

Keselamatan Kebakaran (*Fire Safety*)



Fatma Lestari | Laksita Ri Hastiti | Ike Pujiriani
Deni Andrias | Warid Nurdiansyah | Jefri Chandra
Alfajri Ismail | Ivan Havosan | Ivan Stevanus Chandra
Cynthia Febrina Maharani | Miranda Surya Wardhany
Abdul Kadir | Adis Ardiza Lanin
Debby Paramitasari | Rinaldi Yudha P.



Keselamatan Kebakaran (Fire Safety)

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Laksita Ri Hastiti, S.K.M., M.K.K.K.
Ike Pujiriani, S.K.M., M.K.K.K.
Deni Andrias, S.Kom., M.K.K.K.
Warid Nurdiansyah, S.K.M., M.O.H.S.Sc.
Jefri Chandra, S.T., M.K.K.K.
Dr. Alfajri Ismail, Ms.Si.
Ivan Havosan, S.K.M., M.K.K.K.
Ivan Stevanus Chandra, S.K.M., M.Sc., M.S.
Cynthia Febrina Maharani, S.K.M., M.Sc.
Miranda Surya Wardhany, S.K.M., M.O.H.S.Sc.
Abdul Kadir, S.K.M., M.Sc.
Adis Ardiza Lanin
Debby Paramitasari, S.K.M., M.Dis.Mgt.
Rinaldi Yudha P., S.T.



Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia

Keselamatan Kebakaran (Fire Safety)

Keselamatan Kebakaran (Fire Safety)/Fatma Lestari, dkk.: Ed 1;
Depok: Fakultas Kesehatan Masyarakat, Februari 2021
xxv + 325 ; 17,6 cm x 25 cm

Penulis:

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Laksita Ri Hastiti, S.K.M., M.K.K.K.
Ike Pujiriani, S.K.M., M.K.K.K.
Deni Andrias, S.Kom., M.K.K.K.
Warid Nurdiansyah, S.K.M., M.O.H.S.Sc.
Jefri Chandra, S.T., M.K.K.K.
Dr. Alfajri Ismail, Ms.Si.
Ivan Havosan, S.K.M., M.K.K.K.
Ivan Stevanus Chandra, S.K.M., M.Sc., M.S.
Cynthia Febrina Maharani, S.K.M., M.Sc.
Miranda Surya Wardhany, S.K.M., M.O.H.S.Sc.
Abdul Kadir, S.K.M., M.Sc.
Adis Ardiza Lanin
Debby Paramitasari, S.K.M., M.Dis.Mgt.
Rinaldi Yudha P., S.T.

Desain & Layout:

Pertiwi Panjiasa
Imania Al-Faiza Nurfigni

ISBN 978-623-7768-27-2

Penerbit:

Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia

Redaksi:

Fakultas Kesehatan Masyarakat UI Depok, 16424
Tel +6221 7864975
Fax +6221 7863472
Email: fkmui@ui.ac.id www.fkm.ui.ac.id

© 2021

Hak cipta dilindungi Undang-undang
Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin
tertulis dari Penerbit.



Prakata

Segala puji dan syukur penulis limpahkan kepada Allah swt. atas selesainya penulisan buku ini. Buku ini ditulis dengan tujuan untuk memberikan tambahan pemahaman dan pengetahuan bagi para mahasiswa, praktisi, dan profesional di bidang Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) serta bidang lainnya yang berhubungan dengan manajemen keselamatan kebakaran (*fire safety*).

Tingginya angka kasus kebakaran pada berbagai sektor, seperti pada industri minyak dan gas bumi, petrokimia, kimia, manufaktur, gedung, transportasi, industri makanan, dan perumahan, menunjukkan perlunya pengetahuan dan pemahaman tentang manajemen keselamatan dan konsep dasar api, *fire risk assessment*, *fire modelling* dan *fire protection*, serta *suppression system*. Buku ini disusun guna memberikan pengetahuan dan pemahaman mengenai hal-hal tersebut serta upaya yang dapat dilakukan untuk menurunkan bahaya, risiko, dan dampak akibat kebakaran.

Buku ini tersusun menjadi lima belas bab, meliputi latar belakang permasalahan kebakaran, statistik kebakaran, regulasi dan standar terkait kebakaran, definisi, konsep dasar dan fenomena api, konsep pencegahan kebakaran, toksikologi produk hasil pembakaran, kajian risiko kebakaran (*fire risk assessment*), sistem keselamatan kebakaran, tata cara penyimpanan bahan-bahan yang mudah terbakar, audit keselamatan kebakaran, konsep pemadaman api, dan evakuasi kebakaran. Pelbagai studi kasus dan aplikasi manajemen keselamatan kebakaran seperti untuk gedung, industri minyak dan gas, industri kimia dan manufaktur, serta *fire modelling* juga dibahas dalam buku ini. Berbagai aspek keselamatan kebakaran termuat dalam buku ini. Namun, diharapkan dengan pendekatan yang sederhana, buku ini mudah dipahami oleh para pembacanya dan disertai dengan studi kasus dan contoh aplikasi pada situasi yang sesungguhnya.

Penulis mengucapkan banyak terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang terlibat dalam penulisan buku ini, terkhusus kepada suami, rekan kerja, sekaligus sahabat penulis, Adonis Muzanni, yang

dengan setia selalu mendampingi dan mendorong penulis untuk terus maju dan menyelesaikan penulisan buku ini; kepada sahabat dan rekan kerja penulis yang selalu sabar dan setia membantu penulis selama pengumpulan literatur dan penulisan buku ini, Bapak Muhiddin, Elisa Moetiara, Warid Nurdiansyah, Adis Ardiza Lanin, Hadi Cokro; kepada semua sahabat dan rekan kerja penulis di Departemen K3 FKM UI yang selalu mendorong penulis untuk selalu berkarya dan berprestasi; kepada keluarga penulis tercinta yang selalu sabar memahami semua kesibukan penulis selama proses penulisan buku ini; kepada kedua orang tua penulis, yang memberikan pendidikan dan pemahaman pentingnya kerja keras dan kesabaran untuk menekuni pekerjaan dan profesi; kepada kakak-kakak serta adik penulis yang tercinta, yang selalu mendorong dan memberikan semangat untuk terus berkarya dan berkreasi. Akhirnya, penulis mengucapkan penghargaan dan terima kasih setinggi-tingginya kepada semua pihak serta pihak lain yang tidak dapat disebutkan seluruhnya.

Penulis sadar bahwa buku ini masih jauh dari sempurna, dan masih terdapat pelbagai kekurangan. Untuk itu, penulis sangat memohon umpan balik dan koreksinya guna perbaikan berkelanjutan di kemudian hari.

Penulis,
Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Laksita Ri Hastiti, S.K.M., M.K.K.K.
Ike Pujiriani, S.K.M., M.K.K.K.
Deni Andrias, S.Kom., M.K.K.K.
Warid Nurdiansyah, S.K.M., M.O.H.S.Sc.
Jefri Chandra, S.T., M.K.K.K.
Dr. Alfajri Ismail, Ms.Si.
Ivan Havosan, S.K.M., M.K.K.K.
Ivan Stevanus Chandra, S.K.M., M.Sc., M.S.
Cynthia Febrina Maharani, S.K.M., M.Sc.
Miranda Surya Wardhany, S.K.M., M.O.H.S.Sc.
Abdul Kadir, S.K.M., M.Sc.
Adis Ardiza Lanin
Debby Paramitasari, S.K.M., M.Dis.Mgt.
Rinaldi Yudha P., S.T.



Kata Sambutan

Dekan Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia

Assalammualaikum wr wb,

Salam sejahtera bagi kita semua,

Segala puji dan syukur kita panjatkan kepada Allah SWT atas terbitnya buku Keselamatan Kebakaran karya Prof. Dra. Fatma Lestari, MSi, PhD dan tim. Karya ilmiah ini ditulis oleh dosen Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia (FKMUI) yang mengangkat isu “pencegahan” sebagai satu pilar dari prinsip kesehatan masyarakat.

Seperti diketahui bahwa masalah kesehatan masyarakat di Indonesia masih sangat banyak, beragam, dan menjadi tantangan kita bersama, di antaranya adalah masalah kebakaran yang sangat berdampak bagi kesehatan masyarakat, yang dapat terjadi baik di tempat kerja, industri, transportasi dan rumah tinggal serta wilayah lahan yang luas. Buku ini mengangkat besaran masalah kebakaran di masyarakat, industri, dan tempat kerja. Pembahasan terkait pelbagai permasalahan kebakaran pada gedung, industri dan tempat kerja bertujuan memberikan tambahan pengetahuan yang bermakna bagi mahasiswa, pekerja, praktisi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), akademisi, pemerintah, industri dan masyarakat terkait keselamatan kebakaran.

Terima kasih disampaikan kepada tim penulis yang tidak lelah berjuang bagi peningkatan status kesehatan masyarakat di Indonesia. Semoga buku ini bermanfaat bagi semua pihak, sebagai suatu bentuk kontribusi FKM UI dalam peningkatan pengetahuan tentang kesehatan masyarakat.

Salam veritas, probitas, iustisia.

Dekan Fakultas Kesehatan Masyarakat
Universitas Indonesia
Prof. Dr. dr. Sabarinah Prasetyo, M.Sc.



Kata Sambutan

Kepala Departemen Keselamatan dan
Kesehatan Kerja
Fakultas Kesehatan Masyarakat
Universitas Indonesia

Assalammualaikum wr wb,

Salam sehat & selamat,

Segala puji dan syukur kita panjatkan kepada Allah SWT atas terbitnya buku KeselamatanKebakarankaryaProf.Dra.FatmaLestari,MSi,PhDdantim.Bukuiniditulis oleh dosen Departemen K3 Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia (FKMUI) yaitu Prof Fatma dan Sdri. Laksita Ri Hastiti serta melibatkan alumni K3 kita yang juga praktisi di bidang K3 yaitu Ike Pujiriani, Deni Andrias, Warid Nurdiansyah, Jefri Chandra, Alfajri Ismail, Ivan Havosan, Ivan Stevanus Chandra, Cynthia Febrina M, Miranda Surya W, Abdul Kadir, Adis Ardiza Lanin, Debby Paramitasari dan Rinaldi YudhaP;Buku ini mengangkat permasalahanK3yangsangat pentingyaituKebakaran.

Seperti diketahui bahwa masalah Kebakaran di Indonesia masih sering terjadi, baik di tempat kerja, industri, transportasi dan rumah tinggal. Buku ini membahas permasalahan kebakaran di masyarakat, industri, dan tempat kerja. Pembahasan terkait pelbagai permasalahan kebakaran pada gedung, industri dan tempat kerja bertujuan memberikan informasi dan pengetahuan yang bermakna bagi mahasiswa, pekerja, praktisi Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3), akademisi, pemerintah, industri dan masyarakat terkait keselamatan kebakaran. Terima kasih disampaikan kepada tim penulis yang telah berjuang bagi peningkatan implementasi K3 di Indonesia.

Semoga buku ini bermanfaat bagi semua pihak, sebagai suatu bentuk kontribusi Departemen K3 FKM UI sebagai upaya peningkatan Pencegahan & Proteksi Kebakaran, dan peningkatan Keilmuan K3.

Kepala Departemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja
Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia
Indri Hapsari, S.K.M, M.K.K.K., Ph.D.



Kata Sambutan

Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi
Periode Januari 2015 - Agustus 2017

Industri minyak dan gas bumi (migas) merupakan kegiatan yang mempunyai potensi risiko bahaya yang tinggi, padat modal, berteknologi tinggi, serta membutuhkan sumber daya manusia dengan kompetensi dan kualifikasi khusus. Potensi risiko yang dapat terjadi dalam kegiatan operasi migas antara lain kecelakaan, kebakaran, ledakan, penyakit akibat kerja, dan pencemaran. Keselamatan migas yang terabaikan dapat mengakibatkan kerugian bernilai ekonomi yang besar. Selain itu, *multiplier effects* yang ditimbulkannya dapat berakibat buruk dari aspek sosial, lingkungan, dan lain-lainnya.

Terkait upaya pencegahan kebakaran pada kegiatan usaha migas, peran, dan fungsi manajemen keselamatan kebakaran sungguh sangat strategis. Risiko terjadinya kebakaran yang tinggi menuntut semua *stakeholders* terlibat secara aktif dalam manajemen keselamatan kebakaran mulai dari tahap perancangan, pembangunan/pemasangan, pengoperasian, pemeliharaan dan inspeksi sistem pencegahan dan penanggulangan bahaya kebakaran. Permasalahannya adalah mengapa masih terjadi kebakaran pada kegiatan operasi migas. Salah satu penyebabnya adalah ketidaksesuaian antara rancangan sistem pencegahan dan penanggulangan kebakaran dengan risiko kebakaran yang dihadapi.

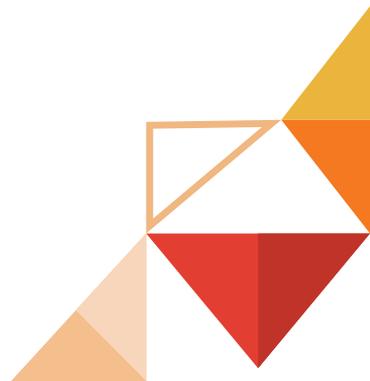
Terbitnya Keselamatan Kebakaran ini dapat menjadi jawaban bagi industri migas untuk mengurangi risiko kebakaran untuk membantu badan usaha dan/atau bentuk usaha tetap dalam merancang, memasang, dan mengoperasikan sistem pencegahan dan penanggulangan kebakaran dengan lebih baik. Buku yang tersusun dalam lima belas bab ini memberikan pengetahuan dan pemahaman tentang manajemen keselamatan serta konsep dasar api, *fire risk assessment*, *fire modelling and protection*, dan *suppression system*. Pengetahuan dan pemahaman tersebut diharapkan mampu menurunkan bahaya, risiko, dan dampak akibat kebakaran.

Kami menyambut baik terbitnya buku Keselamatan Kebakaran yang ditulis oleh Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D. dan rekan-rekan ini. Penulis merupakan akademisi yang memiliki banyak pengalaman dan pengetahuan yang diperoleh baik secara langsung maupun tidak langsung dan saat ini beliau merupakan anggota Tim Independen Pengendalian Keselamatan Migas (TIPKM).

Buku ini tentu sangat bermanfaat bagi para praktisi migas, akademisi, mahasiswa, profesional, dan semua yang mendalami aspek keselamatan. Dalam kegiatan operasi migas, buku ini dapat dijadikan sebagai referensi atau acuan dalam menjalankan kegiatan operasi yang aman berwawasan keselamatan di samping standar-standar dan peraturan yang sudah ada. Semoga kehadiran buku ini dapat membantu upaya kita bersama mewujudkan industri migas yang aman, andal, dan akrab lingkungan.

Jakarta, Maret 2017

Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi
(Periode: Januari 2015 - Agustus 2017),
I.G.N. Wiratmaja Puja





Kata Sambutan

Pendiri dan Ketua Ikatan Ahli Keselamatan
Kerja Indonesia (IAKKI)

Selamat kepada Rekan-rekan yang telah menyelesaikan penulisan buku tentang keselamatan kebakaran ini, yang tentu akan menambah jumlah referensi berbahasa Indonesia tentang serial keselamatan kerja. Kehilangan jiwa yang sia-sia dan aset yang begitu besar, termasuk document penting negara untuk pelayanan *public*, karena abai terhadap faktor keselamatan kebakaran sudah merupakan berita yang sering diunggah di media setiap tahunnya. Kehilangan jiwa dan aset karena kebakaran terjadi tidak hanya di industri, tetapi juga di fasilitas gedung perkantoran, perumahan pribadi, perkampungan, pertokoan, mall, SPBU/E dan bahkan di jalan raya perkebunan dan kehutanan.

Selain memusnahkan jiwa dan harta benda atau aset, kebakaran secara cepat juga menimbulkan dampak kesehatan pada ribuan manusia dan terganggunya aktivitas sehari-hari dalam lingkungan bisnis, sekolah, perkantoran, dan lain-lain. Belum lagi dampak psikososial, terhadap masyarakat, seperti dari anak-anak, keluarga yang kehilangan harapan karena orang tua mereka meninggal karena kebakaran. Permasalahan sederhana seperti akibat kecerobohan dan rendahnya pengetahuan dan kesadaran sering kali menjadi faktor pemicu kebakaran, namun mengakibatkan dampak kerugian yang kompleks, termasuk kemanusiaan yang tidak bisa diabaikan begitu saja.

Buku Keselamatan Kebakaran ini merangkum berbagai referensi dan dituliskan kembali secara ringkas, sistematis, agar mudah dimengerti dan diaplikasikan dalam keseharian, untuk memberdayakan sumber daya manusia Indonesia di semua bidang sehingga dapat meningkatkan pencegahan bahaya kebakaran.

Jika setiap orang Indonesia, memiliki, membaca dan mengaplikasikan apa yang ditulis dalam buku ini, niscaya dapat memberikan wawasan baru, nilai tambah, kesadaran dan bahkan memberikan pengaruh dalam lingkup kendalinya untuk mencegah hal yang tidak diinginkan di atas, termasuk penghematan potensi sumber daya bangsa ini.

Praktisi Senior K3,
Sekretaris DK3N 2012–2015,
Pendiri & Ketua harian IAKKI.
Ir. Satrio Pratomo M.App.Sc.



Kata Sambutan

Kepala Dinas Penanggulangan Kebakaran dan Penyelamatan Pemerintah Daerah Provinsi DKI Jakarta

Puji Syukur kepada Allah SWT Tuhan YME dengan terbitnya buku Keselamatan Kebakaran ini saya ucapkan selamat kepada Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D. beserta seluruh pendukung penulis yang berbahagia, berikut kami sangat menyambut baik kehadiran buku ini yang tentunya akan sangat bermanfaat untuk seluruh masyarakat dan khususnya kami sebagai praktisi sekaligus penyelenggara pelayanan publik urusan pengendalian kebakaran Pemerintah Daerah Provinsi DKI Jakarta telah mendapatkan tambahan referensi penting yang dapat memudahkan kami dalam merumuskan program dan kebijakan-kebijakan strategis tepat sasaran untuk dapat mengatasi masalah kebakaran perkotaan diwilayah Provinsi DKI Jakarta dengan beragam kompleksitas objek-objek potensi risiko kebakaran didalamnya.

Semoga dengan hadirnya buku Keselamatan Kebakaran berikut ini akan memberikan kemudahan-kemudahan dalam mendapatkan pengertian dan pemahaman kepada seluruh pelaku kepentingan penyelenggara keselamatan kebakaran diseluruh wilayah Provinsi DKI Jakarta sehingga kesadaran dan kepedulian dapat menjadi peran tanggung jawab bersama untuk melakukan pencegahan dan mengendalikan dampak risiko kebakaran dimasyarakat hingga dapat terciptanya situasi dan kondisi yang menghadirkan rasa aman seluruh warga masyarakat DKI Jakarta dari bahaya risiko kebakaran sesuai dengan sasaran tujuan layanan publik instansi kami.

Sebagai Kepala Dinas Penanggulangan Kebakaran dan Penyelamatan Provinsi DKI Jakarta mewakili Pemerintah Daerah dan segenap warga masyarakat DKI Jakarta yang mendapat manfaat dari buku ini mengucapkan terima kasih dan semangat terus melahirkan karya-karya buku berikutnya terkait ilmu pengetahuan tentang kebakaran khususnya, semoga diberkahi Tuhan YME kelancaran dan kesuksesan, Amien.

Kepala Dinas Penanggulangan Kebakaran dan Penyelamatan Pemerintah
Daerah Provinsi DKI Jakarta,
Drs. Satriadi Gunawan, M.Si.



Kata Sambutan



**Kepala Dinas Penanggulangan Kebakaran
dan Penyelamatan Provinsi DKI Jakarta/
Ketua Umum APKARI
(Asosiasi Pemadam Kebakaran Indonesia)
Periode Februari 2012 - Februari 2020**

Selamat dan sukses kepada Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si, Ph.D dan rekan-rekan tim yang telah menyelesaikan buku mengenai keselamatan kebakaran ini, yang tentunya sangat bermanfaat sebagai referensi berbagai keperluan, antara lain sebagai upaya mencegah kebakaran guna mewujudkan keselamatan kebakaran, untuk merumuskan kebijakan dan/atau regulasi yang relevan, dan sebagai upaya Pengurangan Risiko Bencana (PRB) kebakaran.

Kebakaran merupakan salah satu masalah terbesar di Indonesia. Kejadian kebakaran menimbulkan risiko (kerugian) yang cukup signifikan, di antaranya korban jiwa dan harta benda/property, rusaknya stabilitas sosial ekonomi masyarakat, karena kehilangan tempat tinggal/tempat berusaha/bekerja hingga berdampak pada risiko kerugian kesehatan dan kerusakan lingkungan. Sering kali terdengar bahwa kejadian kebakaran disebabkan oleh hal-hal kecil yang tidak kita sadari atau karena kecerobohan/kelalaian seperti penggunaan peralatan listrik yang tidak standar, pemanfaatan listrik yang kurang bijak ataupun pembiaran tumpahan bahan mampu bakar.

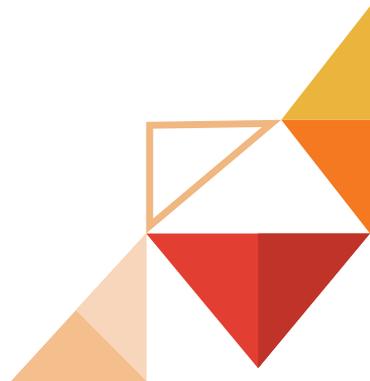
Mengingat kondisi tersebut, sangat dibutuhkan adanya buku/sumber referensi tentang keselamatan kebakaran yang mudah dipahami dan diaplikasikan oleh masyarakat, tentang ilmu pengetahuan dan teknologi sederhana dalam upaya pencegahan kebakaran, tentang pengetahuan evakuasi kebakaran, tentang referensi regulasi nasional dan internasional, beserta berbagai studi kasus kejadian kebakaran yang sangat dibutuhkan masyarakat.

Buku Keselamatan Kebakaran yang ditulis oleh Prof. Dra Fatma Lestari, M.Si., Ph. D beserta tim disajikan dengan sangat baik, ringkas, mudah dimengerti, dan mudah

diaplikasikan sehingga dapat menjadi pedoman masyarakat dalam menanggulangi bahaya kebakaran.

Wassalam,

Kepala Dinas Penanggulangan Kebakaran dan
Penyelamatan Provinsi DKI Jakarta/
Ketua Umum APKARI
(Periode Februari 2012 - Februari 2020),
Dr. Subejo, SH., M.Si





Kata Sambutan



Direktur Teknik dan Lingkungan Mineral dan Batubara/Kepala Inspektur Tambang

Selamat kepada Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D. dan rekan-rekan yang telah menulis dan menuntaskan buku mengenai keselamatan kebakaran ini. Buku ini tentunya bukan hanya bermanfaat bagi dunia keselamatan dan kesehatan kerja secara umum, tetapi juga dapat menjadi salah satu referensi bagi pengelolaan keselamatan pertambangan pada pertambangan mineral dan batubara.

Pertambangan mineral dan batubara merupakan industri yang padat modal, padat teknologi, dan memiliki risiko yang besar. Salah satu risiko yang ada adalah kebakaran. Oleh karena itu, Keputusan Direktur Jenderal Mineral dan Batubara nomor 185.K/37.04/DJB/2019 tentang Petunjuk Teknis Pelaksanaan Keselamatan Pertambangan dan Pelaksanaan, Penilaian, dan Pelaporan Sistem Manajemen Keselamatan Pertambangan mengatur secara khusus mengenai pencegahan dan pengendalian kebakaran, baik di tambang permukaan, tambang bawah tanah, maupun fasilitas penunjang kegiatan operasional pertambangan.

Kami menyadari bahwa upaya pencegahan dan pengendalian kebakaran pada pertambangan mineral dan batubara masih harus ditingkatkan. Kebakaran di pertambangan mineral dan batubara pernah terjadi beberapa kali. Salah satu peristiwa kebakaran yang baru saja terjadi adalah kebakaran lubang tambang batubara di salah satu Izin Usaha Pertambangan (IUP) yang berada di Kota Sawahlunto, Sumatera Barat, pada tanggal 29 Maret 2017. Kebakaran tersebut bukan hanya mengakibatkan kerugian materi dan terhentinya aktivitas penambangan, tetapi juga mengakibatkan satu pekerja meninggal dunia. Oleh karena itu, penerbitan buku ini sangat membantu kami dalam upaya meningkatkan pengelolaan keselamatan pertambangan terkait pencegahan dan pengendalian kebakaran.

Buku *Keselamatan Kebakaran* ini ditulis dengan begitu sistematis dan mudah dimengerti serta dapat diaplikasikan dalam pencegahan dan pengendalian kebakaran pada pertambangan mineral dan batubara.

Buku ini bukan hanya membahas teori kebakaran, tetapi juga memberikan contoh kasus dan panduan praktis dalam pencegahan dan pengendalian kebakaran

Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi semua pihak, baik untuk akademisi maupun praktisi. Semoga tidak terjadi lagi kasus kebakaran di pertambangan mineral dan batubara pada masa yang akan datang.

Jakarta, Januari 2021

Direktur Teknik dan Lingkungan/
Kepala Inspektur Tambang
Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara
Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral,
Dr. Lana Saria, M.Si



DAFTAR ISI

Prakata	iii
Kata Sambutan Dekan Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia	v
Kata Sambutan Kepala Departemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia	vi
Kata Sambutan Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi (Periode Januari 2015 - Agustus 2017)	vii
Kata Sambutan Pendiri dan Ketua Ikatan Ahli Keselamatan Kerja Indonesia (IAKKI)	ix
Kata Sambutan Kepala Dinas Penanggulangan Kebakaran dan Penyelamatan Pemerintah Daerah Provinsi DKI Jakarta	x
Kata Sambutan Kepala Dinas Penanggulangan Kebakaran dan Penyelamatan Provinsi DKI Jakarta/Ketua Umum APKARI (Periode Februari 2012 - Februari 2020)	xi
Kata Sambutan Direktur Teknik dan Lingkungan Mineral dan Batubara/ Kepala Inspektur Tambang	xiii
Daftar Isi	xv
Daftar Gambar	xx
Daftar Tabel	xxiv

BAB 1

PERMASALAHAN DAN STATISTIK KEBAKARAN	1
Tujuan Instruksional Khusus	2
Permasalahan Kebakaran	2
Statistik Kebakaran Dunia	2
Statistik Kebakaran di Indonesia	5
Statistik Kebakaran di Amerika Serikat	7

BAB 2

REGULASI KESEHATAN DAN KESELAMATAN KERJA (K3) DAN KESELAMATAN KEBAKARAN	11
Tujuan Instruksional Khusus	12
Regulasi	12
Peraturan Pemerintah dan Keputusan Presiden Terkait K3	13

Peraturan Menteri dan Keputusan Menteri	14
Instruksi dan Surat Edaran Terkait K3	20
Regulasi dan Standar Keselamatan Kebakaran di Indonesia	22
Standar Internasional Keselamatan Kebakaran	28
Regulasi K3 dan Keselamatan Kebakaran di Inggris	43
<i>International Building Code</i>	47
Bahaya Kebakaran pada Gedung Bertingkat	52
<i>Computerized Fire Safety Evaluation System</i>	53
BAB 3	
PRINSIP DASAR API DAN KEBAKARAN	55
Tujuan Instruksional Khusus	56
Pendahuluan	56
Definisi Api	56
Teori Api	56
Klasifikasi Kebakaran	69
Konsep Kimiawi dalam Kebakaran	71
Proses Perpindahan Panas (<i>Heat Transfer</i>)	84
BAB 4	
JENIS KEBAKARAN DI INDUSTRI KIMIA, MINYAK, DAN GAS BUMI	88
Tujuan Instruksional Khusus	89
Pendahuluan	89
Tipe Kebakaran	89
Potensi Bahaya akibat Lepasnya Gas atau Cairan yang Mudah Terbakar	92
BAB 5	
TOKSIKOLOGI PRODUK PEMBAKARAN	95
Tujuan Instruksional Khusus	96
Toksikologi Asap dan Gas Produk Hasil Pembakaran	96
Gas Aspisian (<i>Asphyxiant Gases</i>)	99
Iritan	100
Karbon Dioksida	102
Ketidakcukupan Oksigen (<i>Insufficient Oxygen</i>)	102
Radikal Bebas	103
Partikulat	103
Toksitas Campuran Kompleks Hasil Pembakaran	104
BAB 6	
KAJIAN RISIKO KEBAKARAN	105
Tujuan Instruksional Khusus	106
Pendahuluan	106
Definisi	106
Gambaran Umum Kajian Risiko Kebakaran	107

Metodologi Kajian Risiko Kebakaran	108
Dasar-dasar Penilaian Risiko	110
Informasi Proses	128
Identifikasi Bahaya Kebakaran	128
Analisis Bahaya Kebakaran	129
Keberlanjutan Program	137
BAB 7	
SISTEM MANAJEMEN KESELAMATAN KEBAKARAN	139
Tujuan Instruksional Khusus	140
Tujuan <i>Fire Safety</i>	140
Konsep <i>Fire Safety</i>	140
BAB 8	
PEMODELAN KOMPUTER UNTUK KEBAKARAN	143
Tujuan Instruksional Khusus	144
Pendahuluan	144
Penggunaan Model Komputer	144
Simulasi Kebakaran Kompartemen (<i>Compartment Fire Simulations</i>)	145
<i>Egress/Evacuation Models</i>	148
<i>Smoke Movement Models</i>	149
<i>Thermal/Structural Response Models</i>	149
<i>Conglomerate/Miscellaneous Fire Models</i>	150
Pemodelan Kebakaran Untuk Industri Petrokimia	151
BAB 9	
EVAKUASI KEBAKARAN	154
Tujuan Instruksional Khusus	155
Pendahuluan	155
Metode Evakuasi Penyelamatan	155
Dasar Desain Teknik untuk Rute Evakuasi	155
Komponen Waktu Evakuasi	166
Simulasi Komputer dan Model Jalan Keluar	167
Sejarah Pemodelan Evakuasi	169
Pemodelan Evakuasi Kebakaran	172
Pemodelan Komputer	172
Evacnet	173
Sistem Deteksi dan Jalur Evakuasi	178
BAB 10	
DASAR-DASAR SISTEM PROTEKSI KEBAKARAN	181
Tujuan Instruksional Khusus	182
Pendahuluan	182
Kriteria Desain Umum	182

Proteksi Aktif	183
Proteksi Pasif	186
BAB 11	
IMPLEMENTASI DAN EVALUASI KESELAMATAN KEBAKARAN GEDUNG	188
Tujuan Instruksional Khusus	189
Konstruksi Gedung	189
Pemisahan Bahaya	192
Bukaan Vertikal	193
<i>Sprinkler</i>	194
Sistem Alarm Kebakaran	196
Pendeteksi Asap	196
<i>Interior Finish</i>	197
Pengendalian Asap	198
Akses Keluar	199
Jalur Evakuasi	201
Koridor/Kompartemen	201
Program Tanggap Darurat	202
BAB 12	
STUDI KASUS KESELAMATAN KEBAKARAN DI INDUSTRI	204
Tujuan Instruksional Khusus	205
Keselamatan Kebakaran pada Transportasi Bahan Kimia Berbahaya	205
Manajemen Risiko Transportasi	207
Tujuan Manajemen Risiko Transportasi	208
Kerangka Manajemen Risiko Transportasi	208
Sistem Manajemen Utama	210
Analisis Konsekuensi: Simulasi Kebakaran dan Ledakan	210
BAB 13	
STUDI KASUS KEBAKARAN DI TAMBANG BAWAH TANAH	230
Tujuan Instruksional Khusus	231
Pendahuluan	231
Statistik Kebakaran pada Tambang Bawah Tanah	231
Kejadian Berbahaya dan Kecelakaan Tambang pada Tambang Bawah Tanah	232
Pentingnya Komitmen Perusahaan terhadap Keselamatan Pertambangan	236
Hal-hal dalam Pemenuhan, Penerapan, dan Penanggulangan Kejadian Kebakaran pada Tambang Bawah Tanah	237

BAB 14

SISTEM PROTEKSI DAN PENCEGAHAN KEBAKARAN PADA INDUSTRI MINYAK DAN GAS BUMI	241
Tujuan Instruksional Khusus	242
Pendahuluan	242
Sistem Pencegahan Kebakaran	243
Sistem Proteksi Aktif	246
Sistem Pompa Pemadam Kebakaran	252
Sistem Proteksi Pasif	254

BAB 15

SISTEM PENCEGAHAN DAN PROTEKSI KEBAKARAN PADA INDUSTRI KIMIA	259
Tujuan Instruksional Khusus	260
Pendahuluan	260
Klasifikasi Bahan Kimia Berbahaya	261
Bahan Kimia yang Bersifat Tidak Stabil	269
Bahan Kimia Reaktif	269
Oksidator	273
Bahan-bahan Kimia yang Inkompatibel	273
Faktor Utama Penyebab terjadinya Kebakaran pada Industri Kimia	275
Sumber Bahaya Kebakaran pada Industri Kimia	277
Program Pencegahan dan Proteksi Kebakaran Industri Kimia	286
Glosarium	315
Daftar Pustaka	319

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Grafik Statistik Kebakaran DKI Jakarta 2003–2016	5
Gambar 1.2	Grafik Statistik Kebakaran Berdasarkan Penyebab di DKI Jakarta	7
Gambar 1.3	Grafik Statistik Kebakaran di Amerika Serikat	9
Gambar 1.4	Grafik Penyebab Kebakaran di Amerika Serikat Tahun 2006–2010	10
Gambar 2.1	Fungsi NFPA	29
Gambar 2.2	Hierarki Legislasi dan Regulasi di Inggris dalam <i>Introduction to Fire Safety Management</i> , 1974.	44
Gambar 2.3	<i>Health and Safety at Work etc. Act</i> 1974	45
Gambar 2.4	Contoh <i>Approved Code of Practice Health and Safety HSC</i> 13	46
Gambar 2.5	<i>International Building Code</i> (International Code Council, 2012)	47
Gambar 2.6	<i>Building Code Australia</i> , 2009	48
Gambar 2.7	<i>Fire Safety Order England</i> , 2005	50
Gambar 2.8	<i>BOCA National Building Code</i> , 1990	51
Gambar 2.9	<i>New Zealand Building Code</i> , 2014	52
Gambar 3.1	Segitiga Api (<i>Fire Triangle</i>)	57
Gambar 3.2	Teori Tetrahedron Api	58
Gambar 3.3	Gambar Reaksi Pembakaran	59
Gambar 3.4	Siklus Api	61
Gambar 3.5	Skema Siklus Api	61
Gambar 3.6	Simbol Gas Mudah Terbakar	67
Gambar 3.7	Simbol Cairan Mudah Terbakar	67
Gambar 3.8	Simbol Padatan Mudah Terbakar	67
Gambar 3.9	Simbol Oksidator	68
Gambar 3.10	Tekanan Uap dan Pergerakan Atom dan Molekul	73
Gambar 3.11	Ilustrasi Kebocoran Gas Metana dan Hidrogen Sulfida	73
Gambar 3.12	Perbedaan Sistem Klasifikasi Bahan Mudah Terbakar	75
Gambar 3.13	Tingkat Kemudahan Terbakar (<i>Flammability</i>)	76
Gambar 3.14	Ilustrasi Batas Nyala Bawah dan Batas Nyala Atas	78
Gambar 3.15	Diagram Batas Nyala	80
Gambar 3.16	Hubungan antara Tekanan Uap, Batas Nyala, Titik Nyala, dan Temperatur Autoignisi	82
Gambar 3.17	Proses Perpindahan Panas	85
Gambar 3.18	Proses Perpindahan Panas melalui Mekanisme Konduksi (Pipa Baja)	85
Gambar 3.19	Proses Perpindahan Panas Konveksi	86
Gambar 3.20	Proses Perpindahan Panas Radiasi	87

Gambar 4.1	<i>Horizontal Jet Fire</i>	90
Gambar 4.3	<i>Running Liquid Fire</i>	91
Gambar 4.2	<i>Pool Fire</i>	91
Gambar 4.4	<i>Fire Ball</i>	92
Gambar 4.5	Pohon Kejadian Pelepasan Gas (<i>Gas Release</i>)	93
Gambar 4.6	Pohon Kejadian Pelepasan Cairan (<i>Liquid Release</i>)	94
Gambar 6.1	Metodologi Kajian Risiko Kebakaran	109
Gambar 6.2	<i>Five Steps to Risk Assessment</i> dari HSE UK	111
Gambar 6.3	Skema Perhitungan F&EI	113
Gambar 6.4	Pendekatan Penilaian Risiko	117
Gambar 6.5	Proses Penilaian Risiko Berdasarkan Skenario	117
Gambar 6.6	Sumber Data dalam Penilaian Risiko Kuantitatif Estimasi Frekuensi/Probabilitas	119
Gambar 6.7	Contoh <i>Event Tree Analysis</i>	121
Gambar 6.8	Prosedur Analisis Konsekuensi Individual Risk	124
Gambar 6.9	Contoh Kriteria Risiko Individu	125
Gambar 6.10	Kriteria Risiko	126
Gambar 6.11	Posisi ALARP Berdasarkan <i>Magnitude of Risk</i>	127
Gambar 6.12	<i>Wind Rose</i>	134
Gambar 7.1	Diagram Komponen-komponen Strategi <i>Fire Safety</i>	142
Gambar 9.1	Desain Teknis Spesifik Rute Evakuasi	157
Gambar 9.2	Grafik Kecepatan Evakuasi untuk Perhitungan Jalur Keluar (<i>Egress</i>)	163
Gambar 9.3	Grafik <i>Specific Flow</i>	163
Gambar 9.4	Jaringan Model Node dalam Evacnet	174
Gambar 9.5	Gambar Simbol Model dalam Evacnet	176
Gambar 9.6	Contoh <i>Building Layout (Node Specification)</i>	177
Gambar 9.7	<i>Network Model</i>	178
Gambar 9.8	<i>Safety Margin</i>	179
Gambar 9.9	Sistem Peralatan untuk Pencegahan dan Perlindungan terhadap Kebakaran	180
Gambar 12.1	Alur Aktivitas Transportasi Bahan Kimia Berbahaya	207
Gambar 12.2	TMR Framework	209
Gambar 12.3	Tangki Propana Milik Herrig Brothers yang Terbakar dan Meledak di Iowa, Amerika Serikat, Tahun 1998	211
Gambar 12.4	Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki Propana Horizontal dalam Bentuk Peta	213
Gambar 12.5	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Propana Horizontal dalam Bentuk Peta (<i>Surface Explosion Overpressure</i>)	214

Gambar 12.6	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Propana Horizontal dalam Bentuk Peta (<i>Free Air Explosion Overpressure</i>)	214
Gambar 12.7	Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki Butana Horizontal dalam Bentuk Peta	215
Gambar 12.8	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Butana Horizontal dalam Bentuk Peta (<i>Surface Explosion Overpressure</i>)	216
Gambar 12.9	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Butana Horizontal dalam Bentuk Peta (<i>Free Air Explosion Overpressure</i>)	217
Gambar 12.10	Tangki Sferikal	218
Gambar 12.11	Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki Propana <i>Spherical</i> dalam Bentuk Peta	219
Gambar 12.12	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Propana Sferikal dalam Bentuk Peta (<i>Surface Explosion Overpressure</i>)	220
Gambar 12.13	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Propana Sferikal dalam Bentuk Peta (<i>Free Air Explosion Overpressure</i>)	220
Gambar 12.14	Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki Butana Sferikal dalam Bentuk Peta	221
Gambar 12.15	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Butana Sferikal dalam Bentuk Peta (<i>Surface Explosion Overpressure</i>)	222
Gambar 12.16	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Butana Sferikal dalam Bentuk Peta (<i>Free Air Explosion Overpressure</i>)	223
Gambar 12.17	Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki LPG Propana 3 Kg dalam Bentuk Map	225
Gambar 12.18	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan LPG Propana 3 Kg dalam Bentuk Peta (<i>Surface Explosion Overpressure</i>)	226
Gambar 12.19	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan LPG Propana 3 Kg dalam Bentuk Peta (<i>Free Air Explosion Overpressure</i>)	226
Gambar 12.20	Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki LPG Butana 3 Kg dalam Bentuk Peta	227
Gambar 12.21	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan LPG	

	Butana 3 Kg dalam Bentuk Peta (<i>Surface Explosion Overpressure</i>)	228
Gambar 12.22	Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan LPG Butana 3 Kg dalam Bentuk Peta (<i>Free Air Explosion Overpressure</i>)	229
Gambar 13.1	Penyebab Kecelakaan Tambang pada Tambang Bawah Tanah	232
Gambar 13.2	Lokasi Kejadian Ledakan pada Tambang Bawah Tanah Tahun 2009 di Sawahlunto	233
Gambar 13.3	Lokasi Kejadian Ledakan pada Tambang Bawah Tanah Tahun 2014 di Sawahlunto	234
Gambar 14.1	Perbandingan Sistem Divisi dan Zona	244
Gambar 14.2	Mekanisme Operasi Sistem CO ₂	250
Gambar 14.3	Grafik Faktor Konversi Material	251
Gambar 14.4	Bagian-bagian Pompa Pemadam Horizontal	252
Gambar 14.5	Bagian-bagian Pompa Pemadam Vertikal	253
Gambar 14.6	Kurva Performa Pemadam Kebakaran	254
Gambar 14.7	Jarak antara Remote Impounding dengan Tangki dan Fasilitas Lainnya	254
Gambar 14.8	Rekomendasi Jarak Antarunit (1) (<i>Industrial Risk Insurance</i>)	256
Gambar 14.9	Rekomendasi Jarak Antarunit (2)	257
Gambar 14.10	Rekomendasi Jarak Antarunit untuk Tangki Penyimpanan	257
Gambar 15.1	<i>Material Safety Data Sheet</i> atau <i>Safety Data Sheets</i>	260
Gambar 15.2	<i>Globally Harmonized System (GHS)</i>	264
Gambar 15.3	Piktogram Bahaya GHS	266
Gambar 15.4	<i>NFPA Hazard Code</i>	269
Gambar 15.5	Tiga Faktor Utama Penyebab Kecelakaan Bahan Kimia pada Industri Kimia Hilir	276
Gambar 15.6	Daerah Bisa-Terbakar (<i>Flammable Range</i>)	279
Gambar 15.7	Karburator Mobil Tempat Pembakaran Bahan Bakar	279
Gambar 15.8	Skrining Faktor Pemicu Bahaya Reaktivitas Kimia	285
Gambar 15.9	Hubungan Kajian Risiko Kebakaran dan Ledakan (<i>Fire and Explosion Risk Assessment</i>) dengan Studi-studi Lainnya	300
Gambar 15.10	Contoh Ketiga <i>Equipment</i>	303
Gambar 15.11	Alur Konsep Sistem Retensi Air Pemadam Kebakaran pada Industri Kimia	309

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Biaya Kerugian akibat Kebakaran Dunia	3
Tabel 1.2	Korban Jiwa akibat Kebakaran di Dunia	3
Tabel 1.3	Statistik Kebakaran di DKI Jakarta	6
Tabel 1.4	Statistik Kebakaran di Amerika Serikat	7
Tabel 2.1	Undang-Undang Terkait Keselamatan dan Kesehatan Kerja	12
Tabel 2.2	Peraturan Pemerintah dan Keputusan Presiden Terkait K3	13
Tabel 2.3	Peraturan Menteri dan Keputusan Menteri Terkait K3	14
Tabel 2.4	Instruksi dan Surat Edaran Terkait K3	20
Tabel 2.5	Regulasi Terkait Keselamatan Kebakaran di Indonesia	22
Tabel 2.6	Daftar Standar Nasional Indonesia (SNI) Terkait Kebakaran	24
Tabel 2.7	Daftar NFPA Standar	29
Tabel 3.1	Sumber-sumber Penyalaan (Ignisi)	62
Tabel 3.2	Sumber-sumber Pengapian	63
Tabel 3.3	Sumber-sumber Bahan Bakar Berdasarkan Sifat Fisiknya	66
Tabel 3.4	Sumber Bahan Bakar Berdasarkan Sifat Kimiawinya	67
Tabel 3.5	Klasifikasi Api Berdasarkan Sumber Bahan Bakarnya (NFPA 10)	69
Tabel 3.6	Klasifikasi Kebakaran Berdasarkan Sistem Eropa	70
Tabel 3.7	Klasifikasi Kebakaran di Indonesia	70
Tabel 3.8	Kerapatan Uap Bahan Bakar	72
Tabel 3.9	Titik Nyala Cairan	74
Tabel 3.10	Informasi Sifat Fisik dan Kimiawi Terkait Kebakaran	76
Tabel 3.11	Batas Nyala Beberapa Bahan Bakar	78
Tabel 3.12	Contoh Perhitungan Konsentrasi Batas Nyala Campuran	79
Tabel 3.13	Contoh Perhitungan Batas Nyala Campuran Gas	81
Tabel 3.14	Temperatur Autoignisi Beberapa Bahan Bakar	82
Tabel 3.15	Panas Pembakaran pada Beberapa Bahan Bakar	83
Tabel 3.16	Nilai Energi Minimum Ignisi	83
Tabel 5.1	Efek Toksisitas Pelbagai Gas Hasil Pembakaran	97
Tabel 5.2	Efek Iritan Produk Hasil Pembakaran terhadap Sensori dan Pernapasan	101
Tabel 5.3	Konsentrasi Iritan	102
Tabel 5.4	Konsentrasi Oksigen dan Gejala yang Ditimbulkan	103
Tabel 6.1	Klasifikasi Tingkat Bahaya Berdasarkan F&EI	115
Tabel 6.2	Metode Identifikasi Bahaya	129
Tabel 6.3	Probabilitas Ignisi Generik	133
Tabel 6.4	<i>Failure Rate Data</i>	135

Tabel 9.1	Aktivitas, Kepadatan Penghuni, dan Kecepatan Pergerakan Maksimum pada Tempat Umum	158
Tabel 10.1	Jenis-jenis Pemadam Api dan Aplikasinya	184
Tabel 10.2	Contoh Alat Pemadam Api Ringan (<i>Fire Protection Agency - Australia</i>)	185
Tabel 11.1	Tingkat Ketahanan Api pada Tipe Konstruksi	191
Tabel 11.2	Tingkat Defisiensi pada Area Berbahaya	193
Tabel 11.3	Warna pada Gelas Kaca <i>Sprinkler</i>	195
Tabel 11.4	Klasifikasi Material Interior Dinding dan Plafon	198
Tabel 12.1	Karakteristik Propana dan Butana	212
Tabel 15.1	Tabel Perbedaan Penetapan Kategori Toksisitas Oral Akut	262
Tabel 15.2	Klasifikasi Bahaya Berdasarkan GHS dan Peraturan Menteri Perindustrian RI	264
Tabel 15.3	Bahan Kimia Sensitif terhadap Air	270
Tabel 15.4	Reaksi Senyawaan Hidrida terhadap Udara Lembap atau Air	272
Tabel 15.5	Tabel Inkompatibilitas Bahan-bahan Kimia Berdasarkan Klasifikasi Kelompoknya	273
Tabel 15.6	Titik Nyala Beberapa Bahan Kimia	278
Tabel 15.7	Daerah Bisa-Terbakar Beberapa Bahan Kimia	280
Tabel 15.8	Perhitungan Luas Area Potensi Kebakaran yang Akan Diproteksi	303
Tabel 15.9	Aplikasi Sistem Penyemprotan Air <i>Fixed</i> dalam Proteksi Kebakaran pada Industri Petroleum dan Petrokimia-API RP 2030 Edisi Ke-3, Juli 2015	304
Tabel 15.9	Tingkat Aplikasi Penyemprotan Air pada Area Permukaan yang Terekspose Api	304
Tabel 15.10	Perhitungan Dasar Kebutuhan Air untuk Sistem Pemadaman Kebakaran	306
Tabel 15.11	Probabilitas Terjadinya Kebakaran di Area Industri Kimia	310
Tabel 15.12	Dampak Lingkungan dari Air Pemadaman terhadap Sistem Pengelolaan Limbah dan Pihak Eksternal dari Area Kerja	311
Tabel 15.13	Penentuan Risiko Total pada Penentuan Dampak Lingkungan dari Air Pemadaman	312
Tabel 15.14	Mitigasi Risiko untuk Sistem Retensi Kebakaran pada Industri Kimia	312



BAB 1

PERMASALAHAN DAN STATISTIK KEBAKARAN

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Warid Nurdiansyah, S.K.M., M.O.H.S.Sc.
Abdul Kadir, S.K.M., M.Sc.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Dalam bab ini pembaca dapat memahami tentang permasalahan kebakaran, statistik kebakaran, baik di Indonesia maupun luar negeri seperti statistik kebakaran dunia dan Amerika Serikat.

PERMASALAHAN KEBAKARAN

Permasalahan kebakaran saat ini merupakan permasalahan yang sering dihadapi baik di Indonesia maupun belahan dunia lainnya. Perkembangan modernisasi kehidupan saat ini pada masyarakat urban perkotaan meningkatkan risiko kebakaran. Dampak perubahan global mengakibatkan kehidupan masyarakat menjadi lebih rentan terhadap permasalahan kebakaran. Pelbagai permasalahan terkait kebakaran terjadi pada pelbagai sektor, misalnya pada gedung bertingkat, rumah sakit, gedung sekolah, pusat pendidikan, pusat perbelanjaan, dan sarana umum lainnya. Perkembangan industrialisasi juga meningkatkan risiko kebakaran, khususnya kebakaran pada pelbagai industri dan sektor seperti minyak dan gas bumi, manufaktur, kimia, serta transportasi.

Kerugian yang diakibatkan oleh kebakaran meliputi:

- Kerugian jiwa (kematian dan luka-luka);
- Kerugian dalam bentuk kesehatan (perawatan kesehatan, dampak terhadap kesehatan akibat kebakaran);
- Kerugian aset (uang, properti);
- Kerugian gedung, peralatan, material, produk;
- Terhentinya proses produksi dan kegiatan kerja;
- Pencemaran lingkungan; serta
- Dampak sosial dan reputasi (*image*).

STATISTIK KEBAKARAN DUNIA

Data dari The International Association for the Study of Insurance Economics atau yang dikenal dengan The Geneva Association menunjukkan bahwa kerugian akibat kebakaran di banyak negara maju di dunia berkisar 0,05–0,22% dari GDP (*Gross Domestic Product*) (World Fire Statistics, 2011). Biaya kerugian akibat kebakaran di seluruh dunia disajikan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Biaya Kerugian akibat Kebakaran Dunia

Negara	Mata Uang	Kerugian			Kerugian dibandingkan % GDP 2006-2008
		2006	2007	2008	
Singapura	S \$	125	110	110	0,05
Slovenia	SIT				0,07 (2002-2004)
Australia	AU \$	806	885	990	0,08
Republik Ceko	Kc	2200	2450	3700	0,08
Spanyol	€			910	0,08 (2008)
Polandia	Zl	750	920	1450	0,09
Selandia Baru	NZ \$	165	180		0,11 (2005-2007)
Amerika Serikat	US \$	13000	16500	17500	0,11
Jepang	¥	625	600	605	0,12
Jerman	€	3300	2950	2850	0,13
Inggris	£	1650	1700	1900	0,13
Belanda	€	746	900	1050	0,16
Finlandia	€	260	315	305	0,17
Italia	€	2200	2500	3150	0,17
Swedia	kr	4300	5400	5950	0,17
Denmark	kr	3000	4050		0,20 (2005-2007)
Prancis	€	3300	3400	4550	0,20
Norwegia	kr				0,22 (2003-2005)

*Nilai kerugian dalam juta, kecuali Jepang dalam miliar.

(Sumber: World Fire Statistic, Geneva Association Information Newsletter, Oktober 2011)

Korban jiwa akibat kebakaran pada pelbagai negara di dunia dapat dinyatakan dalam satuan korban jiwa per 100.000 populasi. Indeks terendah adalah 0,04, yaitu Singapura dan tertinggi adalah 6,59 di Belarusia. Statistik korban jiwa akibat kebakaran pada pelbagai negara di seluruh dunia disajikan pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Korban Jiwa akibat Kebakaran di Dunia

Negara	Korban Jiwa					Rata-Rata Korban Jiwa Per 100.000 Penduduk (2013-2017)
	2013	2014	2015	2016	2017	
India	22.177	19.513	17.700			1,56
Amerika Serikat	3.420	3.275	3.280	3.390	3.400	1,02
Bangladesh	161	70	68			0,06

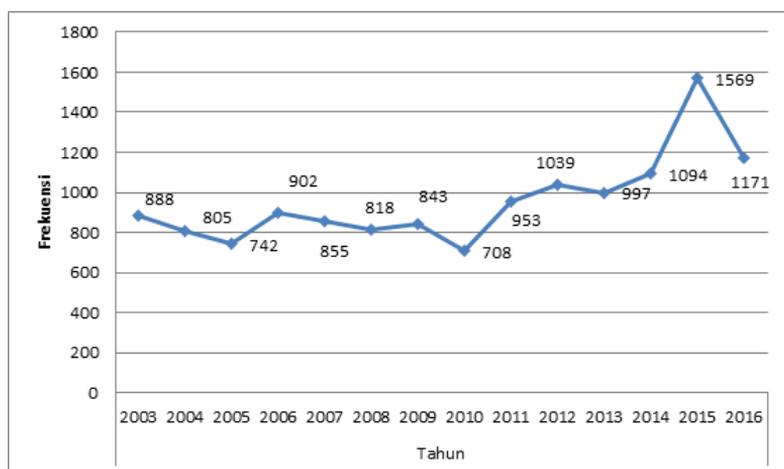
Negara	Korban Jiwa					Rata-Rata Korban Jiwa Per 100.000 Penduduk (2013-2017)
	2013	2014	2015	2016	2017	
Rusia	10.601	10.138	9.405	9.749	7.816	6,37
Jepang	1.625	1.678	1.563	1.452		1,23
Vietnam	45	90	62	98	96	0,08
Jerman	439	372	367			0,48
Thailand	110					0,16
Prancis	321	280	335	289	277	0,45
UK	350	322	325	367	325	0,53
Italia	196	141	222	295	288	0,37
Myanmar	83	60				0,14
Spanyol	132	162	143	175	212	0,35
Ukraina	2.494	2.246	1.948	1.872	1.819	4.89
Polandia	515	493	512	488	475	1,29
Kanada	141	150				0,41
Malaysia	72	139	158	142		0,40
Nepal	59	67				0,21
Taiwan	92	123	117	169		0,54
Romania			646	258	241	1,90
Kazakhstan	455	401	386	371	342	2,23
Belanda		75	81	42	40	0,35
Yunani	33					0,31
Belgia	48					0,45
Republik Ceko	111	114	115	124	92	1,05
Swedia	96		110		110	1,04
Hungaria	112	94	108	114	121	1,12
Yordania	35	35	52	28	28	0,37
Belarusia	783	737	578	538	490	6,59
Austria	20					0,23
Israel				19		0,23
Bulgaria	106	103	109	129	146	1,61
Serbia	62	73				0,94
Denmark	70	84	68	52	61	1,16
Singapura	4			1	1	0,04
Kirgizstan	80	80	48	80		1,30
Finlandia	58	86	74	82	61	1,32
Norwegia	62	54				1,14
Kosta Rika	23	13	12	18	14	0,32

Negara	Korban Jiwa					Rata-Rata Korban Jiwa Per 100.000 Penduduk (2013-2017)
	2013	2014	2015	2016	2017	
Selandia Baru			13	19	14	0,32
Irlandia	24	37	41	20	41	0,72
Kroasia		21	24	22	32	0,58
Kuwait	17	19	38	50	31	0,75
Moldova	120	118	107			3,24
Mongolia	53	61	59	60	44	1,73
Armenia				32	6	0,64
Lituania	160	125	125	101	103	4,31
Slovenia	0	0	3			0,05
Qatar	4	18	18	1		0,52
Latvia	104	94	88	95	79	4,72
Estonia	47	54	50	39	38	3,47
Siprus	5					0,58
Brunei	0	7	4	3	4	0,84

(Sumber: *World Fire Statistic*, Geneva Association Information Newsletter, April 2019)

STATISTIK KEBAKARAN DI INDONESIA

Frekuensi kebakaran yang terjadi di DKI Jakarta rata-rata hampir 2-3 kali per hari. Pada tahun 2012 sejumlah 1.039 frekuensi kebakaran terjadi sehingga diperkirakan rata-rata 2,8 kali per hari. Data statistik kebakaran di DKI Jakarta tahun 2003-2016 disajikan pada Gambar 1.1 dan Tabel 1.3 berikut.



Gambar 1.1 Grafik Statistik Kebakaran DKI Jakarta 2003-2016

Tabel 1.3 Statistik Kebakaran di DKI Jakarta

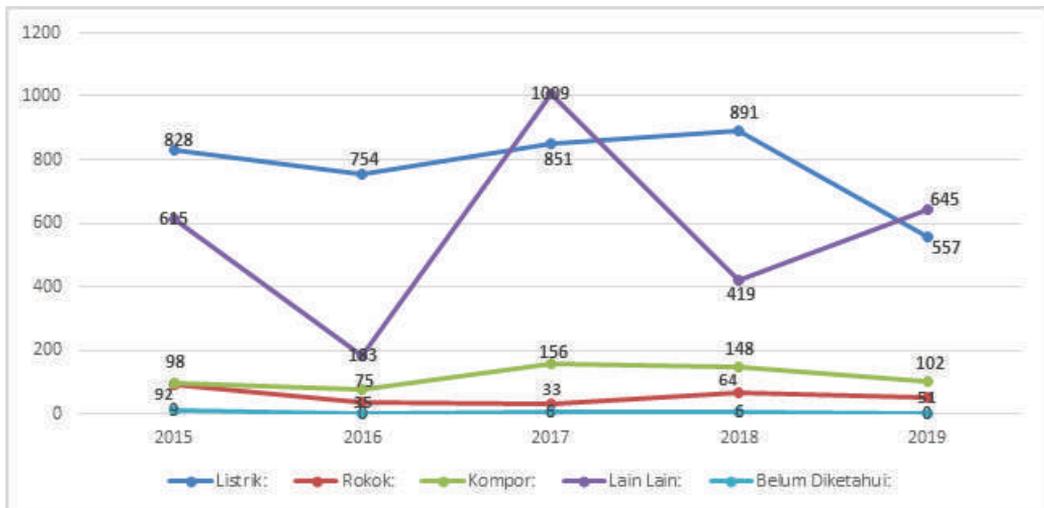
No	Tahun	Frek.	Dugaan Penyebab								Kerugian Jiwa				Kerugian Harta/Benda						
			KP	LP	LS	RK	LN	Petugas		Warga	Luas Area (m ²)	Jumlah Objek Bencana			Jumlah KK	Jumlah Jiwa	Taksiran Kerugian (Rp)				
								Mati	Luka			BP	BUP	BI				KD	LN		
1	2003	888	82	4	463	84	255	0	0	39	245	16.157.594	3.004	3.574	41	82	271	3.897	18.657	109.838.835.000	
2	2004	805	83	8	456	44	214	0	0	29	83	335.068	3.112	531	53	71	184	4.478	24.553	119.767.710.080	
3	2005	742	68	13	458	42	161	0	0	37	35	369,21	3.673	1.698	31	105	121	5.158	22.424	144.683.575.000	
4	2006	902	92	6	519	58	227	2	3	17	85	349.181	2.309	371	37	60	207	4.214	14.449	142.299.250.000	
5	2007	855	94	28	469	44	220	0	2	15	63	352.192	5.478	803	31	97	667	10.057	29.334	168.675.120.000	
6	2008	818	82	20	475	49	192	0	1	13	55	268.906	3,26	624	26	72	214	5.049	18.574	213.048.720.000	
7	2009	843	78	13	506	46	200	1	8	38	145	339.607	3.688	569	45	77	427	2.273	8.946	278.594.960.000	
8	2010	708	80	9	474	19	126	0	2	21	69	272.676	1.975	1,26	25	70	114	3.167	10.826	207.849.225.000	
9	2011	953	82	10	611	44	206	0	13	17	87	445.145	3.221	494	34	95	218	4.742	16.424	219.595.337.000	
10	2012	1039	91	1	684	48	215	0	23	35	96	643.895	3.790	815	24	130	266	5.947	22.033	298.450.580.000	
11	2013	997	52	1	724	29	191	0	7	42	150	217.449	4.027	423	32	160	289	5.627	20.861	254.546.600.000	
12	2014	1.094	73	0	728	61	232	0	13	18	66	306.047	3.146	3.479	36	165	316	3.442	13.362	398.271.800.000	
13	2015	1.569	104	0	873	96	495	0	32	22	81	516.353	3.276	472	13	218	721	4.200	16.139	377.812.400.000	
14	2016	1.171	85	4	873	28	199	0	18	21	100	237.572	1.876	314	30	174	501	3.635	11.766	214.482.400.000	

Keterangan:

- BP : Bangunan perumahan KP : Kompor
 BUP : Bangunan umum dan perdagangan LK : Lampu
 BI : Bangunan industri LS : Listrik
 KD : Kendaraan RK : Rokok
 LN : Lain-lain LN : Lain-lain

(Sumber: Dinas Pemadam Kebakaran dan Penanggulangan Bencana, DKI Jakarta, 2013)

Penyebab kebakaran di DKI Jakarta tertinggi adalah listrik, kompor, dan rokok, serta penyebab lainnya seperti anak main petasan, sampah, dan obat nyamuk. Berikut statistik kebakaran berdasarkan penyebab pada tahun 2015–2019.



Gambar 1.2 Grafik Statistik Kebakaran Berdasarkan Penyebab di DKI Jakarta

STATISTIK KEBAKARAN DI AMERIKA SERIKAT

NFPA melaporkan bahwa di Amerika Serikat setiap 23 detik terjadi kebakaran pada semua negara bagian. Kejadian kebakaran di rumah terjadi setiap 85 detik, sementara kejadian kebakaran di luar gedung terjadi setiap 46 detik, dan setiap 30 menit terjadi korban luka akibat kebakaran (Karter, 2011). Data statistik kebakaran di Amerika Serikat disajikan pada Tabel 1.4.

Tabel 1.4 Statistik Kebakaran di Amerika Serikat

Tahun	Frekuensi	Kematian	Luka-luka	Kerugian (US\$) dalam miliar	
				Dilaporkan	Dolar AS Tahun 2011
1977	3,264,000	7,395	31,19	\$ 4,70	\$ 17,4
1978	2,817,500	7,71	29,825	\$ 4,50	\$ 16,7
1979	2,845,500	7,575	31,325	\$ 5,80	\$ 17,8
1980	2,988,000	6,505	30,2	\$ 6,30	\$ 17,1
1981	2,893,500	6,7	30,45	\$ 6,70	\$ 16,5
1982	2,538,000	6,02	30,525	\$ 6,40	\$ 15,0
1983	2,326,500	5,92	31,275	\$ 6,60	\$ 14,9

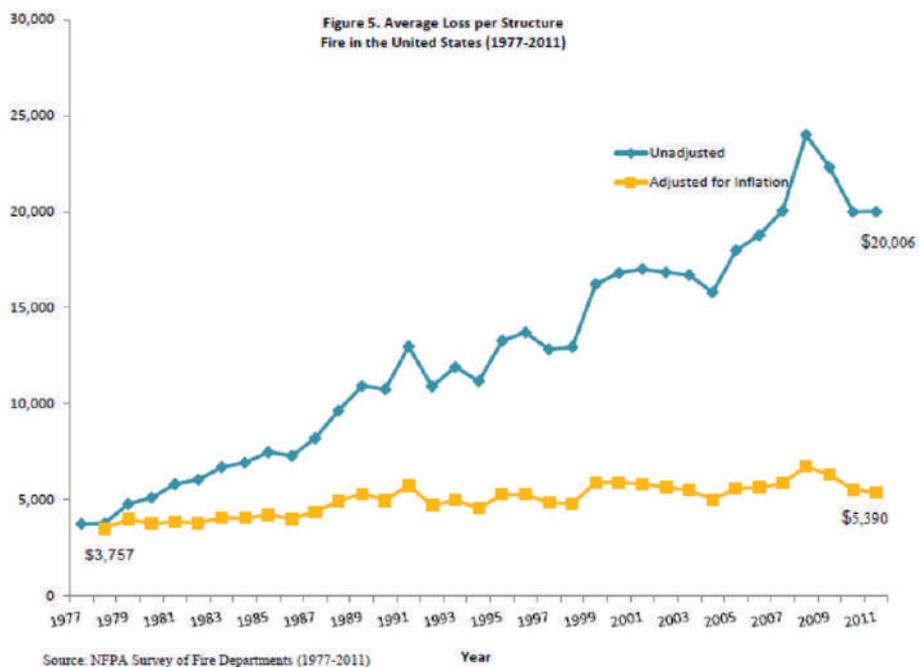
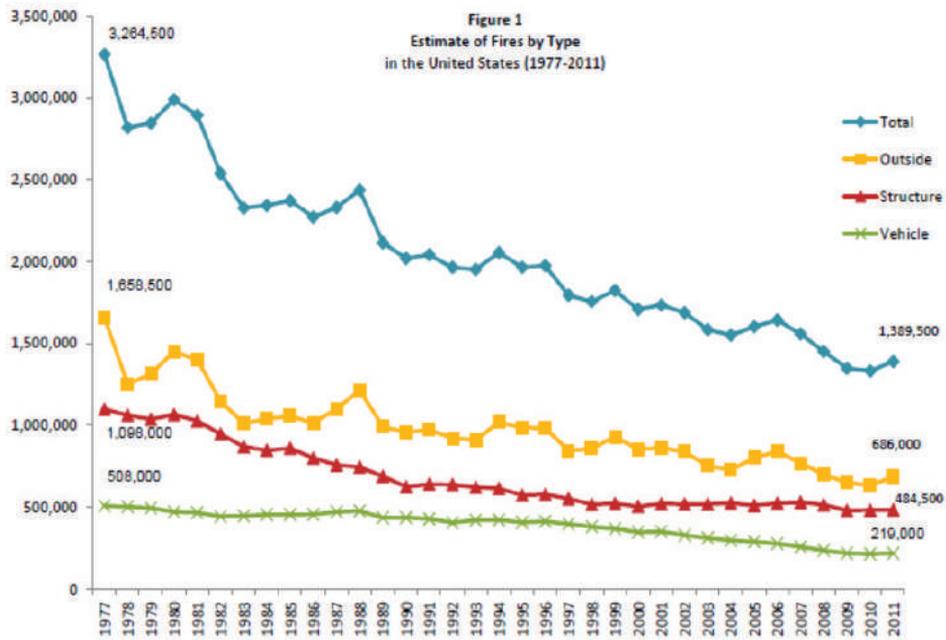
Tahun	Frekuensi	Kematian	Luka-luka	Kerugian (US\$) dalam miliar	
				Dilaporkan	Dolar AS Tahun 2011
1984	2,343,000	5,24	28,125	\$ 6,70	\$ 14,5
1985	2,371,000	6,185	28,425	\$ 7,30	\$ 15,3
1986	2,271,500	5,85	26,825	\$ 6,70	\$ 13,8
1987	2,330,000	5,81	28,215	\$ 7,20	\$ 14,2
1988	2,436,500	6,215	30,8	\$ 8,40	\$ 15,9
1989	2,115,000	5,41	28,25	\$ 8,70	\$ 15,7
1990	2,019,000	5,195	28,6	\$ 7,80	\$ 13,5
1991	2,041,500	4,465	29,375	\$ 9,50	\$ 15,6
1992	1,964,500	4,73	28,7	\$ 8,30	\$ 13,3
1993	1,952,500	4,635	30,475	\$ 8,50	\$ 13,3
1994	2,054,500	4,275	27,25	\$ 8,20	\$ 12,4
1995	1,965,500	4,585	25,775	\$ 8,90	\$ 13,1
1996	1,975,000	4,99	25,55	\$ 9,40	\$ 13,5
1997	1,795,000	4,05	23750	\$ 8,50	\$ 11,9
1998	1,755,500	4,035	23,1	\$ 8,60	\$ 11,9
1999	1,823,000	3,57	21,875	\$ 10,00	\$ 13,5
2000	1,708,000	4,045	22,35	\$ 11,20	\$ 14,6
2001	1,734,500	6,1961*	21,1002	\$ 44,60	\$ 55,9
2002	1,687,500	3,38	18,425	\$ 10,30	\$ 12,9
2003	1,584,500	3,925	18,125	\$ 12,30	\$ 15,0
2004	1,550,500	3,900	17,875	\$ 9,80	\$ 11,7
2005	1,602,000	3,675	17,925	\$ 10,70	\$ 12,3
2006	1,642,500	3,245	16,400	\$ 11,30	\$ 12,6
2007	1,557,500	3,430	17,675	\$ 14,60	\$ 15,9
2008	1,451,500	3,320	16,705	\$ 15,50	\$ 16,2
2009	1,348,500	3,010	17,050	\$ 12,50	\$ 13,1
2010	1,331,000	3,120	17,720	\$ 11,60	\$ 12,0
2011	1,389,500	3,005	17,500	\$ 11,70	\$ 11,7

Keterangan: *Data ini termasuk kejadian 11 September 2001

(Sumber: NFPA, *Fire Loss in the United States*, 2011)

Pencatatan data statistik kebakaran di Amerika Serikat telah dilakukan sejak tahun 1977 dan menunjukkan telah terjadi penurunan kejadian kebakaran yang cukup signifikan, yaitu 42%, hingga tahun 2011. Kerugian materi telah disesuaikan dengan nilai dolar AS tahun 2011 sehingga dari tahun 1977 hingga 2011 telah

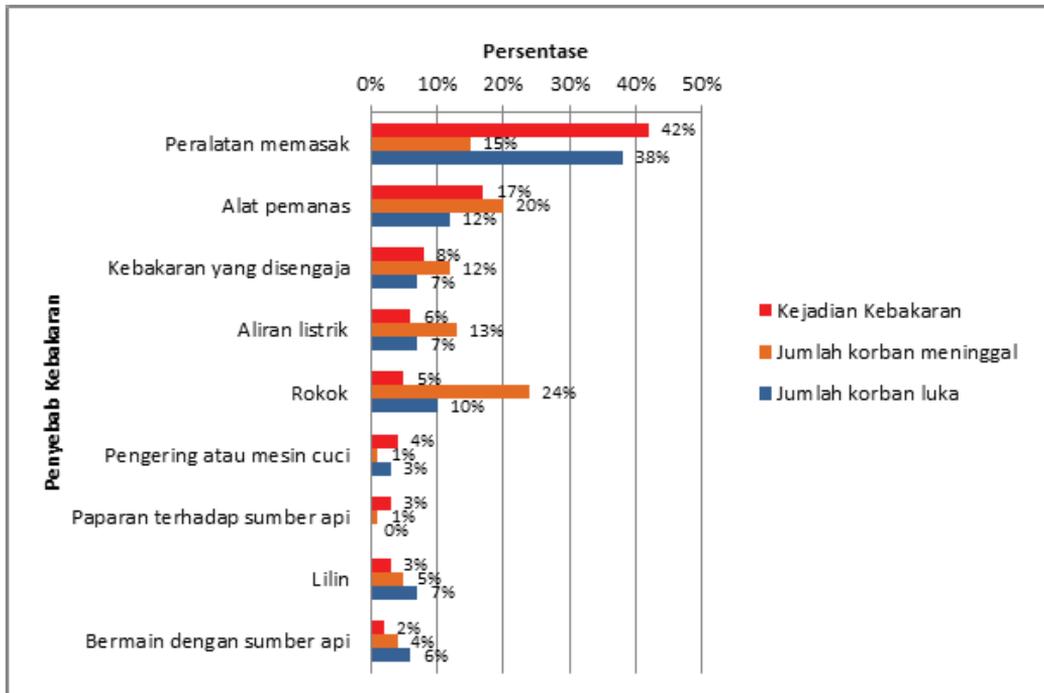
terjadi peningkatan kejadian kebakaran sekitar 150% atau 1,5 kali. Grafik statistik kebakaran di Amerika disajikan pada Gambar 1.3 berikut.



Gambar 1.3 Grafik Statistik Kebakaran di Amerika Serikat

(Sumber: NFPA, *Fire Loss in the United States*, 2011)

Kebakaran di Amerika Serikat pada bangunan kebanyakan disebabkan peralatan memasak (42%), pemanas (17%), kebakaran yang disengaja (8%), listrik (6%), rokok (5%), pengering atau mesin cuci (5%), lilin (3%), dan bermain dengan sumber api (2%). Gambar 1.4 berikut menunjukkan statistik penyebab kebakaran pada bangunan sejak tahun 2006 hingga tahun 2010.



Gambar 1.4 Grafik Penyebab Kebakaran di Amerika Serikat Tahun 2006–2010
 (Sumber: NFPA, *An Overview of the U.S. Fire Problem*, 2011)



BAB 2

REGULASI KESEHATAN DAN KESELAMATAN KERJA (K3) DAN KESELAMATAN KEBAKARAN

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini pembaca memperoleh informasi tentang regulasi dan standar terkait keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dan keselamatan kebakaran baik di Indonesia maupun internasional.

REGULASI

Indonesia telah memiliki sejumlah regulasi terkait keselamatan dan kesehatan kerja sebagaimana disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Undang-Undang Terkait Keselamatan dan Kesehatan Kerja

Tahun	Jenis	Regulasi
1930	Undang-undang	Undang-Undang Uap Tahun 1930 (<i>Stoom Ordonnantie</i>)
1945	Undang-undang Dasar	UUD 1945, Pasal 28 ayat (1) tentang hak setiap warga negara untuk memperoleh pelayanan kesehatan
1969	Undang-undang	Undang-undang Nomor 3 Tahun 1969 tentang Persetujuan Konvensi Organisasi Perburuhan Internasional Nomor 120 mengenai Higiene dalam Perniagaan dan Kantor-kantor
1970	Undang-undang	Undang-undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja
1984	Undang-undang	Undang-undang Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 1984 tentang Perindustrian
1992	Undang-undang	Undang-undang Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 1992 tentang Kesehatan, yang pada Pasal 23 dinyatakan bahwa upaya kesehatan kerja sebagai salah satu dari 15 upaya kesehatan yang diselenggarakan untuk mewujudkan produktivitas kerja yang optimal sejalan dengan perlindungan tenaga kerja, wajib dilakukan setiap tempat kerja, dan mencakup pelayanan kesehatan kerja.

Tahun	Jenis	Regulasi
1998	Undang-undang	Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 1998 tentang Pengesahan <i>Convention on Prohibition of The Development, Production, Stockpiling and Use of Chemical Weapons and On Their Destruction</i> .
2002	Undang-undang	Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung.
2003	Undang-undang	Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 13 Tahun 2003 tentang Ketenagakerjaan
2003	Undang-undang	Undang-Uundang Nomor 21 Tahun 2003 tentang Pengesahan ILO Convention Nomor 81 <i>Concerning Labour Inspection in Industry and Commerce</i> (Konvensi ILO Nomor 81 mengenai Pengawasan Ketenagakerjaan dalam Industri dan Perdagangan).

(Sumber: Himpunan Peraturan Perundangan Kesehatan Kerja, Dr. Zulmiar Yanri, Ph.D., Sp.O.K. (ed.), 2005;. Lembaga ASEAN OHSNET, Indonesia; dan peraturan-peraturan terkait K3 yang diunduh dari website google.com)

PERATURAN PEMERINTAH DAN KEPUTUSAN PRESIDEN TERKAIT K3

Peraturan Pemerintah dan Keputusan Presiden terkait K3 disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2.2 Peraturan Pemerintah dan Keputusan Presiden Terkait K3

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1973	Peraturan pemerintah	Pestisida	Peraturan Pemerintah Nomor 7 Tahun 1973 tentang Pengawasan atas Peredaran Penyimpanan dan Penggunaan Pestisida
1973	Peraturan pemerintah	K3 Pertambangan	Peraturan Pemerintah Nomor 19 Tahun 1973 tentang Pengaturan dan Pengawasan Keselamatan Kerja di Bidang Pertambangan

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1979	Peraturan pemerintah	K3 Minyak dan Gas Bumi	Peraturan Pemerintah Nomor 11 Tahun 1979 tentang Keselamatan Kerja pada Pemurnian dan Pengolahan Minyak dan Gas Bumi
1993	Peraturan pemerintah	Jamsostek	Peraturan Pemerintah Nomor 14 Tahun 1993 tentang Penyelenggaraan Program Jaminan Sosial Tenaga Kerja
1993	Keputusan Presiden	Penyakit akibat Hubungan Kerja	Keputusan Presiden Nomor 22 Tahun 1993 tentang Penyakit yang Timbul karena Hubungan Kerja
2000	Peraturan pemerintah	Otonomi Daerah	Peraturan Pemerintah Nomor 25 Tahun 2000 tentang Kewenangan Pemerintah dan Kewenangan Daerah Otonom di bidang Ketenagakerjaan (Pasal 2 ayat 3)
2012	Peraturan pemerintah	Sistem Manajemen K3	Peraturan Pemerintah Nomor 50 tentang Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja

(Sumber: Himpunan Peraturan Perundangan Kesehatan Kerja, Dr. Zulmiar Yanri, Ph.D., Sp.O.K. (ed.), 2005; Lembaga ASEAN OHSNET, Indonesia; dan peraturan-peraturan terkait K3 yang diunduh dari website google.com)

PERATURAN MENTERI DAN KEPUTUSAN MENTERI

Sejumlah Peraturan Menteri dan Keputusan Menteri terkait K3 telah dikembangkan, yang disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Peraturan Menteri dan Keputusan Menteri Terkait K3

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1964	Peraturan Menteri	Syarat Kesehatan, Kebersihan, dan Penerangan	Peraturan Menteri Perburuhan Nomor 7 Tahun 1964 tentang Syarat Kesehatan, Kebersihan, serta Penerangan dalam Tempat Kerja

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1976	Peraturan Menteri	Dokter dan Paramedis Perusahaan	Peraturan Menteri Tenaga Kerja, Transkop Nomor Per.01/Men/1976 tentang Kewajiban Latihan Hiperkes bagi Dokter Perusahaan
1978	Peraturan Menteri	Ahli K3	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Per.03/Men/1978 tentang Penunjukan dan Wewenang, serta Kewajiban Pegawai Pengawas Keselamatan dan Kesehatan Kerja dan Ahli Keselamatan Kerja
1978	Peraturan Menteri	K3 Industri Kayu	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Per.01/Men/1978 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja dalam Pengangkutan dan Penebangan Kayu
1979	Peraturan Menteri	Dokter dan Paramedis Perusahaan	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor Per.01/Men/1979 tentang Kewajiban Latihan Higiene Perusahaan Kesehatan dan Keselamatan Kerja bagi Tenaga Para Medis Perusahaan
1980	Peraturan Menteri	Pemeriksaan Kesehatan	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor 02/Men/1980 tentang Pemeriksaan Kesehatan Tenaga Kerja dalam Penyelenggaraan Keselamatan Kerja
1980	Peraturan Menteri	K3 pada Konstruksi Bangunan	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Per.01/Men/1980 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Konstruksi Bangunan
1981	Peraturan Menteri	Kewajiban Melapor Penyakit Akibat Kerja	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor Per.01/Men/1981 tentang Kewajiban Melapor Penyakit akibat Kerja
1982	Peraturan Menteri	Pelayanan Kesehatan Tenaga Kerja	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor Per.03/Men/1982 tentang Pelayanan Kesehatan Tenaga Kerja

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1982	Peraturan Menteri	Juru Las	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Per.02/Men/1982 tentang Kualifikasi Juru Las
1982	Peraturan Menteri	Bejana Tekan	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Per.01/Men/1982 tentang Bejana Tekan
1984	Keputusan Menteri	Dewan Keselamatan dan Kesehatan Kerja	Keputusan Menteri Tenaga Kerja Nomor Kep. 155/Men/1984 tentang Penyempurnaan Keputusan Menteri Tenaga dan Transmigrasi Nomor Kep.125/Men/82, tentang Pembentukan, Susunan, dan Tata Kerja Dewan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Nasional, Dewan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Wilayah dan Panitia Pembina Keselamatan dan Kesehatan Kerja
1985	Peraturan Menteri	Pesawat Tenaga	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.04/Men/1985 tentang Pesawat Tenaga dan Produksi
1985	Peraturan Menteri	Asbes	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.03/Men/1985 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pemakaian Asbes Dewan Keselamatan dan Kesehatan Kerja Nasional (DK3N)
1985	Peraturan Menteri	Pesawat Angkat dan Angkut	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.05/Men/1985 tentang Pesawat Angkat dan Angkut
1986	Peraturan Menteri	Pestisida	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.03/Men/1986 tentang Syarat-syarat Keselamatan dan Kesehatan di Tempat Kerja yang Mengelola Pestisida

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1986	Keputusan Bersama Menteri	K3 Konstruksi	Keputusan Bersama Menteri Tenaga Kerja dan Menteri Pekerjaan Umum Nomor Kep. 174/Men/1986. Nomor 104/KPTS/1986 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Tempat Kegiatan Konstruksi
1987	Peraturan Menteri	Panitia Pembina Keselamatan dan Kesehatan Kerja	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.04/Men/1987 tentang Panitia Pembina Keselamatan dan Kesehatan Kerja serta Tata Cara Penunjukan Ahli Keselamatan Kerja
1987	Keputusan Menteri	Bendera K3	Keputusan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Kep.1135/Men/1987 tentang Bendera Keselamatan dan Kesehatan Kerja
1988	Peraturan Menteri	Pesawat Uap	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.01/Men/1988 tentang Kualifikasi dan Syarat-syarat Operator Pesawat Uap
1989	Keputusan Menteri	Diagnosis dan Pelaporan Penyakit Akibat Kerja	Keputusan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor KEPTS.333/Men/1989 tentang Diagnosis dan Pelaporan Penyakit Akibat Kerja
1989	Peraturan Menteri	Petir	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.02/Men/1989 tentang Pengawasan Instalasi-instalasi Penyalur Petir
1989	Peraturan Menteri	Keran Angkat	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.01/Men/1989 tentang Kualifikasi dan Syarat-syarat Operator Keran Angkat
1990	Keputusan Menteri	Hari K3 Nasional	Keputusan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Kep.245/Men/1990 tentang Hari Keselamatan dan Kesehatan Kerja Nasional

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1992	Peraturan Menteri	Ahli Keselamatan dan Kesehatan Kerja	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.02/Men/1992 tentang Tata Cara Penunjukan, Kewajiban dan Wewenang Ahli Keselamatan, dan Kesehatan Kerja
1995	Peraturan Menteri	Perusahaan Jasa K3	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.04/Men/1995 tentang Perusahaan Jasa Keselamatan dan Kesehatan Kerja
1996	Peraturan Menteri	Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.05/Men/1996 tentang Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja
1998	Peraturan Menteri	Dokter dan Paramedis Perusahaan	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.04/Men/1998 tentang Pengangkatan, Pemberhentian, dan Tata Kerja Dokter Penasehat
1998	Peraturan Menteri	Jamsostek	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.01/Men/1998 tentang Penyelenggaraan Pemeliharaan Kesehatan bagi Tenaga Kerja dengan Manfaat Lebih dari Paket Jaminan Pemeliharaan Dasar Jaminan Sosial Tenaga Kerja
1998	Peraturan Menteri	Pelaporan Kecelakaan	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.03/Men/1998 tentang Tata Cara Pelaporan dan Pemeriksaan Kecelakaan
1999	Peraturan Menteri	Lift	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.03/Men/1999 tentang Syarat-syarat Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lift untuk Pengangkutan Orang dan Barang
1999	Keputusan Menteri	Bahan Kimia	Keputusan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Kep.187/Men/1999 tentang Pengendalian Bahan Kimia Berbahaya

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1999	Keputusan Menteri	Nilai Ambang Batas Faktor Fisika	Keputusan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Kep.51/Men/1999 tentang Nilai Ambang Batas Faktor Fisika di Tempat Kerja
2002	Keputusan Menteri	Listrik	Keputusan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Kep.75/Men/2002 tentang Pemberlakuan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. SNI-04-0225-2000 mengenai Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000) di Tempat Kerja
2002	Keputusan Menteri	Pengakuan Kewenangan K3 Daerah	Keputusan Menteri Dalam Negeri Nomor 130-67 Tahun 2002 tentang Pengakuan Kewenangan Kabupaten dan Kota Khususnya di Bidang K3
2003	Keputusan Menteri	K3 Anak-anak	Keputusan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Kep.235/Men/2003 tentang Jenis-Jenis Pekerjaan yang Membahayakan Kesehatan, Keselamatan atau Moral Anak
2003	Keputusan Menteri	Kecelakaan dan Penyakit Akibat Kerja	Keputusan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Kep.79/Men/2003 tentang Pedoman Diagnosis dan Penilaian Cacat karena Kecelakaan dan Penyakit Akibat Kerja
2004	Keputusan Menteri	HIV/AIDS	Keputusan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Kep.68/Men/IV/2004 tentang Pencegahan dan Penanggulangan HIV/AIDS di Tempat Kerja

(Sumber: Himpunan Peraturan Perundangan Kesehatan Kerja, Dr. Zulmiar Yanri, Ph.D., Sp.O.K. (ed.), 2005; Lembaga ASEAN OHSNET, Indonesia; dan peraturan-peraturan terkait K3 yang diunduh dari website google.com)

INSTRUKSI DAN SURAT EDARAN TERKAIT K3

Sejumlah instruksi dan surat edaran terkait K3 juga telah dikembangkan, dan disajikan pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4 Instruksi dan Surat Edaran Terkait K3

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1979	Surat Edaran Menteri	Kantin	Surat Edaran Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Nomor SE-01/Men/1979 tentang Pengadaan Kantin dan Ruang Makan
1984	Instruksi Menteri	Alat Pelindung Diri	Instruksi Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor INS-2/Men/BW/BK/1984 tentang Pengesahan Alat Pelindung Diri
1988	Instruksi Menteri	Toilet	Instruksi Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor INS/01/Men/1988 tentang Peningkatan Pengawasan dan Penertiban terhadap Pengadaan Kantin dan Toilet di Perusahaan
1989	Surat Edaran Direktur Jenderal	Perusahaan Catering	Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Hubungan Ketenagakerjaan dan Pengawasan Norma Kerja Nomor SE-86/BW/1989 tentang Perusahaan Catering yang Mengelola Makanan bagi Tenaga Kerja
1997	Instruksi Menteri	Alat Pelindung Diri	Instruksi Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor INS/05/Men/BW/1997 tentang Pengawasan Alat Pelindung Diri
1997	Surat Edaran Menteri	Bahan Kimia	Surat Edaran Menteri Tenaga Kerja Nomor SE-01/Men/1997 tentang Nilai Ambang Batas Faktor Kimia di Udara Lingkungan Kerja
1997	Surat Edaran	Alat Pelindung Diri	Surat Edaran Nomor SE-05/BW/1997 tentang Alat Pelindung Diri
1997	Surat Edaran	Alat Pelindung Diri	Surat Edaran Nomor SE-06/BW/1997 tentang Pendaftaran Alat Pelindung Diri

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1997	Surat Edaran Direktur Jenderal	Hepatitis B	Surat Edaran Direktur Jenderal Pembinaan Hubungan Industrial dan Pengawasan Ketenagakerjaan Nomor SE-07/BW/1997 tentang Pengujian Hepatitis B dalam Pemeriksaan Kesehatan Tenaga Kerja
1998	Surat Keputusan Direktur Jenderal	Kecelakaan	Surat Keputusan Direktur Jenderal Pembinaan Hubungan Industrial dan Pengawasan Ketenagakerjaan Departemen Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Kep. 84/BW/1998 tentang Cara Pengisian Formulir Laporan dan Analisis Statistik Kecelakaan Ketenagakerjaan
1999	Instruksi Menteri	Pengelolaan Makanan	Instruksi Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor INST-03/Men/BW/1999 tentang Pengawasan terhadap Pengelolaan Makanan di Tempat Kerja
1999	Keputusan Direktur Jenderal	Lift	Keputusan Direktur Jenderal Pembinaan Hubungan Industrial dan Pengawasan Ketenagakerjaan Nomor Kep.407/BW/1999 tentang Persyaratan, Penunjukan Hak dan Kewajiban Teknisi Lift
2002	Keputusan Direktur Jenderal	Listrik	Keputusan Direktur Jenderal Pembinaan Hubungan Industrial dan Pengawasan Ketenagakerjaan Nomor Kep.311/BW/2002 tentang Sertifikasi Kompetensi Keselamatan dan Kesehatan Kerja Teknisi Listrik
2004	Surat Edaran Menteri	Industri Kimia dan Potensi Bahaya Besar	Surat Edaran Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor SE-140/Men/PPK-KK/II/2004 tentang Pemenuhan Kewajiban Syarat-syarat Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Industri Kimia dengan Potensi Bahaya Besar (<i>Major Hazard Installation</i>)

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
2005	Surat Edaran Menteri	K3 di Gedung Bertingkat	Surat Edaran Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor SE-117/Men/PPK-PKK/III/2005 tentang Pemeriksaan Menyeluruh Pelaksanaan Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Pusat Perbelanjaan, Gedung Bertingkat, dan Tempat-tempat Publik lainnya

(Sumber: Himpunan Peraturan Perundangan Kesehatan Kerja, Dr. Zulmiar Yanri, Ph.D., Sp.O.K. (ed.), 2005; Lembaga ASEAN OHSNET, Indonesia; dan peraturan-peraturan terkait K3 yang diunduh dari website google.com)

REGULASI DAN STANDAR KESELAMATAN KEBAKARAN DI INDONESIA

Regulasi terkait keselamatan kebakaran telah dikembangkan di Indonesia dalam sejumlah undang-undang, peraturan menteri serta peraturan daerah. Beberapa regulasi terkait keselamatan kebakaran disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2.5 Regulasi Terkait Keselamatan Kebakaran di Indonesia

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1980	Peraturan Menteri	Alat Pemadam Api Ringan	Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi Republik Indonesia Nomor Per.04/Men/1980 tentang Syarat-syarat Pemasangan dan Pemeliharaan Alat Pemadam Api Ringan
1983	Peraturan Menteri	Instalasi Alarm Kebakaran Otomatik	Peraturan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Per.02/Men/1983 tentang Instalasi Alarm Kebakaran Otomatik
1997	Instruksi Menteri	Penanggulangan Kebakaran	Instruksi Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Ins.11/M/BW/1997 tentang Pengawasan Khusus K3 Penanggulangan Kebakaran

Tahun	Jenis	Topik	Regulasi
1999	Keputusan Menteri	Unit Penanggulangan Kebakaran	Keputusan Menteri Tenaga Kerja Republik Indonesia Nomor Kep.186/Men/1999 tentang Unit Penanggulangan Kebakaran di Tempat Kerja
2000	Keputusan Menteri	Ketentuan Teknis pPada Bangunan Gedung	Keputusan Menteri Negara Pekerjaan Umum Nomor 10/KPTS/2000 tentang Ketentuan Teknis Pengamanan terhadap Bahaya Kebakaran Pada Bangunan Gedung dan Lingkungan
2000	Keputusan Menteri	Teknis Manajemen Penanggulangan Kebakaran	Keputusan Menteri Negara Pekerjaan Umum Nomor 11/KPTS/2000 tentang Ketentuan Teknis Manajemen Penanggulangan Kebakaran.
2002	Undang-undang	Bangunan Gedung	Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung.
2005	Peraturan Pemerintah	Bangunan Gedung	Peraturan Pemerintah Nomor 36 Tahun 2005 tentang Peraturan Pelaksanaan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2002 tentang Bangunan Gedung
2008	Peraturan Daerah	Pencegahan dan Penangulangan Bahaya Kebakaran	Peraturan Daerah Provinsi DKI Jakarta Nomor 8 Tahun 2008 tentang Pencegahan dan Penanggulangan Bahaya Kebakaran

(Sumber: Peraturan terkait yang diunduh dari google.com)

Selain regulasi yang telah ditetapkan oleh Pemerintah, Badan Standarisasi Nasional (BSN) juga mengeluarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) yang terkait keselamatan kebakaran. SNI telah menetapkan sejumlah pedoman tentang kebakaran yang diadopsi dari standar Internasional. Daftar SNI yang terkait dengan kebakaran disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2.6 Daftar Standar Nasional Indonesia (SNI) Terkait Kebakaran

No.	Nomor SNI	Judul (Indonesia)	Judul (Inggris)
1	SNI 04-6539.1.1-2001	Pengujian bahaya kebakaran - Bagian 1: Pedoman untuk penyiapan persyaratan dan spesifikasi pengujian untuk mengases bahaya kebakaran produk elektroteknik - Seksi 1: Pedoman umum	<i>Fire hazard testing - Part 1: Guidance for preparation of requirements and specification of testing for assessing fire hazard of electrotechnical products - Section 1: General guidelines</i>
2	SNI 04-6539.1.2-2001	Pengujian bahaya kebakaran - Bagian 1: Pedoman untuk penyiapan persyaratan dan spesifikasi pengujian untuk mengases bahaya kebakaran produk elektroteknik - Seksi 2: Pedoman untuk komponen elektronik	<i>Fire hazard testing - Part 1: Guidance for preparation of requirements and specification of testing for assessing fire hazard of electrotechnical products - Section 2: Guidance for electronic components</i>
3	SNI 04-6539.1.3-2001	Pengujian bahaya kebakaran - Bagian 1: Pedoman untuk penyiapan persyaratan dan spesifikasi pengujian untuk mengases bahaya kebakaran produk elektroteknik - Seksi 3: Pedoman penggunaan prosedur pra-seleksi	<i>Fire hazard testing - Part 1: Guidance for preparation of requirements and specification for assessing fire hazard of electrotechnical products - Section 3: Guidance for use of pre-selection procedures</i>
4	SNI 04-6539.2.1.0-2001	Pengujian bahaya kebakaran - Bagian 2: Metode uji - Seksi 1/lembar 0: Metode uji kawat-pijar - Umum	<i>Fire hazard testing - Part 2: Test methods - Section 1/sheet 0: Glow-wire test methods - General</i>
5	SNI 04-6539.2.1.1-2001	Pengujian bahaya kebakaran - Bagian 2: Metode uji - Seksi 1/lembar 1: Uji kawat-pijar untuk produk akhir dan pedomannya	<i>Fire hazard testing - Part 2: Test methods - Section 1/sheet 1: Glow-wire end-product tests and guidance</i>

No.	Nomor SNI	Judul (Indonesia)	Judul (Inggris)
6	SNI 04-6539.2.1.2-2002	Pengujian bahaya kebakaran - Bagian 2: Metode uji - Seksi 1/Lembar 2: Uji mampu-nyala kawat-pijar pada bahan	<i>Fire hazard testing - Part 2: Test methods - Section 1/sheet 2: Glow-wire flammability test on materials</i>
7	SNI 09-7053-2004	Kendaraan dan peralatan pemadam kebakaran - Pompa	<i>Fire-fighting vehicles and equipment - Pumps</i>
8	SNI 03-7067-2005	Teknis fasilitas pertolongan kecelakaan penerbangan dan pemadam kebakaran (PKP-PK) di bandar udara	<i>Codes of flight accident rescue and fire fighting in airports</i>
9	SNI 1739:2008	Cara uji jalar api pada permukaan bahan bangunan untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan rumah dan gedung	<i>Testing methods for fire spread tests at the surface of building materials for fire protection in houses and buildings</i>
10	SNI 1740:2008	Cara uji bakar bahan bangunan untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan rumah dan gedung	<i>Testing methods fire test of building materials for fire protection in houses and buildings</i>
11	SNI 1741:2008	Cara uji ketahanan api komponen struktur bangunan untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan rumah dan gedung'	<i>Testing methods for fire resistance tests of structural building components for fire protection in houses and buildings</i>
12	SNI 13-6563.4-2001	Kurikulum pelatihan tenaga teknik khusus migas bidang keselamatan dan kesehatan kerja - Bagian 4: Petugas regu pemadam kebakaran	<i>Curriculum of training for oil and natural gas special technicians on occupational safety and health - Part 4: Fireman</i>
13	SNI 13-6563.5-2001	Kurikulum pelatihan tenaga teknik khusus migas bidang keselamatan dan kesehatan kerja - Bagian 5: Koordinator pemadam kebakaran	<i>Curriculum of training for oil and natural gas special technician on occupational safety and health - Part 5: Fire fighting coordinator</i>

No.	Nomor SNI	Judul (Indonesia)	Judul (Inggris)
14	SNI 13-6563.6-2001	Kurikulum pelatihan tenaga teknik khusus migas bidang keselamatan dan kesehatan kerja - Bagian 6: Ahli penanggulangan kebakaran	<i>Curriculum of training for oil and natural gas special technicians on occupational safety and health - Part 6: Fire protection specialists</i>
15	SNI 03-6570-2001	Instalasi pompa yang dipasang tetap untuk proteksi kebakaran	<i>Installation of stationary pumps for fire protection</i>
16	SNI 03-6571-2001	Sistem pengendali asap kebakaran pada bangunan gedung	<i>Smoke control systems in buildings</i>
17	SNI 03-1736-2000	Tata cara perencanaan dan sistem proteksi pasif untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung	<i>Methods for design and pasive protection system for fire protection of buildings</i>
18	SNI 03-1735-2000	Tata cara perencanaan akses bangunan dan akses lingkungan untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung	<i>Methods for design of building access and environment access for fire protection of buildings</i>
19	SNI 03-1745-2000	Tata cara perencanaan dan pemasangan sistem pipa tegak dan slang untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung	<i>Methods for design and installation of stand pipe and hose systems for fire protection of buildings</i>
20	SNI 03-1746-2000	Tata cara perencanaan dan pemasangan sarana jalan keluar untuk penyelamatan terhadap bahaya kebakaran pada bangunan gedung	<i>Methods for design and installation of means of egress for rescuing to fire in buildings</i>
21	SNI 06-2862-1992	Bahan kimia untuk pemadam kebakaran	<i>Chemicals for fire extinguisher</i>
22	SNI 03-3985-2000	Tata cara perencanaan, pemasangan, dan pengujian sistem deteksi dan alarm kebakaran untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung	<i>Methods for design, installation and testing for fire detection and fire alarm systems for fire protection of buildings</i>

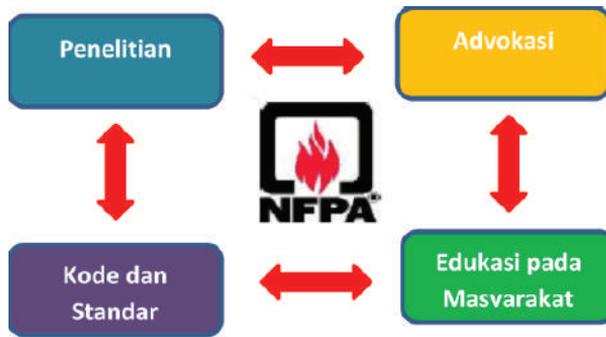
No.	Nomor SNI	Judul (Indonesia)	Judul (Inggris)
23	SNI 03-3986-1995	Instalasi alarm kebakaran otomatis	<i>Automatic fire alarm installation</i>
24	SNI 03-3987-1995	Tata cara perencanaan dan pemasangan pemadam api ringan untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan rumah dan gedung	<i>Codes for design, installation of light fire extinguishers for fire protection in houses and buildings</i>
25	SNI 03-3989-2000	Tata cara perencanaan dan pemasangan sistem sprinkler otomatis untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan gedung	<i>Methods for design and installation of automatic sprinkler systems for fire protection of buildings</i>
26	SNI 10-4831-1998	Ukuran flensa sambungan darat internasional untuk pemadam kebakaran di kapal	<i>Sizes of international shore fitting flange for fire extinguishers in ships</i>
27	SNI 10-4832-1998	Isolasi kebakaran untuk sekat dan geladak kapal barang	<i>Fire insulation for partition and decks of freighters</i>
28	SNI 10-4833-1998	Isolasi kebakaran untuk sekat dan geladak kapal penumpang	<i>Fire insulation for partition and decks of passenger ships</i>
29	SNI 19-4846-1998	Persyaratan perlengkapan petugas pemadam kebakaran di kapal	<i>Requirements for firefighter accessories in ships</i>
30	SNI 19-4851-1998	Peralatan pemadam kebakaran di pelabuhan laut	<i>Fire extinguishers in harbours</i>
31	SNI 03-6420-2000	Spesifikasi sistem pengolahan udara di dapur dan ruang parkir sebagai pengendali asap kebakaran dalam bangunan	<i>Specification for air handling systems in kitchen and park area as smoke fire control in buildings</i>
32	SNI 03-6382-2000	Spesifikasi hidran kebakaran tabung basah	<i>Specification of wet-barrel fire hydrants</i>
33	SNI 03-6462-2000	Tata cara pemasangan damper kebakaran	<i>Methods for installation of fire dampers</i>
34	SNI 19-6718-2002	Spesifikasi damper kebakaran	<i>Specification of the fire dampers</i>

No.	Nomor SNI	Judul (Indonesia)	Judul (Inggris)
35	SNI 03-6765-2002	Spesifikasi bahan bangunan untuk pencegahan bahaya kebakaran pada bangunan rumah dan gedung	<i>Specification of bulding materials for fire prevention on housings and buildings</i>
36	SNI 03-6766-2002	Metode pengujian proteksi kebakaran terhadap pintu kebakaran pada bangunan	<i>Test methods of fire protection for fire doors at buildings</i>
37	SNI 03-6767-2002	Spesifikasi umum sistem ventilasi mekanis dan sistem tata udara sebagai pengendali asap kebakaran dalam bangunan	<i>General specification of mechanical ventilation and air systems as fire smoke controller in buildings</i>
38	SNI 03-6768-2002	Spesifikasi umum sistem pengolahan udara sebagai pengendali asap kebakaran dalam bangunan	<i>General specification of air conditioner system as fire smoke controller in buildings</i>
39	SNI 03-6769-2002	Spesifikasi sistem pengolahan udara sentral sebagai pengendali asap kebakaran dalam bangunan	<i>Specification of central air conditioner system as fire smoke controller in buildings</i>
40	SNI 10-0971-1989	Alat pemadam kebakaran di kapal; simbol grafis	<i>Fire safety appliances in ships, Graphical symbols</i>
41	SNI 10-0972-1989	Alat pemadam kebakaran di kapal; simbol grafis	<i>Fire extinguisher in ships, Graphical symbols</i>
41	SNI 04-0225-2000	Persyaratan umum instalasi listrik 2000 (PUIL 2000)	<i>General requirements for electrical installations</i>

(Sumber: Sistem Informasi Standar Nasional Indonesia, 2009d, laman <http://websisni.bsn.go.id>, diakses tanggal 17 Agustus 2009)

STANDAR INTERNASIONAL KESELAMATAN KEBAKARAN

National Fire Protection Association (NFPA) merupakan institusi di dunia yang mengeluarkan pelbagai standar untuk keselamatan kebakaran. NFPA menjalankan pelbagai fungsi antara lain riset, advokasi, standar, dan kode serta pendidikan bagi masyarakat. Gambar berikut menunjukkan fungsi NFPA.



