

RSNI3

RSNI3 ISO/TR 15916:2015
(Ditetapkan oleh BSN tahun 2024)

Rancangan Standar Nasional Indonesia 3

Pertimbangan dasar untuk keselamatan sistem hidrogen

(ISO/TR 15916:2015, IDT)

Pengguna dari RSNI ini diminta untuk menginformasikan adanya hak paten dalam dokumen ini, bila diketahui tanpa memberi informasi pendukung lainnya (pemilik paten: bagian yang terkena paten, alamat pemberi paten dan lain-lain)

Daftar isi

Daftar isi	i
Prakata	v
Pendahuluan	vi
1 Ruang lingkup	1
2 Acuan normatif	1
3 Istilah dan definisi	1
4 Gambaran umum aplikasi hidrogen	15
4.1 Infrastruktur hidrogen dasar	15
4.1.1 Kategori infrastruktur	15
4.1.2 Produksi	15
4.1.3 Penyimpanan dan transportasi	16
4.1.4 Aplikasi penggunaan hidrogen	17
4.2 Komponen sistem hidrogen yang umum	18
4.2.1 Umum	18
4.2.2 Bejana penyimpanan	18
4.2.3 Jalur penyaluran fluida, perpipaan, <i>joint</i> , dan penyekat	18
4.2.4 Kontrol aliran	18
4.2.5 Sistem pelepas tekanan	18
4.2.6 Komponen deteksi	19
4.2.7 Komponen lainnya	19
4.2.8 Pertimbangan untuk kondisi di luar sistem	19
4.3 Bahan bakar hidrogen	20
4.4 Efek lingkungan	20
5 Sifat dasar dari hidrogen	20
5.1 Sifat umum	20
5.1.1 Sifat atom dan molekuler	20
5.1.2 Penampakan dan karakteristik umum	21
5.2 Sifat termofisika yang dipilih	21
5.2.1 Umum	21
5.2.2 Sifat termofisika yang dipilih dari gas hidrogen	21
5.2.3 Sifat termofisika yang dipilih dari hidrogen cair kriogenik	22
5.3 Sifat pembakaran dasar	23
5.3.1 Catatan umum tentang karakteristik keselamatan	23
5.3.2 Sifat pembakaran hidrogen yang dipilih	23
5.3.3 Ledakan	24
5.3.4 Deflagrasi	24
5.3.5 Detonasi	25
5.3.6 Ambang batas titik bakar	25
5.3.7 Energi penyulutan dan energi penyulutan minimum seperti diterapkan pada deflagrasi	26

6	Pertimbangan keselamatan untuk penggunaan hidrogen gas dan cair	27
6.1	Umum	27
6.2	Bahaya yang terlibat sebagai konsekuensi dari sifat hidrogen.....	28
6.2.1	Umum	28
6.2.2	Gas hidrogen	28
6.2.3	Hidrogen cair	29
6.3	Faktor-faktor yang terlibat dalam bahaya pembakaran.....	29
6.3.1	Aspek pembakaran	29
6.3.2	Proses pembakaran <i>non-premix</i>	30
6.3.3	Ledakan.....	30
6.4	Faktor-faktor yang terlibat dalam bahaya tekanan.....	31
6.4.1	Umum	31
6.4.2	Penyimpanan gas	32
6.4.3	Hidrogen cair	32
6.5	Faktor yang terlibat dalam bahaya temperatur rendah	32
6.6	Faktor yang terlibat dalam bahaya penggetasan hidrogen	32
6.6.1	Penggetasan hidrogen.....	32
6.6.2	Serangan hidrogen	33
6.7	Bahaya kesehatan.....	33
6.7.1	<i>Cold burns</i>	33
6.7.2	Luka bakar temperatur tinggi	33
6.7.3	Asfiksia	33
6.8	Pendekatan tim dan pendidikan atau pelatihan yang diperlukan untuk penggunaan hidrogen yang aman.....	33
7	Mitigasi dan kontrol terhadap bahaya dan risiko.....	34
7.1	Mitigasi dan kontrol bahaya serta risiko secara umum	34
7.1.1	Umum	34
7.1.2	Pelajaran yang dipetik dari pengalaman masa lalu	34
7.1.3	Mengatasi bahaya.....	35
7.1.4	Meminimalkan tingkat keparahan konsekuensi dari bahaya.....	36
7.2	Mitigasi bahaya dan risiko rancangan	36
7.2.1	Rancangan yang secara inheren lebih aman	36
7.2.2	Pertimbangan dalam pemilihan material konstruksi yang sesuai.....	37
7.2.3	Pertimbangan untuk bejana dan komponen	39
7.2.4	Pencegahan tekanan berlebih.....	39
7.2.5	Pertimbangan untuk perpipaan, sambungan, dan koneksi.....	39
7.2.6	Pertimbangan pembersihan	40
7.2.7	Pertimbangan komponen	40
7.3	Pencegahan dan mitigasi dari bahaya dan risiko kebakaran serta ledakan	42
7.3.1	Umum	42
7.3.2	Pencegahan campuran hidrogen/oksidator yang tidak diinginkan	42
7.3.3	Penyulutan.....	42
7.3.4	Deflagrasi dan detonasi	44
7.3.5	Pengayaan oksigen	44
7.4	Pertimbangan deteksi.....	45