Gambar 2.1 Fungsi NFPA

(Sumber: NFPA, *Fire Loss in the US*, 2012)

Berikut ini disajikan tabel yang memuat standard-standar keselamatan kebakaran yang diatur dalam NFPA.

Tabel 2.7 Daftar NFPA Standar

Nomor NFPA	Keterangan
1	Kode Kebakaran
2	Kode Teknologi Hidrogen
3	Rekomendasi Praktik untuk Komisioning dan Pengujian Terintegrasi Sistem Proteksi Kebakaran dan Keselamatan Jiwa
10	Standar untuk Alat Pemadam Api Ringan
11	Standar untuk Busa Ekspansi Rendah, Sedang, dan Tinggi
12	Standar Sistem Pemadaman Karbon Dioksida
12A	Standar Sistem Pemadam Kebakaran Halon 1301
13	Standar untuk Pemasangan Sistem Sprinkler
13D	Standar Instalasi Sistem Sprinkler pada Hunian Perumahan & Rumah Bertingkat 1 dan 2 Level
13E	Rekomendasi Praktik untuk Operasi Pemadam Kebakaran di Properti yang Dilindungi oleh Sistem Sprinkler dan Pipa Tegak
13R	Standar Pemasangan Sistem Sprinkler pada Hunian Bertingkat Rendah
14	Standar untuk Pemasangan Sistem Pipa Tegak dan Selang
15	Standar untuk Sistem Tetap Semprotan Air untuk Proteksi Kebakaran

Nomor NFPA	Keterangan
16	Standar untuk Pemasangan Sprinkler Busa-Air dan Sistem Semprotan Busa-Air
17	Standar untuk Sistem Pemadam dengan Bahan Kimia Kering
17A	Standar untuk Sistem Pemadam dengan Bahan Kimia Basah
18	Standar Agen Pembasahan/ <i>Wetting Agents</i>
18A	Standar untuk <i>Water Additives</i> pada Pengendalian Kebakaran dan Mitigasi Uap
20	Standar Pemasangan Pompa Stasioner untuk Proteksi Kebakaran
22	Standar Tangki Air untuk Proteksi Kebakaran Mandiri
24	Standar Instalasi Jalur Layanan Utama Kebakaran dan Perlengkapannya
25	Standar untuk Inspeksi, Pengujian, dan Pemeliharaan Sistem Proteksi Kebakaran Berbasis Air
30	Kode Cairan <i>Flammable</i> dan Cairan <i>Combustible</i>
30A	Kode untuk Fasilitas Pengeluaran Bahan Bakar Motor dan Bengkel Reparasi
30B	Kode untuk Pembuatan dan Penyimpanan Produk Aerosol
31	Standar Instalasi Peralatan Pembakaran Berbasis Minyak
32	Standar untuk Pabrik <i>Dry Cleaning</i> (Pencucian Kering)
33	Standar untuk Aplikasi Semprotan menggunakan material <i>flammable</i> atau material <i>Combustible</i>
34	Standar untuk Proses Pencelupan, Pelapisan, dan Pencetakan Menggunakan Cairan <i>Flammable</i> atau Cairan <i>Combustible</i>
35	Standar untuk Pembuatan Pelapis Organik
36	Standar untuk Pabrik Ekstraksi Solvent
37	Standar untuk Instalasi dan Penggunaan Mesin Pembakaran Stasioner dan Turbin Gas
40	Standar untuk Penyimpanan dan Penanganan Film Nitrat Selulosa
45	Standar Proteksi Kebakaran untuk Laboratorium yang Menggunakan Bahan Kimia
51	Standar untuk Desain dan Pemasangan Sistem Oksigen-Bahan Bakar Gas untuk Proses Pengelasan, Pemotongan, dan Proses Sejenis

Nomor NFPA	Keterangan
51A	Standar untuk Pabrik Pengisian Silinder Asetilena
51B	Standar Pencegahan Kebakaran Selama Pengelasan, Pemotongan, dan Pekerjaan Panas Lainnya
52	Kode Sistem Bahan Bakar Gas Kendaraan Bermotor
53	Rekomendasi Praktik untuk Material, Peralatan dan Sistem Menggunakan Atmosfir yang Diperkaya dengan Oksigen
54	ANSI Z223.1-2012 Kode Bahan Bakar Gas Nasional
55	Kode Gas Terkompresi dan Cairan Kriogenik
56PS	Standar Pencegahan Kebakaran dan Ledakan selama Pembersihan & Purgung Sistem Pipa Gas Mudah Terbakar
58	Kode Gas Petroleum Cair
59	Kode Utilitas Pabrik LP-Gas
59A	Standar untuk Produksi, Penyimpanan, dan Penanganan Gas Alam Cair/ <i>Liquefied Natural Gas</i> (LNG)
61	Standar Pencegahan Kebakaran dan Ledakan Debu di Fasilitas Pertanian dan Pengolahan Pangan
67	Panduan tentang Perlindungan Ledakan untuk Campuran Gas dalam Sistem Pipa
68	Standar Proteksi Ledakan dengan Deflagrasi Berventilasi
69	Standar Sistem Pencegahan Ledakan
70	Kode Kelistrikan Nasional
70B	Rekomendasi Praktik untuk Pemeliharaan Peralatan Listrik
70E	Standar untuk Keselamatan Listrik di Tempat Kerja®
72	Alarm Kebakaran Nasional dan Kode Pemberian Isyarat
73	Standar Inspeksi Listrik untuk Tempat Tinggal
75	Standar untuk Proteksi Kebakaran pada Peralatan Teknologi Informasi
76	Standar untuk Proteksi Kebakaran pada Fasilitas Telekomunikasi
77	Rekomendasi Praktik tentang Listrik Statis
79	Standar Kelistrikan untuk Mesin Industri
80	Standar untuk Pintu Tahan Api dan Pelindung Bukaannya Lainnya
80A	Rekomendasi Praktik untuk Proteksi Gedung dari Paparan Kebakaran Eksterior

Nomor NFPA	Keterangan
82	Standar tentang Insinerator serta Sistem dan Peralatan Penanganan Limbah dan Linen
85	Kode Bahaya Sistem Boiler dan Pembakaran
86	Standar untuk Oven dan Tungku
87	Rekomendasi Praktik untuk Fluida Pemanas
88A	Standar untuk Struktur Parkir
90A	Standar untuk Pemasangan Sistem AC dan Ventilasi
90B	Standar untuk Pemasangan Sistem Pemanas Udara dan AC
91	Standar Sistem Exhaust untuk Pengangkutan Udara yang Membawa Uap, Gas, Kabut, dan Padatan Partikulat Tidak Mudah Terbakar
92	Standar untuk Sistem Kontrol Asap
92A	Standar untuk Sistem Kontrol Asap yang Menggunakan Penghalang dan Perbedaan Tekanan
92B	Standar untuk Sistem Manajemen Asap di Mall, Atria, dan Ruang Besar
96	Standar untuk Kontrol Ventilasi dan Proteksi Kebakaran pada Pekerjaan Memasak Komersial
99	Kode Fasilitas Pelayanan Kesehatan
99B	Standar untuk Fasilitas Hipobarik
101	Kode Keselamatan Jiwa
101A	Panduan Pendekatan Alternatif untuk Keselamatan Jiwa
102	Standar untuk Tribun, Struktur Lipatan dan Tempat Duduk Teleskopis, Tenda dan Struktur Membran
105	Standar untuk Perakitan Pintu Penahan Asap dan Pelindung Bukaannya Lainnya
110	Standar untuk Sistem Daya Keadaan Darurat dan Siaga
111	Standar tentang Sistem Daya Listrik Darurat Tersimpan dan sistem Daya Siaga
115	Standar untuk Proteksi Kebakaran Laser
120	Standar untuk Pencegahan dan Pengendalian Kebakaran di Tambang Batubara
122	Standar untuk Pencegahan dan Pengendalian Kebakaran di Fasilitas Penambangan Logam/Bukan Logam dan Mineral Logam

Nomor NFPA	Keterangan
130	Standar untuk Sistem Pemandu Transit dan Rel Penumpang Tetap
140	Standar Studio Soundstages Film dan Studio Produksi Televisi, Fasilitas Produksi yang Disetujui, dan Lokasi Produksi
150	Standar tentang Kebakaran dan Keselamatan Jiwa di Fasilitas Pemeliharaan Hewan
160	Standar untuk Penggunaan Efek Nyala Sebelum Audiensi
170	Standar untuk Simbol Keselamatan Kebakaran dan Keadaan Darurat
204	Standar untuk Ventilasi Panas dan Asap
211	Standar untuk Cerobong, Perapian, Ventilasi, dan Peralatan yang Menggunakan Bahan Bakar Padat
214	Standar untuk Menara Pendingin Air
220	Standar Jenis Konstruksi Bangunan
221	Standar Dinding Tahan Api Berkekuatan Besar, Dinding Tahan Api, dan Dinding Penghalang Api
225	Standar Instalasi Rumah Pabrik
232	Standar untuk Proteksi Arsip
241	Standar untuk Pengamanan Proses Konstruksi, Pengubahan, dan Pembongkaran
251	Metode Standar untuk Pengujian Ketahanan Api pada Konstruksi dan Material Bangunan
252	Metode Standar Pengujian Kebakaran Pintu Rakitan
253	Metode Standar Pengujian Fluks Radiant Kritis pada Sistem Penutup Lantai yang Menggunakan Sumber Energi Panas Radiant
255	Metode Standar Pengujian Karakteristik Pembakaran Permukaan Bahan Bangunan
257	Standar Uji Api untuk Rakitan Jendela dan Blok Kaca
259	Metode Standar Pengujian Potensi Panas pada Material Bangunan
260	Metode Standar Sistem Pengujian dan Klasifikasi untuk Ketahanan Penyalaan dari Rokok pada Komponen Furnitur Berlapis

Nomor NFPA	Keterangan
261	Metode Standar Pengujian untuk Menentukan Ketahanan Rakitan Bahan Furnitur Berlapis <i>Mock-Up</i> terhadap Rokok yang Menyala
262	Metode Standar Pengujian untuk <i>Flame Travel</i> dan Asap Kabel dan Kabel untuk Digunakan di Ruang Penanganan Udara
265	Metode Standar Pengujian Kebakaran Guna Mengevaluasi Pertumbuhan Api pada Kebakaran Ruangan yang Berasal dari Tekstil atau Lapisan Dinding Berbahan <i>Vinyl</i> Terekspansi pada Pelapis Dinding dan Panel
268	Metode Uji Standar untuk Menentukan Ignitabilitas Rakitan Dinding Eksterior Menggunakan Sumber Energi Panas Radiant
269	Metode Uji Standar untuk Mengembangkan Data Potensi Racun untuk Digunakan dalam Pemodelan Bahaya Kebakaran
270	Metode Uji Standar untuk Pengukuran Pengaburan Asap Menggunakan Sumber Radiasi Kerucut dalam Satuan Ruang Tertutup
271	Metode Standar Pengujian Laju Pelepasan Panas dan Asap Tampak pada Material dan Produk Menggunakan Kalorimeter Konsumsi Oksigen
274	Metode Uji Standar untuk Mengevaluasi Karakteristik Kinerja Api pada Insulasi Pipa
275	Metode Standar Pengujian Kebakaran untuk Evaluasi Penghalang Termal
276	Metode Standar Pengujian Kebakaran untuk Menentukan Laju Pelepasan Panas pada Rakitan Atap dengan Komponen Bagian Atas Atap yang Mudah Terbakar
285	Metode Uji Kebakaran Standar untuk Mengevaluasi Karakteristik Perambatan Kebakaran pada Rakitan Bagian Luar Dinding Tanpa Bantalan Beban yang Mengandung Komponen Mudah Terbakar
286	Metode Standar Pengujian Kebakaran untuk Mengevaluasi Kontribusi dari Pelapis Interior Dinding dan Plafon terhadap Pertumbuhan Api Ruangan

Nomor NFPA	Keterangan
287	Metode Pengujian Standar untuk Mengukur Sifat Mudah Terbakar Material di Ruang Bersih Menggunakan <i>Fire Propagation Apparatus</i> (FPA)
288	Metode Standar Uji Kebakaran Pintu Kebakaran Horizontal yang Terpasang Horizontal pada Pintu Tahan Api
289	Metode Standar Pengujian Kebakaran untuk Paket Bahan Bakar
290	Standar Pengujian Kebakaran Material Proteksi Pasif untuk Digunakan pada Kontainer LP-Gas
291	Rekomendasi Praktik untuk Pengujian Aliran Kebakaran dan Penandaan Hidran
301	Aturan Keselamatan Hidup terhadap Kebakaran pada Kapal Dagang
302	Standar Proteksi Kebakaran untuk Perahu Motor yang digunakan untuk tujuan Peleisir atau Komersil
303	Standar Perlindungan Kebakaran untuk Pelabuhan dan Pangkalan Kapal
306	Standar untuk Pengendalian Bahaya Gas pada Kapal
307	Standar untuk Konstruksi dan Perlindungan Kebakaran pada Terminal Pelabuhan, <i>Pier</i> , dan <i>Wharf</i>
312	Standar Proteksi Kebakaran Kapal Selama Konstruksi, Pengubahan, Perbaikan dan <i>Lay-Up</i>
318	Standar Proteksi untuk Fasilitas Fabrikasi Semikonduktor
326	Standar Pengamanan Tangki dan Kontainer untuk Aktivitas Masuk, Pembersihan, atau Perbaikan
329	Praktik yang Direkomendasikan untuk Menangani Pelepasan Cairan atau Gas <i>Flammable</i> dan <i>Combustible</i>
385	Standar Kendaraan Tangki untuk Cairan <i>Flammable</i> dan <i>Combustible</i>
400	Kode Material Berbahaya
402	Panduan untuk Operasi Penyelamatan dan Pemadaman Api di Pesawat Terbang
403	Standar Layanan Penyelamatan dan Pemadaman Kebakaran Pesawat di Bandara
405	Standar untuk Keahlian Dasar pada Pemadam Kebakaran Bandara
407	Standar untuk Pelayanan Bahan Bakar Pesawat Terbang

Nomor NFPA	Keterangan
408	Standar untuk Alat Pemadam Api Ringan Pesawat Terbang
409	Standar Hanggar Pesawat Terbang
410	Standar Pemeliharaan Pesawat Terbang
412	Standar untuk Mengevaluasi Peralatan Penyelamatan dan Pemadam Kebakaran Busa pada Pesawat Terbang
414	Standar untuk Kendaraan Penyelamatan dan Pemadam Kebakaran Pesawat Terbang
415	Standar Bangunan Terminal Bandara, Fueling Ramp Drainase, dan Jalan Pemuatan
418	Standar untuk Heliport
422	Panduan Penilaian Respons Kecelakaan/Insiden Pesawat Terbang
423	Standar Konstruksi dan Proteksi pada Fasilitas Uji Mesin Pesawat Terbang
424	Panduan untuk Perencanaan Keadaan Darurat Bandara/ Komunitas
450	Panduan Sistem dan Layanan Medis Darurat
472	Standar Kompetensi Penanggap untuk Material Berbahaya/ Senjata pada Kecelakaan Pemusnahan Massal
473	Standar Kompetensi Personel EMS (<i>Emergency Medical Services</i>) Menangani Insiden yang Melibatkan Bahan Berbahaya/Senjata pada Kecelakaan Pemusnahan Massal
484	Standar untuk Logam Mudah Terbakar
495	Kode Bahan Peledak
496	Standar untuk Pembersihan dan Penutupan Bertekanan pada Peralatan Listrik
497	Rekomendasi Praktik untuk Klasifikasi Cairan Mudah Terbakar, Gas, atau Uap dan Lokasi Berbahaya untuk Instalasi Listrik pada Area Proses Bahan Kimia
498	Standar untuk Penempatan dan Pergantian Aman untuk Kendaraan yang Mengangkut Bahan Peledak
499	Rekomendasi Praktik untuk Klasifikasi Debu Mudah Terbakar dan Lokasi Berbahaya untuk Instalasi Listrik di Area Proses Bahan Kimia
501	Standar untuk Rumah Pabrik

Nomor NFPA	Keterangan
501A	Standar Kriteria Keselamatan Kebakaran untuk Instalasi Rumah Pabrik, Lokasi, dan Komunitas
502	Standar Jalan Terowongan, Jembatan, dan Jalan Raya Akses Terbatas Lainnya
505	Standar Keselamatan Kebakaran untuk Truk Industri Bertenaga termasuk Jenis Penandaan, Area Penggunaan, Pengubahan, Perawatan, dan Operasi
520	Standar untuk Ruang Bawah Tanah
550	Panduan untuk <i>Fire Safety Concept Tree</i>
551	Panduan Evaluasi Penilaian Risiko Kebakaran
555	Panduan Metode untuk Mengevaluasi Potensi <i>Flashover</i> Ruangan
556	Panduan tentang Metode untuk Mengevaluasi Bahaya Kebakaran bagi Kendaraan Penumpang di Jalan
557	Standar untuk Penentuan Beban Kebakaran untuk Digunakan pada Desain Proteksi Kebakaran Struktural
560	Standar Penyimpanan, Penanganan, dan Penggunaan Ethylene Oxide untuk Sterilisasi dan Fumigasi
600	Standar Pemadam Kebakaran Industri
601	Standar Layanan Keamanan dalam Pencegahan Kerugian karena Kebakaran
610	Panduan untuk Operasi Darurat dan Keselamatan di Tempat Olahraga Motor
654	Standar Pencegahan Kebakaran dan Ledakan Debu dari Manufaktur, Pengolahan, dan Penanganan Partikulat Padatan yang Mudah Terbakar
655	Standar Pencegahan Kebakaran dan Ledakan Sulfur
664	Standar Pencegahan Kebakaran dan Ledakan pada Fasilitas Pengolahan dan Pengerjaan Kayu
701	Metode Standar Pengujian Kebakaran untuk Propagasi Api pada Tekstil dan Film
703	Standar untuk Kayu Tahan Api dan Bahan Bangunan Berlapis Tahan Api
704	Sistem Standar untuk Identifikasi Bahaya pada Material untuk Tanggap Darurat
705	Rekomendasi Praktik untuk Uji Lapangan Nyala Api untuk Tekstil dan Material Film Plastik

Nomor NFPA	Keterangan
720	Standar Pemasangan Peralatan Peringatan dan Deteksi Karbon Monoksida
730	Panduan untuk Zona Keamanan
731	Standar untuk Instalasi Sistem Keamanan Gedung Elektronik
750	Standar Sistem Proteksi Kebakaran dengan Kabut Air
780	Standar untuk Pemasangan Sistem Proteksi Petir
790	Standar Kompetensi Pihak Ketiga yang Melakukan Evaluasi Lapangan
791	Praktik dan Prosedur yang Direkomendasikan untuk Evaluasi Peralatan Listrik Tanpa Label
801	Standar Proteksi Kebakaran untuk Fasilitas Penanganan Material Radioaktif
804	Standar Proteksi Kebakaran untuk Unit Pembangkit Listrik Reaktor Air yang ditingkatkan dengan Cahaya
805	Standar Berbasis Kinerja untuk Proteksi Kebakaran pada Pembangkit Listrik Reaktor Ringan
806	Standar Berbasis Kinerja untuk Proteksi Kebakaran pada Proses Perubahan Pembangkit Listrik Reaktor Nuklir Canggih
820	Standar Proteksi Kebakaran di Fasilitas Pengolahan dan Pengumpulan Air Limbah
850	Rekomendasi Praktik untuk Proteksi Kebakaran pada Pembangkit Listrik dan Stasiun Konverter Arus Searah Bertegangan Tinggi
851	Rekomendasi Praktik untuk Proteksi Kebakaran pada Pembangkit Listrik Tenaga Air
853	Standar Instalasi Sistem Stasiun Pengisi Daya Sel berbasis Bahan Bakar
900	Kode Energi Bangunan
901	Klasifikasi Standar untuk Pelaporan Insiden Kebakaran dan Layanan Keadaan Darurat
909	Kode Proteksi untuk Kekayaan Sumber Daya Budaya - Museum, Perpustakaan, dan Tempat Ibadah
914	Kode Proteksi Kebakaran untuk Bangunan Bersejarah
921	Panduan Investigasi Kebakaran dan Ledakan
1000	Standar untuk Sistem Akreditasi dan Sertifikasi Kualifikasi Profesional Pemadam Kebakaran
1001	Standar untuk Kualifikasi Profesional Pemadam Kebakaran

Nomor NFPA	Keterangan
1002	Standar untuk Kualifikasi Profesional Pengemudi/Operator Aparat Pemadam Kebakaran
1003	Standar untuk Kualifikasi Profesional Pemadam Kebakaran Bandara
1005	Standar Kualifikasi Profesional untuk Pemadam Kebakaran Laut bagi Petugas Pemadam Kebakaran di Darat
1006	Standar untuk Kualifikasi Profesional Tenaga Penyelamat Teknis
1021	Standar untuk Kualifikasi Profesional Petugas Pemadam Kebakaran
1026	Standar untuk Kualifikasi Profesional Personel Manajemen Insiden
1031	Standar Kualifikasi Profesional untuk <i>Fire Inspector and Plan Examiner</i>
1033	Standar untuk Kualifikasi Profesional Investigator Kebakaran
1035	Standar Kualifikasi Profesional untuk Pendidik tentang Kebakaran dan Keselamatan Jiwa, Petugas Informasi Publik, Spesialis Intervensi Pemadam Kebakaran Remaja dan Manajer Program Pemadam Kebakaran Remaja
1037	Standar Kualifikasi Profesional untuk <i>Fire Marshal</i>
1041	Standar untuk Kualifikasi Profesional Instruktur Pemadam Kebakaran
1051	Standar untuk Kualifikasi Profesional Pemadam Kebakaran Hutan Liar
1061	Standar untuk Kualifikasi Profesional Personel Telekomunikasi Keselamatan Publik
1071	Standar untuk Kualifikasi Profesional Teknisi Kendaraan Darurat
1081	Standar untuk Kualifikasi Profesional Anggota Pemadam Kebakaran Industri
1122	Kode untuk Model Roket
1123	Kode untuk Pertunjukan Kembang Api
1124	Kode untuk Pembuatan, Transportasi, Penyimpanan dan Penjualan Eceran Kembang Api dan Barang Piroteknik
1125	Kode untuk Pembuatan Model Roket dan Motor Roket Berkekuatan Tinggi

Nomor NFPA	Keterangan
1126	Standar untuk Penggunaan Piroteknik di Depan Audien/ Penonton
1127	Kode untuk Roket Berkekuatan Tinggi
1141	Standar untuk Infrastruktur Proteksi Kebakaran pada Pengembangan Lahan yang Dilakukan di Hutan Liar, Pedesaan, dan Suburban Area
1142	Standar Suplai Air untuk Pemadam Kebakaran Suburban dan Pedesaan
1143	Standar untuk Manajemen Kebakaran Hutan Liar
1144	Standar untuk Mengurangi Bahaya Penyalaan Struktur dari Kebakaran Hutan Liar
1145	Panduan Penggunaan Busa Kelas A dalam Pemadam Kebakaran Struktural Manual
1150	Standar Bahan Kimia Busa untuk Kebakaran pada Bahan Bakar Kelas A
1192	Standar Kendaraan Rekreasi
1194	Standar untuk Parkir Kendaraan Rekreasi & Lahan perkemahan
1201	Standar Penyediaan Layanan Darurat Kepada Publik
1221	Standar Pemasangan, Perawatan, dan Penggunaan Sistem Komunikasi Layanan Darurat
1250	Rekomendasi Praktik dalam Manajemen Risiko Organisasi Layanan Keadaan Darurat dan Kebakaran
1401	Rekomendasi Praktik untuk Pelatihan Laporan dan Catatan Pemadam Kebakaran
1402	Panduan untuk Bangunan Pusat Pelatihan Pemadam Kebakaran
1403	Standar Evolusi Pelatihan Kebakaran Langsung
1404	Standar Pelatihan Perlindungan Pernapasan Pemadam Kebakaran
1405	Panduan untuk Departemen Kebakaran Berbasis Darat yang Merespon Kebakaran Kapal Laut
1407	Standar Pelatihan Kru Intervensi Cepat Pemadam Kebakaran
1410	Standar Pelatihan untuk Operasi Awal Situasi Darurat
1451	Standar Program Pelatihan Pengoperasian Kendaraan Layanan Darurat dan Kebakaran

Nomor NFPA	Keterangan
1452	Panduan untuk Melatih Personel Pemadam Kebakaran untuk Melakukan Survei Keselamatan Kebakaran Tempat Tinggal
1500	Standar Program Keselamatan dan Kesehatan Kerja Departemen Pemadam Kebakaran
1521	Standar Pengawas Keselamatan Departemen Pemadam Kebakaran
1561	Standar Sistem Manajemen Insiden Layanan Darurat dan Komando Keselamatan
1581	Standar Program Pengendalian Infeksi pada Pemadam Kebakaran
1582	Standar Program Medis Kerja yang Komprehensif untuk Departemen Pemadam Kebakaran
1583	Standar Program Kebugaran terkait Kesehatan untuk Anggota Pemadam Kebakaran
1584	Standar Proses Rehabilitasi untuk Anggota Selama Operasi Darurat dan Pelatihan
1600	Standar Manajemen Keadaan Darurat/Bencana & Program Keberlangsungan Usaha
1620	Standar Perencanaan Pra-insiden
1670	Standar Operasi dan Pelatihan untuk Insiden Pencarian dan Penyelamatan Teknis
1710	Standar untuk Pengorganisasian dan Penyebaran Operasi Pemadaman Kebakaran, Operasi Medis Darurat, dan Operasi Khusus kepada Publik oleh Departemen Pemadam Kebakaran
1720	Standar untuk Organisasi dan Penyebaran Operasi Pemadaman Kebakaran, Operasi Medis Darurat, dan Operasi Khusus kepada Publik oleh Relawan Departemen Pemadam Kebakaran
1801	Standar Pencitraan Termal untuk Dinas Pemadam Kebakaran
1851	Standar Pemilihan, Perawatan, dan Pemeliharaan Ensemble Pelindung untuk Pemadam Kebakaran Struktural dan Pemadam Kebakaran Jarak Dekat
1852	Standar Pemilihan, Perawatan, dan Pemeliharaan Alat Bantu Pernapasan Mandiri (SCBA) Sirkuit Terbuka

Nomor NFPA	Keterangan
1855	Standar Pemilihan, Perawatan, dan Pemeliharaan Ensemble Pelindung untuk Insiden Penyelamatan Teknis
1901	Standar untuk Aparat Kebakaran Otomotif
1906	Standar untuk Aparat Kebakaran di Hutan Liar
1911	Standar untuk Inspeksi, Pemeliharaan, Pengujian, dan Penghentian Penggunaan Kendaraan Darurat Aparat Pemadam Kebakaran
1912	Standar untuk Perbaikan Peralatan Pemadam Kebakaran
1917	Standar untuk Ambulans Otomotif
1925	Standar Kapal Pemadam Kebakaran Laut
1931	Standar untuk Pembuatan Desain Tangga Dasar Pemadam Kebakaran
1932	Standar untuk Penggunaan, Pemeliharaan, dan Pengujian Servis Tangga Darat Pemadam Kebakaran
1936	Standar Alat Penyelamatan
1951	Standar Ensemble Pelindung untuk Insiden Penyelamatan Teknis
1952	Standar Pakaian dan Peralatan Pelindung untuk Operasi Air Permukaan
1961	Standar Selang Kebakaran
1962	Standar Perawatan, Penggunaan, Inspeksi, Pengujian Servis, dan Penggantian Selang Kebakaran, Kopling, Nozel, dan Peralatan Selang Kebakaran
1963	Standar untuk Sambungan Selang Kebakaran
1964	Standar untuk Nozel Semprot
1965	Standar untuk Peralatan Selang Kebakaran
1971	Standar pada Pelindung Ensemble untuk Struktur Pemadam Kebakaran dan Pemadam Kebakaran Jarak Dekat
1975	Standar Pakaian Kerja untuk Layanan Keadaan Darurat
1977	Standar Pakaian dan Perlengkapan Pelindung untuk Pemadaman Kebakaran Hutan
1981	Standar Alat Bantu Pernapasan Mandiri (SCBA) Sirkuit Terbuka untuk Layanan Keadaan Darurat
1982	Standar tentang <i>Personal Alert Safety System</i> (PASS)
1983	Standar Tali Pengaman dan Peralatan untuk Layanan Keadaan Darurat

Nomor NFPA	Keterangan
1984	Standar Respirator untuk Operasi Pemadaman Kebakaran Hutan
1989	Standar Kualitas Udara Pernapasan untuk Proteksi Pernapasan pada Layanan Keadaan Darurat
1991	Standar tentang Ensemble Pelindung Uap untuk Keadaan Darurat Material Berbahaya dan Insiden Terorisme CBRN
1992	Standar tentang Ensemble dan Pakaian Pelindung Percikan Cairan untuk Keadaan Darurat Material berbahaya
1994	Standar Ensemble Pelindung untuk Responden Pertama terhadap Keadaan Darurat Material Berbahaya dan Insiden Terorisme CBRN
1999	Standar Pakaian Pelindung untuk Operasi Medis Darurat
2001	Standar <i>Clean Agent</i> Sistem Pemadam Api
2010	Standar untuk Sistem Pemadam Api Aerosol Tetap
2112	Standar <i>Flame-Resistant Garments</i> untuk Proteksi Personel Industri Terhadap <i>Flashfire</i>
2113	Standar Pemilihan, Perawatan, Penggunaan, Pemeliharaan <i>Flame-Resistant Garments</i> untuk Proteksi Personel Industri Terhadap <i>Flashfire</i>
5000	Kode Keselamatan dan Konstruksi Bangunan

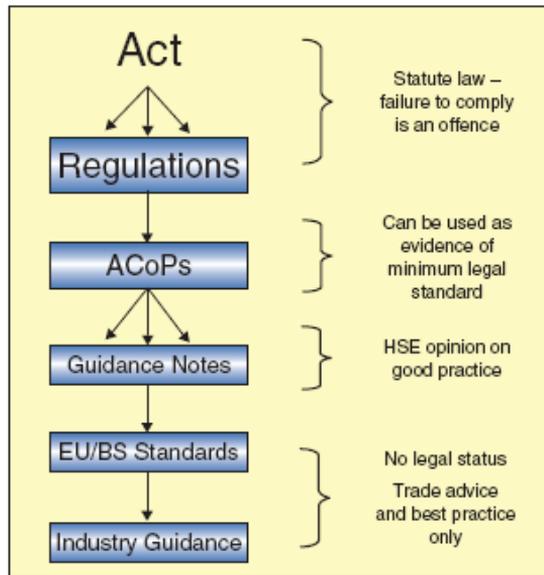
(Sumber: NFPA, *Fire Loss in the US*, 2012)

REGULASI K3 DAN KESELAMATAN KEBAKARAN DI INGGRIS

Hierarki legislasi dan regulasi terkait K3 dan keselamatan kebakaran di Inggris adalah yaitu:

- *The Health and Safety at Work etc. Act 1974*
- *The Management of Health and Safety at Work Regulations 1999*
- *The Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005.*

Hierarki legislasi dan regulasi di Inggris terdiri atas beberapa lapisan sebagaimana disajikan pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Hierarki Legislasi dan Regulasi di Inggris dalam *Introduction to Fire Safety Management*, 1974.

(Sumber: Andrew Furness and Martin Muckett, *Introduction to Fire Safety Management*, 2007)

Berikut ini paparan tentang regulasi terkait K3 di Inggris tersebut.

The Health and Safety at Work etc. Act 1974

The Health and Safety at Work etc. Act 1974 ini dihasilkan sebagai hasil kerja Rubens Institute pada tahun 1972, sebagaimana disajikan pada Gambar 2.2. Pada intinya, undang-undang ini menyebutkan bahwa K3 merupakan tanggung jawab pelbagai pihak, dengan tanggung jawab utama pada:

- perusahaan/pengusaha;
- penghuni bangunan;
- desainer, produsen, pemasok (*supplier*), importer, instalatir;
- pekerja;
- perorangan; dan
- *Health and Safety Committee* (HSC) dan *Health and Safety Executive* (HSE).



Gambar 2.3 *Health and Safety at Work etc. Act 1974*

(Sumber: <http://www.hse.gov.uk/legislation/hswa.pdf>)

Tanggung Jawab Perusahaan/Pengusaha

Tanggung jawab perusahaan/pengusaha adalah:

- menyediakan tempat kerja dan sistem kerja yang aman;
- tempat penyimpanan, penanganan, penggunaan, dan transportasi yang aman untuk semua bahan kimia yang digunakan;
- menyediakan informasi, instruksi kerja dan pelatihan (*training*) yang memadai dan pengawasan yang cukup;
- menyediakan akses dan evakuasi yang memadai;
- menyediakan lingkungan kerja yang aman dan selamat serta fasilitas yang nyaman;
- menyediakan kebijakan K3 secara tertulis jika pekerja lebih dari lima orang; serta
- berkonsultasi dengan serikat pekerja.

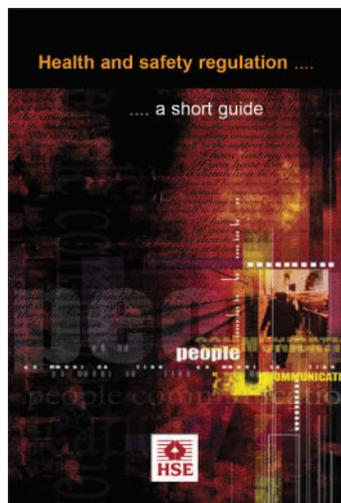
Pengusaha juga bertanggung jawab menjamin keselamatan para pemangku kepentingan lainnya yang terkait dengan pekerjaan perusahaan, seperti:

- kontraktor,
- pengunjung,
- masyarakat,
- petugas gawat darurat, dan
- pejabat pemerintahan.

Perusahaan juga memiliki kewajiban untuk menyediakan peralatan terkait K3 seperti alat pelindung diri (APD).

Petunjuk Praktis yang Disahkan (*Approved Code of Practice*)

Petunjuk praktis ini dikeluarkan oleh *Health and Safety Commission* (HSC) dan disetujui oleh Sekretaris Negara Inggris. Buku ini berisi tentang pedoman praktis terkait pemenuhan terhadap regulasi. Petunjuk praktis ini tidak mengikat secara hukum, namun petunjuk ini merupakan standar minimum yang harus dipenuhi. Petunjuk ini di Inggris memiliki status "*quasi legal*" atau mengikat secara tidak langsung terhadap hukum: jika memenuhi petunjuk praktis ini, pengusaha dianggap sudah memenuhi secara hukum, namun penggunaan petunjuk lain diperbolehkan sepanjang sesuai dengan petunjuk ini.



Gambar 2.4 Contoh *Approved Code of Practice Health and Safety HSC 13*
(Sumber: <http://www.hse.gov.uk/pubns/hsc13.pdf>, 2009a)

The Management of Health and Safety at Work Regulations (MHSW) 1999

Regulasi ini berawal dari buku tahun 1992 yang berstatus statuta, sebagai implementasi dari *European Framework Directive of 1989*. Regulasi ini salah satunya mengatur keselamatan kebakaran secara detail diikuti dengan Petunjuk Praktis untuk melaksanakannya.

The Regulatory Reform Fire Safety Order (RRFSO) 2005

Regulatory Reform Fire Safety Order (RRFSO) yang dikembangkan pada tahun 2005 mulai berlaku 1 Oktober 2006, yang pada saat ini pelbagai regulasi terkait kebakaran diatur kembali. RRFSO membahas ketentuan keselamatan kebakaran untuk seluruh bangunan non-domestik dan merupakan legislasi utama untuk keselamatan kebakaran di Inggris, Skotlandia, dan Irlandia Utara. Secara umum, dinyatakan di dalamnya bahwa tugas dan tanggung jawab pengusaha adalah:

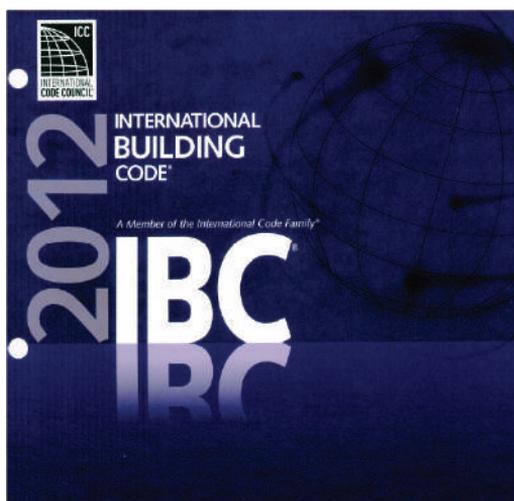
- wajib melakukan kajian risiko kebakaran;
- menetapkan siapa yang bertanggung jawab dalam perusahaan;
- mengendalikan risiko bahan-bahan berbahaya;
- mendeteksi kebakaran dan pemadaman kebakaran;
- menetapkan rute emergensi dan jalan keluar;
- memegang kewenangan inspektor.

INTERNATIONAL BUILDING CODE

International Building Code merupakan standar internasional yang disusun untuk desain dan instalasi pada sistem gedung yang dapat memberikan perlindungan bagi masyarakat termasuk aspek keselamatan dan kesehatan. Standar ini memberikan regulasi minimum untuk sistem gedung yang berbasis preskriptif (*prescriptive based*) dan kinerja (*performance based*).

International Building Code telah memasukkan beberapa pertimbangan terhadap pelbagai hal seperti:

- proteksi terhadap asap dan kebakaran;
- sistem proteksi kebakaran pada gedung;
- jalur evakuasi;
- kemudahan akses;
- konstruksi tahan banjir;
- bahaya terhadap tsunami;
- keselamatan konstruksi.



Gambar 2.5 *International Building Code* (International Code Council, 2012)

(Sumber: <http://archive.org/details/gov.law.icc.ibc>)

Berikut ini dipaparkan bentuk-bentuk *International Building Code* di beberapa negara.

Australia

Australia menetapkan standar mengenai keselamatan kebakaran pada gedung dalam *Building Code Australia* (BCA) yang dikembangkan oleh *The Australian Building Codes Board* (ABCB). ABCB merupakan inisiatif bersama dari semua negara bagian Pemerintah Australia serta beberapa perwakilan dari industri bangunan. Dewan ini menetapkan perjanjian bersama antar pemerintah yang ditetapkan atas nama Pemerintah Australia dan Pemerintah Negara Bagian Australia serta Kementerian Teritorial terkait bangunan gedung. Dewan ini dibentuk tahun 1994, serta dikuatkan kembali oleh Perdana Menteri pada tahun 2006 (2009b).

Tujuan penyusunan BCA adalah memberikan standar yang konsisten, standar minimum keselamatan dan kesehatan yang terkait kebakaran, termasuk keselamatan konstruksi dan bangunan di seluruh Australia. Isi BCA terdiri atas petunjuk teknis untuk desain dan konstruksi bangunan dan struktur lainnya, yaitu resistensi bangunan terhadap api, akses dan jalur evakuasi, peralatan dan layanan, efisiensi energi, serta aspek keselamatan dan kesehatan kerja pada gedung (2009b).

Pada bulan Desember 1994, ABCB mengeluarkan draft yang pertama untuk BCA *performance-based*. BCA versi tahun 1990 tersebut (BCA90) berisi tentang standar teknis untuk bangunan gedung dengan klasifikasi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, dan 10. Dokumen BCA mudian pada versi berikutnya keluar dalam 2 (dua) volume, yaitu Volume 1 untuk Klasifikasi bangunan 2 hingga 9 (bangunan komersial) dan Volume 2 untuk Bangunan Perumahan Klasifikasi bangunan 1 dan 10 (2009b).



Gambar 2.6 Building Code Australia, 2009

(Sumber: Diakses pada laman: <https://www.abcb.gov.au>)

Inggris

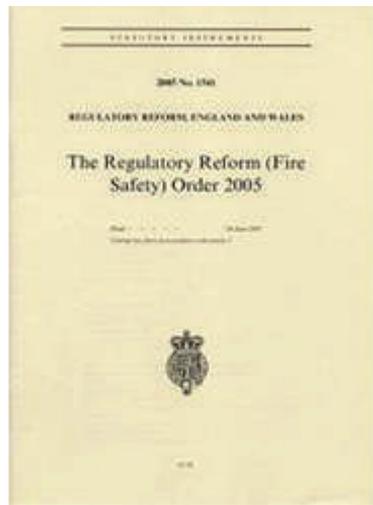
The Regulatory Reform (Fire Safety) Order atau yang lebih dikenal dengan *Fire Safety Order* merupakan standar keselamatan kebakaran di gedung yang berlaku di Inggris dan Wales (Irlandia Utara dan Skotlandia memiliki standar dan peraturan sendiri). Standar keselamatan kebakaran ini meliputi standar *fire precautions* secara umum dan kewajiban apa saja yang harus dipenuhi oleh para *stakeholder* yang terkait untuk melindungi pihak-pihak yang menjadi korban (*relevant person*) pada kejadian kebakaran. Standar keselamatan kebakaran yang berlaku di Inggris ini mewajibkan bahwa setiap langkah *fire precautions* yang diambil harus bersifat masuk akal (*reasonable*) dan mudah dipraktikkan (*practicable*) dalam berbagai kondisi. Standar keselamatan kebakaran ini juga mengatur siapa saja pihak yang bertanggung jawab (*responsible person*) bilamana kejadian kebakaran terjadi.

Adapun pihak yang bertanggung jawab atau dalam standar *Fire Safety Order 2005* ini disebut sebagai *responsible person* adalah pimpinan perusahaan atau organisasi di mana kebakaran tersebut terjadi atau pun pemilik dari perusahaan atau organisasi yang bersangkutan. Dengan diberlakukannya peraturan tersebut secara tegas, setiap pimpinan perusahaan maupun organisasi wajib melakukan *fire risk assessment* untuk mengidentifikasi potensi bahaya kebakaran yang terdapat pada wilayah kerjanya. Pada *Fire Safety Order 2005* ini juga disebutkan bahwa *fire risk assessment* yang dilakukan harus memerhatikan berbagai upaya pencegahan terjadinya kebakaran dengan mereduksi potensi bahaya (*hazard*) dan risiko (sumber ignisi) serta langkah-langkah *fire precautions* yang harus dilakukan untuk memastikan bahwa setiap orang tetap dapat terlindungi bilamana kejadian kebakaran masih saja terjadi.

Adapun elemen-elemen *fire precautions* yang diwajibkan pada *Fire Safety Order 2005* adalah sistem deteksi kebakaran, rute darurat, jalan keluar darurat (*emergency exit*), pemeliharaan (*maintenance*), dan upaya mitigasi. Sementara itu, *fire risk assessment* yang dilakukan wajib mencakup upaya eliminasi atau reduksi potensi risiko kebakaran (sumber ignisi), sistem deteksi dan alarm yang sesuai dengan kondisi gedung, rute dan jalan keluar darurat yang sesuai, tipe APAR serta jumlah APAR yang memadai, tanda kebakaran (*fire signs*) yang memadai, *fire compartment* yang memadai, metode monitoring yang tepat untuk alat proteksi kebakaran yang terinstalasi, sistem proteksi bagi personel pemadam kebakaran, serta instruksi dan training untuk personel pemadam kebakaran.

Isi *Fire Safety Order 2005* secara umum terdiri atas petunjuk teknis untuk desain dan konstruksi bangunan, akses dan jalur evakuasi, peralatan dan layanan, sistem

pemadam dan deteksi kebakaran, pemeliharaan (*maintenance*), rute emergensi bilamana terdapat bahan kimia berbahaya hasil pembakaran, *safety assistance*, dan pelatihan (*training*).



Gambar 2.7 Fire Safety Order England, 2005.

(Sumber : www.legislation.gov.uk)

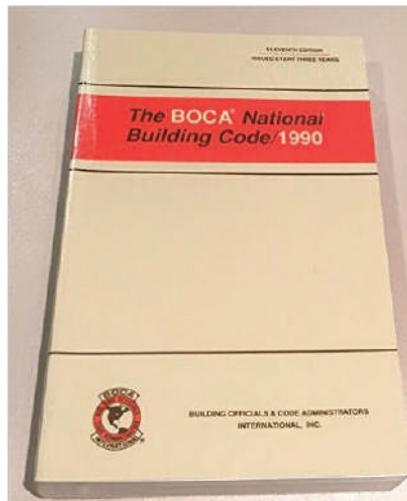
Amerika

The Building Officials and Code Administrators (BOCA) diresmikan pada tahun 1915 di Country Club Hills, Illinois, Amerika Serikat. BOCA merupakan organisasi nirlaba yang beranggotakan para profesional yang berfungsi untuk menyusun regulasi terkait desain dan konstruksi bangunan. Kontraktor, pengusaha manufaktur, arsitek, dan teknisi dapat menjadi anggota BOCA. Organisasi ini sendiri berfungsi sebagai wadah untuk para praktisi di bidang desain dan konstruksi bangunan untuk bertukar ide dan pikiran mengenai regulasi terkait konstruksi bangunan, yang salah satunya mengenai manajemen kebakaran pada gedung. BOCA juga berfungsi untuk memastikan bahwa faktor kesehatan masyarakat, *safety*, dan *welfare* atau kesejahteraan penduduk diperhatikan dalam mendesain dan membangun sebuah gedung.

BOCA sudah mempublikasikan beberapa buku yang berjudul *BOCA National Codes* yang berisi standar-standar detail mengenai aspek-aspek yang harus diperhatikan dalam konstruksi bangunan, misalnya saja dalam mendesain sebuah tangga, harus diperhatikan ketinggian, jarak antar anak tangga, ketebalan tangga, dan juga pegangan (*handrail*) yang sesuai dengan jenis tangga untuk memastikan bahwa keselamatan pengguna dapat terlindungi. Dalam *BOCA National Codes* juga dijelaskan mengenai desain konstruksi bangunan secara umum, sistem mekanikal

pada bangunan atau gedung, pencegahan kebakaran, serta sistem konservasi energi yang dapat diterapkan pada desain bangunan.

Selain memublikasikan buku, BOCA juga merilis berbagai panduan terkait desain dan konstruksi bangunan. BOCA juga mengadakan pelatihan berkala bagi para anggotanya dan menyediakan program konsultasi bagi pemerintah lokal di setiap negara bagian Amerika Serikat.



Gambar 2.8 BOCA National Building Code, 1990.

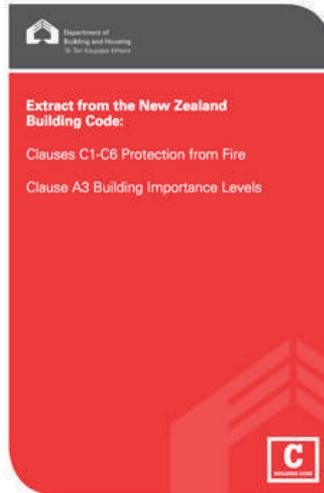
(Sumber : <https://global.ihs.com>)

Selandia Baru

Pemerintah Selandia Baru menetapkan standar keselamatan dan kebakaran di gedung yang dikenal dengan *NZ Building Code* untuk memastikan bahwa desain bangunan di Selandia Baru aman dan sehat bagi penduduknya. *NZ Building Code* ditetapkan pada 14 Februari 2014 dan dilakukan beberapa amandemen yang ditetapkan pada tanggal 14 Agustus 2014. Standar keselamatan dan kebakaran di gedung ini mencakup sistem pencegahan kebakaran, rute emergensi, keselamatan pengguna, perbaikan fasilitas dan juga efisiensi energi.

Tujuan dibentuknya *NZ Building Code* adalah untuk memastikan bahwa setiap komponen sistem yang diaplikasikan pada bangunan dan gedung, seperti instalasi aliran listik dan mekanik sesuai dengan standar keselamatan dan prosedur. Selain itu, *NZ Building Code* juga berfungsi untuk memastikan bahwa setiap orang yang berada di lokasi gedung dapat menyelamatkan atau melarikan diri apabila kebakaran terjadi, termasuk orang-orang dengan disabilitas.

Selain menetapkan standar dan prosedur keselamatan dan kebakaran gedung, *NZ Building Code* juga menyediakan metode verifikasi untuk mengecek apakah desain dan konstruksi bangunan sudah sesuai dengan standar dan prosedur yang ditetapkan. Metode verifikasi tersebut terdiri atas metode kalkulasi, yaitu dengan menggunakan model matematika dan analisis; tes di laboratorium, yaitu dengan menggunakan beberapa komponen dan sistem purwarupa (*prototype*);, serta *in-situ test*, seperti tes uji tekanan pada pipa yang dipasang pada gedung atau bangunan, pengecekan dimensi bangunan, serta tes uji aliran listrik pada bangunan.



Gambar 2.9 New Zealand Building Code, 2014.

(Sumber : <https://www.building.govt.nz/building-code-compliance>)

BAHAYA KEBAKARAN PADA GEDUNG BERTINGKAT

Kebakaran di gedung bertingkat memiliki karakteristik khusus yang berbeda dengan kebakaran di pabrik ataupun bangunan lainnya. Gedung bertingkat seperti gedung perkantoran memiliki penghuni yang beragam dan relatif tidak tetap, baik dari faktor usia, kondisi fisik, kesehatan, pendidikan, ataupun pengetahuan tentang kebakaran. Karakteristik penghuni yang beraneka ragam ini menjadi salah satu faktor kerawanan apabila terjadi kebakaran pada gedung bertingkat. Selain itu, bangunan bertingkat umumnya dilengkapi dengan sekat-sekat atau furnitur yang memenuhi seluruh lantai. Jumlah dan jenis bahan mudah terbakar yang tinggi intensitasnya ini menyebabkan gedung bertingkat rawan penjarangan api. Sementara itu, penyebaran api di gedung bertingkat relatif sangat cepat jika dibandingkan dengan bangunan di atas tanah. Hal ini disebabkan gedung bertingkat memiliki *stack effect*, sehingga penyebaran asap dari lantai bawah ke lantai atas akan berlangsung cepat dan

mempermudah penjarangan api. Selain berbahaya bagi penghuni gedung, asap juga akan mempersulit upaya penyelamatan. Selain itu, upaya penyelamatan dan pemadaman kebakaran juga dipersulit dengan terbatasnya akses masuk maupun keluar bangunan, serta terbatasnya bantuan dari luar jika terjadi kebakaran (Ramli, 2010; Xiuyu, et al, 2012).

Dalam bukunya yang berjudul *Petunjuk Praktis Manajemen Kebakaran*, Soehatman Ramli (2010) menjelaskan bahwa secara umum kebakaran pada gedung bertingkat disebabkan oleh faktor teknis yang berkaitan dengan instalasi listrik, mesin, atau peralatan listrik seperti pembangkit tenaga lift dan elevator. Selain itu, faktor manusia juga menjadi salah satu penyebab kebakaran. Berbagai bahaya kebakaran yang ada menyebabkan gedung bertingkat harus dirancang dengan prinsip pertahanan diri (*self defence*). Hal ini berarti gedung bertingkat harus dirancang dengan pertimbangan tidak adanya bantuan dari luar sehingga gedung bertingkat harus dilengkapi sistem proteksi kebakaran yang handal dan dapat beroperasi dengan sendirinya. Beberapa sistem proteksi kebakaran yang harus dimiliki gedung bertingkat adalah sistem air pemadam, hidran, sistem detektor dan alarm kebakaran, *sprinkler*, *means of escape*, sistem proteksi pasif, dan manajemen kebakaran.

COMPUTERIZED FIRE SAFETY EVALUATION SYSTEM

Computerized Fire Safety Evaluation System (CFSES) merupakan sebuah perangkat lunak komputer untuk mengevaluasi risiko kebakaran pada gedung berdasarkan metodologi evaluasi dalam NFPA 101A: *Guide to Alternative Approaches to Life Safety*. Program CFSES ini dikembangkan oleh Hughes Associates, Inc. yang berada di bawah *National Institute of Standards and Technology* (Hughes Associates, Inc., 2000).

CFSES merupakan pengembangan dari NFPA 101A yang berfokus pada standar penanganan bahaya kebakaran di gedung perkantoran. Pada mulanya, NFPA 101A dikembangkan menjadi *Fire Safety Evaluation System* (FSES) versi 1.0 dan dikembangkan lagi menjadi *Enhanced Fire Safety Evaluation System* (EFSES) versi 1.1B dan versi 1.2. Selanjutnya, sistem tersebut akhirnya dikembangkan secara komputerisasi menjadi *Computerized Fire Safety Evaluation System* (CFSES) versi 1.2.03. pada tahun 2000 (Hughes Associates, Inc. 2000).

CFSES adalah sebuah metodologi yang menyediakan pendekatan multiatribut untuk mengevaluasi performa keselamatan kebakaran secara semikuantitatif. Metode ini bertujuan untuk mempermudah pembuat kebijakan atau regulator untuk

menilai dan menentukan kesesuaian dan pemenuhan keselamatan kebakaran gedung terhadap standar yang berlaku, yaitu NFPA 101 *Life Safety Code*. Selain itu, CFSES juga didesain untuk memberikan informasi kepada pengguna secara efektif dan efisien karena program ini terbentuk dari berbagai standar NFPA seperti NFPA 220 *Standard on Types of Building Construction*, NFPA 13 *Standard for the Installation of Sprinkler System*, NFPA 72 *National Fire Alarm and Signaling Code*, dan NFPA 92 *Standard for Smoke Control Systems*. Akan tetapi, program CFSES ini belum menggabungkan metode perhitungan bahaya kebakaran dengan elemen risiko kebakaran untuk dapat menghasilkan analisis risiko yang menguntungkan. Selain itu, program ini juga kurang efektif bila digunakan untuk menilai keselamatan kebakaran pada bangunan selain perkantoran, seperti rumah sakit atau laboratorium (Watts, 2007).

Menurut NFPA 101A(2013), evaluasi CFSES pada sebuah gedung dilakukan dengan cara membandingkan nilai yang didapat berdasarkan hasil penelitian dengan nilai standar yang harus dipenuhi sesuai dengan NFPA 101 *Life Safety Code*. Dalam CFSES, terdapat dua belas parameter keselamatan untuk menilai keselamatan kebakaran dalam gedung, yaitu konstruksi, segregasi bahaya, bukaan vertikal, *sprinkler*, sistem alarm kebakaran, pendeteksi asap, *interior finish*, pengendalian asap, akses keluar, jalur evakuasi, koridor atau kompartemen, dan pelatihan tanggap darurat. Nilai tiap-tiap parameter ini akan memengaruhi penilaian terhadap kontrol penyebaran api, sistem jalan keluar, dan kondisi keselamatan kebakaran secara umum dalam sebuah gedung bertingkat.



BAB 3

PRINSIP DASAR API DAN KEBAKARAN

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Warid Nurdiansyah, S.K.M., M.O.H.S.Sc.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini pembaca dapat memahami prinsip dasar terbentuknya api, bagaimana proses terjadinya penyebaran api, dan konsep kimiawi api.

PENDAHULUAN

Pemahaman tentang prinsip dasar terbentuknya api dimulai dari bagaimana api terjadi, kemudian menyebar sehingga menyebabkan terjadinya kebakaran merupakan bagian yang sangat penting dalam memahami potensi bahaya kebakaran. Pada bab ini dibahas definisi, teori api, dan konsep kimiawi api.

DEFINISI API

Definisi api (*fire*) dari pelbagai literatur antara lain adalah:

- 'Suatu reaksi kimiawi antara bahan bakar, oksigen, dan terbentuknya panas yang menyebabkan terjadinya ignisi' (Furness & Muckett, 2007);
- 'Reaksi kimiawi oksidasi-reduksi yang menghasilkan panas (*eksotermik*) melibatkan oksidator (umumnya oksigen), reduktor (bahan bakar) yang menghasilkan panas atau energi' (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2003).

Kebakaran terjadi ketika api yang terbentuk mulai tidak terkendali dan menghasilkan reaksi oksidasi-reduksi dan menghasilkan panas (*eksotermik*) secara terus-menerus.

TEORI API

Terdapat tiga teori api yang dapat menjelaskan terjadinya api, yaitu:

- Teori Segitiga Api (*Fire Triangle*)
- Teori Tetrahedron Api (*Fire Tetrahedron*)
- Siklus Api (*Life Cycle of Fire*)

(Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2003)

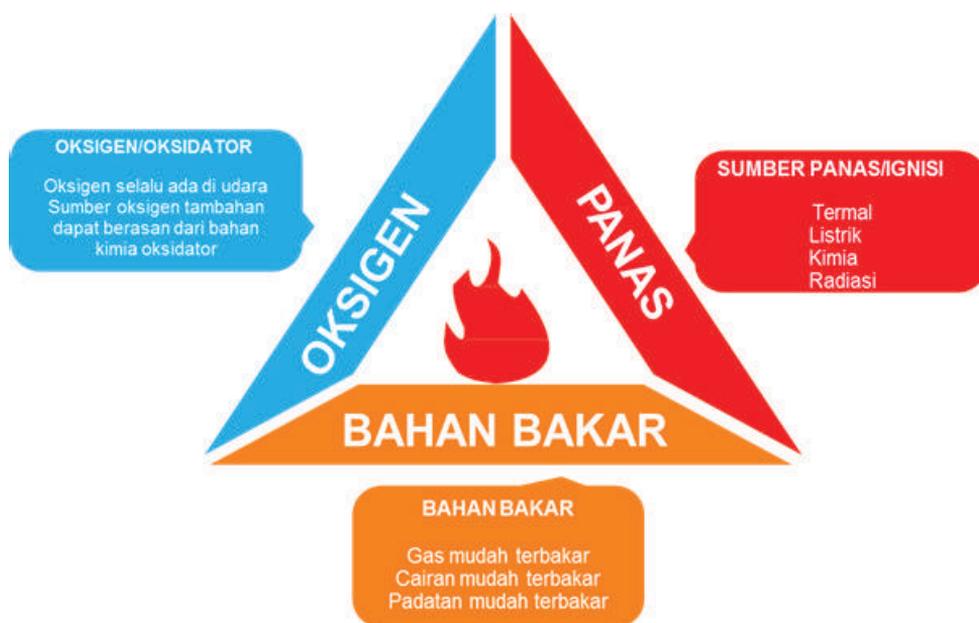
Teori Segitiga Api (*Fire Triangle*)

Teori ini menjelaskan bahwa api dapat terjadi jika terdapat tiga komponen dasar yaitu

- bahan bakar (*fuel*)

- oksigen atau oksidator
- sumber panas atau iginisi (*heat*)

Gambaran segitiga api disajikan pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3.1 Segitiga Api (*Fire Triangle*)

(Sumber: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/20/Fire_triangle.svg/220px-Fire_triangle.svg.png)

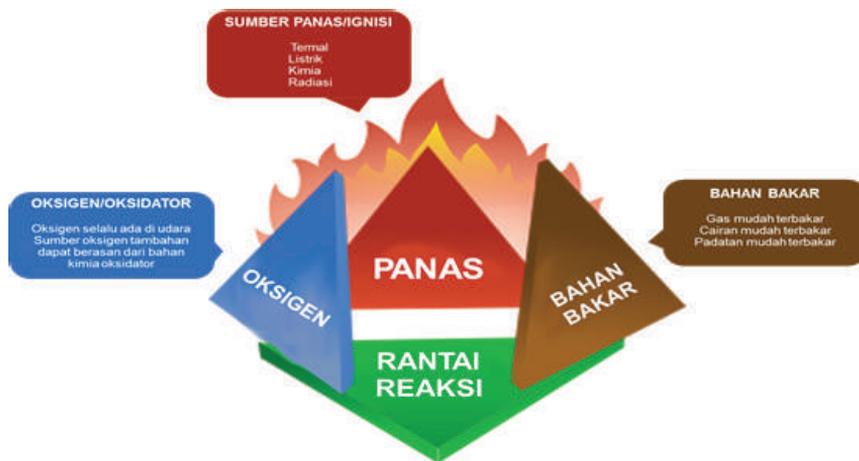
Ketiga komponen tersebut diibaratkan seperti tiga sisi dari sebuah segitiga. Jika masing-masing sisinya tidak menyentuh satu dengan yang lainnya, tidak akan terbentuk segitiga. Api tidak dapat terbentuk tanpa salah satu komponen tersebut. Oleh karena itu, penghilangan salah satu komponen dari komponen segitiga api merupakan prinsip proses pencegahan kebakaran dan pemadaman api. Pencegahan dan pemadaman api dapat dilakukan dengan menghilangkan bahan bakar, misalnya jika terjadi kebocoran bahan yang mudah terbakar, dengan cara menutup katup (*valve*). Jika tidak dapat dilakukan karena terlalu banyak sumber bahan bakar, pencegahan dan pemadaman api dapat dilakukan dengan menghilangkan sumber panas, misalnya dengan menggunakan air. Cara lain untuk mencegah dan memadamkan kebakaran adalah menghalangi atau menghentikan suplai oksigen dengan cara memberikan *foam* atau penambahan gas *inert*.

Menurut Davletshina dan Cheremisinoff (1998), pada perkembangan selanjutnya teori *fire triangle* mengalami sedikit pembaruan. Oksigen diperbaharui dengan oksidator untuk menghindari anggapan bahwa sumber oksigen untuk

terjadinya api hanya bersumber dari atmosfer. Selain itu, walaupun oksigen merupakan oksidator yang umum ditemui, oksidator bukan hanya oksigen. Panas diperbarui dengan energi karena panas hanya salah satu bentuk energi. Sementara itu, yang dibutuhkan untuk terjadinya kebakaran adalah energi. Oleh karena itu, teori *fire triangle* yang terbaru terdiri atas bahan bakar (*fuel*), oksidator, dan energi (Davletshina & Cheremisinoff, 1998).

Teori Tetrahedron Api (*Fire Tetrahedron*)

Teori ini merupakan pembaruan dari teori segitiga api dengan adanya satu komponen tambahan untuk menunjang terjadinya api, yaitu reaksi kimia berantai. Gambar tetrahedron api disajikan pada Gambar 3.2 berikut.

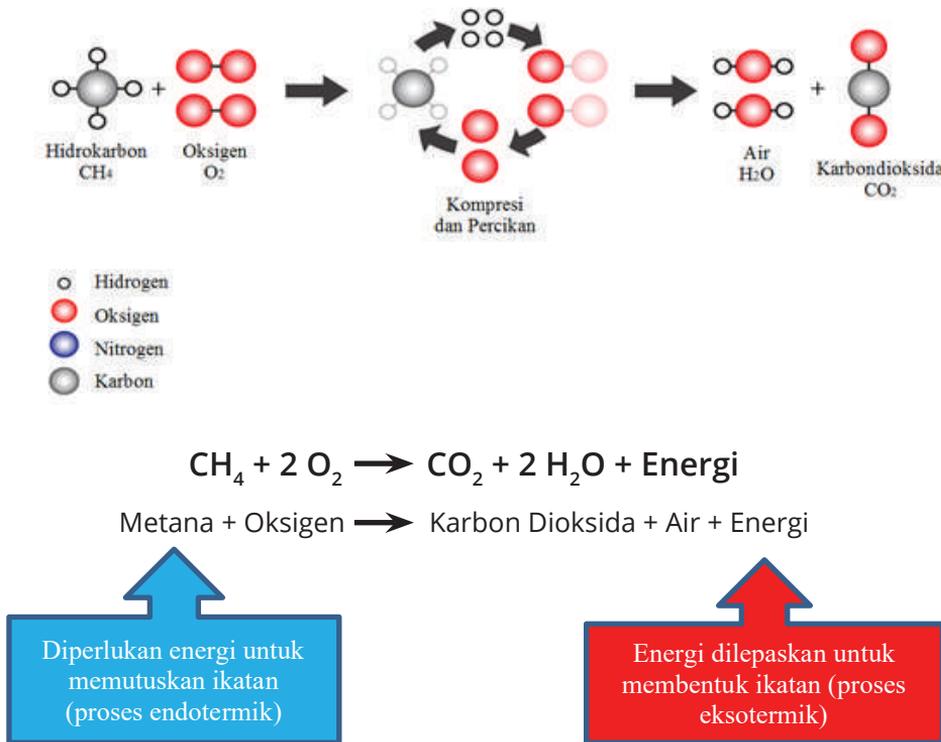


Gambar 3.2 Teori Tetrahedron Api

(Sumber: http://spacetheology.blogspot.com/2012/10/oxygen-and-fire_9.html)

Teori ini menyatakan bahwa ketika energi diberikan pada bahan bakar seperti hidrokarbon, beberapa ikatan karbon dengan karbon terputus dan menghasilkan radikal bebas. Sumber energi tersebut memberikan energi untuk memutus rantai karbon dengan hidrogen sehingga menghasilkan radikal bebas yang lebih banyak. Rantai oksigen dengan oksigen juga terputus dan menghasilkan radikal oksida. Penggabungan radikal bebas dengan radikal bebas lainnya atau dengan gugus fungsi terjadi jika jarak antarradikal bebas cukup dekat. Pada proses pemutusan rantai, terjadi pelepasan energi, yang kemudian energi yang terlepas tersebut akan menjadi sumber energi untuk memutuskan rantai lainnya dan melepaskan lebih banyak energi. Kebakaran terjadi secara berantai dengan melepaskan lebih banyak energi lagi yang kemudian disebut sebagai **reaksi berantai**. Proses tersebut baru akan berhenti jika bahan bakar telah habis terbakar, oksigen telah habis, energi

telah diserap, atau reaksi rantai terputus (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2003). Reaksi kimiawi gas metana sebagai contoh proses terjadinya api disajikan pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Gambar Reaksi Pembakaran

(Sumber: <http://www.sportrider.com>)

Siklus Api (Life Cycle of Fire)

Teori ini menyatakan bahwa proses pembakaran terjadi dalam enam tahap, yaitu

- masukan/*input* (*heat*)
- bahan bakar (*fuel*)
- oksigen
- pencampuran (*proportioning*)
- pencampuran (*mixing*)
- keberlanjutan penyalaan (*ignition continuity*)

(Davletshina & Cheremisinoff, 1988)

Siklus Api disajikan pada Gambar 3.4. Tiga tahap awal dalam teori ini sama dengan komponen yang terdapat dalam segitiga api, yaitu panas, bahan bakar, dan oksigen.

- Tahap pertama adalah masuknya panas (*input heat*), yaitu sejumlah panas yang dibutuhkan untuk melepaskan uap dari padatan atau cairan, serta sebagai sumber penyalaan (*ignition source*). Panas yang masuk harus cukup untuk memproduksi uap yang dibutuhkan dalam menyusun campuran yang dapat menyala (*ignitable mixture*) dengan udara dekat sumber bahan bakar secara terus-menerus. Oleh karena itu, panas yang masuk harus sesuai dengan temperatur penyalaan (*ignition temperature*) bahan bakar (Davletshina & Cheremisinoff, 1988).
- Tahap kedua adalah bahan bakar (*fuel*), yang pada dasarnya sama dengan konsep bahan bakar pada *fire triangle* atau *tetrahedron of fire*. Bahan bakar harus pada susunan yang sesuai untuk terbakar, yaitu bahan bakar sudah menguap atau jika pada logam, hampir seluruh potongan telah mencapai temperatur yang sesuai untuk memulai pembakaran (Davletshina & Cheremisinoff, 1988).
- Tahap ketiga adalah oksigen. Menurut Davletshina and Cheremisinoff (1988), teori ini hanya menyangkut oksigen di atmosfer serta mengabaikan oksigen dan halogen yang dihasilkan dari oksidator. Hal tersebut terjadi karena pusat dari teori ini adalah penyebaran api (*diffusion flame*), di mana api (*flame*) dihasilkan dari campuran spontan dari uap atau gas bahan bakar dengan udara (Davletshina & Cheremisinoff, 1988).
- Tahap keempat adalah persentuhan (*proportioning*) atau peristiwa benturan antara oksigen dan molekul bahan bakar (persentuhan antara kaki oksidator dengan kaki bahan bakar pada teori segitiga api). Kecepatan molekul dan jumlah benturan bergantung pada panas dari campuran oksigen dan bahan bakar: jika campuran lebih panas, kecepatan lebih tinggi. Hal tersebut sesuai dengan hukum dalam kimia yang menyatakan bahwa kecepatan reaksi kimia menjadi dua kali lipat untuk setiap peningkatan temperatur sebesar 18°F (10°C) (Davletshina & Cheremisinoff, 1988).
- Tahap kelima adalah pencampuran (*mixing*), yaitu pencampuran yang sesuai setelah panas diterapkan pada bahan bakar sehingga menghasilkan uap yang dibutuhkan untuk pembakaran (Davletshina & Cheremisinoff, 1988). Pada *mixing* ini rasio bahan bakar terhadap oksigen harus benar sebelum penyalaan terjadi (*flammable range*).
- Tahap terakhir adalah kelanjutan ignisi (*ignition continuity*). Dalam kebakaran, energi kimia diubah menjadi panas. Panas yang dipancarkan dari api kembali ke permukaan bahan bakar. Panas tersebut harus cukup untuk menjadi panas yang masuk (*input heat*) demi berlanjutnya siklus kebakaran. Jika laju panas yang diubah lebih cepat dari laju panas yang hilang, panas dari kebakaran akan meningkat. Hal tersebut mengakibatkan proses reaksi berlangsung lebih cepat dan laju reaksi meningkat. Ketika laju konversi dari energi kimia menurun di bawah laju penghamburan, api akan padam. Oleh karena itu, dapat dikatakan

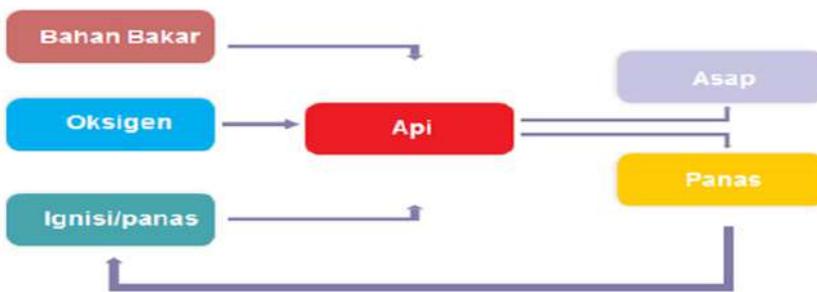
bahwa bagian terakhir, *ignition continuity* merupakan langkah pertama untuk siklus kebakaran selanjutnya, yaitu masuknya panas (*input heat*) (Davletshina & Cheremisinoff, 1988).



Gambar 3.4 Siklus Api

(Sumber: Davletshina & Cheremisinoff, 1988)

Proses siklus api ini juga dapat digambarkan sebagai skema pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skema Siklus Api

(Sumber: Furness & Muckett, 2007)

Sumber Penyalaan (*Ignition Sources*)

Sumber panas untuk memulai terjadinya api umumnya berasal dari sumber ignisi (*ignition source*). Kebakaran dimulai dari terbentuknya api yang kemudian membutuhkan sumber penyalaan sampai kebakaran tersebut mampu

mempertahankan sendiri reaksi kimianya. Sumber penyalaaan ditemukan pada setiap tempat kerja ataupun di rumah. Sumber penyalaaan dapat berasal dari berbagai bentuk, antara lain:

- Termal,
- Kimia,
- Listrik,
- Mekanik, dan
- Radiasi.

Beberapa contoh sumber penyalaaan disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Sumber-sumber Penyalaaan (Ignisi)

Sumber Penyalaaan	Contoh
Termal	Api terbuka
	Rokok
	Korek api
	Kompore
	Api lilin
	Permukaan panas
	Pengelasan
	Percikan panas
	Oven, tungku, insinerator, <i>boiler</i> , mesin pembakar (<i>combustion engine</i>)
Kimia	Reaksi kimiawi
	Bahan kimia inkompatibel (<i>Incompatible chemicals</i>)
	Penyalaaan spontan (<i>Spontaneous combustion</i>)
	Zat piroforik
Listrik	Kompresi campuran zat mudah terbakar
	Loncatan listrik dari sumber arus listrik
	Loncatan listrik dari listrik statis (Elektrostatik)
	Korsleting listrik
	Sambaran petir yang tidak tersalurkan
	Distribusi listrik yang tidak merata
	Peralatan listrik
Penghangat listrik	
Mekanik	Gesekan panas (<i>Frictional Heating</i>)
	Bunga api mekanik (<i>Frictional impact</i>)
Radiasi	Radiasi gelombang non-ionisasi
	Gelombang elektromagnetik

Sumber Penyalaan	Contoh
	Gelombang cahaya ultraviolet, inframerah, laser Radiasi ionisasi (radiasi nuklir)

(Sumber: Ramli, 2010; Davletshina & Cheremisinoff, 1998; Furness & Muckett, 2007)

Tabel 3.2 Sumber-sumber Pengapian

Sumber Pengapian	
Sumber Mekanik	
Gesekan	Logam ke logam Logam ke latu <i>Rotary impact</i> Roda abrasif <i>Buffing disk</i> Alat, bor <i>Boot studs</i> Bantalan Bagian mesin yang tidak sejajar Bagian mesin rusak Tersumbat material Penyesuaian daya <i>drive</i> yang buruk Penyesuaian konveyor yang buruk
Rudal	Rudal panas Gesekan rudal
Fraktur Logam	Logam retak
Sumber Listrik	
Arus Listrik	<i>Switch gear</i> <i>Cable break</i> Starter kendaraan Lampu rusak Motor listrik
Elektrostatik	Kecepatan cairan <i>Surface charge</i> <i>Personal charge</i> Menggosok plastik atau karet Semprotan cair <i>Mist formation</i>

Sumber Pengapian

Petir	Pengaliran air
	Aliran bubuk <i>Water settling</i>
	<i>Direct strike</i> <i>Hot spot</i>
Arus Liar	Tegangan induksi Jalur kereta api
	Kabel rusak Pengelasan busur
Frekuensi Radio	Koneksi udara <i>Intermittent contact</i>

Sumber Panas

Permukaan Panas	<i>Hot spot</i>
Panas	<i>Catalyst hot spot</i>
	Partikel pijar dari insenerator, <i>flarestacks</i> , cerobong asap
	Knalpot kendaraan
	Pipa uap
	Lapisan tahan api, selang panas
	Logam asing dalam peralatan penghancur dan penggiling
	Pemanas listrik
	Merokok
	Bara menyala, <i>brands</i>
	Peralatan pengering
	Logam cair atau kaca
	<i>Heat transfer salt</i>
	Jalur transfer minyak/garam
	Saluran boiler atau <i>flues</i>
	Lampu listrik
	Peralatan dengan proses panas
	Pengelasan logam
Induksi mematri	
<i>Hot plates</i>	
<i>Besi solder</i>	
Pemanasan sendiri	<i>Oksidasi</i> <i>Reaksi</i>

Sumber Pengapian

Api	karbon aktif Lampu pilot Api primer yang melibatkan cairan (<i>unning</i> atau <i>pool</i>), padat atau gas Korek api Pemotongan, pengelasan Pemanas gas portabel kompur, gas alam, LPG, minyak atau bahan bakar padat Pembakar Pembakaran Obor las Mematri
Kompresi	Perubahan tekanan Piston
Mesin	<i>Exhaust</i> <i>Engine overrun</i> Semprotan hidrolik ke pipa masuk udara
Difusi	Perubahan tekanan tinggi

Sumber Kimia

Peroksida	Pelepasan oksigen Tidak stabil Penguraian
Polimerisasi	Reaksi eksotermik Katalis <i>Lack of inhibitor</i> Kristalisasi
Spontan	<i>Deposit piroforik</i> <i>Deposits</i> Air reaktif Sulfida Kain berminyak, impregnasi minyak tertinggal <i>Heat transfer salt</i>

Reaksi dengan Zat Lainnya

<i>Reaksi termite</i>	Karat Reaksi eksotermik dengan alumunium, paduan alumunium
Zat tidak stabil	<i>Acetylides</i>
Dekomposisi	<i>Initiator</i>

Sumber Pengapian	
	Temperatur
	Katalis

(Sumber: Carson & Mumford, 2002)

Sumber Bahan Bakar

Sumber-sumber bahan yang dapat menjadi bahan bakar meliputi:

- Gas,
- Cairan, dan
- Padatan.

Tabel 3.3 Sumber-sumber Bahan Bakar Berdasarkan Sifat Fisiknya

Sumber Bahan Bakar	Contoh
Gas	Gas mudah terbakar (LPG, asetilen)
Cairan	Cairan mudah terbakar (bensin, spirtus, alkohol, parafin, minyak tanah)
	Pelarut mudah terbakar (<i>cat, thinners, paint removers</i>)
Padatan	Padatan mudah terbakar (batu bara)
	Kayu
	Plastik
	Karet
	Bahan kemasan (<i>packaging materials</i>)
	Debu (debu umum, serpihan kayu, tepung terigu)
	Karbohidrat (tepung terigu, gula)
	Kertas
	Bahan-bahan furnitur (polimer, kayu, karpet, tekstil)

(Sumber: Ramli, 2010; Davletshina & Cheremisinoff, 1998; Furness & Muckett, 2007)

Simbol gas, cairan, dan padatan mudah terbakar disajikan pada gambar berikut.



Gambar 3.6 Simbol Gas Mudah Terbakar



Gambar 3.7 Simbol Cairan Mudah Terbakar



Gambar 3.8 Simbol Padatan Mudah Terbakar

Klasifikasi sumber bahan bakar juga dapat dikategorikan berdasarkan sifat kimiawinya, yaitu sebagai berikut (Davletshina & Cheremisinoff, 1998).

Tabel 3.4 Sumber Bahan Bakar Berdasarkan Sifat Kimiawinya

No	Bahan Kimia	Contoh
1.	Unsur	Logam: natrium, magnesium Nonlogam: karbon, sulfur, fospor
2.	Hidrokarbon	Gas: gas alam (campuran metana, etana); LPG (campuran propana dan butana) Cair: bensin (campuran pentana, heksana, heptana, octana, nonana, dan dekana)
3.	Karbohidrat	Selulosa Tepung terigu Kertas
4.	Gas dengan rantai kovalen	Hidrogen sulfida Karbon monoksida Amoniak Hidrogen sianida

No	Bahan Kimia	Contoh
5.	Senyawa organik lainnya	Kayu Polimer Plastik Wool

(Sumber: Davletshina & Cheremisinoff, 1998)

Oksigen atau Oksidator

Oksigen terkandung di udara yang kita hirup sekitar 19,6%–21%, sehingga oksigen selalu berada di mana pun manusia beraktivitas. Suplai oksigen dapat memengaruhi perilaku api, yaitu meningkatkan kebakaran. Kondisi terjadinya peningkatan konsentrasi oksigen antara lain ventilasi, sistem pengatur udara, dan silinder oksigen, misalnya untuk penggunaan medis dan pekerjaan pengelasan dan pemotongan logam (Furness & Muckett, 2007).

Kebakaran akibat cairan mudah terbakar dapat dipadamkan salah satu caranya dengan menurunkan konsentrasi oksigen hingga 12–16%. Kebakaran dari padatan memerlukan penurunan konsentrasi oksigen di bawah 5% untuk bara di permukaan (*surface smoldering*) dan di bawah 2% untuk bara yang mendalam (*deep-seated smoldering*). Metode untuk mencegah kebakaran pada penyimpanan cairan mudah terbakar pada tangki salah satunya dengan sistem penambahan gas *inert* seperti nitrogen. Kebakaran yang terjadi pada cairan mudah terbakar dengan sistem *inert* memerlukan penggunaan pemadam *foam* untuk memisahkan api dan udara (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2003).



Gambar 3.9 Simbol Oksidator

Bahan-bahan kimia dapat pula melepaskan oksigen pada reaksi kimia atau disebut sebagai oksidator. Contoh-contoh oksidator antara lain adalah amonium nitrat (bahan pupuk), natrium klorat (bahan pestisida), hidrogen peroksida (bahan untuk perawatan dan pengecatan rambut, bahan untuk pengolahan air limbah), dan senyawaan kromat. Oksidator dapat mengalami proses reaksi eksotermis yang sangat kuat jika kontak dengan bahan bakar yang mudah terbakar. Oksidator juga dapat meningkatkan kemudahan terbakar suatu bahan bakar yang awalnya tidak mudah terbakar. Penyimpanan oksidator harus dijauhkan dan disimpan terpisah dari bahan-bahan yang mudah terbakar (Furness & Muckett, 2007).

KLASIFIKASI KEBAKARAN

Klasifikasi kebakaran adalah penggolongan kebakaran berdasarkan jenis sumber bahan bakarnya. Klasifikasi kebakaran membantu untuk menentukan jenis pemadam yang sesuai dengan klasifikasi kebakaran.

Klasifikasi kebakaran pada beberapa negara sangat berbeda sebagaimana berikut.

- Amerika: NFPA 10 Standard for Portable Fire Extinguishers
- Inggris: British Standard EN:2 1992: *Classification of fires*
- Indonesia: berdasarkan Permenaker No. 04/Men/1980

Amerika

Amerika mengklasifikasikan kebakaran berdasarkan NFPA 10 sebagaimana disajikan pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.5 Klasifikasi Api Berdasarkan Sumber Bahan Bakarnya (NFPA 10)

Klasifikasi	Gambar	Deskripsi	Contoh
A		Kelas A: Bahan yang jika terbakar meninggalkan ABU (<i>ASH</i>)	Kayu, tekstil, kertas, serta senyawa organik
B		Kelas B: Cairan mudah terbakar atau cairan yang dapat mengalami pendidihan (<i>BOIL</i>)	Gas mudah terbakar, bensin, alkohol, minyak tanah
C		Kelas C: Listrik (<i>CURRENT</i>)	Kebakaran yang melibatkan peralatan listrik; kecuali jika peralatan listrik tersebut sudah dihilangkan listriknya, kebakaran dapat menjadi Kelas A atau B

Klasifikasi	Gambar	Deskripsi	Contoh
D		Kelas D: Kebakaran dari logam	Natrium, magnesium, titanium, litium, dan kalium
K		Kelas K: Kebakaran dari minyak goreng untuk memasak (<i>cooking oil</i>)	Minyak goreng

Inggris

Klasifikasi kebakaran di Inggris berdasarkan BS 2: 1992 adalah sebagai berikut (British Standard BS EN:2, 1992).

Tabel 3.6 Klasifikasi Kebakaran Berdasarkan Sistem Eropa

Kelas	Bahan yang Terlibat
A	Padat (bukan logam)
B	Cairan
C	Gas
D	Logam

(Sumber: Nedved & Imamkhasani, 1991, British Standard BS EN:2, 1992)

Indonesia

Klasifikasi kebakaran di Indonesia dituangkan dalam Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi RI No. Per.04/Men/1980 tentang Syarat-syarat Pemasangan dan Pemeliharaan Alat Pemadam Api Ringan yang diadopsi dari NFPA 10, yaitu:

- Kebakaran bahan padat kecuali logam (Golongan A);
- Kebakaran bahan cair atau gas yang mudah terbakar (Golongan B);
- Kebakaran instalasi listrik bertegangan (Golongan C);
- Kebakaran logam (Golongan D).

Tabel 3.7 Klasifikasi Kebakaran di Indonesia

Klasifikasi	Deskripsi	Contoh
A	Kelas A: Bahan padat, kecuali logam, jika terbakar meninggalkan ABU (ASH)	Kayu, tekstil, kertas, dan senyawa organik

Klasifikasi	Deskripsi	Contoh
B	Kelas B: Cairan atau gas mudah terbakar atau cairan yang dapat mengalami pendidihan (<i>BOIL</i>)	Gas mudah terbakar, bensin, alkohol, minyak tanah
C	Kelas C: Listrik bertegangan (<i>CURRENT</i>)	Kebakaran yang melibatkan peralatan listrik; kecuali jika peralatan listrik tsb. sudah dihilangkan listriknya, kebakaran dapat menjadi Kelas A atau B
D	Kelas D: kebakaran dari logam	Natrium, magnesium, titanium, litium, dan kalium

KONSEP KIMIAWI DALAM KEBAKARAN

Beberapa informasi konsep kimiawi yang berguna untuk memahami proses kebakaran antara lain adalah

- kerapatan uap (*vapour density*),
- titik nyala (*flash point*),
- *minimum ignition energy*,
- *autoignition temperature*,
- *flammability limit*, dan
- *burning velocity*.

Karakteristik tingginya bahaya kebakaran suatu bahan bakar diindikasikan jika bahan tersebut memiliki sifat-sifat sebagai berikut.

- Nilai kisaran batas nyala lebar.
- *Autoignition temperature* rendah.
- Titik nyala rendah.
- *Minimum ignition energy* rendah.

(Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2003)

Kondisi lain yang dapat menunjang proses kebakaran adalah sebagai berikut.

- Kondisi kaya oksigen (*oxygen enriched atmosphere*).
- Kenaikan temperatur dari bahan bakar.

Kerapatan Uap (*Vapor Density*) dan Tekanan Uap (*Vapor Pressure*)

Kerapatan Uap (*Vapor density*) merupakan sifat fisik yang penting dalam proteksi kebakaran. Kerapatan uap adalah ukuran perbandingan relatif kerapatan (*density*) antara uap bahan bakar dibandingkan udara dengan persamaan berikut.

$$\text{Kerapatan Uap} = \frac{\text{Berat Molekul Bahan Bakar}}{29 (\text{Berat Molekul udara})}$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa bahan bakar dengan berat molekul 29 akan memiliki kerapatan uap 1,0. Bahan bakar dengan berat molekul yang lebih tinggi (> 29) akan memberikan kerapatan uap lebih dari 1,0 dan *vapor* tersebut akan menyentuh tanah. Bahan bakar dengan kerapatan uap kurang dari 1,0 akan lebih ringan dari udara sehingga cenderung berada di bagian atas lapisan udara. Makin rendah nilai kerapatan uap, makin mudah dan cepat suatu senyawaan menguap ke bagian atas dari komposisi udara. Kerapatan uap dari beberapa bahan bakar dapat dilihat dalam Tabel 3.7 berikut.

Tabel 3.8 Kerapatan Uap Bahan Bakar

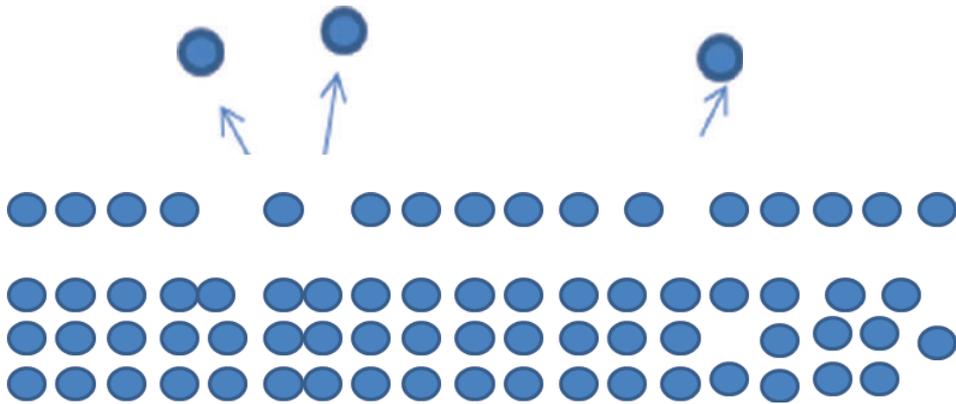
Material	Rasio Kerapatan Uap	Keterangan
Hidrogen (H)	0,069	Lebih ringan dari udara
Metana (C1)	0,554	Lebih ringan dari udara
Udara	1,00	Pedoman
Etana (C2)	1,035	Lebih berat dari udara
Propana (C3)	1,56	Lebih berat dari udara
Butana (C4)	2,01	Lebih berat dari udara
Pentana (C5)	2,48	Lebih berat dari udara
Heksana (C6)	2,97	Lebih berat dari udara
Heptana (C7)	3,45	Lebih berat dari udara

(Sumber: Nolan, 1996)

Tekanan Uap (*Vapor Pressure*) adalah tekanan ketika uap mengalami evaporasi dari suatu bahan bakar cairan maupun padatan yang disebabkan oleh pergerakan atom-atom dan molekul-molekulnya dari permukaan cairan atau padatan tersebut. Satuan tekanan uap adalah satuan tekanan seperti paskal (Pa). Tekanan uap menentukan jumlah dan laju kecepatan pergerakan atom dan molekul tersebut ke

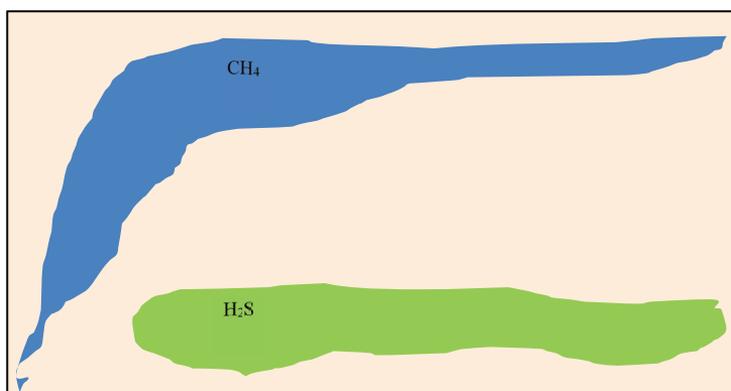
udara, semakin tinggi nilai tekanan uap pada suatu kondisi temperatur tertentu, makin mudah senyawaan tersebut menguap sehingga semakin mudah bahan bakar tersebut berada di udara.

Atom-atom atau molekul yang lebih energetik akan bergerak keluar dari permukaan



Gambar 3.10 Tekanan Uap dan Pergerakan Atom dan Molekul

Informasi kerapatan uap dan tekanan uap sangat penting dalam proteksi kebakaran karena menentukan kemudahan bahan tersebut untuk menguap dan menentukan lokasi di mana bahan bakar tersebut berada. Kebocoran gas metana yang lebih ringan dari udara akan berada di bagian atas lokasi, sementara kebocoran hidrogen sulfida yang lebih berat dari udara akan berada di permukaan tanah (disajikan pada Gambar 3.11).



Gambar 3.11 Ilustrasi Kebocoran Gas Metana dan Hidrogen Sulfida

Titik Nyala (*Flash Point*)

Titik nyala atau *flash point* adalah temperatur terendah di mana cairan memberikan uap yang cukup dan dapat menyala sekejap (*flash*) dengan adanya

sumber panas atau ignisi (Furness & Muckett, 2007). Titik nyala ditentukan dengan menggunakan metode standar di mana sedikit cairan dipanaskan secara perlahan sehingga terbentuk uap dari cairan tersebut yang kemudian diberikan sumber ignisi hingga nyala sekejap terjadi. Metode standar yang digunakan untuk menentukan titik nyala adalah *Open Cup* dan *Closed Cup* dengan perbedaan pada peralatan dan metode yang digunakan untuk mengukur titik nyala (*flash point*). Hasil pengukuran dengan metode *Open Cup* umumnya berada sedikit di atas *Closed Cup*. Suatu bahan bakar cair dikatakan mudah terbakar jika cairan tersebut memiliki titik nyala < 37,8°C. Titik nyala pada beberapa material dapat dilihat dalam Tabel 3.8 berikut.

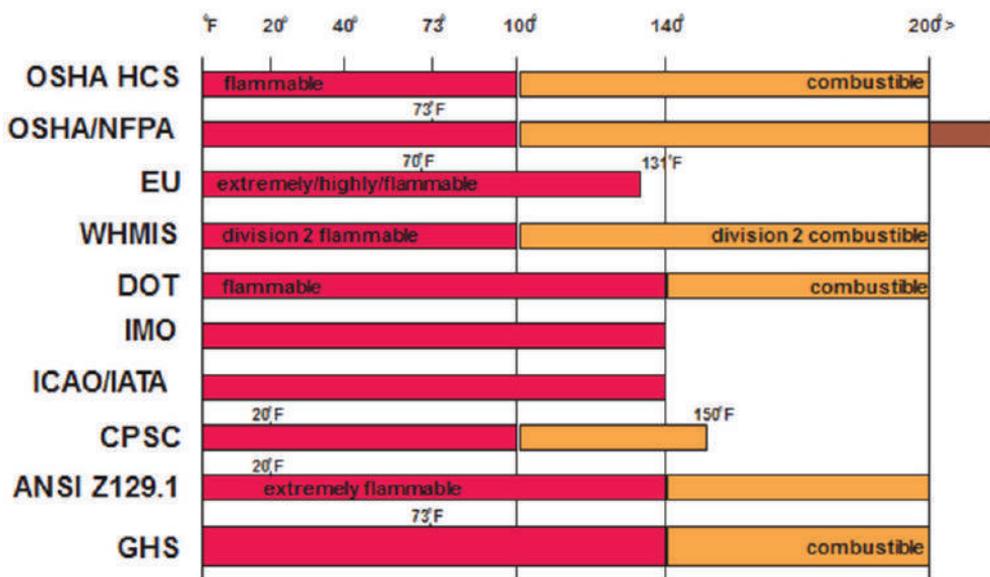
Tabel 3.9 Titik Nyala Cairan

Nama Pelarut	Berat Molekul	Titik Nyala (°F)	Autoignisi (°F)	LEL % Berdasarkan Volume	UEL% Berdasarkan Volume	Titik didih (°F)
Aseton	58	-4	869	2.5	12.8	133
Amonia	17	Gas	1204	16	25	-28
Benzena	78	12	928	1.2	7.8	176
n-Butil Alkohol	74	98	650	1.4	11.2	243
Karbon Disulfida	76	-22	194	1.3	50.0	115
Sikloheksana	84	-4	473	1.3	8.0	179
Etana	30	-275	959	3	12.4	-128
Etilen	287	-250	914	2.7	36	-155
Bensin	Mix	-45	536	1.4	7.6	Range
n-Heptana	100	25	399	1.0	6.7	209
n-Heksana	86	-7	437	1.1	7.5	156
Minyak Tanah	Mix	100-162	410	0.7	5.0	Range
Metana	16	Gas	1004	5	15	-2,59
Naptha (VM&P reguler)	Mix	28	450	0.9	6.0	203-320
Propana	44	-220	842	2.1	9.5	-44
n-Propil Alkohol	60	74	775	2.2	13.7	207
Toluena	92	40	896	1.1	7.1	231
Turpentin	136	95	488	0.8		300
Vinil Asetat	86	18	756	2.6	13.4	161
o-Silena	106	88	867	0.9	6.7	292

(Sumber: Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2003)

Titik Nyala dan Klasifikasi Bahan Mudah Terbakar

Titik nyala menentukan kemudahan suatu bahan mudah terbakar atau tidak mudah terbakar. Pelbagai negara memiliki sistem klasifikasi bahan mudah terbakar yang berbeda. Gambaran perbedaan sistem klasifikasi bahan mudah terbakar disajikan pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12 Perbedaan Sistem Klasifikasi Bahan Mudah Terbakar

(Sumber: GHS. OSHA, <http://www.osha.gov/dsg/hazcom/ghs.html>)

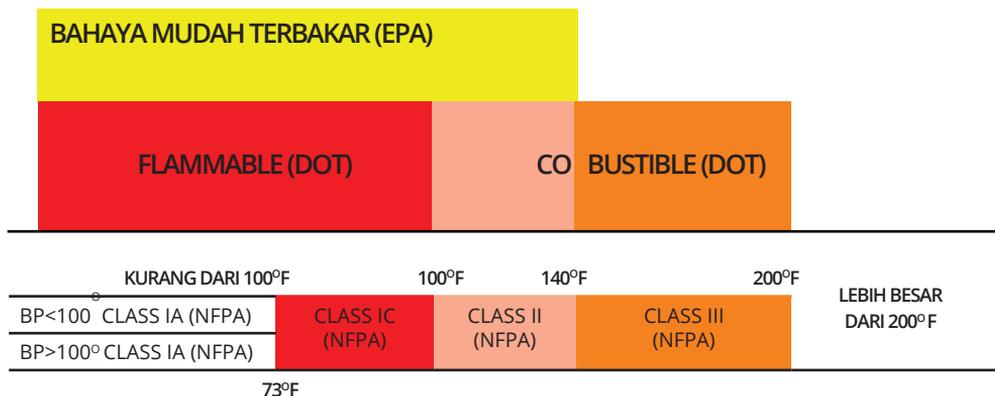
Berikut ini keterangan Gambar 3.12 di atas.

Tip : grafik garis bar dengan derajat Fahrenheit dari 0 derajat sampai 200 derajat dengan sepuluh segmen grafik

Bagan data:

STANDAR	TINGKAT KEMUDAHAN TERBAKAR (°F)	
	<i>Flammable</i>	<i>Combustible</i>
OSHA HCS	0–100°F	100–200°F
OSHA/NFPA	0–100°F	100–200+°F
EU	0–131°F	°F
WHMIS	0–100°F (<i>Division 2 Flammable</i>)	100–200°F (<i>Division 2 Combustible</i>)
DOT	0–140°F	140–200°F
IMO	0–140°F	°F

STANDAR	TINGKAT KEMUDAHAN TERBAKAR (°F)	
	<i>Flammable</i>	<i>Combustible</i>
ICAO/IATA	0-140°F	°F
CPSC	0-100°F	100-150°F
ANSI Z129.1	0-140°F	140-200°F
GHS	0-140°F	140-200°F



Gambar 3.13 Tingkat Kemudahan Terbakar (*Flammability*)

(Sumber: Davletshina and Cheremisinoff, 1998)

Tabel 3.10 Informasi Sifat Fisik dan Kimiawi Terkait Kebakaran

Bahan Kimia	Kelas	Titik Nyala (°C)	Titik Didih (°C)	Temperatur Ignisi (°C)	Batas Mudah Terbakar	
					Batas Bawah	Batas Atas
Asetildehida	IA	-37,8	21,1	175,0	4,0	60,0
Aseton	IB	-17,8	56,7	465,0	2,6	12,8
Benzena	IB	-11,1	80,0	560,0	1,3	7,1
Karbon Disulfida	IB	-30,0	46,1	80,0	1,3	50,0
Cycloheksana	IB	-20,0	81,7	245,0	1,3	8,0
Dietil eter	IA	-45,0	35,0	160,0	1,9	36,0
Etil alkohol	IB	12,8	78,3	365,0	3,3	19,0
n-Heptana	IB	-3,9	98,3	215,0	1,05	6,7
n-Heksana	IB	-21,7	68,9	225,0	1,1	7,5
Isopropil alkohol	IB	11,7	82,8	398,9	2,0	12,0

Bahan Kimia	Kelas	Titik Nyala (°C)	Titik Didih (°C)	Temperatur Ignisi (°C)	Batas Mudah Terbakar	
					Batas Bawah	Batas Atas
Metil alkohol	IB	11,1	64,9	385,0	6,7	36,0
Metil etil keton	IB	-6,1	80,0	515,6	1,8	10,0
Pentana	IA	-40,0	36,1	260,0	1,5	7,8
Stiren	IB	32,2	146,1	490,0	1,1	6,1
Toluena	IB	4,4	110,6	480,0	1,2	7,1
p-Xylena	IC	27,2	138,3	530,0	1,1	7,0

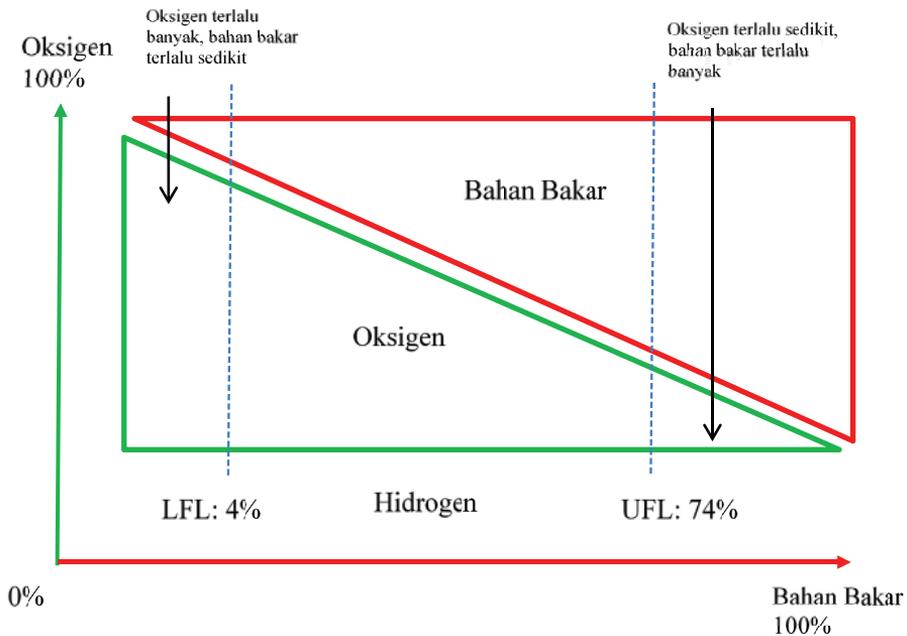
(Sumber: *Flash Points, Boiling Points, Ignition Temperatures, and Flammable Limits of Some Common Flammable Laboratory Chemicals* http://www.pharmacy.ohio-state.edu/safety/pdf/chemhygiene_table_flashpt.pdf)

Batas Nyala (*Flammability Limit*)

Batas nyala (*flammability limit*) adalah konsentrasi campuran uap bahan bakar dengan udara. Uap bahan bakar hanya dapat terbakar dalam udara jika berada pada kisaran batas konsentrasi bahan bakar—udara yang dapat terbakar (*fuel-to-air ratio*). Batas nyala dibagi menjadi dua parameter sebagai berikut.

- Batas nyala bawah (*lower flammable limit*—LFL) atau dapat juga disebut batas nyala ledak (*lower explosive limit*—LEL)
- Batas nyala atas (*upper flammable limit*—UFL) atau disebut juga *upper explosive limit* (UEL).

Ilustrasi penerapan batas nyala bawah (LFL) dan batas nyala atas (UFL) untuk gas hidrogen disajikan pada Gambar 3.14. Pada konsentrasi campuran bahan bakar dan oksigen di antara 4–74%, hidrogen dapat terbakar atau meledak. Pada konsentrasi campuran di bawah konsentrasi LFL, konsentrasi oksigen terlalu banyak, sementara bahan bakar tidak cukup untuk dapat menyebabkan campuran tersebut dapat terbakar. Pada konsentrasi di atas 74%, konsentrasi oksigen terlalu sedikit, sementara konsentrasi bahan bakar terlalu banyak, sehingga campuran tersebut tidak dapat terbakar.



Gambar 3.14 Ilustrasi Batas Nyala Bawah dan Batas Nyala Atas

(Sumber: Furness & Muckett, 2007)

Semakin lebar batas nyala antara LFL dan UFL, semakin berbahaya karena kisaran kemudahan terbakar semakin luas. Batas nyala beberapa bahan bakar disajikan pada Tabel 3.10.

Tabel 3.11 Batas Nyala Beberapa Bahan Bakar

Bahan Bakar	Batas Nyala %	Perbedaan
Asetilen	2,5-100	97,5
Hidrogen (H ₂)	1,0-75,6	71,6
Karbon Monoksida	12,5-74	61,5
Karbon Disulfida	1,3-50	48,7
Etilena	2,7-36	33,3
Metana (C ₁)	3,0-15,5	12,5
Amoniak	15,5-26,6	11,1
Aseton	2,6-13	10,4
Etana (C ₂)	5,0-15,0	10
Propana (C ₃)	2,0-9,5	7,5
Butana (C ₄)	1,5-8,5	7
Pentana (C ₅)	1,4-8,0	6,6
Benzena	1,4-8,0	6,6

Bahan Bakar	Batas Nyala %	Perbedaan
Heksana (C6)	1,7–7,4	5,7
Heptana (C7)	1,1–6,7	5,6

(Sumber: Davletshina & Cheremisinoff, 1998; Nolan, 1996; Lees, 1996)

Batas Nyala Campuran

Batas nyala campuran beberapa bahan bakar dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$LFL = \frac{1}{\left(\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{Y_i}{LFL_i} \right\} \right)}$$

- Y_i adalah konsentrasi dari komponen bahan bakar i (fraksi mol)
- LFL_i adalah LFL dari komponen bahan bakar i (% vol)

Contoh perhitungan batas nyala campuran sebagai berikut.

Hasil analisis konsentrasi campuran gas metana, etana, dan propana, serta nilai LFL disajikan pada Tabel 3.11. Hitunglah LFL campuran gas tersebut.

Tabel 3.12 Contoh Perhitungan Konsentrasi Batas Nyala Campuran

Konsentrasi Gas	% Volume	LFL
Metana	80	5
Etana	15	3,1
Propana	4	2,1
Butana	1	1,86
Campuran	100	?

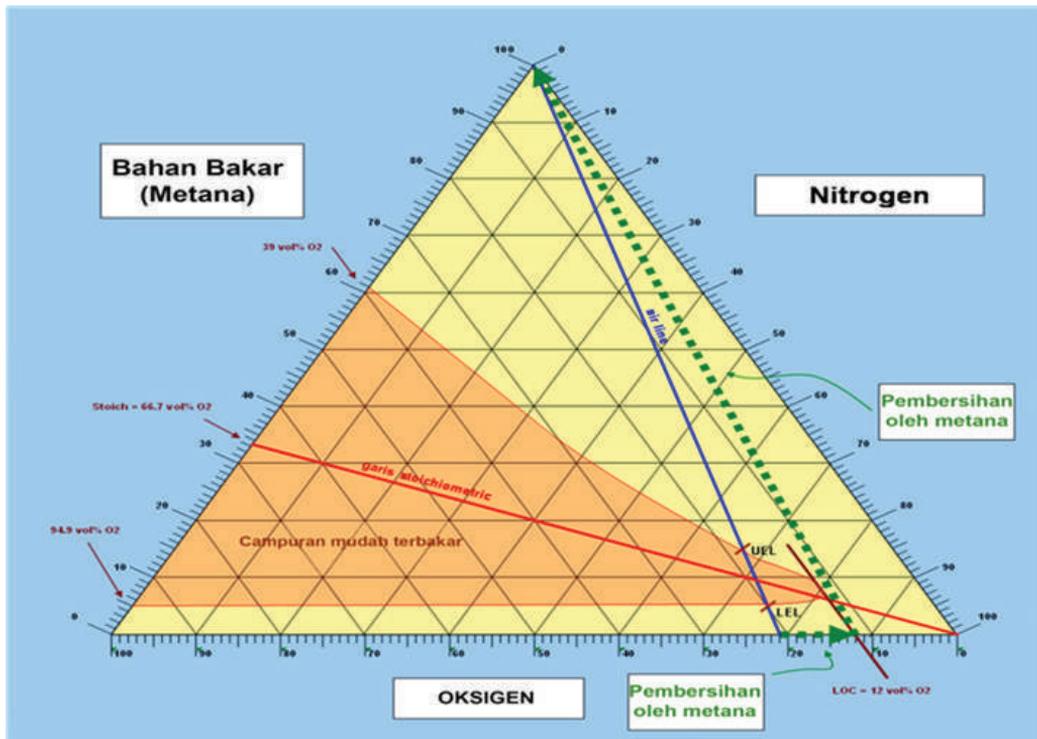
Cara perhitungan:

$$LFL \text{ campuran} = \frac{100}{\frac{80}{5} + \frac{15}{3,1} + \frac{1,0}{1,86}} = 4,3 \text{ \% gas di udara}$$

Penambahan Gas Inert pada Bahan Bakar

Batas nyala bahan bakar dapat dibatasi dengan penambahan gas *inert* seperti nitrogen, air dan karbon dioksida. Contoh penambahan gas nitrogen pada metana

disajikan pada Gambar 3.15 berikut. Pada gambar tersebut terdapat konsentrasi oksigen, metana, dan nitrogen serta batas nyala untuk campuran tersebut. Diagram bahan bakar itu dapat digunakan untuk menentukan nilai batas oksigen (*limiting oxygen concentration*—LOC) atau disebut juga konsentrasi oksigen minimum (*minimum oxygen concentration*—MOC). Konsentrasi LOC atau MOC ini adalah nilai batas konsentrasi oksigen di mana campuran tersebut tidak dapat terbakar, yang satuannya adalah % oksigen.



Gambar 3.15 Diagram Batas Nyala

(Sumber: *Limiting Oxygen Concentration*. http://en.wikipedia.org/wiki/Limiting_oxygen_concentration)

Warna hijau pada gambar di atas menunjukkan batas pengisian aman (*safe purging*) untuk tangki yang didahului dengan nitrogen, kemudian dengan metana untuk mencegah campuran menjadi mudah terbakar (mencapai batas nyala). Warna merah hati menunjukkan LOC atau MOC (nilai batas konsentrasi oksigen yang tidak dapat terbakar).

Contoh perhitungan campuran setelah ditambahkan gas inert juga dapat dilakukan untuk mengetahui nilai LFL dan UFL campuran. Hasil konsentrasi analisis gas campuran disajikan pada tabel berikut. Hitunglah batas nyala campuran gas tersebut.

Tabel 3.13 Contoh Perhitungan Batas Nyala Campuran Gas

Analisis Gas		Kombinasi Gas	Total	Rasio <i>Inert</i> /Mudah Terbakar	Batas Mudah Terbakar	
Komposisi Gas					Batas Bawah	Batas Atas
H ₂	12.4%	12.4 H ₂ + 6.2 CO ₂	18.6%	0.50	6.0	71.5
CO	27.3	27.3 CO + 53.4 N ₂	80.7%	1.96	39.8	73.0
CH ₄	0.7	0.7 CH ₄	0.7%	0.00	5.0	15.0
CO ₂	6.2					
O ₂	0.0					
N ₂	53.4					

Perhitungan A

$$\text{Batas Bawah} = \frac{100}{\frac{18.6}{6.0} + \frac{80.7}{39.8} + \frac{0.7}{5.0}} = 19.0$$

$$\text{Batas Atas} = \frac{100}{\frac{18.6}{71.5} + \frac{80.7}{73.0} + \frac{0.7}{15.0}} = 70.8$$

Analisis Gas	12.4 H ₂ + 53.4 N ₂ - 65.8	4.31	22.0	76.0
	27.3 CO + 6.2 CO ₂ - 33.5	1.23	16.0	71.0
	0.7 CH ₄ - 0.7	0.7	5.0	15.0

Perhitungan B

$$\text{Batas Bawah} = \frac{100}{\frac{65.8}{22.0} + \frac{33.5}{15.0} + \frac{0.7}{5.0}} = 18.7$$

$$\text{Batas Atas} = \frac{100}{\frac{65.8}{76.0} + \frac{33.5}{71.0} + \frac{0.7}{15.0}} = 71.9$$

Kesimpulan	Batas Bawah		Batas Atas	
	Perhitungan A	20.7	73.7	73.7
Perhitungan B	19.0	70.8		
	18.7	71.9		

(Sumber: Davletshina and Cheremisinoff, 1998)

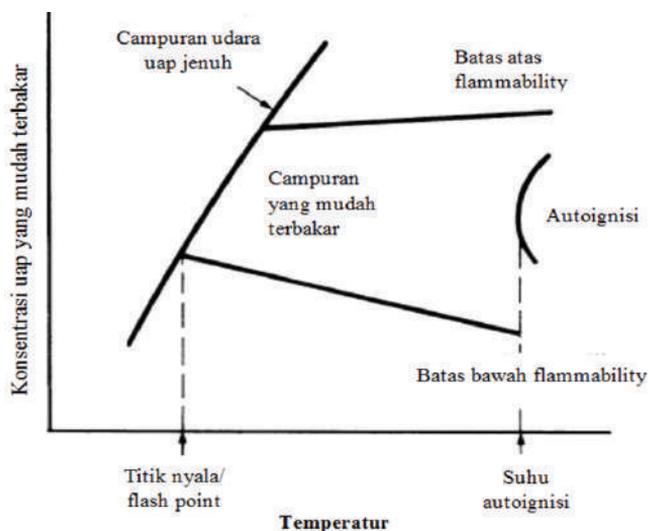
Temperatur Autoignisi (*Autoignition Temperature*)

Temperatur autoignisi (*autoignition temperature*) adalah temperatur terendah suatu padatan, cairan, atau gas yang akan secara spontan menyala secara stabil (*self-sustained combustion*) tanpa dibutuhkan sumber penyalaan eksternal. Makin rendah temperatur autoignisi suatu senyawa, semakin mudah bahan tersebut terbakar. Keselamatan proses di industri harus dijamin dengan sistem deteksi agar tidak tercapai temperatur autoignisi dalam upaya pencegahan kebakaran. Temperatur autoignisi beberapa bahan bakar dapat dilihat dalam Tabel 3.13.

Tabel 3.14 Temperatur Autoignisi Beberapa Bahan Bakar

Material	Temperatur Autoignisi
Heptana	204°C (399°F)
Heksana	225°C (437°F)
Pentana	260°C (500°F)
Butana	287°C (550°F)
Propana	450°C (842°F)
Etana	472°C (882°F)
Hidrogen	500°C (932°F)
Metana	537°C (999°F)

(Sumber: Nolan, 1996)



Gambar 3.16 Hubungan antara Tekanan Uap, Batas Nyala, Titik Nyala, dan Temperatur Autoignisi

(Sumber: Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2003)

Panas Pembakaran (*Heat of Combustion*)

Gas hidrokarbon seperti metana dan etana memiliki panas pembakaran yang lebih tinggi daripada batu bara atau cairan hidrokarbon. Hidrogen memiliki panas pembakaran yang paling tinggi dibandingkan bahan bakar hidrokarbon dan gas (Tabel 3.14). Rasio antara hidrogen dan karbon dalam molekul merupakan faktor penting dalam menentukan panas pembakaran. Molekul dengan rasio hidrogen yang lebih tinggi akan memiliki panas pembakaran yang lebih tinggi. Jika terdapat lebih banyak hidrogen dalam bahan bakar dibandingkan dengan karbon, panas pembakaran akan lebih tinggi.

Tabel 3.15 Panas Pembakaran pada Beberapa Bahan Bakar

Bahan Bakar	<i>Heat of Combustion</i> (BTU/lb)
Batubara	12.000–13.000
Cairan Hidrokarbon	17.000–20.000
Gas Hidrokarbon	20.000–23.000
Hidrogen	60.000

(Sumber: Wentz, 2009)

Energi Minimum Ignisi (*Minimum Ignition Energy*)

Energi minimum ignisi (*minimum ignition energy*—MIE) adalah energi terendah yang dibutuhkan untuk menyalakan suatu campuran bahan bakar yang mudah terbakar. Makin rendah nilai energi minimum ignisi, makin mudah suatu senyawa terbakar. Energi minimum ignisi tergantung pada komposisi dari campuran bahan bakar di udara. Energi minimum ignisi pada bahan bakar hidrokarbon umumnya sebesar 0,25 mJ serta dapat lebih rendah pada hidrokarbon reaktif seperti asetilen. Rendahnya energi tersebut mengindikasikan bahwa hanya dengan percikan listrik kecil atau listrik statis, uap hidrokarbon dapat menyala. Nilai MIE disajikan pada tabel berikut.

Tabel 3.16 Nilai Energi Minimum Ignisi

Bahan Bakar	LMIE, mJ	Bahan Bakar	LMIE, mJ
Asetaldehid	0,37	Isopropil klorida	1,08
Aseton	1,15 @ 4.5%	Isopropil amina	2,0
Asetilen	0,01 @ 8.5%	Isopropil merkaptan	0,53
Akrolein	0,13	Karbon Disulfida	0,009 @ 7.8%
Akilonitril	0,16 @ 9.0%	Metana	0,21 @ 8.5%

Bahan Bakar	LMIE, mj	Bahan Bakar	LMIE. mj
Alil Klorida	0,77	Metanol	0,14 @ 14,7%
Benzena	0,2 @ 4.7%	Metilasetilena	0,11 @ 6.5%
1,3-Butadiena	0,13 @ 5.2%	Metil etil keton	0,53 @ 5.3%
Butana	0,25 @ 4.7%	Metil butana	0,25
n-Butil Klorida	1,24	Metil sikloheksana	0,27 @ 3.5%
Dietil eter	0,19 @ 5.1%	Metil format	0,4
Dihidropiran	0,36	n-Pentana	0,28 @ 3.3%
Diisobutilena	0,96	2-Pentana	0,18 @ 4.4%
Diisopropil eter	1,14	Propana	0,25 @ 5.2%
Dimetil eter	0,29	Propionaldehida	0,32
Dimetil sulfida	0,48	n-Propil klorida	1,08
Di-t-butil peroksida	0,41	Propilena	0,28
Etana	0,24 @ 2.5%	Propilena oksida	0,13 @ 7.5%
Etil asetat	0,46 @ 5.2 %	Sikloheksana	0,22 @ 3.8%
Etilamina	2,4	Siklopentadiena	0,67
Etilen	0,07	Siklopentana	0,54
Etilen oksida	0,065 @ 10.8%	Siklopropana	0,17 @ 6.3%
Furan	0,22	Tetrahidrofuran	0,54
Heptana	0,24 @ 3.4%	Tetrahidropiran	0,22 @ 4.7%
Heksana	0,24 @ 3.8%	Tiopena	0,39
Hidrogen	0,016 @ 28%	Toluena	0,24 @ 4.7%
Hidrogen sulfida	0,068	Tetraetilamina	0,75
Isoktan	1,35	Vinil asetat	0,7
Isopentana	0,21 @ 3.8%	Vinil asetilena	0,082
Isopropil alkohol	0,65	Silena	0,2

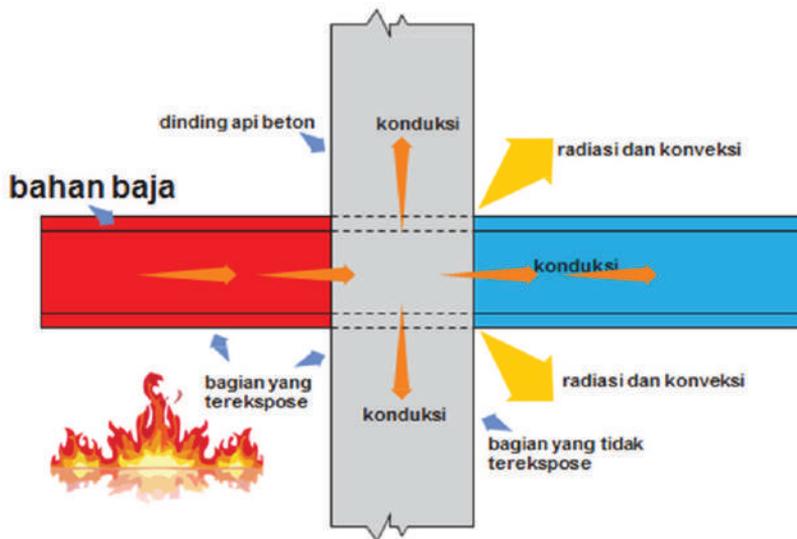
(Sumber: Pratt, 2000)

PROSES PERPINDAHAN PANAS (*HEAT TRANSFER*)

Konsep proses perpindahan panas (*heat transfer*) merupakan konsep penting untuk memahami terjadinya penyebaran api. Api kecil dapat menjadi api besar yang sehingga akhirnya menjalar dan kebakaran dapat terjadi. Perpindahan panas dapat terjadi melalui tiga jenis proses, yaitu

- Konduksi (melalui padatan);
- Konveksi (melalui cairan atau gas); dan
- Radiasi (oleh elektromagnetik radiasi)—tidak memerlukan medium.

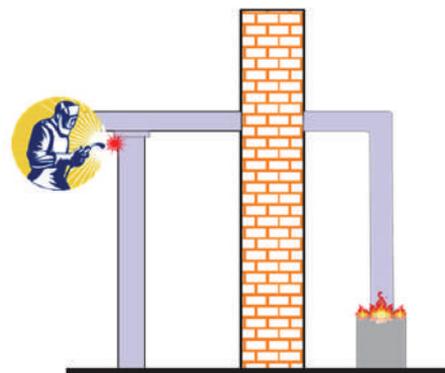
Proses konduksi terjadi dalam padatan sebagai mediumnya, sedangkan proses konveksi terjadi dalam cairan atau gas. Radiasi dipindahkan secara elektromagnetik dan tidak memerlukan medium. Perpindahan panas selalu terjadi dari kondisi panas menjadi dingin. Pemahaman mengenai perpindahan panas ini penting dalam kaitannya dengan kebakaran. Perpindahan panas dari proses kebakaran ke manusia dapat menyebabkan manusia terbakar, sedangkan perpindahan panas ke peralatan atau struktur dapat merusak gedung atau peralatan.



Gambar 3.17 Proses Perpindahan Panas

Konduksi

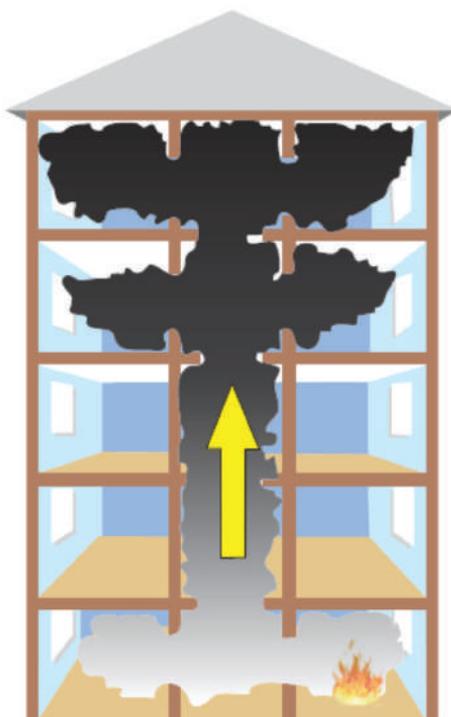
Dalam kaitannya dengan konduksi, informasi mengenai konduktivitas termal (*thermal conductivity*) merupakan informasi penting yang menunjukkan kemampuan suatu padatan untuk menghantarkan panas. **Insulator** memiliki nilai konduktivitas termal rendah, sedangkan **konduktor** memiliki konduktivitas termal tinggi. Insulator atau material yang memiliki konduktivitas rendah sering digunakan untuk *fire protection coating* dan insulasi termal karena sifatnya yang menghambat perpindahan panas.



Gambar 3.18 Proses Perpindahan Panas melalui Mekanisme Konduksi (Pipa Baja)

Konveksi

Proses konveksi terjadi jika suatu gas ataupun cairan memindahkan energi dengan padatan di sekitarnya. Konveksi adalah istilah yang digunakan untuk menjelaskan pergerakan atau sirkulasi yang terjadi dalam gas atau cairan jika dipanaskan atau didinginkan. Jika suatu kebakaran terjadi di area terbuka, panas dipindahkan dengan cara proses konveksi menjauhi pusat kebakaran. Jika kebakaran terjadi dalam gedung dan ruangan tertutup (*enclosed space*), panas dipindahkan dari bagian bawah ruangan atau gedung dan terkumpul di atap.



Gambar 3.19 Proses Perpindahan Panas Konveksi

Radiasi

Radiasi bersifat agak berbeda dengan konduksi dan konveksi karena pada radiasi perpindahan panas di antara dua material terjadi tanpa adanya kontak satu sama lain. Proses yang terjadi merupakan fenomena fisika kuantum. Berapa banyak suatu obyek mengeluarkan radiasi dipengaruhi oleh temperatur, temperatur di sekeliling obyek tersebut, dan faktor emisivitas obyek tersebut. Radiasi terjadi dalam spektrum elektromagnetik dan perpindahan panas hanya terjadi dalam bagian spektrum elektromagnetik. Kisaran panjang gelombang radiasi umumnya 0.3–50 mikron, yang meliputi spektrum inframerah, *visible light*, hingga ultraviolet. Energi

panas, yang mempunyai kecepatan cahaya, ditransmisikan melalui gelombang elektromagnetik atau foton. Energi radian yang mencapai suatu permukaan dapat

- direfleksi
- diabsorpsi, dan
- ditransmisikan.

Proses perpindahan panas tidak terjadi hingga gelombang elektromagnetik mencapai suatu obyek. Tumbukan ini menimbulkan pergerakan molekul pada permukaan obyek, yang selanjutnya panas yang terjadi tersebar di seluruh bagian obyek secara konduksi. Proses perpindahan panas dengan cara radiasi dapat menimbulkan kondisi terbakar jika mengenai manusia atau merusak peralatan dan struktur gedung.



Gambar 3.20 Proses Perpindahan Panas Radiasi



BAB 4

JENIS KEBAKARAN DI INDUSTRI KIMIA, MINYAK, DAN GAS BUMI

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Laksita Ri Hastiti, S.K.M., M.K.K.K.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini disajikan mengenai jenis-jenis kebakaran pada industri minyak dan gas bumi.

PENDAHULUAN

Pelbagai jenis-jenis kebakaran dapat terjadi pada industri kimia dan industri kimia, khususnya yang menggunakan, menyimpan dan memproduksi bahan-bahan kimia mudah terbakar baik pada industri kimia, eksplorasi, pengolahan, maupun penyimpanan minyak dan gas bumi.

TIPE KEBAKARAN

Tipe kebakaran banyak bersumber dari industri kimia dan industri perminyakan karena kebakaran banyak terjadi di kedua jenis industri tersebut. Tipe kebakaran yang terjadi bergantung pada karakteristik material, temperatur dan tekanan material, kondisi lingkungan, serta waktu penyalaan. Tipe kebakaran yang umumnya dapat terjadi di pabrik kimia dan hidrokarbon antara lain:

- *jet fire*,
- *flash fire*,
- *pool fire*,
- *running liquid fire*,
- *fireball* atau *boiling liquid expanding vapor explosion* (BLEVE), dan
- *vapor cloud explosions*.

Tipe kebakaran lainnya yang terjadi dalam suatu proses industri (*plant*) antara lain adalah:

- kebakaran yang melibatkan padatan, misalnya kebakaran selulosik (*cellulosic fire*) seperti pada kayu, plastik, kertas, debu;
- kebakaran gudang;
- kebakaran yang berkaitan dengan peralatan listrik;
- kebakaran yang melibatkan oksigen, seperti pada sistem penambahan oksigen pada *Fluid Catalytic Cracking* (FCC) unit;
- kebakaran yang melibatkan logam yang mudah terbakar, misalnya natrium; dan
- kebakaran yang melibatkan material piroporik (*pyrophoric materials*), seperti aluminium alkil yang digunakan untuk katalis.

Jet Fire

Jet fire didefinisikan sebagai

- 'kebakaran yang berasal dari pelepasan bertekanan (pressurized release) suatu gas dan/atau cairan'
- 'difusi turbulen api yang ditimbulkan dari kebakaran suatu bahan bakar yang secara kontinu melepaskan momentum pada suatu arah tertentu'.

Kebakaran yang terbentuk akibat bahan mudah terbakar membentuk uap (*combustible gas*) dan tidak segera terignisi oleh panas atau sumber api sehingga menyebabkan kebakaran dengan cepat mengikuti uap yang terkumpul tersebut. Jika gas tersebut terlepas ke udara ambien, akan terjadi *jet fire*. *Jet fire* dapat terjadi secara horizontal ataupun vertikal. Tekanan tinggi dan sumber yang ukurannya terbatas menyebabkan kecepatan gas sangat tinggi mendekati kecepatan suara dengan energi panas yang sangat besar. Contoh *horizontal jet fire* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Horizontal Jet Fire

(Sumber: www.spadeadam.biz)

Flash Fire

Flash fire dapat didefinisikan sebagai kebakaran dari campuran uap *flammable* dan udara yang terjadi pada kecepatan tinggi (kecepatan sonik). Umumnya *flash fire* terjadi dalam waktu sangat cepat (detik), namun jika terjadi secara kontinu, akan menjadi *jet fire*.

Pool Fire

Pool fire adalah diffusi turbulen kebakaran yang terjadi di atas suatu *pool* horizontal dari uap hidrokarbon dengan bahan bakar (*fuel*) yang memiliki nilai awal (initial) momentum yang rendah atau nol. *Pool fire* terjadi secara statis pada suatu cairan, dan jika "*running*" disebut "*runing liquid fire*". Karakteristiknya hampir mirip dengan *jet fire*, tetapi penyebaran secara konveksi tidak secepat *jet fire*. Contoh *pool fire* dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Pool Fire
(Sumber: www.spadeadam.biz)

Running Liquid Fire

Running liquid fire adalah kebakaran yang terjadi pada suatu cairan yang tertumpah pada suatu permukaan air atau cairan lainnya. Contoh *running liquid fire* dapat dilihat pada Gambar 4.3.



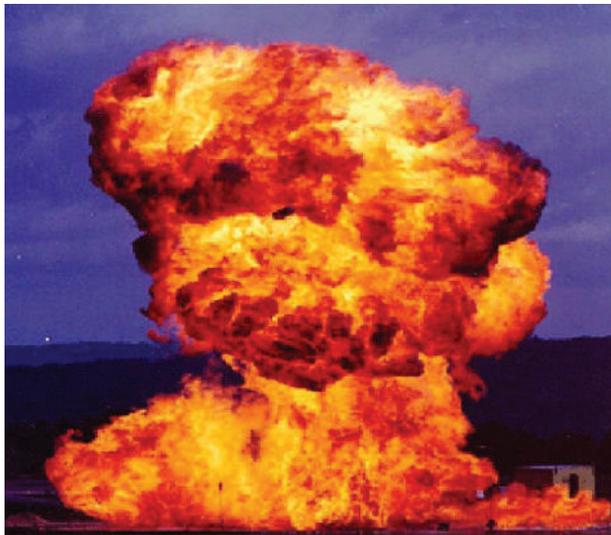
Gambar 4.3 Running Liquid Fire

Fire Ball

Fire ball adalah kebakaran berbentuk bola yang hebat hasil dari terbakarnya cairan atau gas bertekanan yang lepas secara tiba-tiba. Penyebab *fire ball* yang

paling diketahui adalah *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (BLEVE). Durasi *fire ball* sekitar 5–20 detik.

Menurut Lees (1996), *fire ball* dapat disebabkan oleh ledakan peralatan bertekanan (*pressure vessel*) atau hasil dari pembentukan *vapor cloud*. Pada kasus pertama, ledakan dapat terjadi dalam kondisi kebakaran dan menjadi bagian BLEVE, atau terjadi tanpa kebakaran. Radiasi panas *fire ball* ini dalam jumlah besar menyebabkan mulai dari kerusakan material, cedera, hingga kematian pada area yang luas. Contoh *fire ball* dapat dilihat pada Gambar 4.4.



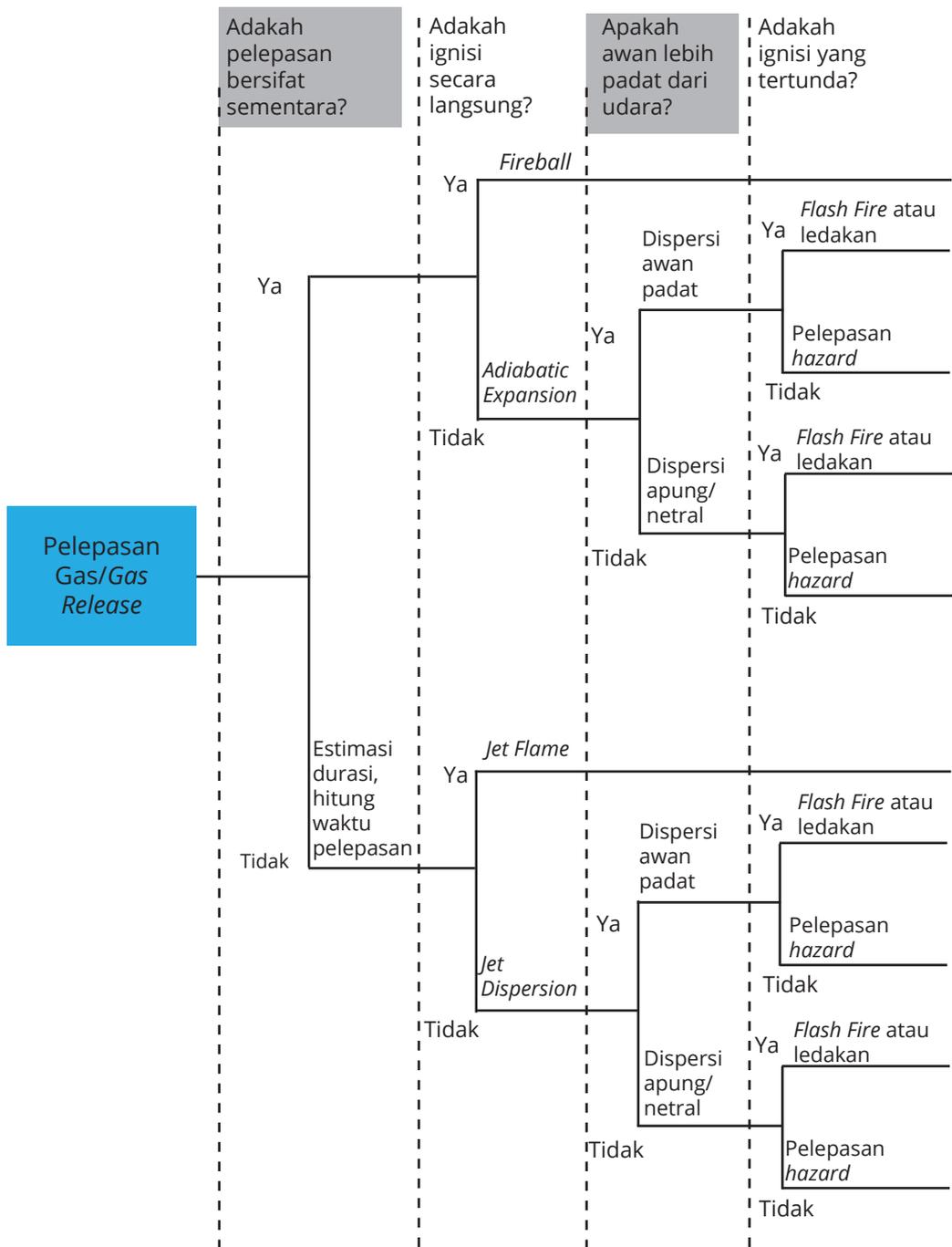
Gambar 4.4 *Fire Ball*

Vapor Cloud Explosion

Vapor cloud explosion adalah ledakan yang dihasilkan dari pengapian dari awan uap yang mudah terbakar, gas, atau kabut dengan kecepatan api mempercepat untuk mencapai kecepatan tinggi yang cukup untuk menghasilkan *overpressure* yang signifikan.

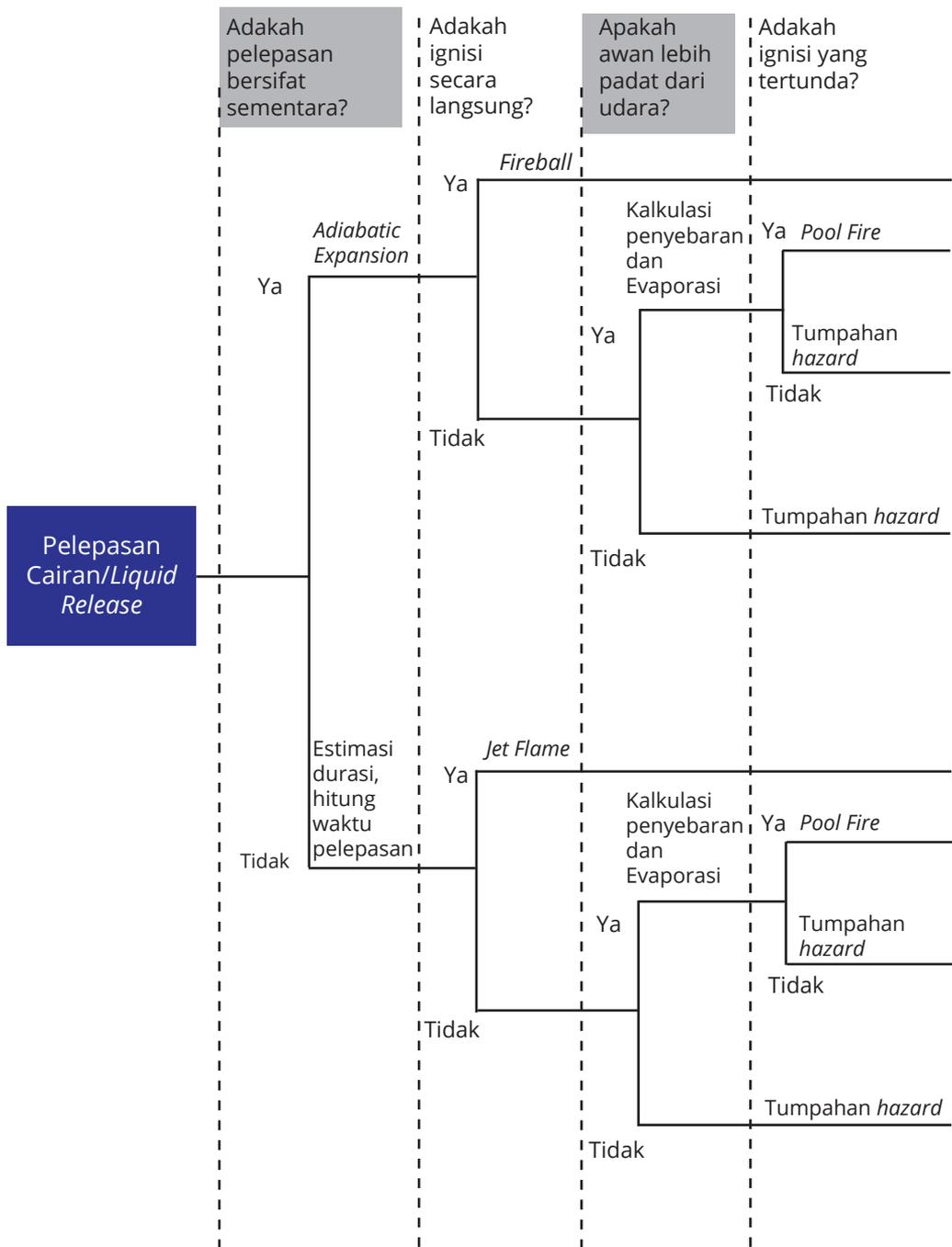
POTENSI BAHAYA AKIBAT LEPASNYA GAS ATAU CAIRAN YANG MUDAH TERBAKAR

Pohon kejadian pelepasan gas (*gas release*) dan pelepasan cairan (*liquid release*) dapat digunakan untuk memperkirakan bahaya yang akan terjadi (kebakaran, ledakan, atau *release/spill hazard*). Pohon kejadian pelepasan gas dapat dilihat pada Gambar 4.5, sedangkan pohon kejadian pelepasan cairan dapat dilihat dari Gambar 4.6.



Gambar 4.5 Pohon Kejadian Pelepasan Gas (*Gas Release*)

(Sumber: Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2003)



Gambar 4.6 Pohon Kejadian Pelepasan Cairan (*Liquid Release*)

(Sumber: Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2003)



BAB 5

TOKSIKOLOGI PRODUK PEMBAKARAN

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini dibahas toksikologi produk hasil pembakaran.

TOKSIKOLOGI ASAP DAN GAS PRODUK HASIL PEMBAKARAN

Dampak asap dan gas dari produk hasil pembakaran dapat menyebabkan korban meninggal dunia akibat menghirup asap dan gas beracun dari kebakaran yang jumlah korbannya dapat lebih banyak daripada jumlah korban meninggal dunia akibat panas dan luka bakar (Purser, 2002). Saat ini banyak bahan bangunan dan alat rumah tangga yang dapat terbakar mengeluarkan asap dan gas yang berbahaya dan kebanyakan mengakibatkan korban kebakaran karena mengisap asap tersebut (Gann *et al.*, 2001). Pendapat yang lain mengatakan bahwa meningkatnya korban kebakaran mungkin tidak berhubungan langsung dengan bahan bangunan modern, tetapi dengan perubahan gaya hidup dari waktu ke waktu yang saat ini menggunakan kain pelapis pada peralatan rumah tangga (Purser, 2002). Korban kebakaran mungkin saja tidak mengalami luka bakar, tetapi asap yang terhirup dapat mengakibatkan gangguan pernapasan dan infeksi pernapasan (Hantson *et al.*, 1997).

Pada saat kejadian kebakaran, ancaman pelbagai toksikan yang diproduksi dari hasil pembakaran dapat menimbulkan dampak kesehatan yang dapat mengganggu atau menghambat seseorang untuk melakukan evakuasi serta menyebabkan toksisitas akut yang dapat berdampak jangka panjang. Asap adalah campuran dari partikulat dan gas baik cairan maupun padatan yang terdispersi ke udara yang dilepaskan pada saat terjadi pirolisis atau pembakaran (ASTM, 1999). Pada saat suatu bahan didekomposisi secara termal, pelbagai bahan kimia dihasilkan. Terdapat lebih dari 100 bahan kimia telah diidentifikasi dari hasil pembakaran beberapa bahan (Kaplan *et al.*, 1983). Meningkatnya pelbagai material yang dipergunakan di rumah dan gedung meningkatkan pula isu tentang bahan sintesis yang kemungkinan dapat menghasilkan bahan hasil pembakaran yang toksisitasnya tidak biasa atau sangat toksik. "Toksitas yang tidak biasa (*unusual toxicity*)" ini menunjukkan bahwa efek toksik tidak dapat secara total merupakan atribut dari gas-gas hasil pembakaran (baik individual maupun kombinasi) yang umumnya ada dan dianggap sebagai toksikan utama; sedangkan istilah "sangat toksik (*extremely toxic*)" merupakan istilah yang digunakan untuk mengindikasikan bahwa konsentrasi yang sangat kecil dari hasil pembakaran dapat menyebabkan kematian pada hewan coba (umumnya tikus atau mencit) pada suatu percobaan laboratorium (Levin, 2001).

Pada tahun 1975 *The Journal of Science* mendokumentasikan kasus hasil uji coba *rigid polyurethane foam* yang mengandung *fire retardant* menyebabkan toksisitas yang sangat tidak biasa dan diidentifikasi sebagai "4-ethyl-1-phospho-2,6,7-trioxabicyclo[2.2.2]octane-1-oxide" (atau disebut sebagai *bicyclic phosphate ester*) (Petajan *et al.*, 1975). Senyawa fosfat bisiklis ini menyebabkan kejang-kejang pada tikus pada konsentrasi yang sangat rendah. Berdasarkan hasil ini, bahan *fire retardant* yang terbuat dari *rigid polyurethane foam* tidak dipergunakan lagi secara komersial (Levin, 2001). Hampir sebagian besar materi alami dan sintetis mengeluarkan karbon pada saat dibakar serta menghasilkan CO dan/atau CO₂. Rasio perbandingan kedua gas yang dihasilkan ini tergantung pada konsentrasi oksigen yang tersedia pada lokasi pembakaran (Gad, 1990). Efek kesehatan yang merugikan ini berasal dari inhalasi asap yang diketahui merupakan dampak dari pajanan gas toksik, meskipun peran dari partikulat saja maupun kombinasi dari gas-gas hasil pembakaran masih memerlukan investigasi lebih lanjut (Levin, 2001). Produk hasil pembakaran umumnya dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelas, yaitu bahan yang dapat menyebabkan efek narkose (*asphyxiants*); iritan, yang dapat menyebabkan sensitisasi pada saluran pernapasan dan sensori; serta toksikan yang dapat menunjukkan efek toksik tidak biasa (NMAB, 1991). Toksisitas pelbagai jenis gas-gas hasil pembakaran serta sumber bahan yang dapat menghasilkan produk pembakaran tersebut disajikan pada Tabel 5.1.

Efek toksik dari pelbagai produk hasil pembakaran pada sel manusia serta hasil *in vitro* toksisitas telah dilakukan dan menunjukkan bahwa produk hasil pembakaran dapat mengakibatkan perubahan pada sel manusia (Lestari *et al.*, 2005; Lestari *et al.*, 2006a; Lestari *et al.*, 2010; Lestari *et al.*, 2011; Lestari *et al.*, 2012).

Tabel 5.1 Efek Toksisitas Pelbagai Gas Hasil Pembakaran

Toksikan	Sumber	Efek Toksisitas	Konsentrasi mematikan - 10 menit (ppm)
Hydrogen sianida (HCN)	Dari pembakaran wol, sutra, poliakrilonitril (<i>polyacrylonitrile</i>), nilon, poliuretran, dan kertas	Gangguan pernapasan	350
Nitrogen dioksida (NO ₂) dan oksida nitrogen lainnya	Diproduksi dalam jumlah yang besar dari nitrat selulosa dan seluloid	Iritasi pada paru-paru dan kematian mendadak	>200

Toksikan	Sumber	Efek Toksisitas	Konsentrasi mematikan - 10 menit (ppm)
Amonia (NH ₃)	Diproduksi dari pembakaran wol, sutra, nilon, dan melamin, konsentrasi biasanya rendah pada kebakaran gedung biasa	Iritasi pada hidung dan mata	>1000
Hidrogen klorida (HCl)	Berasal dari pembakaran polivinil klorida (PVC)	Iritasi pada saluran pernapasan. Dalam bentuk partikulat lebih berpotensi menyebabkan toksisitas	>500, jika tidak ditemukan dalam bentuk partikulat
Gas halogen (HF and HBr)	Berasal dari pembakaran <i>fluorinated resins</i> atau hasil pembakaran yang mengandung bromin	Iritasi pada saluran pernapasan	HF ~ 400 HBr > 500
Sulfur dioksida (SO ₂)	Berasal dari material yang mengandung sulfur	Iritasi berat	>500
Isosianat	Berasal dari polimer uretan, produk pirolisis, seperti toluene-2,4-diisocianat (TDI)	Iritasi pada saluran pernapasan	~ 100 (TDI)
Akrolein	Berasal dari pirolisis poliolefin dan selulosik pada temperatur rendah	Iritasi pada saluran pernapasan	30-100

(Diadaptasi dari Kaplan *et al.*, 1983)

GAS ASPISIAN (ASPHYXIANT GASES)

Gas-gas narkose (aspisian/*asphyxiants*) adalah gas-gas yang dapat menyebabkan penurunan fungsi pada sistem saraf pusat sehingga menyebabkan hilangnya kesadaran yang dapat diikuti dengan kematian (Hartzell, 1996; Prien & Traber, 1988). Dua jenis gas narkose yang utama dihasilkan dari kebakaran adalah gas CO and HCN, di mana gas CO merupakan gas yang paling utama selalu ada pada setiap hasil pembakaran (Fardell, 1993; Hartzell, 1996).

Selama beberapa tahun terakhir, CO telah diketahui merupakan penyebab utama kematian dalam kebakaran (Levin, 1982; Kaplan *et al.*, 1983; Levin *et al.*, 1996; Persily, 1996; Nelson, 1998; Chaturvedi *et al.*, 2001, Gorman *et al.*, 2003). Terdapat banyak hasil penelitian yang mempelajari toksisitas CO, termasuk kajian toksisitasnya (Nelson, 1998); keracunan CO (Annau, 1987; Rodge & Olving, 1996), mekanisme dan prediksi produksi CO pada saat kebakaran (Pitts, 1994; Pitts, 1995; Hull *et al.*, 2000), serta toksikologi klinik dan tindakan pengobatannya (Kulling, 1992; Gorman *et al.*, 2003). Hampir dua pertiga dari kematian akibat kebakaran disebabkan oleh CO, yang diketahui merupakan toksikan yang dominan menyebabkan kematian pada saat kebakaran (Kaplan *et al.*, 1983; Pitts, 1994; Pitts, 1995). Korban kebakaran pada umumnya ditemukan menghasilkan konsentrasi karboksihemoglobin/*carboxyhemoglobin* (COHb) yang menunjukkan paparan akibat CO (Doe, 1986; Chaturvedi *et al.*, 2001). Toksisitas CO ini disebabkan pembentukan karboksihemoglobin I dalam darah, yang menyebabkan menurunnya kemampuan darah untuk mengangkut oksigen ke bagian tubuh yang membutuhkan (Gad, 1999; Bloom & Brandt, 2001; Gorman *et al.*, 2003). Proses ini dimediasi oleh ion Fero (Fe^{+2}) yang terdapat pada hemoglobin di dalam sel darah merah (Barile, 2003), reaksi ini bersifat reversibel. Afinitas hemoglobin terhadap CO sangat tinggi, kurang lebih sekitar 200 kali oksigen (Bloom & Brandt, 2001) sehingga proporsi hemoglobin yang berikatan dengan COHb meningkat sejalan dengan jumlah CO yang terinhalasi (Nelson, 1998). Kekuatan ikatan menghasilkan pembentukan karboksihemoglobin (COHb) yang stabil, COHb menurunkan kemampuan hemoglobin untuk membawa oksigen (Barile, 2003). Oleh karena hal tersebut, toksisitas CO tergantung pada dosis yang terakumulasi dari COHb.

Studi yang dilakukan oleh Rodge and Olving (1996) di Oslo, Norwegia, menyatakan bahwa dari 286 kasus kematian kebakaran selama 10 tahun, CO dianggap merupakan penyebab kematian yang utama pada 212 kasus. Kasus kematian selebihnya (74 kematian) disebabkan karena panas, terbakar, ketidakcukupan oksigen serta keracunan karena gas lainnya selain CO (Rodge & Olving, 1996).

CO bukanlah merupakan penyebab tunggal pada kematian pada kasus kebakaran, HCN juga berperan penting (Purser & Wooley, 1986; Ferrari *et al.*, 2001). Banyak hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai efek toksik sianida (Norris *et al.*, 1986; Karhunen *et al.*, 1991; Moore *et al.*, 1991; Kulling, 1992). serta kombinasinya dengan CO (Turrina *et al.*, 2004). HCN merupakan toksikan yang bereaksi sangat cepat (Kaplan *et al.*, 1984). HCN terbentuk dari hasil pembakaran bahan yang mengandung nitrogen, seperti akrilik, *polyurethane foams*, dan wol (Purser, 2002). Toksisitas HCN disebabkan karena hipoksia histotoksik, di mana metabolisme sel normal dihambat karena adanya enzim *inhibition* melalui interferensi sistem sitokrom pada sel (Kaplan *et al.*, 1984; Gad, 1999). Oksigen tidak digunakan secara efektif oleh sel pada bagian tubuh yang penting sehingga terjadi asfiksia (*asphyxia*) (Kaplan *et al.*, 1983). Sianida merupakan pokok perhatian yang sangat penting karena dapat menyebabkan kematian pada konsentrasi yang sangat rendah (1 µg per ml merupakan konsentrasi letal dalam darah) (Gad, 1999).

Studi lainnya dilakukan dari matras poliuretan (*polyurethane*) yang menyebabkan kematian pada 35 orang di Argentina (2001). Hasil studi ini menunjukkan bahwa konsentrasi letal sianida terdapat di dalam darah korban serta konsentrasi COHb. Adanya HCN kemungkinan berasal dari *pyrolysis matras polyurethane*. Pada kasus ini jangka waktu antara mulai terjadinya kebakaran dengan kematian berlangsung sangat cepat, sekitar 3–5 min, menunjukkan bahwa HCN adalah senyawa yang menyebabkan kematian (Ferrari *et al.*, 2001).

IRITAN

Iritan dalam asap mengandung gas-gas anorganik (seperti hidrogen klorida, hidrogen fluorida, hidrogen bromida, nitrogen oksida, asam fosforik, dan sulfur dioksida) serta senyawaan organik (seperti akrolein, formaldehida, dan krotonaldehida). Terdapat lebih dari 20 jenis iritan telah dideteksi yang diketahui dapat menyebabkan iritasi sensorik (NMAB, 1991). Tabel 5.2 menyajikan beberapa contoh iritan yang dapat menyebabkan dan mempunyai potensi iritasi sensorik dan saluran pernapasan.

Efek iritasi umumnya dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis: iritasi sensorik (*sensory irritation*) dan iritasi saluran pernapasan (*pulmonary irritation*). Efeknya dapat berupa iritasi mata ringan hingga iritasi mata yang parah serta sakit pada saluran pernapasan (Purser, 2002). Asam anorganik pada konsentrasi sekitar 200 ppm dapat mengganggu proses evakuasi, namun tidak menghambat. Pada konsentrasi 900 ppm dan di atasnya, efeknya menjadi lebih parah dan dapat menyebabkan

inkapasitasi (BS 78999-2, 1999). Formaldehida (*formaldehyde*) dan akrolein (*acrolein*) diketahui dapat menghambat seseorang untuk melakukan evakuasi.

Pembentukan iritan bergantung dari jenis material yang terbakar. Material yang mengandung bromin, fluorin, seperti polivinil klorida, neopren, politetrafluoroetilen, polivinil fluorida, dan *brominated flame retardants* akan menghasilkan HCl, HF, dan HBr jika terbakar (Alarie, 2002).

Tabel 5.2 Efek Iritan Produk Hasil Pembakaran terhadap Sensori dan Pernapasan

Jenis Iritan	Efek Iritan Pada Sensori Manusia (Ppm)
Toluena diisosianat	1
Akrolein	1-5.5
Formaldehida	5-10
Klorin	9-20
Krotonaldehida	4-45
Akrilonitril	> 20
Fenol	> 50
SO ₂	50-100
NH ₃	700-1.700
HF	120
HCl	100
HBr	100
NO ₂	80
Stirena	> 700
Asetaldehida	> 1.500
Etanol	> 5.000
Aseton	> 12.000

(Diadaptasi dari Purser, 2002)

Tabel 5.3 Konsentrasi Iritan

Gas	Perkiraan konsentrasi untuk mengganggu jalan keluar pada setengah populasi Ppm	Konsentrasi diperkirakan menyebabkan ketidakmampuan setengah populasi Ppm
HCl	200	900
HBr	200	900
HF	200	900
SO ₂	24	120
NO ₂	70	350
CH ₂ CHO (acrolein)	4	20
HCHO (formaldehyde)	6	30

(Diadaptasi dari BS 7899-2:1999)

KARBON DIOKSIDA

Konsentrasi karbon dioksida pada kondisi atmosferik normal (CO₂) berkisar antara 0,027 dan 0,036% v/v. Hirupan karbon dioksida pada konsentrasi 2 hingga 5% dapat menstimulasi *medullary respiratory centre* pada stem otak sehingga terjadi kenaikan *Respiratory Minute Volume* (RMV) (Barile, 2003). Walaupun CO₂ tidaklah bersifat toksik pada kebanyakan kasus kebakaran, konsentrasi CO₂ pada tingkat menengah dapat menstimulasi laju pernapasan dan meningkatkan *uptake* gas-gas lainnya (Speitel, 1995). Paparan terhadap CO and CO₂ menyebabkan kenaikan tingkat asidosis sehingga memerlukan waktu pemulihan yang lebih lama daripada paparan dari satu gas (Levin *et al.*, 1987).

Hasil model matematik menunjukkan adanya interaksi sinergis (Levin *et al.*, 1987). Kondisi ini berkontribusi pada bahaya secara umum dari gas hasil pembakaran sehingga mengakselerasi *uptake* toksikan dan iritan lainnya (Fardel, 1993).

KETIDAKCUKUPAN OKSIGEN (*INSUFFICIENT OXYGEN*)

Konsentrasi oksigen pada kondisi atmosferik normal adalah 21% (Barile, 2003). Selama proses pembakaran, oksigen dikonsumsi sehingga terjadi penurunan kadar oksigen (Stefanidou M. & S., 2004). Beberapa gejala yang berhubungan dengan ketidakcukupan oksigen disajikan pada Tabel 5.4. Konsentrasi oksigen yang rendah

(di bawah 15%) dan konsentrasi CO₂ yang sangat tinggi (lebih dari 5%) dapat menyebabkan efek narkose (NMAB, 1991). Ketika konsentrasi oksigen menurun di bawah 21% menjadi 17%, koordinasi motorik terganggu (Kaplan *et al.*, 1984; Fardell, 1993).

Tabel 5.4 Konsentrasi Oksigen dan Gejala yang Ditimbulkan

Konsentrasi Oksigen (%)	Efek Patologis Akut
16-21 (normal)	Tidak ada simtom atau gejala
12-16	Takipnea (<i>tachypnea</i>), takikardia (<i>tachycardia</i>), inkoordinasi sistem otot
10-12	Hipoksia; kebingungan, lelah, pusing
6-10	Hipoksia dan menurunnya saturasi oksigen; muntah-muntah, <i>lethargy</i> , tidak sadar
<6	Kejang-kejang, apnea, gagal jantung

(Sumber: Diadaptasi dari Barile, 2003)

RADIKAL BEBAS

Asap dari pembakaran pelbagai material sintetis dan alami yang digunakan di gedung dapat mengandung radikal bebas (Pryor, 1992). Radikal bebas dapat berada pada fase gas dan pada permukaan partikel jelaga dalam asap (Lachocky *et al.*, 1989; Yeo-Kyu *et al.*, 1992; Akutsu *et al.*, 1998; Dellinger *et al.*, 2001). Beberapa radikal bebas terdeteksi dari hasil pembakaran selulosa, kayu, cat kering, polietilen, dan karet (Pryor, 1992; Yeo-Kyu *et al.*, 1992). Sedikitnya terdapat tiga jenis radikal bebas yang dapat terbentuk: pertama adalah yang membentuk oksigen pada pusat radikalnya, jenis yang kedua adalah karbon dioksida anion radikal (*carbon dioxide anion radical*), dan yang ketiga adalah *carbon-centred radical* (Pryor, 1992; Wallace, 1997). Radikal bebas yang berasal dari hasil pembakaran dapat menyebabkan toksisitas terhadap sel (Bai *et al.*, 2001), alterasi ekspresi gen (*gene expression*) (Timblin *et al.*, 1997), karsinogenesis, kematian sel, *unregulated cell proliferation*, dan kerusakan DNA (Wallace, 1997).

PARTIKULAT

Partikulat dapat mengganggu evakuasi dan pertolongan keadaan darurat bagi seseorang karena mengganggu penglihatan, iritasi mata, dan distres pada saluran

pernapasan atas. Deposit partikulat merupakan produk dari pembakaran yang tidak sempurna dari bahan organik; menghasilkan partikulat yang terdiri atas partikel karbon, hidrokarbon, dan jelaga (Barfknecht, 1983). Jelaga berperan penting dalam proses induksi kanker dan penyakit-penyakit saluran pernapasan serta mortalitas dan morbiditas pada kasus kebakaran (Lahaye & Prado, 1981). Partikulat diketahui dapat mempotensiasi toksisitas bahan-bahan kimia yang ada selama proses pembakaran (Hill, 1996).

Terdapat pelbagai produk hasil pembakaran yang dapat terkondensasi dan terabsorpsi pada partikel jelaga yang kemudian ditransportasikan bersama asap ke dalam tubuh (Fardell, 1993). HCl merupakan salah satu contoh senyawaan yang ditransportasikan ke dalam paru-paru (Lahaye & Prado, 1981; Bennett, 1984). Radikal bebas juga merupakan perhatian utama karena reaktivitasnya yang tinggi dalam periode waktu yang pendek. Partikel dengan ukuran 5–10 μm terdeposit pada saluran pernapasan atas, sementara partikel dengan ukuran lebih kecil akan terpenetrasi ke dalam *cavities* sistem pernapasan yang lebih bawah (Hill, 1996).

TOKSISITAS CAMPURAN KOMPLEKS HASIL PEMBAKARAN

Asap dan efluen kebakaran mengandung campuran kompleks gas, uap, radikal bebas, iritan, dan partikulat yang dapat menyebabkan situasi berbahaya dan bersifat toksik dan memajan seseorang. Terdapat pelbagai bahan kimia yang bergantung pada jenis bahan yang terbakar, seperti sulfur, bromin, atau fluorin (NFPA 269, 2000). Pelbagai interaksi toksisitas dan kombinasinya berasal dari campuran kompleks produk pembakaran yang dapat berupa interaksi aditif, sinergistis, dan antagonistis (Purser, 2002). Interaksi toksisitas antara karbon monoksida dan karbon dioksida meningkatkan asidosis dibandingkan gas tunggal (*single*) (Levin *et al.*, 1987) sehingga menyebabkan efek toksik yang lebih tinggi (Raloff, 1985).



BAB 6

KAJIAN RISIKO KEBAKARAN

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.

Adis Ardiza Lanin

Debby Paramitasari, S.K.M., M.Dis.Mgt.

Laksita Ri Hastiti, S.K.M., M.K.K.K.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini dijelaskan kajian risiko kebakaran (*fire risk assessment*).

PENDAHULUAN

Kajian risiko kebakaran bertujuan untuk mengidentifikasi bahaya dan risiko kebakaran serta menentukan tindakan pengendalian yang mencakup pencegahan dan penanggulangan kebakaran. Prinsip-prinsip dalam kajian risiko kebakaran hampir sama dengan kajian risiko di tempat kerja maupun kajian risiko pekerjaan (*task risk assessment*), yang diawali dengan identifikasi bahaya, risiko, serta mitigasi dan pengendalian risiko. Kajian risiko kebakaran sebaiknya dilakukan mulai pada saat tahapan desain agar perbaikan terhadap tindakan pengendalian dan pencegahan serta penanggulangan kebakaran dapat dilakukan.

Kajian risiko kebakaran dapat digunakan sebagai suatu alat bantu dalam pengambilan keputusan akan masalah terkait kejadian kebakaran. Adapun tujuan penulisan bab ini adalah untuk memberikan pemahaman mengenai bagaimana dan mengapa suatu kajian risiko kebakaran dilakukan. Dengan dilakukannya kajian risiko kebakaran, manajemen akan terbantu dengan tersedianya informasi-informasi yang akan memudahkan pembuatan keputusan berbasis risiko.

DEFINISI

Bahaya adalah sumber, situasi, atau tindakan yang berpotensi dapat menimbulkan kerusakan/gangguan dalam hal cedera atau sakit pada manusia atau kombinasi dari keduanya—“**Hazard** is source, situation, or act with a potential for harm in terms of human injury or ill health, or a combination of these” (OHSAS 18001, 2007).

Bahaya kebakaran dapat terbagi menjadi sebagai berikut.

- Bahaya kebakaran primer: sesuatu yang berpotensi dapat menyebabkan kerusakan dengan terjadinya inisiasi api atau memperbesar terjadinya kebakaran (ignisi, bahan bakar, sumber oksigen);
- Bahaya kebakaran sekunder: sesuatu yang berpotensi menyebabkan kerusakan pada kejadian kebakaran dengan menghambat respons yang cukup (misalnya ukuran rute evakuasi yang tidak sesuai, tanda evakuasi yang minim, perencanaan keadaan darurat yang tidak efektif).

Identifikasi bahaya merupakan proses dalam mengenali adanya bahaya dan menjelaskan karakteristiknya—“*Hazard identification is a process of recognizing that a hazard exists and defining its characteristics*” (OHSAS 18001, 2007).

Risiko merupakan kombinasi dari kemungkinan terjadinya keadaan berbahaya atau pajanan dan keparahan dari cedera atau sakit yang dapat disebabkan oleh keadaan atau pajanan tersebut—“*Risk is a combination of the likelihood of an occurrence of a hazardous event or exposure(s) and the severity of injury or ill health that can be caused by the event or exposure(s)*” (OHSAS 18001, 2007).

Risiko kebakaran merupakan kombinasi dari kemungkinan (probabilitas) terjadinya kebakaran serta keparahan dari dampak kebakaran tersebut (Furness & Muckett, 2007).

Manajemen risiko merupakan kegiatan yang terkoordinasi untuk mengelola dan mengendalikan suatu organisasi dengan memperhatikan risiko—“*Risk management is coordinated activities to direct and control an organization with regard to risk*” (ISO 73, 2009).

Penilaian risiko adalah proses evaluasi risiko yang muncul dari bahaya dengan mempertimbangkan kecukupan dari pengendalian yang ada dan memutuskan apakah risiko dapat diterima atau tidak—“*Risk assessment: process of evaluating the risk(s) arising from a hazard(s), taking into account the adequacy of any existing controls, and deciding whether or not the risk(s) is acceptable*” (OHSAS 18001, 2007).

Kajian risiko kebakaran adalah proses identifikasi bahaya kebakaran dan evaluasi tingkat risiko termasuk dampak kebakaran dengan mempertimbangkan pengendalian risiko kebakaran yang telah ada (Furness & Muckett, 2007).

Pengendalian risiko kebakaran adalah tindakan pencegahan, penanggulangan dan proteksi kebakaran antara lain prosedur pencegahan, penanggulangan dan proteksi kebakaran, misalnya sistem sprinkler, sistem deteksi kebakaran dan alarm, prosedur dan perencanaan keadaan darurat, sistem izin kerja, dan peralatan pemadam api (Furness & Muckett, 2007).

GAMBARAN UMUM KAJIAN RISIKO KEBAKARAN

Kajian risiko kebakaran merupakan bagian integral dari suatu sistem manajemen risiko perusahaan secara keseluruhan sehingga harus terintegrasi dengan kajian

risiko lainnya. Kajian risiko kebakaran merupakan kajian risiko terhadap bahaya kebakaran dan merupakan upaya untuk mengetahui kebutuhan dan kememadaian suatu perlindungan terhadap kebakaran dengan beberapa kode dan standar sebagai tolok ukurnya. Berikut ini adalah beberapa prinsip pokok mengenai kajian risiko kebakaran, yaitu

- suatu kajian risiko kebakaran harus dilakukan di awal pengerjaan suatu proses desain;
- identifikasi bahaya secara menyeluruh merupakan bagian dari kajian risiko kebakaran;
- kajian risiko kebakaran yang telah ada harus dikaji ulang untuk memastikan diperolehnya informasi yang terbaru;
- suatu kajian risiko kebakaran digunakan dalam identifikasi upaya pencegahan, pengendalian, dan mitigasi.

Selain itu, suatu kajian risiko kebakaran juga berguna sebagai alat bantu dalam peninjauan ulang fasilitas yang ada, khususnya dalam kondisi

- apabila diperkirakan akan terjadi perubahan pada fasilitas yang ada;
- sebagai upaya evaluasi retrospektif atas kejadian yang telah terjadi, khususnya ketika banyak perubahan yang terjadi dalam beberapa tahun belakangan;
- ketika ada perubahan proses kerja atau perubahan material yang digunakan.

Suatu kajian risiko kebakaran harus didokumentasikan agar diperoleh suatu gambaran utuh serta menyeluruh mengenai kemungkinan bahaya kebakaran dan mengenai gambaran peran dalam sistem keselamatan yang ada untuk mitigasi dan mengendalikan bahaya. Pelaksanaan kajian risiko kebakaran yang terus-menerus atas suatu fasilitas harus dijaga untuk memastikan adanya manajemen bahaya kebakaran yang berkelanjutan.

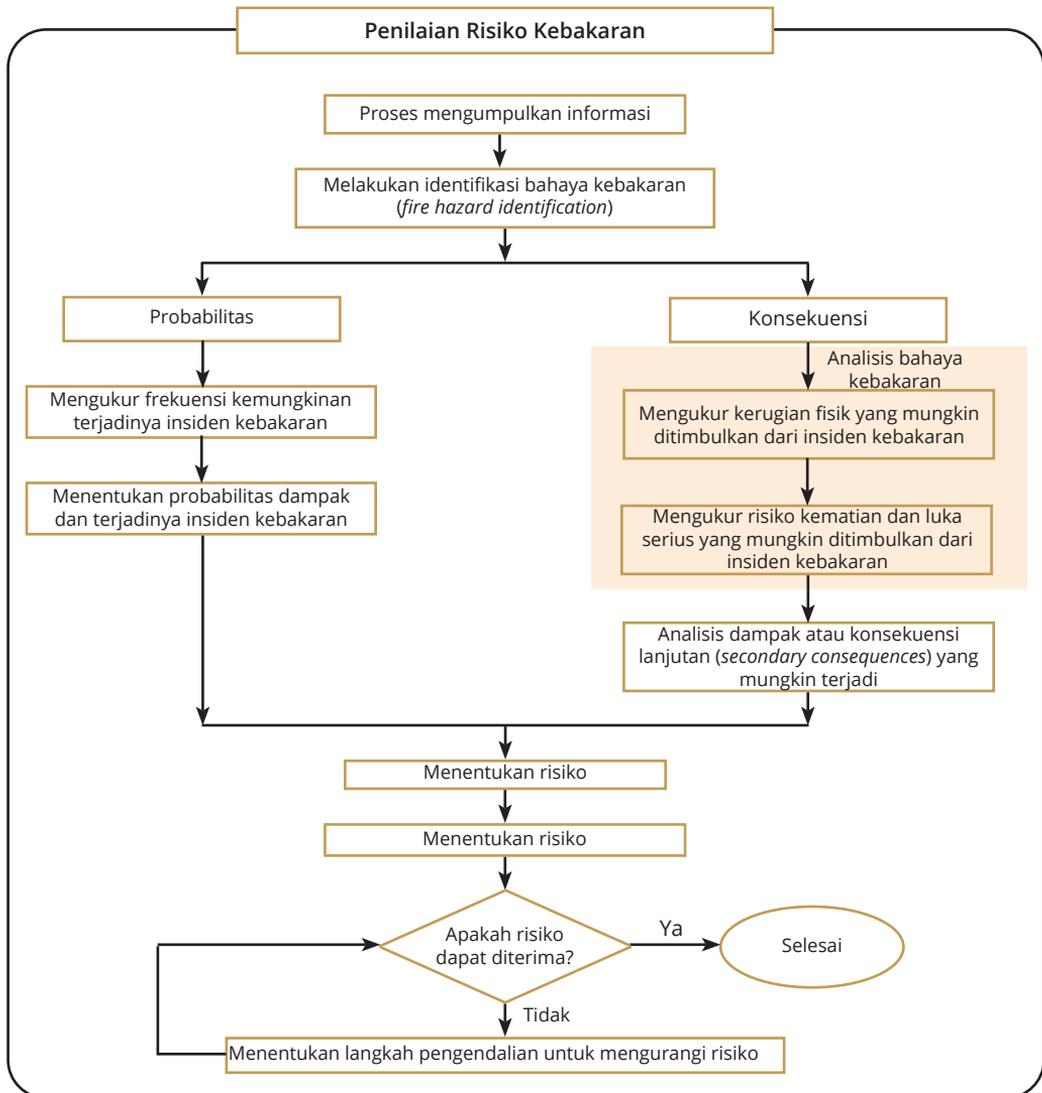
METODOLOGI KAJIAN RISIKO KEBAKARAN

Metodologi pelaksanaan kajian risiko kebakaran dapat diilustrasikan dalam Gambar 6.1, sedangkan setiap langkah dalam metodologi tersebut akan dijelaskan lebih lanjut dalam pembahasan berikut.

Manfaat penerapan kajian risiko kebakaran sebagai alat bantu pengambilan keputusan akan bervariasi antara untuk perusahaan atau untuk pengerjaan proyek. Tidak semua kegiatan harus menerapkan kajian risiko kebakaran secara formal. Kajian risiko kebakaran diperlukan dalam kondisi

- proyek yang sangat besar;

- ketika bahaya kebakaran yang ada kurang dipahami;
- ketika sulit mengambil keputusan terhadap upaya perlindungan kebakaran yang paling sesuai, mengingat dampak yang dapat ditimbulkan akibat kebakaran sangat luas;
- Ketika biaya perlindungan kebakaran secara relatif signifikan terhadap biaya kajian risiko kebakaran.



Gambar 6.1 Metodologi Kajian Risiko Kebakaran

Kerangka metodologi yang disajikan dalam bab ini mengacu pada *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. Sebagai tambahan, contoh lain dari kajian risiko kebakaran dapat dilihat pada NFPA 550 mengenai *Guide to the Fire Safety Concept*.

Beberapa kunci atas suksesnya suatu kajian risiko kebakaran adalah sebagai berikut.

- Personel yang akan melakukan kajian risiko kebakaran sebaiknya adalah orang yang mengerti kajian risiko kebakaran serta berpengalaman. Kajian risiko kebakaran sebaiknya dilakukan oleh seorang *fire protection engineer* yang dapat menggunakan *common sense*, realitis, dan hasilnya dapat dibuat menjadi suatu laporan yang berbasis kinerja (*performance-based*) terhadap upaya proteksi kebakaran.
- Seorang *fire risk engineer* akan membuat beberapa asumsi penting. Setiap asumsi yang dibuat tersebut harus didokumentasikan serta dilampirkan dengan justifikasi berupa data penunjang.
- Dokumentasi penting untuk membantu pemahaman akan hasil dan laporan kajian risiko kebakaran yang sudah lama dibuat sehingga *fire protection* harus memastikan bahwa kajian risiko kebakaran telah didokumentasikan secara utuh dan menyeluruh.

DASAR-DASAR PENILAIAN RISIKO

Pendekatan metodologi penilaian risiko seharusnya dilakukan secara efisien (*cost-effective*) dan dapat memberikan detail yang mencukupi untuk menentukan tingkat risiko agar pengendalian risiko yang dilakukan lebih tepat sasaran. Aspek keselamatan terhadap kebakaran dan ledakan merupakan salah satu aspek utama yang diperhatikan. Oleh karena itu, penting memahami dasar penilaian risiko terkait aspek keselamatan terhadap kebakaran dan ledakan. Secara umum penilaian risiko terbagi dalam 4 tahap, yaitu

- Tahap 1: Identifikasi dan Skala Prioritas
- Tahap 2: Analisis Risiko
- Tahap 3: Evaluasi Risiko
- Tahap 4: Reduksi Risiko

Penilaian risiko disesuaikan dengan kompleksitas dan besarnya risiko. Metode penilaian risiko melalui tiga tahap berikut.

1. Kualitatif/*Qualitative* (Q): frekuensi dan *severity* ditentukan secara kualitatif.
2. Semikuantitatif/*Semiquantitative* (SQ): frekuensi dan *severity* ditentukan/ diestimasi mendekati kuantitatif dalam bentuk *range*.
3. Kuantitatif/*Quantified Risk Assessment* (QRA): penilaian secara kuantitatif yang paling detail dibandingkan metode sebelumnya berdasarkan level estimasi risiko dan kompleksitas risiko yang ada.

Penilaian Risiko Kualitatif

Fire Safety Risk Assesesment dari HSE UK

Panduan *Five Steps to Risk Assessment* yang dikeluarkan oleh HSE UK dapat digunakan sebagai panduan untuk melakukan Kajian Risiko kebakaran (Gambar 6.2).



Gambar 6.2 *Five Steps to Risk Assessment* dari HSE UK
(Sumber: <http://www.hse.gov.uk/pubns/indg163.pdf>)

Penilaian Risiko Semi Kuantitatif

Fire And Explosion Index (F&EI)

Dow's Fire and Explosion Index (F&EI) merupakan indeks bahaya yang telah digunakan secara luas dan telah diperbarui enam kali sejak tahun 1967. Edisi terbaru (edisi ke-7), yang diterbitkan pada tahun 1994, adalah metode yang dipakai pada kajian ini. AIChE (1994) mendeskripsikan F&EI sebagai pengukuran kuantitatif yang berdasarkan data-data, energi potensial material yang sedang dievaluasi, dan pengembangan dari praktik pencegahan kerugian yang telah dilakukan. F&EI dapat dijadikan sebagai panduan bagi desainer proses (*process designer*) untuk memutuskan apakah dibutuhkan material dengan yang lebih aman dan/ atau rute proses lainnya (Etowa, Amyotte, Pegg, & Khan, 2002). Selain itu, F&EI mendeskripsikan bahaya-bahaya di masing-masing unit proses dan juga dapat menjadi dasar pembuatan keputusan dalam mengurangi tingkat keparahan dan/ atau probabilitas dari potensi kecelakaan. Terdapat beberapa aplikasi kajian risiko menggunakan F&EI pada industri minyak dan gas bumi (Lestari & Nurdiansyah, 2007).

F&EI menghubungkan bahaya-bahaya proses dengan informasi proses (contohnya kondisi proses, material, tipe peralatan, dan karakteristik proses lainnya) dalam istilah “penalti” dan “faktor kredit”. F&EI dilakukan berdasarkan “kondisi terburuk”, yang berarti hanya material yang paling berbahaya yang dievaluasi pada saat kondisi operasional spesifik (contohnya *start up*, *shut down*, dan operasi normal). Sebagai contoh, ketika unit proses memiliki bahaya cairan dan debu yang mudah terbakar, F&EI harus ditetapkan berdasarkan cairan dan debu yang mudah terbakar itu. Setelah itu, hasil F&EI dan *business interruption* dengan nilai tertinggi harus dilaporkan kepada manajemen sebagai kejadian terburuk.

Rincian prosedur, panduan, dan perhitungan (persamaan) untuk menentukan penalti dan faktor kredit dari F&EI akan dijelaskan pada seksi selanjutnya. Metode yang dipakai dalam proposal ini merupakan ringkasan dari metode *Dow's Fire and Explosion Hazard Classification Guide 7th edition* yang diterbitkan pada tahun 1994 oleh American Institute of Chemical Engineers (AIChE).

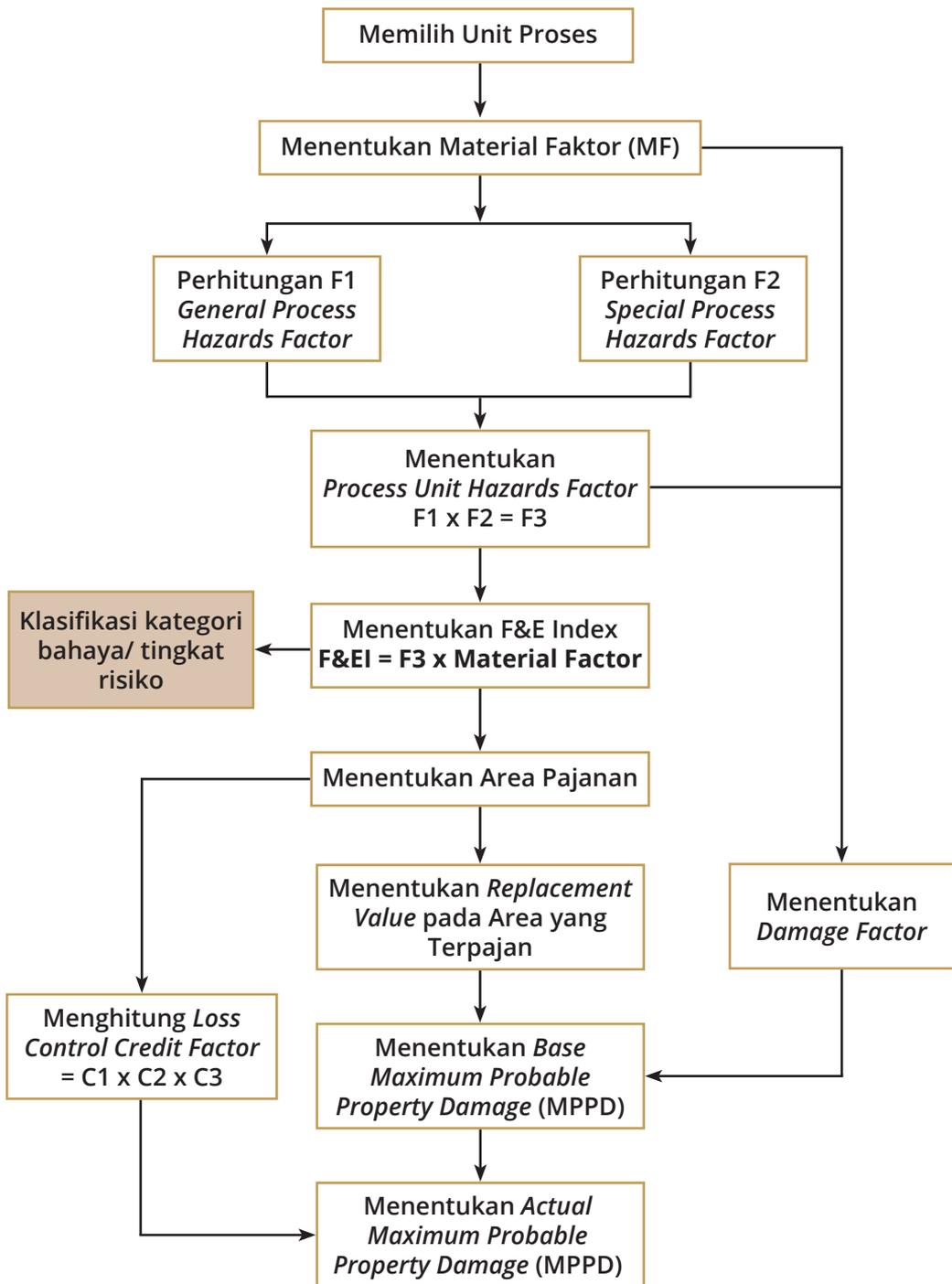
Secara singkat, tujuan F&EI adalah untuk

1. MENGKUANTIFIKASI perkiraan kerusakan jika terjadi kebakaran dan ledakan.
2. MENGIDENTIFIKASI peralatan yang mungkin akan memberi kontribusi untuk menimbulkan atau memperparah kecelakaan.

Perhitungan *Dow's Fire and Explosion Index*

Perhitungan *Dow's Fire and Explosion Index* (F&EI) terdiri atas beberapa langkah yang ditunjukkan oleh Gambar 6.3 (AIChE, 1994) dan pada pembahasan di bawah ini. Untuk menghitung F&EI, diperlukan beberapa dokumen di bawah ini (AIChE, 1994).

- a. Plot dari *plant/process* dan/atau *process flow sheet*.
- b. *Replacement cost* data untuk pemasangan peralatan proses yang sedang dilakukan.
- c. *Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide, 7th Edition*.
- d. *Formulir Fire and Explosion index, Loss control Credit Factors, Process Unit Analysis Summary, and Manufacturing Unit Risk Analysis Summary*.



Gambar 6.3 Skema Perhitungan F&E

(Sumber: AIChE, 1987; AIChE, 1994)

Berikut ini dipaparkan langkah-langkah perhitungan F&EI.

Pemilihan Unit Proses

Metode ini dimulai dengan pemilihan unit proses yang akan dievaluasi. Unit proses yang bisa menyebabkan dampak besar jika terjadi kecelakaan adalah unit proses yang pertama dipilih. Untuk mengevaluasi unit proses tersebut, diperlukan informasi mengenai

- energi potensial bahan kimia (*material factor*);
- jumlah bahan berbahaya yang terdapat di dalam unit proses;
- massa jenis bahan yang terdapat di dalam unit proses;
- temperatur dan tekanan pada saat operasi;
- sejarah kejadian kebakaran dan kecelakaan di unit proses yang sama; dan
- peranan unit proses terhadap keseluruhan proses

(AIChE, 1994).

Penentuan *Material Factor* (MF)

Material factor adalah angka potensial energi yang dilepaskan dari kejadian kebakaran dan ledakan yang disebabkan oleh *combustion* atau *chemical reaction*. MF dihasilkan dari nilai *reactivity* (N_r) dan nilai *flammability* (N_f).

Perhitungan *General Process Hazards Factor* (F1)

General process hazard memiliki peranan yang penting dalam menentukan besarnya potensi kecelakaan dan dapat diterapkan di hampir semua kondisi. *General process hazard* terdiri atas enam butir, yaitu reaksi eksotermis, reaksi endotermis, pemindahan dan penanganan material, unit proses tertutup, akses (jalan) dan saluran pembuangan, dan pengendalian tumpahan, meskipun mungkin pada kasus tertentu tidak perlu menerapkan semua butir.

Perhitungan *Special Process Hazards Factor* (F2)

Special process hazard adalah faktor penting yang dapat meningkatkan probabilitas potensi kecelakaan dan terdiri atas kondisi proses spesifik yang berdasarkan pengalaman berperan dalam penyebab terbesar dari kejadian kecelakaan. Terdapat dua belas butir yang termasuk dalam *special process hazards factor*, seperti material beracun, tekanan bawah atmosfer, temperatur operasi pada/dekat *flammable range*, ledakan debu, tekanan pelepasan, temperatur rendah,

jumlah material, korosi dan erosi, kebocoran, penggunaan alat pembakar, sistem pertukaran minyak panas, dan peralatan berputar.

Penentuan *Process Unit Hazard Factor* (F3)

Process unit hazard menggabungkan seluruh faktor yang dapat menyebabkan terjadinya kebakaran dan ledakan. Nilai dari unit *hazard factor* diperoleh dari *General Process Hazards Factor* (F1) dan *Special Process Hazards Factor* (F2).

Penentuan *F&E Index*

The Dow Fire and Explosion Index (F&EI) adalah hasil dari *Process Unit Hazards Factor* (F3) dan *Material Factor* (MF). Setelah itu, tingkat bahaya (keparahan) dari proses yang dievaluasi dapat ditetapkan menggunakan Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Klasifikasi Tingkat Bahaya Berdasarkan F&EI

Kisaran F&EI	Tingkat Bahaya
1-60	Ringan
61-96	Moderat
97-127	Intermediat
128-158	Berat
159-ke atas	Parah

Penghitungan *Loss Control Credit Factors* (LCCF)

Faktor-faktor ini mewakili pengendalian kerugian (pencegahan) yang berdasarkan pengalaman dan data statistik telah terbukti menguntungkan dalam pencegahan atau pengurangan kecelakaan yang serius. Dasar pemikiran dalam menggunakan faktor kredit ini berbeda dengan nilai F&EI. Nilai F&EI yang tinggi menunjukkan proses yang dievaluasi memiliki bahaya yang tinggi pula, sedangkan nilai faktor kredit pengendalian kerugian menunjukkan menurunnya kesempatan untuk terjadinya kecelakaan.

Terdapat tiga kategori dalam faktor kredit pengendalian kerugian: *Process Control* (C1), *Material Isolation* (C2), dan *Fire Protection* (C3). Jika tidak ada kredit yang diberikan pada butir tertentu, faktor kredit yang diberikan adalah 1,0. Total kredit faktor diberikan berdasarkan perhitungan di bawah ini.

$$C_{total} = C1 \times C2 \times C3$$

a. *Process Control Credit Factor (C1)*

Process control credit factors terdiri atas *emergency power* (pembangkit listrik darurat), *cooling* (pendingin), *explosion control* (pengendalian ledakan), *emergency shutdown* (penghentian darurat), *computer control* (pengendalian komputer), *inert gas* (gas inert), *operating instruction/procedures* (prosedur atau instruksi operasi), *reactive chemical review* (tinjauan terhadap bahan kimia reaktif), *other process hazards analysis* (analisis bahaya proses yang lain).

b. *Material Isolation Credit Factor (C2)*

Material isolation credit factors terdiri atas *remote control valves* (katup yang dikendalikan dari jauh), *dump/blowdown* (tangki penampungan), *drainage* (drainase), dan *interlock*.

c. *Fire Protection Credit Factor (C3)*

Fire protection credit factors terdiri atas *leak detection* (deteksi kebocoran), *structural steel* (baja struktural), *fire water supply* (pasokan air pemadam), *special systems* (sistem khusus), *sprinkler system* (sistem sprinkler), *water curtain* (tabir air), *foam* (busa), *hand extinguisher/monitors* (alat pemadam api ringan), *cable protection* (proteksi kabel).