7.4.1	Deteksi gas hidrogen	45
7.4.2	Deteksi kebakaran	45
7.5	Pertimbangan untuk fasilitas	46
7.5.1	Umum	46
7.5.2	Lokasi	46
7.5.3	Area pengecualian	47
7.5.4	Barikade pelindung	47
7.5.5	Peralatan kontrol keselamatan	47
7.5.6	Pembuangan hidrogen	48
7.5.7	Bangunan	49
7.5.8	Ventilasi	49
7.5.9	Komponen listrik	50
7.5.10	Alarm dan perangkat peringatan	50
7.5.11	Proteksi kebakaran dan pemadaman kebakaran	51
7.6	Pertimbangan untuk operasi	51
7.6.1	Umum	51
7.6.2	Prosedur pengoperasian	51
7.6.3	Alat pelindung diri	52
7.6.4	Pendinginan	53
7.6.5	Transportasi	53
7.6.6	Operasi penyimpanan dan pemindahan	53
7.6.7	Prosedur keselamatan	54
7.7	Praktik-praktik yang direkomendasikan untuk organisasi	55
7.7.1	Umum	55
7.7.2	Kontrol melalui kebijakan dan prosedur organisasi	56
7.7.3	Penggunaan prosedur dan daftar periksa yang disetujui	56
7.7.4	Melakukan peninjauan yang tepat	56
7.7.5	Program pemeliharaan dan kontrol mutu yang disetujui	56
7.7.6	Pendidikan/pelatihan personel	56
7.7.7	Asesmen bahaya dan kemampuan operasi	57
	Lampiran A (informatif) Sifat hidrogen	58
	Lampiran B (informatif) Data pembakaran hidrogen	62
	Lampiran C (informatif) Data material	65
	Lampiran D (informatif) Opsi penyimpanan lainnya	70
	Bibliografi	71

Tabel A.1	— Sifat fisik dan termal-fisik terkait keselamatan yang dipilih dari hidrogen normal dan parahidrogen	58
Tabel A.2	— Sifat termofisika dari gas-gas umum	61
Tabel A.3	— Beberapa sifat tertentu dari beberapa cairan kriogenik pada titik didih normalnya	61
Tabel B.1	— Sifat pembakaran hidrogen normal yang berkaitan dengan keselamatan	62
Tabel B.2	— Sifat penyulutan dan pembakaran untuk campuran udara pada 25°C dan	

101,3 kPa untuk beberapa bahan bakar yang umum	64
Tabel C.1 — Kerentanan penggetasan hidrogen dari beberapa metal yang umum digunakan ^a	66
Tabel C.2 — Kesesuaian beberapa material terpilih untuk layanan hidrogen.....	68
Gambar B.1 — Lebar sel detonasi untuk campuran hidrogen/udara pada 101,3 kPa (14,7 psia) ^[10]	63

Prakata

SNI ISO/TR 15916:2015, *Pertimbangan dasar untuk keselamatan sistem hidrogen*, merupakan standar revisi dari SNI 7928:2013, *Dasar-dasar keselamatan bahan bakar hidrogen* (ISO/TR 15916:2004, MOD). Standar ini disusun dengan jalur adopsi tingkat keselarasan identik dari ISO/TR 15916:2015, *Basic considerations for the safety of hydrogen systems*, dengan metode adopsi terjemahan satu bahasa dan ditetapkan oleh BSN Tahun 2024.