(AIChE, 1994)

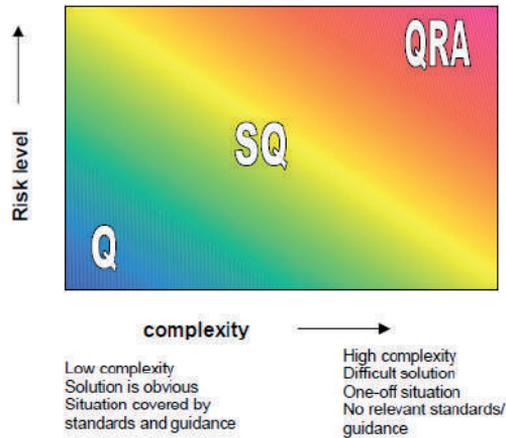
Hasil Perhitungan F&EI

Terdapat beberapa hasil yang dapat dihitung dalam F&EI, yaitu

- klasifikasi kategori bahaya/ level dari risiko;
- kemungkinan area yang terpajan;
- kemungkinan nilai kerugian.

Penilaian Risiko Kuantitatif

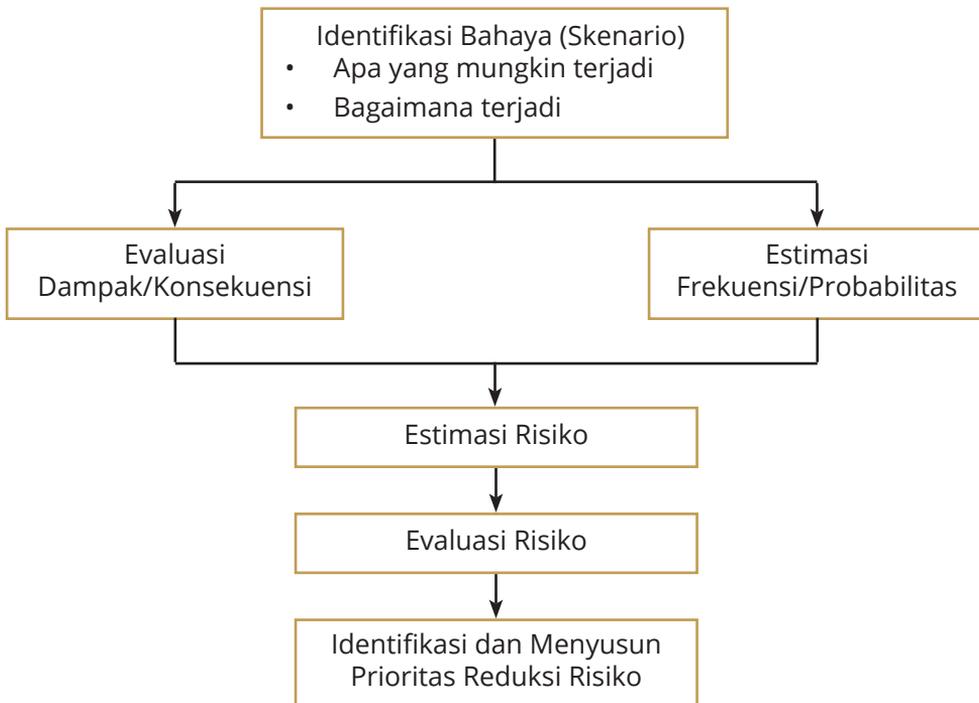
Penilaian Risiko Kuantitatif adalah sebuah penilaian risiko yang formal, sistematis, dan menyeluruh yang memberikan estimasi kuantitatif risiko kebakaran pada orang, asset, dan masyarakat. Kemungkinan terjadinya kebakaran (*likelihood*) dan dampak kebakaran (*consequences*) digambarkan dalam angka. Semakin tinggi risiko, maka membutuhkan penurunan risiko yang signifikan. Artinya, semakin diperlukan penilaian risiko kuantitatif yang lebih kompleks dan detail. Ilustrasi tahapan setiap metode penilaian risiko dapat dilihat dalam Gambar 6.4 berikut.



Gambar 6.4 Pendekatan Penilaian Risiko

(Sumber: HSE UK, 2006)

Penilaian risiko secara kuantitatif dilakukan untuk mengevaluasi risiko dan mengidentifikasi kemungkinan upaya penurunan risiko dengan biaya yang efektif. Berdasarkan Center for Chemical Process Safety/CCPS (2009), proses penilaian risiko secara kuantitatif dapat dijelaskan dalam Gambar 6.5 berikut.



Gambar 6.5 Proses Penilaian Risiko Berdasarkan Skenario

(Sumber: Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2000 dalam Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2009)

Penilaian risiko berdasarkan skenario memiliki beberapa elemen, yaitu:

1. tujuan penilaian risiko berdasarkan skenario,
2. deskripsi fasilitas yang ditinjau,
3. identifikasi bahaya,
4. daftar insiden,
5. pemilihan insiden yang mungkin terjadi,
6. konstruksi model dari insiden,
7. estimasi dampak,
8. estimasi frekuensi,
9. perhitungan risiko, dan
10. upaya penurunan risiko.

Penjelasan lengkap mengenai tahap-tahap penilaian risiko kuantitatif kaitannya dengan kebakaran dan ledakan dijelaskan sebagai berikut.

a. Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*)

Identifikasi bahaya merupakan langkah yang terstruktur dan sistematis untuk menetapkan suatu bahaya pada awal proses penilaian risiko. Proses identifikasi bahaya dilakukan melalui observasi, wawancara dan analisis data sekunder. Identifikasi bahaya mencakup dua aspek meliputi risiko terhadap fasilitas dan risiko eksternal. Hasil identifikasi bahaya tersebut akan digunakan sebagai dasar penentuan skenario untuk menentukan estimasi frekuensi dan analisis dampak/konsekuensi.

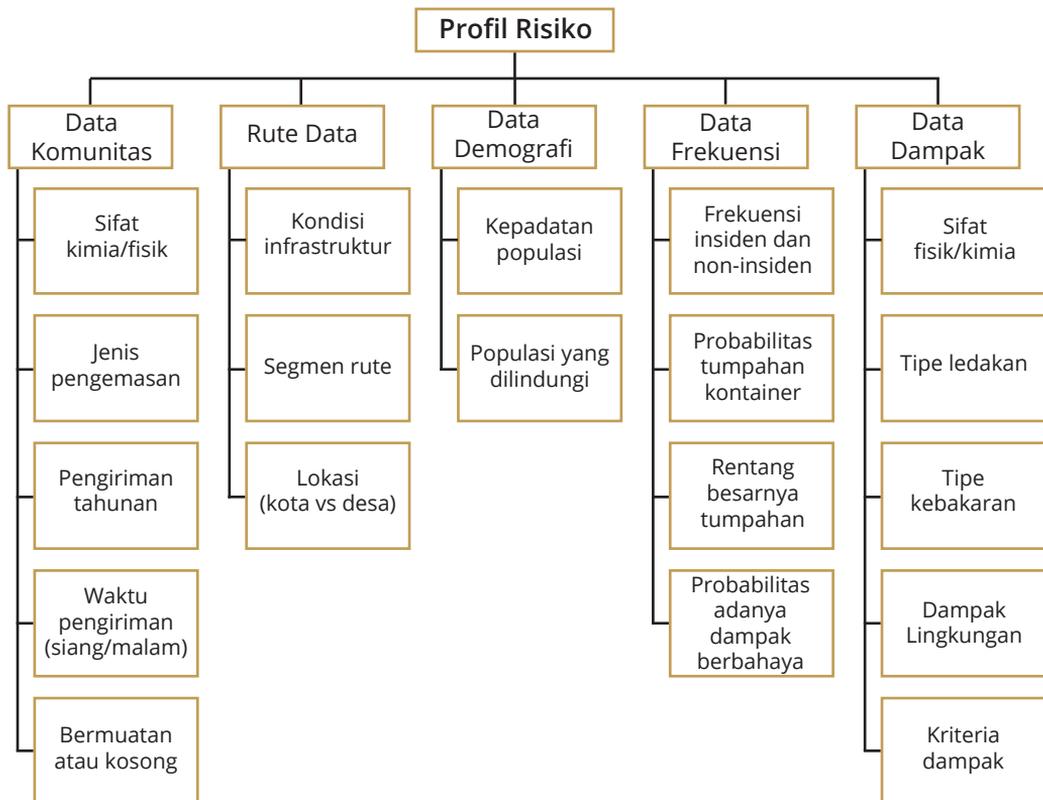
Dalam *Guidelines for Chemical Transportation Safety, Security and Risk* dari CCPS (2008) dijelaskan bahwa *hazard* berupa bahan kimia berbahaya berhubungan dengan karakteristik bahan kimia berbahaya tersebut. Karakteristik tersebut merepresentasikan *inherent risk* dan potensi konsekuensi jika bahan kimia tersebut rilis ke lingkungan. *Hazard* berdasarkan karakteristik bahan kimia berbahaya meliputi sifat *flamability, combustibility, toxicity, corrosivity, reactivity* dan sebagainya, misalnya *explosivity, detonability, radioactivity, biological hazard, odor, asphyxiation, dan environmental persistence*. Selain itu, perlu ditentukan beberapa initiating event yang dapat memicu kejadian kebakaran dan ledakan.

Sumber data yang dapat dipergunakan dalam identifikasi bahaya untuk menentukan skenario kejadian kebakaran dan ledakan dapat diperoleh dari berbagai sumber. Data tersebut harus memenuhi syarat sebagai berikut.

- Data tersedia untuk skenario-skenario yang mungkin terjadi.

- Data dapat dianalisis.
- Data harus divalidasi oleh pihak yang bertanggung jawab atas data tersebut
- Data yang dianalisis dapat diinterpretasikan.
- Data kuat dan valid serta dapat dipergunakan untuk justifikasi dan prediksi konsekuensi yang akan terjadi.

(Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2008)



Gambar 6.6 Sumber Data dalam Penilaian Risiko Kuantitatif Estimasi Frekuensi/Probabilitas

(Sumber: Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2008)

Setelah melakukan identifikasi bahaya, tahap berikutnya adalah pengukuran estimasi frekuensi/probabilitas risiko. Estimasi frekuensi dilakukan untuk mengetahui frekuensi atau kemungkinan suatu kecelakaan terjadi. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam penentuan frekuensi dari suatu skenario kebakaran dan ledakan dapat meliputi hal-hal sebagai berikut:

- *Event rate untuk mengestimasi frekuensi kejadian dari initiating event*
- Kondisi yang mungkin terjadi dan dampak lanjutan dari pelepasan/tumpahan (*release*) tersebut
- Probabilitas ukuran atau besarnya pelepasan/tumpahan bahan kimia

berbahaya dalam persentase tertentu termasuk jangkauannya.
(Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2008)

Metode estimasi frekuensi dapat diketahui dengan beberapa metode yang banyak digunakan dan dikembangkan dalam penilaian risiko umum ataupun penilaian risiko secara kuantitatif, antara lain

- *Fault Tree Analysis*,
- *Event Tree Analysis*,
- *Failure Mode and Effects Analysis*,
- *Statistical Simulation Analysis*, dan
- *Analytical Methods*

(Center for Chemical Process Safety, 2008).

Dalam menentukan frekuensi berdasarkan skenario yang telah ditetapkan, prinsip-prinsip umum data yang dapat digunakan untuk metode estimasi frekuensi harus menggunakan data yang sesuai dengan situasi atau mendekati situasi nyata, pemilihan data dilakukan secara selektif sesuai dengan kondisi yang paling sesuai, serta data yang digunakan adalah data yang representatif (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2008).

Metode analisis yang umum digunakan dalam estimasi frekuensi adalah *Event Tree Analysis* (ETA). Metode ini dapat digunakan untuk perhitungan atau kalkulasi frekuensi berdasarkan kejadian/skenario (*event*) yang terjadi. ETA menyajikan grafik logis yang mengidentifikasi dan menghitung *outcome* yang kemungkinan besar terjadi dari kejadian permulaan (*initiating event*) yang ditetapkan dalam skenario. Khusus dalam penilaian transportasi, *outcome* yang muncul dapat terjadi akibat didahului dengan kecelakaan/*incident* atau tanpa terjadi kecelakaan terlebih dahulu. ETA juga dapat dikembangkan untuk mengetahui prakejadian (*pre-incident*) dan pascakejadian (*post accident*) (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2008).

	Only minor damage to the riser	Wind is sufficient to carry cloud away	No ignition source	Frequency	Description	
External impact 1.9E-03/yr	TRUE 0.56	0.95		1.0E-03/yr	No consequence	
			0.05	0.89	4.7E-05/yr	No consequence
		0.11		5.9E-06/yr	Small external fire/explosion	
	FALSE 0.44		0.83		6.9E-04/yr	No consequence
			0.17		1.4E-04/yr	Large external fire/explosion
					1.9E-03/yr	Total - same as initiating event

Gambar 6.7 Contoh Event Tree Analysis

(Sumber: Center for Chemical Process Safety, 2009)

b. Analisis Dampak/Konsekuensi

Jangkauan potensi dampak atau konsekuensi yang dapat menjangkau manusia, peralatan, material dan lingkungan dalam aspek kebakaran dan ledakan bergantung pada:

- bahan berpotensi bahaya (*hazard*) dan karakteristik fisik kimia dari bahan berbahaya;
- volume total;
- tekanan dan suhu;
- desain dan instalasi alat;
- kondisi kebakaran dan ledakan; dan
- kondisi atmosferik.

(Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2008).

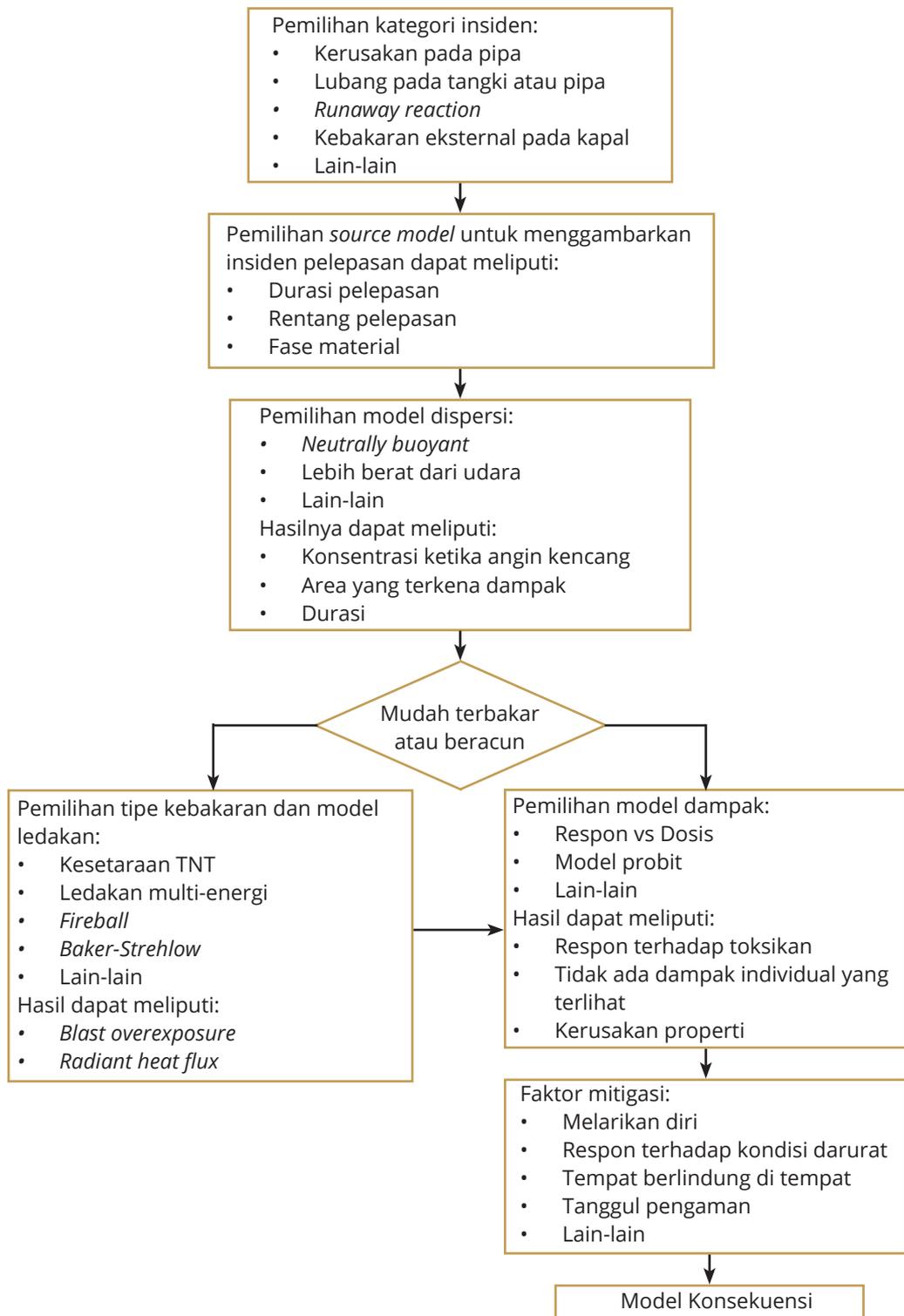
Potensi tersebut dapat menimbulkan berbagai konsekuensi, misalnya kebakaran, BLEVE, *vapor cloud explosion*, *flammable vapor cloud*, *toxic cloud*, *asphyxiation cloud*, dan dampak lingkungan seperti kerusakan ekosistem, kontaminasi, radiasi. Konsekuensi yang ditimbulkan mulai dari kematian, luka/cedera, kerusakan properti, dampak lingkungan, penghentian bisnis, citra yang buruk dan lain-lain (Center for Chemical Process Safety/CPSS, 2008).

Potensi konsekuensi yang terjadi dalam transportasi bahan kimia berbahaya secara umum dijelaskan dalam Center for Chemical Process Safety (2008) dengan beberapa konsekuensi yang sering terjadi dalam peristiwa kebakaran dan ledakan sebagai berikut.

Metode analisis dampak dapat diketahui dengan beberapa metode yang banyak digunakan dan dikembangkan dalam penilaian risiko umum maupun penilaian risiko secara kuantitatif, antara lain

- *TNT Equivalency Model,*
- *TNO Method,*
- *Multy Energy Concept,*
- *Baker-Strehlow Method,* dan
- *Congestion Assessment Method.*

Penelitian Crowl dan Louvar (2002) telah mengembangkan prosedur analisis konsekuensi seperti dalam Gambar 6.10. Perhitungan evaluasi dampak atau konsekuensi ini dapat dilakukan secara matematik maupun dengan menggunakan perangkat lunak. Perangkat lunak yang dapat digunakan untuk evaluasi konsekuensi kebakaran dan ledakan adalah BREEZE Incident Analysis dan ALOHA (Area Locations of Hazardous Atmosphere).



Gambar 6.8 Prosedur Analisis Konsekuensi

(Sumber: Crowl dan Louvar, 2002)

c. Estimasi Tingkat Risiko

Estimasi tingkat risiko dilakukan berdasarkan hasil perhitungan konsekuensi dan frekuensi. Dalam kajian risiko kuantitatif, risiko dihitung dalam risiko individu dan risiko sosial. Tindakan risiko dihitung dari kajian risiko kuantitatif adalah sebagai berikut:

- Potensi Kehilangan Hidup (*Potential Loss of Life* (PLL))
PLL merupakan *annual fatality rate* atau jumlah kematian per tahun yang diperkirakan berdasarkan sebab tertentu atau angka rata-rata kematian per tahun. Keseluruhan jumlah kematian yang dihitung menjadi perhatian penting karena menunjukkan jumlah korban jiwa yang dapat timbul akibat adanya *major accident*, khususnya kebakaran dan ledakan.
- Risiko Individu Per Tahun (*Individual Risk Per Annum*/IRPA)
Risiko individu yang dihitung menunjukkan frekuensi di mana individu dapat diekspektasikan menerima level bahaya tertentu dari potensi bahaya (*hazard*) yang spesifik. Dengan mengetahui risiko pada tingkat individu, diharapkan dapat dipastikan tidak ada personel dalam perusahaan yang *over-exposed* terhadap suatu risiko.

Risiko individu (IR) adalah frekuensi di mana seorang individu dapat diharapkan untuk mempertahankan bahaya tingkat tertentu dari realisasi bahaya tertentu. Tujuan dari kriteria risiko individu adalah untuk memastikan bahwa tidak ada personel dalam kelompok pekerja tertentu lebih terkena risiko. Nilai tersebut menghasilkan sebuah nilai tunggal pada lokasi tertentu atau dalam bentuk garis kontur yang menunjukkan risiko transportasi. Nilai risiko individu diperoleh dengan mengalikan frekuensi yang diambil (kejadian/km/tahun) dengan jarak konsekuensi yang didapat pada setiap skenario kejadian.

Analisis frekuensi telah dilakukan berdasarkan bagian (b) dan hasil untuk masing-masing kejadian yang sesuai dengan skenario yang dipilih. Frekuensi dari setiap peristiwa kemudian dihitung sebagai berikut.

$$\text{Individual Risk} = \sum \text{Event Frequency} \times \text{Fatality Probability}$$

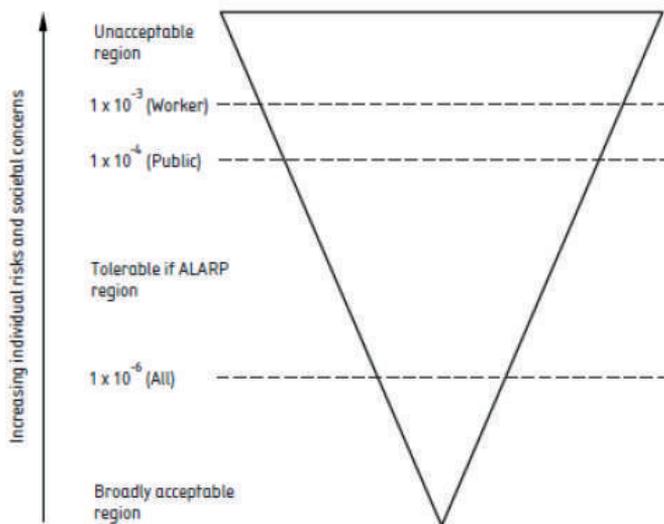
Frekuensi kejadian (*event frequency*) akan didasarkan pada *event tree* yang menganggap keberhasilan/kegagalan dari deteksi/isolasi dan probabilitas pengapian. Probabilitas kematian adalah probabilitas dari personel yang

terkena konsekuensi dalam kisaran lokasi dan probabilitas setara kematian, yang didefinisikan oleh persamaan di bawah ini.

$$\text{Fatality Probability} = \text{Directional Factor} \times \text{Operating Time} \times \text{Consequence Impact}$$

Asumsi yang digunakan untuk estimasi risiko adalah sebagai berikut.

- *Operating time*. Waktu operasi diambil dari durasi waktu kerja atau waktu total operasional selama satu *shift* kerja. Sementara itu, untuk masyarakat diestimasi maksimal waktu di rumah adalah 24 jam bagi masyarakat yang tidak memiliki aktivitas di luar rumah.
- *Directional factor*. Bergantung pada bahaya, kejadian seperti jet api (*jet fire*) hanya akan memiliki probabilitas 1/4 karena bahaya tidak dapat merambat di segala arah secara bersamaan. Untuk ledakan, *probabilitas directional* adalah 1.0.
- *Consequence Impact*. Bergantung pada sejauh mana konsekuensi dalam daerah, 100% cakupan kontur kematian diperkirakan, faktor akan 1.0. Jika nilai yang didapat rendah, maka konsekuensinya ringan dan kontur kematian 100% kurang dari daerah dianalisis. *Consequence impact* adalah perbandingan antara luas area dengan zona dengan konsekuensi paling besar pada simulasi dibandingkan dengan luas area keseluruhan.

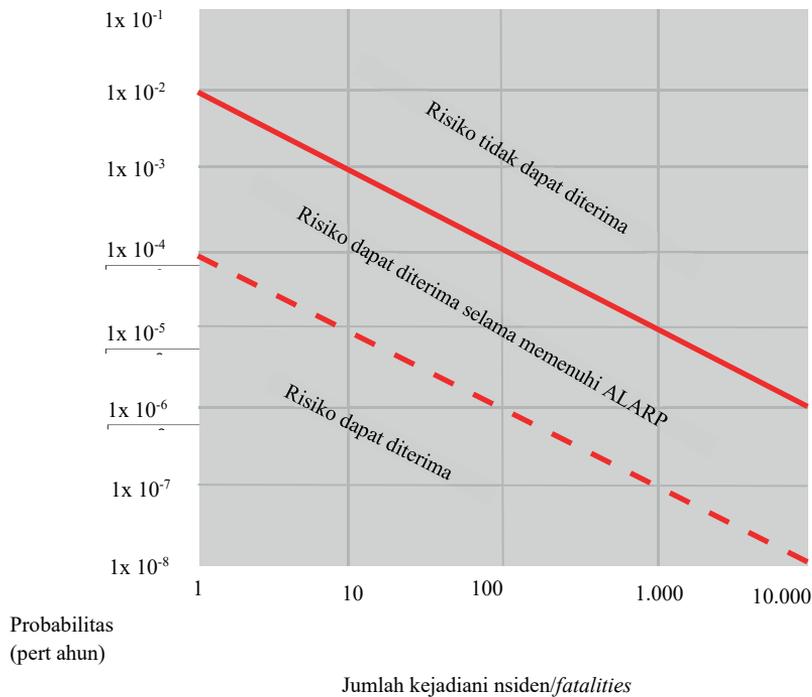


Gambar 6.9 Contoh Kriteria Risiko Individu

(Sumber: HSE, 2006)

Kriteria Risiko Masyarakat (*Societal Risk Criteria*)

Risiko masyarakat merupakan akumulasi dari keseluruhan risiko individu yang telah dihitung. Hal ini penting untuk menunjukkan frekuensi kejadian dan jumlah korban yang dapat timbul dari suatu kebakaran dan ledakan. Risiko masyarakat adalah perhitungan kemungkinan yang memengaruhi lebih dari satu orang dan membutuhkan estimasi dari lokasi dan jumlah orang yang mengalami risiko, kemudian nilainya ditampilkan dalam grafik F-N di mana grafik tersebut menunjukkan frekuensi (F) dari orang-orang yang berpotensi menjadi korban (N).



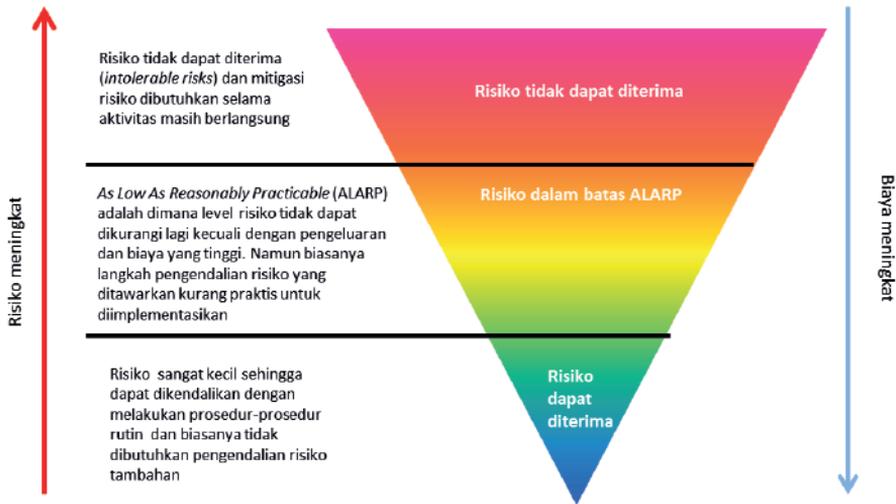
Gambar 6.10 Kriteria Risiko

(Sumber: HSE, 2006)

d. Evaluasi Risiko

Evaluasi risiko merupakan proses yang dilakukan setelah menjalankan analisis risiko, proses ini digunakan untuk menentukan risiko apa saja yang membutuhkan mitigasi khusus dan bagaimana prioritas mitigasinya, membandingkan tingkat risiko terhadap standar yang telah ditentukan, target tingkat risiko, dan kriteria lainnya.

ALARP adalah salah satu prinsip dasar manajemen risiko. Konsep “*As Low as Reasonably Practicable Risk*” atau ALARP sering kali digunakan untuk menentukan atau menetapkan nilai risiko yang dapat diterima. Ide dasar di balik konsep ini adalah risiko yang harus dikurangi ke tingkat yang wajar yang serendah mungkin tanpa memerlukan investasi yang “berlebih”.



Gambar 6.11 Posisi ALARP Berdasarkan *Magnitude of Risk*

(Sumber: Talbot, 2013)

Matriks risiko sering digunakan untuk mengatur batas-batas risiko yang dapat diterima dan tidak dapat diterima. Kotak tengah pada matriks mewakili tingkat risiko yang sedikit diterima. Pada ALARP ada batasan risiko yang ditetapkan “dapat diterima” dan tidak dapat diterima”. Di antara batas-batas yang dapat diterima dan tidak dapat diterima terdapat keseimbangan antara risiko dan manfaat yang harus ditetapkan. Jika fasilitas yang diusulkan untuk mengambil tingkat risiko yang tinggi, manfaat yang dihasilkan harus sangat tinggi.

e. Identifikasi dan Penyusunan Prioritas Risiko

Proses pengendalian risiko dilakukan berdasarkan rekomendasi dari hasil mitigasi yang dilakukan pada proses evaluasi risiko dan harus konsisten dengan tujuan/sasaran proyek, dan tujuan pengelolaan. Pada tahap ini dilakukan beberapa strategi, yaitu

- mengumpulkan data dan informasi lengkap mengenai seluruh kegiatan operasional, dokumentasi insiden yang pernah terjadi, potensi kecelakaan;

- mengidentifikasi area krusial/sensitif pada rute yang dilalui, misalnya pada kondisi jalur yang membahayakan, pemukiman padat penduduk, kedekatan dengan fasilitas publik, infrastruktur negara yang penting, atau area tertentu yang dapat memicu potensi kebakaran dan ledakan;
- mengidentifikasi interaksi dengan berbagai pihak terkait terkait untuk saling bertukar pendapat atau mengacu suatu pedoman yang baik untuk diterapkan;
- melakukan penyusunan prioritas pengendalian yang akan dilakukan.

INFORMASI PROSES

Kegiatan kajian risiko kebakaran diawali dengan melakukan pengumpulan terhadap informasi dasar mengenai desain yang ada. Oleh karena itu, kegiatan kajian risiko kebakaran pada proyek baru mungkin mengalami kesulitan karena keterbatasan informasi yang ada. Walaupun demikian, daftar bahaya yang mungkin ada tetap dapat disusun; dampak bahaya kebakaran dapat dikaji; dan besar risiko *preliminary* dapat dihitung. Sebaiknya detail suatu kajian risiko kebakaran sesuai dengan detail dari desain informasi yang dimiliki. Beberapa informasi yang diperlukan untuk melakukan suatu kajian risiko kebakaran adalah

- filosofi pengoperasian dan pemeliharaan;
- *plot plans* dan gambaran *layout*;
- *piping and instrumentation diagrams* (P&IDs);
- *process flow diagrams* (PFDs);
- data bahan berbahaya;
- daftar peralatan; dan
- *process data sheets*.

IDENTIFIKASI BAHAYA KEBAKARAN

Proses identifikasi dan analisis bahaya kebakaran dan skenarionya merupakan tahap berikutnya dalam kajian risiko kebakaran. Oleh karena itu, identifikasi bahaya harus dilakukan secara terstruktur, sistematis, *auditable*, dan mencakup seluruh bahaya kebakaran, termasuk *nonprocess fires*. Proses identifikasi bahaya ini kemudian akan menghasilkan daftar potensial bahaya kebakaran yang mungkin timbul di fasilitas, seperti *jet fire*, *pool fire*, *flash fire*, BLEVE, *electrical*, atau kebakaran kelas A. Selain itu, daftar yang telah ada tersebut sebaiknya juga dilengkapi dengan kemungkinan lokasi dimana kebakaran tersebut dapat terjadi. Beberapa teknik

identifikasi bahaya yang dapat digunakan, tercantum dalam tabel berikut ini (Tabel 6.4).

Tabel 6.2 Metode Identifikasi Bahaya

Metode Identifikasi Bahaya
<ul style="list-style-type: none">• Checklist• Hazard Identification (HAZID)• What - If?• Hazard and Operability Studies (HAZOP)• Metode lainnya

Setiap bahaya yang teridentifikasi akan memiliki sejumlah skenario yang mungkin terjadi sehingga akan sulit bila harus dilakukan evaluasi untuk setiap skenario tersebut. Oleh karena itu, skenario kebakaran yang akan dipilih untuk dievaluasi adalah skenario yang representatif, yaitu yang memiliki karakteristik *initial release* dan ignisi yang dapat menyebabkan kerusakan paling besar, kerugian produksi, dan yang berisiko tinggi terhadap pekerja. Selain itu, skenario kebakaran yang terpilih harus memiliki inventaris yang cukup dan dapat terbakar cukup lama untuk mengakibatkan kegagalan peralatan maupun struktur. Adapun skenario yang lebih kecil, namun juga perlu dipertimbangkan, antara lain adalah kebakaran yang dapat mengalami eskalasi dan berdampak kurang parah, namun sangat mungkin terjadi.

ANALISIS BAHAYA KEBAKARAN

Analisis bahaya kebakaran (*fire hazard analysis*) merupakan proses untuk menentukan ukuran, keparahan, dan durasi dari suatu skenario, serta dampaknya kepada para pekerja, peralatan, operasi, dan lingkungan. Pada bagian ini dibahas proses dari analisis bahaya kebakaran. Sebagai contoh diberikan satu skenario terjadinya kegagalan penyegelan (*seal failure*) sehingga material di dalamnya terlepas, dan terignisi, kemudian terbakar. Dalam melakukan kajian, beberapa hal harus dikritisi, antara lain sebagai berikut.

- Kondisi parah apa yang dapat terjadi dari keadaan yang mengawali kejadian kebakaran tersebut?
- Dapatkah keadaan tersebut tereskalasi?
- Apa dampak dari keadaan tersebut terhadap pekerja, properti, *supply chain*, *customer*, dan publik?

Dalam banyak kasus, setiap skenario akan memiliki kondisi yang bervariasi untuk dianalisis, seperti ukuran zat yang terlepas, arah terlepasnya, suhu dan tekanan proses operasi, dan kondisi cuaca.

Escalation

Merupakan suatu hal yang penting untuk melihat jauh ke depan apa yang dapat terjadi setelah terjadi suatu kondisi inisiasi. Ini berguna untuk mengetahui penyebaran kebakaran ke area di sekitarnya. Jika tidak terdeteksi dan dikendalikan sedini dan secepat mungkin, kebakaran dapat tereskalasi hingga ke peralatan dan unit lainnya. Eskalasi dapat terjadi bila suatu kondisi telah melebihi *rule set* yang ada. Berikut ini adalah beberapa poin yang termasuk dalam *rule set*.

- Radiasi panas melebihi 37,5 kW/m² selama 10 menit.
- *Jet fire* dalam *vessel* atau *structural steel* yang tidak terproteksi selama 15 menit.
- *Pool fire* yang menjalar ke area yang belum terbakar.

Potensi terjadinya eskalasi harus dipelajari untuk melakukan kajian terhadap dampak dari radiasi panas dari suatu peralatan, jalur evakuasi, dan struktur pendukung.

Estimating Impact

Analisis bahaya kebakaran adalah suatu metode untuk melakukan estimasi dampak kebakaran terhadap pekerja, struktur, dan peralatan. Sebuah model komputer yang digunakan dalam analisis konsekuensi kebakaran, dengan persamaan sederhana untuk pemodelan *computational fluid dynamics* (CFD), membutuhkan waktu satu hari untuk mengevaluasi satu skenario. Sementara itu, seiring dengan semakin detailnya desain, analisis juga akan semakin kompleks. Dengan demikian, diperlukan program komputer yang dapat digunakan untuk pemodelan kebakaran di fasilitas industri.

Consequence-Only Decision Making

Dalam beberapa kasus, setelah dampak dari suatu konsekuensi diperkirakan, perusahaan memutuskan upaya proteksi kebakaran yang akan dilakukan tanpa melakukan analisis terlebih dahulu. Padahal, sangatlah penting untuk mengambil waktu untuk melakukan analisis konsekuensi (analisis bahaya kebakaran), kemudian menentukan upaya mitigasi yang paling sesuai dan dapat dilakukan sebelum melanjutkan kajian risiko kebakaran.

Likelihood

Analisis *likelihood* atau kemungkinan dari suatu skenario kebakaran penting untuk dijadikan pertimbangan, seperti

- frekuensi terjadinya kejadian inisiasi (karena kurangnya pengendalian);
- probabilitas terjadinya ignisi;
- kejadian *postrelease (escalation)*, konsekuensi berbeda, dan frekuensi kejadian terkait yang dapat timbul setelah bahan flammable ter-*release*.

Initiating Event Frequency Analysis

Estimasi frekuensi kejadian permulaan atau inisiasi dapat diketahui dari penyebab yang ada dalam skenario kebakaran. Setiap asumsi yang dibuat selama proses ini harus didokumentasikan. Bahan mudah terbakar yang terlepas dapat diestimasi dengan menghitung semua komponen sistem terkait yang bila rusak dapat menyebabkan terjadinya pelepasan (*release*). Selain itu, jumlah tersebut dapat meningkat bila terdapat data yang tidak sesuai (misalnya jenis, desain, penggunaan, dan kondisi pengoperasiannya). Pada kondisi tertentu, dapat pula dilakukan suatu studi atas sekuens kejadian yang mengarah pada kejadian inisiasi (*initiating event*). Untuk itu, teknik seperti *fault tree analysis* atau *event trees* dapat digunakan untuk mengestimasi frekuensi kejadian tersebut.

Adapun *fault tree analysis* dilakukan berdasarkan data grafis, deskripsi logis terhadap kegagalan mekanisme sistem yang ada. Sebelum melakukan analisis tersebut, harus dibuat suatu definisi spesifik mengenai kejadian tersebut, misalnya lepasnya propilen dari suatu sistem refrigerasi. Dengan demikian, dibutuhkan suatu pengertian yang dalam akan operasi sistem, bagian komponen yang menyusun, peran operator, dan kemungkinan *human error* yang dapat terjadi. Pembahasan ini mengacu pada *Guidelines for Hazard Evaluation* dan *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Assessment*.

Postrelease Frequency Analysis

Postrelease frequency analysis dilakukan dengan menggunakan *event trees*. *Event trees* merupakan gambaran representasi dari model logis sehingga pembuatannya didasari atas teori logis. Frekuensi dari sejumlah keluaran didefinisikan sebagai hasil dari *initiating event frequency* dan seluruh kemungkinan kejadian yang mengarah terbentuknya keluaran. Proses ini mirip dengan *fault tree analysis*, namun kebalikannya.

Konsep analisis ini mengandung suatu pengertian menyeluruh akan suatu sistem seperti *time sequence of instruction*, upaya pengendalian, atau kejadian fisik secara sekuens yang menimbulkan konsekuensi berbahaya.

Langkah awal dalam *event tree analysis* ini adalah kejadian permulaan (*initiating event*). Sementara itu, untuk melakukan evaluasi kuantitatif dari *event tree analysis*, diperlukan *condition probability*, yang mencakup reliabilitas data, catatan historis, pengalaman, atau dari *fault tree*.

Suatu *event tree* dari *postrelease frequency analysis* menghasilkan sejumlah luaran (*output*) dengan rentang dari yang lebih berbahaya ke yang kurang berbahaya. Suatu *event tree* berfokus pada kegagalan yang terjadi pada kondisi tanpa sistem dapat terjadi, dan pada kondisi dengan sistem proteksi maupun upaya mitigasi. Luaran kuantitatifnya adalah frekuensi dari setiap kejadian *outcome* seperti BLEVE, *flash fire*, *pool fire*, dan *jet fire* yang digunakan untuk menentukan besar risiko untuk individu maupun masyarakat.

Teknik *event tree* ini merupakan pendekatan yang relatif mudah dan dapat digunakan dalam berbagai tingkatan. Tingkatan tersebut ditentukan berdasarkan besarnya signifikansi suatu kejadian atau berdasarkan jumlah informasi yang tersedia (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2001).

Ignition Probability

Pelepasan sebagian besar bahan yang mudah terbakar dapat terignisi pada berbagai jarak dari lokasi sumbernya. Dalam kajian risiko kebakaran, perlu dilakukan identifikasi sumber ignisi yang dapat dijangkau oleh suatu awan mengandung konsentrasi bahan yang mudah terbakar. Ignisi dapat segera terjadi (ketika ada energi dari suatu kejadian kegagalan, kontak langsung dengan permukaan panas, atau pelepasan yang terjadi dalam kondisi suhu autoignisi suatu material) atau dapat juga tertunda hingga awannya, atau *pool*, bertemu dengan suatu sumber ignisi. Sumber-sumber tersebut antara lain api terbuka, permukaan panas, percikan atau gesekan mekanis (*mechanical friction*). Selain itu, ignisi juga dapat terjadi akibat aktivitas manusia. Beberapa sumber ignisi yang dapat ditemui pada area proses adalah

- *flare*,
- *boilers*,
- *fires heaters*,
- *static electricity*,
- *vehicle traffic*,

- *electrical motors,*
- *hot work; welding, cutting,*
- *hot surfaces,*
- *lighting,*
- *overhead high voltage lines,*
- *mechanical; sparks, friction, impact, vibration,*
- *chemical reactions.*

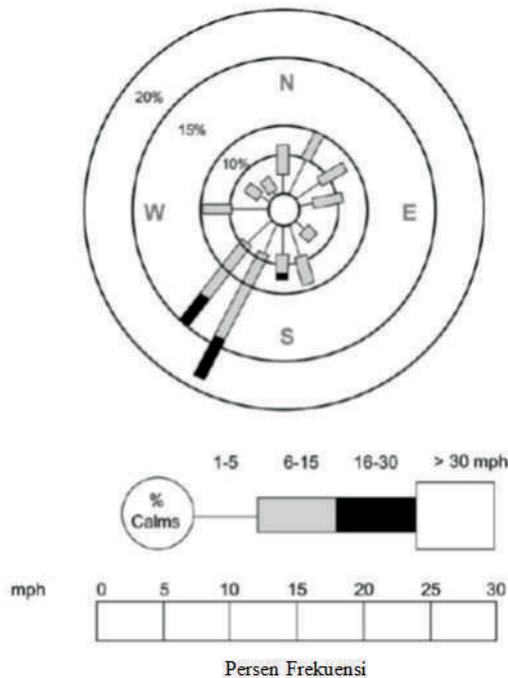
Probabilitas terjadinya ignisi didasari oleh fungsi dari dua komponen: yang pertama adalah kemungkinan akan timbulnya sumber ignisi; dan yang kedua adalah probabilitas sumber ignisi yang ada mengignisi material. Faktor kedua tersebut lebih sulit untuk diestimasi karena dalam fungsinya membutuhkan energi minimum untuk mengignisi suatu material yang mudah terbakar dan harus ada energi ignisi dari suatu sumber. Tabel 6.5 berikut menyajikan data mengenai probabilitas ignisi generik berdasarkan ukuran pelepasan (Cox *et al.*, 1990).

Tabel 6.3 Probabilitas Ignisi Generik

Kategori Tingkat Pelepasan	Tingkat Pelepasan lbs/s (kg/s)	Probabilitas Kebocoran Gas	Probabilitas Kebakaran Minyak
<i>Tiny</i> (Sangat kecil)	< 1,1 (<0,5)	0,005	0,03
<i>Small</i> (Kecil)	1,1-11 (0,5 -5)	0,04	0,04
<i>Medium</i> (Sedang)	11-55 (5-25)	0,10	0,06
<i>Large</i> (Besar)	55-441 (25-200)	0,30	0,08
<i>Massive</i> (Masif)	>441 (>200)	0,50	0,10

Kondisi Cuaca

Kondisi cuaca dapat memberikan efek yang besar terhadap mekanisme dan penyebaran bahan yang terlepas (*release*). Oleh karena itu, ketersediaan data mengenai kondisi cuaca (data meteorologi) tersedia dari *National Oceanic and Atmosphere Administration* (NOAA) dan dari bandara yang ada di sekitar lokasi fasilitas. Data tersebut mencakup arah angin, beberapa hasil perhitungan kecepatan angin, dan beberapa data kategori stabilitas atmosferik. Gambar 6.16 berikut ini menunjukkan tipikal peningkatan kecepatan angin (*wind rose*) pada poin 16, yang menggambarkan persentasi frekuensi angin dari masing-masing arah, dan frekuensi dari ketenangan aliran angin tersebut (*calm*). Stabilitas atmosferik merupakan hal yang sangat penting karena dapat memengaruhi proses pencampuran dan hasil dispersi udara.



Gambar 6.12 *Wind Rose*

Kebutuhan akan kelengkapan data meteorologi bergantung dari tingkat akurasi hasil analisis yang diinginkan. Sebuah data mengenai kondisi cuaca (kombinasi antara stabilitas atmosferik dan kecepatan angin) dapat digunakan, namun akan sulit untuk hanya menggunakan satu nilai kondisi rata-rata yang memadai untuk mewakili kondisi cuaca secara keseluruhan. Sebagian besar analisis risiko menggunakan setidaknya dua kondisi cuaca, contohnya satu data dengan nilai stabil (misalnya 2 m/s, tingkat stabilitas F) dan data lainnya adalah karakteristik kondisi rata-rata (misalnya 5 m/s, tingkat stabilitas D).

Informasi tambahan mengenai kondisi atmosferik dan faktor stabilitas dapat ditemukan dalam *Guidelines for Consequence Analysis* (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2000).

Kepadatan Populasi

Pola distribusi dan tingkat kepadatan penduduk penting diketahui untuk dapat mengkaji dampak dari radiasi panas dan asap kebakaran pada penduduk. Berdasarkan data tersebut, dapat dibuat suatu estimasi risiko dampak di atas terhadap populasi di dan sekitar fasilitas. Data populasi dibutuhkan bila estimasi risiko terhadap penduduk sekitar diperlukan. Namun, bila hanya ingin mengetahui

risiko individu, data populasi tidak terlalu diperlukan. Walaupun demikian, lokasi tempat tinggal dari individu yang akan diestimasi tetap harus diketahui.

Distribusi populasi didefinisikan sebagai kepadatan populasi. Beberapa sumber data populasi suatu area dapat diperoleh dari laporan sensus, peta, foto udara, dan inspeksi langsung. Sementara itu, perhatian khusus dibutuhkan terhadap tipe populasi yang bervariasi dan terhadap variasi waktu siang/malam (misalnya lokasi huni atau industri) serta konsentrasi kegiatan penduduk, seperti rumah sakit, rumah ibadah, atau sekolah. Jika variasi populasi pada waktu siang atau malam signifikan, perhitungan menggunakan data meteorologi yang dibagi berdasarkan kondisi waktu siang dan waktu malam.

Failure Rate Data

Dalam kajian risiko kebakaran, suatu alat bantu yang mencakup tipe *time-related* maupun tipe *demand-related* penting untuk digunakan untuk mengetahui *failure rate data*. Pada dasarnya, terdapat empat jenis data dan sumber data korespondensi mencakup *time-related* dan *demand-related failure data* yang tercantum dalam Tabel 6.6 dan akan dibahas dalam bagian berikutnya.

Tabel 6.4 Failure Rate Data

Tipe Data	Sumber Data
Fasilitas-data spesifik	Sumber internal
Data umum	Sumber data eksternal
Prediksi data (kualitas umum)	Teknik estimasi
Pendapat ahli (perkiraan kasar)	Pendapat ahli internal

Facility-Specific Data

Failure rate data yang dihasilkan dari pengumpulan informasi pada pengalaman akan kegagalan operasi peralatan fasilitas disebut sebagai *facility-specific* atau *field failure rate data*. *Facility-specific data* mencakup *failure rate specific* pada peralatan (misalnya data suatu pompa yang digunakan di lokasi fasilitas berdasarkan pabrik pembuat, model, dan nomor seri) yang juga terdapat dalam katalog. Pengumpulan *facility-specific data* dari kegiatan internal dalam suatu analisis risiko lebih sering dilakukan karena data tersebut merupakan cerminan dari kegiatan kerja, faktor lingkungan, dan data lainnya yang dapat berpengaruh secara spesifik terhadap peralatan yang diteliti. Kondisi yang paling ideal adalah dengan memperoleh data

historis yang valid dari peralatan yang identik, aplikasi yang identik, penggunaan fungsi alat dalam kondisi pengoperasian dan pemeliharaan yang identik. Data dari jenis peralatan yang serupa seperti disebut di atas dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan.

Agar suatu *facility-specific data* dapat digunakan, data tersebut harus di-maintain dalam suatu periode waktu demi keakuratan dalam penggambaran kecenderungan kegagalan kerja komponen, dan harus disimpan dalam format yang siap untuk diakses serta dapat ditemukembali (*di-retrieve*) (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2000).

Generic data

Walaupun jenis *facility-specific failure rate* data pada peralatan tertentu lebih sering dipilih untuk digunakan dalam berbagai penelitian, tetap, satu-satunya cara untuk memperoleh data yang cukup untuk kelengkapan penelitian adalah dengan membuat suatu set data generik. Data set ini dibuat dengan menggunakan *input-input* dari semua fasilitas suatu perusahaan, berbagai fasilitas suatu industri, sumber literatur, atau dari database komersil.

Data generik memiliki karakteristik yang lebih kurang spesifik dan detail daripada data jenis *facility-specific failure rate data*. Walaupun demikian, data generik hampir mendekati *facility-specific failure rate data*. *Generik failure rate data* tidak terbatas pada pabrik manufaktur spesifik, model, maupun nomor seri tertentu. Sebagai contoh, suatu *database* generik tidak dapat digunakan untuk membedakan performa ke depan atas dua pompa baru, yang masing-masing didesain untuk tujuan yang sama, namun dibuat oleh pabrik yang berbeda. Maka, *generic failure* akan menghasilkan perhitungan yang kurang lebih sama antara dua pompa tersebut. Walaupun spesifisitasnya kurang, *database* generik dapat memberikan gambaran lebih luas mengenai fasilitas sebagai *input* dan dapat mengatasi kekurangan dari *facility-specific data* dalam hal bias yang terjadi dalam *operating exposure* dan *failure mode*.

Predicted Data

Saat ini telah terjadi peningkatan perhatian dalam pengembangan metode untuk memprediksi jumlah *failure rate data* proses peralatan dan sistem. Beberapa metode terdahulu telah dipublikasikan di berbagai literatur, mencakup metode korelasi, *factored estimation procedures*, dan analogi untuk memprediksi tingkat kegagalan peralatan. Metode-metode tersebut diminati karena tingkat efisiensinya dalam

menghasilkan *equipment failure rate data* untuk mengkaji risiko dan kemudahannya untuk dioperasikan dengan *software* komputer.

Dalam metode ini estimasi *failure rate data* dengan menggunakan model dan korelasi dikembangkan berdasarkan analisis teknik dan *scientific* terhadap pengaruhnya pada reliabilitas jenis, kelas, atau kelompok tertentu dari suatu peralatan. Sebagai contoh, seseorang menyediakan teknik *factor-based* untuk mengestimasi kemungkinan dari kebocoran pipa atau kontainer betekan yang berdampak katastrofik. Faktor-faktor tersebut antara lain pengaruh bentuk dan ukuran, area pengelasan, usia dari tempat fasilitas, dan faktor kualitas lainnya (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2000).

Expert Opinion

Expert opinion adalah suatu opini dari seorang ahli mengenai *equipment failure rate data* yang didasarkan pada pengalaman seseorang atau kelompok, terhadap peralatan dan kondisi pengoperasian yang sama dan yang dapat lebih akurat daripada data generik.

Jenis pendekatan Delphi adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi estimasi dari opini ahli (*expert opinion*) yang dilakukan oleh sekelompok ahli. Data dalam *Institute of Electrical and Electronic Engineer's (IEEE) Std.500, Guide to the Collection and Presentation of Electrical Electronic, Sensing Component and Mechanical Equipment, Reliability for Nuclear-Power Generating Station* dikompilasi menggunakan pendekatan tersebut (IEEE, 1985). Jika *facility-specific data* tidak tersedia, referensi ini dapat dijadikan sumber yang baik untuk *failure rate data* komponen listrik, elektronik, dan mekanik.

Assumptions

Dalam berbagai kajian risiko, analis akan membuat asumsi-asumsi. Hal ini penting dilakukan karena validitas dari suatu analisis risiko bergantung dari validitas asumsi yang dibuat. Semua asumsi dalam kajian risiko harus didokumentasikan, dan dilengkapi dengan justifikasi yang dilakukan.

KEBERLANJUTAN PROGRAM

Sebagaimana sistem manajemen pada umumnya, sistem manajemen transportasi merupakan suatu siklus yang terus berkesinambungan. Beberapa hal

yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut.

- *Plan*: pengembangan sistem untuk mengelola risiko transportasi, termasuk review berkala, dan perbaruan manajemen sesuai kebutuhan;
- *Do*: segala sesuatu yang menjamin keberlangsungan elemen sistem manajemen, termasuk komitmen manajemen, budaya menerapkan konsep manajemen risiko dalam penetapan setiap keputusan;
- *Check*: memastikan sistem manajemen primer (primary management system) dan proses penilaian risiko berjalan sebagaimana mestinya;
- *Act*: identifikasi, pengembangan, evaluasi, dan pemilihan upaya reduksi risiko.

Untuk menjamin keberlangsungan siklus tersebut, perlu dipastikan

- komitmen yang sudah ada terhadap manajemen risiko;
- perbaikan berkelanjutan;
- tren terkini berkaitan dengan keselamatan dan keamanan bahan kimia; dan
- perkembangan implementasi analisis risiko transportasi.



BAB 7

SISTEM MANAJEMEN KESELAMATAN KEBAKARAN

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini dibahas sistem manajemen keselamatan kebakaran.

TUJUAN FIRE SAFETY

Pelbagai penelitian terkait dengan keselamatan kebakaran telah dilakukan pada beberapa bidang, seperti pada bangunan gedung (Lestari & Panindrus, 2008) dan pada kapal motor penumpang (Estria & Lestari, 27 Agustus 2008). Kebakaran menyebabkan kerugian yang sangat besar. Oleh karena itu, diperlukan upaya *fire safety* dengan tujuan

- menjaga keselamatan jiwa (*life safety*);
- mempertahankan aset dan properti;
- mempertahankan keberlanjutan proses produksi dan kegiatan kerja;
- memenuhi standar dan peraturan yang berlaku;
- melindungi lingkungan (*environmental protection*);
- melindungi masyarakat (*community protection*);
- memenuhi standar *fire brigade*; dan
- melindungi gedung dan lingkungan di sekitarnya.

KONSEP FIRE SAFETY

Strategi *fire safety* mencakup dua bagian besar berikut.

Kebijakan Manajemen

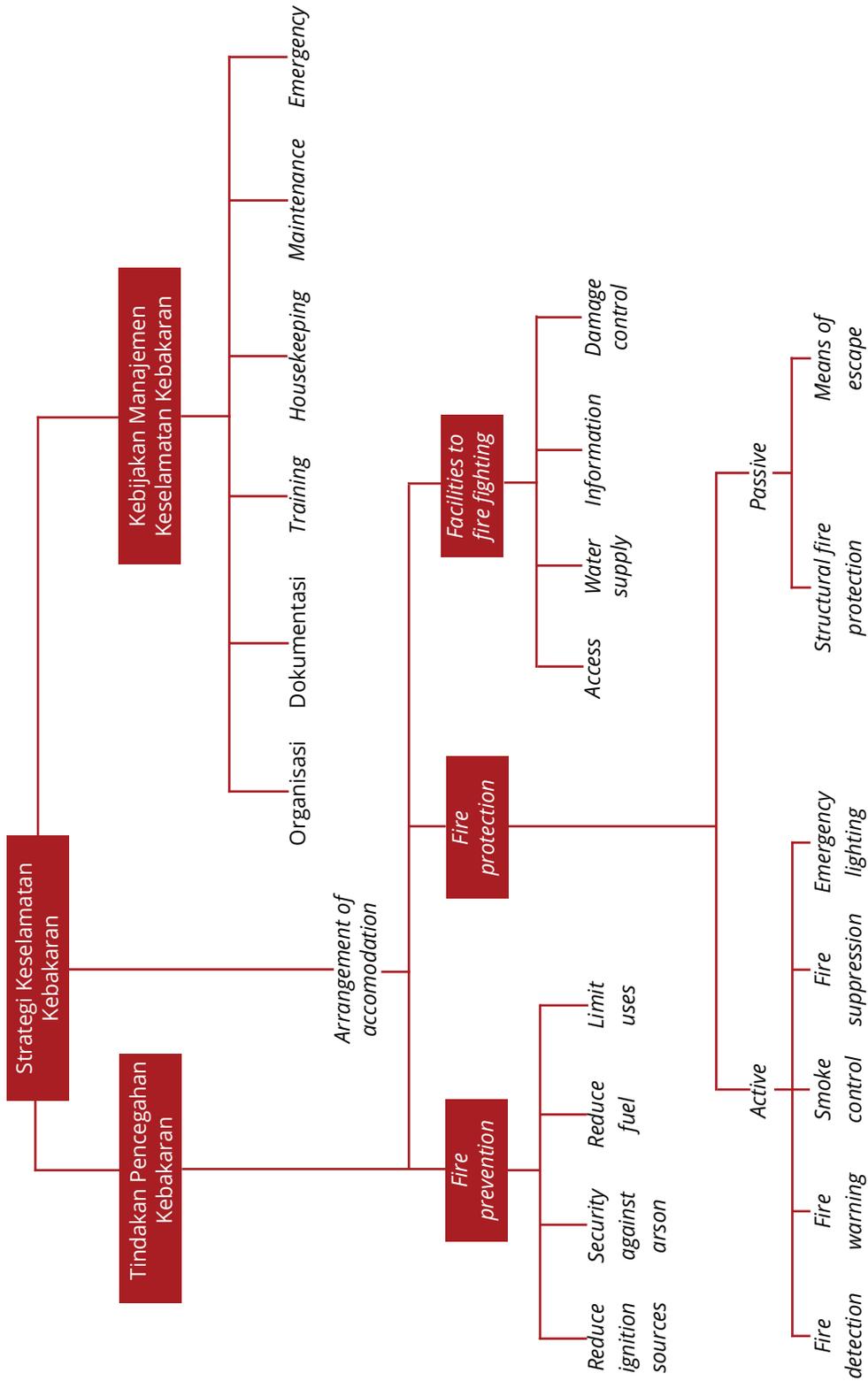
- Organisasi
- Dokumentasi
- Pelatihan (*training*)
- *Housekeeping*
- *Maintenance*
- *Emergency planning*

Fire Precaution

- a. *Fire prevention*
 - Mengurangi sumber-sumber *ignition*
 - Keamanan terhadap adanya sabotase

- Mengurangi bahan bakar
- Membatasi penggunaan
- b. *Fire protection*
 - *Active (fire detection, fire warning, pengendalian asap, fire suppression, emergency lighting)*
 - *Passive (structural fire protection, jalur keluar saat keadaan darurat)*
- c. Fasilitas untuk pemadam kebakaran
 - Akses
 - Suplai air
 - Informasi
 - Pengendalian kerusakan

Diagram komponen-komponen dalam strategi *fire safety* disajikan pada Gambar 7.1 berikut.



Gambar 7.1 Diagram Komponen-komponen Strategi Fire Safety



BAB 8

PEMODELAN KOMPUTER UNTUK KEBAKARAN

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.

Jefri Chandra, S.T., M.K.K.K.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini dibahas pemodelan komputer untuk kebakaran (*fire computer modeling*).

PENDAHULUAN

Sejak tahun 1960-an telah terdapat beberapa model komputer untuk kebakaran (*computer fire model*). Bahkan tahun 1970–1980-an merupakan masa ketika model komputer untuk kebakaran menjadi populer seiring dengan semakin banyaknya model yang dapat digunakan dan meningkatnya kemampuan komputer. Walaupun demikian, model komputer yang ada tersebut masih bersifat terbatas untuk melakukan penelitian. Kemudian, pada tahun 1990 banyak jenis model komputer untuk kebakaran mulai tersedia. Bahkan satu jenis model dapat tersedia dalam berbagai versi. Berikut ini adalah gambaran mengenai sejarah perkembangan model komputer untuk kebakaran yang diberikan oleh Nelson (2002).

Pada umumnya berbagai model komputer untuk kebakaran yang ada mensimulasikan konsekuensi api pada suatu area (*enclosure*). Namun, model enclosure ini memiliki keterbatasan dalam mengkaji bahaya di industri petrokimia. Model komputer dan alat bantu analisis lainnya juga dapat digunakan untuk memprediksi bagaimana material, sistem, atau pekerja dalam memberikan respons ketika berada dalam kondisi terjadinya kebakaran. Perhitungan bahaya spesifik lebih banyak digunakan oleh industri petrokimia, khususnya dalam analisis struktural dan pajanan terhadap pekerja. Sementara itu, pemodelan bahaya ledakan dan *vapor cloud* dilakukan dengan CCPS Guideline (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 1994).

PENGUNAAN MODEL KOMPUTER

Sekarang ini model komputer untuk kebakaran telah dapat digunakan dalam berbagai upaya perlindungan dari kebakaran secara modern. Penggunaan model kebakaran (*fire model*) memiliki dua tujuan utama, yaitu untuk merekonstruksi dan analisis kebakaran serta untuk mengevaluasi desain *fire safety* dari suatu struktur atau proses. Penggunaan ini dapat dilakukan antara lain untuk penelitian dan pengembangan, *code and regulatory compliance*, analisis bahaya kebakaran, studi litigasi dan forensik, desain struktural, desain pengendalian asap, dan untuk desain jalur evakuasi (*egress*).

Saat ini tidak ada suatu teknik yang secara luas dapat diadopsi untuk melakukan kajian atau validasi terhadap model komputer untuk kebakaran. Namun, ASTM telah mendirikan suatu subkomite pemodelan kebakaran (*fire modeling*) yang memiliki tugas untuk menyusun panduan terhadap isu spesifik terkait pemodelan kebakaran dengan komputer, seperti

- ASTM E1355, mengenai evaluasi terhadap kemampuan prediksi dari model kebakaran;
- ASTM E1472, mengenai panduan dalam pendokumentasian model kebakaran;
- ASTM E1591, mengenai gambaran prosedur untuk melakukan *input* data model kebakaran;
- ASTM 1895, mengenai penggunaan dan pembatasan dari model komputer untuk kebakaran.

Berikut ini merupakan langkah-langkah untuk evaluasi model yang terdapat dalam panduan ASTM E1355, yaitu

1. menentukan skenario dari model yang akan dievaluasi;
2. memvalidasi teori dasar dan asumsi yang digunakan dalam model tersebut;
3. memverifikasi keakuratan angka-angka dan perhitungan matematik model;
4. mengevaluasi model, misalnya menghitung akurasi dan kepastiannya.

Suatu model yang paling sederhana adalah model DETACT-QS yang digunakan untuk memperkirakan respons termal dari detektor dan *sprinkler*, yang telah diujicobakan oleh Janssens (2002) dengan panduan ASTM E1355. Evaluasi yang dilakukan selama lebih dari lima tahun ini berhasil merekognisi proses validasi. Lamanya proses tersebut menunjukkan sulitnya proses evaluasi tersebut.

Sebagian besar model yang disajikan dalam pembahasan bab ini memiliki dokumentasi referensi dan telah dikembangkan untuk publik. Ada juga beberapa model yang dikembangkan secara privat untuk industri petrokimia. Keseluruhan model disajikan hanya sebagai informasi sehingga tidak ada klaim yang dapat diajukan baik yang terkait dengan performa maupun kemampuannya untuk diaplikasikan, terlebih karena dokumentasi untuk publik belum tersedia.

SIMULASI KEBAKARAN KOMPARTEMEN (*COMPARTMENT FIRE SIMULATIONS*)

Secara umum model simulasi kebakaran kompartemen (*compartment fire*) digunakan untuk memprediksi perkembangan api dalam suatu kompartemen dalam kondisi yang bervariasi. Tipe simulasi ini bermanfaat antara lain untuk mengestimasi kriteria yang dapat diterima, kompartemen *thermal insult*, dan

kecenderungan penyebaran api dari kompartemen satu ke lainnya. Lebih lanjut lagi, model tipe ini kemudian dibagi dalam tiga kategori berdasarkan pendekatannya untuk mensimulasi kebakaran tersebut, yaitu *zone model*, *field model*, dan *post-flashover model*.

Zone Model

Salah satu model simulasi kebakaran kompartemen, yaitu *zone model*, dapat mengalkulasi kebakaran dengan membagi tiap-tiap kompartemen dalam model ke dalam dua zona yang homogen. Zona satu merupakan zona bagian atas (*upper*) yang berisi asap panas dan mengandung produk hasil pembakaran, sedangkan zona lainnya merupakan bagian bawah (*lower*), yang relatif bebas-asap sehingga lebih dingin daripada zona panas. Hubungan vertikal antara zona tersebut berubah ketika kebakaran berkembang, biasanya melalui ekspansi dari zona atas. Kondisi ini diketahui berdasarkan observasi yang dilakukan dalam beberapa eksperimen kebakaran. Eksperimen-eksperimen tersebut menunjukkan adanya beberapa variasi terhadap kondisi zona yang ada. Namun, variasi tersebut dapat dikatakan kecil bila dibandingkan dengan perbedaan di antara zona-zona itu sendiri.

Zone model dapat mengestimasi temperatur lapisan atas dan bawah, lokasi batas zona-zona tersebut, konsentrasi oksigen, konsentrasi karbon monoksida, visibilitas, serta aliran masuk dan keluar dari opening suatu kompartemen sebagai fungsi dari waktu. Informasi ini bermanfaat untuk mengevaluasi *tenability* suatu kompartemen atau dalam menentukan kapan *flashover* dapat terjadi di suatu ruangan. *Zone model* dapat melihat satu ruang dengan satu *opening* (bukaan) atau banyak ruang dengan banyak *opening*.

Kebutuhan *input* pada *zone model* bervariasi, bergantung pada model dan informasi yang ingin diperoleh. Secara umum, *input* dalam *zone model* merupakan yang paling sederhana bila dibandingkan pada model *field-type*. Dalam *zone model*, geometri kompartemen dan dimensi *opening* dibutuhkan untuk menentukan luas area yang ada. Adapun data termal dari *boundary* kompartemen juga dibutuhkan untuk mengestimasi *heat loss* yang terjadi melalui dinding, langit-langit, dan lantai. Ukuran api juga harus dimasukkan, mengingat model ini dapat memodifikasi laju panas yang dilepas, sebanding dengan konsentrasi oksigen dalam kompartemen yang berkurang akibat kebakaran. Beberapa *zone model* ada juga yang memperhitungkan efek dari ventilasi mekanik. Dengan demikian, data mengenai laju aliran fan dan lokasi *inlet* dan *outlet* udara dibutuhkan. Beberapa contoh *zone model* adalah CFAST (CFAST, 1993), FASTLite (FASTLite, 1996), dan BRI-2 (BRI2, 2000).

Field Model

Jenis model simulasi kebakaran kompartemen lainnya adalah *field model*, yaitu model yang dapat mengestimasi kebakaran dalam suatu ruangan melalui perhitungan *conservation equation* (contohnya momentum, massa, energi, difusi, *species*) sebagai hasil dari suatu kebakaran. Biasanya ini dilakukan dengan menggunakan suatu *finite difference*, *finite element*, atau *boundary element method*. Metode tersebut tidak khusus digunakan untuk upaya proteksi dari kebakaran, namun biasa digunakan dalam aeronautika, teknik mesin, struktur mekanik, dan teknik lingkungan. *Field model* membagi suatu ruang menjadi sejumlah bagian dan menghitung *conservation equation* dalam tiap bagian. Semakin banyak bagian yang dibuat, semakin detail pembahasannya. Hasilnya muncul dalam bentuk tiga dimensi dan sangat lengkap bila dibandingkan dengan *zone model*.

Walaupun menghasilkan estimasi yang lebih detail terhadap efek kebakaran pada kompartemen, *field model* membutuhkan waktu yang banyak karena perhitungan sejumlah rumus yang harus dilakukan. Beberapa efek seperti radiasi hanya dapat dilakukan dalam tingkat yang lebih sederhana. Dalam banyak kasus, hasil yang mendetail kurang diperlukan sehingga pendekatan yang lebih sederhana yang perlu dilakukan. *Field model* bermanfaat untuk memecahkan masalah yang membutuhkan hasil lebih lengkap daripada bila menggunakan tipe model lainnya.

Seperti *zone model*, *field model* membutuhkan gambaran geometri kompartemen dan *opening* yang ada di dalamnya. Penggunaan *field model* tidak terbatas pada kompartemen saja, tetapi dapat digunakan juga untuk mensimulasi fenomena seperti *open plume* atau dalam konfigurasi unik seperti lorong maupun *shaft*. Dalam model ini laju pelepasan panas api juga harus diperhitungkan. *Field model* tidak selalu memodifikasi laju pelepasan panas sebanding dengan penurunan tingkat oksigen. Sementara itu, kehilangan panas dari *boundary* kompartemen dihitung menggunakan beberapa *thermal property* dari bahan pembatas kompartemen tersebut. Beberapa contoh *field model* adalah JASMINE (Cox dan Kumar, 1987), FLOW3D (Portier *et al.*, 1996), PHOENICS (Spalding), SOFIE (Rubini, 2002), dan Fire Dynamics Simulator (LES3D) (Baum, 2000).

Post-Flashover Model

Post-flashover fire model memperhitungkan catatan waktu-suhu suatu kompartemen dengan menggunakan persamaan ringkas dari energi, massa, dan *species*. Konsentrasi dari berbagai konstituen gas dapat dimonitor sebaik monitor yang dilakukan terhadap aliran ventilasi. Beberapa *post-flashover fire model*

memasukkan ventilasi mekanik sebagai salah satu faktor dalam perhitungan. Beberapa model tersebut sangat bermanfaat untuk menentukan waktu-suhu pajanan terhadap struktur suatu kompartemen spesifik dan muatan bahan bakar yang tersedia. Catatan waktu-suhu tersebut dapat digunakan untuk mengkaji kemungkinan kegagalan struktur atau penyebaran api ke kompartemen yang berdekatan.

Data *input* yang diperlukan pada model ini cukup banyak. Selain ukuran dimensi kompartemen dan ventilasi yang ada, karakteristik detail bahan bakar juga sering dibutuhkan. Karakteristik bahan bakar yang dimaksud mencakup fraksi karbon, hidrogen, nitrogen, dan oksigen yang menyusun bahan bakar, tingkat efisiensi kebakaran, dan jumlah bahan bakar yang tersedia untuk pembakaran. Laju aliran ventilasi mekanik dan data mengenai material dari *boundary* kompartemen juga dibutuhkan. Beberapa model juga memperhitungkan detail perpindahan panas yang terjadi melalui *boundary* kompartemen, dan bahkan kadang-kadang juga diperlukan data *time-dependent* dari material yang digunakan. Sebuah contoh mengenai *Port-flashover fire model* adalah COMPF (Babrauskas, 1979).

EGRESS/EVACUATION MODELS

Model *Egress and evacuation simulation* sebenarnya tidak termasuk dalam golongan *fire model*. Model tersebut dikembangkan sebagai respons terhadap kebutuhan evaluasi dampak kebakaran pada okupan atau penghuni bangunan. Kebanyakan model *egress* menggambarkan suatu struktur sebagai jaringan atau jalur yang digunakan okupan berjalan/berpindah tempat. Laju perjalanan okupan diketahui dari studi mengenai pergerakan orang. Faktor-faktor yang memengaruhi laju perjalanan tersebut adalah usia dan kemampuan okupan, kepadatan, dan tipe jalur perjalanan.

Secara umum, *egress model* membutuhkan detail rencana evakuasi, lengkap dengan *layout*-nya atau *layout* area keseluruhan bila diperlukan. Beberapa data tambahan yang juga diperlukan sebagai *input* adalah jumlah okupan, tipe okupan, dan kondisi asap. Model *egress* juga dapat digunakan untuk memprediksi waktu evakuasi dari jumlah tingkat bangunan, *stair egress time*, *congestion location* yang membutuhkan pintu keluar lebih banyak, dan dampak dari lokasi pintu keluar dari suatu ruangan. Beberapa contoh *egress model* adalah EVACNET (Kisko dan Francis, 1985), EXITT (Levin, 1988), dan EXIT89 (Fahy, 1995).

SMOKE MOVEMENT MODELS

Model pergerakan asap digunakan untuk mengestimasi penyebaran asap dalam suatu gedung. Beberapa model cocok untuk *modeling* sistem pengendalian asap untuk kondisi eksterior dan interior yang bervariasi. Model-model tersebut serupa dengan model *sprinkler* hidrolik, di mana ruangan dianggap sebagai *node*, dan *opening* sebagai penghubung (*link*). *Link* yang dianalogikan sebagai pipa memiliki tekanan yang bergantung pada tipe *opening* dan laju alir yang melalui *opening*. Estimasi yang dikerjakan oleh model dihasilkan melalui penyeimbangan antara tekanan dan laju aliran.

Beberapa model pergerakan asap dapat mengetahui jalur dispersi jenis gas seperti gas beracun. Model pergerakan asap ini dapat menjadi alternatif secara ekonomi untuk pengujian *acceptance* dari suatu pengendali asap *full-scale*, serta dapat digunakan untuk mengkaji dampak dari sejumlah parameter, seperti arah angin yang berbeda, temperatur eksterior, dan *window opening*. Model ini biasanya digunakan dalam bangunan besar dan bertingkat. Semua data mengenai persambungan yang ada dalam kompartemen harus dicatat, demikian pula dengan data volume ruangan, ukuran dan koefisien alir *opening*, serta keadaan eksterior/*boundary* kompartemen dibutuhkan dalam analisis pergerakan asap. Beberapa contoh model pergerakan asap adalah CONTAM96 (Walton, 1997), Airnet (Walton, 1989), dan MFIRE (Chang *et al.*, 1990). Selain itu, sebuah teknik simulasi yang telah dikembangkan untuk radiasi dan pergerakan asap dari *pool fire* yang besar adalah ALOFT (McGrattan, 1987).

THERMAL/STRUCTURAL RESPONSE MODELS

Thermal/structural response models memiliki hubungan dengan *field model*, yaitu pada persamaan perhitungan *energy equation* yang dilakukan, walaupun hubungan ini ada hanya pada elemen yang padat. Adapun metode *finite difference* dan *finite element* merupakan yang paling sering digunakan.

Area padat dibagi menjadi beberapa bagian, hal yang sama dengan *field model* yang membagi sebuah kompartemen menjadi beberapa wilayah. Beberapa tipe kondisi dari permukaan *boundary* antara lain *adiabatic*, *convection/radiation*, *constant flux*, atau *constant temperature*.

Ketahanan suatu struktur terhadap kebakaran merupakan pengukuran yang dilakukan atas kemampuan suatu sistem struktural untuk bertahan dari kehancuran

selama terpajan oleh api. *Thermal/structural response models* mengevaluasi catatan waktu-suhu suatu padatan yang dipajankan pada suatu kebakaran. Catatan waktu-suhu atau desain pajanan api yang ada dapat distandarisasi dengan suatu kurva api, seperti yang terdapat pada ASTM E119 dan kurva UL1709; atau dapat juga dilakukan estimasi menggunakan model kebakaran kompartemen. Besi struktur dan bahan material yang keras merupakan jenis yang paling banyak dianalisis menggunakan model *thermal/structural response*. Demikian pula dengan lantai dan atap yang dapat juga dianalisis menggunakan model tersebut. Model *thermal/structural response* sangat baik dan cocok digunakan untuk mengetahui ketebalan insulasi yang dibutuhkan untuk perlindungan terhadap kebakaran. Selain itu, model ini juga dapat digunakan dengan model struktural untuk menghitung defleksi pada lantai atau pada area *framing*.

Beberapa data termal yang dibutuhkan untuk melakukan analisis struktural adalah konduktivitas termal dan *specific heat*. Selain itu, data massa jenis juga diperlukan, sedangkan kebutuhan data mengenai perubahan fase bergantung pada jenis masalah yang dihadapi. Catatan pajanan berdasarkan waktu-suhu adalah *input* pada setiap langkah atau dapat juga untuk diinterpolasi oleh program. Contoh-contoh *thermal/structural response models* antara lain FIRES-T3 (Iding *et al*, 1977) dan TASEF (Wickstrom, 1999).

CONGLOMERATE/MISCELLANEOUS FIRE MODELS

Berikut ini adalah beragam alat bantu hitung dan berbagai jenis *fire model* lain yang kurang sesuai dengan kategori yang telah dibahas sebelumnya, yaitu *multicalculation package*, *flame spread models*, dan *glass breaking simulations*.

Terdapat dua *multicalculation software package* yang cukup populer, yaitu FPETOOL (Nelson, 1990) dan FASTLite (Portier, 1996). Kedua *software package* ini memiliki lebih dari dua belas alat bantu perhitungan untuk *fire protection*. Masing-masing memiliki sebuah *compartment fire model*. Alat bantu hitung ini bermanfaat untuk mencapai perkiraan yang paling mendekati keadaan sebenarnya terhadap aspek yang berhubungan dengan kebakaran, seperti aliran ventilasi, obyek yang mengeluarkan radiasi panas, *sprinkler actuation*, *timed egrss*, dan *plume dimension*. Sebagian besar alat bantu hitung tersebut telah berproses menggunakan komputer sehingga memiliki kapasitas yang lebih besar daripada perhitungan manual.

Jenis lainnya dari *fire model* yang belum terlalu banyak dikenal dan digunakan adalah *flame spread models*. *Flame spread models* menggunakan bahan material

untuk uji coba kebakaran dalam skala kecil untuk mengestimasi penyebaran api dari berbagai jenis permukaan. Salah satu kekurangan dari model ini adalah beberapa permukaan terbatas untuk dilakukan uji, seperti pada dinding vertikal, pada bagian pojok, atau pada langit-langit. Secara spesifik model ini membutuhkan beberapa data karakteristik termal dari bahan penyusun jenis permukaan tersebut, seperti temperatur ignisi, dan parameter *lateral flame spread*. Sebuah model contoh tipe *flame spread model* adalah CFHAT (Lattimer, 2000).

Selain *flame spread models*, terdapat pula model lain, yaitu *glass breaking models* yang kadang digunakan untuk memprediksi waktu kapan sebuah jendela akan pecah dalam sebuah kompartemen yang terbakar. Untuk beberapa jenis simulasi kebakaran, ini merupakan hal yang penting karena ketika jendela pecah maka kondisi ventilasi dalam kompartemen dapat berubah secara drastis. Dalam beberapa kasus, penambahan suplai oksigen bisa memperparah kebakaran hingga dapat mencapai titik dimana *flashover* terjadi. Model *glass breaking* ini menggunakan kombinasi dari persamaan transfer panas dan *thermal stress*.

PEMODELAN KEBAKARAN UNTUK INDUSTRI PETROKIMIA

Bahaya yang umum ada pada industri petrokimia adalah cairan dan gas yang mudah menyala (*flammable*). Beberapa model kebakaran dapat digunakan untuk mengkaji bahaya tersebut, namun tidak terdapat dalam kategori yang telah disebutkan di atas. Berikut ini dibahas model kebakaran atau *conglomerate models* yang telah didesain secara spesifik untuk mengatasi masalah bahaya kebakaran yang ada di industri petrokimia.

The Center of Marine and Petroleum Technology merupakan lembaga yang menyediakan daftar menyeluruh untuk sektor publik dan swasta mengenai analisis bahaya petrokimia (Spouge, 1999). Daftar ini mencakup berbagai tingkat akses, mulai dari bebas akses hingga yang terbatas, yaitu hanya untuk pemegang lisensi). Namun, belum ada situs khusus yang diperuntukkan untuk publik.

Public Domain/ Unrestricted

Berikut ini merupakan beberapa jenis model yang tergolong tidak dibatasi untuk publik (*unrestricted*), di antaranya FIREX dan FRED.

FIREX—Model FIREX merupakan program dengan desain untuk kebanyakan kejadian kebakaran yang melibatkan kecelakaan berupa pelepasan gas atau cairan

yang menyebabkan ledakan. Kemampuan FIREX dalam melakukan kajian mencakup *smoke production*, *visibility*, dan *temperature response of steel*. Pengembang pertama program FIREX ini adalah SINTEF NBL-Norwegian Fire Research Laboratory dan INTELLEX GmbH.

FRED—Program yang dikembangkan oleh Shell Research ini merupakan kepanjangan dari *Fire Release Explosion Dispersion*. FRED merupakan suatu model dengan *PC-based* untuk kecelakaan yang terjadi akibat pelepasan gas atau cairan. Beberapa bidang pengaplikasiannya adalah pada *fire*, *dispersion*, dan *explosion*. Selain FRED, Shell juga telah memproduksi SEAFIRE, yaitu sebuah *consequence model* untuk kebakaran yang terjadi pada jalur pipa di dasar laut (*sub sea*).

Restricted

Berikut ini merupakan beberapa program yang bersifat terbatas, antara lain EFFECTGIS, KAMELEON FIRE E-3D, PHAST, dan REDIFEM.

EFFECTSGIS—EFFECTGIS merupakan *conglomerate package* untuk model seperti pelepasan kimia (*chemical releases*). Pelepasan ini dihubungkan dengan model fenomena fisik yang cocok, seperti sebuah model *pool fire* yang digunakan untuk memperkirakan konsekuensinya terhadap manusia. Program ini dilengkapi dengan sistem mini-GIS internal untuk dapat melakukan perhitungan seperti radiasi panas, kemudian dapat ditampilkan dalam bentuk peta.

KAMELEON FIRE E-3D—Model ini merupakan program bersifat *restricted* yang secara spesifik didesain untuk menangani kebakaran hidrokarbon, baik dalam bentuk *liquid pool fires* maupun *gas jet fires*. Model KAMELEON divalidasi melalui percobaan *enclosed pool fire* yang dilakukan SINTEF.

PHAST (*Process Hazard Analysis Software Tool*)—Program ini termasuk sebagai *conglomerate package* untuk dispersi gas dan *fire modeling*. PHAST mampu untuk menghitung formasi dari sebuah awan (*cloud*) atau *pool* hingga dispersi final. Selain itu, PHAST juga mampu untuk menghitung konsentrasi, *fire radiation*, toksisitas, dan *explosion overpressure endpoints*.

REDIFEM—Model kebakaran ini memiliki beberapa aplikasi, di antaranya penentuan *steady state releases* dari gas maupun uap bertekanan, model Gaussian Plume, *continuous free momentum*, BLEVE, *confined/unconfined vapor cloud explosion*. Diketahui bahwa REDIFEM telah divalidasi secara internal dengan ISO 9001 dan dibandingkan dengan PHAST dan FRED.

BREEZE INCIDENT ANALYST—dirancang untuk memprediksi toksisitas, kebakaran, dan potensi dampak ledakan bahan kimia. *Software* ini dapat digunakan untuk memprediksi konsentrasi bahan kimia dan *flammability level*; model radiasi termal untuk memprediksi fluks radiasi dan kenaikan suhu, dan model untuk memprediksi tekanan berlebih (*overpressures*) akibat ledakan. BREEZE Incident Analyst menyediakan berbagai macam model dispersi untuk menganalisis bahan kimia beracun. Program ini sangat ideal untuk tanggap darurat dan perencanaan serta skenario kecelakaan untuk program seperti manajemen risiko. Model-model yang dipakai dalam analisis kejadian (*incident analysis*) meliputi model dispersi (Dense Gas Dispersion, SLAB, INPUFF, dan AFTOX); model kebakaran (dikembangkan untuk mengkalkulasi fluks radiasi panas yang berhubungan dengan potensi ledakan dan kebakaran, yang meliputi *confined pool fires*, *unconfined pool fires*, *jet fires*, dan BLEVE); dan model ledakan (US Army TNT Equivalency, UK HSE TNT Equivalency, TNO Multi-Energy dan Baker-Strehlow) (Breeze Software, 2011).

Beberapa model lainnya dan beberapa *software* terdapat dalam *A Guide to Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations* (Spouge, 1999), yang khusus dibuat untuk analisis risiko area lepas pantai, pemodelan ledakan (*explosion modeling*), analisis evakuasi dan penyelamatan (*evacuation and rescue analysis*), analisis reliabilitas (*reliability analysis*), pangkalan data kecelakaan (*accident databases*), *event tree analysis*, dan manajemen keselamatan.



BAB 9

EVAKUASI KEBAKARAN

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.

Jefri Chandra, S.T., M.K.K.K.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini akan dibahas pelbagai ihwal tentang evakuasi kebakaran.

PENDAHULUAN

Evakuasi kebakaran merupakan bagian terpenting dalam manajemen keselamatan kebakaran.

METODE EVAKUASI PENYELAMATAN

Tujuan desain sebuah penyelamatan diri adalah untuk menjamin bahwa syarat-syarat *life safety performance* dapat terpenuhi. *New Zealand Building Code* menyatakan bahwa yang harus dipenuhi dalam metode evakuasi tercantum dalam klausul C2, dan dijelaskan di *Appendix A*. Persyaratan metode evakuasi juga terdapat di bagian *D Building Code of Australia*. Tidak perlu untuk melebihi dari syarat-syarat tersebut kecuali manajemen menginginkan gedung mereka lebih aman dari syarat-syarat yang ditetapkan pada *Building Code*. Tujuan klausul C2 adalah untuk melindungi orang dari cedera maupun penyakit yang ditimbulkan dari api pada saat mengevakuasi diri ke tempat aman dan untuk memfasilitasi program evakuasi pekerja. Ini juga merupakan tujuan pada *section D* dari *Building Code of Australia*.

Perencanaan berdasarkan *Acceptable Solution C/ASI* ditujukan untuk memenuhi syarat minimum yang tertuang di *New Zealand Building Code*, sedangkan perencanaan yang terdapat di *BCA section* ditujukan untuk memenuhi standar minimum yang disyaratkan *Building Code of Australia*. Banyak negara lain yang memiliki persyaratan sendiri terhadap metode penyelamatan diri.

Tujuan bahasan ini adalah memberikan gambaran terhadap desain teknik spesifik rute evakuasi sebagai solusi alternatif dari solusi yang sudah banyak diterima saat ini. Solusi umum terkadang juga dapat digunakan sebagai acuan untuk desain yang spesifik.

DASAR DESAIN TEKNIK UNTUK RUTE EVAKUASI

Flow chart untuk desain teknis spesifik rute evakuasi terdapat pada Gambar 9.1. Waktu yang dibutuhkan untuk mengevakuasi harus lebih sedikit dibandingkan

waktu agar keadaan berubah menjadi mengancam nyawa, termasuk juga *safety margin*. Jadi,

$$t_{ev} + t_s < t_{lt} \quad \dots\dots\dots \text{Persamaan 1}$$

- t_{ev} adalah waktu evakuasi yang diperhitungkan dari saat ignisi
- t_{lt} adalah waktu untuk keadaan berubah menjadi mengancam nyawa, juga diperhitungkan dari saat ignisi
- t_s adalah *safety margin*

Baik waktu evakuasi maupun waktu sampai keadaan mengancam nyawa di perhitungkan dari saat ignisi. Waktu evakuasi t_{ev} dirumuskan sebagai berikut.

$$t_{ev} = t_d + t_a + t_o + t_i + t_t + t_q \quad \dots\dots\dots \text{Persamaan 2}$$

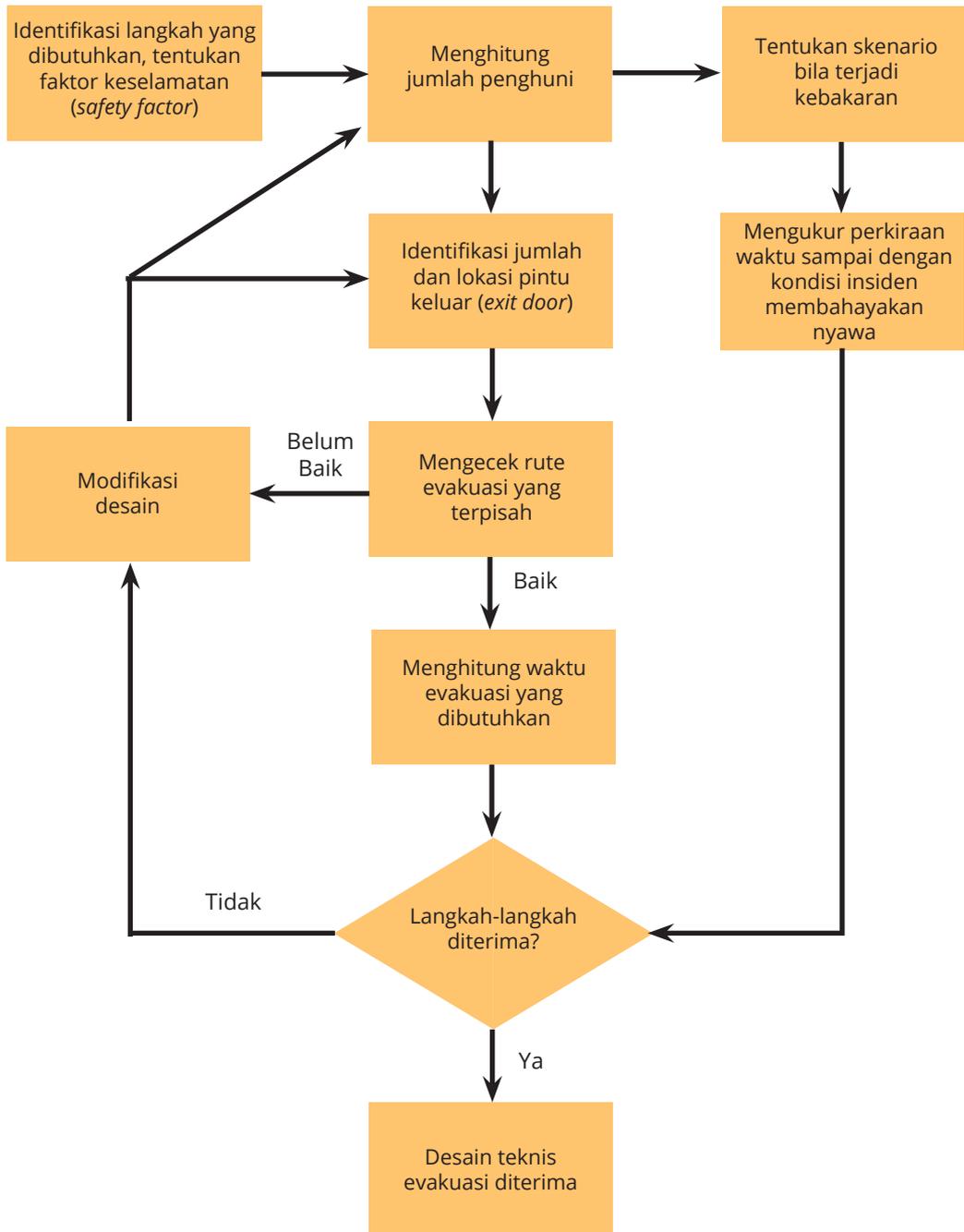
- t_d adalah waktu pada saat ignisi terjadi sampai api dapat terdeteksi baik oleh manusia maupun alat (detektor asap dll.)
- t_a waktu dari api terdeteksi sampai alarm berbunyi
- t_o waktu dari alarm berbunyi sampai dengan pekerja membuat keputusan
- t_i waktu pekerja untuk menyelidiki asal api, mengumpulkan barang berharga, dan berusaha memadamkan api
- t_t adalah *travel time*, waktu aktual yang dibutuhkan untuk menyelusuri rute evakuasi sampai dengan tempat yang aman dicapai, sudah termasuk waktu untuk mencari jalan
- t_q adalah waktu mengantre di pintu atau hambatan lain

t_d dapat dihitung dengan dengan program *computer fire growth model*, sedangkan t_a harus dapat diestimasi berdasarkan pengetahuan mengenai alarm ataupun perilaku manusia. t_o dan t_i lebih sulit untuk diprediksi, tetapi tidak boleh lebih dari 30 detik masing-masing; dari beberapa pengalaman kebakaran, waktu ini sangat signifikan dibandingkan *travel time*. Penjelasan mengenai *travel time* dijelaskan di bawah ini.

Safety margin yang sudah disebutkan dalam persamaan di atas dibutuhkan untuk menyediakan beberapa *safety factor* tambahan antara waktu evakuasi dan waktu sampai semua pekerja sudah harus dievakuasi. Perhitungan waktu evakuasi hanya dapat diperkirakan dan sangat berbeda-beda, bergantung pada gedung dan mobilitas pekerja.

Safety margin dibutuhkan untuk mengantisipasi ketidakpastian dalam penghitungan waktu evakuasi, kesulitan mencari jalan keluar, dan kejadian-kejadian lain yang mungkin terjadi. *Safety margin* akan sangat bervariasi, bergantung pada

karakteristik pekerja (umur, kemampuan, apakah hanya pekerja aktif atau ada pekerja yang beristirahat, tidur di gedung tersebut), keberadaan sistem pemadam api, dan besarnya gedung. Disarankan *safety margin* tidak kurang dari t_{ev} untuk pekerja yang normal (tidak cacat); analisis lebih detail mungkin diperlukan untuk menjustifikasi *safety margin*.



Gambar 9.1 Desain Teknis Spesifik Rute Evakuasi

Jumlah Pekerja

Kapasitas pekerja dapat dihitung dengan mengalikan area yang tersedia untuk pekerjaan dan kepadatan pekerja yang sesuai dengan jenis pekerjaan dan luas area bekerja. Tabel kepadatan pekerja diberikan di *Acceptable Solution*.

Tabel 9.1 menjelaskan kepadatan pekerja pada tempat umum (*2000 version of the approved documents*) dengan *travel speed* dari **Persamaan 4** dalam keadaan tertentu mungkin sangat baik untuk menentukan jumlah maksimal orang di ruangan maupun gedung, dan harus ada mekanisme untuk menjamin bahwa jumlah orang di gedung dapat termonitor dan tidak melebihi jumlah yang ditentukan, seperti dengan menempelkan plakat di dinding tentang jumlah maksimal orang.

Tabel 9.1 Aktivitas, Kepadatan Penghuni, dan Kecepatan Pergerakan Maksimum pada Tempat Umum

Aktivitas (<i>Activity</i>)	Kepadatan Penghuni (<i>Occupant Density</i>) Pengguna/m ² (<i>users/m²</i>)	Kecepatan Pergerakan Maksimum (meter/menit) (<i>Maximum Travel Speed (m/min)</i>)
Aktivitas		
Bandara – <i>Baggage Claim</i>	0,50	73
Bandara – <i>conscourses</i>	0,10	73
Bandara – area tunggu, <i>Check In</i>	0,7	68
Area tanpa kursi	1,0	62
Galeri seni, museum	0,25	73
Bar—Area duduk	1,0	62
Bar—Area berdiri	2,0	39
Bangku	2.2 users per linear metre	
Ruang kelas	0,5	73
Ruang dansa	1,7	46
<i>Day Care Centres</i>	0,25	73
Restoran, kafe	0,8	66
Ruang pameran	0,7	68
Pusat kebugaran (<i>fitness</i>)	0,2	73

Aktivitas (<i>Activity</i>)	Kepadatan Penghuni (<i>Occupant Density</i>) Pengguna/m ² (users/m ²)	Kecepatan Pergerakan Maksimum (meter/menit) (<i>Maximum Travel Speed</i> (m/min))
<i>Gymnasium</i>	0,35	73
Olahraga dalam ruang (<i>indoor</i>)	0,1	73
Perpustakaan—Area buku	0,1	73
Perpustakaan—Area lain	0,15	73
Lobi	1,0	62
Mal	1,0	62
Mal—khususnya area yang digunakan untuk pusat perbelanjaan	0,3	73
Ruang membaca dan menulis	0,5	73
Ruang makan	0,9	64
Area berbelanja	0,3	73
Area belanja furnitur dan kebutuhan bangunan	0,1	73
<i>Showroom</i>	0,2	73
<i>Space with fixed seating</i>	Sesuai jumlah kursi	
<i>Space with loose seating</i>	1,3	55
<i>Space with loose seating and tables</i>	0,9	64
Tribun	1,8	44
Stage untuk arena teater	1,3	55
Area berdiri (<i>standing space</i>)	2,6	26
Kolam renang	0,2	73
Kolam renang (yang dilengkapi dengan kursi dan tempat bersantai)	0,35	73
Laboratorium	0,2	73
Ruang latihan di sekolah	0,1	73
Ruang tidur	Sesuai jumlah kasur	
Ruang bekerja	<0,5	73

Aktivitas (<i>Activity</i>)	Kepadatan Penghuni (<i>Occupant Density</i>) Pengguna/m ² (users/m ²)	Kecepatan Pergerakan Maksimum (meter/menit) (<i>Maximum Travel Speed</i> (m/min))
Aktivitas tertentu (tidak terus-menerus)	<0,5	73
Kepadatan secara umum	0,5	73
	1,0	62
	1,5	50
	2,0	39
	2,5	28
	3,0	17
	3,5	6

Geometri Rute Evakuasi

Geometri rute evakuasi harus dibuat sesederhana mungkin; koridor yang berliku-liku dan banyaknya pintu membuat lebih sulit bagi orang untuk menemukan pintu keluar sehingga tanda-tanda menjadi sangat penting.

Jumlah Rute Evakuasi

Prinsip umumnya adalah menyediakan jalan keluar minimal dua orang, dengan pengecualian untuk ruangan yang sangat sempit. Syarat mengenai ini terdapat dalam *acceptable solution* untuk jumlah minimum rute evakuasi yang disarankan. Untuk gedung yang tidak memiliki *sprinkler*, *New Zealand Acceptable Solution* mengasumsikan bahwa satu pintu keluar tidak dapat digunakan pada saat menentukan lebar dari rute evakuasi. Apabila pendekatan ini juga termasuk dalam perhitungan desain yang spesifik, *safety margin* sebaiknya lebih rendah. Apabila gedung dilindungi dengan *sprinkler* otomatis, sangat jarang pintu keluar tertutup oleh api.

Separasi Pintu Keluar

Apabila jalur evakuasi alternatif sudah ada, seharusnya jalur itu didesain sedemikian mungkin sehingga api tidak mungkin mengemblok kedua pintu keluar secara bersamaan. *The Acceptable Solution* secara spesifik menjelaskan separasi yang baik adalah dengan membedakan kedua pintu keluar tersebut minimal 90°

satu sama lain sehingga mereka terpisahkan baik dengan jarak maupun separasi dari asap.

Lebar Pintu Keluar

Metode alternatif untuk menentukan lebar pintu keluar yang memperhitungkan geometri tangga, yang telah dijelaskan oleh Wade (1992), didesain untuk mengevakuasi orang sama dengan waktu yang dibutuhkan dengan menggunakan *Acceptable Solution C2/A1* dan dengan mengombinasikannya dengan tinggi tangga yang diperbolehkan oleh *Acceptable Solution D1/A1*. Hal ini memberikan kemudahan bagi desainer untuk mempercepat evakuasi pada tangga akibat tinggi tangga yang proporsional. Hal ini tidak berlaku apabila analisis yang komplet mengenai *travel time* yang tersedia diabaikan. Apabila *flow time* berbeda dengan waktu yang tertuang pada *Acceptable Solution*, model dari Paul (1995) dapat digunakan untuk menghitung lebar pintu keluar yang tepat dengan mempertimbangkan kepadatan, kecepatan, dan *flow (traffic)*.

Travel Time

Travel time menjelaskan hubungan ruang terbuka (jarak) yang harus ditempuh orang untuk mencapai tempat aman dengan waktu yang dibutuhkan sampai ruangan tersebut sudah mengancam nyawa akibat api maupun asap. Ruang terbuka adalah rute yang harus dilalui orang pada saat mengevakuasi diri sampai mereka keluar dari gedung atau mencapai tempat yang aman, seperti pintu keluar yang dapat melindungi mereka dari akibat api dan asap.

Panjang *travel* L_t (meter) berhubungan dengan *travel speed* S (meter/menit) dan *traversal time* t_{tr} (menit) dengan

$$L_t = S \times t_{tr} \quad \dots\dots\dots \text{Persamaan 3}$$

Kecepatan *travel time* bergantung pada kepadatan orang, umur, dan mobilitas. Saat kepadatan orang kurang dari 0,5 orang per meter kuadrat, aliran (*flow*) tidak akan padat dan kecepatan sekitar 70 meter/menit dapat dicapai untuk level travel dan 51–63 meter/menit menuruni tangga. Sebaliknya, apabila kepadatan orang lebih dari 3,5 orang per meter kuadrat, aliran (*flow*) akan sangat padat dan hanya sedikit pergerakan yang mungkin. Nelson dan Mac Lennan (1995) memperlihatkan hubungan antara kecepatan travel, kepadatan orang, dan aliran (*flow*). Gambar 9.2 memperlihatkan hubungan antara kecepatan evakuasi dengan kepadatan orang. Hubungan antara kecepatan *travel* S (m/menit) dan kepadatan orang D_o (orang per m^2) dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$S = k_t (1 - 0,226 D_o) \dots\dots\dots \text{Persamaan 4}$$

Untuk kepadatan orang yang lebih dari 0,5 orang per meter kuadrat, maka k_t

$$k_t = 84,0 \text{ untuk corridor dan doorway} \dots\dots\dots \text{Persamaan 5}$$

$$k_t = 51,8 (G/R)^{0,5} \text{ untuk tangga} \dots\dots\dots \text{Persamaan 6}$$

dengan G adalah panjang dari tangga dan R adalah tinggi dari tiap anak tangga. Untuk nilai kepadatan orang dan kecepatan yang berasal dari **Persamaan 4**, nilai dari spesifik *Flow* F_s (orang/menit/meter) dapat dijelaskan dengan

$$F_s = S \times D_o \dots\dots\dots \text{Persamaan 7}$$

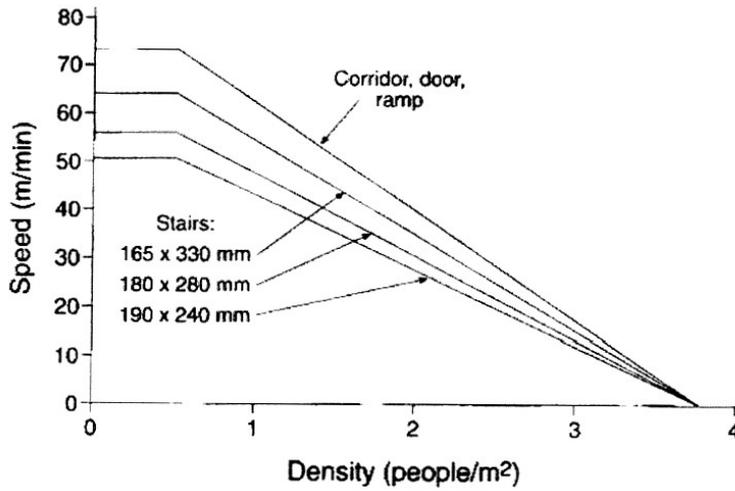
Nilai dari *specific flow* dapat dilihat pada Gambar 9.3. Dapat dilihat bahwa maksimal *specific flow* pada koridor yang datar adalah sekitar 75 orang per menit per meter pada kepadatan orang 1,88 orang per meter kuadrat. Perhatikan bahwa kepadatan orang di **Persamaan 4** adalah kepadatan orang pada saat mereka bergerak ataupun mengantre di pintu keluar, nilainya mungkin lebih besar daripada kepadatan desain pada Tabel 9.1.

Informasi di atas dapat digunakan untuk menghitung kecepatan *travel*, demikian pula untuk waktu yang dibutuhkan kumpulan orang untuk menyusuri sepanjang ruang seperti koridor. Waktu yang dibutuhkan untuk orang melewati keterbatasan tangga ataupun pintu yang lebarnya telah ditentukan juga dapat diperkirakan (Nelson dan McLennon, 1995).

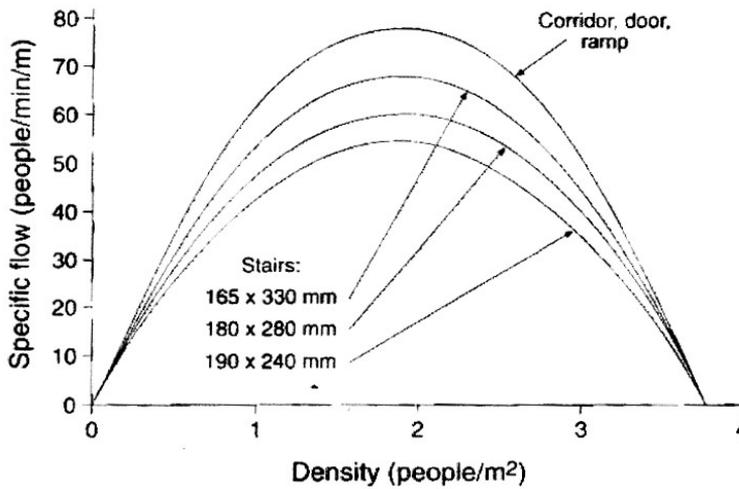
Untuk tangga atau pintu dengan lebar W (m), lebar efektif W_e dihitung dengan

$$W_e = W - B \dots\dots\dots \text{Persamaan 8}$$

di mana B adalah lebar permukaan batas, biasanya 0,15 m dari setiap sisi tangga, 0,05 m setiap sisi pintu atau 0,09 m setiap sisi dari *rail*.



Gambar 9.2 Grafik Kecepatan Evakuasi untuk Perhitungan Jalur Keluar (*Egress*)



Gambar 9.3 Grafik *Specific Flow*

Aliran (*flow*) sebenarnya dari orang F_a (*people/min*) melewati tangga atau pintu dihitung dengan

$$F_a = F_s \times W_e \quad \dots\dots\dots \text{Persamaan 9}$$

Waktu t_{ts} dalam menit untuk sejumlah orang N untuk melewati tangga dan pintu dihitung dengan

$$t_{ts} = N / F_a \quad \dots\dots\dots \text{Persamaan 10}$$

Ini dapat digunakan untuk menetapkan waktu untuk mengantre yang mungkin timbul. Kalkulasi dapat menjadi sangat komplikasi untuk jalur keluar yang memiliki banyak pintu, koridor, tangga, dan lain-lain, jika beberapa aliran manusia menuju pintu keluar melalui beberapa jalur keluar gedung. Nelson dan McLennan (1988) memberikan banyak contoh penghitungan.

Waktu Sampai Kondisi Berubah Menjadi Mengancam Nyawa

Waktu untuk mengevakuasi seluruh manusia harus lebih kecil daripada waktu yang dibutuhkan sampai situasi menjadi mengancam nyawa dan juga sudah memperhitungkan *margin of safety* 5. Pemodelan komputer dapat digunakan untuk menghitung waktu sampai dengan kondisi mengancam nyawa. Saat itulah waktu ketika *tenability limit* (waktu yang ditoleransi) telah terlewati.

Tenability Limit (Waktu yang Dapat Ditoleransi)

Efek api terhadap manusia sangat sulit dikuantifikasi. Efek negatif dapat berupa fisik ataupun psikologis. Data yang akurat mengenai manusia sangat jarang didapat pada setiap kasus kebakaran. Penelitian terhadap manusia akibat kebakaran sangat sulit untuk dilakukan dan mungkin melanggar etika. Respons setiap manusia terhadap kejadian kebakaran sangat bervariasi pada setiap manusia, bergantung pada bagaimana interaksi terhadap fisik dan psikologi mereka dan bagaimana kondisi yang mereka hadapi. Ada beberapa orang yang tidak bergerak walaupun asap masih tipis dan beberapa orang masih berusaha bergerak walaupun asap sudah sangat tebal.

Atas kejadian asfiksia (*asphyxia*) yang disebabkan oleh lingkungan yang kurang oksigen ataupun karena karbon monoksida, beberapa penelitian baik dengan subjek manusia maupun kera telah dilakukan. Sebagai hasilnya, gangguan kesehatan dapat dengan mudah diukur, namun bagaimanapun juga akibat perbedaan kerentanan, beberapa orang masih sangat sehat pada saat sebagian lain sudah terganggu kesehatannya. Akibat yang timbul dapat bermacam-macam, mulai dari iritasi mata ringan sampai dengan berat serta sakit pada saluran pernapasan. Respons dari tiap individu sangat berbeda bergantung pada daya tubuh menahan sakit dan kemampuan paru-paru.

Jika *zone based growth model* digunakan untuk memprediksi bagaimana asap mengisi ruangan, *tenability criteria* digunakan untuk menentukan apakah desain tersebut dapat diterima atau tidak. *Tenability criteria* dapat memperkirakan waktu sampai kejadian mengancam nyawa terjadi dan kriteria itu secara umum lebih

memperhatikan efek dari satu ataupun banyak fenomena berikut yang dapat terjadi pada penghuni pada saat di gedung ataupun pada rute keluar.

- a. *Convective heat* (panas konveksi)
- b. *Radiant heat* (panas radiasi)
- c. *Visibility through smoke layer* (ketebalan asap)
- d. Konsentrasi gas narkotik
- e. Konsentrasi gas iritant

Berikut dipaparkan satu per satu fenomena di atas.

a. Konveksi

Tingkat panas konveksi yang tinggi dapat menyebabkan kulit sakit atau terbakar. Menghirup gas panas juga dapat menyebabkan *stroke*. Temperatur kritis untuk panas konveksi bergantung pada waktu paparan dan jumlah air yang terdapat dari gas tersebut. *Criteria tenability* untuk panas konveksi adalah 60° Celcius (*saturated*, waktu paparan 30 menit). Purser (1995) menggambarkan fungsi waktu sampai berbahaya sebagai fungsi dari temperatur gas.

b. Radiasi

Radiasi panas menyebabkan eritema (*erythema*), yaitu kondisi munculnya bercak merah pada kulit yang terasa sakit akibat sebagian kulit terbakar dan dalamnya tingkat kebakaran kulit. Mudan dan Croce (1995) membuat persamaan timbulnya rasa sakit sebagai fungsi dari waktu paparan. *Criteria tenability* untuk paparan panas radiasi adalah panas radiasi dari *uppler layer* tidak boleh melebihi 2,4 kw/m² dari tinggi kepala. Di atas ini waktu yang dapat ditoleransi adalah kurang dari 20 detik.

c. Jarak Pandang (*Visibility*)

Jarak pandang terhadap asap bergantung pada ketebalan asap, tipe asap, dan karakteristik dari sebuah objek untuk dapat dilihat, misalnya apakah pintu keluar menyala atau tidak. Beberapa model dapat menghitung jarak pandang secara langsung dan sebagian dapat menentukan *optical density*. Nilai jarak pandang sangat dipengaruhi oleh jelaga yang dipilih untuk dimasukkan ke dalam zone model dan nilai ini harus dipilih secara hati-hati.

d. Gas Narkotik (*Narcotic Gases*)

Gas narkotik dapat menyebabkan pingsan ataupun kematian dengan mencegah oksigen masuk ke dalam jaringan otak. Gas narkotik merupakan hasil pembakaran, seperti karbon monoksida, hidrogen sianida, karbon dioksida, dan oksigen tereduksi (*reduced oxygen*). Konsentrasi gas tersebut menyebabkan

kerusakan dalam waktu kira-kira 30 menit (Purser, 1995). Metode lebih detail untuk mengevaluasi bahaya dari Gas narkotik melibatkan pendekatan "*fractional effective dose*" (FED), yang dijelaskan oleh Purser (1995) yang juga menghitung efek paparan terhadap banyaknya Gas narkotik. Saat FED mencapai kesatuan (*incapacitation*), efek pada manusia diasumsikan sudah terjadi.

e. Gas Iritan (*Irritant Gases*)

Gas iritan menyebabkan ketidaknyamanan, sakit, ataupun kerusakan jaringan pada membran mata, hidung, tenggorokan, dan paru paru, yang dapat menyebabkan kerusakan fungsi tubuh bahkan kematian. Gas iritan adalah produk pembakaran termasuk gas asam anorganik seperti hidrogen clorida, dan bahan organik seperti formaldehida dan akrolein. Purser (tidak dipublikasikan) menyatakan bahwa batas kadar gas narkotik tidak akan melebihi batas jika jarak pandang 5 meter atau lebih FCTC (1996) melakukan pendekatan sederhana bahwa produk toksik (baik narkotik maupun iritan) tidak akan melebihi batas apabila kepadatan *smoke optical* tidak melebihi 0,11 m atau jarak pandang tidak kurang dari 10 meter.

KOMPONEN WAKTU EVAKUASI

Waktu evakuasi bagi seorang individu adalah keseluruhan jangka waktu mulai dari timbulnya api hingga pekerja keluar dari gedung atau tiba di lokasi yang aman. Hal ini terdiri atas empat komponen, yang semuanya harus diperhatikan, yaitu:

- a. *time to notification* (waktu untuk pemberitahuan)
- b. *reaction time* (waktu reaksi)
- c. *preevacuation activity time* (waktu sebelum evakuasi)
- d. *travel or movement time* (waktu pergerakan)

Komponen pertama hingga ketiga sering dikelompokkan bersama dan lebih dikenal sebagai "*delay time*" atau "*premovement time*".

$$\begin{aligned} \text{Evacuation time} &= \text{Delay time} + \text{Travel time} \\ &= \text{Time to notification} + \text{Reaction time} + \\ &\quad \text{Preevacuation activity time} + \text{Travel time} \end{aligned}$$

Hal tersebut sangat penting diperhatikan agar para insinyur tidak mengabaikan kontribusi dari delay time yang dapat memengaruhi *total evacuation time*. Studi *evacuation drills* pada bangunan tinggi menunjukkan bahwa rata-rata *travel time* hanya berperan < 25% dari total keseluruhan rata-rata waktu evakuasi.

Time to Notification

Dalam evaluasi terhadap desain gedung yang dirancang, waktu evakuasi dimulai ketika nyala api terjadi. Selang beberapa periode waktu, waktu untuk pemberitahuan akan berlalu sebelum keadaan berkembang ke titik ketika alarm berbunyi atau ketika orang mulai menyadari tanda terjadinya kebakaran seperti asap, panas, melihat adanya api, suara kaca pecah, atau suara alarm dari alarm asap, detektor panas (*heat detector*), atau *sprinkler system*. Waktu untuk pemberitahuan dapat diperagakan atau dapat diperkirakan jika menggunakan pertimbangan ahli.

Reaction Time

Reaction time adalah waktu yang diperlukan oleh pekerja untuk menyadari alarm atau isyarat api dan mengambil keputusan. Sebagai contoh, ketika seseorang tidur ketika alarm asap berbunyi, dibutuhkan beberapa selang waktu bagi orang tersebut untuk bangun, mengidentifikasi suara alarm asap, dan memutuskan untuk pergi. Dalam hal ini tidak ada teknik peraga yang dapat diterima untuk *reaction time*. Waktu yang digunakan untuk menganalisis hal tersebut bergantung pada observasi (data) atau pertimbangan ahli (pemikiran). *Reaction time* yang tepat akan bergantung pada apakah orang tersebut bangun atau tidur, kemampuan pendengaran, kapasitas mental, usia (bayi/anak-anak/orang dewasa), dan sebagainya.

Preevacuation Activity Time

Preevacuation activity time meliputi waktu yang dilalui pekerja dalam mempersiapkan untuk pergi atau mencari tempat perlindungan. *Preevacuation activity time* meliputi semua aktivitas di mana pekerja akan bertindak dari waktu ketika ia membuat keputusan untuk pergi hingga ia mulai untuk pergi keluar atau ke tempat perlindungan.

Travel Time

Travel time adalah komponen terakhir dari perhitungan *evacuation time*. *Travel time* didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan untuk berpindah ke lokasi yang aman (Rita F. Fahy).

SIMULASI KOMPUTER DAN MODEL JALAN KELUAR

Pemodelan simulasi evakuasi sangat berguna karena tidak membutuhkan

banyak uang, banyak waktu, dan banyak tenaga. Eksperimen mengenai kebakaran dan evakuasi tidak dapat dilakukan karena tingginya biaya dan risiko yang besar terhadap manusia.

Saat ini terdapat tiga tipe pemodelan evakuasi, yaitu:

- a. *single parameter estimation model* (model estimasi dengan parameter tunggal);
- b. *movement models* (model pergerakan); dan
- c. *behavioral simulation model* (model simulasi perilaku).

Single parameter estimation model

Single parameter estimation model secara umum digunakan untuk estimasi sederhana dari *movement times* (lama waktu pergerakan). Lama waktu pergerakan dapat dihitung dengan kalkulator ataupun dengan pemodelan komputer sederhana (seperti menghitung *flow times* berdasarkan lebar pintu keluar maupun *travel time* berdasarkan jarak).

Movement models

Movement models dapat digunakan untuk jumlah orang yang banyak. Model ini mengasumsikan manusia seperti air di dalam pipa. Model ini mengasumsikan perilaku pekerja sangat bagus dan mengasumsikan pekerja memiliki kecepatan yang sama saat evakuasi dan memiliki pengetahuan yang sangat baik tentang *layout* gedung dan rute pintu keluar. Model ini dapat digunakan sebagai acuan desain. Jika perhitungan waktu keluar dengan model ini tidak cukup untuk evakuasi aman, dalam keadaan sebenarnya jika terjadi kebakaran, dapat dipastikan tidak akan cukup waktu untuk evakuasi.

Behavioral simulation models

Model ini juga mempertimbangkan beberapa variabel terkait dengan pergerakan pekerja dan perilaku. Mereka memperlakukan pekerja sebagai individu dengan karakteristik yang unik. Pekerja bergerak dengan kecepatan yang berbeda, sesuai dengan keadaan di sekitar mereka. Oleh karena para pekerja diperlakukan sendiri-sendiri, pajanan dan reaksi terhadap gas beracun pada saat evakuasi dapat diestimasi oleh sebagian pemodelan ini atau dengan *tenability model* atau dengan *toxicity model* untuk menganalisis hasil simulasi. Tipe pemodelan ini memperlihatkan simulasi yang realistis dengan keadaan sebenarnya, namun yang harus diingat dari pemodelan ini adalah minimnya data untuk memprediksi perilaku manusia terhadap api. Dalam memilih model, peneliti harus mengerti cara pengasumsian

tiap model dan mengerti bahwa asumsi tersebut tepat untuk analisis yang akan dilakukan.

Simulasi komputer dan pemodelan menjadi alat yang penting untuk mendesain evakuasi yang baik terkait dengan jenis pekerjaan dan kondisi struktur. Pemodelan evakuasi menjadi sangat penting beberapa tahun ini sejak banyak organisasi di dunia mencoba mengembangkan *performance based option for fire protection design* (desain perlindungan terhadap api berbasis *performance*). Elemen yang paling esensial dalam mengevaluasi sebuah desain teknik adalah membandingkan hasil dari pemodelan terhadap skenario api dan dampak api yang mungkin muncul, dan dengan hasil pemodelan evakuasi yang dapat memprediksi berapa lama pekerja dapat mengevakuasi diri dari struktur gedung.

SEJARAH PEMODELAN EVAKUASI

Pemodelan evakuasi memiliki sejarah yang panjang. Ada sebuah studi tentang *fire safety* di rumah jompo, yang mengkaji masalah perkembangan api dan evakuasi dan hubungannya dengan waktu dan struktur gedung. Penelitian ini menganalisis beberapa variabel terkait dengan munculnya api dan penyebaran api terhadap kemampuan populasi rumah jompo untuk mencapai tempat yang aman dari pengaruh api. Studi ini menghasilkan variabel api sebagai *critical time* dan parameter keselamatan penghuni sebagai *reaction time*.

Critical time adalah waktu yang dibutuhkan dari mulai munculnya api sampai level yang tidak dapat ditoleransi lagi, sedangkan *Reaction time* adalah waktu yang dibutuhkan oleh penghuni untuk bereaksi terhadap api dan menyelamatkan diri dengan mengevakuasi diri dengan mencapai tempat yang aman dari bahaya dan efek api. Oleh karena itu, berkaitan dengan definisi diatas, perilaku manusia terhadap api juga harus diperhatikan. Konsep tentang *critical time* sebagai waktu bagi api untuk menyebar dalam gedung dan *reaction time* sebagai waktu yang dibutuhkan untuk penghuni untuk mempersepsikan dan merespons terhadap api baik dengan mengevakuasi diri maupun menyelamatkan diri keluar gedung sudah banyak diteliti dan menghasilkan banyak pemodelan tentang perilaku evakuasi, dimulai oleh Caravaty dan Haviland pada tahun 1967.

Pemodelan komputer yang mensimulasi pergerakan manusia saat evakuasi baru dimulai pada pertengahan 1970-an. Pemodelan yang berbasis pada Markov memfokuskan pergerakan manusia mulai saat mendengar bunyi alarm sampai dengan mereka selamat keluar melalui pintu keluar (*exit*) ataupun mati oleh api.

Terdapat enam variabel yang teridentifikasi memengaruhi pergerakan saat kebakaran, yaitu:

1. lokasi sumber api;
2. pengetahuan penghuni mengenai rute jalan keluar;
3. persepsi penghuni mengenai lokasi dan keparahan yang ditimbulkan;
4. persepsi penghuni mengenai alternatif lain yang tersedia;
5. pengalaman sebelumnya; dan
6. kepanikan atau *shock*.

Teknik pemodelan dikembangkan pada awal 1980-an untuk membandingkan perilaku evakuasi penghuni yang dibantu oleh personel yang terlatih dengan evakuasi tanpa bantuan personel. Pemodelan ini menentukan potensi evakuasi dari sebuah area gedung berdasarkan pendekatan algoritma komputer. Selain itu, pemodelan ini mengevaluasi efek dari perkembangan api dan pergerakan asap terhadap penghuni pada saat mereka mencoba mengevakuasi diri. Evakuasi penghuni disimulasikan dengan memperhatikan dampak dari desain rute evakuasi, kepadatan penghuni di rute evakuasi, kemacetan di pintu keluar, dan efek dari produk kebakaran (asap dan lain-lain terhadap penghuni).

Konsep mengenai *critical time* dan *reaction time* awalnya diformulasi oleh Caravaty and Haviland dan diadopsi Available Safe Egress Time (ASET) model. Pemodelan ini adalah perhitungan matematika untuk menyimulasi kondisi yang terus berkembang antara waktu dari api mulai berawal sampai dengan keadaan sudah sangat berbahaya bagi manusia. Model ini untuk mengevaluasi *evacuation plan* (perencanaan evakuasi) dan prosedur dari sebuah gedung. Model ini membutuhkan input data tentang dimensi fisik dari gedung, rute keluar, rute evakuasi, dan jumlah, serta lokasi para penghuni. Model ini menghasilkan estimasi rata-rata waktu evakuasi dan estimasi total waktu evakuasi.

Building network evacuation model mirip dengan model milik O'leary dan Gratz, yang dikembangkan untuk mengevaluasi lingkungan jalur keluar (*egress*) di sebuah gedung dan karakteristik penghuni terkait lokasi dan kepadatan. Model ini menghasilkan estimasi aliran evakuasi (*evacuation flow*) dan waktu evakuasi (*evacuation time*) dan dapat mengidentifikasi masalah kemacetan (antre). Hasil pemodelan ini didukung oleh data evakuasi oleh *High Rise Federal Office Building College Dormitories*.

Queuing Network Model (QNM) juga dikembangkan untuk menganalisis desain sebuah gedung terkait dengan *egress system*. Pemodelan ini menghasilkan estimasi dari *evacuation time* (waktu evakuasi) rata-rata lama mengantre di rute *egress*,

kemungkinan cacat pada manusia, dan total kemungkinan *egress*. Perkembangan dan penggunaan model untuk evakuasi pada akhir tahun 1980-an di-review oleh Watts.

Pada era 1990-an pemodelan evakuasi berkembang pesat. Fahy mengembangkan FORTRAN model yang dinamakan EXIT89 untuk memprediksi waktu evakuasi untuk bangunan tinggi. Pemodelan evakuasi ini didesain untuk digunakan bersama dengan dua subprogram dari HAZARD I, FAST, dan TENAB untuk mengestimasi bahaya terhadap penghuni dari pemodelan api. Pemodelan ini menghitung pergerakan penghuni baik melalui rute evakuasi terdekat maupun rute evakuasi yang familiar dan juga menghitung antrean penghuni di rute ini. Kecepatan berjalan penghuni di pemodelan ini diturunkan dari nilai kepadatan penghuni yang dikembangkan Predtechenskii dan Milinskii. Model ini terus dikembangkan sampai satu dekade kemudian untuk memasukkan keadaan yang sebenarnya di kehidupan, seperti keberadaan orang cacat, penundaan evakuasi, pemilihan rute keluar, dan lain-lain.

Dalam beberapa tahun ini perkembangan ilmu komputer sangat pesat dan kemampuan software komputer juga menjadi sangat baik dan rumit. Pemodelan ini sangat mirip dengan DFC *model of fire development*, yang tidak lagi menggunakan *network—node description* dari sebuah gedung namun menggambarkan area gedung sebagai *mesh* (jaring) dan *grid* (kotak) dan menggunakan analisis yang kompleks untuk menentukan teknik penentuan rute. Tidak lagi berjalan dari *node* ke *node*, penghuni di pemodelan ini terlihat dalam *network model*: penghuni akan bergerak dari *tile* ke *tile* dalam *grid* yang menggambarkan lantai, yang membuat lokasi dari penghuni menjadi lebih tepat.

Pemodelan generasi terbaru sudah memasukkan fenomena yang ada dalam EXIT89, beberapa bahkan menambahkan tambahan beberapa fenomena. Namun, selalu ada konsekuensi antara kekompletan dan detail dari sebuah model, yaitu banyaknya data yang dibutuhkan oleh model tersebut. Belum dapat dipastikan apakah kemampuan memprediksi dan keakuratan meningkat apabila pemodelan sederhana dan menggunakan data yang tidak terlalu banyak dengan tingkat ketidakpastian yang sedang diganti dan dielaborasi. Pemodelan yang rumit membutuhkan pangkalan data (*database*) yang sangat besar dan harus memperhatikan tingkat ketidakpastian yang tinggi dalam mengestimasi untuk mengatasi kurangnya data yang ada di lapangan. Secara singkat, pilihan pemodelan sudah berkembang sangat banyak dalam beberapa tahun terakhir, namun nilai dari pemodelan sederhana tidak berkurang sama sekali.

Karena banyaknya variasi dari teknik yang digunakan untuk pemodelan

evakuasi, tidak mungkin digunakan sebuah persamaan (*equation*). Peneliti harus menggunakan referensi dari satu pemodelan yang ia minati. Dengan semakin banyaknya pemodelan evakuasi—sangat tidak mungkin menuliskan semua model tersebut di artikel ini—tidak ada pembanding yang objektif untuk membandingkan satu buah pemodelan dengan yang lain, namun gambaran dari banyaknya program pemodelan dapat dicari dari literatur. Tingkat pemodelan perilaku manusia berbeda di tiap model sehingga harus sangat diperhatikan pada saat memilih sebuah model. Kompleksitas dari sebuah model memperlihatkan kemampuan yang lebih bagus dalam membuat prediksi, namun dengan minimnya data yang ada tentang perilaku, banyak asumsi yang dimasukkan dalam pemodelan itu, dan kebenaran dalam melakukan asumsi tersebut merupakan titik kritis dalam mengevaluasi validitas hasil sebuah pemodelan.

PEMODELAN EVAKUASI KEBAKARAN

Dengan adanya daya tahan tubuh manusia, dibutuhkan sebuah cara untuk dapat memprediksi atau memperkirakan kondisi pada suatu lingkungan saat terjadi kebakaran. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk melakukan prediksi terhadap kejadian kebakaran di dalam unit gedung perkantoran atau ketika melakukan evaluasi terhadap unit adalah melakukan pemodelan atau simulasi.

PEMODELAN KOMPUTER

Ada banyak metode berbasis komputer untuk membantu perhitungan evakuasi. seperti di bawah ini.

- a. **EVACNET+** (Kisko dan Francis 1985): adalah program tidak berbayar untuk pemodelan evakuasi di sebuah gedung. Inputnya berupa *nodes* dan *arcs*. *Nodes* merepresentasikan ruang kosong di dalam gedung dan mengalokasikan jumlah penghuni; *arcs* memperlihatkan *traversal time* dan *flow capacity* yang harus ada. Program ini memberikan gambaran waktu minimal untuk evakuasi dari sebuah gedung, digambarkan dalam aliran air, seperti yang dijelaskan oleh Nelson dan MacLennon.
- b. **EXODUS**: program ini untuk menyimulasikan pergerakan keluar banyak orang (Owen *et al.*, 1977).
- c. **FPETool**: adalah program yang awalnya dikembangkan oleh Bud Nelson untuk mengantisipasi fenomena api dan digunakan untuk kepentingan teknik (Nelson, 1990; Deal 1993), yang di dalamnya sudah termasuk untuk menilai performa dari sebuah *egress*. Program ini kemudian dikembangkan dan dan berubah

nama menjadi FASTLite (Peacock *et al.*, 1996).

- d. **FIRECALC**: diproduksi di Australia (CSIRO, 1993), yang juga terdapat rutinitas untuk menilai performa dari sebuah *egress*—namun, saat ini sudah tidak didukung lagi oleh CSIRO dan digantikan oleh FIREWIND.
- e. **FIRESYS**: di dalamnya terdapat program untuk menghitung *fire egress* dari ruangan menuju pintu, koridor, dan tangga, menggunakan prinsip dasar.
- f. **EXITT**: merupakan program yang juga ditambahkan *hazard assessment program*.
- g. **HAZARD I**: program ini sangat jarang digunakan untuk gedung komersial maupun gedung umum karena tidak menyertakan *queuing theory*.
- h. **SIMULEX** adalah program untuk menyimulasi pergerakan keluar dari banyak orang dalam gedung yang besar dan kompleks (Thompson dan Marchant, 1994).

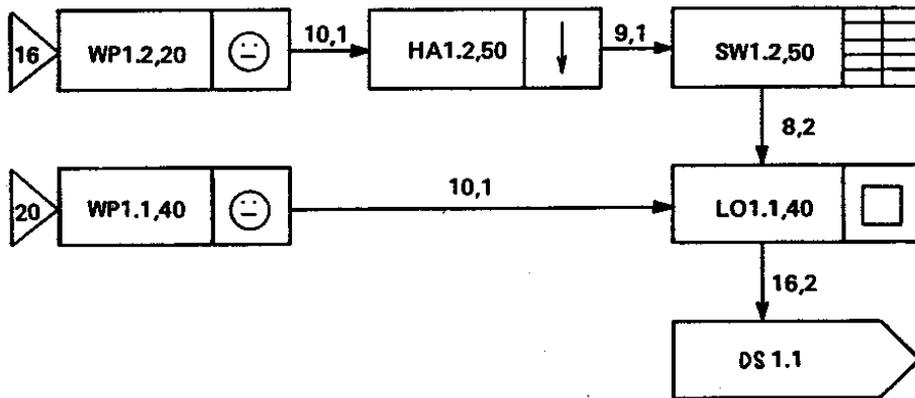
EVACNET

Evacnet adalah *evacuation network* (jaringan evakuasi) dengan program komputer yang berguna untuk simulasi model evakuasi gedung. Program ini menguraikan jaringan evakuasi dalam gedung (Kisko 1985). Evacnet memberikan gambaran kondisi yang optimal dalam evakuasi untuk memperkecil waktu evakuasi sehingga penghuni dapat secepat mungkin dievakuasi. Evacnet membutuhkan uraian bangunan dan informasi berapa penghuni gedung pada awal evakuasi. Program Evacnet sampai sekarang masih digunakan di gedung-gedung perkantoran, mal, pasar, baik di Indonesia maupun di luar negeri oleh para pakar NFPA International seperti Rita F. Fahy, Jack Paul, Nelson, Maclennon, James K. Lathrop, dan lain-lainnya dan di Indonesia sendiri digunakan oleh pakar kebakaran nasional, Arif Muhaimin. Jaringan model Evacnet terdiri atas sekumpulan *Node*, *Arc*, *WP (Work Place)*, *SW (Stairwell)*, *HA (Hallway)*, *LA (Landing)*, dan *LO (Lobby)*.

- *Node* adalah jaringan model yang mewakili komponen gedung, seperti ruangan, koridor, tangga, lobi. Kondisi awal berupa jumlah penghuni pada awal evakuasi.
- *Arcs* mewakili jalur evakuasi dalam gedung.

Gambar berikut menggambarkan jaringan model sederhana dengan tanda:

- segi empat mewakili *nodes*,
- tanda panah mewakili *arcs*, dan
- angka-angka dalam gambar mewakili data yang dibutuhkan dalam *nodes* dan *arcs*.



Gambar 9.4 Jaringan Model Node dalam Evacnet
(Sumber: Kisko, 1984)

- *Work Place (WP)*
Workplace adalah ruang kerja yang berada di setiap lantai suatu gedung yang dibatasi dengan dinding dan partisi. Di dalam Evacnet ruang kerja diberi inisial WP.
- *Stairwell (SW)*
Stairwell adalah sarana tangga darurat yang digunakan untuk evakuasi. Di dalam Evacnet tangga darurat untuk turun pada saat evakuasi dinamakan *Stairwell* dengan inisial SW.
- *Hallway (HA)*
Hallway adalah ruang kosong atau gang kosong sebagai sarana evakuasi yang digunakan pekerja setelah keluar dari *workplace* untuk menuju tangga darurat. Di dalam Evacnet *hallway* ini diberi inisial HA.
- *Landing (LA)*
Landing adalah tempat penyeberangan sementara antara hall dan tangga. Di dalam Evacnet landing diberi inisial LA.
- *Lobby (LO)*
Lobby adalah ruangan masuk gedung yang secara umum berada di lantai dasar suatu gedung. Di dalam Evacnet *lobby* diberi inisial LO. Di dalam Evacnet simbol-simbol ini digunakan sebagai alur untuk menjelaskan tiap-tiap jalur evakuasi yang akan dilalui pekerja untuk memperoleh waktu evakuasi yang paling efisien.

Keunggulan dan Kelemahan Evacnet

Keunggulan Evacnet

- Evacnet memberikan gambaran kondisi yang optimal dalam evakuasi untuk memperkecil waktu evakuasi penghuni agar secepat mungkin evakuasi dapat dilakukan.
- Evacnet memberikan informasi mendetail mengenai hasil dari evakuasi penghuni dan tempat yang menjadi hambatan pada saat evakuasi.
- Evacnet membuat alur evakuasi mulai dari tahap awal evakuasi, antrean, serta tujuan akhir menuju *assembly point*.
- Evacnet menghitung secara menyeluruh mulai dari luas bangunan, lebar pintu, lebar tangga, serta lobi untuk dimasukkan ke dalam program Evacnet.

Kelemahan Evacnet

- Evacnet tidak memperhitungkan perilaku.
- Evacnet tidak melihat faktor-faktor penghambat dalam evakuasi seperti *hall, landing, tangga, lobi*; semua dianggap bersih atau bebas dari halangan seperti vas bunga, dispenser, lemari, dan sebagainya.

Simbol-simbol yang Digunakan dalam Evacnet

Work Place (WP)



Stairwell (SW)



Hallway (HA)



Landing (LA)



Lobby (LO)



Escalator (ES)



Elevator (EL)



Other



Destination (DS)



Gambar 9.5 Gambar Simbol Model dalam Evacnet

(Sumber: Kisko, 1984)

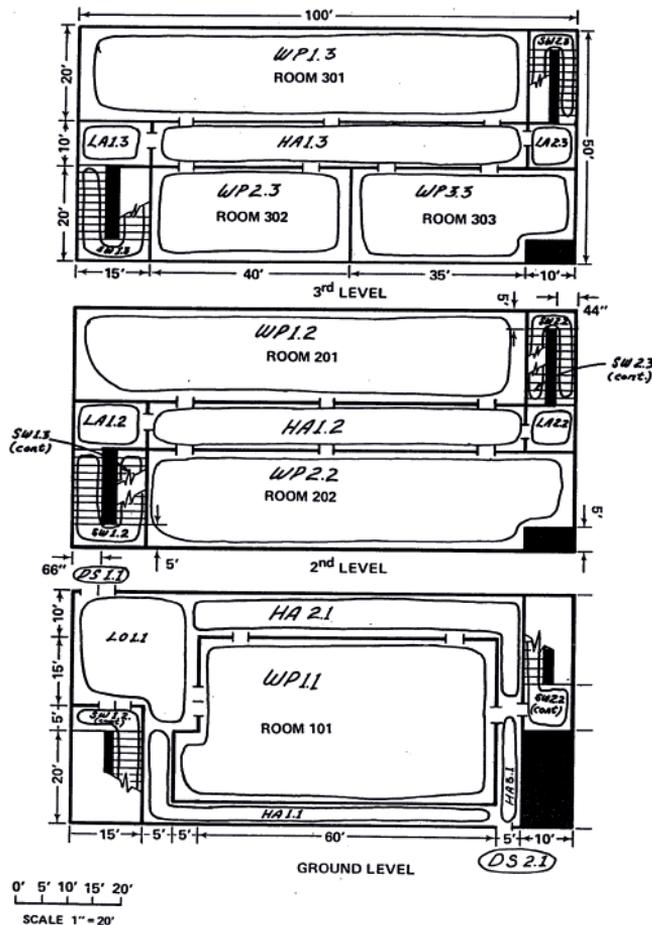
Input dan Output Data

Input data pembuatan *node* dan *arc* berdasarkan spesifikasi gambar tata letak ruangan dan dimensi gedung serta estimasi jumlah penghuni. *Output* data terdiri atas 14 pilihan, yaitu:

- *Summary of result:*
Basic statistic of evacuation
- *Destination alocation:*
Number of evacuess by destination
- *Total ARC movement:*
Total movement thorough an ARC by ARC
- *Bottlenecks:*
Identifiction of bottlenecks ARCS
- *Floor clearing time:*
Time to clear a floor by floor number
- *Node clearing time:*
Time to clear a node by node
- *Uncongested times:*
Uncongested evacuation time by node
- *Building evacuation profile:*
Number of evacuess by time period

- Destination evacuation profile:
Number of evacuees by time period for each destination
- Node contents profile:
People waiting at end of time period by time period
- ARC movement profile:
Movement through an ARC by time period
- Bottleneck profile:
Bottleneck ARC information by time period
- Node contents snapshot:
People waiting at end of time period by node
- Non-evacuee allocation:
Number of non-evacuees by node

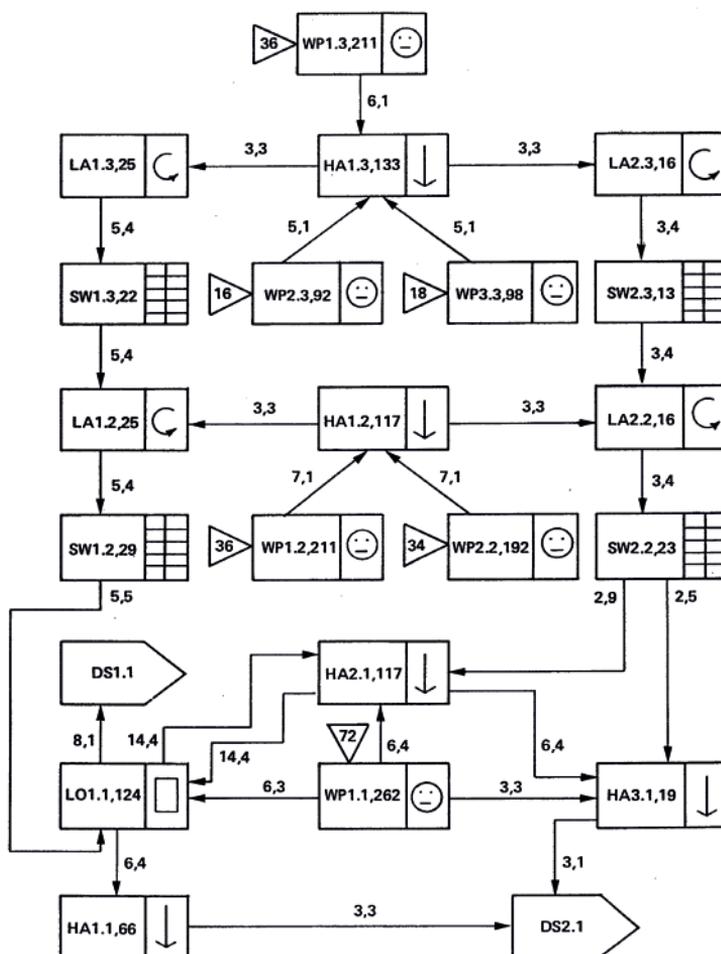
Contoh Building Layout



Gambar 9.6 Contoh Building Layout (Node Specification)

(Sumber: Kisko, 1984)

Network Model



Gambar 9.7 Network Model

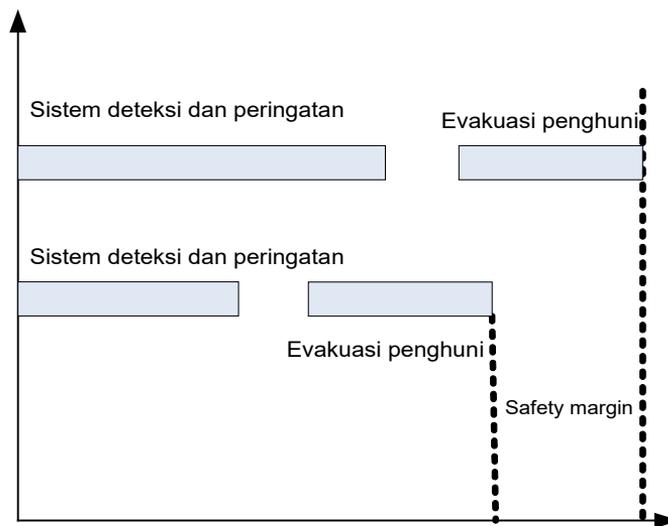
(Sumber: Kisko, 1984)

SISTEM DETEKSI DAN JALUR EVAKUASI

Dengan adanya kondisi yang membahayakan tersebut, jalur evakuasi dan sistem deteksi harus dipersiapkan untuk mencegah akibat yang lebih besar lagi. Sistem deteksi kebakaran sangat penting di dalam sebuah bangunan apartemen karena dapat membantu mengurangi kerugian yang terjadi akibat kejadian tersebut. Apabila sistem ini deteksi bekerja dengan baik dan dapat memberikan peringatan dini, penghuni/bangunan dapat dengan segera melakukan evakuasi.

Sistem deteksi kebakaran otomatis didesain untuk menanggapi dan memberikan sinyal melalui sistem komunikasi pneumatik, elektrik, hidrolik, ataupun mekanik

serta diprogram untuk merespons keadaan. Ketika terjadi perubahan kondisi baik fisik maupun kimia dari suatu material, yang perlu diperhatikan adalah adanya kemungkinan terjadinya alarm palsu (*false alarm*).



Gambar 9.8 Safety Margin

(Sumber: Egan, 1978)

Dari gambar tersebut sistem deteksi akan sangat membantu pada saat evakuasi sehingga *Safety Margin* dapat tercapai. Semakin cepat sistem deteksi dan peringatan dapat bereaksi serta mendapat tanggapan cepat dari penghuni, waktu evakuasi yang dilakukan akan menjadi lebih efektif, yang akan memengaruhi berkurangnya jumlah kerugian yang dapat dihindari.

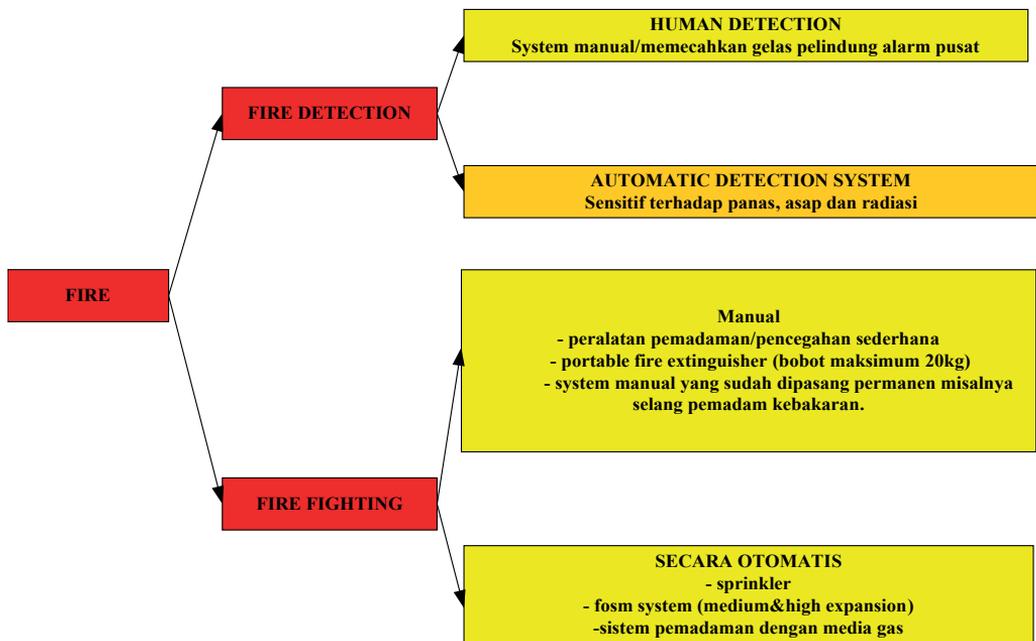
Sistem detektor terbagi atas beberapa tipe:

- detektor gas, yaitu detektor yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan gas-gas tertentu yang mudah terbakar dan beracun;
 - detektor asap (*smoke detector*), yaitu detektor yang menggunakan sistem ionisasi, yang mendeteksi perubahan arus kecil yang terjadi dari elektroda di dalam bejana (Americium 241 atau Radium 226) akibat terjadinya asap (ionisasi) atau mendeteksi keberadaan partikel-partikel asap di udara (fotoelektrik);
 - detektor panas (*heat detector*) adalah detektor yang mendeteksi keberadaan api di dalam suatu ruangan dengan merasakan perubahan secara fisik ataupun elektrikal dari sebuah material yang disebabkan oleh paparan panas.
- (Egan, 1978)

Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam ruangan pemasangan detektor sebagai berikut.

- Semua lantai dan lantai bawah tanah yang dihuni harus memiliki detektor asap.
- Detektor asap di langit-langit hendaknya diletakkan di tengah-tengah ruangan atau apabila harus diletakkan dalam posisi menempel di dinding, sebaiknya berjarak sekitar 15–30 cm dari batas langit-langit (berlaku untuk ruangan dengan panjang koridor 9m).
- Apabila ditemukan sistem struktur yang menyulitkan peletakan detektor, detektor harus diletakkan sesuai dengan saran dari produsen atau pemasang
- Sebaiknya detektor tidak diletakkan di tempat-tempat yang tidak memiliki aliran udara atau aliran udara buangan langsung, seperti sudut-sudut ruangan tanpa aliran udara atau dekat dengan penyedot udara (*exhaust fan*).
- Detektor panas yang digunakan pada daerah rawan kebakaran sebaiknya menggunakan detektor panas dengan temperatur aktivasi $\pm 57^{\circ}$ – 73° C.
- Kebersihan dan perawatan detektor sangat penting untuk memastikan detektor dapat bekerja dengan baik saat dibutuhkan karena keberadaan debu, kotoran, dan serangga akan mengganggu kesensitifan dan keefektifan detektor. (Egan, 1978).

Berikut ini merupakan gambaran sistem peralatan yang digunakan untuk pencegahan dan perlindungan terhadap kebakaran.



Gambar 9.9 Sistem Peralatan untuk Pencegahan dan Perlindungan terhadap Kebakaran

(Sumber: Parmell, 1983)



BAB 10

DASAR-DASAR SISTEM PROTEKSIKEBAKARAN

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Laksita Ri Hastiti, S.K.M., M.K.K.K.
Debby Paramitasari, S.K.M., M.Dis.Mgt.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini dibahas dasar-dasar sistem proteksi kebakaran.

PENDAHULUAN

Proteksi kebakaran (fire protection) adalah perlindungan gedung atau aset lainnya melalui sistem proteksi. Penerapan sistem proteksi kebakaran perlu dibekali dengan pemahaman mengenai kriteria umum sistem proteksi kebakaran, pemahaman dasar sistem proteksi kebakaran aktif dan pasif, informasi desain umum sistem proteksi kebakaran di berbagai industri, serta kelebihan dan kekurangan tiap-tiap sistem. Kriteria desain sistem proteksi kebakaran yang direkomendasikan dalam bab ini berdasarkan standar dan regulasi yang sudah banyak dijadikan acuan serta standar di berbagai perusahaan. Sistem proteksi pasif dapat diterapkan di mana pun selama memungkinkan serta memiliki pendekatan yang relatif lebih aman daripada sistem proteksi aktif. Metode proteksi yang optimum adalah kombinasi antara proteksi aktif dan pasif.

KRITERIA DESAIN UMUM

Pembahasan kriteria desain umum pada bab ini adalah kriteria yang dipakai hampir pada semua desain sistem proteksi kebakaran dan hal-hal yang perlu dipertimbangkan dalam mendesain sistem proteksi kebakaran.

Aktivasi Manual versus Aktivasi Otomatis

Sistem proteksi aktif dapat dipasang untuk memfasilitasi proses mitigasi yang diinginkan, baik dengan aktivasi secara manual maupun otomatis.

- **Aktivasi Otomatis**

Suatu sistem di mana peralatan proteksi kebakaran terintegrasi dengan sistem deteksi yang didesain secara otomatis teraktivasi setelah mendeteksi api.

- **Aktivasi Manual**

Suatu sistem dimana peralatan proteksi kebakaran harus secara manual dioperasikan oleh petugas atau operator setelah terdeteksi adanya sumber api atau kebakaran.

PROTEKSI AKTIF

Deteksi dan Peringatan Kebakaran

Inisiasi proteksi kebakaran bergantung pada bagaimana sistem tersebut dibuat untuk secara cepat mendeteksi terjadinya kebakaran dan pengaturan alarm. Hal ini dapat dilakukan melalui dua cara:

- **Manual:** setelah kebakaran dideteksi, petugas diharapkan untuk melakukan tindakan untuk mencegah terjadinya kebakaran lebih besar atau memadamkannya.
- **Otomatis:** setelah kebakaran terdeteksi, sistem otomatis memadamkannya. Cara ini lebih efektif dan cepat.

Sistem pendeteksi kebakaran dapat diklasifikasikan berdasarkan cara pendeteksiannya melalui

- panas,
- asap,
- nyala, dan
- kebocoran.

Untuk kebakaran di dalam gedung, umumnya sistem pendeteksi kebakaran dan alarm diletakkan di atap karena asap di dalam sistem tertutup akan menuju ke atap.

Smoke Control

Pengendalian asap dapat dilakukan dengan cara berikut.

- *Smoke containment*
 - o *Smoke containment* dapat dilakukan dengan cara penggunaan penghalang (*barrier*) fisik seperti dinding, jendela, pintu, dan gorden asap (*smoke curtain*).
 - o Aliran udara (*airflow*) dan penerapan tekanan (*pressurization*) untuk mencegah terjadinya aliran asap menuju ke jalan keluar atau mengatur aliran asap ke arah yang terbalik.
- *Smoke extraction*
 - o *Smoke dilution*
 - o *Smoke clearance*
 - o *Smoke removal (natural venting, mechanical venting)*

Pemadam Api (*Fire Suppression*)

Pada dasarnya jenis-jenis utama pemadam api (*fire suppression*) adalah

- air
- *foam*
- *vaporising liquid*
- *dry powder*
- *inert gas*

Jenis-jenis alat pemadam api dan penggunaannya pada lokasi tertentu disajikan pada Tabel 10.1, sedangkan klasifikasi alat pemadam api ringan disajikan pada Tabel 10.2.

Tabel 10.1 Jenis-jenis Pemadam Api dan Aplikasinya

Sistem Pemadaman Api	Tipe Penggunaan
Alat Pemadam Portabel	Kantor Gudang <i>Switchgear</i> Semua area pabrik
Hidran (jika pemadam kebakaran tersedia)	Semua proses dan area utilitas tempat penyimpanan hidrokarbon Gudang Kantor
<i>Hose Reels</i>	Area produksi Gudang Kantor Akomodasi
<i>Firewater monitors</i>	Area produksi Tempat penyimpanan hidrokarbon Area pemuatan hidrokarbon
<i>Wet Pipe Sprinklers</i>	Kantor Akomodasi Gudang
<i>Dry Pipe Sprinklers</i>	Gudang <i>Critical cable vaults</i> Menara pendingin
<i>Water Spray</i> atau <i>Deluge</i>	Proses pendinginan kapal Cakupan area umum

Sistem Pemadaman Api	Tipe Penggunaan
	Pompa Transformer bernilai kritis atau tinggi
<i>Foamwater Deluge dan Monitor</i>	Potensi tumpahan hidrokarbon Rak truk dan kereta api (bongkar muat) Dok kapal Stasiun pompa
Sistem CO ₂	Fasilitas <i>switchgear</i> listrik Turbin gas Panel komunikasi atau rak
<i>Halon Substitutes</i>	Aset atau operasi komputer yang kritis
Sistem <i>Dry Chemical</i>	Dapur Rak bongkar muat (kebanyakan bila sistem air tidak ekonomis atau tidak tersedia)
<i>Dual Agent System</i>	Operasi pesawat terbang (sayap tetap dan putaran)

(Sumber: Nolan, 1996)

Tabel 10.2 Contoh Alat Pemadam Api Ringan
(Fire Protection Agency - Australia)

		Petunjuk Pemakaian APAR					Website Fire Protection Association Australia www.fpa.com.au	
		Kelas A	Kelas B	Kelas C	Kelas E	Kelas F	Kelas D	
Ada dua pola warna untuk APAR		Bahan Pemadam	Kayu Kertas Plastik	Cairan mudah menyala dan terbakar	Gas mudah terbakar	Peralatan dengan energi listrik	Minyak goreng dan lemak	Untuk api dengan logam yang mudah terbakar menggunakan APAR khusus
Sebelum 1999	Mulai 1999							
		Air	Ya	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak	Berbahaya jika digunakan pada cairan mudah terbakar, peralatan listrik dan minyak goreng /lemak
		Bahan kimia basah	Ya	Tidak	Tidak	Tidak	Ya	Berbahaya jika digunakan pada peralatan listrik
		Busa	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Terbatas	Berbahaya jika digunakan pada peralatan listrik
		Bahan kimia kering	Ya (ABE)	Ya (ABE)	Ya (ABE)	Ya (ABE)	Tidak (ABE)	Perhatikan penggunaan APAR untuk menentukan apakah digunakan BE atau ABE karena keduanya mempunyai penggunaan yang berbeda
			Tidak (BE)	Ya (BE)	Ya (BE)	Ya (BE)	Terbatas (BE)	

		karbon oksida	Terbatas	Terbatas	Terbatas	Ya	Terbatas	Tidak cocok digunakan di luar ruangan
		Gas cair	Ya	Terbatas	Terbatas	Ya	Tidak	Perhatikan karakteristik agen pemadam khusus
<p>TERBATAS menunjukkan bahwa APAR bukan agen pilihan untuk pemakaian pada kelas api tetapi hal tersebut mungkin mempunyai efek terbatas dalam memadamkan api</p> <p>Pelarut seperti alkohol atau aseton bercampur dengan air dan karena itu dibutuhkan busa khusus</p> <p>Tulisan hijau menunjukkan penggunaan APAR pada kelas api yang paling efektif</p>								

(Sumber: Fire Protection Agency, Australia)

Lampu Emergensi (*Emergency Lighting*)

Lampu emergensi diperlukan pada kondisi darurat yang membantu mempercepat menemukan jalan keluar ke tempat yang aman. *Emergency lighting* yang efektif dilakukan dengan mengombinasikan cahaya dengan *audible noise* sehingga membantu orang untuk mempermudah mencari jalan keluar yang aman.

PROTEKSI PASIF

Structural Fire Protection

Proteksi kebakaran dapat dilakukan dengan cara desain dan plant layout, misalnya

- *material containment*,
- *material separation*, dan
- *emergency material transfer*.

Sarana Penyelamatan (*Means of Escape*)

Dalam suatu desain gedung, *life safety* dari kebakaran ditentukan formula sebagai berikut.

RSET (*Required safe egress time*) < ASET (*Available safe egress time*)

$$RSET = t_d + t_a + t_o + t_i + t_e$$

t_d = waktu yang diperlukan dari terjadinya ignisi hingga terdeteksinya kebakaran

t_a = waktu yang diperlukan dari deteksi untuk memberi tahu penghuni bahwa terjadi keadaan darurat kebakaran

t_0 = waktu yang diperlukan dari pemberitahuan hingga penghuni memutuskan untuk melakukan suatu aksi

t_i = waktu yang diperlukan dari melakukan suatu aksi hingga evakuasi dilakukan

t_e = waktu dari mulai start evakuasi hingga selesainya evakuasi

ASET harus lebih besar dari RSET sehingga penghuni dapat keluar secara aman.

t_d dapat direduksi dengan mereduksi waktu yang diperlukan untuk mendeteksi adanya ignisi, misalnya dengan penggunaan peralatan pendeteksi kebakaran dan alarm kebakaran.

t_0 ditentukan oleh kemampuan seseorang untuk mengenali kondisi tidak aman t_i dan t_e dipengaruhi oleh kemampuan fisik seseorang untuk bergerak, geometri gedung, dan sejauh mana seseorang telah dipengaruhi oleh produk hasil pembakaran.

Mereduksi t_i dan t_e antara lain dapat dicapai dengan memberikan simbol dan *warning sign* yang dapat mudah terlihat dan terbaca, desain jalur keluar yang baik, dan mencegah terjadinya penetrasi asap kejalur keluar yang aman.

(SFPE *Handbook*)



BAB 11

IMPLEMENTASI DAN EVALUASI KESELAMATAN KEBAKARAN GEDUNG

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Cynthia Febrina Maharani, S.K.M., M.Sc.
Miranda Surya Wardhany, S.K.M., M.O.H.S.Sc.
Debby Paramitasari, S.K.M., M.Dis.Mgt.
Deni Andrias, S.Kom., M.K.K.K.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini pembaca dapat memahami keselamatan kebakaran pada gedung berdasarkan regulasi dan standar nasional maupun internasional.

KONSTRUKSI GEDUNG

Konstruksi gedung merupakan salah satu aspek penting dalam keselamatan kebakaran. Konstruksi gedung ini terdiri atas komponen-komponen yang berfungsi untuk mendukung ketahanan bangunan terhadap kebakaran, yaitu balok dan kolom, dinding, dan lantai. Komponen bangunan ini harus sesuai dengan standar ketahanan bangunan terhadap kebakaran karena dapat mengurangi risiko terhadap pekerja dan tim pemadam kebakaran serta mencegah terjadinya perpindahan panas ke gedung lain ataupun kerusakan yang lebih besar akibat kebakaran (Ferguson & Janicak 2005; Furness & Muckett, 2007).

NFPA 220 *Standard on Types of Building Construction* (2012) dan Hughes Associates, Inc. (2000) menjelaskan bahwa konstruksi bangunan diklasifikasikan menjadi lima tipe konstruksi dasar, yaitu Tipe I hingga Tipe V, dengan kemampuan untuk bertahan dari api yang semakin menurun dari Tipe I ke Tipe V. Masing-masing tipe konstruksi tersebut kemudian dikelompokkan lagi melalui penambahan tiga angka di belakang jenis tipe. Angka pertama menunjukkan kemampuan dinding bantalan bagian luar untuk menopang setidaknya satu lantai. Angka kedua menggambarkan kemampuan dinding penyangga bagian dalam, seperti kolom dan atap. Adapun angka H digunakan untuk mengindikasikan adanya penggunaan kayu berat pada konstruksi bangunan. Klasifikasi tipe konstruksi tersebut antara lain

1. Konstruksi Tipe I (443 atau 332)

Konstruksi Tipe I merupakan tipe konstruksi tahan api (*fire resistive*). Elemen strukturalnya berupa dinding, kolom, bentangan, balok penopang, tiang penopang, lengkungan, lantai, dan atap yang terbuat dari bahan yang tidak mudah terbakar. Secara umum konstruksi tipe ini memiliki waktu ketahanan api hingga lebih dari dua jam untuk semua dinding, kolom, balok, dan tiang penopang, bentangan, lengkungan, serta lantai. Adapun untuk bagian atap, konstruksi Tipe I ini memiliki setidaknya 1,5 jam ketahanan terhadap api. Terdapat dua jenis subklasifikasi pada konstruksi Tipe I, yaitu Tipe 443 dan Tipe 332. Hal mendasar yang membedakan kedua tipe ini adalah spesifikasi tingkat ketahanan api pada kerangka struktural bangunan.

Konstruksi tipe I ini adalah tipe konstruksi terbaik pada persepsi keselamatan kebakaran karena mampu menahan api selama beberapa jam tanpa kegagalan atau kerusakan struktural. Beberapa material yang tergolong dalam konstruksi Tipe I adalah beton, baja, dan *masonry*. Biasanya bangunan Tipe I diperkuat dengan fondasi beton pada lantai setidaknya 4,5 inchi atau struktur rangka baja yang tahan terhadap api pada seluruh bangunan.

2. Konstruksi Tipe II (222, 111, atau 000)

Konstruksi Tipe II adalah tipe konstruksi yang elemen strukturnya terbuat dari material yang tidak mudah terbakar dan beberapa material yang mudah terbakar. Walaupun bahan bangunan yang digunakan juga tergolong dalam material yang tidak mudah terbakar, konstruksi Tipe II tidak dapat dikategorikan sebagai konstruksi tahan api karena bangunan dapat runtuh akibat kegagalan struktur baja yang menopang bangunan saat terjadinya kebakaran. Bahan bangunan yang umumnya tergolong dalam konstruksi Tipe II meliputi bingkai logam dan logam berlapis, baja, *masonry*, aluminium, kaca, dan serat mineral.

Terdapat tiga subklasifikasi pada konstruksi Tipe II. Subklasifikasi pertama adalah Tipe 222. Tipe subklasifikasi ini memiliki bantalan dinding eksterior, bantalan dinding interior, dan balok dengan tingkat ketahanan api selama dua jam. Tipe subklasifikasi kedua adalah Tipe 111 yang elemen strukturnya berupa bantalan dinding eksterior, bantalan dinding interior, kolom, balok, dan *rider* yang memiliki ketahanan api satu jam. Adapun subklasifikasi ketiga dalam konstruksi Tipe II adalah Tipe 000 yang tidak tahan terhadap api.

3. Konstruksi Tipe III (211 atau 200)

Konstruksi Tipe III biasa disebut *ordinary construction*. Konstruksi tipe ini terdiri atas material konstruksi yang mudah terbakar, seperti batu bata atau anak kayu balok biasa. Jenis ini biasanya memiliki dinding bantalan eksterior dari batu bata atau jenis batu lain yang memiliki ketahanan api selama dua jam atau lebih, tetapi dinding interior terbuat dari material yang mudah terbakar. Pada saat terjadi kebakaran, seluruh interior pada konstruksi Tipe III dapat dengan mudah dihancurkan oleh api.

Konstruksi Tipe III terbagi menjadi dua subklasifikasi, yaitu Tipe 211 dan 200. Pada konstruksi Tipe III (211), elemen dinding interior, lantai, dan atap terbuat dari bilah dan plester, atau membran pelapis gipsum yang dapat tahan terhadap api selama satu jam. Adapun pada Tipe III (200), material pada elemen dinding interior, lantai, ataupun atap tidak memiliki kemampuan untuk menahan api.

4. Konstruksi Tipe IV (2HH)

Konstruksi Tipe IV adalah jenis konstruksi mudah terbakar yang sering disebut sebagai konstruksi jenis *heavy timber* atau *mill construction*. Konstruksi Tipe IV memiliki elemen struktural yang berbahan dasar kayu yang tidak terlindungi dengan luas penampang yang besar, di mana kerangka dinding bantalan eksterior berupa kolom kayu minimal delapan inci dengan ketebalan minimal enam inci, tebal lantai kayu empat inci, dan atap sebesar dua inci. Karakteristik konstruksi Tipe IV adalah terjadinya pembakaran dengan konduksi panas yang lambat sehingga terkadang jenis konstruksi ini lebih unggul daripada konstruksi baja pada kapasitas beban yang sama.

5. Konstruksi Tipe V (111 atau 000)

Konstruksi Tipe V merupakan konstruksi dengan kerangka kayu atau bahan mudah terbakar lainnya. Semua bagian kerangka bangunan terdiri dari kayu yang tidak diklasifikasikan dalam konstruksi Tipe III ataupun Tipe IV. Konstruksi Tipe V adalah tipe konstruksi dengan tingkat proteksi kebakaran terendah. Pada konstruksi Tipe V (111), seluruh bagian gedung memiliki setidaknya satu jam ketahanan terhadap api karena terdapat plester dinding khusus atau pelapis gipsum pada dinding eksterior, partisi, bantaran interior, lantai, dan atap. Sementara itu, konstruksi Tipe V (000) tidak memiliki kemampuan dalam ketahanan terhadap api. Berikut tabel yang memperlihatkan detail tipe-tipe konstruksi.

Tabel 11.1 Tingkat Ketahanan Api pada Tipe Konstruksi

	Tipe I		Tipe II			Tipe III		Tipe IV		Tipe V
	443	332	222	111	000	211	200	2HH	111	000
Dinding bearing bagian luar.										
Menunjang lebih dari satu lantai, kolom, atau dinding bearing lainnya	4	3	2	1	0 ¹⁾	2	2	2	1	0 ¹⁾
Menunjang hanya satu lantai	4	3	2	1	0 ¹⁾	2	2	2	1	0 ¹⁾
Menunjang hanya atap.	4	3	1	1	0 ¹⁾	2	2	2	1	0 ¹⁾
Dinding bearing bagian dalam.										
Menunjang lebih dari satu lantai, kolom, atau dinding bearing lainnya	4	3	2	1	0	1	0	2	1	0

	Tipe I		Tipe II			Tipe III		Tipe IV		Tipe V
	443	332	222	111	000	211	200	2HH	111	000
Menyangga hanya satu lantai	3	3	2	1	0	1	0	1	1	0
Menyangga hanya atap.	4	3	2	1	0	1	0	H ²⁾	1	0
Kolom.										
Menunjang lebih dari satu lantai, kolom, atau dinding bearing lainnya	3	2	2	1	0	1	0	H ²⁾	1	0
Menunjang hanya satu lantai	3	2	1	1	0	1	0	H ²⁾	1	0
Menunjang hanya atap.	4	3	2	1	0	1	0	H ²⁾	1	0
Balok, anak balok, dan lengkungan										
Menunjang lebih dari satu lantai, kolom, atau dinding bearing lainnya	3	2	2	1	0	1	0	H ²⁾	1	0
Menunjang hanya satu lantai	3	2	1	1	0	1	0	H ²⁾	1	0
Menunjang hanya atap.	3	2	1	1	0	1	0	H ²⁾	1	0
Konstruksi lantai	3	2	2	1	0	1	0	H ²⁾	1	0
Konstruksi atap.	2	1 1/2	1	1	0	1	0	H ²⁾	1	0
Dinding non bearing bagian luar ³⁾	0 ¹⁾									

(Sumber: Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 26 Tahun 2008)

PEMISAHAN BAHAYA

Parameter pemisahan bahaya dirancang untuk mendeteksi dan menilai dampak kebakaran pada suatu area yang bukan merupakan bagian dari kegiatan normal penghuni gedung, namun memiliki potensi untuk menciptakan *flash over*. Beberapa contoh area untuk kegiatan normal adalah meja kerja, ruang komputer, dan ruang pertemuan yang digunakan sehari-hari. Area yang diperhatikan dalam pemisahan bahaya ini adalah area yang memiliki bahan yang mudah terbakar dalam jumlah signifikan, sampah, ataupun ruang penyimpanan (Hughes Associates, Inc., 2000).

NFPA 101A (2013) mengemukakan bahwa pemisahan bahaya dapat diketahui melalui empat tahapan proses. Pada tahap pertama perlu dilakukan identifikasi terhadap area yang memiliki potensi bahaya. Setelah dilakukan identifikasi, dilakukan penentuan tingkat bahaya. Area tersebut dikatakan dapat membahayakan

struktur apabila potensi keparahan kebakaran yang mungkin terjadi dapat melebihi ketahanan dari struktur dasar bangunan. Namun, apabila area berbahaya tersebut cukup potensial untuk menciptakan *flash over* dan menimbulkan bahaya dengan menyebar melalui bukaan atau dinding kompartemen, tetapi tidak memiliki potensi yang cukup untuk membahayakan kerangka bangunan, maka daerah berbahaya disebut tidak membahayakan struktur. Langkah ketiga adalah menentukan sistem proteksi kebakaran yang tersedia untuk mengendalikan atau membatasi bahaya. Sistem proteksi yang digunakan dapat berupa *sprinkler* otomatis atau sistem pemadam lainnya serta penggunaan partisi dan pintu pelindung kebakaran yang dapat memisahkan daerah berbahaya dari bagian struktur bangunan lain. Pelindung kebakaran ini harus memiliki tingkat ketahanan terhadap api yang cukup untuk menghadapi keparahan potensi kebakaran dari daerah berbahaya tersebut. Selanjutnya, tahap terakhir adalah menentukan tingkat defisiensi (*deficiency*) pada area berbahaya. Tingkat defisiensi dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 11.2 Tingkat Defisiensi pada Area Berbahaya

	TIDAK ADA PERLINDUNGAN	PERLINDUNGAN <i>SPRINKLER</i>	PENAHAN API – TINGKAT PENGHALANG	YANG DILENGKAPI <i>SPRINKLER</i> DAN PENAHAN API
Tidak membahayakan secara struktural	Kekurangan tunggal	Tidak ada kekurangan		
Sangat membahayakan	Kekurangan ganda	Kekurangan tunggal	Tidak ada kekurangan	

(Sumber: NFPA 101A, 2013)

BUKAAN VERTIKAL

NFPA 101 *Life Safety Code* (2012) mengemukakan bahwa bukaan vertikal adalah suatu bukaan atau lubang yang menghubungkan tiap lantai secara vertikal ataupun antara lantai dengan atap bangunan. Bukaan vertikal ini dapat berupa tangga, jalur landai, lift atau jalur keluar vertikal lain, saluran pipa, saluran ventilasi, saluran binatu, pembuangan sampah, ataupun atrium. Menurut Black (2009), bukaan vertikal yang tidak tertutup dapat mempercepat proses penyebaran asap dari lantai ke lantai karena adanya gaya *buoyancy* yang mendorong asap naik ke atas sehingga menimbulkan *stack effect*. Xiuyu et al. (2012) menjelaskan bahwa kecepatan penyebaran asap secara horizontal dapat mencapai 3–4 m/s, sedangkan kecepatan penyebaran asap melalui bukaan vertikal mencapai lebih dari 10 kali

kecepatan horizontal tersebut. Pada gedung yang memiliki tinggi 100 meter, asap dapat mencapai atap gedung dalam waktu 30 detik melalui bukaan vertikal.

Bukaan vertikal harus dilengkapi dengan *fire stopping* untuk mencegah terjadinya penyebaran asap. Beberapa material yang biasa digunakan sebagai *fire stopping* antara lain mortar semen, plester *gypsum*, semen vermikulit, *fiberglass*, material keramik, partisi masonry, *inturnecent pillow* ataupun bahan-bahan tidak mudah terbakar lain yang memiliki ketahanan api selama satu jam. *Fire stopping* ini harus dipasang pada salah satu atau kedua sisi bukaan vertikal. Selain menggunakan *fire stopping*, bukaan vertikal juga dapat dilengkapi dengan *baffles*. *Baffles* adalah hambatan fisik yang tahan terhadap api dan memanjang antara balok dan atap bangunan. *Baffles* berfungsi untuk mencegah penyebaran api di bawah atap dan memegang peranan penting untuk mengeluarkan asap dari dalam bangunan. Selain itu, untuk mencegah penyebaran api dan asap dalam pipa atau saluran ventilasi, bukaan vertikal tersebut dapat menggunakan *fire damper*. *Fire damper* ini dilengkapi dengan *fusible links* yang dapat meleleh akibat panas kebakaran sehingga akan menutup saluran kebakaran secara otomatis saat terjadi kebakaran (Ferguson & Janicak, 2005; Furness & Muckett, 2007).

SPRINKLER

Sistem *sprinkler* dapat menjadi sistem kontrol penyebaran api hampir di seluruh bagian gedung melalui pendeteksian api pada saat api baru menyala serta pengendalian penyebaran api, panas, dan asap dengan cara memancarkan air untuk menurunkan temperatur dan menutupi permukaan benda yang terbakar sehingga api dapat dipadamkan. Kemampuan *sprinkler* untuk memadamkan api ini dipengaruhi oleh kecenderungan radiasi api, jenis ruangan, sistem ventilasi pada ruangan tertutup, dan jenis bahan yang terbakar (Furness & Muckett, 2007; Yu, 2012).

Secara sederhana sistem *sprinkler* terdiri atas rangkaian pipa yang dilengkapi dengan ujung penyemprot kecil atau yang biasa disebut sebagai *sprinkler head*. Kepala *sprinkler* ini dilengkapi dengan gelas kaca berisi cairan yang akan memuai dan memecahkan kaca pada suhu tertentu. Warna cairan pada gelas kaca ini menunjukkan tingkat suhu yang diperlukan untuk memuai, sesuai pada tabel 2.5. Jika terjadi kebakaran, peningkatan temperatur akibat panas dari api akan memecahkan *bulb* atau gelas kaca sehingga sistem akan beroperasi dan kepala *sprinkler* akan mengeluarkan air. Sementara itu, alarm *monitoring* yang ada pada sistem *sprinkler* akan mengaktifkan sistem alarm kebakaran (Furness & Muckett, 2007; Ramli, 2010).

Tabel 11.3 Warna pada Gelas Kaca *Sprinkler*

WARNA GLASS BULB	SUHU AKTIVASI (°C)
Oranye	57
Merah	68
Kuning	79
Hijau	93
Biru	141
Ungu	182

(Sumber: Ferguson & Janicak, 2005; Furness & Muckett, 2007)

Sistem *sprinkler* dapat diklasifikasikan berdasarkan desain dan cara kerja sistem instalasi pipa. Beberapa jenis instalasi sistem *sprinkler* yang biasa digunakan berupa sistem *wet-pipe*, sistem *dry-pipe*, sistem *preaction*, dan sistem *deluge*. Pemilihan sistem *sprinkler* ini dilakukan berdasarkan jenis ruangan dan klasifikasi barang-barang yang akan dilindungi pada area tersebut. Sebagai contoh, sistem *wet-pipe* merupakan sistem *sprinkler* yang banyak digunakan pada tempat kerja, residensial, dan kawasan industri karena sistem ini dapat melindungi bangunan dari berbagai jenis bahaya kebakaran (Schroll, 2002; Ferguson & Janicak, 2005).

Sistem *wet-pipe* merupakan jaringan pipa yang selalu berisi air pada tekanan tertentu sehingga *sprinkler* akan langsung memancarkan air pada saat terjadi kebakaran. Berbeda dengan jenis *wet-pipe*, jaringan pipa pada sistem *dry-pipe* diisi oleh udara bertekanan. *Sprinkler* jenis ini baik digunakan pada ruangan dengan suhu rendah. Akan tetapi, pada saat terjadi kebakaran, respons sistem *sprinkler* ini relatif lebih lama karena adanya waktu yang dibutuhkan agar *sprinkler* memancarkan air. Sementara itu, sistem *sprinkler preaction* merupakan kombinasi antara sistem *wet-pipe* dan *dry-pipe*. Sistem *sprinkler* ini bekerja setelah adanya aktivasi dari sensor kebakaran yang ada. Ketika sensor mendeteksi adanya api, sensor akan membuka katup pada sistem *sprinkler* sehingga air dapat memancar keluar. Sistem *sprinkler* lainnya adalah sistem *deluge*. Sistem ini biasanya digunakan pada area dengan tingkat bahaya kebakaran tinggi. Pada sistem *deluge*, kepala *sprinkler* dalam posisi terbuka sehingga pada saat sistem *deluge* diaktifkan, air segera mengalir melalui pipa dan keluar dari kepala *sprinkler* (Schroll, 2002; Ferguson & Janicak, 2005).

Selain terdiri atas kepala *sprinkler* dan instalasi pipa, *sprinkler* dilengkapi dengan persediaan air cadangan. Sistem *sprinkler* ini setidaknya memiliki satu jenis sistem persediaan air yang bebas lumpur dan pasir. Persediaan air harus sesuai dengan luas gedung sehingga *sprinkler* dapat menyemburkan air selama minimal 30 menit (NFPA 13, 2013).

SISTEM ALARM KEBAKARAN

Salah satu cara untuk memastikan penghuni gedung melakukan evakuasi secara aman ketika terjadi kebakaran adalah melalui penyediaan sistem alarm kebakaran. Setiap bangunan gedung perlu memiliki sistem alarm kebakaran sebagai sistem pendeteksi dini kebakaran, peringatan kepada penghuni gedung untuk segera melakukan evakuasi penyelamatan saat terjadinya kebakaran, serta dapat menjadi sinyal kebakaran yang diberikan kepada petugas pemadam kebakaran agar kebakaran dapat segera ditanggulangi. Selain itu, sistem alarm kebakaran yang terintegrasi juga akan mengaktifkan sistem proteksi lain, seperti sistem pengendalian asap dan sistem tekanan udara pada tangga darurat, serta menutup sistem ventilasi pada bangunan (Furness & Muckett, 2007).

Sistem alarm kebakaran dapat berupa alarm manual. Sistem ini digunakan untuk memberitahu penghuni gedung untuk melakukan evakuasi dalam keadaan darurat. Alarm ini membutuhkan aktivasi manual melalui penggunaan *pull station*. Setelah alarm secara manual diaktifkan, bel alarm akan berbunyi. Selain sistem manual, alarm kebakaran dapat berupa alarm otomatis. Alarm otomatis dilengkapi dengan alat pendeteksi seperti detektor asap dan detektor panas yang akan mengaktifkan alarm jika detektor tersebut mendeteksi adanya asap atau panas. Selain itu, terdapat sistem alarm terpusat yang dapat memberikan notifikasi pada area pusat. Jika terjadi kebakaran, indikasi kebakaran akan ditransmisikan ke panel *annunciator* yang menunjukkan lokasi asal alarm yang berbunyi (Schroll, 2002).

PENDETEKSI ASAP

Detektor asap adalah alat deteksi kebakaran yang dapat mendeteksi adanya asap dalam ruangan. Detektor asap lebih baik digunakan sebagai pendeteksi pada saat kebakaran karena detektor asap merespons lebih cepat daripada *sprinkler* dan detektor panas. Salah satu alat deteksi asap bekerja dengan prinsip ionisasi dengan menggunakan bahan radioaktif yang akan mengionisasi udara dalam komponen detektor asap. Apabila ada asap dengan partikel kecil masuk ke dalam ruang detektor, akan terjadi penurunan daya hantar listrik yang akan memberikan sinyal ke sistem alarm. Selain itu, terdapat jenis deteksi asap dengan prinsip fotoelektrik. Pendeteksi asap ini dapat mendeteksi semua jenis asap dengan partikel lebih besar, seperti asap yang muncul dari furnitur yang terbakar. Alat ini bekerja dengan prinsip mengantarkan sinar ultraviolet ke dalam ruang detektor. Jika sinar ultraviolet terhalang oleh asap untuk mencapai ruang detektor, alat akan mengaktifkan alarm kebakaran secara otomatis (Furness & Muckett, 2007; Ramli, 2010).

Ferguson dan Janicak (2005) menjelaskan bahwa penempatan dan jarak pemasangan detektor asap harus disesuaikan dengan bentuk dan permukaan langit-langit, tinggi langit-langit, bentuk dan wujud, susunan dari isi ruangan, sifat-sifat asap dari bahan yang akan diproteksi bila terbakar, serta sistem ventilasi ruangan. Berdasarkan NFPA 72 *National Fire Alarm and Signaling Code* (2013), elemen peka atau sensor detektor asap harus dipasang lebih dari 4 cm dari langit-langit. Selain itu, detektor asap harus dipasang pada jarak yang sama dengan 0,7 kali jarak yang dipilih dan sesuai dengan rekomendasi dari pabrik.

INTERIOR FINISH

Menurut NFPA 101 (2012), *interior finish* merupakan material atau rangkaian material yang menutupi permukaan interior pada dinding, lantai, dan plafon suatu bangunan. Dalam *International Building Code* (2012), *interior finish* terdiri dari material yang melapisi permukaan lantai bangunan, anak tangga, dinding, partisi, kolom, plafon, bingkai interior, atau segala sesuatu yang menutupi struktur bangunan untuk dekorasi. Material yang termasuk dalam *interior finish* antara lain kayu, panel kayu, *drywall*, plastik, ubin plafon berserat, dan penutup dinding.

Ferguson dan Janicak (2005) menjelaskan bahwa jenis material yang digunakan untuk menutupi permukaan bangunan, baik pada dinding, plafon, maupun lantai, dapat memengaruhi tingkat penyebaran api pada saat kebakaran. Tingkat penyebaran api merupakan kecepatan ikut terbakarnya interior bangunan sesaat setelah api muncul. Menurut IBC dan NFPA (2012), material interior pada dinding dan plafon diklasifikasikan sesuai dengan ASTM E 84 berdasarkan tingkat penyebaran api menjadi tiga tingkatan, yaitu Kelas A, B, dan C sesuai dengan Tabel 11.4. Berdasarkan klasifikasi tersebut, material pada Kelas A merupakan material terbaik yang memiliki tingkat penyebaran api yang paling rendah. Hal ini berarti api tidak dapat merambat sejauh pada material di kelas lainnya. Adapun untuk material interior pada lantai, NFPA 101 (2012) mengklasifikasikan material yang dapat digunakan berdasarkan nilai *critical radiant flux* material sesuai dengan ASTM E 648. Material interior pada lantai dikategorikan sebagai material Kelas I jika nilai *critical radiant flux* material lebih dari $0,45 \text{ W/cm}^2$ dan Kelas II jika nilainya di antara $0,22$ dan $0,45 \text{ W/cm}^2$.

Tabel 11.4 Klasifikasi Material Interior Dinding dan Plafon

Klasifikasi	Contoh Material	Tingkat Penyebaran Api
Kelas A	Batu bata (<i>brick</i>), gipsum (<i>gypsum</i>), semen-fiber (<i>fiber-cement</i>)	0–25
Kelas B	Kayu cedar, kayu <i>hemlock</i> , kayu <i>spruce</i>	26–75
Kelas C	Kayu lapis (<i>plywood</i>), papan partikel (<i>particle board</i>), papan fiber (<i>fiber board</i>)	76–200

(Sumber: IBC dengan modifikasi, 2012)

Selain memengaruhi tingkat penyebaran api, material yang digunakan sebagai *interior finish* juga memengaruhi banyaknya asap dan gas beracun yang dihasilkan. Selain itu, *interior finish* dapat meningkatkan beban terbakar dalam bangunan sehingga meningkatkan intensitas api (Ferguson & Janicak, 2005).

PENGENDALIAN ASAP

Pengendalian asap merupakan salah satu aspek penting dalam proteksi kebakaran. Saat terjadi kebakaran, asap dengan suhu tinggi akan terakumulasi dan sulit untuk dikeluarkan dari dalam gedung. Asap ini akan dapat merusak struktur bangunan dan membahayakan keselamatan penghuni gedung. Asap sering kali menjadi penyebab utama kematian. Berdasarkan data statistik, 85% kematian pada kejadian kebakaran disebabkan oleh asap kebakaran. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendalian asap yang efektif untuk mengeluarkan panas dan asap dari dalam gedung (Black, 2009; Wei *et al.*, 2013).

Menurut Schroll (2002) dan Furness & Muckett (2007), sistem pengendalian asap berfungsi untuk mencegah penyebaran asap dari suatu bagian gedung ke bagian lainnya. Pengendalian asap ini memegang peranan penting untuk memastikan jalur evakuasi aman dari asap akibat kebakaran serta meningkatkan waktu yang tersedia untuk proses evakuasi penghuni gedung.

Schroll (2002) menjelaskan bahwa pengendalian asap dapat dilakukan secara aktif dan pasif. Sistem pengendalian asap aktif adalah sistem yang secara aktif dapat mengendalikan asap dengan menggunakan ventilasi, baik berupa ventilasi alami maupun buatan. Ventilasi alami dibuat dengan cara membuat bukaan pada gedung

sehingga suplai udara bebas dari luar dapat masuk ke dalam gedung. Agar ventilasi efektif, perlu disediakan aliran udara yang masuk dan keluar. Sementara itu, ventilasi buatan atau ventilasi mekanik adalah sistem ventilasi dengan menggunakan alat untuk memaksa udara masuk, keluar, atau kombinasi keduanya. Ventilasi mekanik yang biasa digunakan adalah dengan menggunakan sistem tekanan. Sistem ini akan menjaga tekanan dalam ruangan agar tetap positif saat alarm kebakaran berbunyi sehingga asap tidak dapat masuk ke dalam ruangan. Selain itu, pengendalian asap aktif dapat berupa pintu kontrol asap yang secara otomatis akan menutup jika mendeteksi adanya asap, pintu kebakaran, serta *dampers* yang didesain dalam sistem ventilasi. Adapun metode pengendalian asap pasif dilakukan dengan cara membatasi pergerakan asap dan penyebaran api dengan kompartemen yang dapat memisahkan bangunan dengan area yang terbakar.

Dalam *Principles of Fire Risk Assessment in Buildings* (Yung, 2008) dikemukakan bahwa terdapat tiga teknik dasar pengendalian asap. Teknik pertama adalah dengan mencegah asap menjalar keluar dari ruangan munculnya api dan mencegah asap untuk memasuki ruangan lain. Jenis pengendalian tipe ini dapat dilakukan dengan menggunakan *door self-closers*, dan *automatic shut-offs* pada kipas ventilasi mekanik, serta aktivasi *dampers* pada saluran ventilasi. Selanjutnya, teknik kedua dilakukan dengan cara mengeluarkan asap dari ruangan tempat munculnya api dan mencegah penyebaran asap ke lantai atas dan bawah. Sistem pengendalian asap ini mencakup *automatic smoke extraction* dan *pressurization systems*. Selain itu, teknik lainnya adalah mencegah asap untuk mencapai tangga, lift, dan bukaan vertikal melalui *automatic stairwell pressurization* dengan penggunaan kipas untuk menjaga tekanan pada tangga.

AKSES KELUAR

Pada saat terjadi kebakaran, perlu segera dilakukan evakuasi terhadap penghuni gedung. Proses evakuasi dapat dilakukan melalui sistem jalan keluar yang tersedia dalam gedung. Sistem jalan keluar ini terdiri atas akses keluar, jalur evakuasi, dan pintu darurat. Akses keluar merupakan bagian dari sarana jalan keluar yang mengarah ke pintu darurat terdekat pada masing-masing lantai gedung menuju jalur evakuasi (NFPA 5000, 2012).

Menurut Furness & Muckett (2007), agar proses evakuasi dapat dilakukan secara lancar, perlu dipertimbangkan jumlah dan lebar akses keluar yang dibutuhkan untuk dapat mengevakuasi penghuni gedung dalam waktu yang terbatas. Berdasarkan dokumen PD 7974 The British Standard Institute (dalam Furness & Muckett, 2007),

waktu evakuasi dapat dihitung berdasarkan *Required Safe Escape Time* (RSET), yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mendeteksi adanya kebakaran, bunyi alarm kebakaran, pengenalan dan respons penghuni gedung atas bunyi alarm, hingga waktu yang ditempuh penghuni gedung untuk sampai ke jalan akses keluar menuju tempat yang aman.

Secara umum, waktu yang tersedia agar semua penghuni gedung dapat melarikan diri dengan selamat disebut sebagai *Available Safe Escape Time* (ASET) yang terdiri atas empat tahapan. Tahap 1 adalah waktu yang dibutuhkan penghuni gedung untuk menyadari adanya api yang baru menyala. Tahap ini biasanya memakan waktu hingga dua pertiga dari total waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi. Selanjutnya, Tahap 2 merupakan *pre-movement time* atau waktu yang terbuang sebelum tiap-tiap penghuni gedung mulai bergerak menuju jalur evakuasi. Tahap 3 adalah waktu ketika penghuni gedung berjalan menuju akses keluar, dan tahap akhir disebut sebagai *flow time*, yaitu waktu yang dibutuhkan penghuni gedung untuk melewati jalur evakuasi. Waktu yang tersedia (ASET) ini harus lebih besar dibandingkan dengan RSET agar penghuni gedung dapat melakukan evakuasi dengan selamat (Furness & Muckett, 2007; Hoskins & Milke 2012).

Waktu proses evakuasi juga dipengaruhi oleh jarak yang dibutuhkan penghuni gedung untuk sampai ke pintu keluar pada saat terjadi kebakaran. Jarak yang dapat ditempuh penghuni gedung dari titik terjauh ruangan menuju pintu darurat terdekat ini tidak boleh melebihi 60 meter atau sekitar 200 kaki. Selain itu, akses keluar tidak boleh memiliki jalan buntu yang dapat memungkinkan penghuni gedung tersesat saat melakukan proses evakuasi (Furness & Muckett, 2007; NFPA 101, 2012).

Akses keluar menuju pintu darurat harus bebas hambatan dan memiliki lebar yang memadai karena akan memengaruhi kecepatan proses evakuasi yang dapat dilakukan penghuni gedung. Selain itu, pintu darurat tidak boleh terkunci ketika penghuni berada di dalam gedung. Semua akses menuju jalan keluar harus ditandai dengan tanda petunjuk jalan keluar yang mudah terlihat dan diposisikan rendah sepanjang sisi pintu keluar. Jika bangunan gedung memiliki pencahayaan yang kurang, petunjuk arah ini harus diterangi. Hal itu akan memudahkan penghuni gedung untuk menentukan rute keluar yang benar jika asap mengaburkan tanda petunjuk jalan keluar selama kebakaran. Akses keluar juga perlu dilengkapi dengan pencahayaan darurat yang dirancang untuk memungkinkan penghuni gedung menemukan pintu keluar walaupun daya listrik dimatikan. Penerangan darurat bersumber dari baterai yang dapat beroperasi setidaknya selama 90 menit setelah sumber listrik utama padam (Schroll, 2002).

JALUR EVAKUASI

Jalur evakuasi merupakan jalur aman yang disediakan agar penghuni gedung dapat menyelamatkan diri jika terjadi kebakaran, dari titik mana pun dalam gedung tersebut menuju tempat aman di luar gedung tanpa bantuan dari luar. Jalur evakuasi dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu *single route*, *multiple routes*, dan *direct exit*. Jalur evakuasi dikatakan sebagai *single route* apabila hanya terdapat satu jalur evakuasi dalam sebuah gedung, sedangkan evakuasi dengan *multiple routes* berarti penghuni gedung pada setiap lantai memiliki paling tidak dua jalur evakuasi menuju tempat aman di luar gedung. *Direct exit* merupakan jalur evakuasi di mana setiap ruangan memiliki akses langsung keluar gedung melalui *exterior exit* (Furness & Muckett, 2007; NFPA 101A, 2013).

Jalur evakuasi harus memadai dan memiliki sistem perlindungan khusus agar penghuni gedung dapat melarikan diri secara aman dari keadaan darurat dalam waktu yang terbatas. Setidaknya terdapat dua jalur evakuasi yang mengarah pada titik berkumpul. Jalur evakuasi ini harus terpisah untuk menghindari adanya kemungkinan api menyebar secara cepat dan menghalangi jalur evakuasi. Jalur evakuasi yang memadai dipengaruhi oleh kapasitas jalur, jumlah pekerja, dan jarak yang ditempuh untuk sampai pada titik berkumpul. Selain itu, jalur evakuasi harus memiliki sistem perlindungan berupa pemasangan *sprinkler*, pintu tahan api dengan *self-closers*, penerangan darurat dan konstruksi tahan api selama dua jam (Schroll, 2002; IBC 2012).