SNI ini disusun untuk menjadi informasi terkait penerapan keselamatan untuk sistem hidrogen. Sedangkan revisi standar ini dilakukan untuk harmonisasi dengan standar internasional yang ada dan meningkatkan tingkat keselarasan adopsi menjadi identik, sebelumnya tingkat keselarasan adopsi adalah modifikasi.

Dalam standar ini, istilah "*This Technical Report*" pada standar ISO/TR 15916:2015 diterjemahkan menjadi "Standar ini".

Terdapat kesalahan editorial pada standar asli ISO yang diadopsi, yaitu:

- a) Pasal 5.3.5.1, paragraf ke-1, penulisan tanda baca pada satuan ribuan yang tertulis koma seharusnya menjadi titik sehingga penulisan yang benar adalah "1.500 m/s hingga 2.000 m/s".
- b) Pasal 7.2.4, paragraf ke-1, penempatan tanda baca koma dan titik yang kurang sesuai dari "...change, if this happens in an uncontrolled way. This hazard is commonly addressed by the use of pressure-relief devices" seharusnya menjadi "jika hal ini terjadi dengan cara yang tidak terkendali, bahaya ini umumnya diatasi dengan penggunaan perangkat pelepas tekanan".

Standar ini disusun oleh Komite Teknis 27-11, Teknologi Hidrogen. Standar ini telah dibahas melalui rapat teknis dan disepakati dalam rapat konsensus pada tanggal 12 Juli 2024 di Bogor, yang dihadiri oleh para pemangku kepentingan (*stakeholders*) terkait yaitu perwakilan dari pemerintah, pelaku usaha, konsumen, dan pakar. Standar ini telah melalui tahap jajak pendapat pada tanggal 01 Agustus 2024 sampai dengan 15 Agustus 2024 dengan hasil akhir disetujui menjadi SNI.

Apabila pengguna menemukan keraguan dalam Standar ini, maka disarankan untuk melihat standar aslinya, yaitu ISO/TR 15916:2015, dan/atau dokumen terkait lain yang menyertainya.

Perlu diperhatikan bahwa kemungkinan beberapa unsur dari Standar ini dapat berupa hak kekayaan intelektual. Namun selama proses perumusan SNI, Badan Standardisasi Nasional telah memperhatikan penyelesaian terhadap kemungkinan adanya hak kekayaan intelektual terkait substansi SNI. Apabila setelah penetapan SNI masih terdapat permasalahan terkait hak kekayaan intelektual, Badan Standardisasi Nasional tidak bertanggung jawab mengenai bukti, validitas, dan ruang lingkup dari hak kekayaan intelektual tersebut.

Pendahuluan

Fokus standar ini adalah pada aplikasi energi hidrogen yang relatif baru. Tujuannya adalah untuk menyediakan dasar untuk memahami masalah keselamatan kepada kalangan yang tidak terbiasa dengan teknologi tersebut. Standar ini berkaitan dengan aplikasi yang memperoleh kegunaannya dari reaksi kimia hidrogen dan tidak berlaku untuk aplikasi berdasarkan proses nuklir.

Secara tradisional, hidrogen telah digunakan secara luas dalam industri petrokimia dan kimia serta dalam jumlah yang lebih kecil dalam industri elektronik, produksi baja, pembuatan kaca, dan hidrogenasi makanan. Dalam aplikasi energi, penggunaan hidrogen pertama yang signifikan telah muncul dalam program luar angkasa. Penggunaan ini mengalami perubahan, mengingat potensi bahwa hidrogen sebagai pembawa energi yang efisien dan bahan bakar dengan dampak lingkungan minimal. Sistem yang menghasilkan hidrogen saat ini sedang dikembangkan menggunakan berbagai sumber energi dan bahan baku seperti sinar matahari, angin, biomassa, tenaga air dan bahan bakar fosil, untuk digunakan dalam aplikasi energi untuk pemanasan rumah dan kantor, pembangkit listrik dan transportasi.