Furness & Muckett (2007) dan Tavares (2010) menjelaskan bahwa jarak evakuasi ini dihitung berdasarkan jarak dari ruangan atau area di mana sumber api berasal, menuju tangga darurat, hingga tempat evakuasi di lantai dasar. Akan tetapi, jarak evakuasi ditentukan berdasarkan jenis ataupun kegunaan dari gedung tersebut. Pada gedung perkantoran, maksimal jarak evakuasi yang disarankan jika gedung memiliki satu jalur keluar adalah 18 meter dan 45 meter untuk jalur keluar lebih dari satu. Selain itu, penentuan batas jarak evakuasi juga harus memperhatikan jumlah laju alir penghuni gedung pada saat melakukan proses evakuasi.

KORIDOR/KOMPARTEMEN

Koridor atau kompartemen merupakan suatu bagian horizontal atau vertikal berupa dinding atau lantai yang memisahkan bagian dalam bangunan. Selain untuk memisahkan, kompartemen ini berfungsi sebagai penghalang penyebaran asap dan api serta jalur evakuasi yang aman ketika terjadinya kebakaran. Kompartemen yang

efektif harus dapat membatasi tingkat kerusakan yang disebabkan oleh panas dan asap dari api. Kompartemen sangat penting baik bagi keselamatan jiwa penghuni maupun perlindungan terhadap properti di dalam gedung. Oleh karena itu, material kompartemen harus memiliki ketahanan terhadap api. Biasanya, material tersebut harus dapat menahan beban api selama 30 menit hingga 4 jam untuk beberapa kondisi tertentu (Stollard & Abrahams, 2002; Furness & Muckett, 2007).

Koridor atau kompartemen harus dilengkapi dengan pintu dan jendela kebakaran karena bukaan pada koridor atau kompartemen dapat membantu penyebaran asap, panas, dan api menuju ruangan lain. Pada kompartemen yang membagi bangunan menjadi beberapa ruangan, pintu harus memiliki ketahanan terhadap api selama 3–4 jam. Akan tetapi, jika dinding kompartemen hanya dapat menahan api selama 2 jam, dapat digunakan pintu kebakaran dengan tingkat ketahanan api 1,5 jam. Selain itu, pintu dengan ketahanan api selama 45 menit juga dapat digunakan untuk melindungi bukaan pada dinding partisi atau pemisah pada ruangan yang memiliki potensi bahaya kebakaran (Fergusom & Janicak, 2002).

Jumlah kompartemen pada setiap lantai pada gedung harus dibagi berdasarkan jumlah material yang berpotensi menyebabkan kebakaran. Semakin besar potensi bahaya kebakaran yang terdapat dalam gedung, ukuran kompartemen harus semakin kecil. Selain itu, jumlah kompartemen juga disesuaikan dengan fungsi dari bangunan dan jumlah penghuni gedung. Pada setiap lantai setidaknya harus terdapat dua buah kompartemen. Hal ini akan memungkinkan penghuni gedung melakukan evakuasi secara mudah. Jarak antarkompartemen juga harus dipertimbangkan karena dapat memengaruhi kecepatan penghuni gedung dalam proses evakuasi (Stollard & Abrahams, 2002).

PROGRAM TANGGAP DARURAT

Kejadian kebakaran pada bangunan dapat terjadi kapan saja dan dapat membahayakan jiwa penghuni gedung serta menimbulkan kerugian baik berupa properti maupun lingkungan. Sebagai upaya untuk meminimalisasi kerugian, perlu diterapkan sistem pengendalian keadaan darurat yang efektif melalui peningkatan kompetensi personel yang bertanggung jawab. Program tanggap darurat merupakan pelatihan yang ditujukan untuk memberikan pengetahuan dan keterampilan dalam mencegah, melakukan perencanaan, dan menghadapi keadaan darurat untuk meminimalkan kerugian (Gerber, 2013).

NFPA 101A dan Yung (2008) menjelaskan bahwa program tanggap darurat berupa latihan pemadaman kebakaran dan simulasi evakuasi sesuai dengan kondisi bahaya yang mungkin muncul saat terjadinya kebakaran harus dilakukan oleh penghuni gedung untuk meminimalkan adanya *delay* dalam proses evakuasi. Selain itu, program tanggap darurat yang dilakukan secara rutin juga dapat mempersingkat waktu yang dibutuhkan untuk melakukan evakuasi karena penghuni gedung telah memiliki pengetahuan yang cukup mengenai jalur evakuasi terbaik yang dapat digunakan pada saat terjadinya kebakaran.



BAB 12

STUDI KASUS KESELAMATAN KEBAKARAN DI INDUSTRI

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.

Laksita Ri Hastiti, S.K.M., M.K.K.K.

Ike Pujiriani, S.K.M., M.K.K.K.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini pembaca dapat memahami keselamatan, keamanan, dan manajemen risiko transportasi bahan kimia. Pada bagian ini pembaca juga dapat memahami studi kasus simulasi kebakaran dan ledakan (*fire and explosion modelling*) pada media penyimpanan *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) propana dan butana dengan menggunakan perangkat lunak BREEZE Incident Analyst.

KESELAMATAN KEBAKARAN PADA TRANSPORTASI BAHAN KIMIA BERBAHAYA

Bahan kimia, terutama yang memiliki karakteristik mudah menyala atau mudah terbakar, memiliki potensi risiko mengalami kejadian kebakaran dan ledakan. Kebakaran dan ledakan mengakibatkan kecelakaan serius yang merugikan secara material, bahkan mengancam nyawa. Keduanya sering kali saling berhubungan: kebakaran dapat disebabkan oleh ledakan, demikian pula sebaliknya ledakan dapat disebabkan oleh kebakaran.

Transportasi bahan kimia dan bahan berbahaya lainnya melalui darat, laut, udara, perpipaan (*pipeline*), dan jenis moda transportasi lain telah menjadi penunjang utama bagi perekonomian global dan nasional. Pada satu sisi, perkembangan teknologi, terus meningkatnya kebutuhan pasar, dan volume lalu lintas yang semakin padat menuntut sistem transportasi dan infrastruktur yang memadai. Pada sisi yang lain sektor transportasi ini memiliki potensi risiko pelepasan bahan kimia berbahaya yang dapat berdampak pada masyarakat, properti, lingkungan (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2008).

Bahan kimia berbahaya, termasuk di dalamnya olahan minyak dan gas bumi, didistribusikan dalam jumlah yang besar setiap harinya. Pengangkutan bahan-bahan berbahaya dengan karakteristik tertentu akan berpotensi menimbulkan risiko yang tinggi jika terjadi kecelakaan. Berbagai kecelakaan kaitannya dengan transportasi bahan kimia berbahaya dapat terjadi. Berdasarkan laporan *Major Hazard Incident Data Services/MHIDAS* (2004), 43% dari 12.179 kecelakaan terjadi pada transportasi (Cuchi *et al.*, 2004).

Penelitian yang dilakukan oleh Oggero *et al.* (2005) mengenai kecelakaan pada pengangkutan bahan kimia berbahaya melalui jalan darat dan kereta api mulai tahun 1932 hingga Juli 2004 menunjukkan bahwa terdapat peningkatan frekuensi kecelakaan dengan sekitar 63% kecelakaan terjadi di jalan raya.

Kecelakaan yang paling sering terjadi berupa

- rilisnya/tumpahnya suatu zat atau kebocoran (78%),
- kebocoran yang diikuti dengan kebakaran (28%),
- ledakan (14%), dan
- awan gas (6%).

Penelitian tersebut menyatakan frekuensi terjadinya kecelakaan yang menyebabkan ledakan sebesar 1:9,5, yang berarti terdapat 1 dari setiap 9,5 kejadian kecelakaan menyebabkan ledakan. Frekuensi kecelakaan yang menyebabkan kebakaran serta kebakaran dan ledakan masing-masing sebesar 1:3,5 dan 1:15.

Berdasarkan penelitian Stachler (2001), transportasi bahan kimia berbahaya memperoleh persentase sebesar 10% dari total transportasi jalan raya. Hal ini berisiko menimbulkan dampak terhadap manusia, material, dan lingkungan. Volume transportasi bahan kimia berbahaya di Eropa pada tahun 1990–1998 menunjukkan bahwa jumlahnya mencapai 35% atau dalam rentang 932–1.225 dalam 1.000 juta ton kilometer dari total transportasi darat (Eurostat, 2000). Statistik menunjukkan bahwa mobil adalah alat transportasi bahan kimia berbahaya nomor satu di Eropa. Volume tersebut diperkirakan akan naik terus-menerus.

Tingkat kecelakaan transportasi di jalan raya yang mengangkut bahan kimia berbahaya sebesar tujuh kali lebih tinggi daripada kecelakaan kereta api dan perairan. Hal ini didukung dengan fakta bahwa kecelakaan lebih sering terjadi di jalan pada transportasi bahan kimia berbahaya dengan kapasitas lebih dari 10.000 liter (Brenck dan Mondry, 1998). Pada tahun 2000 German Federal Statistic Office telah mendata kecelakaan jalan raya yang melibatkan kendaraan yang mengangkut bahan kimia berbahaya, baik akibat rilisnya bahan maupun tidak, menyebabkan cedera dan kerusakan material serius. Penelitian tahun 1999 menunjukkan bahwa sebagian besar kecelakaan yang melibatkan rilisnya bahan kimia berbahaya, dengan 34 dari 52 kasus atau sekitar 65%, terjadi dengan karakteristik bahan yang diangkut dalam Kategori 3 (cairan yang mudah terbakar).

Kajian risiko memberikan masukan terhadap evaluasi risiko. Hal ini dilakukan untuk mengambil keputusan apakah risiko tersebut perlu dikendalikan serta menentukan strategi dan metode pendekatan pengendalian risiko yang paling baik. Pada tahun 1995 Center for Chemical Process Safety (CCPS) membuat *Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis* dan pada tahun 2000 mengembangkan *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis* yang menjadi salah satu panduan kajian risiko untuk aktivitas transportasi bahan kimia berbahaya. Secara umum analisis risiko dapat dilakukan secara skenario dan non-skenario (Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2000 dalam Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2009; CCPS, 2008).

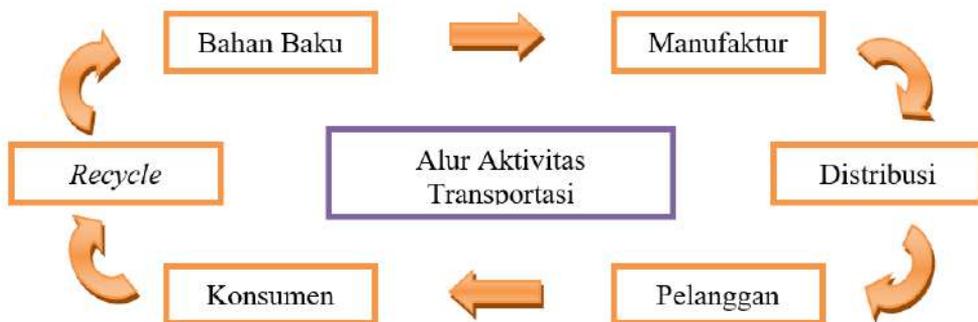
Analisis risiko kebakaran dan ledakan berbasis skenario merupakan bagian dari analisis risiko dengan aspek kebakaran dan ledakan sebagai fokus analisisnya. Analisis risiko kebakaran dan ledakan berbasis skenario merupakan metode perhitungan risiko yang detail dengan langkah-langkah

- menentukan sekuens kejadian atau skenario yang berpotensi serta potensi terjadi insiden;
- melakukan evaluasi konsekuensi;
- melakukan estimasi frekuensi kejadian/insiden;
- melakukan estimasi dampak insiden; dan
- melakukan estimasi nilai risiko

(Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2000 dalam Center for Chemical Process Safety/CCPS 2009).

MANAJEMEN RISIKO TRANSPORTASI

Semakin kompleks rantai transportasi bahan kimia seperti tergambar dalam Gambar 12.1 menunjukkan bahwa ada berbagai pemangku kebijakan yang berbagi tanggung jawab dalam menjamin keselamatan dan keamanan transportasi bahan kimia. Rantai suplai transportasi bahan kimia dapat dilihat sebagai satu bagian atau keseluruhan sistem yang lengkap mulai dari suplai material mentah, proses manufaktur dan distribusi, suplai ke pengguna, serta manajemen limbahnya.



Gambar 12.1 Alur Aktivitas Transportasi Bahan Kimia Berbahaya

(Sumber: Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2008)

Peran dan tanggung jawab mungkin berbeda pada setiap pemangku kebijakan dan berbeda dalam area fungsional dari setiap perusahaan. Oleh karena itu, penting bagi setiap kelompok untuk memahami bagaimana aktivitas dan tindakan mereka dapat memengaruhi risiko atau dampak pada keseluruhan rantai suplai. Optimalisasi rantai suplai dan dukungan terhadap seluruh pihak dalam menjaga

efisiensi operasional untuk menekan risiko terhadap keselamatan dan keamanan transportasi bahan kimia dapat ditingkatkan salah satunya melalui program manajemen risiko transportasi.

Manajemen risiko transportasi sangat kompleks karena berkaitan dengan beberapa hal, meliputi

- jumlah bahan kimia yang diatur dalam regulasi nasional, regional dan internasional;
- regulasi yang bervariasi di berbagai wilayah dan negara di dunia;
- perbedaan karakteristik dan klasifikasi bahan kimia, misalnya toksisitas, reaktivitas, dan sebagainya;
- variasi moda transportasi, mulai dari darat, laut, perpipaan, rel, dan udara;
- variasi pengemasan bahan kimia;
- penggunaan metode intermodal atau lebih dari satu moda transportasi;
- kompleksitas rantai suplai dan perubahan yang mungkin terjadi saat transit material bahan kimia;
- potensi kurang jelasnya pembagian peran dan tanggung jawab yang tumpang tindih pada beberapa pihak terkait; dan
- rute transportasi yang dinamis dan dapat berubah-ubah sewaktu-waktu di area yang berbeda-beda.

TUJUAN MANAJEMEN RISIKO TRANSPORTASI

Tujuan utama dalam memastikan transportasi bahan kimia dengan aman dan selamat adalah penurunan tingkat kecelakaan yang dapat mengakibatkan kebakaran, ledakan, rilisnya bahan kimia ke lingkungan, atau adanya penyalahgunaan.

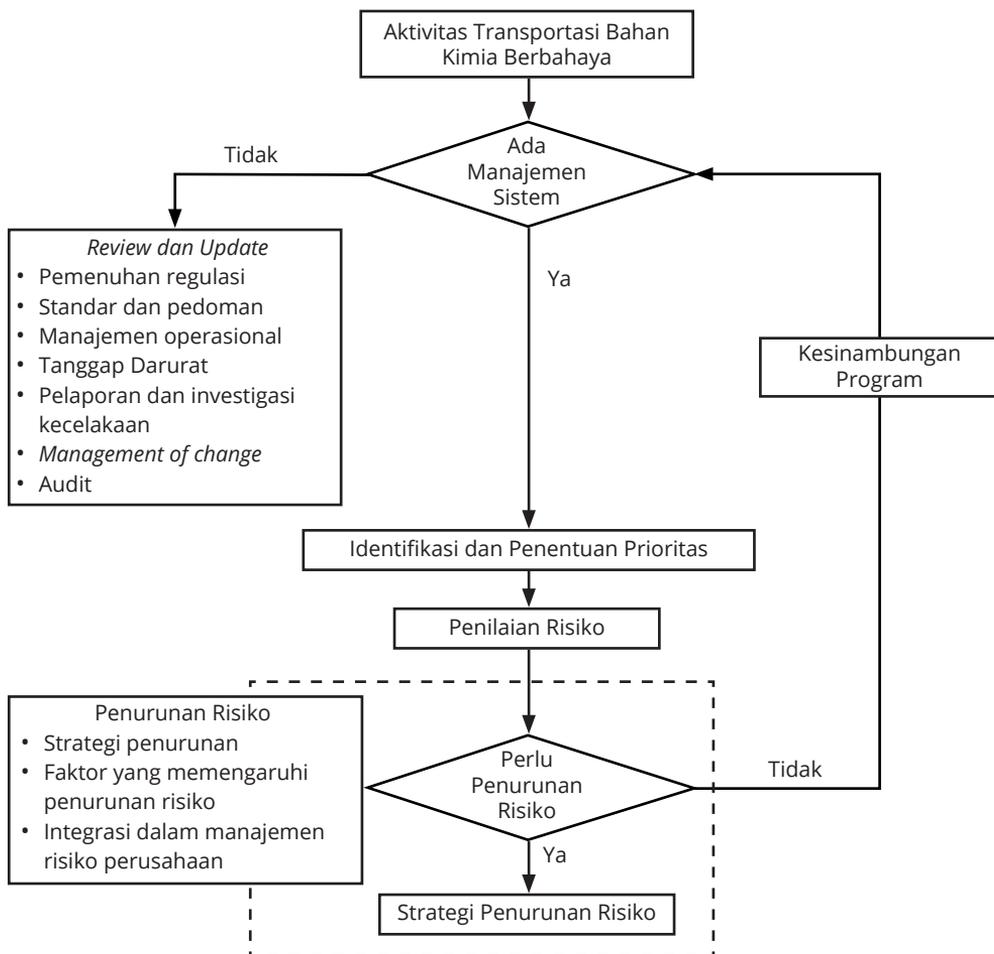
KERANGKA MANAJEMEN RISIKO TRANSPORTASI

Manajemen risiko transportasi atau dikenal dengan *Transportation Management Framework* (TMF) telah dikembangkan oleh Center for Chemical Process Safety sejak tahun 1995. Kerangka manajemen risiko transportasi dirancang untuk dapat bersifat fleksibel, yang mempermudah perusahaan merancang proses manajemen risiko transportasi sesuai dengan lingkungan dan implementasi yang spesifik. Secara sederhana kerangka manajemen risiko transportasi meliputi beberapa tahapan berikut.

- Manajemen sistem utama (*primary management system*) adalah dasar dari manajemen risiko transportasi. Memastikan setiap elemen sistem lengkap dan

tersedia adalah tahap pertama dari keseluruhan tahapan. Dalam tahap ini perlu dipertimbangkan berbagai kemungkinan perubahan regulasi.

- Identifikasi dan skala prioritas, yang mencakup (1) data bahan kimia berbahaya dan moda transportasi yang digunakan, (2) identifikasi area sensitif dan titik potensial terjadinya kegagalan sepanjang rute transportasi dan transpor, dan (3) memahami interaksi dengan pemangku kebijakan pada setiap rantai suplai.
- Analisis risiko baik terkait aspek keselamatan maupun keamanan. Aspek keselamatan dapat dinilai secara kualitatif, semikuantitatif, atau kuantitatif.
- Reduksi risiko melalui implementasi hasil analisis dan evaluasi risiko yang telah dilakukan sesuai prioritas yang telah ditetapkan.
- Keberlanjutan proses manajemen risiko melalui komitmen, perbaikan yang terus-menerus, penyesuaian dengan isu-isu terkini, serta pelaksanaan manajemen risiko secara berkelanjutan.



Gambar 12.2 TMR Framework

(Sumber: Center for Chemical Process Safety/CCPS, 2008)

SISTEM MANAJEMEN UTAMA

Sistem manajemen utama (*primary management system*) merupakan hal-hal mendasar yang dibutuhkan sebagai prioritas dalam organisasi agar siap dalam menjalankan analisis risiko. Hal-hal yang perlu diperhatikan antara lain

- memastikan bahwa semua regulasi yang wajib harus terpenuhi;
- mengembangkan dan memenuhi kebutuhan dalam aspek *training*/pelatihan;
- mengembangkan prosedur dan protokol;
- memastikan integritas peralatan;
- monitoring dan peningkatan praktik suplai bahan kimia berbahaya;
- mengelola setiap perubahan prosedur dan protokol;
- mempersiapkan penanggulangan kecelakaan (termasuk kebakaran dan ledakan) serta kondisi gawat darurat;
- identifikasi dan pengelolaan risiko transportasi.

Pengembangan sistem manajemen utama yang komprehensif yang memenuhi segala kebutuhan dan sesuai dengan semua kondisi memang tidak mudah untuk dilakukan. Namun, penting untuk mengenali dan memahami bahwa sistem manajemen utama dapat berjalan dengan komitmen, dukungan, dan partisipasi seluruh elemen sistem. Sistem manajemen transportasi bukan bagian yang terpisah dari sistem manajemen yang ada di perusahaan, tetapi merupakan salah satu bagian dari sistem tersebut. Sering kali dalam aktivitas transportasi, manajemen tersebut dikelola oleh bagian yang berbeda dalam satu perusahaan. Oleh karena itu, diperlukan terintegrasi dan komunikasi yang baik untuk menjamin keberlangsungan sistem tersebut.

ANALISIS KONSEKUENSI: SIMULASI KEBAKARAN DAN LEDAKAN

Propana dan butana merupakan komponen utama *Liquefied Petroleum Gas* (LPG) yang digunakan di Indonesia. Sebelum diisikan ke tabung-tabung ukuran 3 kg, 12 kg atau 50 kg, LPG disimpan di dalam tangki-tangki penyimpanan, baik berbentuk horizontal, sferikal (*spherical*), dan tabung penyimpanan LPG berukuran 3 kg. Tangki penyimpanan tersebut dapat menampung hingga ribuan meter kubik (m³) LPG. Oleh karena sifat propana serta butana yang mudah terbakar dan meledak, area penyimpanan LPG termasuk dalam area berisiko tinggi.

Sebuah kejadian ledakan dan kebakaran tangki penyimpanan 18.000 galon LPG propana pernah terjadi di Albert City, Iowa, Amerika Serikat, pada tanggal 9 April 1998. Kejadian tersebut berawal dari kebocoran tangki hingga menyebabkan

kebakaran dan ledakan yang mengakibatkan 2 orang petugas pemadam kebakaran meninggal dan 7 warga lainnya luka parah. Selain korban jiwa, kejadian ini juga mengakibatkan kerugian material hingga mencapai 250.000 dolar AS (U.S. Chemical Safety Hazard and Investigation Board, 1998). Oleh karena itu, simulasi dispersi gas, kebakaran, dan ledakan dilakukan untuk mengetahui sejauh mana dampak yang dapat timbul jika terjadi peristiwa kebocoran tangki penyimpanan propana dan butana agar kejadian serupa tidak terulang kembali.

Simulasi Kebakaran dan Ledakan LPG pada Tangki Penyimpanan Horizontal

Dimensi tangki horizontal tempat penyimpanan propana dan butana yang digunakan untuk simulasi sama dengan tangki penyimpanan propana yang terbakar dan meledak di Iowa, Amerika Serikat, tahun 1998 (U.S. Chemical Safety Hazard and Investigation Board, 1998). Dimensi tangki tersebut adalah sebagai berikut.

- Panjang tangki : 14 meter
- Diameter tangki : 2 meter
- Volume tangki : 43.982 m³
- Temperatur dalam tangki : 32°C
- Tekanan dalam tangki : 20 atm



Gambar 12.3 Tangki Propana Milik Herrig Brothers yang Terbakar dan Meledak di Iowa, Amerika Serikat, Tahun 1998

(Sumber: U.S. Chemical Safety Hazard and Investigation Board, 1998)

Sementara itu, karakteristik propana dan butana yang disimpan di dalam tangki horizontal adalah sebagai berikut.

Tabel 12.1 Karakteristik Propana dan Butana

NO.	KARAKTERISTIK	PROPANA	BUTANA
1.	Bentuk	<i>Liquefied gas</i>	<i>Liquefied gas</i>
2.	<i>Chemical BREEZE ID</i>	BRZ108	BRZ018
3.	CAS Number	74-98-6	106-97-8
4.	Berat molekul	44,097 g/g-mol	58,124 g/g-mol
5.	Titik didih	231,078 K	272,65 K
6.	Temperatur kritis	369,8 K	425,156 K
7.	Tekanan kritis	41,94 atm	37,493 atm
8.	Volume kritis	203 cm ³ /g-mol	254.707 cm ³ /g-mol
9.	<i>Liquefied heat capacity</i>	500,5 J/kg-K	2.420 J/kg-K
10.	<i>Heat of vaporization</i>	245.740 J/kg	390.000 J/kg
11.	<i>Flammability</i>	Ya	Ya
12.	LEL	2,1%	1,9%
13.	UEL	9,5%	8,5%

1. Simulasi Skenario Propana

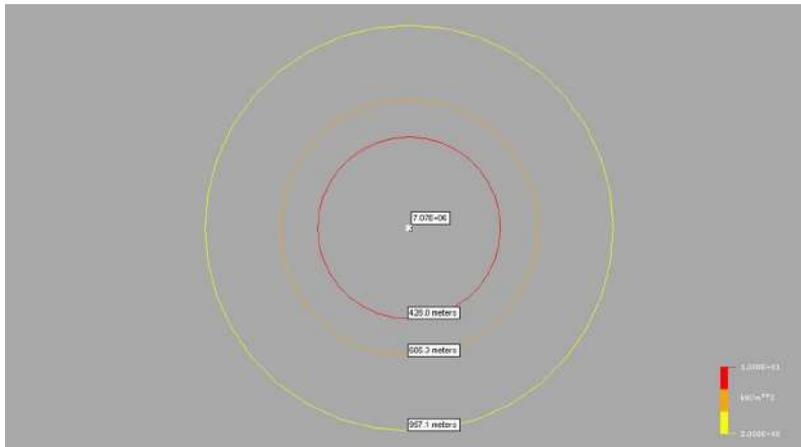
Sebuah kejadian kebocoran tangki penyimpanan propana disimulasikan terjadi pada tanggal 12 Januari 2012 pukul 11.34. Tangki penyimpanan tersebut menampung 50% (21.991 m³) propana dari kapasitas penuhnya, yaitu sebesar 43.982 m³. Titik kebocoran berada pada bagian bawah tangki. Lubang kebocoran berdiameter ±2 mm. Kejadian kebocoran tersebut kemudian berdampak pada kejadian kebakaran dan ledakan. Berikut data meteorologi pada saat kejadian.

- Koordinat lokasi : *Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 48*
- Temperatur : 25,03°C
- Tekanan : 760 mmHg
- Kelembapan relatif : 50%
- Arah angin : 270°
- Kecepatan angin : 1,5 m/s
- Kelas stabilitas : D (A = sangat tidak stabil; F = sangat stabil)

Skenario kejadian kebakaran ini kemudian disimulasikan menggunakan *BREEZE Incident Analyst* dan *BREEZE 3D Analyst*. Hasilnya adalah sebagai berikut.

a. Kebakaran (*Fire*)

Jenis kebakaran yang terjadi adalah BLEVE dengan masukan data massa bahan yang terbakar seberat 12.798,762 kg.

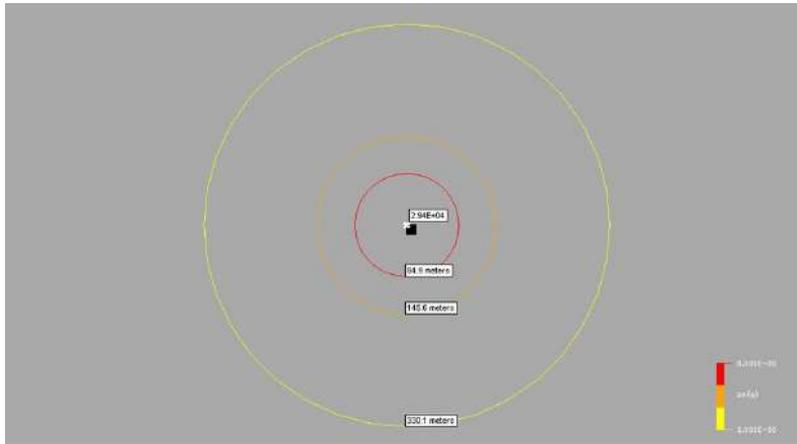


Gambar 12.4 Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki Propana Horizontal dalam Bentuk Peta

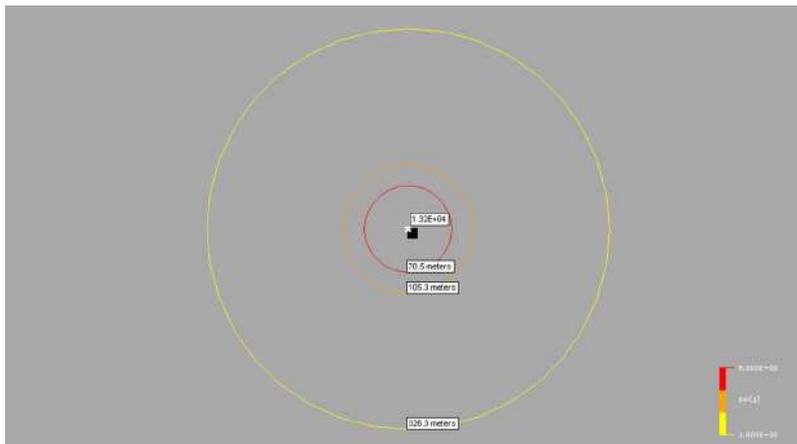
Kebocoran gas memicu terjadinya BLEVE. Propana cair yang bocor menguap, ditambah dengan panas lingkungan menambah tekanan yang ada di dalam tangki. Tekanan tersebut terus bertambah hingga pada saat tidak mampu lagi menahan tekanan, tangki akan pecah dan meledak. Dengan massa bahan yang terbakar seberat 12.798,762 kg, tingkat radiasi akibat BLEVE cukup luas. Batas *level of concern* (LoC) tingkat tinggi (10 kW/m^2) hingga pada jarak 428 m, *level of concern* tingkat menengah (5 kW/m^2) hingga jarak 605,3 m, dan baru mencapai tingkat aman (2 kW/m^2) pada radius 957,1 meter.

b. Ledakan

Jenis ledakan yang direkomendasikan berdasarkan BREEZE *Incident Analyst* berupa *single vapor cloud* (TNT *equivalency method*) U.S. Army TNT *Equivalency* dengan masukan data berupa massa bahan yang terbakar seberat 12.798,762 kg, % *yield of* TNT 5%, dan ketinggian ledakan 100 cm. Dari data tersebut diperoleh hasil *surface explosion overpressure* serta *free air explosion overpressure* sebagai berikut.



Gambar 12.5 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Propana Horizontal dalam Bentuk Peta (*Surface Explosion Overpressure*)



Gambar 12.6 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Propana Horizontal dalam Bentuk Peta (*Free Air Explosion Overpressure*)

Kejadian bocornya tangki penyimpanan propana juga memicu terjadinya ledakan. Ledakan disimulasikan menggunakan *TNT equivalency method* untuk mengestimasi area ledakan, baik di permukaan maupun ke udara bebas (Bjerketvedt, Bakke & Wingerden, 1997). Dengan massa bahan yang terbakar seberat 12.798,762 kg, ketinggian ledakan 100 cm, dan % *yield of TNT* sebesar 5% (normal 3 – 5%) (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997), diketahui bahwa area ledakan di permukaan *zona high level of concern* (8 psig) hingga radius 84,9 meter, *zona mid level of concern* (5 psig) hingga radius 145,6 meter, sedangkan *zona low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 330,1 meter. Sementara itu, estimasi area ledakan ke udara bebas *zona high level of concern* (8 psig) hingga radius 70,5 meter, *zona mid*

level of concern (5 psig) hingga radius 105,3 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 326,3 meter.

2. Simulasi Skenario Butana

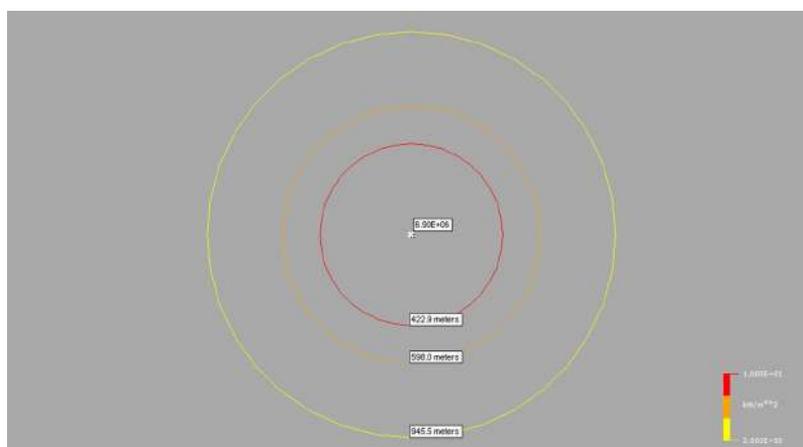
Sebuah kejadian kebocoran tangki penyimpanan butana disimulasikan terjadi pada tanggal 12 Januari 2012, pukul 09.30. Tangki penyimpanan tersebut menampung 50% (21.991 m³) dari kapasitas penuhnya sebesar 43.982 m³. Titik kebocoran berada pada bagian bawah tangki. Lubang kebocoran berdiameter ±2 mm. Kejadian kebocoran tersebut kemudian berdampak pada kejadian *toxic dispersion*, kebakaran, dan ledakan. Berikut data meteorologi pada saat kejadian.

- Koordinat lokasi : *Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 48*
- Temperatur : 25,03°C
- Tekanan : 760 mmHg
- Kelembapan relatif : 50%
- Arah angin : 270°
- Kecepatan angin : 1,5 m/s
- Kelas stabilitas : D (A = sangat tidak stabil; F = sangat stabil)

Skenario kejadian kebakaran ini kemudian disimulasikan menggunakan *BREEZE Incident Analyst* dan *BREEZE 3D Analyst*. Hasilnya adalah sebagai berikut.

a. Kebakaran

Jenis kebakaran yang terjadi adalah BLEVE dengan masukan data berupa massa bahan yang terbakar seberat 12.589,835 kg.



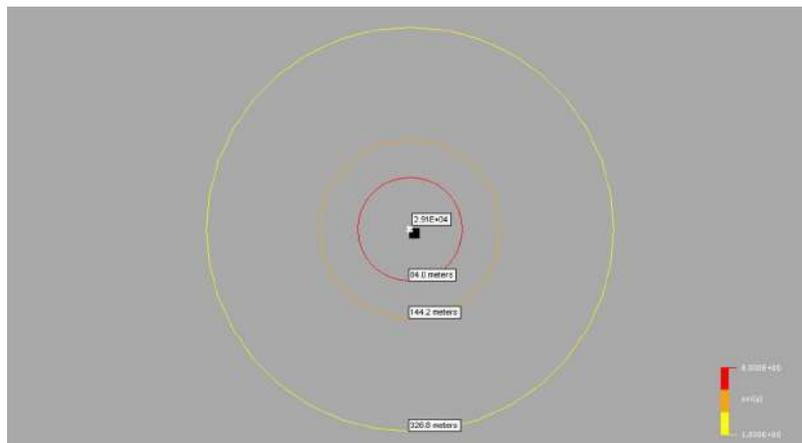
Gambar 12.7 Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki Butana Horizontal dalam Bentuk Peta

Kebocoran gas memicu terjadinya BLEVE. Propana cair yang bocor akan menguap, ditambah dengan panas lingkungan menambah tekanan yang ada di dalam tangki. Tekanan tersebut terus bertambah hingga pada saat tidak mampu lagi menahan tekanan, tangki akan pecah dan meledak. Dengan massa bahan yang terbakar seberat 12.589,835 kg, tingkat radiasi akibat BLEVE cukup luas. Batas *level of concern* (LoC) tingkat tinggi (10 kW/m²) hingga pada jarak 422,9 m, *level of concern* tingkat menengah (5 kW/m²) hingga jarak 598 m, dan baru mencapai tingkat aman (2 kW/m²) pada radius 945,5 meter.

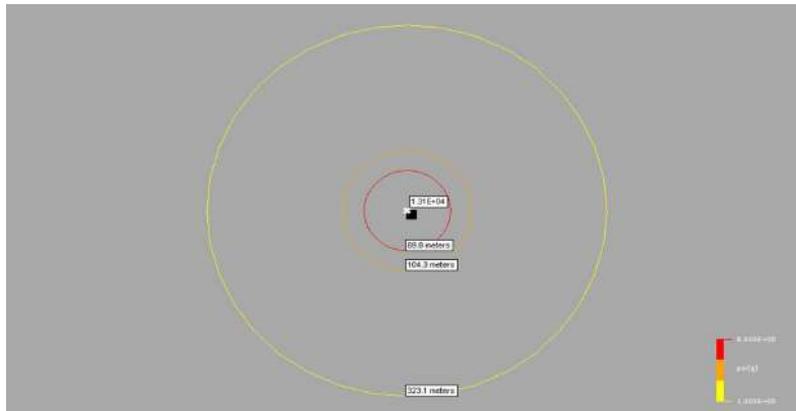
b. Ledakan

Jenis ledakan yang direkomendasikan berupa *single vapor cloud* (TNT *equivalency method*) U.S. Army TNT *Equivalency* dengan masukan data berupa massa bahan yang terbakar seberat 12.589,835 kg, % *yield of TNT* sebesar 5%, dan ketinggian ledakan 100 cm.

Dari data tersebut diperoleh hasil *surface explosion overpressure* serta *free air explosion overpressure* sebagai berikut.



Gambar 12.8 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Butana Horizontal dalam Bentuk Peta (*Surface Explosion Overpressure*)



Gambar 12.9 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Butana Horizontal dalam Bentuk Peta (*Free Air Explosion Overpressure*)

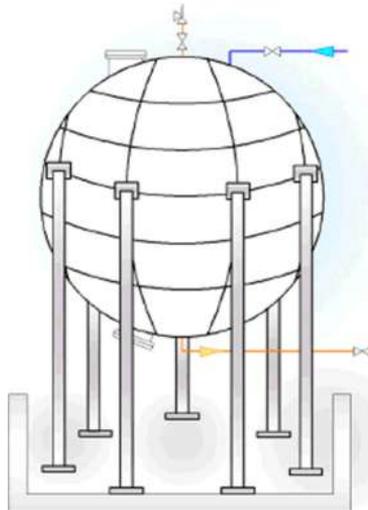
Kejadian bocornya tangki penyimpanan propana juga memicu terjadinya ledakan. Ledakan disimulasikan menggunakan TNT *equivalency method* untuk mengestimasi area ledakan, baik di permukaan maupun ke udara bebas (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997). Dengan massa bahan yang terbakar sebesar 12.589,835 kg, ketinggian ledakan 100 cm, dan % *yield of TNT* sebesar 5% (normal 3 – 5%) (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997), diketahui bahwa area ledakan di permukaan zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 84 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 144,2 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 326,8 meter. Sementara itu, estimasi area ledakan ke udara bebas zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 69,8 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 104,3 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 323,1 meter.

Simulasi Kebakaran dan Ledakan LPG pada Tangki Penyimpanan Sferikal

Dimensi tangki sferikal (*spherical*) yang digunakan untuk menyimpan propana dan butana adalah sebagai berikut.

- Diameter tangki : 2.121,6 cm
- Volume tangki : 5.000,22 m³
- Temperatur dalam tangki : 35°C
- Tekanan dalam tangki : 20 atm

Adapun karakteristik propana dan butana yang disimpan dalam tangki sferikal tersebut mengacu pada Tabel 12.10.



Gambar 12.10 Tangki Sferikal

(Sumber: Wermac, 2011)

1. Simulasi Skenario Propana

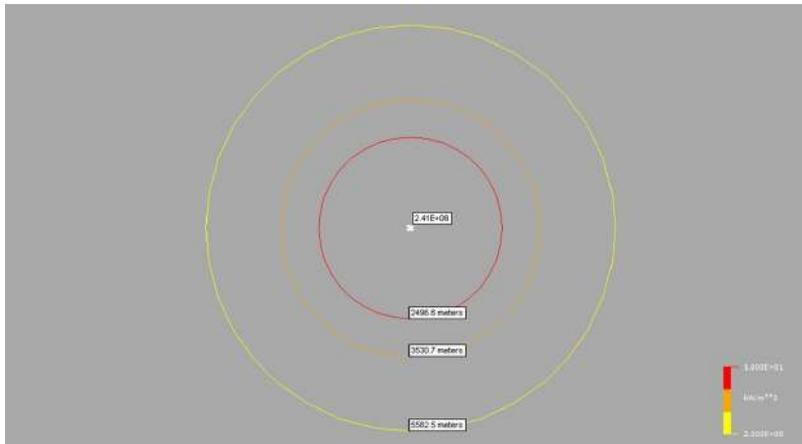
Sebuah kejadian kebocoran tangki penyimpanan propana disimulasikan terjadi tanggal 12 Januari 2012 pukul 10:30. Tangki penyimpanan tersebut menampung 85% (4.250,187 m³) dari kapasitas penuhnya, yaitu sebesar 5.000,22 m³. Titik kebocoran berada pada bagian bawah tangki. Lubang kebocoran berdiameter ± 2 mm. Kejadian kebocoran tersebut kemudian berdampak pada kejadian *toxic dispersion*, kebakaran, dan ledakan. Berikut data meteorologi pada saat kejadian.

- Koordinat lokasi : *Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 48*
- Temperatur : 25,03°C
- Tekanan : 760 mmHg
- Kelembapan relatif : 50%
- Arah angin : 270°
- Kecepatan angin : 1,5 m/s
- Kelas stabilitas : D (A = sangat tidak stabil; F = sangat stabil)

Skenario kejadian kebakaran ini kemudian disimulasikan menggunakan *BREEZE Incident Analyst* dan *BREEZE 3D Analyst*. Hasilnya adalah sebagai berikut.

a. Kebakaran

Jenis kebakaran yang terjadi adalah BLEVE dengan masukan data berupa massa bahan yang terbakar seberat 2.473.608,907 kg.



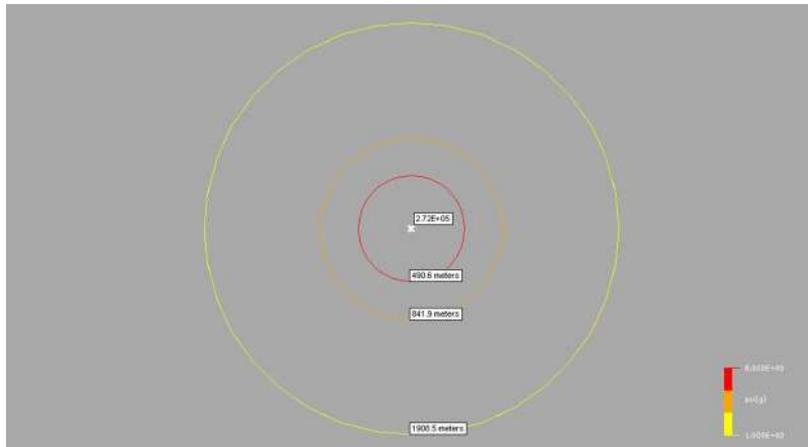
Gambar 12.11 Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki Propana *Spherical* dalam Bentuk Peta

Kebocoran gas memicu terjadinya BLEVE. Propana cair yang bocor akan menguap, ditambah dengan panas lingkungan menambah tekanan yang ada di dalam tangki. Tekanan tersebut terus bertambah hingga pada saat tidak mampu lagi menahan tekanan, tangki akan pecah dan meledak. Dengan massa bahan yang terbakar sebesar 2.473.608,907 kg, tingkat radiasi akibat BLEVE cukup luas. Batas *level of concern* (LoC) tingkat tinggi (10 kW/m²) hingga pada jarak 2.496,6 m, *level of concern* tingkat menengah (5 kW/m²) hingga jarak 3.530,7 m, dan baru mencapai tingkat aman (2 kW/m²) pada radius 5.582,5 meter.

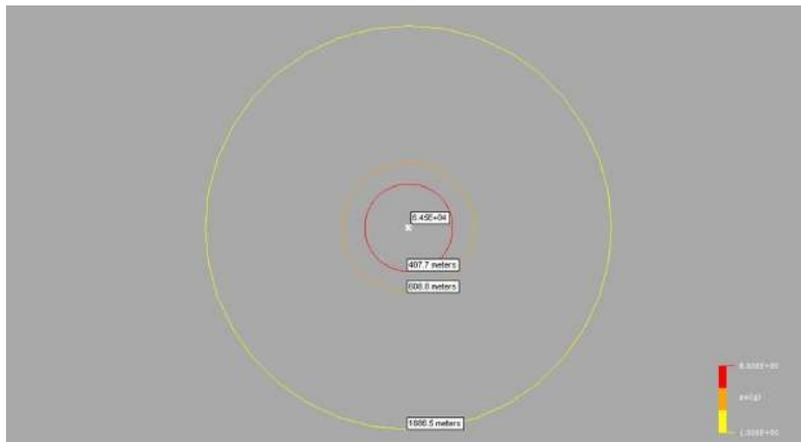
b. Ledakan

Jenis ledakan yang direkomendasikan berupa *single vapor cloud* (TNT *equivalency method*) U.S. Army TNT *Equivalency* dengan masukan data berupa massa bahan yang terbakar sebesar 2.473.608,907 kg, % *yield of TNT* 5%, dan ketinggian ledakan 100 cm. Dari masukan data diperoleh hasil *surface explosion overpressure* serta *free air explosion overpressure* seperti pada gambar 12.12 dan gambar 12.13.

Kejadian bocornya tangki penyimpanan propana juga memicu terjadinya ledakan. Ledakan disimulasikan menggunakan TNT *Equivalency method* untuk mengestimasi area ledakan, baik di permukaan maupun ke udara bebas (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997). Dengan massa yang terbakar sebesar 12.589,835 kg, ketinggian ledakan 100 cm, dan % *yield of TNT* sebesar 5% (normal 3–5%) (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997),



Gambar 12.12 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Propana Sferikal dalam Bentuk Peta (*Surface Explosion Overpressure*)



Gambar 12.13 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Propana Sferikal dalam Bentuk Peta (*Free Air Explosion Overpressure*)

diketahui bahwa area ledakan di permukaan zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 490,6 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 841,9 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 1.908,5 meter. Sementara itu, estimasi area ledakan ke udara bebas zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 407,7 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 608,8 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 1.866,5 meter.

2. Simulasi Skenario Butana

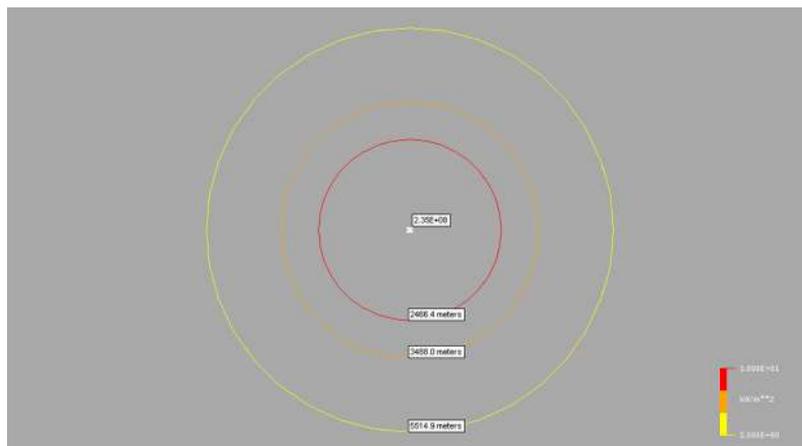
Sebuah kejadian kebocoran tangki penyimpanan butana disimulasikan terjadi pada tanggal 12 Januari 2012, pukul 10.58. Tangki penyimpanan tersebut menampung 85% (4.250,187 m³) dari kapasitas penuhnya sebesar 5.000,22 m³. Titik kebocoran berada pada bagian bawah tangki. Lubang kebocoran berdiameter ± 2 mm. Kejadian kebocoran tersebut kemudian berdampak pada kejadian *toxic dispersion*, kebakaran, dan ledakan. Berikut data meteorologi pada saat kejadian.

- Koordinat lokasi : *Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 48*
- Temperatur : 25,03°C
- Tekanan : 760 mmHg
- Kelembapan relatif : 50%
- Arah angin : 270°
- Kecepatan angin : 1,5 m/s
- Kelas stabilitas : D (A = sangat tidak stabil; F = sangat stabil)

Skenario kejadian kebakaran ini kemudian disimulasikan menggunakan *BREEZE Incident Analyst* dan *BREEZE 3D Analyst*. Hasilnya adalah sebagai berikut.

a. Kebakaran

Jenis kebakaran yang terjadi adalah BLEVE dengan masukan data berupa massa yang terbakar seberat 2.433.229,721 kg. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk peta sebagai berikut.

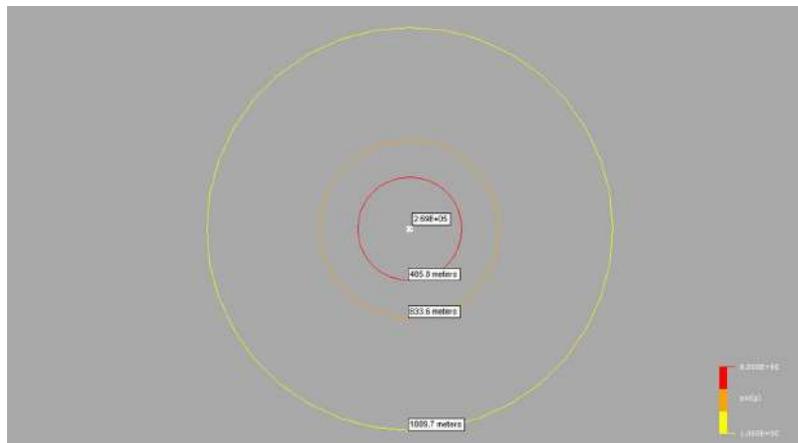


Gambar 12.14 Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki Butana Sferikal dalam Bentuk Peta

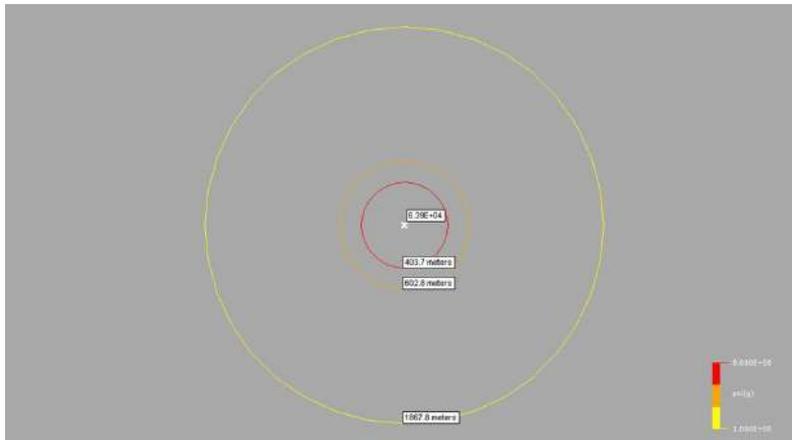
Kebocoran gas memicu terjadinya BLEVE. Butana cair yang bocor akan menguap, ditambah dengan panas lingkungan menambah tekanan yang ada di dalam tangki. Tekanan tersebut terus bertambah hingga pada saat tidak mampu lagi menahan tekanan, tangki akan pecah dan meledak. Dengan massa yang terbakar seberat 2.433.229,721 kg, tingkat radiasi akibat BLEVE cukup luas. Batas *level of concern* (LoC) tingkat tinggi (10 kW/m^2) hingga pada jarak 2.486,4 meter, *level of concern* tingkat menengah (5 kW/m^2) hingga pada jarak 3.480 meter, dan baru mencapai tingkat aman (2 kW/m^2) pada radius 5.514,9 meter.

b. Ledakan

Jenis ledakan yang direkomendasikan berupa *single vapor cloud* (TNT *equivalency method*) U.S. Army TNT *Equivalency* dengan masukan data berupa massa yang terbakar seberat 2.433.229,721 kg, % *yield of TNT* 5%, dan ketinggian ledakan 100 cm. Dari data tersebut diperoleh hasil *surface explosion overpressure* serta *free air explosion overpressure* sebagai berikut.



Gambar 12.15 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Butana Sferikal dalam Bentuk Peta (*Surface Explosion Overpressure*)



Gambar 12.16 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan Butana Sferikal dalam Bentuk Peta (*Free Air Explosion Overpressure*)

Kejadian bocornya tangki penyimpanan propana juga memicu terjadinya ledakan. Ledakan disimulasikan menggunakan TNT *equivalency method* untuk mengestimasi area ledakan, baik di permukaan maupun ke udara bebas (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997). Dengan massa yang terbakar seberat 2.433.229,721 kg, ketinggian ledakan 100 cm, dan % *yield of TNT* sebesar 5% (normal 3–5%) (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997), diketahui bahwa area ledakan di permukaan zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 485,8 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 833,6 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 1.889,7 meter. Sementara itu, estimasi area ledakan ke udara bebas zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 403,7 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 602,8 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 1.867,8 meter.

Hasil simulasi yang berupa radius bahaya dan radius aman dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam menempatkan tangki-tangki penyimpanan bahan kimia (dalam hal ini propana dan butana). Selain itu, hasil simulasi dapat juga dipergunakan dalam pembuatan rencana tanggap darurat (terkait dengan rencana evakuasi) baik pekerja maupun masyarakat di lingkungan sekitar. Deteksi dini kebocoran juga penting dimasukkan dalam rencana tanggap darurat untuk meminimalkan dampak negatif yang timbul akibat kejadian kebocoran. Sementara itu, pemeliharaan berkala tangki penyimpanan material beracun dan berbahaya harus dilakukan dengan baik untuk mencegah terjadinya kebocoran tangki.

Pengendalian dan tanggap darurat sangat penting dilakukan mengingat jika terpajan gas propana dengan konsentrasi tinggi, dapat terjadi kerusakan susunan saraf pusat, sedangkan jika terpajan propana dalam bentuk cairan dapat menyebabkan luka bakar (NIOSH, 2008).

Simulasi Kebakaran dan Ledakan LPG pada Tabung LPG 3 Kg

Dimensi tabung LPG ukuran 3 kg yang banyak beredar di pasaran adalah sebagai berikut.

- diameter : 260 mm
- tinggi tabung : 190 mm
- volume : 7,3 liter
- tekanan : 18,6 atm
- temperatur dalam tabung : 25°C

Sedangkan karakteristik propana dan butana yang disimpan dalam tangki sferikal tersebut mengacu pada Tabel 12.1.

1. Simulasi Skenario Propana

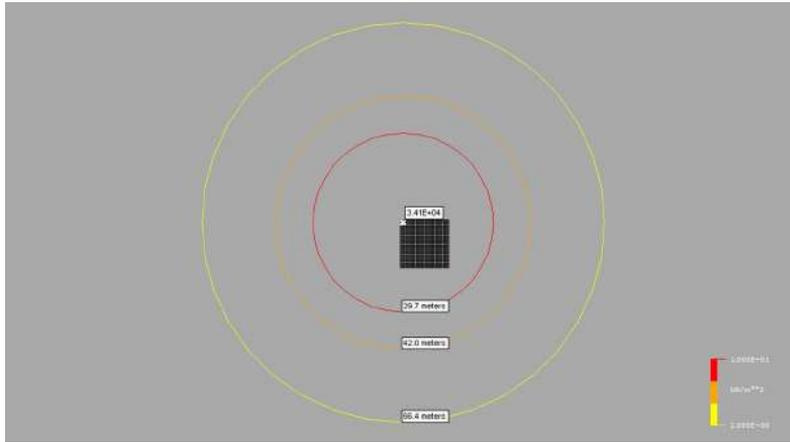
Sebuah kejadian kebocoran tabung LPG 3 kg disimulasikan terjadi pada tanggal 24 Januari 2012, pukul 13.27.17. Tabung tersebut menyimpan 85% (0,008 m³) dari kapasitas penuhnya sebesar 0,009 m³. Titik kebocoran berada pada bagian bawah tabung. Lubang kebocoran berdiameter 1 mm. Kejadian kebocoran tersebut kemudian berdampak pada kejadian *toxic dispersion*, kebakaran, dan ledakan. Berikut data meteorologi pada saat kejadian.

- Koordinat lokasi : *Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 48*
- Temperatur : 25,03°C
- Tekanan : 760 mmHg
- Kelembapan relatif : 50%
- Arah angin : 270°
- Kecepatan angin : 1,5 m/s
- Kelas stabilitas : D (A = sangat tidak stabil; F = sangat stabil)

Skenario kejadian kebakaran ini kemudian disimulasikan menggunakan BREEZE *Incident Analyst* dan BREEZE *3D Analyst*. Hasilnya adalah sebagai berikut.

a. Kebakaran

Jenis kebakaran yang terjadi adalah BLEVE dengan masukan data berupa massa yang terbakar seberat 4,452 kg.



Gambar 12.17 Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki LPG Propana 3 Kg dalam Bentuk Map

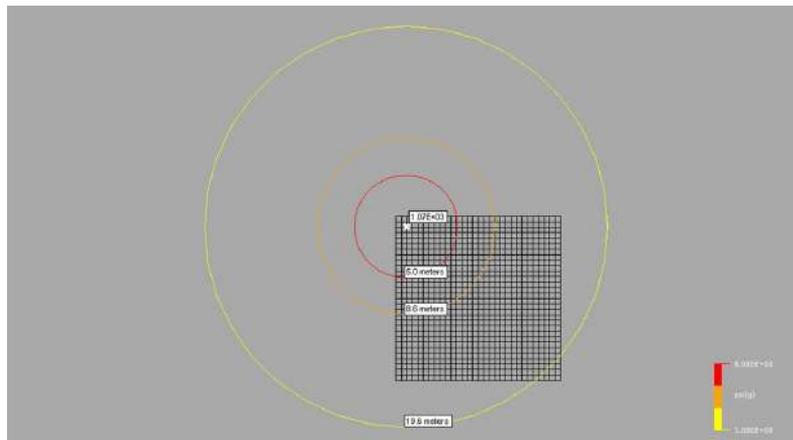
Kebocoran gas memicu terjadinya BLEVE. Propana cair yang bocor akan menguap, ditambah dengan panas lingkungan menambah tekanan yang ada di dalam tangki. Tekanan tersebut terus bertambah hingga pada saat tidak mampu lagi menahan tekanan, tangki akan pecah dan meledak. Dengan massa yang terbakar seberat 4,452 kg, tingkat radiasi akibat BLEVE cukup luas. Batas *level of concern* (LoC) tingkat tinggi (10 kW/m^2) hingga pada jarak 29,7 m, *level of concern* tingkat menengah (5 kW/m^2) hingga jarak 42 m, dan baru mencapai tingkat aman (2 kW/m^2) pada radius 66,4 meter.

b. Ledakan

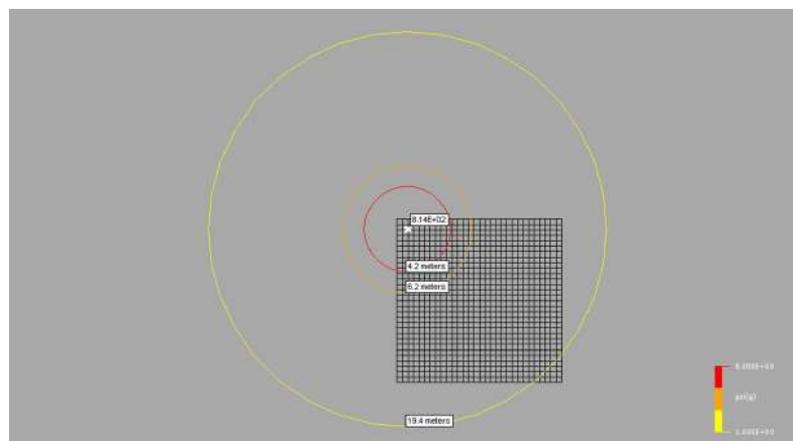
Jenis ledakan yang direkomendasikan berupa *single vapor cloud* (TNT *equivalency method*) U.S. Army TNT *Equivalency* dengan masukan data berupa massa yang terbakar seberat 4,452 kg, % *yield of* TNT 3%, dan ketinggian ledakan 10 cm. Dari masukan data diperoleh hasil *surface explosion overpressure* serta *free air explosion overpressure* seperti pada gambar 12.18 dan gambar 12.19.

Kejadian bocornya tangki penyimpanan propana juga memicu terjadinya ledakan. Ledakan disimulasikan menggunakan TNT *equivalency method* untuk mengestimasi area ledakan, baik di permukaan maupun ke udara bebas (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997). Dengan massa bahan yang terbakar seberat 4,452 kg, ketinggian ledakan 10 cm, dan % *yield of*

TNT sebesar 5% (normal 3–5%) (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997), diketahui bahwa area ledakan di permukaan zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 5 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 8,6 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 19,4 meter. Sementara itu, estimasi area ledakan ke udara bebas zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 4,1 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 6,2 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 19,2 meter.



Gambar 12.18 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan LPG Propana 3 Kg dalam Bentuk Peta (*Surface Explosion Overpressure*)



Gambar 12.19 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan LPG Propana 3 Kg dalam Bentuk Peta (*Free Air Explosion Overpressure*)

2. Simulasi Skenario Butana

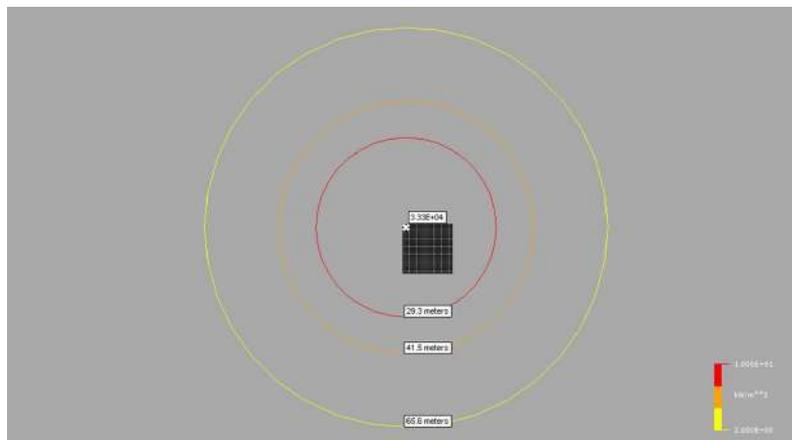
Sebuah kejadian kebocoran tabung LPG butana ukuran 3 kg disimulasikan terjadi pada tanggal 24 Januari 2012, pukul 14.48.12. Tabung tersebut menampung 85% (0,008 m³) dari kapasitas penuhnya sebesar 0,009 m³. Titik kebocoran berada pada bagian bawah tangki. Lubang kebocoran berdiameter 1 mm. Kejadian kebocoran tersebut kemudian berdampak pada kejadian *toxic dispersion*, kebakaran, dan ledakan. Berikut data meteorologi pada saat kejadian.

- Koordinat lokasi : *Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 48*
- Temperatur : 25,03 °C
- Tekanan : 760 mmHg
- Kelembapan relatif : 50%
- Arah angin : 270°
- Kecepatan angin : 1,5 m/s
- Kelas stabilitas : D (A = sangat tidak stabil; F = sangat stabil)

Skenario kejadian kebakaran ini kemudian disimulasikan menggunakan *BREEZE Incident Analyst* dan *BREEZE 3D Analyst*. Hasilnya adalah sebagai berikut.

a. Kebakaran

Jenis kebakaran yang terjadi adalah BLEVE dengan masukan data berupa massa yang terbakar seberat 4,38 kg. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk peta sebagai berikut.

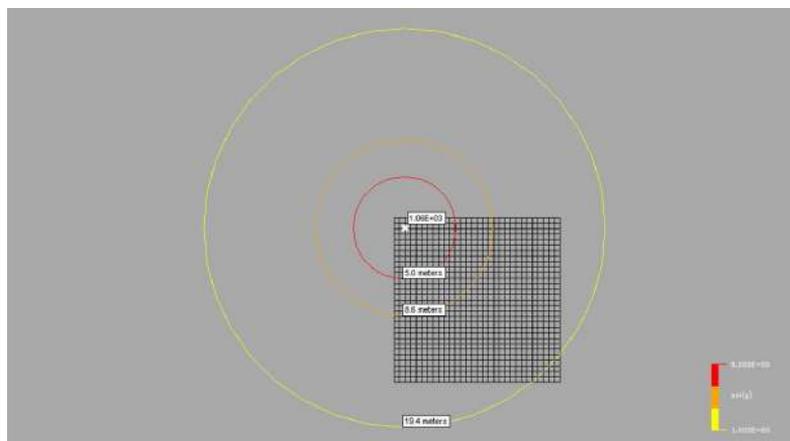


Gambar 12.20 Hasil Simulasi Dampak Kebakaran (Tingkat Radiasi) Tangki LPG Butana 3 Kg dalam Bentuk Peta

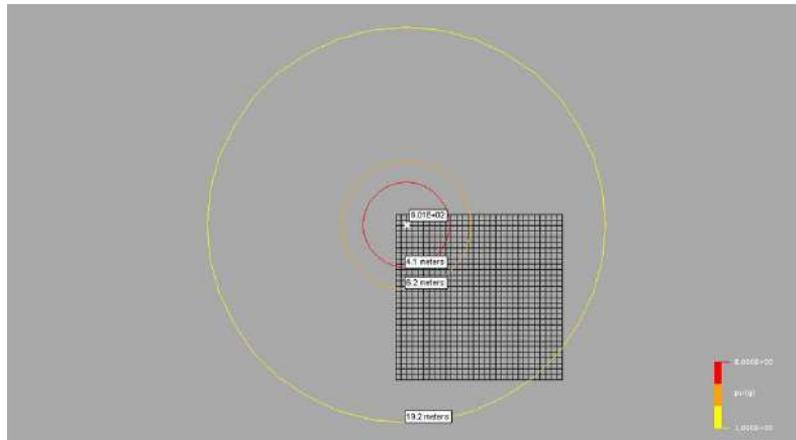
Kebocoran gas memicu terjadinya BLEVE. Butana cair yang bocor akan menguap, ditambah dengan panas lingkungan menambah tekanan yang ada di dalam tangki. Tekanan tersebut terus bertambah hingga pada saat tidak mampu lagi menahan tekanan, tangki akan pecah dan meledak. Dengan massa bahan yang terbakar seberat 4,38 kg, tingkat radiasi akibat BLEVE cukup luas. Batas *level of concern* (LoC) tingkat tinggi (10 kW/m^2) hingga pada jarak 29,3 meter, *level of concern* tingkat menengah (5 kW/m^2) hingga jarak 41,5 meter, dan baru mencapai tingkat aman (2 kW/m^2) pada radius 65,6 meter.

b. Ledakan

Jenis ledakan yang direkomendasikan berupa *single vapor cloud* (TNT *equivalency method*) U.S. Army TNT *Equivalency* dengan masukan data berupa massa yang terbakar seberat 4,38 kg, % *yield of TNT* 3%, dan ketinggian ledakan 10 cm. Dari data tersebut diperoleh hasil *surface explosion overpressure* serta *free air explosion overpressure* sebagai berikut.



Gambar 12.21 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan LPG Butana 3 Kg dalam Bentuk Peta (*Surface Explosion Overpressure*)



Gambar 12.22 Hasil Simulasi Dampak Ledakan Tangki Penyimpanan LPG Butana 3 Kg dalam Bentuk Peta (*Free Air Explosion Overpressure*)

Kejadian bocornya tangki penyimpanan propana juga memicu terjadinya ledakan. Ledakan disimulasikan menggunakan TNT *equivalency method* untuk mengestimasi area ledakan, baik di permukaan maupun ke udara bebas (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997). Dengan massa yang terbakar seberat 4,38 kg, tinggi ledakan 10 cm, dan % *yield of* TNT sebesar 3% (normal 3–5%) (Bjerketvedt, Bakke and Wingerden, 1997), diketahui bahwa area ledakan di permukaan zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 5 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 8,6 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 19,4 meter. Sementara itu, estimasi area ledakan ke udara bebas zona *high level of concern* (8 psig) hingga radius 4,1 meter, zona *mid level of concern* (5 psig) hingga radius 6,2 meter, sedangkan zona *low level of concern* (1 psig) berada pada jarak minimal 19,2 meter.

Hasil dari simulasi tersebut dapat dipergunakan baik oleh pihak penyalur maupun pengguna LPG agar lebih memperhatikan aspek keselamatan dalam hal penyimpanan dan penanganan tabung LPG 3 kg. Jika aspek keselamatan telah diperhatikan dengan baik, diharapkan kejadian kebocoran tabung LPG yang dapat bermuara pada peristiwa kebakaran dan ledakan dapat dicegah. Aspek keselamatan penyalur LPG ini dapat dilihat dari beberapa aspek, mulai dari penanganan tabung, prosedur keselamatan dan kompetensi petugas, fasilitas dan rambu keselamatan, serta sistem proteksi kebakaran.



BAB 13

STUDI KASUS KEBAKARAN DI TAMBANG BAWAH TANAH

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Warid Nurdiansyah, S.K.M., M.O.H.S.Sc.
Rinaldi Yudha P., S.T.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini dibahas statistik kecelakaan pada tambang bawah tanah, kasus kejadian kebakaran pada tambang bawah tanah, dan penanggulangan kejadian kebakaran pada tambang bawah tanah

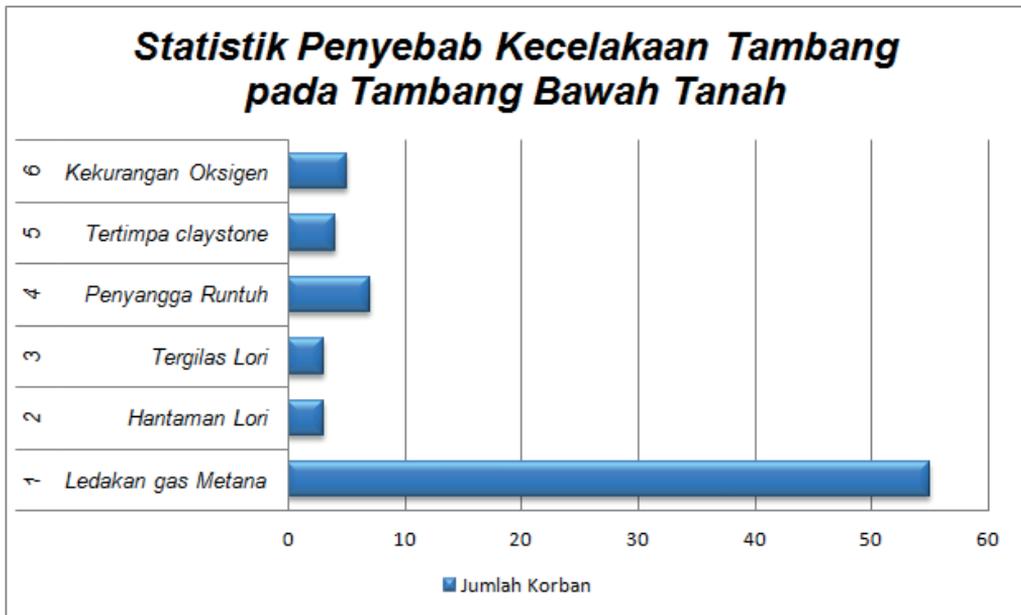
PENDAHULUAN

Dalam kegiatan operasional penambangan bawah tanah banyak variabel dalam mendukung keselamatan kerja sehingga target produksi dapat tercapai tanpa mengesampingkan aspek keselamatan. Pada kegiatan penambangan, khususnya tambang bawah tanah, sering terjadi kecelakaan. Dalam rentang waktu lima tahun (2009–2014) telah terjadi banyak kecelakaan, baik yang dikategorikan cedera ringan, berat, maupun fatal.

STATISTIK KEBAKARAN PADA TAMBANG BAWAH TANAH

Pada data dari Kementerian ESDM Direktorat Teknik dan Lingkungan Subdirektorat Keselamatan Pertambangan tercatat pada tahun 2009 pernah terjadi kasus kecelakaan tambang pada salah satu Izin Usaha Penambangan (IUP) tambang bawah tanah yang berada pada Kota Sawahlunto dengan korban sebanyak 44 orang (32 meninggal, 9 luka ringan, dan 3 luka berat). Adapun tercatat dalam data lima tahunan (2009–2014) sejumlah 78 korban kecelakaan tambang pada tambang bawah tanah di Izin Usaha Penambangan Batu Bara Kota Sawahlunto.

Ledakan akibat gas metana (CH_4) merupakan faktor penyebab kecelakaan tertinggi dengan 56 orang korban yang terjadi pada lokasi penambangan. Data penyebab kecelakaan tambang di Sawahlunto disajikan pada Gambar 13.1.



Gambar 13.1 Penyebab Kecelakaan Tambang pada Tambang Bawah Tanah

(Sumber: Statistik Kecelakaan Tambang Kementerian ESDM, Subdirektorat Keselamatan Pertambangan Tahun 2009–2014)

Tujuan bahasan pada bab ini adalah memberikan gambaran kasus kejadian berbahaya hingga kecelakaan tambang yang diakibatkan oleh ledakan gas metana dan bagaimana seharusnya penanganan terbaik dari kejadian tersebut yang hampir setiap tahun terjadi pada tambang bawah tanah.

KEJADIAN BERBAHAYA DAN KECELAKAAN TAMBANG PADA TAMBANG BAWAH TANAH

Kejadian berbahaya pada operasional tambang, baik tambang permukaan ataupun pada tambang bawah tanah diatur dalam Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik dan Keputusan Direktur Jenderal Mineral dan Batubara Nomor 185.K/30/DJB/2019 tentang Petunjuk Teknis Dalam Pelaksanaan Keselamatan Pertambangan serta Pelaksanaan, Penilaian, dan Pelaporan Sistem Manajemen Keselamatan Pertambangan Mineral dan Batubara. Peraturan terkait menjelaskan bahwa kejadian berbahaya adalah kejadian yang dapat membahayakan jiwa atau terhalangnya produksi dan apabila dikaitkan pada tambang bawah tanah salah satunya adalah kejadian kebakaran.

Sementara itu, sesuai peraturan terkait sebelumnya, suatu kejadian dapat digolongkan sebagai kecelakaan tambang apabila memenuhi kelima unsur, yaitu

- a. benar-benar terjadi, yaitu tidak diinginkan, tidak direncanakan dan tanpa unsur kesengajaan;
- b. mengakibatkan cedera pekerja tambang atau orang yang diberi izin oleh Kepala Teknik Tambang (KTT) atau Penanggungjawab Teknik dan Lingkungan;
- c. akibat kegiatan usaha pertambangan atau pengolahan dan/atau pemurnian atau akibat kegiatan penunjang lainnya
- d. terjadi pada jam kerja pekerja tambang yang dapat mendapat cedera atau setiap saat orang yang diberi izin; dan
- e. terjadi di dalam wilayah kegiatan usaha pertambangan atau wilayah proyek.

Kecelakaan tambang selanjutnya akan dikategorikan sesuai dengan tingkat keparahan yang menimpa korban, yaitu meliputi kecelakaan tambang berakibat ringan, berat, hingga kematian.

Dari beberapa kejadian yang melibatkan tambang bawah tanah, kecelakaan tambang dengan jumlah korban terbesar pada tahun 2009–2014 adalah yang terjadi pada salah satu Izin Usaha Penambangan (IUP) di Kota Sawahlunto dengan jumlah korban sebanyak 44 orang (2009) dan 5 orang (2014). Investigasi yang dilakukan oleh Inspektur Tambang terkait kejadian tahun 2009 dan 2014 pada Izin Usaha Penambangan (IUP) di Kota Sawahlunto, didapatkan kronologis singkat dan kesimpulan dari dua kejadian tersebut sebagai berikut.

Kejadian Tahun 2009



Gambar 13.2 Lokasi Kejadian Ledakan pada Tambang Bawah Tanah Tahun 2009 di Sawahlunto

(Sumber: <http://sawahloento.blogspot.com.tr>)

Telah terjadi kecelakaan tambang pada tanggal 16 Juni 2009 dengan jumlah korban sebanyak 44 orang pada lubang bawah tanah di salah satu Izin Usaha Penambangan PT X di Kota Sawahlunto dengan metode penambangan Room and Pilar yang terjadi akibat akumulasi gas yang terdapat di dalam tambang bawah tanah dan berefek hingga kedalaman lebih dari 350 meter. Tercatat fakta kandungan nitrogen (N_2) sehari sebelum kejadian adalah di atas 20% dan kandungan metana (CH_4) sebesar 21%, sedangkan metana memiliki *upper explosion limit* (UEL) sebesar 15%.

Kondisi ventilasi lubang tambang yang tidak baik merupakan salah satu penyebab dari akumulasi gas nitrogen dan metana di lokasi tambang tersebut. Selain itu, dari hasil investigasi didapatkan adanya indikasi arus pendek pada peralatan listrik yang digunakan pada lokasi kejadian dan merambat cepat pada berbagai peralatan tidak tahan api yang kemudian bereaksi dengan gas metana (CH_4), sedangkan pada tambang bawah tanah seluruh peralatan baik kabel, sambungan kabel, maupun lampu yang digunakan harus antiapi (*flameproof*).

Fakta lain yang didapatkan adalah peralatan keselamatan yang digunakan sangat minim: hanya berupa *safety helm* dan sepatu bot, tidak dilengkapi peralatan lain yang mendukung keselamatan kerja dan keselamatan operasional di area tersebut.

Kejadian Tahun 2014



Gambar 13.3 Lokasi Kejadian Ledakan pada Tambang Bawah Tanah Tahun 2014 di Sawahlunto

(Sumber <http://nasional.news.viva.co.id>)

Telah terjadi kecelakaan tambang pada tanggal 24 Januari 2014 dengan jumlah korban meninggal sebanyak 5 orang pada lubang bawah tanah di salah satu Izin Usaha Penambangan PT Y di Kota Sawahlunto dengan metode penambangan Room and Pilar. Proses evakuasi korban berlangsung selama tujuh belas hari (24 Januari–9 Februari 2014), yang melibatkan tim evakuasi yang beranggotakan gabungan perusahaan IUP di Sawah Lunto, BPBD Kota Sawahlunto, Badan SAR Nasional Padang, Tagana Kota Sawahlunto, Dinas Perindagkopnaker (bidang pertambangan), serta Dinas Kesehatan dan Sosial Kota Sawah Lunto dan Balai Diklat Tambang Bawah Tanah Sawahlunto). Proses evakuasi hingga 4 Februari 2014 terkendala kondisi penyangga yang lemah. Proses perbaikan penyangga dan jalur evakuasi mengalami halangan karena kandungan gas CH₄ (metana) dan CO (karbon monoksida) tidak stabil. Korban terakhir baru ditemukan pada tanggal 9 Februari 2014 dalam kondisi meninggal.

Berdasarkan hasil investigasi dapat disimpulkan penyebab kejadian tersebut adalah sebagai berikut.

1. Dari hasil pengukuran pada lokasi kejadian didapatkan data bahwa karbon monoksida (CO) sebesar 55 ppm dari standar sebesar 25 ppm dan metana (CH₄) sebesar 5% LEL (*Lower Explosion Limit*) pada tanggal 24 Januari 2014.
2. Lubang masuk utama tambang bawah tanah memiliki kemiringan rata-rata 35°–45°.
3. Dimensi lubang bukaan tambang bawah tanah lebar 2 meter dan tinggi 1,7 meter sehingga sistem ventilasi tidak bekerja optimal untuk sirkulasi gas-gas berbahaya. Gas metana (CH₄) tidak dapat terurai sehingga terakumulasi yang menimbulkan ledakan pada tambang bawah tanah jika ada percikan api.
4. Dari hasil wawancara saksi didapatkan fakta bahwa kejadian runtuh diakibatkan terjadinya percikan api pada saat mekanik listrik sedang melakukan perubahan fungsi *blower* menjadi *exhaust* di front kerja tambang karena meningkatnya suhu pada saat dilakukan penggalian batubara dan *overburden* sehingga saat melakukan pekerjaan tersebut terjadi percikan api yang berhubungan dengan fungsi kelistrikan.

Dari kejadian kecelakaan tambang pada tambang bawah tanah yang terjadi pada tahun 2009 dan 2014 tersebut dapat disimpulkan dari beberapa sumber beberapa hal sebagai berikut.

1. Komitmen perusahaan dalam menerapkan keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dan Keselamatan Operasi (KO) sangat lemah.
2. Ventilasi dari setiap lubang tambang tidak terskema dengan baik sehingga masih terjadi akumulasi gas metana (CH₄) pada suatu tempat.
3. Tidak ada komitmen perusahaan dalam pemenuhan kebutuhan peralatan

untuk mendeteksi gas-gas berbahaya dan diterapkannya penggunaan peralatan kelistrikan yang tahan api (*flameproof*) untuk mendukung operasional penambangan.

Ketiga faktor tersebut hanya merupakan sedikit sampel dari kejadian kecelakaan yang terjadi pada tambang bawah tanah karena masih banyak hal lain, seperti tipe penambangan, komoditas bahan galian, dan hal-hal lain yang relevan dengan kejadian itu. Akan lebih baik jika perusahaan sendiri lebih bertindak preventif dan mencegah daripada memperbaiki setelah ada kejadian

PENTINGNYA KOMITMEN PERUSAHAAN TERHADAP KESELAMATAN PERTAMBANGAN

Hal terpenting dalam mencegah kejadian-kejadian merugikan tersebut adalah komitmen perusahaan terhadap pelaksanaan penerapan peraturan kesehatan dan keselamatan kerja yang diatur dalam Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik dan Keputusan Direktur Jenderal Mineral dan Batubara Nomor 185.K/30/DJB/2019 tentang Petunjuk Teknis Dalam Pelaksanaan Keselamatan Pertambangan serta Pelaksanaan, Penilaian, dan Pelaporan Sistem Manajemen Keselamatan Pertambangan Mineral dan Batubara. Rendahnya kompetensi dan pengetahuan para pekerja pun menjadi tanggung jawab manajemen atau perusahaan untuk ditingkatkan ke arah yang lebih baik sehingga perusahaan dapat menjalankan bisnisnya tanpa mengurangi penerapan kaidah keselamatan.

Komitmen terhadap teknik dan skema penambangan yang sesuai dengan tipe endapannya juga mempunyai porsi tersendiri karena berhubungan dengan bagaimana nantinya ventilasi dari kegiatan tambang bawah tanah tersebut diatur untuk mengurangi kemungkinan gas-gas metana (CH_4) terakumulasi dalam satu tempat. Komitmen terakhir adalah manajemen atau perusahaan juga wajib mendukung kegiatan operasional dengan peralatan dan perlengkapan khusus pada penambangan bawah tanah, seperti detektor gas, lampu antiapi, dan lain-lain, bukan hanya Alat Pelindung Diri. Kesimpulannya manajemen atau perusahaan harus mengedepankan keselamatan sesuai dengan komitmennya terhadap peraturan kesehatan dan keselamatan kerja, skema dan teknik penambangan, serta peralatan dan perlengkapan khusus penambangan bawah tanah.

HAL-HAL DALAM PEMENUHAN, PENERAPAN, DAN PENANGGULANGAN KEJADIAN KEBAKARAN PADA TAMBANG BAWAH TANAH

Merupakan suatu hal yang penting untuk merinci hal apa saja yang wajib dimiliki oleh perusahaan yang nantinya ketika diterapkan dapat mencegah kejadian berbahaya, termasuk kecelakaan pada tambang bawah tanah. Beberapa hal yang telah menjadi acuan standar tambang batu bara bawah tanah yang berfungsi untuk mengurangi risiko kejadian berbahaya tersebut adalah sebagai berikut.

Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019

1. Elemen Administrasi (Ada/Tidak/Memadai/Tidak Memadai)

- a. AMDAL/UKL-UPL (PP 27 Tahun 1999 dan Kepmen PE 1453/2000)
- b. Studi Kelayakan (Kepmen PE.1453/2000)
- c. Buku Tambang (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- d. Buku Daftar Kecelakaan (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- e. Daftar Hadir Pekerja Tambang (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- f. Izin Penimbunan Bahan Bakar Cair (Kepdirjen Minerba No. 309.K/30/DJB/2018)
- g. Izin Penggunaan dan Penyimpanan Bahan Peledak (Kepdirjen Minerba No. 309.K/30/DJB/2018)
- h. Perizinan Perusahaan Jasa Pertambangan (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018)

2. Personel (Ada/Tidak/Memadai/Tidak Memadai)

- a. Kepala Teknik Tambang (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018 Lampiran I)
- b. Kepala Tambang Bawah Tanah (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018 Lampiran I)
- c. Petugas Pengukur Gas (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- d. Pekerja Tambang (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)

3. Kewajiban Pelaporan (Ada/Tidak/Memadai/Tidak Memadai) Pelaporan Lingkungan

- a. Triwulan (Permen ESDM No 11 Tahun 2018 & Kepmen ESDM No 1806 Tahun 2018)
- b. Rencana Tahunan (Permen ESDM No 11 Tahun 2018 & Kepmen ESDM No 1806 Tahun 2018)
- c. Jaminan Reklamasi (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018 Lampiran VI)
- d. Peta Pengelolaan Lingkungan (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018 Lampiran VI)

- e. Peta Pemantauan Lingkungan (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018 Lampiran VI)

4. Pelaporan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

- a. Pelaporan IIII-XIVI (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- b. Peta Ventilasi (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- c. Jalan Masuk/Keluar (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- d. Pemberitahuan Peningkatan Gas Methana (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)

5. Teknik Penambangan

- a. Peta Perencanaan Tambang Bawah Tanah
- b. Peta Situasi Tambang Bawah Tanah
- c. Peta Kemajuan Tambang
- d. Cadangan Batu Bara
- e. Sistem Penyaliran dan Pengeringan TBBT

6. Peralatan dan Sarana K3LL (Ada/Tidak/Memadai/Tidak Memadai)

- a. Alat Deteksi Gas Metana, O₂, CO, dan H₂S Portabel (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- b. Alat Pelindung Diri (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- c. Lampu Keselamatan (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- d. Lampu Pekerja Tambang (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- e. Ruang P3K (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- f. Alat Komunikasi (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)

7. Sarana/Peralatan Tambang (Ada/Tidak/Memadai/Tidak Memadai)

- a. Kantor Tambang (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- b. Instalasi Listrik (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- c. Penerangan Tambang Bawah Tanah (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- d. Alat Angkut (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018)
- e. Alat Penggalian (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018)
- f. Kolam Pengendap (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018)
- g. Penirisan Air Tambang (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018)
- h. Sistem Ventilasi (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018)
- i. Portal Tambang (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018)

8. Pelaksanaan (Ada/Tidak/Memadai/Tidak Memadai)

Pelaksanaan Perlindungan Lingkungan

- a. Pengelolaan Kualitas Air (PP No. 82 Tahun 2001)
- b. Pemantauan Kualitas Air (PP No. 82 Tahun 2001)
- c. Reklamasi (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018 Lampiran VI)
- d. Pengelolaan Limbah B3 (PP 101 2014)

Pelaksanaan K3 Dan Keselamatan Operasi

- a. Pelatihan Tenaga Kerja (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- b. Inspeksi (Pemeriksaan Tambang) (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- c. Pemeriksaan Kecelakaan (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- d. Safety Talk (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- e. Safety Induction (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- f. Safety Meeting (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- g. Pemeriksaan Gas Metana dan H₂S (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- h. Pemeriksaan Udara (O₂ dan CO) (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)
- i. Pemeriksaan Penyanggaan (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018)
- j. Pengaturan Pengangkutan Bawah Tanah (Kepmen ESDM No 1827 Tahun 2018)
- k. Pemeriksaan Awal Gilir Kerja (Kepdirjen Minerba No. 185.K/30/DJB/2019)

Beberapa poin di atas digunakan sebagai panduan dalam melakukan pengawasan pada tambang bawah tanah. Selain hal-hal tersebut, Keputusan Direktur Jenderal Mineral dan Batubara Nomor 185.K/30/DJB/2019 tentang Petunjuk Teknis Dalam Pelaksanaan Keselamatan Pertambangan serta Pelaksanaan, Penilaian, dan Pelaporan Sistem Manajemen Keselamatan Pertambangan Mineral dan Batubara juga memberi panduan terkait operasional pada tambang bawah tanah sehingga efektivitas keselamatan pertambangan menjadi terencana, terukur, dan terstruktur serta mencegah terjadinya kejadian-kejadian yang merugikan perusahaan (kecelakaan tambang, kejadian berbahaya, dan penyakit akibat kerja).

Elemen III dalam Sistem Manajemen Keselamatan Pertambangan tentang Organisasi dan Personel butir 10.2.2, misalnya, memberikan gambaran pendidikan dan pelatihan tambahan yang wajib diberikan kepada para pengawas operasional dan pengawas teknik pada tambang bawah tanah yang sekurang-kurangnya meliputi hal-hal berikut.

1. Tata cara kerja yang aman

Menjelaskan bagaimana melakukan kegiatan operasional yang mengedepankan

keselamatan.

2. Pemeliharaan dan penggunaan lampu perorangan
Lampu pada tambang bawah tanah berbeda dengan yang umumnya digunakan karena bersifat antiapi (*flameproof*) sehingga pekerja harus diberi edukasi tentang pemeliharaan dan penggunaannya.
3. Pengetahuan dasar ventilasi
Ventilasi berhubungan dengan pola keluar masuknya udara pada tambang bawah tanah sehingga dapat memberikan cukup udara bersih kepada semua tempat kerja dan menguraikan/membuang gas-gas berbahaya seperti metana. Standar minimal menurut Keputusan Direktur Jenderal Mineral dan Batubara Nomor 185.K/30/DJB/2019 adalah tidak kurang dari 19,5% untuk volume oksigen dan tidak lebih dari 0,5% untuk karbon dioksida.
4. Peraturan tentang penyangga dan pengetahuan dasar cara penyanggaan
Menjelaskan tentang peraturan penyanggaan, pedoman penyanggaan, dan ketentuan umum pada tambang bawah tanah.
5. Cara meninggalkan tambang penyelamat diri/evakuasi
6. Bahaya-bahaya serta bagaimana mendeteksi gas-gas yang mudah terbakar

Setiap pekerja mampu dan mengerti gas-gas yang berada pada tambang bawah tanah dan bahayanya sehingga dapat memberikan respons ketika terdeteksi gas berbahaya dalam jumlah yang melebihi standar keselamatan.

Minimal ketika poin-poin tersebut diterapkan oleh perusahaan, kejadian berbahaya ataupun kecelakaan pada tambang bawah tanah dapat dicegah.



BAB 14

SISTEM PROTEKSI DAN PENCEGAHAN KEBAKARAN PADA INDUSTRI MINYAK DAN GAS BUMI

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.
Ivan Havosan, S.K.M., M.K.K.K.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini dibahas mengenai sistem pencegahan dan proteksi kebakaran pada industri minyak dan gas bumi. Sistem proteksi kebakaran yang terdiri dari klasifikasi area berbahaya dan *work permit*. Sistem pencegahan kebakaran meliputi sistem proteksi aktif dan sistem proteksi pasif.

PENDAHULUAN

Dalam industri migas dan petrokimia, desain harus direncanakan sedemikian rupa untuk dapat meminimalkan risiko serendah mungkin. Namun, desain terbaik pun pasti akan meninggalkan sisa risiko (*residual risk*). Sisa risiko dalam pembahasan ini terutama berkaitan dengan potensi kebakaran dan ledakan. Upaya mitigasi sisa risiko tersebut dapat dilakukan dengan membuat perangkat perlindungan dan pencegahan kebakaran (*fire protection and prevention barriers*), di antaranya sebagai berikut.

1. Sistem pencegahan kebakaran

Sistem ini berfungsi memisahkan terbentuknya segi tiga api dalam suatu area yang berbahaya atau berpotensi risiko tinggi untuk terjadinya kebakaran dan ledakan.

2. Sistem deteksi

Sistem ini berfungsi untuk mendeteksi munculnya kebakaran atau hal-hal yang berpotensi menyebabkan kebakaran (kebocoran gas, hidrokarbon, dan lain-lain).

3. Sistem proteksi aktif

Sistem ini berfungsi untuk secara aktif memadamkan kebakaran yang telah terjadi, contohnya sistem busa (*foam system*) dan *deluge system*.

4. Sistem proteksi pasif

Sistem ini berfungsi untuk mengurangi penyebaran api sehingga tidak memperparah dampak dari terjadinya kebakaran, contohnya *fire proofing*, *bundwall*, dan *fire wall*.

Bahasan ini akan lebih banyak menyinggung praktik dan standar pencegahan dan pengendalian kebakaran dan ledakan yang kerap digunakan pada industri

migas dan petrokimia. Adapun pengendalian yang mirip dengan jenis industri lain tidak akan dibahas lebih lanjut.

SISTEM PENCEGAHAN KEBAKARAN

Klasifikasi Area Berbahaya (*Hazardous Area Classification/HAC*)

Area berbahaya adalah suatu daerah yang memiliki potensi kebakaran atau ledakan disebabkan adanya gas atau material di udara yang dapat terbakar namun bukan gas beracun. Pada instalasi migas dan petrokimia, area berbahaya sering kali berada pada area proses, kepala sumur (*well bay area*), kompresor, penyimpanan cairan mudah terbakar, dan beberapa area di daerah *utility*.

Klasifikasi area berbahaya dibuat dengan tujuan memberikan profil risiko kebakaran dan ledakan di suatu area. Klasifikasi tersebut tidak dapat memprediksi dengan tepat bahwa suatu ledakan akan terjadi di suatu area, tetapi hanya memisahkan area di pabrik menjadi beberapa tingkat risiko kebakaran dan ledakan yang mungkin terjadi, contohnya risiko besar, risiko kecil, atau tidak mungkin terjadi ledakan. Klasifikasi ini merupakan alat bantu untuk memitigasi risiko kebakaran dan ledakan di suatu area. Tiga hal yang menjadi perhatian dalam menentukan klasifikasi area berbahaya adalah

1. tipe potensi bahaya dari materi (gas, cairan, dan debu);
2. kemungkinan (*likelihood*) keadaan bahaya dengan konsentrasi dapat terbakar (*leak source*); dan
3. potensi pemantikan (ignisi) dan suhu untuk dapat terpantik sendiri (temperatur otoignisi) dari material berbahaya.

a. Klasifikasi Area Berbahaya Standar Eropa (IEC)

- 1) **Zona 0:** area yang terdapat paparan gas atau material yang dapat meledak dalam rentang waktu yang cukup lama (terus-menerus) pada keadaan normal. Area Zona 0 pada umumnya adalah "*floating roof tank*", ruangan pompa bahan mudah terbakar dengan ventilasi yang tidak mencukupi, saluran limbah minyak (*oily waste sewer/basin*), tempat pemuatan atau pemindahan produk mudah terbakar (*loading unloading hazardous product*).
- 2) **Zona 1:** area yang memungkinkan terdapatnya paparan gas atau material yang dapat meledak selama kondisi operasi normal. Area untuk Zona 1 pada umumnya adalah tempat penanganan bahan mudah terbakar, sistem tertutup (*process containment system*) yang dapat melepaskan

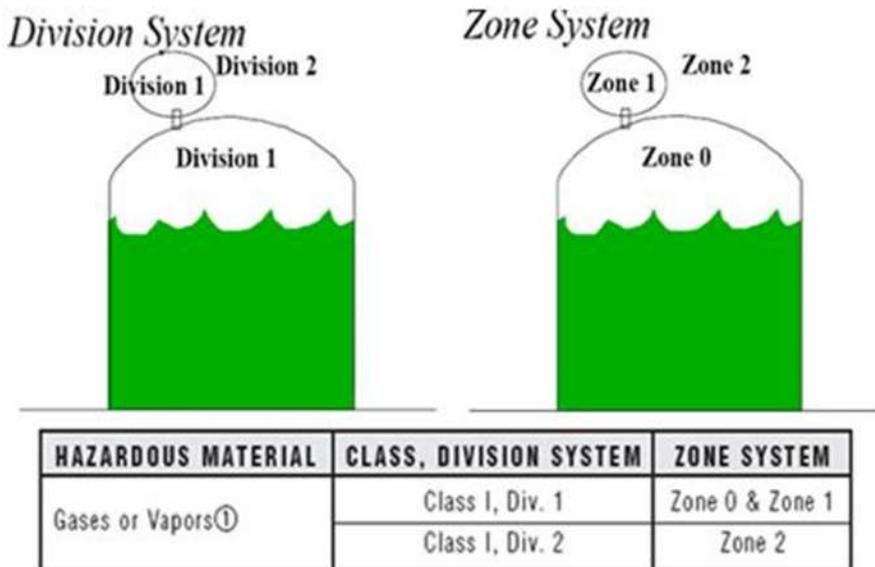
gas atau cairan mudah terbakar pada keadaan abnormal, dan lain-lain.

- 3) **Zona 2:** area yang tidak terdapat gas atau material yang dapat meledak dalam keadaan operasi normal kecuali dalam keadaan abnormal (kecelakaan pelepasan gas). Area untuk Zona 2 pada umumnya adalah sistem perpipaan yang tidak terdapat sumber-sumber kebocoran (katup, *flange*, *instrument fitting*, dan lain-lain), tempat di mana cairan mudah terbakar dipindahkan dengan tetap berada pada sistem tertutupnya (kontainer yang sesuai), dan sebagainya.

b. Klasifikasi Area Berbahaya Standar Amerika Serikat (NEC) dan Kanada (CEC)

Berdasarkan standar Amerika Serikat NEC (NFPA 70) dan API RP 500, berikut ini pembagian klasifikasi area berbahaya.

- 1) **Divisi 1 (Division 1):** area di mana kemungkinan campuran dapat terbakar atau meledak yang dapat terjadi pada keadaan normal.
- 2) **Divisi 2 (Division 2):** area di mana kemungkinan campuran dapat terbakar atau meledak yang dapat terjadi pada keadaan abnormal.



Gambar 14.1 Perbandingan Sistem Divisi dan Zona

Sistem Izin Kerja (Work Permit)

Sistem Izin Kerja (SIKA) terdiri atas berbagai macam jenis dan aplikasinya. Dalam hal pencegahan kebakaran SIKA dikenal dengan nama *Hot Work Permit*. *Hot Work Permit* diperlukan untuk setiap jenis pekerjaan yang berkaitan dengan penggunaan

sumber penyalaan atau yang dapat menimbulkan api terbuka. Pekerjaan panas tersebut antara lain

- pengelasan listrik dan las potong serta mesin gerinda atau alat potong;
- penggunaan peralatan *hot tapping*;
- *sand blasting*;
- penggunaan alat yang memakai baterai, tetapi tidak mencantumkan kualifikasi *gas proof*;
- pekerjaan yang berpotensi terjadinya kebakaran atau dapat menimbulkan bunga api, seperti memasang atau melepas sorokan buta atau *blind* dengan potensi paparan terhadap fluida yang mudah terbakar dan membuka *manhole* dengan potensi paparan terhadap toksik fluida mudah terbakar atau beracun;
- penggunaan alat berat, kendaraan, atau mesin-mesin motor bakar lainnya di dalam *battery limit*.

Pengendalian pekerjaan panas tersebut diperlukan agar tidak terjadi kontak antara sumber api tersebut dan potensi kebocoran fluida dan/atau gas yang mudah terbakar dari sekitar tempat kerja panas dilakukan (terbentuk segi tiga api).

Pengendalian pekerjaan panas di antaranya

1. isolasi peralatan: mengisolasi peralatan dari sumber-sumber energi yang berhubungan dengan peralatan tersebut seperti energi listrik, energi proses, dan potensi energi lainnya;
2. pembersihan peralatan sebelum melakukan pekerjaan panas pada peralatan tersebut, yang dapat berupa pembebasan dari tekanan, pengosongan isi, pencucian peralatan, pendorongan isi cairan atau gas dalam peralatan dengan air, penguapan atau pengeringan sisa-sisa cairan mudah terbakar dengan uap air (*steam*) panas, ataupun purging dengan gas *inert*;
3. persyaratan keselamatan lainnya: penutupan drain dan *valve* yang berada pada jarak tertentu (misalnya 15 m), penutupan bahan mudah terbakar di sekitar tempat kerja panas, penyediaan alat pemadam api ringan (APAR), petugas pengaman (*fireman*), atau penggunaan *positive pressure habitat*, dan sebagainya.

Sistem Deteksi Kebakaran

Setelah pencegahan, sistem deteksi merupakan pelindung (*barrier*) pertama dalam upaya mitigasi konsekuensi kebakaran dan ledakan pada industri migas dan petrokimia. Dalam istilah praktis sehari-hari, sistem deteksi ini sering disebut *F&G Detection System*. Prinsip deteksi kebakaran didasarkan atas elemen-elemen yang ada dalam suatu fenomena kebakaran, seperti terjadinya kebocoran bahan bakar (*fuel leak*), adanya asap, nyala, dan panas. Dengan mendeteksi hal-hal tersebut,

dapat diketahui kemunculan kebakaran pada tahap yang lebih awal. Beberapa jenis sistem deteksi yang lazim digunakan pada industri migas dan petrokimia ialah detektor api (*flame detector*), detektor panas (*heat detector*), detektor asap (*smoke detector*), dan detektor gas (*gas detector*).

SISTEM PROTEKSI AKTIF

Sistem Air dan Busa Kebakaran (*Foam System*)

Dalam upaya pemadaman kebakaran, selain diperlukan peralatan yang andal, juga diperlukan tersedianya media pemadam dalam jumlah yang cukup. Air merupakan salah satu media pemadam yang banyak digunakan. Air, selain berfungsi untuk memadamkan, yang tidak kalah penting, merupakan media pendingin (*cooling*). Air dapat dicampur dengan busa pemadam (*foam*) dengan komposisi tertentu untuk menghasilkan busa yang sangat efektif dalam upaya pemadaman kebakaran kelas C.

Salah satu cara menghitung kebutuhan air ialah dengan menggunakan pendekatan perhitungan kebutuhan busa (NFPA 11). Adapun perhitungan dilakukan dengan cara menjumlahkan kebutuhan air untuk hal berikut.

a. Pemadaman Fasilitas yang Terbakar

Pemadaman kebakaran di fasilitas migas dan petrokimia lebih efektif apabila menggunakan busa pemadam. Untuk itu, perhitungan dapat menggunakan standar NFPA 11 dengan perhitungan kebutuhan air sebagai berikut.

$$V_{air} = dr \times A \times T \times (1 - C_f)$$

dr = *Delivery rate foam solution/application rate*

A = luas kebakaran

T = lama waktu pemadaman

C_f = kadar konsentrat busa dalam *foam solution*

Catatan: Jumlah air dan busa harus 100%

Delivery rate adalah laju pencurahan busa pada fasilitas yang terbakar. Besarnya bergantung pada peralatan sistem busa yang digunakan. Berikut adalah rinciannya.

SISTEM BUSA	DELIVERY RATE
<i>Monitor Foam</i>	6,5 lpm/m ² luas tangki
<i>Foam Chamber</i>	4,1 lpm/m ² luas tangki
<i>Base Injection</i>	4,1 lpm/m ² luas tangki

Lama pemadaman yang diperlukan bergantung pada peralatan sistem busa dan jenis bahan mudah terbakar yang disimpan.

SISTEM BUSA	DELIVERY RATE	
	Kelas I	Kelas II
<i>Monitor Foam</i>	65 menit	50 menit
<i>Foam Chamber</i>	55 menit	30 menit
<i>Base Injection</i>	55 menit	30 menit

Kadar konsentrat busa ditentukan bergantung pada jenis produk yang terbakar. Untuk produk yang bersifat nonpolar, seperti hidrokarbon, biasanya digunakan kadar 3% konsentrat busa, sedangkan untuk produk yang polar diperlukan kadar yang lebih pekat, biasanya 6%.

b. Pendinginan Fasilitas yang Terbakar (*Main Cooling*)

Pendinginan fasilitas yang terbakar memiliki tujuan supaya tidak terjadi kolaps (collapse) pada struktur dan juga agar busa pemadam dapat menyentuh dinding tangki secara sempurna. Perhitungan dapat dilakukan sebagai berikut.

$$Vair = \pi/2 \times D \times Tt \times fr \times t$$

π = konstanta (3,14)

D = diameter tangki

Tt = tinggi tangki (meter atau kaki)

Fr = *flow rate* (0,1 US gpm/ft² atau ±4,1 lpm/m²)

t = lama pemadaman (mengacu tabel *delivery rate*) dalam menit

c. Pemadaman Tumpahan Api (*Fire Spill*) yang Mungkin Timbul

Selama berlangsungnya kebakaran dimungkinkan terjadinya tumpahan api (*fire spill*), yang bisa jadi karena ikut terbakarnya ceceran minyak dan atau rumput sekitar. Bila hal ini terjadi, sistem *fixed foam* saja belum cukup, karena sistem tersebut khusus didesain untuk fasilitas atau tangki. Oleh karena itu diperlukan *foam hose suplement* (selang-*nozzle foam*). Jumlah yang dibutuhkan, menurut NFPA-11, bergantung pada diameter tangki yang terbakar. Kapasitas

aliran untuk satu buah hose suplement ± 50 US gpm (190 lpm). adapun lama atau durasi pemadaman *fire spill*, menurut NFPA-11, bergantung pada ukuran tangki (dinyatakan dengan diameter).

Dengan demikian, untuk menghitung jumlah air yang diperlukan untuk pemadaman *fire spill*, dapat digunakan rumus berikut ini.

$$\begin{aligned} \text{Vair} &= n \times 190 \times \text{Th} \times (1 - \text{Cf}) \text{ (dalam satuan liter) atau} \\ &= n \times 50 \times \text{Th} \times (1 - \text{Cf}) \text{ (dalam satuan galon AS)} \end{aligned}$$

n = jumlah *hose suplement*

Th = lama pemadaman

Cf = kadar *foam solution*

DIAMETER	MIN. HOSE SUPPLEMENT
< 19,5 m	1
19,5–36 m	2
> 36 m	3

DIAMETER	DURASI PEMADAMAN
< 10 m	10 menit
10–28,5 m	20 menit
> 28,5 m	30 menit

d. Pendinginan Fasilitas Sekitar (*Auxiliary Cooling*)

Belum ada rujukan yang baku mengenai pendinginan fasilitas sekitar sehingga dalam buku ini digunakan pendekatan yang lazim digunakan di beberapa perusahaan minyak di dunia. Apabila jumlah fasilitas di area *tank yard* cukup banyak, tidak mungkin dilakukan pendinginan secara keseluruhan karena diperlukan jumlah air yang cukup banyak dan kapasitas pompa yang cukup besar. Untuk itu, pendinginan perlu selektif: hanya fasilitas terdekat yang perlu mendapat pendinginan. Pendinginan selektif ini disebut *radius cooling*.

Besarnya *radius cooling* ditinjau dari jenis produk yang disimpan (dalam tangki sekitar tersebut) dan besarnya (diameter) tangki yang terbakar, dengan kondisi

- 1) untuk fasilitas dengan produk Kelas I atau sejenisnya, *radius cooling* adalah 2 kali diameter fasilitas yang terbakar;
- 2) untuk fasilitas dengan produk Kelas II atau yang sejenis, *radius cooling*

- adalah 1,5 kali diameter fasilitas yang terbakar;
- 3) untuk fasilitas dengan produk solar atau yang sejenis, *radius cooling* adalah 1 kali diameter tangki yang terbakar.

5. Pendinginan Pasca ebakaran

Sekalipun api kebakaran telah dipadamkan, dinding tangki yang terbakar biasanya masih cukup panas atau masih tertinggal bara, misalnya bila terjadi tumpahan api. Sementara itu, atmosfer masih memungkinkan mengandung campuran uap yang mudah terbakar akibat penguapan bahan bakar minyak. Kondisi ini bisa menimbulkan *burn back* atau campuran uap-udara terbakar kembali akibat adanya panas yang cukup.

Untuk menghindari hal tersebut, upaya pendinginan masih perlu terus dilakukan, terutama pada dinding tangki yang terbakar dan bara yang tersisa. Seperti *auxiliary cooling*, belum ada acuan baku kapasitas aliran dan lama pendinginan untuk pendinginan pascakebakaran. Namun, beberapa pelatihan menyarankan media air pemadam yang tersedia harus mampu dioperasikan selama empat jam.

Mengingat pemadaman kebakaran tangki BBM mudah terbakar Kelas I dengan busa memerlukan perkiraan waktu ± 1 jam, diasumsikan sisa 3 jam dimaksudkan untuk mempersiapkan kegiatan pendinginan sebelum dan sesudah upaya pemadaman kebakaran. Dalam kejadian kebakaran dapat saja terjadi hal-hal yang di luar dugaan, seperti bukaan *valve cooling* melampaui yang dibutuhkan. Hal ini tentunya akan meningkatkan konsumsi air pemadam sehingga perlu adanya antisipasi sebelumnya.

Oleh karena itu, dalam mengestimasi kebutuhan minimal air pemadam, masa pendinginan pascakebakaran ditetapkan selama ± 3 jam dengan *flow rate* sama dengan *flow rate* pendinginan dinding tangki yang terbakar, yaitu 4,1 lpm/m² setengah luas dinding tangki atau dengan rumus berikut ini.

$$V_{air} = \pi \times D \times T \times (1 - C_f)$$

π = konstanta (3,14)

D = diameter tangki

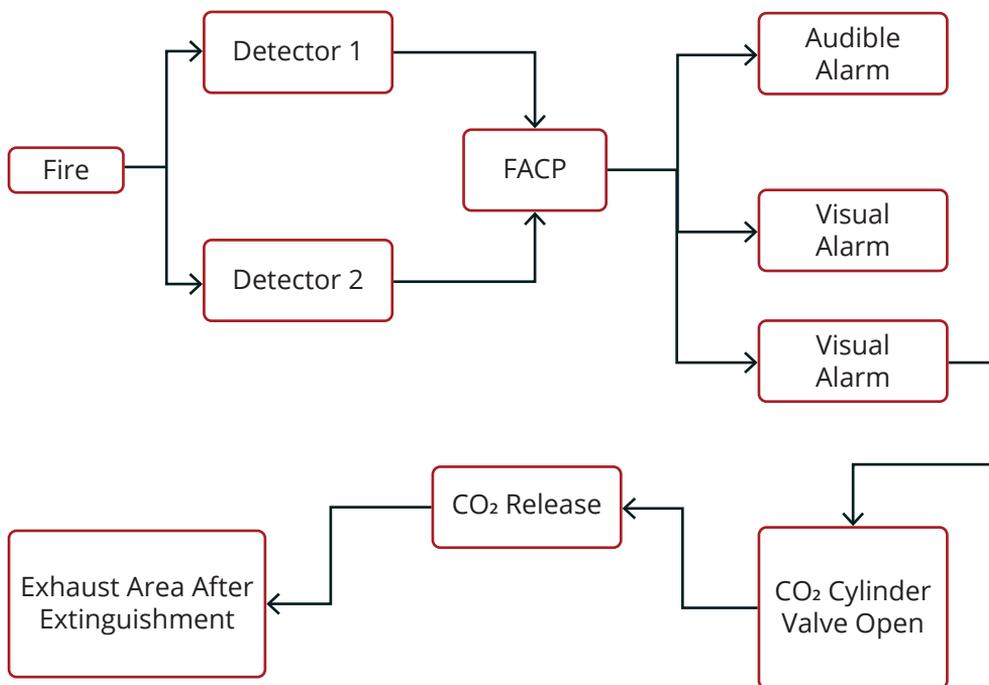
Tt = tinggi tangki (meter atau kaki)

Fr = *flow rate* (0,1 US gpm/ft² atau $\pm 4,1$ lpm/m²)

T = lama pendinginan pascakebakaran (± 180 mnt)

Sistem CO₂

Bahan CO₂ (karbon dioksida) merupakan bahan pemadam kebakaran yang digunakan untuk menggantikan media gas halon. Cara kerja sistem CO₂ dalam memadamkan api adalah dengan cara mengurangi komposisi oksigen dalam ruang sampai ke tingkat di mana kebakaran tidak terjadi lagi. Sistem CO₂ dalam industri migas dan petrokimia banyak digunakan dalam ruang server, ruang kontrol, ruang komputer, dan ruang dengan perangkat elektronik. Tipe Sistem CO₂ berdasarkan cara aplikasinya terdiri atas total *flooding* dan *local application*.



Gambar 14.2 Mekanisme Operasi Sistem CO₂

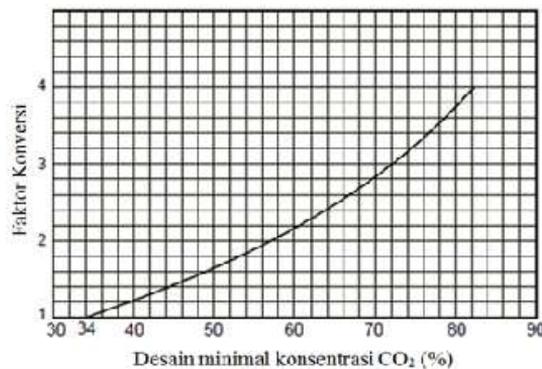
Untuk menentukan kebutuhan CO₂, biasanya dilakukan berdasarkan tabel yang ada pada NFPA dengan pendekatan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Hazard Volume} &= \text{Volume Ruang Kosong} - \text{Total Volume Peralatan} \\ \text{Kebutuhan CO}_2 &= \text{Hazard Volume} / \text{Flooding Factor} \end{aligned}$$

MODEL KONSENTRASI	VOLUME FAKTOR				BAHAYA KHUSUS
	Ft ³ /lb CO ₂	m ³ /kg CO ₂	Lb CO ₂ /ft ³	Kg CO ₂ /m ³	
50	10	0,62	0,100	1,60	Bahaya listrik kering secara umum [jarak 0-2.000 ft ³ (56,6 m ³)]
50	12	0,75	0,083 (200 lb)	1,33 (91 kg)	
65	8	0,50	Minimal 0,125	Minimum 2,00	Jarak lebih besar dari 200 ft ² (56,6 m ²)
75	6	0,38	0,166	2,66	Rekaman Penyimpanan (kertas jumlah besar), pipa, parit tertutup, kubah penyimpanan bulu, pengumpul debu

Setelah diketahui kebutuhan CO₂, kemudian perlu ditentukan % konsentrasi CO₂ sesuai dengan grafik faktor konversi material di bawah ini.

$$\% \text{ Konsentrasi CO}_2 = \text{Kebutuhan CO}_2 \times \text{Faktor Konversi Material}$$



Gambar 14.3 Grafik Faktor Konversi Material

Contoh Kasus:

Sebuah ruangan trafo dengan data sebagai berikut.

- Vol. Ruang Trafo = 765 m³
- Vol. Trafo 1. 6.300 kVA = 15,24 m³
- Vol. Trafo 2. 2.500 kVA = 11,92 m³
- Vol. Trafo 3. 200 kVA = 11,92 m³

- Vol. Trafo 4. 2.500 kVA = 11,92 m³
- Pannel Switch Gear 1 = 21,38 m³
- Pannel Switch Gear 2 = 12,15 m³

Berapa jumlah tabung CO₂ yang harus dipasang untuk sistem proteksi di ruangan tersebut jika 1 tabung di pasaran memiliki berat 45,5 kg CO₂?

Jawaban:

Hazard Volume = 765–84,53 = 680,47 m³

Kebutuhan CO₂ = HV/FF = 680,47 m³/0,75 kg CO₂/m³ = x kg CO₂

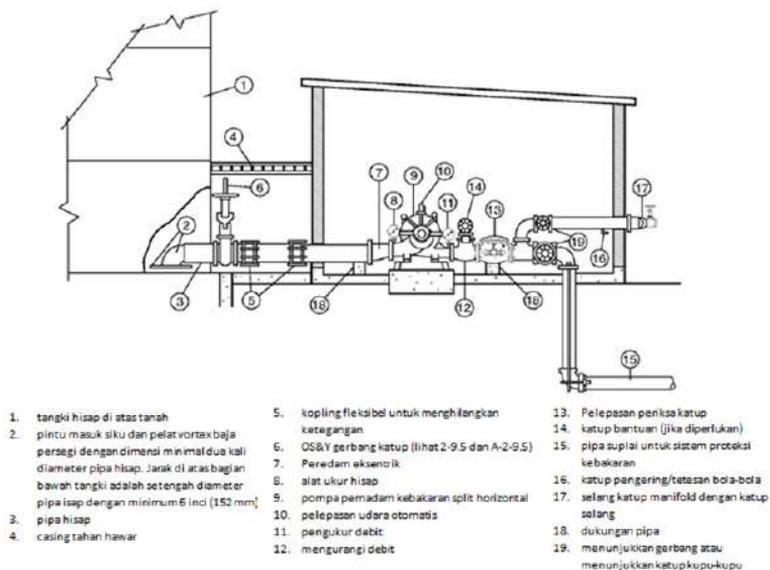
50% Konsentrasi Aktual =

50% Konsentrasi Aktual = 511,63 x 1,6 = 818,608 kg CO₂

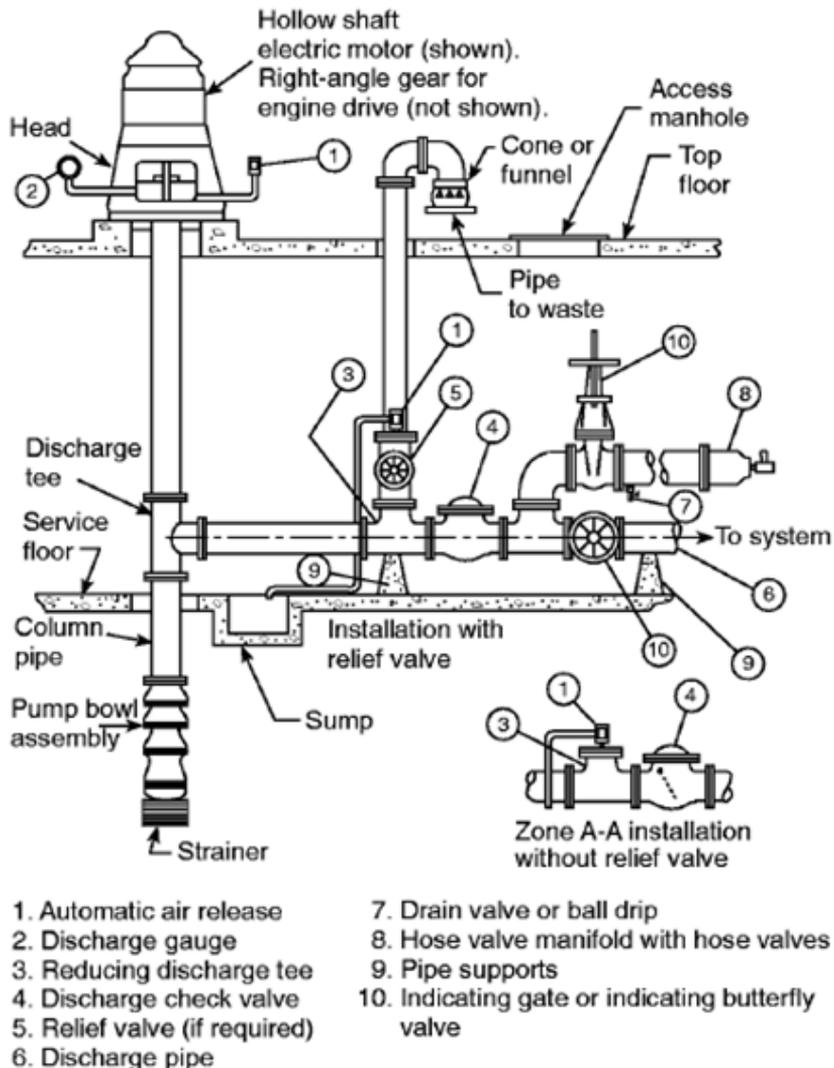
Jumlah tabung CO₂ yang dibutuhkan = 818,608 kg CO₂/45,5 kg = 18 tabung

SISTEM POMPA PEMADAM KEBAKARAN

Pompa pemadam kebakaran merupakan jantung seluruh upaya pemadaman yang dilakukan. Tanpa pemahaman dan perencanaan desain pompa pemadam yang baik, tindakan penanggulangan tidak akan berjalan dengan efektif dan aman sesuai dengan filosofi sistem proteksi kebakaran dan juga standar yang dipersyaratkan. Standar pompa pemadam kebakaran yang lazim digunakan ialah NFPA 20 *Standard for the Installation of Stationary Pumps for Fire Protection*.



Gambar 14.4 Bagian-bagian Pompa Pemadam Horizontal



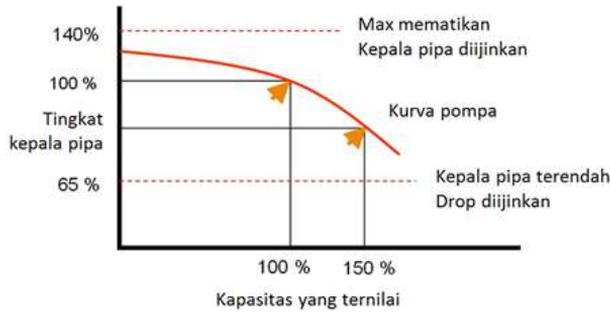
Gambar 14.5 Bagian-bagian Pompa Pemadam Vertikal

Salah satu aspek penting dalam pemeliharaan pompa pemadam kebakaran ialah terkait performa pemadam kebakaran, yang dalam NFPA 20 disebutkan sebagai berikut.

Article 6.2.1 Pump shall furnish not less than 150% of rated capacity at not less than 65% of total rated head.

Article 6.2.2 The shut of head shall not exceed 140% of rated head for any type of pump.

Jika kedua persyaratan tersebut dimasukkan ke dalam grafik, akan muncul gambar sebagai berikut.



Gambar 14.6 Kurva Performa Pemadam Kebakaran

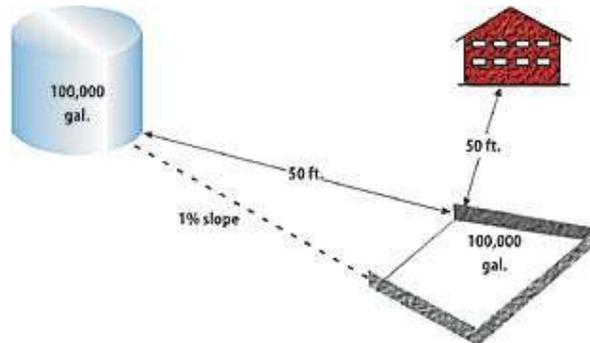
SISTEM PROTEKSI PASIF

Sistem Pengendalian Tumpahan

Pengendalian tumpahan merupakan salah satu proteksi pasif untuk mencegah eskalasi dari suatu kecelakaan, seperti kebakaran akibat kebocoran cairan (*running liquid fire*) dan pencemaran lingkungan akibat tumpahan BBM. Pada setiap wadah (berupa tangki atau vessel) yang berisi produk Kelas I, II, atau IIIA harus disediakan fasilitas yang mencegah tumpahan menjaral ke aset penting lainnya serta ke lingkungan sekitarnya.

1. Pengendalian Tumpahan BBM dengan *Remote Impounding*

Jika pengendalian tumpahan menggunakan drainase yang dialirkan ke area *remote impounding*, jarak minimal antara tangki dan *remote impounding area* adalah sebesar 15 meter dan kemiringan minimum adalah minimum sebesar 1%. Kapasitas *impounding area* adalah minimum sama dengan kapasitas tangki



Gambar 14.7 Jarak antara Remote Impounding dengan Tangki dan Fasilitas Lainnya

terbesar yang aliran tumpahannya menuju ke *remote impounding* tersebut. Jika hal tersebut tidak dapat dipenuhi karena keterbatasan lahan, dapat dibuat *remote impounding* secara parsial.

Drainase harus ditempatkan sedemikian rupa sehingga jika terjadi kebakaran pada sistem drainasenya tidak mengenai tangki atau peralatan penting lainnya. *Impounding area* harus ditempatkan sedemikian rupa sehingga jika *impounding area* terisi penuh, jarak permukaan cairan minimum sebesar 15 meter dari pagar atau peralatan lainnya yang akan dibangun ke depannya.

2. Penampungan Tumpahan dengan *Bundwall* (*Open/Closed Dike*)

a. *Main Bundwall*

Jika pengendalian tumpahan menggunakan *bundwall*, yaitu mengurung tumpahan yang dikumpulkan di sekitar tangki, kemiringan minimum adalah 1%. Kapasitas *bundwall* adalah minimum sebesar BBM yang dapat keluar dari tangki dengan kapasitas terbesar dengan diasumsikan penuh. Untuk kemudahan akses dalam pemeriksaan dan pemadaman kebakaran, jarak minimum antara *bundwall* dan pagar terluar adalah 3 meter. Jika *bundwall* dibuat dari tanah, ketinggian lebih dari 0,9 meter wajib memiliki puncak yang rata dengan lebar minimum 0,6 meter. Ketinggian maksimum *bundwall* yang diizinkan 1,5 meter dan jika akan dibuat lebih tinggi, perlu dilakukan pengurangan di area luar *bundwall* agar memudahkan pemeriksaan dan pengawasan saat terjadi kebakaran.

b. *Intermediate Bundwall*

Setiap *bundwall* yang terdiri atas dua atau lebih tangki harus dipisahkan menggunakan saluran air (*drainage channel*) atau setidaknya dengan menggunakan *intermediate bundwall*, yang bertujuan agar tumpahan yang terjadi tidak memapar tangki di sekitarnya. Tinggi *intermediate bundwall* tidak boleh kurang dari 450 mm, dengan total kapasitas 10% dari tangki terbesar yang dilindungi.

Intermediate bundwall harus disediakan untuk tangki dengan tipe *cone roof*, *floating roof*, dan *internal floating roof* dengan kapasitas lebih besar dari 10.000 bbl (1.590 KL); ataupun apabila terdapat beberapa tangki (dengan kapasitas <10.000 bbl) dengan total kapasitas 15.000 bbl (2.385 KL). Untuk tipe tangki lainnya (*horizontal tank*, *dome roof*, dll.), *intermediate bundwall* harus disediakan apabila kapasitas tangki lebih besar dari 2.380 bbl (380 KL) ataupun apabila terdapat beberapa tangki dengan total kapasitas

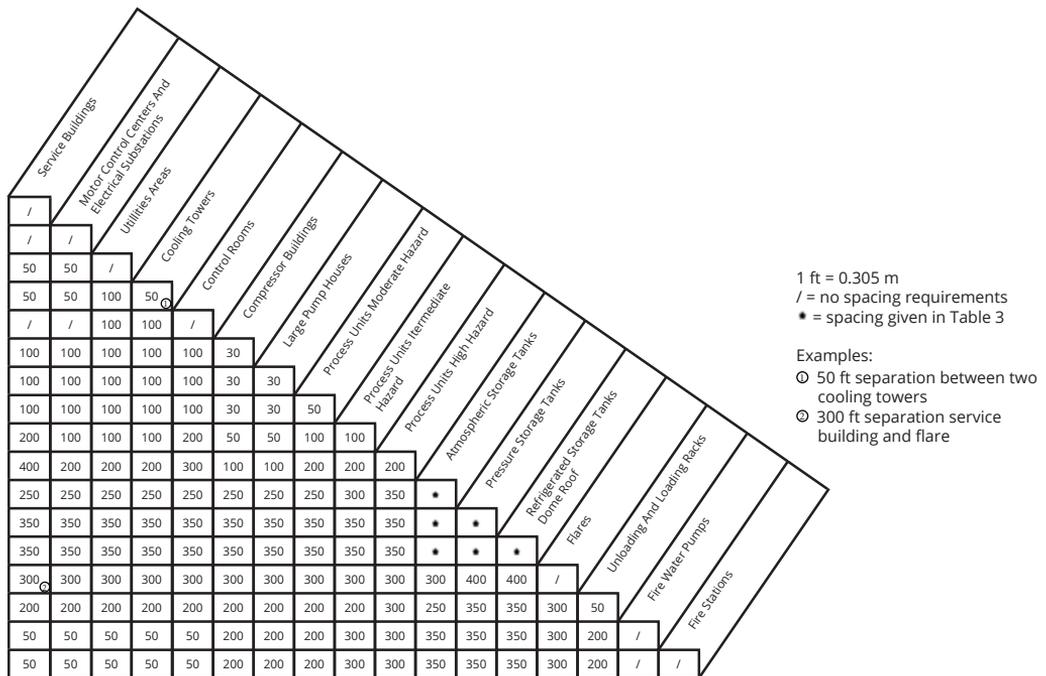
<3.750 bbl (570 KL). Selain itu, *intermediate bundwall* juga harus disediakan apabila diameter tangki melebihi 45 m.

Peraturan lebih detail mengenai penanggulangan tumpahan dapat dilihat pada NFPA 30 edisi terbaru.

Pengaturan Jarak Aman

Biaya, kompleksitas dan keselamatan proses operasi, serta pemeliharaan (*maintenance*) sangat bergantung pada letak lokasi, tata letak (*layout*), dan jarak aman sebuah *site*. Kajian pemilihan letak lokasi, tata letak, dan jarak aman memegang peranan penting dalam manajemen risiko keselamatan karena menyangkut pemisahan sumber api/panas potensial, ledakan, atau kebocoran gas/bahan beracun dari sumber ke area/fasilitas lain di sekitarnya. Dengan kata lain, tata letak lokasi, *layout*, dan jarak yang aman merupakan dasar dari konsep *inherently safer design*.

Terdapat beberapa standar, baik dari yang berasal dari suatu negara maupun asosiasi profesional, yang mengatur dan menjelaskan pengaturan tata letak dan jarak aman ini. Salah satu di antaranya ialah Industrial Risk Insurance seperti gambar di bawah ini.



Gambar 14.8 Rekomendasi Jarak Antarunit (1) (*Industrial Risk Insurance*)

	Compressors		Intermediate Hazard Pumps		High Hazard Pumps		High Hazard Reactors		Intermediate Hazard Reactors		Moderate Hazard Reactors		Columns, Accumulators, Rundown Tanks		Fired Heaters, Incinerators, Oxidizers		Air Cooled Heat Exchanger		Heat Exchangers		Pipe Racks		Emergency Exchangers		Unit Block Valves		Analyzer Rooms	
30																												
30	5																											
50	5	5																										
50	10	15	25																									
50	10	15	25	15																								
50	10	15	25	15	15																							
50	10	15	25	15	25	15																						
50	10	15	50	25	25	15																						
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
30	15	15	25	15	15	15	15	100	50	/																		
30	10	15	25	15	10	10	10	100	50	15	5																	
30	10	15	25	15	10	10	10	100	50	/	10	/																
50	50	50	100	50	50	50	50	100	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	100	50	50	50	50	100	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
50	50	50	50	50	50	50	50	100	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

1 ft = 0.305 m
/ = no spacing requirements

Gambar 14.9 Rekomendasi Jarak Antarunit (2)

	FLOATING & CONE ROOF TANKS < 3000 BARRELS		FLOATING & CONE ROOF TANKS > 3000 < 10,000 BARRELS		FLOATING & ROOF TANKS > 10,000 < 300,000 BARRELS		JUMBO FLOATING ROOF TANKS > 300,000 BARRELS		CONE ROOF TANKS CLASS II, III PRODUCT > 10,000 < 300,000 BARRELS		CONE ROOF TANKS INERTED CLASS I PRODUCT** > 10,000 < 150,000 BARRELS		PRESSURE STORAGE VESSELS SPHERES AND SPHEROIDS		PRESSURE STORAGE VESSELS DRUMS AND BULLETS		REFRIGERATED DOME ROOF STORAGE TANKS		
0,5 D*																			
0,5 D	0,5 D																		
1 X D	1 X D	1 X D																	
1 X D	1 X D	1 X D	1 X D																
0,5 D	0,5 D	1 X D	1 X D	0,5 D															
1 X D	1 X D	1 X D	1 X D	1 X D	1 X D	1 X D													
1,5 D 100' MIN	1,5 D 100' MIN	1,5 D 100' MIN	2 X D	1,5 D 100' MIN	1,5 D 100' MIN	1 X D 50' MIN													
1,5 D 100' MIN	1,5 D 100' MIN	1,5 D 100' MIN	2 X D	1,5 D 100' MIN	1,5 D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D												
2 X D 200' MIN	2 X D 200' MIN	2 X D 200' MIN	2 X D	2 X D 200' MIN	2 X D 200' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN	1 X D 100' MIN

D = Largest Tank Diameter
1 barrel = 42 gallons = 159 L
°C = (°F - 32) x 0,555
1 ft = 0,305

*For Class II, III products, 5 ft spacing is acceptable.
**Or Class II or III operating at temperatures >200 °F.

Gambar 14.10 Rekomendasi Jarak Antarunit untuk Tangki Penyimpanan

Sebagai contoh, dari tiga gambar di atas dapat diketahui rekomendasi jarak aman antara area kompresor dan jalur perpipaan minimal 30 meter. Dengan jarak tersebut dianggap tiap-tiap unit telah memiliki jarak yang aman dengan risiko kebakaran dan ledakan yang telah masuk ke zona yang dapat ditoleransi.



BAB 15

SISTEM PENCEGAHAN DAN PROTEKSI KEBAKARAN PADA INDUSTRI KIMIA

Prof. Dra. Fatma Lestari, M.Si., Ph.D.

Dr. Alfajri Ismail, M.Si.

Ivan Stevanus Chandra, S.K.M., M.Sc., M.S.

TUJUAN INSTRUKSIONAL KHUSUS

Pada bagian ini dijelaskan klasifikasi bahan kimia berbahaya, sifat-sifat bahan kimia, dan contoh-contoh kasus kejadian kebakaran dan kesalahan dalam manajemen bahan kimia.

PENDAHULUAN

Bahan kimia dapat menimbulkan pelbagai bahaya, tidak hanya bahaya kebakaran, tetapi juga bahaya yang beragam (*multiple hazards*), seperti bahaya kebakaran, ledakan, toksisitas akut, ataupun toksisitas kronik dalam satu kejadian. Gas, cairan, dan padatan bahan kimia berbahaya memiliki potensi bahaya dan dapat menimbulkan terjadinya kebakaran dan ledakan pada saat diproduksi, disimpan, dan digunakan. Diperlukan analisis terhadap semua bahan kimia dan reaksi yang berhubungan dengan proses penggunaannya dalam proses produksi, manufaktur, penyimpanan, ataupun fasilitas *treatment*. Demikian pula, pemahaman tentang klasifikasi dan sifat-sifat bahan kimia berbahaya sangat diperlukan untuk manajemen bahan kimia secara tepat.

Informasi mengenai karakteristik senyawa kimia dapat diperoleh dari MSDS (*Material Safety Data Sheet*) atau Lembar Data Keselamatan Bahan, yang saat ini disebut dengan *Safety Data Sheet* (SDS) atau Lembar Data Keselamatan sebagaimana disajikan pada Gambar 15.1.



**Gambar 15.1 *Material Safety Data Sheet* atau *Safety Data Sheets*
(Lembar Data Keselamatan Bahan atau Lembar Data Keselamatan)**

Industri kimia adalah salah industri yang rentan terhadap kebakaran dan ledakan karena melibatkan bahan-bahan kimia yang mudah terbakar yang digunakan atau dihasilkan oleh industri kimia. Kita dapat melihat hal tersebut dari sejarah peristiwa kebakaran dan yang disertai ledakan yang terjadi pada banyak industri kimia baik

di Indonesia maupun di luar negeri. Beberapa contoh kebakaran yang terjadi pada industri kimia di Indonesia di antaranya adalah Kebakaran PT Dunia Kimia Jaya di kawasan Industri Delta Mas, Cikarang, Bekasi Jawa Barat, yang terjadi pada tanggal 8 Agustus 2016 (news.detik.com, 8 Agustus 2016); kebakaran PT Arindo yang berlokasi di Desa Cicadas, Jalan Mercedes Benz, Gunung Putri Bogor, yang terjadi pada tanggal 6 November 2016 (news.detik.com, 6 November 2016); kebakaran PT Laetat Chemindo yang terletak di Blok HH Kawasan Industri Jababeka II, Desa Pasirsari, Kecamatan Cikarang Selatan, Kabupaten Bekasi, yang terjadi pada tanggal 2 September 2016 (beritasatu.com, 2 September 2016); dan masih banyak lagi kejadian kebakaran pada industri kimia di Indonesia. Beberapa kejadian kebakaran industri kimia di luar negeri salah satu kejadiannya adalah kebakaran pada industri kimia terbesar di Jerman, yaitu BASF, di Ludwigshafen, pada tanggal 17 Oktober 2016 (international.sindonews.com, 18 Oktober 2016).

Sering terjadinya kebakaran di industri kimia menjadi salah satu indikasi masih lemahnya sistem pencegahan dan proteksi kebakaran pada industri kimia tersebut. Sistem pencegahan dan proteksi kebakaran pada industri kimia sudah seharusnya menjadi prioritas utama bagi perusahaan mengingat konsekuensi yang diakibatkan oleh kejadian kebakaran dan ledakan pada industri kimia bersifat katastropik yang menimbulkan kerugian sangat besar bagi perusahaan, masyarakat sekitarnya, dan lingkungan.

Apa yang dimaksud **pencegahan dan proteksi kebakaran**?

- Proteksi kebakaran adalah salah satu bidang ilmu untuk mengurangi hilangnya nyawa dan properti dari kebakaran dengan cara mengendalikan dan memadamkan kebakaran. Proteksi kebakaran mencakup pencegahan kebakaran, deteksi kebakaran, penyediaan sistem untuk mengendalikan atau mitigasi kebakaran, dan penyediaan panduan pemadaman kebakaran.
- Pencegahan kebakaran adalah segala bentuk kegiatan atau program yang ditujukan untuk mencegah terjadinya atau muncul kebakaran di tempat kerja.

KLASIFIKASI BAHAN KIMIA BERBAHAYA

Pelbagai klasifikasi bahan kimia berbahaya yang terdapat di dunia antara lain adalah

- Klasifikasi Internasional: Sistem Harmonisasi Global (*Globally Harmonized System/GHS*)
- Klasifikasi berdasarkan NFPA (National Fire Protection Association)

Sistem Harmonisasi Global Klasifikasi dan Label pada Bahan Kimia

Sistem Harmonisasi Global Klasifikasi dan Label pada Bahan Kimia atau *Globally Harmonized System (GHS) of Classification and Labelling of Chemicals* (United Nations Economic Commission for Europe, 2005) adalah suatu sistem klasifikasi bahan-bahan kimia terpadu yang disepakati secara internasional untuk menggantikan standar-standar klasifikasi dan pelabelan bahan kimia yang digunakan secara berbeda-beda oleh berbagai negara. Pengembangan sistem klasifikasi global ini dimulai pada tahun 1992 oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa. Di Indonesia penerapan sistem klasifikasi dan pelabelan ini diatur oleh Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 87/M-IND/PER/9/2009. Sistem ini disusun untuk standarisasi dan harmonisasi untuk klasifikasi dan labeling bahan kimia. Sistem ini berdasarkan pendekatan komprehensif terhadap

- bahaya fisik, bahaya kesehatan, dan bahaya terhadap lingkungan;
- pembentukan proses klasifikasi berdasarkan data bahan kimia yang ada sebagai perbandingan untuk kriteria bahaya yang ditentukan;
- informasi yang dapat dipakai untuk komunikasi bahaya (*hazard communication*), tindakan perlindungan yang harus dicantumkan dalam label dan *Safety Data Sheets* (SDS) atau Lembar Data Keselamatan (LDK).

Sistem ini disusun untuk menstandarisasi dan mengharmonisasi sistem klasifikasi dan label karena terdapat perbedaan dalam pelbagai hal, antara lain tingkat kemudahan terbakar (*flammability*) serta penentuan akut oral toksisitas di pelbagai negara sebelum diterapkannya GHS (disajikan pada Tabel 15.1).

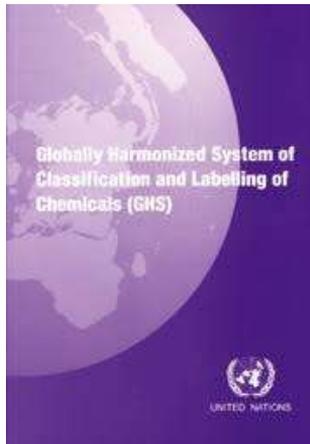
Tabel 15.1 Tabel Perbedaan Penetapan Kategori Toksisitas Oral Akut

Acute oral toxicity LD ₅₀ (mg/kg)				
Organization/Country/ Regulation or Standard	High	Hazard		Low
	0	< 50	< 500	< 5000
ANSI/US/A 129.1	< 50 Highly Toxic	> 50 < 500 Toxic	> 500 < 2000 Harmful	
OSHA/US/HCS	< 50 Highly Toxic	> 50 < 500 Toxic		
EPA/US/FIFRA	0 ≤ 50 Toxicity Category I	> 50 ≤ 500 Toxicity Category II	> 500 < 5000 Toxic Category III	> 5000 Toxicity Category IV
CPSC/US/FHSA	< 50 Highly Toxic	> 50 ≤ 500 Toxic		

Acute oral toxicity LD ₅₀ (mg/kg)						
Organization/Country/ Regulation or Standard	High		Hazard			Low
	0		< 50	< 500	< 5000	
GHS	≤ 5	> 5 ≤ 50	> 50 ≤ 300	> 300 ≤ 2000	> 2000 ≤ 5000	
DOT/US	< 5 Packing Group 1	> 5 < 50 Packing Group II	> 50 < 200 (solid) > 50 > 500 (liquid) Packing Group III			
NFPA/US	≤ 5 Hazard Category 4	> 5 ≤ 50 Hazard Category 3	> 50 ≤ 500 Hazard Category 2	> 500 ≤ 2000 Hazard Category 1	> 2000 Hazard Category 0	
NPCA/US/HMIS	≤ 1 Toxicity Rating 4	> 1 ≤ 50 Toxicity Rating 3	> 50 ≤ 500 Toxicity Rating 2	> 500 ≤ 5000 Toxicity Rating 1	> 5000 Toxicity Rating 0	
EU	< 25 Very Toxic	> 25 > 200 Toxic	> 200 < 2000 Harmful			
WHMIS/Canada	≤ 50 Very Toxic WHMIS Class D, Division 1, Subdivision A		> 50 ≤ 500 Toxic WHMIS Class D, Division 1, Subdivision B			
Australia/NOHSC	< 25 Very Toxic	> 25 < 200 Toxic	> 200 < 2000 Harmful			
Mexico	<1 Extremely Toxic	>20 < 50 Highly Toxic	> 50 < 500 Moderately Toxic	> 500 < 5000 Mildly Toxic		
Malaysia	< 25 Very Toxic		200 to 500 Harmful			
Japan	< 30 Poisonous			300 to 3000 Powerful		
Korea	< 25 Very Toxic	> 50 < 200 Toxic	> 200 < 2000 Harmful			

(Sumber: <http://www.osha.gov/dsg/hazcom/ghs.html>)

Sistem ini dituangkan dalam buku yang disebut "Purple Book" pada laman GHS. Gambar buku disajikan berikut ini.



Gambar 15.2 Globally Harmonized System (GHS)

(<http://www.osha.gov/dsg/hazcom/ghs.html>)

Klasifikasi bahaya fisik bahan kimia berdasarkan GHS dan diadopsi menjadi Peraturan Menteri Perindustrian RI Nomor 87/M-IND-PER/9/2009 disajikan pada Tabel 15.2.

Tabel 15.2 Klasifikasi Bahaya Berdasarkan GHS dan Peraturan Menteri Perindustrian RI

GHS	Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 87/M-IND/PER/9/2009
<i>Physical Hazards</i>	Bahaya Fisik
<i>Explosives</i>	Eksplusif
<i>Flammable gases</i>	Gas mudah menyala
<i>Flammable aerosols</i>	Aerosol mudah menyala
<i>Oxidizing gases</i>	Gas pengoksidasi
<i>Gases under pressure</i>	Gas bertekanan
<i>Flammable liquids</i>	Cairan mudah menyala
<i>Flammable solids</i>	Padatan mudah menyala
<i>Self-reactive substances</i>	Bahan dan campuran yang swareaktif
<i>Pyrophoric liquids</i>	Cairan piroforik
<i>Pyrophoric solids</i>	Padatan piroforik
<i>Self-heating substances</i>	Bahan dan campuran swapanas
<i>Substances which, in contact with water emit flammable gases</i>	Bahan dan campuran yang jika kontak dengan air melepaskan gas mudah menyala

GHS	Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 87/M-IND/PER/9/2009
<i>Oxidizing liquids</i>	Cairan pengoksidasi
<i>Oxidizing solids</i>	Padatan pengoksidasi
<i>Organic peroxides</i>	Peroksida organik
<i>Corrosive to metals</i>	Korosif pada logam
Health Hazards	Bahaya Kesehatan
<i>Acute toxicity</i>	Toksitas akut
<i>Skin corrosion/irritation</i>	Korosi/iritasi kulit
<i>Serious eye damage/eye irritation</i>	Kerusakan/iritasi serius pada mata
<i>Respiratory or skin sensitization</i>	Sensitisasi pernapasan atau kulit
<i>Germ cell mutagenicity</i>	Metagenisitas sel induk
<i>Carcinogenicity</i>	Karsinogenisitas
<i>Reproductive toxicology</i>	Toksik terhadap reproduksi
<i>Target organ systemic Toxicity—single exposure</i>	Toksitas sistemik pada organ sasaran spesifik setelah paparan tunggal
<i>Target organ systemic toxicity—repeated exposure</i>	Toksitas sistemik pada organ sasaran spesifik setelah paparan berulang
<i>Aspiration toxicity</i>	Bahaya aspirasi
Hazardous to the Aquatic Environment	Bahaya terhadap lingkungan akuatik
<i>Acute aquatic toxicity</i>	Toksitas akut lingkungan akuatik
<i>Chronic aquatic toxicity</i>	Toksitas kronik lingkungan akuatik
<i>Bioaccumulation potential</i>	Potensi bioakumulasi
<i>Rapid degradability</i>	Degradabilitas cepat

		
<ul style="list-style-type: none"> • Pengoksidasi 	<ul style="list-style-type: none"> • Mudah terbakar • Swa-reaktif • Piroforik • Menyala Sendiri • Menghasilkan Gas yang Mudah Terbakar • Peroksida Organik 	<ul style="list-style-type: none"> • Eksplosif • Swa-reaktif • Peroksida Organik

		
• Toksisitas Akut	• Korosif	• Gas Di Bawah Tekanan
		
• Karsinogen • Pemeka Pernapasan • Toksisitas Reproduksi • Toksisitas Organ Target • Mutagenisitas • Toksisitas Penghirupan	• Iritan • Pemeka Kulit • Toksisitas Akut (bahaya) • Efek Narkotika • Saluran Pernapasan • Iritasi	• Toksisitas Lingkungan

Gambar 15.3 Piktogram Bahaya GHS

(Sumber: Peraturan Menteri Perindustrian RI No. 87/M-IND-PER/9/2009 (United Nations Economic Commission for Europe, 2005)

Klasifikasi NFPA

Klasifikasi bahan kimia berbahaya berdasarkan NFPA 400 *Hazardous Materials Code* terdiri atas empat belas jenis, yaitu

1. padatan, cairan, dan gas korosif;
2. padatan mudah terbakar;
3. gas mudah terbakar;
4. cairan kriogenik mudah terbakar;
5. cairan kriogenik *inert*;
6. gas *inert*;
7. senyawaan formulasi peroksida organik;
8. padatan dan cairan oksidator;
9. gas oksidator;
10. cairan oksidator kriogenik;
11. padatan, cairan dan gas piroforik;
12. padatan, cairan dan gas toksik dan sangat toksik;
13. padatan, cairan dan gas tidak stabil/reaktif; dan
14. padatan dan cairan reaktif terhadap air.

Simbol bahaya dari NFPA atau fire hazard code digunakan untuk komunikasi bahaya (*hazard communication*). NFPA *hazard code* memberikan informasi singkat

serta cepat dari bahaya bahan kimia. Simbol ini berfungsi untuk memberikan proteksi terhadap masyarakat serta informasi bagi petugas pemadam kebakaran sehingga bahan kimia tersebut mudah dikenali karakteristik bahayanya. NFPA *hazard code* juga dapat membantu dalam perencanaan operasi pemadaman kebakaran yang efektif.

NFPA *hazard code* terdiri atas kategori bahaya terhadap kesehatan (*health hazard*), bahaya kebakaran (*fire hazard*), dan reaktivitas (*reactivity*). Tingkat keparahan dari tiap kategori keberadaan hazard ditunjukkan dengan nilai 0. NFPA *hazard code* dapat dilihat pada Gambar 15.4 dengan kategori sebagai berikut.

- Biru: *Health Hazard*

Health hazard dalam proses pemadaman kebakaran merupakan *single exposure*, yang dapat bervariasi dari beberapa detik hingga hitungan jam. Nilai *health hazard* ditentukan berdasarkan alat pelindung yang umumnya digunakan oleh petugas pemadam kebakaran.

- | | |
|--------|--|
| Nh = 0 | Pada kondisi terbakar dalam waktu singkat, material tidak menimbulkan bahaya. |
| Nh = 1 | Menyebabkan iritasi ringan, tetapi membutuhkan <i>approved airpurifying respirator</i> ketika terjadi pajanan singkat dengan material. |
| Nh = 2 | Menyebabkan ketidakmampuan sementara, kemungkinan menyebabkan cedera, dan membutuhkan penggunaan <i>respiratory protective equipment</i> dengan <i>independent air supply</i> ketika terpajan secara intensif atau singkat dengan material. |
| Nh = 3 | Membutuhkan <i>full body protection</i> dan menyebabkan cedera yang serius sementara ketika terjadi pajanan singkat dengan material. |
| Nh = 4 | Menyebabkan kematian dan cedera yang parah ketika terpajan dalam waktu sangat singkat dengan material. <i>Normal full protective clothing</i> dan <i>breathing apparatus</i> tidak cukup melindungi ketika kontak kulit atau inhalasi dengan material ini. |

- Merah: *Fire Hazard*

Fire hazard ditentukan berdasarkan kemampuan material untuk dapat terbakar.

- | | |
|--------|--|
| Nf = 0 | Material tidak akan terbakar |
| Nf = 1 | Material akan terbakar jika dipanaskan terlebih dahulu |

- Nf = 2 Material akan terbakar jika dipanaskan dengan pemanasan yang sedang (*moderately heated*)
- Nf = 3 Material dapat terbakar hampir di semua kondisi temperatur normal
- Nf = 4 Material sangat mudah terbakar (*very flammable gases or very volatile flammable liquids*)

- Kuning: *Reactivity Hazard*

Reactivity hazard ditentukan berdasarkan kemudahan material melepaskan energi dengan sendirinya atau saat kontak dengan air. Selain itu, juga dipertimbangkan reaksi material jika terdapat guncangan atau tekanan.

- Nr = 0 Material stabil walaupun dalam kondisi terbakar.
 - Material tidak bereaksi dengan air.
 - Material bersifat eksotermis pada temperatur lebih dari 300°C, tetapi kurang dari 500°C.
- Nr = 1 Material stabil, tetapi berubah tidak stabil pada temperatur dan tekanan yang dinaikkan.
 - Material mengurai bila terpajan udara, sinar, atau kelembapan.
 - Material bersifat eksotermis pada temperatur lebih dari 150°C, tetapi kurang dari 300°C.
- Nr = 2 Material yang sifat kimianya siap berubah secara keras pada temperatur dan tekanan yang dinaikkan.
 - Material yang bereaksi keras dengan air atau membentuk campuran berpotensi untuk meledak.
 - Material bersifat eksotermis pada temperatur kurang dari 150°C.
- Nr = 3 Material yang berkemampuan untuk meledak, tetapi memerlukan sumber penyalaan yang kuat atau harus dipanasi dulu sebelum dinyalakan.
- Nr = 4 Material yang siap meledak pada temperatur dan tekanan yang normal.

- Putih: *Specific Hazard* (Bahaya Khusus)

Bagian ini menyediakan informasi tambahan berarti bagi petugas pemadam kebakaran. Contohnya untuk material yang akan bereaksi keras dengan air, material tersebut diberi simbol W yang berarti "*No water*" atau "hindari penggunaan air" sehingga ketika material tersebut terbakar, tidak boleh dipadamkan dengan air.



Gambar 15.4 NFPA Hazard Code

(Sumber: NFPA)

BAHAN KIMIA YANG BERSIFAT TIDAK STABIL

Bahan kimia yang bersifat tidak stabil (*unstable chemical*) merupakan senyawa yang dapat menimbulkan reaksi spontan. Beberapa bahan kimia dapat menjadi tidak stabil karena

- terjadi perubahan temperatur;
- terkena sinar matahari;
- terkena guncangan; dan
- adanya inhibitor dan senyawa lain yang menginisiasi keadaan bahaya.

Beberapa contoh bahan kimia yang bersifat tidak stabil antara lain asetaldehida, etilen oksida, hidrogen sianida, nitrometan, peroksida organik, stiren, dan vinil klorida.

BAHAN KIMIA REAKTIF

Beberapa bahan kimia reaktif terhadap air atau udara sehingga dapat menimbulkan kebakaran. Jenis-jenis bahan kimia reaktif adalah sebagai berikut.

- **Bahan kimia reaktif terhadap udara (piroforik)**, yaitu bahan kimia yang terbakar secara spontan jika terkena udara tanpa adanya sumber api. Contoh:

aluminium hidrida, alminum alkil, dan fosfor kuning.

- **Bahan kimia reaktif terhadap air**, contohnya anhidrida karbida, hidrida, dan logam alkali (litium, natrium, kalium).
- **Jenis senyawa kimia yang reaktif lainnya**, contohnya aluminium trialkil, batu arang, batu bara, aatrium hidrosulfat. Batu arang pada kondisi tertentu dapat secara spontan terbakar, dan bergantung pada ukuran partikelnya: makin kecil partikel, makin besar *fire hazard*-nya.

Tabel 15.3 Bahan Kimia Sensitif terhadap Air

Nama bahan kimia	Reaksi yang terjadi (kontak dengan air)	
Asetil bromida	T	
Asetil klorida	T	V
Asetilkolin bromida	T	
Aluminium (bubuk)	F	
Aluminium basa	F	V
Aluminium isoprosida	F	
Aluminium litium hidrida	F	
Aluminium selenida	T	
Aluminium fospida	F	T
Boron tribromida	T	
Kalsium (butiran)	F	
Kalsium karbida	F	
Kalsium hidrida	F	
Kalsium fospida	F	T
Asam klorosulfonik	T	V
Disulfur diklorida	T	V
Etoksida, alkalin		V
Litium (logam)	F	V
Litium aluminium deuterida	F	
Litium aluminium dihidrida	F	
Litium borohidrida	F	
Litium hidrida	F	
Litium metoksida	F	
Magnesium (bubuk)	F	
Magnesium basa	F	
Magnesium fospida	F	T

Nama bahan kimia	Reaksi yang terjadi (kontak dengan air)	
Metoksida, basa	F	V
Nikel sulfida		T
Fospor pentasulfida	F	T
Fospor sekuisulfida	F	T
Fospor pentaklorida		T
Fospor pentabromida		T
Kalium (logam)	F	V
Kalium borohidrida	F	
Kalium metoksida	F	
Silikon tetraklorida		T V
Natrium (logam)	F	V
Natrium aluminium hidrida	F	
Natrium borohidrida	F	T
Natrium hidrida	F	
Sulfur diklorida		T V
Asam sulfur, oleum		T V
Sulfur tetraklorida		T V
Sulfuril klorida		T V
Tionil klorida		T V
Titanium tetraklorida		T V
Triklorofenilsilan		T
Triklorosilan	F	
Seng (bubuk)	F	
Seng basa		T V
Zirkonium (bubuk)	F	

Keterangan:

F = Gas mudah terbakar (*flammable gas*)

T = Produk Toksik (*toxic products*)

V = Sangat reaktif (*vigorous reaction*)

(Sumber: Carson & Mumford, 2002)

Tabel 15.4 Reaksi Senyawaan Hidrida terhadap Udara Lembap atau Air

Bahan		Reaksi (temperatur ambien)	
		Udara Lembap	Air
Aluminium borohidrida	$\text{Al}(\text{BH}_4)_3$	Mudah meledak	Mudah meledak
Aluminium hidrida	AlH_3	Lambat	Menengah
Antimoni hidrida (stibine)	SbH_3	Cepat	Sangat lambat
Arsenik hidrida	AsH_3	Menengah	Sangat lambat
Barium hidrida	BaH_2	Cepat	Cepat
Berillium borohidrida	$\text{Be}(\text{BH}_4)_2$	Mudah meledak	Mudah meledak
Berillium hidrida	BeH_2	Lambat	Lambat
Kalsium hidrida	CaH_2	Menengah cepat	Cepat
Cerium hidrida	CeH_3	Piroforik	Lambat
Caesium hidrida	CsH	Menyala	Sedikit reaktif
Tembaga hidrida	CuH	Cepat	Lambat
Diborana	B_2H_6	Mudah meledak	Menengah
Timbal hidrida	PbH_4	Sangat cepat (gas - tidak stabil)	-
Litium aluminium hidrida	LiAlH_4	Cepat	Sedikit reaktif
Litium borohidrida	LiBH_4	Cepat	Kuat
Litium hidrida	LiH	Dapat menyala	Cepat
Magnesium aluminium Hidrida	$\text{Mg}(\text{AlH}_4)_2$	Kuat	Kuat
Magnesium borohidrida	$\text{Mg}(\text{BH}_4)_2$	Sangat Lambat	Sedikit reaktif
Magnesium hidrida	MgH_2	Dapat menyala	Cepat
Pentaboran	B_5H_9	Menyala	Cepat
Fosfor hidrida (Fosfine)	PH_3	Piroforik	Sangat lambat
Kalium borohidrida	KBH_4	Sangat lambat	Sangat lambat
Kalium hidrida	KH	Menyala	Kuat
Rubidium hidrida	RbH	Menyala	Sedikit reaktif
Silikon hidrida	SiH_4	Mudah meledak	Cepat
Natrium aluminium hidrida	NaAlH_4	Cepat	Menyala, dapat meledak
Natrium borohidrida	NaBH_4	Lambat	Lambat
Natrium hidrida	NaH	Menyala	Sedikit reaktif
Uranium hidrida	UH_3	Piroforik	Menengah

(Sumber: Carson & Mumford, 2002)

OKSIDATOR

Oksidator tidak bersifat mudah terbakar, tetapi mempercepat atau mendukung reaksi oksidasi dari material yang mudah terbakar. Padatan dan cairan mudah terbakar harus disimpan jauh dan terpisah dari oksidator. Beberapa contoh oksidator adalah nitrat, asam nitrit, nitrit, peroksida anorganik, klorat, klorit, dikromat, hipoklorit, perklorat, permanganat, persulfat, dan halogen.

BAHAN-BAHAN KIMIA YANG INKOMPATIBEL

Senyawa yang saling inkompatibel (*incompatible*) dapat menimbulkan *fire hazard* dan harus dipisahkan (segregasi). Tabel inkompatibilitas bahan-bahan kimia (*chemical incompatibility chart*) disajikan pada Tabel 15.5.

Tabel 15.5 Tabel Inkompabilitas Bahan-bahan Kimia Berdasarkan Klasifikasi Kelompoknya

Grafik Kesesuaian Penyimpanan Barang Berbahaya dan Cairan Mudah Terbakar													
Klasifikasi atau Resiko tambahan													
Gas Mudah Terbakar	OK disimpan bersama	OK disimpan bersama	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m	
Gas Mudah Terbakar tidak beracun	OK disimpan bersama	OK disimpan bersama	OK disimpan bersama	OK disimpan bersama	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m
Gas beracun	Dipisah minimal 3m	OK disimpan bersama	Mungkin tidak sesuai lihat MSDS & catatan	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m
Gas Oksidator	Dipisah minimal 3m	OK disimpan bersama	Dipisah minimal 3m	OK disimpan bersama	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m
Cairan Mudah terbakar + menyala	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	OK disimpan bersama	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m
Bahan padat mudah terbakar	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	OK disimpan bersama	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 3m	Mungkin tidak sesuai lihat MSDS & catatan
Terbakar Tiba-tiba	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m	OK disimpan bersama	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m
Berbahaya saat basah	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	OK disimpan bersama	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m
Agon Oksidator	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Mungkin tidak sesuai lihat MSDS & catatan	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m
Peroksida Organik	Harus dipisahkan	Harus dipisahkan	Harus dipisahkan	Harus dipisahkan	Harus dipisahkan	Harus dipisahkan	Harus dipisahkan	Harus dipisahkan	Harus dipisahkan	Harus dipisahkan	OK disimpan bersama	Harus dipisahkan	Dipisah minimal 3m
Substansi Beracun	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Harus dipisahkan	OK disimpan bersama	Dipisah minimal 5m
Korosif	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m	Mungkin tidak sesuai lihat MSDS & catatan	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 5m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 3m	Dipisah minimal 5m	Mungkin tidak sesuai lihat MSDS & catatan

(Sumber: <http://www.docstoc.com/docs/15930771/DANGEROUS-GOODS-COMBUSTIBLE-LIQUIDS-STORAGE-COMPATIBILITY-CHART>)

Kelompok bahan kimia bermuatan	Bahan Kimia Reaktif																						
	1. Asam mineral yang tidak mengoksidasi	2. Asam belerang	3. Asam nitrat	4. Asam organik	5. Kautsik	6. Ammonia	7. Aliphaticamines	8. Alkanolamina	9. Aromaticamines	10. Amida	11. Anhidrida organik	12. Isosianat	13. Vinil asetat	14. Acrylates	15. Substituted allyls	16. Alkilena oksida	17. Epiklorohidrin	18. Keton	19. Aldehid	20. Alkohol, glikol	21. Phenols, Cresols	22. Larutan Kaprolaktam	
1. Asam mineral yang tidak mengoksidasi		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X		A	F			
2. Asam belerang	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3. Asam nitrat	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
4. Asam organik		X			X	X	X	X	C			X				X	X			F			
5. Kautsik	X	X	X	X							X	X				X	X		X	X	X	X	
6. Amonia	X	X	X	X						X	X	X	X			X	X		X				
7. Alifatikamina	X	X	X	X							X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
8. Alkanolamina	X	X	X	X							X	X	X	X	X	X	X	B	X				
9. Amina aromatik	X	X	X	C							X	X							X				
10. Amida	X	X	X			X						X										X	
11. Anhidrida organik	X	X	X		X	X	X	X	X														
12. Isosianat	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X						D				X		X	
13. Vinil asetat	X	X	X			X	X	X															
14. Akrilat		X	X				X	X															
15. Substituted allyls		X	X				X	X					D										
16. Alkilena oksida	X	X	X	X	X	X	X	X															
17. Epiklorohidrin	X	X	X	X	X	X	X	X															
18. Keton		X	X				X	B															
19. Aldehida	A	X	X		X	X	X	X	X														
20. Alkohol, glikol	E	X	X	F	X		X					X											
21. Fenol, Kresol		X	X		X		X			X													
22. Larutan Kaprolaktam		X			X		X					X											
30. Olefin		X	X																				
31. Parafin																							
32. Hidrokarbon aromatik				X																			
33. Campuran hidrokarbon lainnya				X																			
34. Ester		X	X																				
35. Vinil halida				X																		X	
36. Hidrokarbon terhalogenasi			G			H		I															
37. Nitril		X																					
38. Karbon disulfida							X	X															
39. Sulfolana																							

Kelompok bahan kimia bermuatan	Bahan Kimia Reaktif																					
	1. Asam mineral yang tidak mengoksidasi	2. Asam belerang	3. Asam nitrat	4. Asam organik	5. Kautsik	6. Ammonia	7. Aliphaticamines	8. Alkanolamina	9. Aromaticamines	10. Amida	11. Anhidrida organik	12. Isosianat	13. Vinil asetat	14. Acrylates	15. Substituted allyls	16. Alkilena oksida	17. Epichlorohydrin	18. Keton	19. Aldehid	20. Alkohol, glikol	21. Phenols, Cresols	22. Larutan Kaprolaktam
40. Glikol eter		X										X										
41. Eter		X	X																			
42. Senyawa nitro					X	X	X	X	X													
43. Beberapa macam larutan air		X										X										

X = Hindari, karena berbahaya.

(Sumber: Nolan, 1996)

- Isoforon (18) dan mesitil oksida (18) tidak sesuai dengan kelompok 8, Alkanolamina.
- Asam akrilik (4) tidak sesuai dengan kelompok 9, amina aromatik.
- Alil alkohol (15) tidak sesuai dengan kelompok 12, isosianat.
- Furfuril alkohol (20) tidak sesuai dengan kelompok 1, asam mineral yang tidak mengoksidasi.
- Furfuril alkohol (20) tidak sesuai dengan kelompok 4, asam organik.
- Dikloroetil eter (36) tidak sesuai dengan kelompok 2, asam sulfur.
- Trikloroetilena (36) tidak sesuai dengan kelompok 5, kaustik.
- Etilenediamin (7) tidak sesuai dengan etilen diklorida (36).

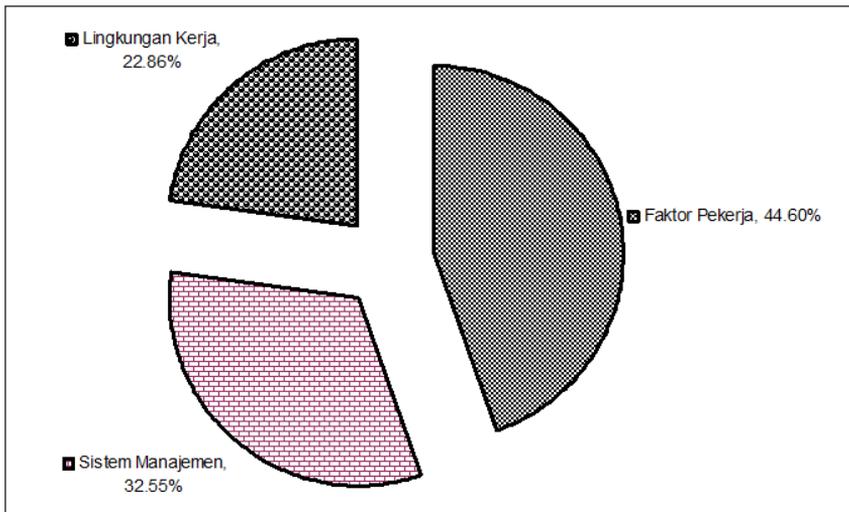
FAKTOR UTAMA PENYEBAB TERJADINYA KEBAKARAN PADA INDUSTRI KIMIA

Secara garis besar penyebab kebakaran pada industri kimia dapat dikategorikan dalam tiga kategori berikut ini.

- Faktor manusia adalah faktor penyebab terbesar terjadinya kecelakaan kebakaran pada industri kimia. Hal ini disebabkan rendahnya kompetensi pekerja khususnya pengetahuan pekerja terhadap bahan kimia yang mereka tangani. Hasil penelitian yang pernah penulis lakukan pada beberapa industri kimia hilir menunjukkan 44,06% kejadian kecelakaan bahan kimia disebabkan oleh faktor manusia; 32,55% adalah faktor lemahnya sistem manajemen pada

industri kimia; dan 22,86% disebabkan oleh buruknya lingkungan/tempat kerja (Gambar 15.5).

Kesalahan akibat faktor manusia yang sering terjadi di antaranya adalah kesalahan penyimpanan bahan kimia, kesalahan pencampuran, kesalahan penggunaan, kesalahan dalam transportasi, kesalahan *setting* parameter proses, dan kesalahan prosedur proses kimia. Kesalahan-kesalahan tersebut terjadi akibat kurangnya pengetahuan pekerja tentang sifat bahaya bahan kimia, simbol bahaya bahan kimia, sifat fisik dan kimia bahan kimia, dan ketidakmampuan memahami Lembar Data Keselamatan Bahan Kimia (LDKB).



Gambar 15.5 Tiga Faktor Utama Penyebab Kecelakaan Bahan Kimia pada Industri Kimia Hilir

2. Faktor Sistem Manajemen, yaitu kelemahan sistem manajemen pengendalian bahaya dalam penanganan bahan kimia, merupakan salah satu faktor penyebab sering terjadinya kecelakaan bahan kimia, termasuk kebakaran pada industri kimia. Gambar 15.5 menunjukkan bahwa faktor sistem manajemen menjadi penyebab 32,55% kecelakaan bahan kimia pada industri kimia hilir. Kelemahan pada sistem manajemen penanganan bahan kimia pada industri kimia yang banyak ditemukan di antaranya adalah pada sistem manajemen penyimpanan bahan kimia, sistem manajemen pengendalian bahaya proses, serta sistem manajemen transportasi dan distribusi.
3. Faktor lingkungan merupakan kondisi lingkungan tempat penyimpanan, proses/produksi, dan peralatan yang digunakan. Buruknya kondisi lingkungan kerja atau dikenal dengan *unsafe condition* menjadi penyebab di urutan ketiga terhadap terjadinya kecelakaan bahan kimia pada industri, yaitu sebesar 22,86%.

Beberapa contoh kondisi lingkungan yang tidak sesuai dengan standar pada industri kimia adalah tempat penyimpanan bahan kimia yang tidak memadai, suhu ruangan yang tidak terkontrol, ventilasi yang buruk, peralatan yang tidak terawat atau rusak dan sudah tua, peralatan yang tidak memadai, sistem kontrol proses yang tidak memadai, sistem keselamatan proses yang tidak memadai dan lain sebagainya.

SUMBER BAHAYA KEBAKARAN PADA INDUSTRI KIMIA

Sumber bahaya kebakaran pada industri kimia yang paling sering menyebabkan kebakaran pada industri kimia adalah

1. bahaya bahan kimia mudah terbakar;
2. bahaya listrik statis; dan
3. bahaya reaksi kimia tidak terkontrol (reaktivitas kimia).

Bahaya Bahan Kimia Mudah Terbakar

Bahan kimia mudah terbakar atau menyala (*flammable*) dapat dikelompokkan ke dalam tiga kelompok, yaitu

1. *extremely flammable*: padatan atau cairan yang memiliki titik nyala (*flash point*) di bawah 0°C dan titik didih lebih rendah atau sama dengan 35°C;
2. *highly flammable*: padatan atau cairan yang memiliki titik nyala 0°C–2°C; dan
3. *flammable*: Bila cairan, bahan yang mengandung alkohol kurang dari 24%-volume, dan atau mempunyai titik nyala $\leq 60^{\circ}\text{C}$ (140°F), akan menyala apabila terjadi kontak dengan api, percikan api, atau sumber nyala lainnya, pada tekanan 760 mmHg. Pengujiannya dapat dilakukan dengan metode *Closed-up Test*. Bila padatan, bahan bukan cairan, temperatur dan tekanan standar dengan mudah menyebabkan terjadinya kebakaran melalui gesekan, penyerapan uap air, atau perubahan kimia secara spontan; dan apabila terbakar, dapat menyebabkan kebakaran terus-menerus dalam 10 detik. Pengujian dapat pula dilakukan dengan *Seta Closed-cup Flash Point Test*, dengan titik nyala di bawah 40°C.

(Sumber: PP 74 Tahun 2001)

Sementara itu, di dalam Sistem Harmonisasi Global (*Global Harmonize System*), bahan kimia dapat terbakar dikelompokkan ke dalam beberapa kelompok yang lebih spesifik, yaitu

1. gas mudah menyala;
2. aerosol mudah menyala;
3. gas pengoksidasi;

4. cairan mudah menyala;
5. padatan mudah menyala;
6. zat dan campuran swareaktif;
7. cairan piroforik;
8. padatan piroforik;
9. zat dan campuran swapanas;
10. zat dan campuran jika kontak dengan mengeluarkan gas mudah menyala;
11. cairan pengoksidasi;
12. padatan pengoksidasi; dan
13. peroksida organik.

Semua kelompok bahan kimia tersebut di atas dapat menimbulkan kebakaran dan ledakan.

Ada tiga sifat fisik bahan kimia mudah terbakar mulai dari tetrahedron api yang memengaruhi sifat nyala atau keterbakaran suatu uap atau gas mudah terbakar sebagai berikut.

1. Titik nyala (*flash point*), yaitu suhu terendah saat suatu zat memberikan cukup uap dan akan menyala (terbakar sekejap) bila ada sumber panas dengan energi yang cukup. Jadi, suatu bahan kimia mudah terbakar belum akan terbakar jika belum mencapai titik nyalanya meskipun unsur segi tiga api sudah terpenuhi (oksigen, uap mudah terbakar, dan sumber panas). Informasi titik nyala (*flash point*) suatu bahan kimia dapat dilihat di dalam Lembar Data Keselamatan Bahan atau MSDS. Berikut beberapa contoh titik nyala bahan kimia mudah terbakar.

Tabel 15.6 Titik Nyala Beberapa Bahan Kimia

NAMA BAHAN	TITIK NYALA (°C)
Kerosin	38
Bensin	-43 s.d. -38
Butan	-60
Propan	-104
Asetilin	-18
Etanol (spiritus)	-12
Aseton	-19

2. Daerah bisa-terbakar (*flammable range*), yaitu batas konsentrasi volume campuran antara uap bahan bakar dan udara agar campuran tersebut dapat menyala bila diberi panas yang cukup. Uap atau gas bahan kimia mudah terbakar hanya akan terbakar apabila konsentrasinya berada dalam daerah bisa-terbakar dari uap atau gas tersebut.

Batas daerah bisa-terbakar bawah disebut Batas Bisa Terbakar Bawah (BBTB) atau juga dikenal dengan *Lower Flammable Limit* (LFL) atau *Lower Explosive Limit* (LEL). Batas daerah bisa-terbakar atas disebut Batas Bisa Terbakar Atas (BBTA) atau juga dikenal dengan *Upper Flammable Limit* (UFL) atau *Upper Explosive Limit* (UEL).

Gambar sederhana berikut dapat memudahkan pemahaman mengenai daerah bisa-terbakar suatu uap atau gas mudah terbakar.



Gambar 15.6 Daerah Bisa-Terbakar (*Flammable Range*)

Daerah bisa-terbakar suatu gas atau uap digambar dengan warna merah. Artinya pada area daerah bisa-terbakar tersebut konsentrasi uap yang ada di udara memadai bagi proses terjadinya nyala atau pembakaran. Daerah di bawah BBTB adalah daerah tidak-bisa-terbakar karena jumlah uap atau gas di udara tidak memadai (miskin) bagi terjadinya penyalaan dan daerah di atas BBTA juga tidak bisa terbakar karena jumlah uap atau gas di udara terlalu banyak (kaya) untuk terjadinya nyala atau pembakaran.

Sebagai contoh, aplikasi sehari-hari yang sering kita lihat adalah proses pembakaran pada karburator mobil, di mana di dalam karburator mobil tersebut terjadi pembakaran bahan bakar dan energi pembakaran yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan mesin mobil.



Gambar 15.7 Karburator Mobil Tempat Pembakaran Bahan Bakar

Karburator tersebut dipenuhi unsur segi tiga api, yaitu adanya bahan bakar berupa bensin yang dikabutkan di dalam karburator, kemudian udara yang disuplai melalui pompa udara, dan sumber panas atau nyala dari busi. Namun, proses pembakaran tidak akan terjadi apabila suplai bensin terlalu banyak, yang di bengkel disebut “karburator banjir” atau “busi terendam”, sehingga mesin mobil tidak dapat dihidupkan. Demikian pula sebaliknya: apabila suplai bensin terlalu kecil, mesin mobil juga tidak dapat dihidupkan, yang di bengkel disebut “mobil masuk angin”. Kejadian ini sebenarnya adalah tidak cukupnya atau berlebihnya konsentrasi uap bahan bakar di dalam karburator tersebut sehingga menyebabkan proses pembakaran tidak dapat terjadi.

Informasi daerah bisa-terbakar dapat dilihat di dalam Lembar Data Keselamatan Bahan (LDKB) atau dikenal dengan MSDS. Berikut beberapa contoh daerah bisa-terbakar dari beberapa bahan kimia mudah terbakar.

Tabel 15.7 Daerah Bisa-Terbakar Beberapa Bahan Kimia

NAMA BAHAN	BATAS KONSENTRASI
Bensin	1,4–7,6 %
Kerosin	0,7–5 %
Butan	1,8–8,4 %
Propan	2,1–9,5 %
Asetilin	2,5–100 %
Etanol (spiritus)	3,3–19 %
Aseton	2,6–13 %
Hidrogen	4–75 %

Salah satu upaya pengendalian atau pencegahan kebakaran uap atau gas bahan kimia kimia adalah dengan mencegah konsentrasi uap atau gas masuk dalam daerah bisa-terbakar atau menjaga konsentrasi uap atau gas selalu berada di bawah BBTB. Salah satu upaya pengendalian rekayasa yang dapat dilakukan adalah dengan membuat sistem ventilasi ruangan tempat penyipaman atau proses bahan kimia untuk menjaga agar tidak terjadi akumulasi gas atau uap dalam ruangan. Jika akumulasi konsentrasi gas atau uap sulit untuk dihindari, dapat dilakukan strategi pengendalian lain dengan penetapan zona berbahaya yang akan dibahas lanjut dalam bab ini.

Energi Penyalaan, yaitu besar energi minimum yang berbentuk panas yang diperlukan untuk menimbulkan api bila mengenai campuran dari daerah bisa-

terbakar. Beberapa bahan kimia memiliki energi penyalaan yang sangat rendah, misalnya gas mudah terbakar pada umumnya memiliki energi penyalaan yang sangat rendah, sehingga sedikit energi panas yang muncul akibat gesekan benda keras dapat menyalakan gas tersebut.

Untuk mengendalikan potensi kebakaran akibat adanya energi penyalaan, beberapa pengendalian yang dapat dilakukan misalnya adalah mencegah terbentuknya percikan (*spark*) dari listrik dan gesekan dari mesin yang dapat menimbulkan panas, atau menggunakan bahan yang tidak menimbulkan panas apabila terjadi gesekan atau benturan atau kedad terhadap gas dan uap.

Bahaya Listrik Statis

Bahaya listrik statis dapat terjadi pada beberapa lokasi, seperti pada lokasi proses, penyimpanan, dan transfer bahan kimia. Beberapa bahan kimia dalam bentuk gas atau uap memiliki energi penyalaan yang sangat rendah, misalnya sebagai berikut.

Metana	: 0,29 milijoule
Propana	: 0,25 milijoule
Siklopropana	: 0,18 milijoule
Etilen	: 0,08 milijoule
Asetilen	: 0,017 milijoule
Hidrogen	: 0,017 milijoule

(Handbook of Fire and Explosion)

Bahaya listrik statis dapat terjadi pada proses transfer bahan kimia dengan cara mengalirkan, menyemprotkan (*spray*) cairan bahan kimia, mencampur, atau mengaduk bahan kimia. Jika suatu gas mengandung cairan, uap air, atau partikel padat seperti karat atau kotoran lain juga dapat timbul atau terhasikan listrik statis.

Terbentuknya listrik statis pada proses-proses tersebut dapat dicegah dengan memasang arde (*grounded*) pada sistem proses tersebut. Sistem arde dipasang untuk mengalirkan muatan listrik yang terbentuk ke tanah sehingga tidak terjadi akumulasi muatan listrik permukaan atau bahan kimia tersebut. Dapat juga dilakukan cara mengurangi laju aliran cairan atau padatan sehingga laju pembentukan muatan listrik statis juga menjadi berkurang.

Bahaya Reaktivitas Kimia

Bahaya reaktivitas kimia yang dimaksud di sini adalah situasi potensial terjadinya reaksi kimia yang tidak terkontrol yang dapat mengakibatkan terjadinya kecelakaan dan secara langsung atau tidak langsung menyebabkan kerugian pada pekerja, aset perusahaan, dan lingkungan. Reaksi tidak terkontrol tersebut dapat disertai oleh naiknya temperatur dan tekanan, pelepasan gas, atau energi. Bahaya reaktivitas bahan kimia analog dengan bahaya bahan kimia lainnya seperti beracun, mudah terbakar, mudah meledak, dan sebagainya. Bahaya reaktivitas kimia adalah suatu konsep yang kompleks sehingga sampai saat ini belum ada satu pun parameter tunggal yang dikembangkan yang secara lengkap dapat mengkarakterisasi semua aspek reaktivitas kimia.

Potensi terjadinya reaksi tidak terkontrol dapat terjadi dalam banyak bentuk yang melibatkan satu atau lebih sifat dari bahan kimia tersebut dan kondisi bahan kimia tersebut diproses atau digunakan. Hal ini dapat dilihat dari kesimpulan yang diambil oleh U.S. Chemical Safety and Hazards Investigation Board dari hasil investigasi bahaya reaktivitas bahan kimia yang menyatakan bahwa pendekatan regulasi yang menggunakan daftar bahan kimia untuk bahaya reaktivitas adalah kurang tepat. Dengan demikian, perlu adanya perbaikan terhadap manajemen bahaya reaktivitas bahan kimia yang tidak hanya mengacu pada daftar bahan kimia sesuai dengan regulasi yang ada, tetapi juga melihat bahaya dari kombinasi bahan-bahan kimia dan kondisi proses pada industri.

Ada tiga parameter yang dijadikan sebagai acuan untuk mendesain proses kimia yang aman:

1. energi potensial dari bahan kimia yang digunakan;
2. laju potensial reaksi dan/atau dekomposisi; dan
3. peralatan produksi dan proses.

Faktor pertama yang dipertimbangkan untuk mendesain proses kimia yang aman adalah energi yang terlibat dalam proses reaksi kimia tersebut. Ada dua jenis energi yang harus diperhatikan, yaitu eksotermik dan endotermik. Kedua jenis energi ini dapat diperoleh dari literatur, perhitungan termodinamika, atau pengukuran dengan peralatan/instrumen di laboratorium. Faktor kedua adalah laju reaksi dari suatu reaksi kimia, yang bergantung pada temperatur, tekanan, dan konsentrasi. Laju reaksi baik dalam kondisi normal maupun abnormal harus ditentukan atau diperhitungkan untuk mendesain suatu proses kimia yang lebih aman. Faktor ketiga adalah desain proses dan peralatan produksi yang dapat mengakomodasi dan mengantisipasi faktor pertama dan kedua, seperti pemindahan panas yang

dihasilkan oleh reaksi eksotermik.

Ketiga parameter tersebut saling berinteraksi satu sama lain. Sebagai contoh, sejumlah energi potensial yang besar dapat dipindahkan dalam proses yang normal jika laju pelepasan energi relatif kecil dan dikontrol dengan kapasitas pendingin yang mencukupi. Untuk mengetahui apakah kapasitas pendingin mencukupi untuk memindahkan pelepasan energi, pendekatan dengan studi bahaya reaktivitas kimia dapat dilakukan. Dalam banyak kasus, pendekatan yang dilakukan adalah pendekatan teoretis, seperti studi literatur, *database*, dan program *software*-meskipun pendekatan teoretis ini tidak sepenuhnya memadai untuk merancang proses kimia. Dalam tahapan tertentu diperlukan eksperimen dan pengukuran tergantung dari reaktivitas kimia yang terkait untuk mendapatkan desain proses yang lebih sempurna.

Ada tiga situasi yang melibatkan bahaya reaktivitas bahan kimia, yaitu

1. penyimpanan, penanganan, dan pengemasan (misalnya gudang atau tangki penyimpanan bahan kimia di mana tidak ada proses pencampuran atau reaksi kimia yang dilakukan);
2. pencampuran dan proses fisika (misalnya pencampuran, pengenceran, pemaduan atau *blending*, pengeringan, distilasi, absorpsi, filtrasi, *crushing*, atau pemanasan yang tidak melibatkan reaksi kimia); dan
3. proses reaksi kimia (misalnya reaksi desalinasi, desulfirisasi, alkilasi, isomerisasi, polimerisasi, hidrogenasi, dan sebagainya).

Reaksi yang tidak terkontrol dapat menyebabkan terjadinya bahaya reaktivitas kimia. Dampak dari reaksi kimia yang tidak terkontrol adalah pelepasan energi, panas, dan gas dalam jumlah besar, yang selanjutnya dapat memicu terjadinya ledakan, kebakaran, dan pelepasan gas beracun.

Bahaya reaktivitas muncul karena adanya kecenderungan bahan kimia untuk bereaksi atau mengalami dekomposisi. Ada empat jalur potensi bahaya reaktivitas yang dapat terjadi, yaitu

1. reaksi eksotermik dengan udara;
2. reaksi dengan air;
3. bercampur dengan bahan kimia lain; dan
4. bereaksi sendiri atau mengalami dekomposisi.

Dampak bahaya yang dapat ditimbulkan oleh keempat jalur reaksi tersebut di atas adalah ledakan, pelepasan gas mudah terbakar, dan pelepasan gas beracun. Sebagai contoh adalah senyawa-senyawa hidrida yang bereaksi dengan air atau udara kemudian memicu terjadinya ledakan dan kebakaran.

Langkah pertama untuk mengetahui apakah pada suatu industri terdapat bahaya reaktivitas bahan kimia atau tidak adalah dengan melakukan skrining awal (*preliminary screening*) dengan mengajukan dua belas pertanyaan. Skrining awal merupakan metode cepat dalam mengidentifikasi ada tidaknya bahaya reaktivitas dalam proses tertentu. Terdapat dua belas pertanyaan yang harus di jawab secara komprehensif yang melibatkan beberapa departemen (produksi, laboratorium, rekayasa, penyimpanan, dan sebagainya) untuk dapat memutuskan ada tidaknya bahaya reaktivitas pada proses tersebut. Jika terdapat bahaya kimia reaktivitas pada proses tertentu, perlu diadakan pengkajian bahaya reaktivitas dan cara penanganan bahaya reaktivitas tersebut. Dua belas pertanyaan yang harus dijawab adalah sebagai berikut.

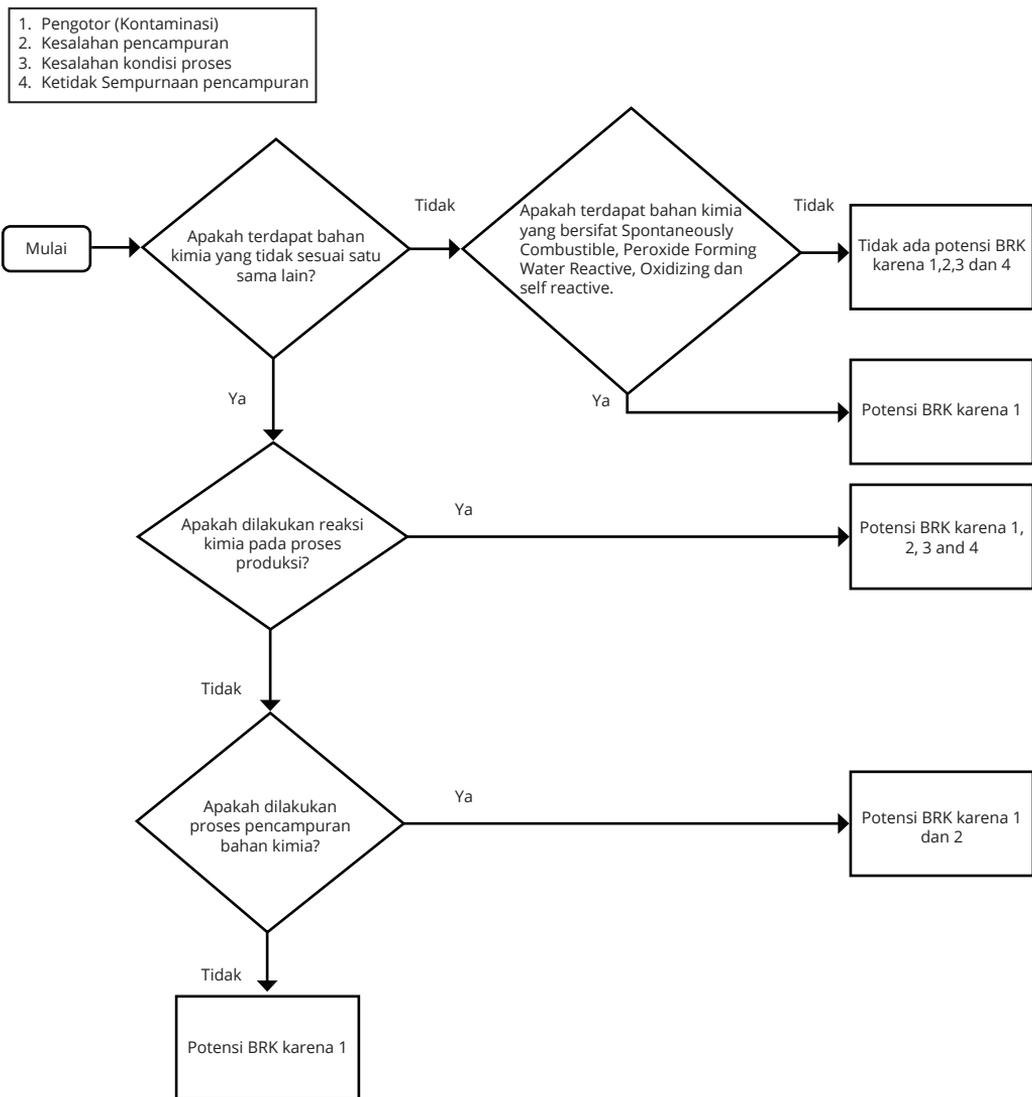
1. Apakah ada proses reaksi kimia yang dilakukan pada proses tersebut?
(retakan katalitis/*catalytic cracking*, elektrokimia/*electrochemistry*, polimerisasi, dan lain-lain)
2. Apakah ada proses pencampuran dari bahan kimia yang berbeda?
(pemaduan/*blending*, pengenceran pelarut, dan lain-lain)
3. Apakah ada proses fisika lain yang dilakukan?
(distilasi, pengeringan, penyaringan, penggerusan, dan lain-lain)
4. Apakah ada bahan berbahaya yang disimpan atau digunakan?
(mudah terbakar, korosif, beracun, dan lain-lain)
5. Apakah hanya proses pembakaran dengan udara yang dilakukan?
(perebusan/*boiler*, penyalan/*flare*, pembakaran/*burner*, dan lain-lain)
6. Apakah ada panas yang dihasilkan dari proses pencampuran atau proses fisika yang dilakukan?
7. Apakah ada bahan kimia yang bersifat terbakar secara spontan apabila kontak dengan udara?
8. Apakah ada bahan kimia pembentuk peroksida?
9. Apakah ada bahan kimia yang bersifat reaktif terhadap air?
10. Apakah ada bahan kimia yang bersifat pengoksidasi?
11. Apakah ada bahan kimia yang bersifat swareaktif (*self-reactive*)?
12. Dapatkah bahan kimia yang inkompatibel saling kontak satu sama lain?

Ada lima faktor pemicu bahaya reaktivitas kimia, yaitu

1. pengotoran (kontaminasi);
2. kesalahan pencampuran;
3. kesalahan kondisi proses;
4. 4ketidaksempurnaan pencampuran; dan
5. kesalahan penyimpanan.

Untuk menentukan pemicu mana yang paling mungkin terjadi dari suatu proses industri, dilakukan skrining awal pemicu bahaya reaktivitas kimia seperti pada Gambar 15.8. Ada empat pertanyaan berikut ini dalam skrining awal ini yang dapat menentukan pemicu yang paling mungkin terjadi.

1. Apakah terdapat bahan kimia yang tidak sesuai satu sama lain?
2. Apakah terdapat bahan kimia yang bersifat terbakar spontan (*spontaneously combustible*, membentuk peroksida (*peroxide forming*), reaktif terhadap air (*water reactive*), mengoksidasi (*oxidizing*), dan swareaktif (*self-reactive*)?
3. Apakah dilakukan reaksi kimia pada proses produksi?
4. Apakah dilakukan proses pencampuran bahan kimia?



Gambar 15.8 Skrining Faktor Pemicu Bahaya Reaktivitas Kimia

PROGRAM PENCEGAHAN DAN PROTEKSI KEBAKARAN INDUSTRI KIMIA

Pencegahan dan proteksi kebakaran (*fire prevention and protection*) pada industri kimia merupakan aspek paling utama dalam program perlindungan kebakaran. Perencanaan yang baik dalam aktivitas pencegahan kebakaran akan dapat menyelamatkan miliaran rupiah dan juga nyawa manusia akibat kebakaran. Salah satu penyebab utama terjadinya kebakaran pada berbagai industri kimia adalah tindakan tidak aman atau kondisi lingkungan yang kurang baik. Dengan memperbaiki tindakan tidak aman (*unsafe act*) dan kondisi lingkungan kerja, penyebab terjadinya kebakaran dapat dikurangi.

Program proteksi kebakaran membutuhkan investasi baik personel kebakaran, peralatan kebakaran, waktu, dan biaya-biaya lain yang cukup besar bagi perusahaan, namun hal ini dapat dijustifikasi dengan memperlihatkan bukti-bukti kerugian yang diakibatkan oleh kebakaran. Investasi yang ditanamkan untuk program pencegahan kebakaran sangatlah jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan kerugian yang dapat terjadi akibat kebakaran.