Penggunaan hidrogen yang aman sebagai bahan bakar adalah tujuan utama ISO karena berusaha memfasilitasi kemunculan cepat teknologi hidrogen ini. Elemen kunci dalam penggunaan hidrogen yang aman adalah memahami sifat unik terkait keamanannya dan fenomena terkait, dan bahwa ada pendekatan rekayasa yang dapat diterima untuk mengendalikan bahaya dan risiko yang terkait dengan penggunaan hidrogen. Standar ini menjelaskan bahaya yang terkait dengan penggunaan dan keberadaan hidrogen, membahas sifat-sifat hidrogen yang relevan dengan keselamatan, dan memberikan diskusi umum tentang pendekatan yang diambil untuk mengurangi bahaya hidrogen. Tujuan dari standar ini adalah untuk mempromosikan penerimaan teknologi hidrogen dengan memberikan informasi penting kepada regulator dan dengan mendidik orang-orang yang terlibat dengan masalah keselamatan hidrogen.

Pengembangan Standar Internasional untuk menghilangkan hambatan perdagangan internasional dan menyederhanakan proses regulasi yang sulit dengan menyediakan standar khusus hidrogen untuk memungkinkan implementasi teknologi yang muncul dengan cepat adalah salah satu kebutuhan yang diidentifikasi oleh ISO/TC 197. Standar ini adalah salah satu dari banyak dokumen yang telah dikembangkan, atau sedang dalam proses dikembangkan, oleh ISO. Persyaratan keselamatan terperinci yang terkait dengan aplikasi hidrogen tertentu diperlakukan dalam Standar Internasional terpisah. Standar ini memberikan referensi informatif untuk standar terpisah tersebut sebagai sumber informasi hidrogen terkait keselamatan yang umum dan konsisten. Ini akan menghasilkan pengurangan duplikasi dan kemungkinan inkonsistensi dalam standar terpisah ini.

Pertimbangan yang disajikan dalam standar ini luas, umum, dan berupaya mengatasi sebagian besar aspek keselamatan. Sejauh mana pedoman ini diterapkan akan bervariasi sesuai dengan spesifikasi aplikasi (seperti kondisi dan jumlah hidrogen yang terlibat, dan cara hidrogen digunakan). Pengguna industri dapat menemukan sebagian besar pedoman, yang disajikan di sini, berlaku untuk operasi mereka. Tidak diharapkan bahwa masyarakat umum akan diminta untuk menerapkan tingkat pengetahuan ini untuk mengoperasikan alat hidrogen dengan aman. Diantisipasi bahwa desain alat yang baik, ditambah dengan perawatan yang tepat dalam pemasangan, akan mengurangi tingkat pertimbangan keselamatan ke tingkat yang dianggap dapat diterima oleh publik untuk peralatan umum. Pabrikan peralatan hidrogen perlu mempertimbangkan pedoman ini untuk menyesuaikan informasi spesifik yang cukup untuk pengoperasian peralatan mereka, di lingkungan tempat peralatan tersebut akan

digunakan, dan untuk audiens yang akan menggunakannya. Pembaca didorong untuk mengingat poin-poin ini saat mereka mempertimbangkan informasi yang disajikan dalam standar ini. Hidrogen telah digunakan dengan aman dalam berbagai aplikasi selama bertahun-tahun. Kepatuhan terhadap prinsip-prinsip yang disajikan dalam standar ini dapat mengarah pada kelanjutan penggunaan hidrogen yang aman dan berkelanjutan.