Program pencegahan kebakaran pada industri kimia dapat dikelompokkan dalam empat program utama, yaitu:

1. **Program rekayasa (*engineering*)**, yaitu program yang meliputi perencanaan bangunan yang aman dari kebakaran dan perencanaan proses yang aman dari kebakaran, misalnya instalasi sistem deteksi kebakaran aktif dan instalasi sistem proteksi kebakaran pasif.
2. **Program edukasi**, yaitu program untuk meningkatkan kesadaran pekerja terhadap kebakaran, yaitu dengan cara memberikan pelatihan-pelatihan tentang kebakaran, identifikasi penyebab kebakaran, bahaya kebakaran, pencegahan kebakaran, dan evakuasi jika terjadi kebakaran.
3. **Program penegakan sistem**, yaitu program untuk memastikan bahwa semua sistem pencegahan kebakaran sesuai (*comply*) dengan standar kebakaran (*fire code*) yang ada. Maka, harus dilakukan inspeksi terhadap semua fasilitas pencegahan kebakaran secara berkala.
4. **Program manajemen bahan kimia dan proses kimia**, yaitu program untuk mengendalikan semua potensi bahaya kebakaran yang disebabkan oleh bahan kimia dapat terbakar atau proses kimia yang dapat menimbulkan kebakaran.

Program rekayasa (*engineering*) memegang peranan yang sangat penting dalam pencegahan kebakaran. Tanpa didasari oleh prinsip teknis yang baik, program edukasi dan penegakan sistem tidak akan optimal dalam mencegah terjadinya kebakaran. Prinsip rekayasa dalam pencegahan kebakaran yang harus diperhatikan

adalah desain dan konstruksi bangunan, bahan bangunan, pemasangan sistem perlindungan kebakaran, pasokan air untuk pemadam, desain dan rencana pengembangan bangunan, sistem pemadam, dan jaringan pasokan air pemadam. Masukan dari inspektur kebakaran atau ahli kebakaran akan sangat berharga bagi insinyur perancang bangunan karena mereka memiliki pengetahuan yang baik tentang kebakaran dan regulasi tentang kebakaran. Oleh karena itu, perancangan suatu bangunan dan proses industri hendaklah melibatkan ahli kebakaran sehingga sistem pencegahan kebakaran dapat didesain sesuai dengan standar baku nasional atau internasional. Misalnya seberapa banyak titik deteksi kebakaran, *sprinkler*, dan pemadam kebakaran (*fire extinguisher*) yang diperlukan dalam suatu area bangunan atau proses, dan di mana saja titik penempatannya yang paling tepat sesuai standar kebakaran atau *fire code*.

Hal lain yang sangat penting dalam program pencegahan kebakaran adalah pemahaman terhadap standar kebakaran (*fire code*). Personel pencegah kebakaran harus mengetahui dan memahami standar kebakaran dan regulasi yang harus diterapkan untuk jenis industri mereka. Standar kebakaran dan regulasi yang harus dipahami misalnya adalah NFPA, OSHA, regulasi pemerintah, kebijakan perusahaan, perusahaan asuransi yang digunakan, dan regulasi yang spesifik terhadap proses atau bahan kimia tertentu.

Industri yang menggunakan teknologi modern memasukkan sistem pencegahan kebakaran sebagai bagian dari sistem keselamatan secara keseluruhan. Namun, jika sistem pencegahan kebakaran tidak merupakan bagian dari teknologi yang digunakan seperti industri modern, komite keselamatan kebakaran harus dibentuk untuk membantu pengembangan dan penerapan program pencegahan kebakaran, seperti identifikasi bahaya kebakaran, inspeksi proses tertentu, perencanaan kegiatan pencegahan kebakaran, pelaksanaan pelatihan bagi pekerja, serta komunikasi program pencegahan kebakaran kepada pekerja dan komunitas di sekitar pabrik atau perusahaan.

Penegakan sistem merupakan program penting lainnya dalam mencegah terjadi kebakaran. Untuk menjamin bahwa sistem kebakaran yang sudah dibuat berjalan dan alat-alat pemadam selalu dalam kondisi baik, perlu dilakukan inspeksi secara rutin. Setiap temuan dalam inspeksi sistem kebakaran harus dilaporkan kepada pihak manajemen untuk ditindaklanjuti agar tidak terjadi kebakaran.

Program Rekayasa (*Engineering*)

Program proteksi kebakaran dengan sistem rekayasa dilakukan dengan memberikan perhatian terhadap hal-hal berikut.

- a. Tata letak dan jarak
- b. Isolasi, pengurangan inventori, dan pengurangan tekanan
- c. Drainase/saluran pembuangan
- d. Proteksi kebakaran pasif
- e. Proteksi kebakaran aktif
- f. Jalur evakuasi
- g. Pengendalian bahaya listrik statis
- h. Pengendalian area atmosfer berbahaya kebakaran

a. Tata Letak dan Jarak

Jenis bahan kimia yang digunakan di suatu pabrik tertentu akan memengaruhi desain proteksi kebakarannya. Demikian juga dengan jarak bangunan dan peralatan proses yang tepat sangat penting untuk mencegah perambatan kebakaran karena jarak dapat mencegah ancaman kebakaran dengan mengurangi risiko terpapar panas terhadap fasilitas terdekat. Jika terjadi kebakaran, jarak fasilitas pabrik yang cukup akan membatasi penyebaran api dari eskalasi ke daerah sekitarnya. Jarak peralatan yang tepat adalah salah satu pertimbangan desain yang paling penting. Saat terjadi kebakaran, jarak yang cukup sering merupakan garis pertahanan utama dalam membatasi kerugian.

b. Isolasi, Pengurangan Inventori, dan Pengurangan Tekanan

Cara yang paling efektif untuk memadamkan kebakaran adalah dengan memisahkan bahan bakar dengan sumber api dengan menutup atau mengisolasi katup (*valve*) yang menyuplai bahan bakar ke sumber api. Untuk itu, perlu disediakan katup yang berada pada posisi yang jauh dari area yang rentan atau berpotensi terbakar.

c. Drainase/Saluran Pembuangan

Saluran pembuangan atau drainase yang memadai dan tepat dapat membawa atau menjauhkan bahan kimia mudah terbakar dari sumber api. Sistem drainase yang dirancang dengan baik juga akan dapat pemindahan air pemadam dari lokasi kebakaran ke lokasi lain sehingga dapat mencegah bahan kimia yang mengapung di atas air tidak memapari petugas-petugas yang berada di sekitar lokasi kebakaran.

d. Proteksi Kebakaran Pasif

Penggunaan bahan tahan api dapat mengurangi atau memperlambat penyebaran api dan mengurangi kerusakan pada saat terjadi kebakaran. Contoh proteksi kebakaran pasif adalah memasang pintu dan dinding tahan api, menutup lubang-lubang kabel atau pipa dengan material tahan api, menggunakan kabel yang tahan api, dan melapisi dinding dengan cat tahan api.

e. Proteksi Kebakaran Aktif

Sistem proteksi kebakaran aktif seperti hidran sudah sangat umum digunakan pada industri kimia besar karena hidran sudah terbukti efektif dalam mendinginkan tangki yang berdekatan dengan lokasi kebakaran, memadamkan api pada kondisi tertentu, dan lain-lain. Demikian juga dengan alat pemadam api ringan (APAR) efektif digunakan untuk memadamkan kebakaran pada tingkat awal atau kebakaran kecil. Pemasang sistem detektor, asap, dan detektor panas akan dapat meminimalkan kerugian akibat kebakaran karena kebakaran yang terjadi dapat diketahui dengan segera.

f. Jalur Evakuasi

Penentuan jalur evakuasi yang tepat akan dapat mengurangi kerugian jiwa akibat kebakaran. Jalur evakuasi harus dirancang sedemikian rupa sehingga dapat meminimalkan potensi korban jiwa pada saat terjadi kebakaran.

g. Pengendalian Zona Atmosfer Berbahaya Kebakaran (ATEX)

Zona Atmosfer Berbahaya atau Zona ATEX (*Atomosphere Explosive Zone*) adalah zona atau kawasan di mana kandungan uap atau gas mudah terbakar yang terdapat dalam udara sangat potensial untuk menyebabkan terjadinya kebakaran dan ledakan. Mengacu pada Directive 1999/92/BC ANNEX I, zona berbahaya dibagi menjadi 3 zona sebagai berikut.

- **Zona 0**

Zona 0 merupakan area di mana udara atau atmosfer mudah terbakar terbentuk dari campuran udara dan bahan mudah terbakar dalam bentuk gas, uap, atau kabut yang terbentuk secara terus-menerus dalam kurun waktu yang lama.

- **Zona 1**

Zona 1 merupakan area di mana udara atau atmosfer mudah terbakar terbentuk dari campuran udara dan bahan mudah terbakar dalam bentuk gas, uap, atau kabut yang cenderung terbentuk dalam kondisi operasi normal atau sekali-sekali.

- **Zona 2**

Zona 2 merupakan area di mana udara atau atmosfer mudah terbakar terbentuk dari campuran udara dan bahan mudah terbakar dalam bentuk gas, uap, atau kabut yang tidak terbentuk dalam kondisi normal; jika memang terjadi, akan bertahan dalam waktu yang singkat.

Zona Berbahaya (Zona 0, Zona 1, dan Zona 2) tersebut diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria berikut.

- 1. Tingkatan dari sumber emisi**

- Emisi terus-menerus: pelepasan yang kontinu atau diperkirakan akan terjadi dalam waktu lama;
- Emisi primer: pelepasan yang dapat diharapkan terjadi secara berkala atau sesekali selama operasi normal;
- Emisi sekunder: pelepasan yang tidak diharapkan terjadi dalam operasi normal dan jika hal itu terjadi, kemungkinannya hanya akan jarang dan dalam periode singkat.

- 2. Tingkat kemampuan ventilasi**

- Tinggi: ventilasi ini dapat mengurangi konsentrasi pada sumber pelepasan hampir seketika sehingga menghasilkan konsentrasi di bawah nilai batas ledakan (BBTB). Area ini menjadi zona aman, namun bilamana ventilasi tidak bekerja dengan baik, dapat saja terbentuk zona lain yang berbahaya;
- Medium: ventilasi ini dapat mengendalikan konsentrasi bahan mudah terbakar di udara, menghasilkan situasi yang stabil di mana konsentrasi bahan mudah terbakar berada di bawah BBTB saat pelepasan sedang berlangsung dan di mana atmosfer eksplosif tidak bertahan terlalu lama setelah pelepasan berhenti;
- Rendah: ventilasi ini tidak dapat mengendalikan konsentrasi saat pelepasan sedang berlangsung dan/atau tidak dapat mencegah terbentuknya atmosfer eksplosif meskipun setelah pelepasan dihentikan.

- 3. Ketersediaan ventilasi**

- Bagus: ventilasi beroperasi secara konstan dan stabil;
- Sedang: ventilasi diharapkan beroperasi selama operasi normal. Diskontinuitas diizinkan asalkan jarang terjadi dan untuk jangka pendek;
- Buruk: ventilasi tidak memenuhi standar sedang atau bagus, bahkan diskontinuitas diperkirakan terjadi dalam waktu lama.

Pengendalian bahaya kebakaran pada Zona ATEX harus dilakukan secara ketat. Semua pekerjaan yang dapat menimbulkan penyalaan harus dikontrol dan dihindari, misalnya penerapan *safety work permit* atau surat izin kerja aman akan dapat mengurangi potensi terjadinya kebakaran pada zona ATEX.

Program Sistem Manajemen Kebakaran

Program sistem manajemen dapat dikategorikan menjadi tiga kategori program, yaitu:

1. sistem manajemen sebelum terjadi kebakaran (*pre-fire*);
2. sistem manajemen pada saat terjadi kebakaran (*incase-fire*);
3. sistem manajemen setelah terjadi kebakaran (*post-fire*).

Untuk ketiga program tersebut harus dilakukan perencanaan dalam bentuk sistem manajemen kebakaran yang dapat dituangkan dalam beberapa bentuk prosedur baku, misalnya prosedur inspeksi dan perawatan sistem perlindungan kebakaran, prosedur tanggap darurat kebakaran, serta investigasi kebakaran.

1. Sistem Manajemen Sebelum Terjadi Kebakaran

Sistem manajemen sebelum terjadi kebakaran adalah upaya yang dilakukan untuk mencegah terjadinya kebakaran dan mengurangi kerugian jika terjadi kebakaran. Oleh karena itu, manajemen perusahaan benar-benar harus secara serius dalam menerapkan sistem ini secara konsisten dan berkelanjutan. Berikut adalah sistem manajemen sebelum terjadi kebakaran yang harus dilakukan oleh manajemen perusahaan.

- a. **Kebijakan dan komitmen:** manajemen puncak (*top management*) harus mengembangkan dan menyosialisasikan kebijakan dalam penanggulangan dan pencegahan kebakaran di perusahaan sehingga dapat dipahami dan didukung oleh seluruh pekerja.
- b. **Identifikasi sumber daya:** manajemen harus mengidentifikasi sumber daya yang dibutuhkan dalam upaya pencegahan dan pengurangan kerugian kebakaran di dalam perusahaan, termasuk sumber daya manusia dan keuangan untuk mendukung seluruh program dan sistem perlindungan dan pencegahan kebakaran di perusahaan.
- c. **Inventarisasi sarana proteksi dan jalan keluar:** manajemen harus melakukan inventarisasi sarana proteksi dan jalan keluar atau evakuasi yang dibutuhkan jika terjadi kebakaran.
- d. **Inspeksi dan uji coba berkala:** manajemen harus membuat sistem dan melakukan inspeksi dan uji coba berkala terhadap semua sarana proteksi dan jalan keluar kebakaran.

- e. **Tindakan pemeliharaan dan perawatan peralatan:** manajemen harus membuat sistem dan melakukan pemeliharaan dan perawatan terhadap semua sarana peralatan kebakaran, seperti pompa hidran, *sprinkler*, sistem alarm, dan sebagainya.
- f. **Pengawasan terhadap tempat dan lingkungan kerja:** manajemen harus membuat sistem pengawasan dan pengendalian terhadap semua potensi penyebab munculnya kebakaran di seluruh area kerja, misalnya peraturan dilarang merokok, prosedur izin kerja panas atau yang menimbulkan api, prosedur bekerja aman, dan sebagainya.
- g. **Struktur organisasi manajemen pengamanan kebakaran:** manajemen harus membentuk struktur organisasi penanggulangan kebakaran, seperti tim utama pemadam kebakaran, tim pemadam kebakaran untuk setiap area atau *shift* kerja, tim evakuasi, tim P3K, dan tim lain yang diperlukan untuk pengamanan kebakaran.
- h. **Rekrutmen dan pelatihan personel:** manajemen harus membuat sistem dan program pelatihan bagi personel yang sudah ditunjuk sebagai tim organisasi pengamanan kebakaran. Organisasi dan petugas peran kebakaran harus mengacu pada Peraturan Menteri Tenaga Kerja Nomor 186/MEN/1999 tentang Unit Penanggulangan Kebakaran di Tempat Kerja.
- i. **Penyuluhan kepada pekerja dan visualisasi pencegahan kebakaran:** manajemen harus melakukan edukasi dan penyuluhan kepada semua pekerja tentang sistem proteksi dan pencegahan kebakaran di tempat kerja secara berkelanjutan.
- j. **Gambar situasi rute penyelamatan:** manajemen harus membuat gambar rute evakuasi dan penyelamatan serta menempatkannya di tempat-tempat yang mudah dilihat oleh pekerja.
- k. **Rencana tindakan keadaan darurat kebakaran:** manajemen harus membuat rencana tindakan keadaan darurat kebakaran yang dituangkan dalam bentuk prosedur Rencana Tindakan Darurat Kebakaran.
- l. **Gladi/simulasi kebakaran dan evakuasi:** manajemen harus melakukan simulasi keadaan darurat kebakaran bersama dengan seluruh pekerja setiap enam bulan sekali. Simulasi harus dilakukan dengan membuat skenario kebakaran yang mendekati sesungguhnya dan dilaksanakan secara sungguh-sungguh oleh seluruh personel yang terlibat.

2. Sistem Manajemen pada Saat Terjadi Kebakaran

Sistem manajemen pada saat terjadi kebakaran adalah sistem yang mengatur langkah-langkah yang harus dilakukan dalam menanggulangi kebakaran yang terjadi. Sistem ini harus disiapkan sebelum terjadi kebakaran. Sistem atau prosedur tindakan yang dipersiapkan dalam menghadapi

kebakaran di antaranya adalah prosedur pengaktifkan alarm, prosedur untuk mengumumkan kebakaran dan menghubungi pihak-pihak terkait, pemadaman dengan APAR, pemadaman dengan hidran, evakuasi orang dan barang, pertolongan pertama jika ada korban, prosedur pengamanan lokasi kebakaran, prosedur pemberhentian operasi pabrik, dan prosedur alternatif operasi pabrik untuk mengurangi kerugian yang lebih besar.

3. Sistem Manajemen Setelah Terjadi Kebakaran

Sistem manajemen setelah terjadi kebakaran adalah usaha untuk mencari penyebab terjadinya kebakaran dan membuat tindakan perbaikan untuk mencegah terulangnya kebakaran tersebut di tempat kerja.

Program Manajemen Bahan Kimia

Pengelolaan bahan kimia sesuai standar akan dapat mengurangi atau mencegah terjadinya potensi kebakaran pada industri kimia. Beberapa kejadian kebakaran pada industri kimia disebabkan oleh buruknya sistem manajemen atau pengelolaan bahan kimia. Manajemen bahan kimia harus dimulai sejak pembelian bahan kimia, penyimpanan bahan kimia, penggunaan bahan kimia dan pembuangan sisa atau limbah bahan kimia.

- **Manajemen Pembelian Bahan Kimia**

Pada saat melakukan pembelian bahan kimia, perusahaan harus mempertimbangkan faktor-faktor berikut ini.

1. Membeli bahan kimia yang sifat bahaya/terbakarnya rendah atau mengganti bahan-bahan yang mudah terbakar dengan yang tidak mudah terbakar.
2. Membeli dengan jumlah sedikit atau sesuai kebutuhan. Tidak membeli dalam jumlah yang besar sehingga menimbulkan risiko penyimpanan yang besar.
3. Hanya membeli bahan kimia yang dilengkapi dengan Lembar Data Keselamatan Bahan (MSDS) dan label yang sesuai dengan standar GHS.
4. Melakukan pengecekan pada saat kedatangan bahan kimia yang dibeli untuk memastikan kualitas, kuantitas, dan kelengkapan MSDS dan label.

- **Manajemen Penyimpanan Bahan Kimia**

Banyak kasus kecelakaan kebakaran bahan kimia terjadi pada proses penyimpanan bahan kimia karena manajemen penyimpanan yang tidak memenuhi standar yang dipersyaratkan. Salah satu risiko terbesar pada saat penyimpanan B3 adalah kebocoran bahan kimia yang dapat menyebabkan kebakaran dan ledakan. Beberapa penyebab kebocoran yang sering terjadi

adalah kerusakan karena mekanik yang terjadi pada kemasan atau rak penyimpanan (benturan, penyok, dan lain-lain), kerusakan fisik (rusak karena usia, panas, atau dingin, berinteraksi dengan isi, dan lain-lain), dan kerusakan kimia (dekomposisi, degradasi, karat, dan lain-lain).

Untuk mengurangi potensi kecelakaan kebakaran pada saat penyimpanan, perlu dibuat prosedur penyimpanan yang harus mencakup

1. penjelasan kondisi dan lingkungan penyimpanan;
2. karakteristik bangunan ruang penyimpanan termasuk sistem perlindungan kebakaran;
3. pengendalian organisasi dan teknis;
4. penjelasan potensi ledakan atmosfer (LEL dan UEL);
5. jenis penyimpanan dan jenis kemasan yang disimpan; serta
6. sifat, jumlah, dan kelas bahan yang disimpan.

Tempat penyimpanan juga harus dirancang sedemikian rupa sehingga meminimalkan potensi kecelakaan bahan kimia di tempat penyimpanan. Kajian risiko harus dilakukan sebelum merancang tempat dan penyimpanan bahan kimia.

- Sumber informasi kajian risiko adalah label, MSDS, Regulasi, *Tech Data Sheet*, literatur lain.
- Proses pekerjaan dan alur bahan kimia harus dipertimbangkan, seperti pengiriman, penempatan stok, pemindahan B3 dari stok, pemindahan B3 secara internal.
- Potensi ledakan atmosfer; potensi terbentuknya udara mudah terbakar (LEL-UEL), tindakan pencegahan.

Persyaratan dasar penyimpanan bahan kimia yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut.

1. **Persyaratan tempat penyimpanan:** bahan kimia tidak boleh diletakkan di tempat yang membahayakan manusia, seperti koridor, tangga, jalur evakuasi, ruang kerja, kamar mandi, dan lain-lain.
2. **Persyaratan kontainer dan kemasan:** kontainer dan kemasan harus tahan terhadap dampak mekanik, panas, dan kimia. Bahan kimia harus disimpan dalam kemasan aslinya. Jika bahan kimia tidak disimpan dalam kemasan aslinya, harus dipastikan kemasannya cocok dan berlabel sesuai standar.
3. **Tumpukan dan tinggi tumpukan:** tinggi tumpukan harus ditentukan dan dipastikan tidak akan ada risiko jatuh. Kekuatan kemasan yang diletakkan di bawah harus mampu menahan beban dari kemasan di atasnya. Kekuatan

dampak (*impact*) kemasan di tas harus tinggi untuk mencegah pecah jika terjatuh.

4. **Perencanaan penyimpanan dan daftar penyimpanan:** tersedia informasi bahan kimia yang disimpan, data klasifikasi, dan sifat bahan kimia yang disimpan, maksimum dan aktual jumlah yang disimpan, data lokasi penyimpanan (nomor rak, jalur, dan lain-lain).
5. **Penyimpanan gabungan bahan kimia:** menyimpan bahan kimia yang berbeda sifat tidak diperkenankan karena dapat menimbulkan reaksi kimia dari bahan kimia yang tidak kompatibel, memicu pelepasan gas beracun, atau gas mudah terbakar akibat interaksi bahan kimia yang tidak kompatibel.
6. **Waktu penyimpanan:** menyimpan bahan kimia tidak boleh melewati masa kedaluwarsa karena bahan kimia kedaluwarsa harus diberlakukan sebagai limbah B3 (menambah biaya) dan bahan kimia kedaluwarsa dapat berubah sifat dan menimbulkan sifat bahaya baru.

- **Manajemen Penggunaan atau Proses Bahan Kimia**

Kebakaran sering kali terjadi pada saat melakukan proses produksi yang menggunakan bahan kimia. Di antara penyebab yang cukup sering terjadi adalah

1. bahan kimia tumpah atau bocor pada saat proses;
2. bahan kimia salah mencampur sehingga terjadi bahaya reaktivitas kimia; dan
3. kesalahan parameter proses yang menimbulkan kenaikan suhu dan tekanan sehingga menimbulkan ledakan dan kebakaran.

Untuk menghindari kemungkinan hal-hal di atas terjadi, perlu dilakukan manajemen penggunaan dan proses bahan kimia yang baik. Beberapa negara maju telah menerapkan regulasi sistem proses keselamatan dan manajemen risiko yang juga mengatur penanganan dan manajemen bahaya kimia, seperti di Amerika dan Eropa yang memberlakukan regulasi sebagai berikut.

1. Di Amerika Serikat Occupational Safety and Health Administration (OSHA) Process Safety Management Standard, 29 CFR 1910.119 (OSHA 1992), merupakan regulasi pengendalian bahan-bahan kimia berbahaya. Di sini juga terdapat daftar bahan-bahan yang sangat reaktif.
2. Regulasi Federal Amerika Serikat memuat penanganan bahaya kimia, seperti EPA RMP Rule (40 CFR Part 68), EPCRA Section 311 dan 312, dan OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200).
3. Di Eropa Seveso II Directive [96/082/EEC] menerapkan aturan pada fasilitas yang menangani bahan-bahan berbahaya dengan jumlah di atas ambang batas, termasuk bahan kimia yang dikategorikan bersifat reaktif. Di sini

diterapkan persyaratan program pencegahan yang hampir sama dengan standar OSHA PSM.

American Institute of Chemical Engineers (AIChE) pada tahun 1985 mengambil inisiatif untuk membentuk suatu badan yang disebut Center for Chemical Process Safety (CCPS). Badan ini bertugas mengembangkan sistem pengendalian bahaya kimia termasuk bahaya reaktivitas kimia yang sering kali menjadi penyebab terjadinya kebakaran dan ledakan pada industri kimia di Amerika Serikat. CCPS telah mengembangkan beberapa *guidelines* untuk manajemen bahaya kimia seperti *Guidelines for Chemical Reactivity Evaluation and Application to Process Design* (1995), *Guidelines for Safety Storage and Handling of Reactive Materials* (1995), *Guideline for Safe Warehousing of Chemicals* (1988), dan *Guidelines for Process Safety in Batch Reaction System* (1999). *Guidelines* yang dikeluarkan oleh CCPS ini langsung diadopsi oleh berbagai perusahaan besar. Namun, pada tahun 2002, berdasarkan investigasi dari U.S. Chemical and Hazards Safety Board (CSB), ditemukan banyak sekali industri skala kecil-menengah yang memiliki keterbatasan sumber daya tidak mampu menerapkan *guidelines* ini.

Pada tahun 2003 CCPS memublikasikan *guidelines* cara pelaksanaan manajemen bahaya reaktivitas kimia (*Essential Practice for Managing Chemical Reactivity Hazards*) yang lebih mudah dipahami. Dalam *guidelines* baru ini terdapat 12 elemen penting dari manajemen bahaya reaktivitas kimia. Kedua belas elemen tersebut sejalan dengan sistem manajemen yang sudah ada, yaitu *Process Safety Management Standard* (PSM) yang dikeluarkan oleh CCPS, OSHA, dan *Saveso II*. Namun, masih terdapat beberapa elemen dari ketiga PSM tersebut yang belum masuk atau terakomodasi dalam sistem manajemen bahaya reaktivitas kimia. Demikian pula, sebaliknya, sebagian elemen yang terdapat dalam PSM telah menerapkan prinsip-prinsip manajemen bahaya reaktivitas kimia.

Di dalam sistem manajemen keselamatan proses atau lebih dikenal dengan *Process Safety Management* (PSM) terdapat tiga belas unsur penting sebagai berikut, yang apabila diterapkan dengan baik akan dapat meminimalkan risiko terjadinya kebakaran dan ledakan pada industri kimia.

1. Informasi Keselamatan Proses
2. Analisis Bahaya Proses
3. Keterpaduan Mekanik (*Mechanical Integrity*)
4. Prosedur Operasi
5. Manajemen Perubahan

6. Keselamatan Kerja Kontraktor
7. Telaah Keselamatan Kerja Awal Operasi
8. Pelatihan Karyawan
9. Cara Kerja Aman
10. Partisipasi Karyawan
11. Rencana Tanggap Darurat
12. Penyelidikan Kecelakaan
13. Audit Manajemen Keselamatan Proses

Penerapan sistem manajemen keselamatan proses ini pada berbagai industri kimia telah terbukti efektif dalam mengurangi kecelakaan bahan kimia pada saat penggunaan dan proses bahan kimia.

Program Edukasi

Manusia atau pekerja adalah salah satu penyebab terjadinya kebakaran pada industri kimia, bahkan menjadi penyebab terbesar kecelakaan bahan kimia pada industri kimia. Faktor utama penyebab terjadinya kesalahan pekerja dalam menangani bahan kimia adalah rendahnya kompetensi pekerja tersebut dalam menangani bahan kimia. Dalam Peraturan Menteri Tenaga Kerja Nomor 187/MEN/1999 tentang Pengendalian Bahan Kimia Berbahaya di Tempat Kerja pada Pasal 16 butir (a) dan (b) dan 17 butir (a) disebutkan sebagai berikut.

Pasal 16 butir (a) dan (b): Perusahaan yang dikategorikan mempunyai potensi bahaya besar sebagaimana dimaksud pada Pasal 15 ayat (1) wajib

- a. mempekerjakan petugas K3 Kimia dengan ketentuan apabila dipekerjakan dengan sistem kerja *non-shift* sekurang-kurangnya 2 (dua) orang dan apabila dipekerjakan dengan sistem kerja *shift* sekurang-kurangnya 5 (lima) orang.
- b. mempekerjakan ahli K3 Kimia sekurang-kurangnya 1 (satu) orang.

Pasal 17 butir (a): Perusahaan yang dikategorikan mempunyai potensi bahaya menengah sebagaimana dimaksud pada Pasal 15 ayat (2) wajib

- a. mempunyai petugas K3 Kimia dengan ketentuan apabila dipekerjakan dengan sistem kerja *non-shift* sekurang-kurangnya 1 (satu) orang dan apabila dipekerjakan dengan mempergunakan *shift* sekurang-kurangnya 3 (tiga) orang.

Untuk menjadi seorang petugas K3 Kimia, pekerja yang ditunjuk harus mengikuti pelatihan petugas K3 Kimia yang diselenggarakan oleh Perusahaan Jasa K3 (PJK3) selama 6 hari, sementara untuk menjadi ahli K3 Kimia harus mengikuti pelatihan selama 12 hari. Hal ini menunjukkan bahwa perhatian pemerintah terhadap sumber

daya manusia dalam pengendalian bahan kimia di tempat kerja sangat penting untuk mencegah terjadinya kecelakaan bahan kimia, termasuk kebakaran.

Namun demikian, tidak cukup hanya dengan memiliki petugas K3 Kimia dan Ahli K3 Kimia dalam mengendalikan kecelakaan bahan kimia yang dapat menimbulkan kebakaran. Setiap pekerja yang mengelola bahan kimia harus diberikan pelatihan tentang keselamatan pengelolaan bahan kimia di tempat kerja. Ada empat hal pokok penting (4M) yang harus diajarkan kepada semua pekerja yang mengelola bahan kimia, yaitu

1. Melihat Bahaya Kimia;
2. Mengenali Bahaya Kimia;
3. Mengendalikan Bahaya Kimia;
4. Mau Mengendalikan Bahaya Kimia.

1. M1-Kemampuan Melihat Bahaya Kimia

Setiap pekerja harus diajarkan untuk memiliki kemampuan untuk melihat potensi bahaya kimia yang ada di tempat kerja mereka masing-masing karena tidak semua pekerja mampu melihat potensi bahaya kimia yang ada di tempat kerjanya. Kemampuan melihat potensi bahaya bahan kimia adalah dengan memiliki pengetahuan tentang simbol-simbol bahaya bahan kimia. Semua pekerja harus diperkenalkan dengan simbol-simbol bahaya bahan kimia. Misalnya simbol bahaya Bahan Mudah Terbakar, simbol bahaya Bahan Oksidator dan simbol bahaya Bahan Dapat Meledak. Dengan mengenal simbol-simbol bahaya tersebut, pekerja dapat melihat bahaya apa yang dapat terjadi dari suatu bahan kimia.

2. M2-Kemampuan Mengenali Bahaya Kimia

Setelah pekerja memiliki kemampuan melihat setiap potensi bahaya kimia di tempat kerja, selanjutnya mereka harus diajarkan mengenali bahaya dari bahan kimia tersebut. Mengenali bahaya bahan kimia maksudnya adalah mengetahui karakteristik dari bahaya bahan kimia tersebut. Misalnya suatu bahan kimia mudah terbakar yang dapat dilihat dari simbol bahayanya, kemudian pekerja harus mengenali bagaimana sifat keterbakaran dari bahan kimia tersebut, seperti titik nyala (*flash point*), daerah bisa-terbakar (*flammable range*), energi penyalaan, laju penguapan, dan sebagainya. Mengenali bahaya bahan kimia juga dapat diartikan mempelajari sifat fisika dan kimia bahan kimia yang dapat menimbulkan kebakaran.

3. M3-Kemampuan Mengendalikan Bahaya Kimia

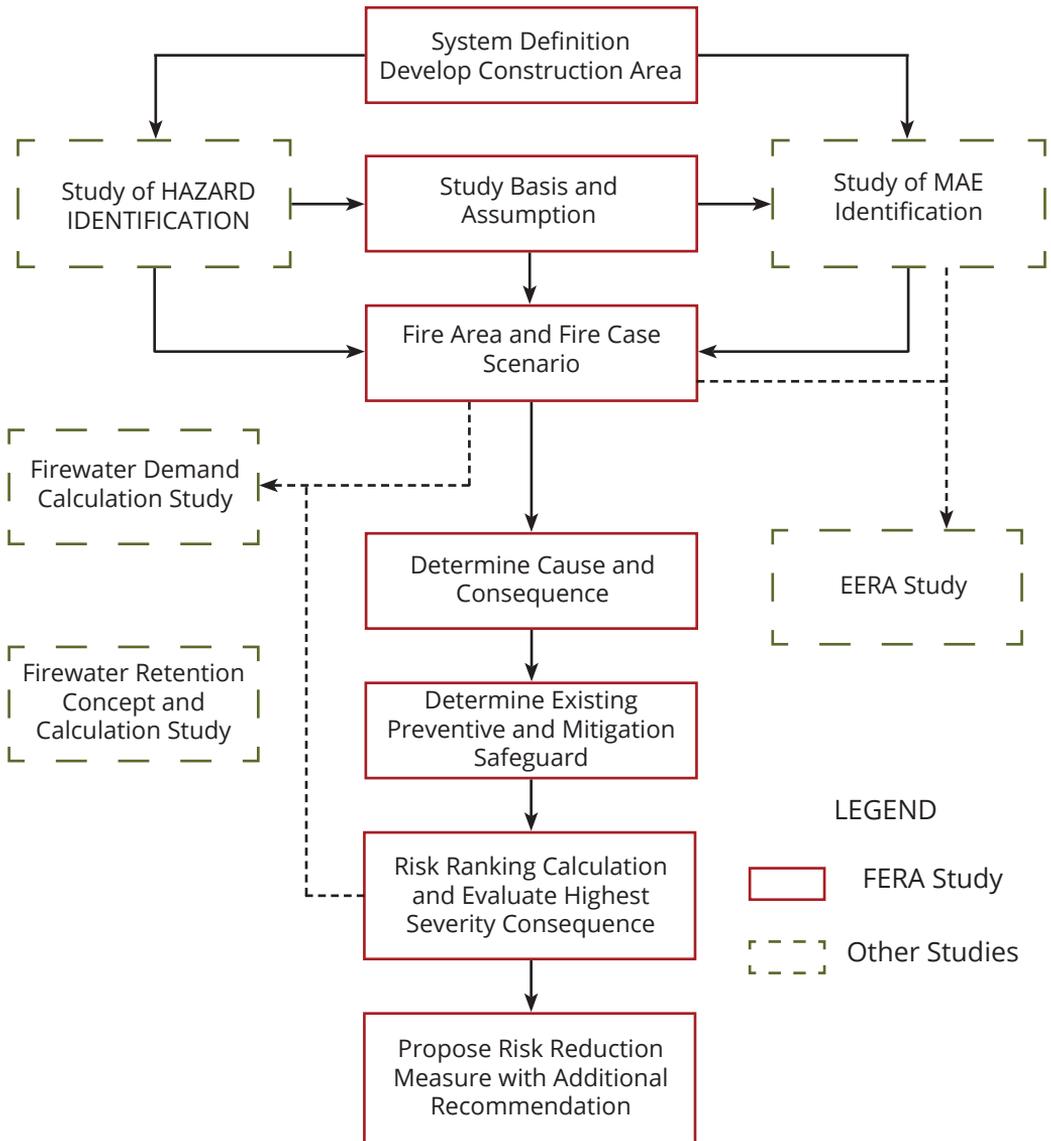
Selanjutnya pekerja dapat diajarkan untuk dapat mengendalikan bahaya

kimia tersebut. Untuk dapat mengendalikan bahaya kimia, pekerja sudah harus mampu melihat dan mengenali bahaya kimia tersebut. Dengan memiliki kemampuan untuk mengenali sifat-sifat bahaya kimia dari suatu bahan kimia, pekerja dapat mengendalikan atau menghindari bahaya kimia tersebut. Misalnya, dengan mengetahui nilai titik nyala suatu bahan kimia, pekerja harus menyimpan atau menggunakan bahan kimia tersebut di bawah temperatur titik nyala untuk menghindari potensi nyala dari bahan kimia tersebut.

4. M4-Mau Mengendalikan Bahaya Kimia

Mau mengendalikan bahaya kimia artinya melakukan pekerjaan secara aman sesuai dengan standar keselamatan bekerja dengan bahan kimia. Banyak pekerja yang sudah memiliki kemampuan untuk melihat bahaya, mengenali bahaya, dan mengendalikan bahaya, tetapi tidak ada kemauan untuk mengendalikan atau menghindari bahaya tersebut. Banyak faktor yang dapat memengaruhi pekerja untuk tidak mau menghindari bahaya kimia tersebut, seperti motivasi yang rendah, iklim kerja yang tidak mendukung, merasa aman, dan tidak pernah terjadi kecelakaan, dan lain sebagainya. Proses edukasi untuk membangun kemauan untuk mau mengendalikan bahaya membutuhkan waktu yang panjang dan usaha terus-menerus karena hal ini berkaitan dengan mengubah perilaku dan budaya K3 di tempat kerja.

Komponen Kunci dalam Pencegahan dan Penanggulangan Bahaya Kebakaran pada Industri Kimia



Gambar 15.9 Hubungan Kajian Risiko Kebakaran dan Ledakan (*Fire and Explosion Risk Assessment*) dengan Studi-studi Lainnya

Program Penanggulangan pada Saat dan Pascakebakaran pada Industri Kimia

Pada dasarnya penanggulangan bahaya kebakaran pada industri kimia dikhususkan kepada prinsip-prinsip pencegahan (preventif) mulai dari melakukan identifikasi bahaya, kajian risiko dan mitigasi (*barrier*) baik bersifat teknis atau rekayasa, manajerial atau operasional, dan evakuasi terhadap para pekerja. Namun demikian, jika kebakaran tetap terjadi, diperlukan sistem mitigasi yang bersifat protektif terhadap kebakaran. Sistem ini merupakan bagian dari tindakan mitigasi yang bertujuan untuk mencegah terjadinya kerugian ataupun konsekuensi yang lebih besar.

Berdasarkan data-data yang digunakan pada suatu industri kimia, biasanya derajat keparahan bahaya kebakaran ditunjukkan pada titik nyala (*flash point*) dan karakteristik internal misalnya mudah terbakar (*extremely or highly flammable*); dapat terbakar (*flammable*), *combustible*, dan oksidator. Hal ini dibuktikan dengan menggunakan metode penilaian api yang sesuai. Kebutuhan air untuk sistem proteksi kebakaran antara lain penggunaan busa, pengaturan sistem tanggap darurat yang benar seperti evakuasi personel dan prosedur intervensi tim pemadam kebakaran, dan tentunya pemadaman yang menggunakan peralatan tetap dan portabel harus dihitung sesuai dengan risikonya. Jadi, penentuan kebutuhan air yang diidentifikasi dalam kode NFPA yang sesuai harus digunakan. Selain itu, pada saat desain atau perancangan persyaratan, air pendingin untuk perlindungan struktur baja atau pada penyimpanan hidrokarbon dan kapal proses yang terkena radiasi termal harus sesuai dengan API RP2001.

Dalam hal ini ada tiga prinsip dasar dalam penanggulangan pada saat kebakaran dan pascakebakaran.

- a. Evaluasi kebutuhan air pemadam kebakaran atau *Fire Water Demand*.
- b. Evaluasi sistem retensi air sehabis kebakaran atau *Fire Water Retention*.
- c. Evaluasi tentang penyelamatan diri pada saat keadaan darurat dan analisis evakuasi (*Escape, Evacuation and Rescue Analysis*).

Tujuan ketiga program di atas adalah untuk memproteksi site, khususnya industri kimia dalam aspek K3 baik internal (pekerja dan instalasi) dan eksternal (masyarakat luar dan lingkungan).

a. Evaluasi Kebutuhan Air Pemadam Kebakaran (*Fire Water Demand*)

Permintaan kebutuhan air pada saat pemadaman kebakaran untuk instalasi apa pun harus didasarkan pada penilaian identifikasi bahaya kebakaran (HAZID, mengacu pada halaman XX) dan penilaian atau kajian risikonya (*Fire and*

Explosion Risk Assessment/FERA, mengacu pada halaman XX).

Berikut ini langkah-langkah utama dalam melakukan evaluasi kebutuhan air untuk memadamkan kebakaran.

- **Mengidentifikasi bahaya**

Biasanya bahan kimia yang mudah terbakar dan digunakan oleh industri kimia adalah bahan baku (*raw material*). Walaupun demikian, bergantung pada jenis industri dan proses sistem yang dimiliki, bahan jadi (*finish good product*) dapat juga merupakan bahan yang mudah terbakar.

Jika kita berbicara bahan mudah terbakar, lokasi yang sering kita jumpai adalah gudang atau *warehouse* dan tangki penyimpanan atau *storage tank-ST*. Selain itu, bahaya kimia yang sangat diperhatikan lainnya adalah sifat toksisitas dari bahan kimia tersebut. Jika kita mengacu pada LDK (Lembar Data Keselamatan) atau SDS (*Safety Data Sheet*), bahaya kimia toksik ataupun CMR (*carcinogenic, mutagenic and reprotoxic*).

Dengan demikian, diperlukan identifikasi bahaya yang dilakukan secara menyeluruh dengan menampilkan bahaya kebakaran melalui plot *plan* dan mencakup seluruh area, yaitu *Flammable-F*, *Combustible-C*, dan *Toxic-T*.

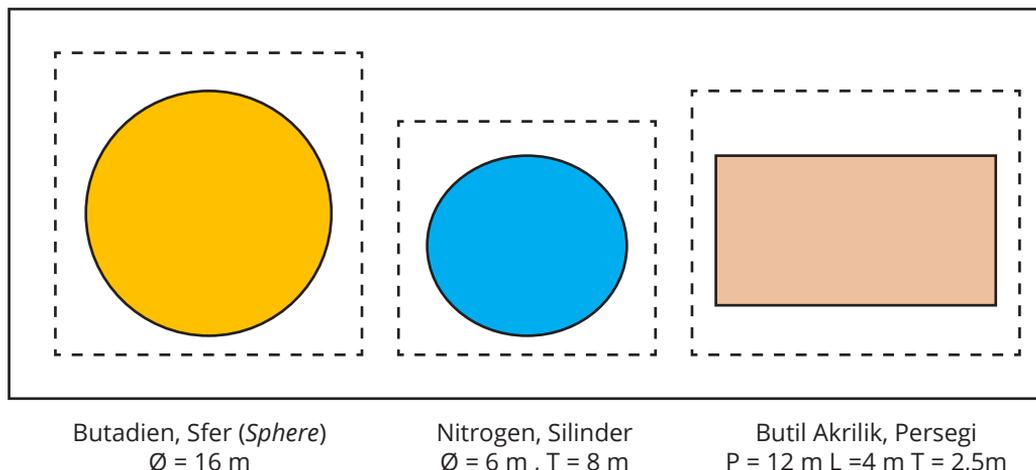
- **Memetakan lokasi di mana kebakaran dapat terjadi**

Pemetaan lokasi kebakaran yang dapat terjadi biasanya dikenal dengan zona kebakaran (*fire zone-FZ*). Definisi zona kebakaran adalah area dalam instalasi ataupun pabrik di mana peralatan yang berada di dalamnya dikelompokkan berdasarkan sifat dan/atau memiliki tingkat risiko homogen yang sama.

Pemisahan zona kebakaran dengan kata lain didasarkan atas pemisahan area berdasarkan segregasi ataupun jarak antarinstalasi. Sebagai contoh, suatu area tangki penyimpanan memiliki bahan antara lain butadiena, butil akrilik, dan nitrogen (Gambar 15.10).

Berdasarkan LDK, butadiena dan butil akrilik merupakan bahan mudah terbakar, sedangkan nitrogen bukan bahan mudah terbakar. Sebagai acuan tambahan, berdasarkan plot *plan* yang ada, dapat kita ketahui bahwa butadiena dan butil akrilik terpisah dengan adanya *bund-wall*. Jadi, dapat kita ketahui bahwa FZ pada area tangki penyimpanan ada dua zona. Nitrogen

tidak dapat kita kategorikan ke dalam FZ karena sifat intrinsik dari bahan ini tidak dapat terbakar.



Gambar 15.10 Contoh Ketiga *Equipment*

- **Menghitung luas area yang akan diproteksi**

Luas area di mana dapat terjadi kebakaran dihitung berdasarkan zona kebakaran (*fire zone*) yang sudah ditentukan ataupun luas dari peralatan yang memiliki sifat mudah terbakar (*flammable* ataupun *combustible*). Khusus untuk gedung ataupun kantor dapat dihitung berdasarkan luas permukaan lantai. Misalnya, gedung kantor di pabrik berukuran 8 meter x 12 meter x 5 m dan dibagi menjadi dua bagian melalui sebuah pintu darurat kebakaran (*fire door*). Satu area merupakan kantor, sedangkan sisi lainnya adalah gudang penyimpanan bahan-bahan kimia yang bersifat variatif dengan volume total tersimpan adalah 10 ton. Bahan kimia ini bersifat bubuk, cairan, ataupun koagulan.

Berdasarkan gambar ketiga *equipment* dan keterangan di atas, dapat kita hitung luas area yang diproteksi sebagai berikut.

Tabel 15.8 Perhitungan Luas Area Potensi Kebakaran yang Akan Diproteksi

No.	Keterangan	Rumus Perhitungan	Luas Area	Kategori
1	Kantor	$(P \times L) = 4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$	24 m ²	FZ 1
2	Gudang	$(P \times L) = 4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$	24 m ²	FZ 2
3	Bejana Bola Butadiena	$(4 \pi r^2) = 4 \times 3,14 \times 8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$	804,57 m ²	FZ 3

No.	Keterangan	Rumus Perhitungan	Luas Area	Kategori
4	Kotak Butil Akrilik	$2(P \times L) + 2(L \times T + 2) \times 2(P \times T)$ $= 2(12 \times 4) + 2(4 \times 2,5) + 2(12 \times 2,5) \text{ m}$	176 m ²	FZ 4

Hitung kebutuhan jumlah air pemadaman kebakaran berdasarkan API 2030–Table 1 Water Spray Application Rates for Exposed Surfaced Area.

Untuk menggunakan tabel di bawah, diperlukan pemilihan item atau berdasarkan keadaan di lapangan. Untuk kantor dapat kita gunakan *application rates for general exposure protection* sesuai dengan Section 7.2.1 dalam API 2030, yaitu 0,10–0,25 gpm/ft² atau Untuk bejana bertekanan dapat dirujuk *point* 7.3.5, yaitu 0,25 gpm/ft².

Perlu diperhatikan bahwa perhitungan kebutuhan air untuk pemadaman ini didasarkan pada penggunaan satuan yang sama. Satuan yang biasa digunakan adalah gpm/ft di mana *supplier* barang-barang terkait sistem proteksi kebakaran, misalnya *fire pump*, memiliki kapasitas 500, 750, 1.000, 1.200, 1.500, 1.750, 2.000, 2.250, 2.500, 2.750, 3.000, 3.500, 4.000, 5.000, dan 6.000 gpm. Perlu dicatat bahwa pompa kebakaran dengan ukuran 3.000 gpm atau lebih biasanya digunakan dalam dunia industri.

Tabel 15.9 Aplikasi Sistem Penyemprotan Air *Fixed* dalam Proteksi Kebakaran pada Industri Petroleum dan Petrokimia-API RP 2030 Edisi Ke-3, Juli 2015

Tabel 15.9 Tingkat Aplikasi Penyemprotan Air pada Area Permukaan yang Terekspose Api

Item	Bagian Dalam API 2030 atau Referensi Lain	Tingkat Penerapan; Galon Per Menit Per Kaki Persegi	Tingkat Penerapan; Liter Per Menit Per Kaki Persegi
Tingkat penerapan untuk perlindungan paparan umum			
Perlindungan paparan secara umum	7.2.1	0,10-0,25	4,1-10,2
Tingkat penerapan untuk pengendalian kebakaran			
Pengendalian kebakaran Variasi dengan skenario penerapan	7.2.2	0,50-0,20	20,4-8,2

Item	Bagian Dalam API 2030 atau Referensi Lain	Tingkat Penerapan; Galon Per Menit Per Kaki Persegi	Tingkat Penerapan; Liter Per Menit Per Kaki Persegi
Tingkat penerapan untuk pemadaman lihat catatan 4			
Pemadaman			
Bahan mudah terbakar padat	7.2.3	0,15-0,30	6,1-12,2
Bahan mudah terbakar cair	7.2.3	0,35-0,50	14,6-20,4
Bahan mudah menyala cair	7.2.3	Mungkin tidak diperlukan atau tidak memungkinkan	
Tingkat penerapan perlindungan paparan untuk peralatan dan bangunan khusus			
Pendingin udara lihat catatan 1	7.3.4	0,25	10,2
Tempat penyimpanan udara	7.3.13	0,10-0	4,1-0
Kompresor-umum	7.3.6	0,25	10,2
Dalam gedung	7.3.6	0,30	12,2
Menara pendingin	7.3.10, NFPA 214	0,15-0,50	6,1-20,4
Bantuan pemanas api	7.3.9	0,25	10,2
Rak penyimpanan LPG	7.3.11	0,25	10,2
Motor	7.3.8	0,25	10,2
Rak pipa lihat catatan 2	7.3.2	0,25	10,2
Tempat penyimpanan bertekanan	7.3.5; Standar API 2510 dan Publikasi 2510A		
Paparan radiasi	7.3.5 (tergantung jarak)	0-0,10	0-4,1
Tubrukan material tidak bertekanan	7.3.5 (tergantung desain)	0,25 dasar minimal lihat catatan 3	10,2 dasar minimal lihat catatan 3
Tubrukan material bertekanan	7.3.5 berkisar 250 hingga 500 gpm tubrukan air dan api	0,50 minimal ditambah arus air api	20,4 minimal ditambah arus air api

Item	Bagian Dalam API 2030 atau Referensi Lain	Tingkat Penerapan; Galon Per Menit Per Kaki Persegi	Tingkat Penerapan; Liter Per Menit Per Kaki Persegi
Gedung proses dan struktur -bangunan utama -tambahan	7.3.14, NFPA 13	0,30 0,15	12,2 6,1
Tempat bertekanan, pengatur, dan menara lihat catatan 3	7.3.5	0,25	10,2
Pompa	7.3.1	0,50	20,4
Trafo	7.3.3	0,25	10,2
Turbin -umum -dalam gedung	7.3.7 (7.3.6)	0,25 0,30	10,2 12,2
Sumur air	7.3.12	0,30	20,4

Values from Table 1 are intended for use by fire protection engineering personnel in conjunction with the explanatory material in the text and references.

Note 1: While NFPA 15 does not specifically address air-fin heat exchangers it recommends a minimum of 0.25 gpm/ft² (10.2 lpm/m²) for protection of vessels (7.4.2) and piping (7.4.3.7). Where the temperature of the vessel or its contents should be limited, higher application rates may be required (NFPA 15 7.4.2)

Note 2: Water spray density for the upper level of multilevel pipe racks can be reduced in accordance with NFPA 15 7.4.3.7.3

Note 3: Rate of 0.25 gpm/ft² [10.2 lpm/m²] is the basic minimum but rates between 0.25 and 0.15 gpm/ft² [10.2 and 6.1 lpm/m²] may be used where supported by relevant engineering data, or documented experience, or where other protective measures have been taken.

Note 4: Rates should be established by review of relevant test data for the specific materials (NFPA 15 7.2)

Perhitungan dasar kebutuhan air untuk pemadaman kebakaran disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 15.10 Perhitungan Dasar Kebutuhan Air untuk Sistem Pemadaman Kebakaran

FZ (Zona Kebakaran)	Keterangan	Luas Area (ft ²) (1 M ² = 10,674 ft ²)	Rate (GPM/ft ²)	Total Kebutuhan Air	Penambahan Margin 20%
1	Kantor	24 m ² x 10,674 = 256,18 ft ²	0,15	38,427 gpm	46,11 gpm
2	Gudang	24 m ² x 10,674 = 256,18 ft ²	0,15	38,427 gpm	46,11 gpm

FZ (Zona Kebakaran)	Keterangan	Luas Area (ft ²) (1 M ² = 10,674 ft ²)	Rate (GPM/FT ²)	Total Kebutuhan Air	Penambahan Margin 20%
3	Bejana Bola Butadiena	804,57 m ² x 10,674 = 8.588 ft ²	0,25	2.147 gpm	2.576,4 gpm
4	Kotak Butil Akrilik	176 m ² x 10,674 = 1.872,64 ft ²	0,25	468,16 gpm	561,79 gpm

- **Menentukan akhir kebutuhan air untuk sistem proteksi kebakaran**

Berdasarkan NFPA 101-2009 *Life Safety Code*, skenario kebakaran (*fire scenario*) adalah *a set of conditions that defines the development of fire, the spread of combustion products throughout a building or portion of a building that reactions of people to fire, and the effects of combustion products*. Dengan menentukan zona kebakaran (*fire zone*), kita dapat memetakan di mana saja potensi atau skenario terjadinya kebakaran di tempat kerja.

Khusus dalam penentuan akhir kebutuhan air, skenario kebakaran yang kita ambil adalah skenario kebakaran tunggal terburuk (*one single worst fire scenario*). Filosofi dalam pengambilan ini adalah jika terjadi kebakaran, area yang akan terbakar hanya terjadi pada satu zona kebakaran tanpa menambahkan kemungkinan terjadinya kebakaran pada zona kebakaran yang lain. Oleh karena itu, kebutuhan air untuk sistem proteksi kebakaran didasarkan pada kebutuhan terbesar di dalam tempat kerja yang sedang dievaluasi.

Jika kita melihat Tabel 15.10, dapat kita simpulkan bahwa kebutuhan terbesar adalah pada Zona 3 adalah bejana bola butadiena. Perlu diingat bahwa total kebutuhan air merupakan perhitungan dasar dan diperlukan penambahan margin minimal 20%. Beberapa industri kimia dapat menambahkan margin ini hingga 30%. Hal ini merupakan keputusan pihak manajemen yang juga harus disesuaikan dengan anggaran ataupun biaya pembelian alat-alat proteksi kebakaran yang cukup.

Dengan demikian, bejana bola butadiena ini membutuhkan 2.577 gpm sehingga HSE *engineer* harus memiliki pompa kebakaran dengan ukuran 3.000 gpm.

b. Evaluasi Sistem Retensi Air Pemadam Kebakaran (*Fire Water Retention System*)

Tiga puluh tahun yang lalu salah satu dampak lingkungan terburuk di eropa adalah akibat dari kebakaran pada gudang pabrik kimia untuk industri pertanian Sandoz dekat Basel, Swiss. Air yang digunakan untuk memadamkan kebakaran pada gudang ini mencapai Sungai Rhine dan menyebabkan kontaminasi materi toksik sepanjang 70 km mulai dari Swiss, Perancis, Jerman, hingga ke Belanda. Hal ini menyebabkan terganggunya polusi air dan mengancam tersedianya air bersih dan kehilangan populasi ikan.

Sejumlah 1.350 ton bahan kimia dengan toksisitas yang sangat tinggi tersimpan dalam gudang. Tim pemadam kebakaran menanggapi dengan baik dan api dapat dipadamkan. Akan tetapi, 20 ton bahan kimia tersebut larut dalam air pemadam kebakaran dan mencemari lingkungan di luar area pabrik. Pada tahun 1998 UNECE mengadakan *workshop* bersama untuk mencegah kecelakaan dan limitasi pada industri kimia, khususnya untuk mencegah adanya dampak terhadap sistem perairan.

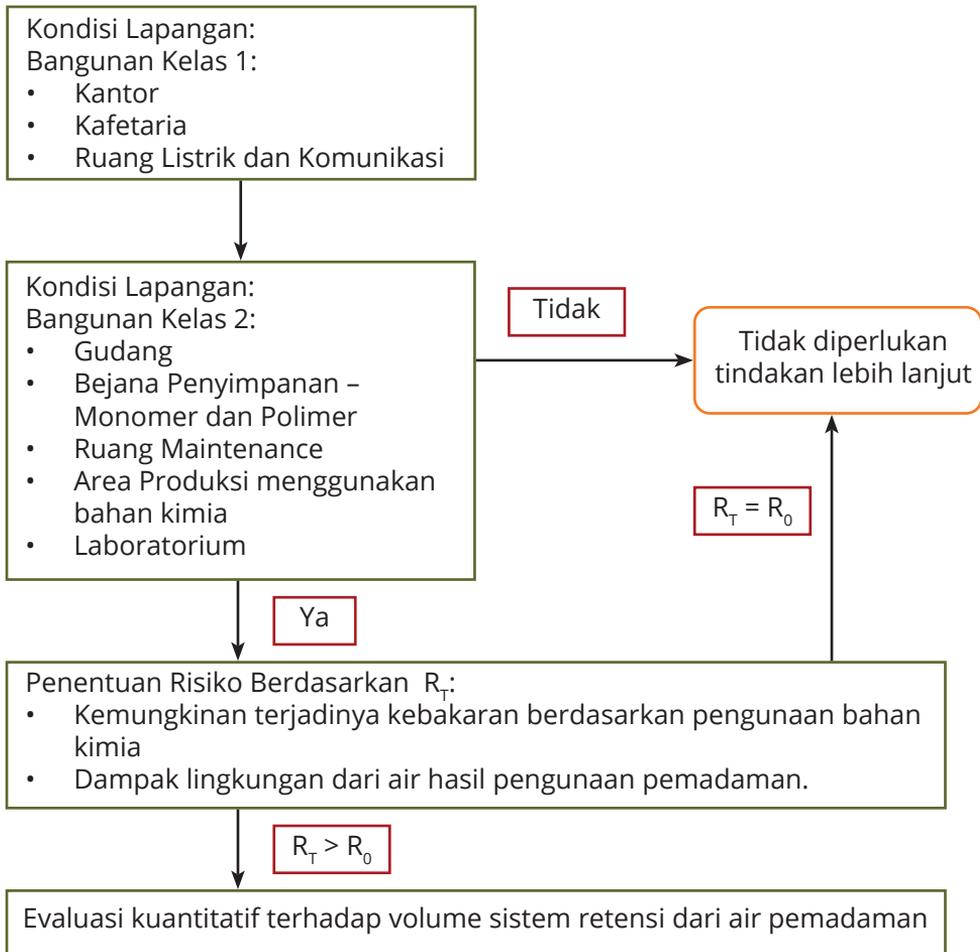
Berikut ini konsep evaluasi sistem retensi air pemadam kebakaran pada industri kimia.

1. Evaluasi Sistem secara Kualitatif

Bangunan Kelas 1 adalah suatu gedung atau tempat yang merupakan area kerja dengan tingkat bahaya kimia yang rendah. Bangunan yang biasanya dikategorikan dalam Kelas 1 ini antara lain gedung kantor yang terdiri atas peralatan komputer, meja, ataupun barang-barang elektronik, dan adanya kafeteria sebagai tempat para pekerja makan ataupun minum beserta dapur.

Bangunan Kelas 2 adalah suatu gedung atau tempat yang memiliki tingkat bahaya kimia yang tinggi karena adanya jumlah bahan kimia yang bersifat *flammable* atau beracun yang biasanya memiliki efek berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Biasanya bangunan kelas ini memiliki kuantitas bahan kimia tertentu dan dapat bereaksi pada saat kebakaran. Contoh bangunan Kelas 2 antara lain gudang penyimpanan bahan kimia (cair, larutan, padatan, ataupun serbuk) dengan bahaya kimia seperti mudah terbakar, bersifat toksik pada manusia, dan memiliki potensi gangguan pada lingkungan; bejana penyimpanan seperti monomer dan polimer; laboratorium; dan ruang pemeliharaan (*maintenance*).

Konsep Sistem Retensi Air Pemadam Kebakaran (Evaluasi Kualitatif)



Gambar 15.11 Alur Konsep Sistem Retensi Air Pemadam Kebakaran pada Industri Kimia

Penentuan Risiko Total dapat ditentukan dengan melakukan evaluasi risiko terhadap sistem retensi air pemadam kebakaran berdasarkan dua faktor:

- 1) probabilitas terjadinya kebakaran (*Fire Probability—F-P*);
- 2) dampak lingkungan dari air pemadaman (*Firewater Environmental Impact-FW-EI*).

Probabilitas terjadinya kebakaran (*Fire Probability*) ditentukan oleh faktor-faktor yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 15.11 Probabilitas Terjadinya Kebakaran di Area Industri Kimia

Probabilitas Terjadinya Kebakaran	Faktor-faktor yang Menentukan
F-P 1 (Rendah)	<p>Penanganan zat yang tidak mudah terbakar:</p> <ol style="list-style-type: none"> i. Adanya SOP penanggulangan kebakaran ii. Tersedianya sistem pemadam kebakaran antara lain APAR dan hidran <p>Penanganan zat mudah terbakar:</p> <ol style="list-style-type: none"> i. Khusus pengamanan proses antara lain monitoring otomatis, misalnya sirkuit otomatis keselamatan (<i>Safety interlock</i>) ii. Adanya HAZOP regular (tahap desain, operasional, dan evaluasi setiap lima tahun) iii. Tersedianya evaluasi/inspeksi secara reguler dengan pihak damkar/pihak ketiga setiap tahun. iv. Tersedianya sistem deteksi dini (teknis dan organisasi) dan adanya pemeliharaan yang teratur terhadap alat-alat proteksi keselamatan proses.
F-P 2 (Sedang)	<p>Penanganan bahan-bahan kimia dapat, mudah, dan sangat mudah terbakar dalam sebuah tempat penampungan/bejana ataupun operasi laboratorium. Indikasinya adalah bahan-bahan kimia bersifat tertutup dalam sistem. Adanya sistem proteksi keselamatan proses bersifat semi otomatis.</p>
F-P 3 (Tinggi)	<p>Penanganan bahan-bahan kimia dapat, mudah, dan sangat mudah terbakar dalam sebuah tempat terbuka, misalnya mengisi, mengosongkan proses sistem. Indikasi utamanya adalah adanya interaksi bahan-bahan kimia dengan lingkungan terbuka. Sistem proteksi keselamatan proses bersifat manual.</p>

Dampak lingkungan dari air pemadaman (*Firewater Environmental Impact—FW-EI*)

Dampak lingkungan pada prinsipnya dipengaruhi oleh faktor berikut.

- Potensi bahaya lingkungan dari bahan-bahan kimia yang digunakan antara lain berdasarkan Sistem GHS—H label (H300, H310, H340, H350, H360D, H360F, H370, H372, H400, H411, H413, dan bahan-bahan reaktif lainnya yang mudah larut dalam air/hidrofilik).
- Jumlah bahan kimia yang ada—bahan pemadam termasuk di dalamnya.

Jumlah bahan kimia akan langsung berhubungan pada penghitungan sistem retensi air pemadaman.

- Perlu dicatat bahwa penilaian kuantitas bahan pemadaman harus dilakukan secara terpisah untuk setiap zona kebakaran. Dengan demikian, terdapat penambahan selain air pemadaman, antara lain jumlah bahan kimia tersimpan (gudang atau bejana penyimpanan) ataupun busa yang digunakan oleh sistem pemadaman.

Tabel 15.12 Dampak Lingkungan dari Air Pemadaman terhadap Sistem Pengelolaan Limbah dan Pihak Eksternal dari Area Kerja

Dampak Lingkungan dari Air Pemadaman — FW-EI	
FW-EI kategori	Berdasarkan dampak terhadap tanah dan badan air di area kerja pada sistem pengelolaan limbah internal ataupun yang ada.
FW-EI Kelas 1	<ul style="list-style-type: none"> • Penalti ataupun penghentian usaha oleh pihak berwajib. • Dapat memengaruhi media massa dan pihak umum. Gangguan besar pada sistem pengelolaan limbah.
FW-EI Kelas 2	<ul style="list-style-type: none"> • Peringatan oleh pihak berwajib (tanpa menarik media massa). • Gangguan sedang pada sistem pengelolaan limbah.
FW-EI Kelas 3	<ul style="list-style-type: none"> • Pelaporan kepada pihak berwajib dibutuhkan. • Gangguan ringan pada sistem pengelolaan limbah.
FW—EI Kelas 4	<ul style="list-style-type: none"> • Pelaporan kepada pihak berwajib tidak diperlukan. • Penanganan pada sistem limbah secara internal dan tidak ada gangguan pada sistem pengelolaan limbah.

Catatan: Jika site ataupun pabrik tidak memiliki sistem pengelolaan limbah, kategori dampak lingkungan dari air pemadaman hanya ditentukan berdasarkan kriteria GHS label H di atas. Dengan tidak dimilikinya label H sesuai kriteria di atas, FW-EI dapat langsung dikategorikan ke dalam Kelas 4.

Penentuan Risiko Total (RT)

Penentuan risiko total didasarkan pada prinsip kualitatif analisis risiko, yang dilakukan dengan menentukan probabilitas kebakaran (F-P) dan dampak lingkungan dari air pemadaman (FW-EI) sesuai dengan Tabel 15.12 di atas.

Tabel 15.13 Penentuan Risiko Total pada Penentuan Dampak Lingkungan dari Air Pemadaman

	FW-EI 1	FW-EI 2	FW-EI 3	FW-EI 4
F-P 1	FW-R 0	FW-R 1	FW-R 2	FW-R 2
F-P 3	FW-R 0	FW-R 1	FW-R 2	FW-R 3
F-P 3	FW-R 0	FW-R 2	FW-R 3	FW-R 3
di mana				
FW-R 0 = Risiko Rendah; FW-R 1 = Risiko Sedang; FW-R 3 = Risiko Tinggi				

Adapun mitigasi risiko untuk sistem retensi kebakaran pada industri kimia ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 15.14 Mitigasi Risiko untuk Sistem Retensi Kebakaran pada Industri Kimia

Risiko	Tindakan Mitigasi Risiko
FW-R0	Tidak ada tindakan tambahan yang diperlukan.
FW-R1	Air sisa pemadaman harus disimpan di dalam area industri. HSE atau unit tanggap darurat harus membuat fasilitas atau penyediaan retensi. Jika tidak memungkinkan, harus ada tim tanggap darurat yang menggunakan sistem retensi sementara dengan menyedot (tindakan organisasi).
FW-R2	Air sisa pemadaman harus disimpan dalam area industri. Diperlukan sistem retensi yang terpusat meskipun sudah ada sistem penampungan di tiap-tiap lokasi penyimpanan (<i>bund wall</i> dll.). Jika ada risiko terhadap air tanah, sistem retensi harus tidak memiliki potensi kebocoran.
FW-R3	Air sisa pemadaman harus disimpan dalam area industri. Perlunya fasilitas khusus yang kedap terhadap air tanah dan tertutupnya area pabrik dengan aliran air umum. Sistem retensi air pemadaman bersifat wajib dimiliki meskipun sudah ada penampungan lokal (<i>bund wall</i> dll.).

2. Evaluasi Sistem secara Kuantitatif

Konsep Sistem Retensi Air Pemadam Kebakaran (Evaluasi Kuantitatif)

Evaluasi sistem retensi air pemadaman secara kuantitatif didasarkan pada dua persyaratan, yaitu metode perhitungan secara umum dan berbasis skenario. Perhitungan secara umum didasarkan sebagai asumsi berikut.

- Untuk zona kebakaran (FZ) < 600 m², waktu pemadaman yang dibutuhkan paling sedikit 1 jam 30 menit.
- Untuk zona kebakaran (FZ) ≥ 600 m², waktu pemadaman yang dibutuhkan paling sedikit 2 jam.

Selain itu, ada faktor-faktor lain yang perlu dipertimbangkan, yaitu

- waktu tanggap darurat dengan pihak damkar setempat;
- jumlah air yang tersedia untuk pemadaman;
- rasio penguapan yang didasarkan pada lokasi;
- luas area keseluruhan dari pabrik; dan
- bahan kimia yang ada di area pabrik biasanya yang tersimpan baik dalam bejana penyimpanan maupun gudang.

Contoh Kasus:

Mengacu pada Tabel 15.10, zona kebakaran (FZ) untuk bejana bola butadiena memiliki luas area yang akan diproteksi sebesar 804,57 m². Dengan demikian, sesuai dengan perhitungan umum di atas, waktu pemadaman yang dibutuhkan adalah dua jam.

Analisis Pertama:

Sistem retensi pemadaman yang diperlukan dan dihitung sebagai berikut.

- Jumlah kebutuhan air pada skenario kebakaran tunggal terburuk (*single worst fire scenario*) adalah 2.576,4 gpm.
- Waktu pemadaman adalah dua jam.
- Total air yang diperlukan pada saat pemadaman adalah 2.576,4 gpm x 2 x 60 min = 309.168 galon atau 1.170,33 m³.

Dengan demikian, pimpinan manajemen harus memiliki sistem retensi atau sistem penampungan sebesar 1.170,33 m³.

Analisis Kedua:

Skenario kebakaran tunggal terburuk (*single worst fire scenario*) memang benar kita perlukan untuk mengetahui kapasitas pompa yang benar-benar dibutuhkan oleh site. Akan tetapi, ada juga analisis kedua yang dapat kita perhatikan, yaitu kebakaran yang terjadi pada gudang.

Dalam kasus kebakaran pada bola butadiena, setelah terjadinya insiden kebakaran, produk atau butadiena ini akan menguap sehingga tidak terjadi penambahan antara air pemadaman dan produk. Namun, jika terjadi kebakaran pada gudang di mana terdapat berbagai macam barang, misalnya bubuk, padatan,

ataupun cairan, bahan kimia inilah yang akan menambahkan kebutuhan sistem retensi selain air pemadaman.

Berikut perhitungannya.

- Berdasarkan Tabel 15.10, jumlah kebutuhan air untuk pemadaman gudang adalah 46,11 gpm.
- Waktu pemadaman ditentukan dengan nilai maksimum, yaitu dua jam.
- Total air yang diperlukan pada saat pemadaman adalah $46,11 \text{ gpm} \times 2 \times 60 \text{ min} = 5.533,2 \text{ gpm}$ atau $20,95 \text{ m}^3$.

Faktor lain yang perlu dipertimbangkan adalah isi gudang tersebut. Misalnya jika estimasi maksimum oleh pihak SCM (*supply chain management*) total isi gudang adalah 200 ton dan estimasi koefisien produk-produk tersebut adalah 1,4, total volume penambahannya adalah 280 ton. Berdasarkan unit konversi semen, 1 ton (metrik) = $0,42 \text{ m}^3$. Dengan demikian, penambahan 280 ton menjadi $117,6 \text{ m}^3$.

Jadi, untuk analisis kedua, untuk skenario terjadinya kebakaran pada gudang, kebutuhan sistem retensi adalah $20,95 \text{ m}^3 + 117,6 \text{ m}^3 = 138,55 \text{ m}^3$.

Keputusan Final dari Analisis di Atas:

Pada prinsipnya sistem retensi air pemadaman kebakaran didasarkan pada jenis bahan kimia yang berbahaya dan memiliki dampak pada sistem lingkungan. Perhitungan kebutuhan air menjadi penentu seberapa besar sistem penampungan atau retensi yang dimiliki oleh *site*, antara lain sistem gorong-gorong atau parit dan juga ditambah dengan dinding penahan (*bund wall*).

Kedua analisis di atas dapat diterima dan keputusan akhir adalah sistem penampungan retensi air pemadaman harus minimal atau lebih besar dari $1.170,33 \text{ m}^3$. Perlu dicatat bahwa pada skenario lain, jumlah bahan kimia berbahaya yang ada di gudang dapat menjadi lebih signifikan daripada jumlah terbesar kebutuhan air (*firewater demand*).

GLOSARIUM

Asphyxiant gases: gas-gas asfiksia; gas-gas narkose yang dapat menyebabkan depresi sistem saraf pusat, sehingga menyebabkan hilangnya kesadaran yang dapat diikuti dengan kematian

Autoignition Temperature: temperatur autoignisi; temperatur terendah suatu padatan, cairan, atau gas yang akan secara spontan menyala, hasil dari self-sustained combustion tanpa dibutuhkan sumber ignisi eksternal

Burning Velocity: fungsi dari konsentrasi bahan bakar, oksigen, temperatur dan tekanan dari campuran

Compartment Fire Simulation: simulasi kebakaran kompartemen; digunakan untuk memprediksi perkembangan api dalam suatu kompartemen dalam kondisi yang bervariasi

Cooling: pendingin

Decay: bahan bakar telah habis, laju energi yang dilepaskan menurun dan rata-rata temperatur gas dalam kompartemen berkurang.

Degree of Confinement (*by equipment or structures*)

Degree of Turbulence

Delayed Ignition

Diffusion Flame: penyebaran api

Emergency Power: pembangkit listrik darurat

Emergency Shutdown: penghentian darurat

Explosion Control: pengendalian ledakan

Event Trees: gambaran representasi dari model logis, sehingga pembuatannya didasari atas teori logis

Facility-Specific Data: *failure rate*; data yang dihasilkan dari pengumpulan informasi pada pengalaman akan kegagalan operasi peralatan fasilitas

Fault Tree Analysis: analisis *fault tree*

Field Model: model yang dapat mengestimasi kebakaran dalam suatu ruangan melalui perhitungan conservation equation (contohnya momentum, massa, energi,

difusi, spesies) sebagai hasil dari suatu kebakaran

Fire And Explosion Index (F&EI): pengukuran kuantitatif yang berdasarkan data-data, energi potensial material yang sedang dievaluasi, dan pengembangan dari praktik pencegahan kerugian yang telah dilakukan

Fire Ball: bola api; kebakaran berbentuk bola yang hebat hasil dari terbakarnya cairan atau gas bertekanan yang lepas secara tiba-tiba

Fire Hazard: bahaya kebakaran

Fire Point: titik api/suhu terendah ketika campuran uap dengan udara dapat terbakar terus-menerus apabila dinyalakan

Fire Prevention: pencegahan kebakaran

Fire Risk Assessment: kajian risiko kebakaran

Fire Triangle: segi tiga api

Flammable: mudah menyala

Flammable Liquid: cairan yang memiliki titik nyala (*flash point*) di bawah 100°F

Flash Fire: dapat didefinisikan sebagai kebakaran dari campuran uap yang dapat terbakar (*flammable*) dan udara yang terjadi pada kecepatan tinggi (kecepatan sonik)

Flash Point: titik nyala/suhu terendah ketika cairan memberikan uap yang cukup pada permukaannya sehingga campuran tersebut dapat dinyalakan

Fuel: bahan bakar

Fully Developed Fire: bahan bakar telah habis, laju energi yang dilepaskan menurun dan rata-rata temperatur gas dalam *compartement* berkurang

Hand Extinguisher/Monitors: alat pemadam api ringan

Heat Transfer: perpindahan panas

Ignitable Mixture: campuran yang dapat menyala

Ignition: ignisi; proses terjadinya reaksi eksotermis dengan meningkatnya temperatur di atas temperatur lingkungan *ignition point (ignited)*

Ignition Point: titik ignisi; suhu terendah ketika campuran uap dengan udara dapat terbakar terus-menerus apabila dinyalakan

Ignition Probability: probabilitas ignisi; identifikasi sumber ignisi yang dapat dijangkau oleh suatu awan mengandung konsentrasi bahan *flammable*

Ignition Source: sumber penyalaaan

Ignition Temperature: temperatur penyalaaan

Konduksi: perpindahan panas melalui padatan

Konveksi: perpindahan panas melalui cairan atau gas

Life Cycle of Fire: siklus api

Lower Flammable Limit (LFL): proporsi minimum bahan bakar di udara yang akan mendukung pembakaran

Material Factor: faktor material; angka potensial energi yang dilepaskan dari kejadian kebakaran dan ledakan yang disebabkan oleh *combustion* atau *chemical reaction*

Minimum Ignition Energy: energi ignisi minimum; energi terendah yang dibutuhkan untuk menyalakan

Mushroom Clouds: asap/awan berbentuk seperti jamur

Oksidator: tidak bersifat mudah terbakar, tetapi mempercepat atau mendukung reaksi oksidasi dari material yang mudah terbakar

Pool Fire: difusi turbulen kebakaran yang terjadi di atas suatu *pool horizontal* dari uap hidrokarbon di mana bahan bakar (*fuel*) memiliki nilai momentum inisial yang rendah atau nol

Postrelease Frequency Analysis: analisis dilakukan dengan menggunakan *event trees*

Proportioning: peristiwa benturan antara oksigen dan molekul bahan bakar *piloted ignition*

Radiasi: perpindahan panas oleh elektromagnetik radiasi/tidak memerlukan medium

Reactive Chemical Review: tinjauan terhadap bahan kimia reaktif

Running Liquid Fire: kebakaran yang terjadi pada suatu cairan yang tertumpah pada suatu permukaan air atau cairan lainnya

Sprinkler System: sistem *sprinkler*

Unstable Chemical: merupakan senyawa yang dapat menimbulkan reaksi spontan

Upper Flammable Limit (UFL)/Lower Explosive Limit (LEL): konsentrasi maksimum dari bahan bakar di udara yang mendukung pembakaran

Vapour Density: kerapatan uap/ukuran perbandingan densitas antara uap murni atau gas dibandingkan udara

DAFTAR PUSTAKA

- ABCB, Australian Building Codes Board. (2009). *Building Code Australia*. Diakses pada Agustus 2009 dari <https://www.abcb.gov.au>.
- American Institute of Chemical Engineers. (t.t.). *Dow's Fire and Explosion Index Hazard Classification Guide*. Edisi Ke-6. Diakses pada 20 Maret 2007 dari www.huttcity.govt.nz.
- Anonim. (1970). Undang-Undang Nomor 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja.
- Anonim. (2005). Fire Safety Order. Diakses pada 17 Februari 2017 dari https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/15111/guidance1enforcement2005.pdf.
- Anonim. (2014). *New Zealand Building Code*. Diakses pada 18 Februari 2017 dari <https://www.building.govt.nz/assets/Uploads/building-code-compliance-handbooks/building-code-handbook/building-code-handbook-3rd-edition-amendment-13.pdf>.
- Anonim. (t.t.). MSDS Butane. Diakses pada 15 Juli 2011 dari <http://www.chemadvisor.com/Matheson/database/msds/MAT15370000800003.PDF>.
- Anonim. (t.t.). MSDS Propane. Diakses pada 15 Juli 2011 dari <https://www.mathesongas.com/pdfs/msds/MAT19690.pdf>.
- Badan Standarisasi Nasional. (2009). *Sistem Informasi Standar Nasional Indonesia*. Diakses pada 17 Agustus 2009 dari <http://websisni.bsn.go.id>
- Bjerketvedt, D., Bakke, J.R., & Wingerden, K.V. (1997). Gas Explosion Handbook. *Journal of Hazardous Material*, 52, 1–150.
- Black, W. (2009). Smoke Movement in Elevator Shafts during a High-rise Structural Fire. *Fire Safety Journal*, 44, 168–182. USA: Georgia Institute of Technology. Diakses pada 7 Oktober 2013 dari <http://www.sciencedirect.com>.
- Brenck, A., & Mondry S. (1998). Risiko Analyse des Gefahrguttransportes- Unfallstatistische Risiko Analyse auf der Basis Typischer Transportketten, *Berich zum Forschungsprojekt 890611, BAST, Bergisch Gladbach*.
- BREEZE Software. *BREEZE Incident Analysis*. 2011. Diakses pada 25 November 2011 dari <http://www.BREEZE-software.com/incidentanalyst/>.
- Building Officials and Code Administrators (BOCA). (2002). Diakses pada 17 Februari 2017 dari <http://www.hazardcontrol.com/factsheets/pdfs/say-goodbye-to-SBC-UBC-BOCA.pdf>.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2003). *Guideline for Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing Facilities*. New York: American Institute of Chemical Engineers.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2009). *Guidelines for Chemical Process*

- Quantitative Risk Analysis*. New Jersey: American Institute of Chemical Engineers and John Wiley & Sons, Inc.
- Center for Chemical Process Safety (CCPS). (2008). *Guidelines for Chemical Transportation Safety, Security and Risk*. New York: American Institute of Chemical Engineers and John Wiley & Sons, Inc.
- Chattopdhyay, G., Hallahan, P., Brockbank, P., Lestari, F., & Hayes, A.J. (1–2 Juli 2004). Development of a New Apparatus for the Assessment of Health Impact from Exposure to Fire Combustion Products. *TechTrain 2004 conference*. Adelaide: TechNet South Australia, The University of Adelaide.
- Chemical Engineering Magazine. (22 Desember 2006). *Chemical Engineering Plant Cost Index, Revision: 1*. Diakses pada 16 April 2007 dari www.curryhydrocarbons.com.
- Citra Ibukota. (Februari 2001). *82 Tahun Dinas Kebakaran DKI Jakarta: Pencegahan Lebih Baik Ketimbang Penanggulangan*. Diakses pada 22 Maret 2007 dari Citra Ibukota No. 004: www.jakarta.go.id.
- Colling, D.A. (1990). *Industrial Safety: Management and Technology*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Crowl, D.A. (2003). *Understanding Explosions*. New York: Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers.
- Crowl, D.A., & Louvar, J.F. (2003). *Chemical Process Safety: Fundamentals with Application*. Edisi Ke-2. Prentice Hall PTR.
- Cuchi, Gasulla, Ventosa, & Casal. (2004). Explosion of Road Tanker Containing Liquefied Natural Gas. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17, 315–321.
- Davletshina, T.A., & Cheremisino, N.P. (1998). *Fire and Explosion Hazards Handbook of Industrial Chemical*. New Jersey: Noyes Publications.
- Department of Transportation. (2000). *Emergency Response and Preparedness. A Guidebook for first responders during the initial phase of a dangerous goods/hazardous materials incident*. USA: Department of Transportation.
- Dinas Pemadam Kebakaran. (2007). *Data Statistik Kebakaran*. Retrieved Maret 22, 2007, from www.jakartafire.com diakses pada
- Dinas Pemadam Kebakaran. (2009). *Data Statistik Kebakaran*. Retrieved Agustus 17, 2009, from <http://www.jakartafire.org/damkar>.
- Estria, C., & Lestari, F. (27 Agustus 2008). Evaluasi Sistem Penanggulangan Kebakaran di Kapal Penumpang KM X di PT XY Tahun 2008. Seminar Nasional ke 4 K3LL. Diselenggarakan oleh FKM UI dan BATAN. Depok: BATAN.
- Eurostat. (2000). *Transport in Figures, Statistical Pocket Book*. European Commission Directorate for Energy and Transport in co-operation with Eurostat.
- Ferguson, L.H., & Janicak, C.A. (2005). *Fundamentals of Fire Protection for the Safety Professional*. USA: The Scarerow Press, Inc.

- Furness, A., & Muckett, M. (2007). *Introduction to Fire Safety Management*. Burlington: Butterworth-Heinemann.
- Gerber, B., et al. (2013). Situational Awareness for Supporting Building Fire Emergencies Response: Information Needs, Information Source, and Implementation Requirements. *Fire Safety Journal*, 63, 17–28. Diakses pada 7 October 7 2013 dari <http://www.sciencedirect.com>.
- Glendon, I.A., & McKenna, E.F. (1995). *Human Safety and Risk Management*. London: Chapman and Hall.
- Health and Safety Executive UK. (2006). *Guidance on Risk Assessment for Offshore Installations*. HSE UK Information Sheet.
- Health and Safety Executive. (2009). *Approved Code of Practice Health and Safety HSC 13*. Diakses pada 17 Agustus 2009 dari <http://www.hse.gov.uk/pubns/hsc13.pdf>.
- Health and Safety Executives. (2009). *Five Steps to Risk Assessment*. Diakses pada 17 Agustus 2009 dari <http://www.hse.gov.uk/pubns/indg163.pdf>.
- Hendershot, D. C. (Agustus 1997). *Safety Through Design in the Chemical Process Industry: Inherently Safer Process Design*. Briston: Rohm and Haas Company.
- HSE. (2006). *Guidance on Risk Assessment for Offshore Installations*. Offshore Information Sheet No. 3/2006.
- Hughes Associates, Inc. (2000). *Computerized Fire Safety Evaluation System For Business Occupancies Software*. Baltimore, MD: Commerce Drive.
- International Code Council. (2012). *International Building Code*. USA.
- Karlsson, B., & Quintiere, J.G. (1999). *Enclosure Fire Dynamics*. Boca Raton: CRC Press.
- Karlsson, B., & Quintiere, J.G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. USA: CRC Press.
- Kementerian Pekerjaan Umum. (2008). Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 26 Tahun 2008 tentang Persyaratan Teknis Sistem Proteksi Kebakaran pada Bangunan Gedung dan Lingkungan.
- Lees, F.P. (1996). *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control*. Great Britain: Butterworth-Heinemann.
- Lestari, F., & Nurdiansyah, W. (2007). Potensi Bahaya Kebakaran dan Ledakan pada Tangki Timbun Bahan Bakar Minyak (BBM) Jenis Premium di Depot X Tahun 2007. *Makara Seri Teknologi*, 11(2).
- Lestari, F., & Panindrus, R.Y. (2008). Audit Sarana Prasarana Pencegahan Penanggulangan dan Tanggap Darurat Kebakaran di Gedung Fakultas X Universitas Indonesia Tahun 2006. *Makara Seri Teknologi*, 12(1).
- Lestari, F., Green, A.R., Chattopadhyay, G., & Hayes, A.J. (2006). An Alternative Method for Fire Smoke Toxicity Assessment Using Human Lung Cells. *Fire Safety Journal*, 41, 605–615.
- Lestari, F., Green, A.R., Chattopadhyay, G., Hayes, A.J., Khalil, C.A., & Markovic, B.

- (17–20 Maret 2004.). In Vitro Cytotoxicity Test on Human Cells for Assessment of Fire Combustion Products Using a Tube Furnace. 6th Asia-Oceania Symposium Fire Science and Technology. Daegu, Korea.
- Lestari, F., Green, A.R., Hayes, J.A., & Markovic, B. (30 November–3 December 2003). The in Vitro Cytotoxicity Method for Exposure of Human Cell Lines to Fire Combustion Products. *Australasian Society of Clinical and Experimental Pharmacologists and Toxicologists (ASCEPT)*. Sydney.
- Lestari, F., Green, A., & Markovic, B. (3–6 Desember 2001). The Use of in Vitro Cytotoxicity Testing Using Human Cell Lines as an Alternative for a Fire Combustion Products Toxicity Test. 5th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology. University of Newcastle, Australia.
- Lestari, F., Hayes, A.J., Green, A.R., & Chattopadhyay, G. (21–25 Agustus 2005). Assessing the Toxicity of Smoke Derived from Polymer Combustion Using Human Lung Cells (A549). 5th World Congress on Alternatives and Animal Use in the Life Sciences. Berlin.
- Lestari, F., Hayes, A.J., Green, A.R., & Chattopadhyay, G. (26–28 Oktober 2005). Development of an Alternative Method for Assessing the Smoke Toxicity of Fire Combustion Products. The Safety Conference 2005. Sydney, Australia: Safety Institute of Australia (SIA).
- Lestari, F., Hayes, A.J., Green, A.R., & Chattopadhyay, G. (2011). An Alternative Method for in Vitro Fire Smoke Toxicity Assessment of Polymers and Composites Using Human Lung Cells. *Fire & Materials*, 35, 411–429.
- Lestari, F., Hayes, A.J., Green, A.R., Chattopadhyay, G. (2012). In Vitro Cytotoxicity and Morphological Assessment of Smoke from Polymer Combustion in Human Lung Derived Cells (A549). *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 215, 320–332.
- Lestari, F., Hayes, A.J., Green, A.R., & Khalil, G. (7 Juni 2004). Cytotoxicity Assessment of Smoke from Polymer Combustion on Human Cells. The Australian Society for Medical Research, XIIIth NSW Scientific Meeting. Sydney.
- Lestari, F., Hayes, A.J., Green, A.R., & Markovic, B. (2005). In Vitro Cytotoxicity of Selected Chemicals Commonly Produced during Fire Combustion Using Human Cell Lines. *Toxicology in Vitro*, 19, 653–663.
- Lestari, F., Hayes, A.J., Green, A.R., Chattopadhyay, G., & Khalil, C.A. (21–26 November 2004). Smoke Cytotoxicity Assessment of Polymer Combustion: A New in Vitro Method for Exposure of Fire Effluents to Human Cells. The Australian Health and Medical Research Congress. Sydney.
- Lestari, F., Markovic, B., & Green, A. (17–19 Juni 2003). Development of in Vitro Cytotoxicity Method Using Human Cell Lines for Fire Combustion Products Toxicity Testing. The 8th International Congress of Toxic Combustion by Products: Origin, Fate and Health Impacts. Umea University, Umea, Sweden.

- Lestari, F., Markovic, B., Green, A.R., Chattopadhyay, G., & Hayes, A.J. (2006). Comparative Assessment of Three in Vitro Exposure Methods for Combustion Toxicity. *Journal of Applied Toxicology*, 26, 99–114.
- Lestari, F., Nugroho, Y.S., & Khotimah, H. (27 Agustus 2008). Thermal Radiation Modeling for Oil and Gas Tank. OHS International Seminar, Special Topics: Radiation and Its Health Effects. FKM UI, Ruang Promosi Doktor. Depok: BATAN.
- Lestari, F., Hayes, A.J., & Green, A.R. 2010. In Vitro Biological Toxicity Assessments for Fire Combustion Products. Anna Stec & Richard Hull (eds.). *Fire Toxicity*. UK: Woodhead Publishing, CRC Press.
- National Fire Protection Association. (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Edisi Ke-3. Massachusetts: Society of Fire Protection Engineers.
- Nedved, M., & Imamkahasani, S. (1991). Dow's Fire and Explosion Index (F&EI). *Dasar-dasar Keselamatan Kerja Bidang Kimia dan Pengendalian Bahaya Besar*. Jakarta: ILO.
- Nedved, M., & Imamkahasani, S. (1991). Pencegahan dan Perlindungan terhadap Kebakaran dan Peledakan. *Dasar-dasar Keselamatan Kerja Bidang Kimia dan Pengendalian Bahaya Besar*. Jakarta, Jakarta, Indonesia: ILO.
- NFPA. (1990). NFPA 30: Flammable and Combustible Liquid Code 1990 Edition. *National Fire Codes*. USA: NFPA.
- NFPA. (1991). *National Fire Codes*. Volume 1. USA: NFPA.
- NFPA 101. (2012). *Life Safety Code*. Edisi 2012. National Fire Protection Association. Quincy MA.
- NFPA 5000. (2012). *Building Construction and Safety Code*. Edisi 2012. National Fire Protection Association. Quincy MA.
- NFPA 13. (2013). *Standard for the Instalation of Sprinkler Systems*. Edisi 2013. National Fire Protection Association. Quincy MA.
- NFPA 72. (2013). *National Fire Alarm and Signaling Code*. Edisi 2013. National Fire Protection Association. Quincy MA.
- NFPA 101 A. (2013). *Guide on Alternative Approaches to Life Safety*. Edisi 2013. National Fire Protection Association. Quincy MA.
- NFPA 220. (2013). *Standard on Types of Building Construction*. Edisi 2013. National Fire Protection Association. Quincy MA.
- NIOSH. (2005). *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards and Other Databases*. USA: NIOSH.
- NIOSH. (2008). *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazard*. National Institute on Occupational Safety and Health.
- Nolan, D.P. (1996). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities*. USA, New Jersey: Noyes Publications.
- Orzog, H.D. (t.t.). *Facility Siting–Case Study Demonstrating Benefit of Analyzing Blast*

- Dynamics*. Cambridge: Arthur D. Little, Inc.
- Ramli, S. (2010). *Petunjuk Praktis Manajemen Kebakaran (Fire Management)*. Jakarta: Dian Rakyat.
- Saputra, Y. (2004). *Prosedur dan Potensi Bahaya pada Kegiatan Penyaluran BBM Beserta Penanggulangannya*. Laporan Magang. Indonesia: FKM UI.
- Schroll, R.C. (2002). *Industrial Fire Protection Handbook*. Edisi Ke-2. Florida: CRC Press.
- Sinar Harapan. (20 April 2002). *Polisi Tangkap Kernet Mobil Tangki Penyebab Kebakaran*. *Harian Umum Sore Sinar Harapan*. Diakses pada 20 Maret 2007 dari www.sinarharapan.co.id.
- Stollard, P., & Abrahams, J. (2002). *Fire from First Principles: A Design Guide to Building Fire Safety*. Edisi Ke-3. New York: E & FN Spon.
- Suardin, J. (Agustus 2005). *The Integration of Dow's Fire and Explosion Index into Process Design and Optimization to Achieve an Inherently Safer Design*. A Thesis Master of Science. USA: Texas A&M University.
- Talbot, J. (2013). "ALARP (As Low As Reasonably Practicable)". Diakses pada 15 Desember 2014 dari <http://www.jakeman.com.au/media/alarp-as-low-as-reasonably-practicable>.
- Tavares, R.M. (2010). *Design for Horizontal Escape in Buildings; The use of the Relative Distance between Exits as an Alternative Approach to the Maximum Travel Distance*. *Safety Science*, 48, 1242–1247. Diakses pada 7 Oktober 2013 dari <http://www.sciencedirect.com>.
- The International Association for the Study of Insurance Economics. (2006). *World Fire Statistics. Information Bulletin of the World Fire Statistic Centre No 22. October 2006*. Geneva: The Geneva Association Newsletter.
- U.S. Chemical Safety Hazard and Investigation Board. (1998). *Herrig Brothers Propane Tank Explosion*. Diakses pada 11 Januari 2012 dari http://www.csb.gov/assets/document/CSB_HerrigFinaldigest.pdf.
- U.S. Fire Administration. (2004). *A Profile of Fire in the United States 1992–2001*. Edisi Ke-13. Maryland: Federal Emergency Management Agency.
- United Kingdom, UK Parliament. (1974). *Health and Safety Act*. Diakses dari <http://www.hse.gov.uk/legislation/hswa.pdf>.
- Wermac. 2011. *Introduction to Storage Tanks and Vessel*. Diakses pada 15 Desember 2011 dari http://www.wermac.org/equipment/storage_tanks_vessels_general.html.
- Watts, J.M. (2007). *Analysis of the NFPA Fire Safety Evaluation System for Business Occupancies*. Vermont: Fire Safety Institute. Diakses pada 11 September 2013 dari www.firesafetyinstitute.org.
- Wei, Z. et al. (2013). *A Study of Bifurcation Flow of Fire Smoke in Tunnel with Longitudinal Ventilation*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 67, 829–

835. Diakses pada 7 Oktober 2013 dari <http://www.sciencedirect.com>
- Xiuyu, L., et al. (2012). Factor Analysis of High-Rise Building Fires Reasons and Fire Protection Measures. *Procedia Engineering*, 45, 643–648. Anhui University of Technology China. Diakses pada 7 Oktober 2013 dari <http://www.sciencedirect.com>
- Yanri, Z. (2005). Himpunan Peraturan Perundangan Kesehatan Kerja. Indonesia: Lembaga ASEAN OHSNET.
- Yu, H. (2012). Spray Characterization Measurements of a Pendant Fire Sprinkler. *Fire Safety Journal*, 54, 36–48. USA: Elsevier Ltd. Diakses pada 7 Oktober 2013 dari <http://www.sciencedirect.com>
- Yung, D. (2008). *Principles of Fire Risk Assessment in Buildings*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.

Tingginya angka kasus kebakaran pada berbagai sektor, seperti pada industri minyak dan gas bumi, petrokimia, kimia, manufaktur, gedung, transportasi, industri makanan, dan perumahan, menunjukkan perlunya pengetahuan dan pemahaman tentang manajemen keselamatan dan konsep dasar api, *fire risk assessment*, *fire modelling* dan *fire protection*, serta *suppression system*.

Buku ini tersusun menjadi lima belas bab. Pelbagai studi kasus dan aplikasi manajemen keselamatan kebakaran seperti untuk gedung, industri minyak dan gas, industri kimia dan manufaktur, serta *fire modeling* dibahas dalam buku ini, juga berbagai aspek keselamatan kebakaran termuat dalam buku ini. Diharapkan dengan pendekatan yang sederhana, buku ini mudah dipahami oleh para pembacanya dan disertai dengan studi kasus dan contoh aplikasi pada situasi yang sesungguhnya.

Diterbitkan oleh :

Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Indonesia