Pertimbangan dasar untuk keselamatan sistem hidrogen

1 Ruang lingkup

Standar ini memberikan panduan untuk penggunaan hidrogen dalam bentuk gas dan cair serta penyimpanannya baik antara kedua bentuk tersebut atau bentuk lainnya (hidrida). Standar ini mengidentifikasi masalah keselamatan dasar, bahaya dan risiko, serta menjelaskan sifat-sifat hidrogen yang berkaitan dengan keselamatan. Persyaratan keselamatan terperinci yang terkait dengan aplikasi hidrogen tertentu dibahas dalam Standar Internasional yang terpisah.

“Hidrogen” dalam standar ini berarti hidrogen normal ($^1\text{H}_2$), bukan deuterium ($^2\text{H}_2$) atau tritium ($^3\text{H}_2$).

2 Acuan normatif

Standar-standar berikut ini, baik secara utuh maupun sebagian, diacu secara normatif dalam standar ini dan tidak tergantikan untuk pengaplikasiannya. Untuk acuan bertanggal, hanya edisi yang dikutip yang berlaku. Untuk acuan tidak bertanggal, berlaku edisi terbaru dari dokumen yang diacu (termasuk amendemennya).

ISO 11114-4, *Transportable gas cylinders — Compatibility of cylinder and valve materials with gas contents — Part 4: Test methods for selecting metallic materials resistant to hydrogen embrittlement*

ISO 11119 (all parts), *Gas cylinders — Refillable composite gas cylinders and tubes — Design, construction and testing*

ISO 14687 (all parts), *Hydrogen fuel — Product specification*

ISO 16110 (all parts), *Hydrogen generators using fuel processing technologies*

ISO 16111, *Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride*

ISO 17268, *Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices*

ISO 19880-1¹, *Gaseous hydrogen — Fueling stations — Part 1: General requirements*

ISO 19881², *Gaseous hydrogen — Land and vehicle fuel tanks*

ISO 19884³, *Gaseous hydrogen — Cylinders and tubes for stationary storage*

ISO 22734 (all parts), *Hydrogen generators using water electrolysis process*

ISO 26142, *Hydrogen detection apparatus — Stationary applications*

3 Istilah dan definisi

Untuk keperluan standar ini, istilah dan definisi berikut ini berlaku.

3.1

kondisi lingkungan sekitar (*ambient conditions*)

AIT

kondisi lingkungan sekitar yang dicirikan oleh temperatur dan tekanan pada lokasi tertentu, seperti kota atau fasilitas

Catatan 1 untuk entri: Lihat temperatur dan tekanan normal (3.71).

¹ Sedang dalam pengembangan

² Sedang dalam pengembangan

³ Sedang dalam pengembangan

3.2

annealing

proses perlakuan kalor yang digunakan untuk melunakkan baja keras sehingga dapat diproses dengan mesin atau pengerjaan dingin

3.3

pemadaman nyala api (*arrested flame*)

proses pembakaran yang dihentikan atau nyala api yang dipadamkan

3.4

swasulut

penyulutan yang tidak memerlukan energi penyulutan eksternal karena energi termal dari molekul saja sudah cukup untuk melebihi ambang batas aktivasi untuk inisiasi pembakaran

3.5

temperatur swasulut

temperatur terendah yang memungkinkan *swasulut* (3.4) terjadi; 858 K untuk hidrogen

3.6

penggantian gas isi (*backfill*)

proses ketika gas yang diinginkan digunakan untuk menggantikan gas yang tidak diinginkan dalam volume sistem

Catatan 1 untuk entri: Umumnya, gas yang tidak diinginkan awalnya dihilangkan dengan dikosongkan menggunakan pompa vakum, kemudian gas yang diinginkan dimasukkan ke dalam.

3.7

aliran balik

aliran dari fluida ke arah yang berkebalikan dengan arah aliran normal

Catatan 1 untuk entri: Istilah ini digunakan untuk menggambarkan masuknya (difusi) udara atmosfer ke dalam saluran ventilasi hidrogen.

3.8

ball valve

katup yang berfungsi dengan bola beralur di dalam *housing*

Catatan 1 untuk entri: Kontrol aliran nyala-mati dicapai dengan rotasi bola 90°.

Catatan 2 untuk entri: *Diverter ball valve* tersedia untuk aliran terpisah dan aplikasi khusus lainnya.

3.9

gelombang ledakan

gelombang tekanan kuat yang digerakkan oleh *gelombang kejut* (3.94) dan/atau gas produk panas dari *deflagrasi* (3.22) cepat atau *detonasi* (3.25) yang mengenai lingkungan, umumnya udara

3.10

tabung Bourdon

tabung lengkung berdinding tipis yang ditutup di salah satu ujungnya dan dipasang ke sumber tekanan pada ujung lainnya

Catatan 1 untuk entri: Perubahan tekanan menyebabkan perubahan kelengkungan pada tabung Bourdon yang digunakan untuk mengindikasikan tekanan dalam sistem.

3.11**gaya apung**

gaya vertikal yang diberikan pada benda gas yang kurang padat oleh gas statis yang lebih berat di sekitarnya, umumnya udara

3.12**konverter katalitik**

katalis yang digunakan untuk mengonversi ortohidrogen menjadi parahidrogen dalam proses pencairan sehingga hidrogen cair yang dihasilkan sebagian besar adalah parahidrogen

Catatan 1 untuk entri: Beberapa katalis yang umum digunakan dalam proses konversi ini adalah *hydrous ferric oxide*, oksida kromat pada partikel alumina, dan senyawa berbasis nikel.

3.13**check valve**

katup yang beroperasi pada tekanan diferensial dan hanya memungkinkan aliran satu arah saja

3.14**kolimasi**

membuat paralel atau membariskan dalam garis lurus

3.15**pembakaran**

proses reaksi ketika zat yang mudah terbakar teroksidasi, menghasilkan gas produk panas, kalor, radiasi, dan mungkin gelombang tekanan

Catatan 1 untuk entri: Sebuah *ledakan* (3.38) pada standar ini diartikan proses pembakaran.

3.16**komponen**

bagian mana pun dari *item* atau sistem yang lengkap

3.17**ruang terbatas**

ruang yang biasanya tidak ditempati oleh personel

Catatan 1 untuk entri: Ruang terbatas memiliki bukaan yang terbatas atau dibatasi untuk masuk dan keluar, mungkin tidak memiliki ventilasi yang memadai, dan mungkin mengandung atau menghasilkan "kontaminasi udara yang berbahaya". Oleh karena itu, mungkin tidak aman untuk dimasuki.

3.18**confinement**

pembatasan fisik, cukup untuk memengaruhi proses pembakaran atau untuk memfasilitasi akumulasi hidrogen

3.19**arus konveksi**

gerakan atau sirkulasi fluida yang melibatkan pengangkutan massa dari satu lokasi ke lokasi lain yang digerakkan oleh gradien densitas yang bergantung pada temperatur

Catatan 1 untuk entri: Lihat *konveksi alami* (3.68).

3.20

kriogenik

kondisi yang melibatkan temperatur yang sangat rendah di sekitar *titik didih normal* (3.69)

3.21

cryopumping

proses yang terdiri dari pendinginan permukaan hingga temperatur kurang dari 120 K sehingga gas dan uap mengembun di permukaan

Catatan 1 untuk entri: Proses ini, meskipun biasanya tidak diinginkan dalam konteks ini, namun juga digunakan sebagai pompa vakum.

3.22

deflagrasi

proses pembakaran yang nyala api atau reaksi kimianya bergerak melalui campuran yang mudah terbakar dengan kecepatan kurang dari kecepatan suara dalam campuran yang tidak terbakar

Catatan 1 untuk entri: Deflagrasi cepat dicirikan oleh kecepatan dalam ratusan meter per detik, dan efeknya tidak jauh berbeda dari efek *detonasi* (3.25).

Catatan 2 untuk entri: Gelombang deflagrasi laminar dicirikan oleh kecepatan dalam beberapa meter per detik dan tidak menyebabkan tekanan berlebih yang signifikan di tempat terbuka.

3.23

transisi deflagrasi menuju detonasi (*deflagration-to-detonation-transition*)

DDT

kejadian, seringkali disebabkan oleh turbulensi, ketika *deflagrasi* (3.22) mengawali sebuah *detonasi* (3.25)

3.24

sistem *deluge*

sistem penyemprotan air yang digunakan untuk menjaga peralatan, terutama bejana penyimpanan hidrogen, tetap dingin jika terjadi kebakaran

3.25

detonasi

proses pembakaran yang distabilkan dengan guncangan yang menghasilkan fenomena pembakaran yang merambat lebih cepat dari kecepatan suara

Catatan 1 untuk entri: Detonasi adalah ledakan, tetapi tidak berlaku sebaliknya.

Catatan 2 untuk entri: Energi termal dari reaksi yang mempertahankan gelombang kejut, dan gelombang kejut memampatkan material yang tidak bereaksi, menghasilkan temperatur tinggi yang diperlukan untuk mendorong reaksi.

3.26

sel detonasi

bagian mendasar dari mekanisme pelepasan energi dalam sebuah *detonasi* (3.25)

Catatan 1 untuk entri: Susunan spasial dari *shock front* dan gelombang akustik yang bergerak di belakang dan melintang ke bagian *shock front* mendefinisikan wilayah pembakaran yang diamati secara eksperimental sebagai lintasan berbentuk "*fish-scale*" pada *sooted foils* yang terpapar ledakan.

Catatan 2 untuk entri: Lebar bentuk berlian ini menunjukkan ukuran sel, dan panjangnya secara empiris dapat dikaitkan dengan persamaan yang dapat memprediksi energi yang diperlukan untuk memulai

detonasi secara langsung dan dimensi fisik struktur yang mencegah detonasi.

3.27

ambang batas detonasi

konsentrasi maksimum dan minimum gas, uap, kabut, semprotan, atau debu, di udara atau oksigen, agar terjadi *detonasi* (3.25) yang stabil

Catatan 1 untuk entri: Batas-batas tersebut pada kenyataannya tidak hanya dikendalikan oleh konsentrasi campuran, tetapi juga oleh ukuran dan geometri lingkungan serta cara penyulutan terjadi. Tidak ada prosedur standar untuk penentuannya.

Catatan 2 untuk entri: Lihat *ambang batas titik bakar* (3.47).

3.28

deuterium

D atau ^2H

isotop hidrogen yang pada inti atom mengandung satu neutron dan satu proton

3.29

difusi

fluks fluida melalui fluida atau material lain karena gradien konsentrasi

CONTOH Pergerakan gas hidrogen melalui udara, atau pergerakan gas hidrogen melalui dinding selang karet.

Catatan 1 untuk entri: Koefisien difusi adalah massa material yang berdifusi melintasi unit area dalam satu unit waktu pada gradien konsentrasi unit.

3.30

diluen

komponen *inert* dalam campuran gas yang mengurangi konsentrasi material (aktif) yang tersisa

3.31

toleransi kegagalan ganda

rancangan sistem yang memungkinkan kegagalan pada dua elemen untuk bekerja sebagaimana mestinya yang tidak menyebabkan seluruh sistem berfungsi secara tidak terprediksi atau katastrofe

Catatan 1 untuk entri: Kegagalan mungkin terjadi pada dua area yang berkaitan atau dua area yang fungsi sepenuhnya independen, dan sistem sebaiknya berlanjut dengan fungsi sebagaimana mestinya.

3.32

keuletan

<dari suatu material> persentase elongasi hingga kegagalan atau reduksi luas penampang spesimen dalam uji tarik sederhana

Catatan 1 untuk entri: Material dapat mengalami transisi ulet-getas pada temperatur rendah.

3.33

electrolyser

perangkat yang melakukan *elektrolisis* (3.34)

3.34

elektrolisis

proses ketika arus listrik digunakan untuk mendorong reaksi kimia

Catatan 1 untuk entri: Pada kasus air, contohnya adalah pemisahan hidrogen dari oksigen.

**3.35
darurat**

keadaan yang tidak diinginkan, yang menimbulkan bahaya yang jelas dan nyata bagi personel atau properti, yang memerlukan tanggapan segera

**3.36
emisivitas**

jumlah relatif dari kalor radiasi yang dipancarkan oleh suatu permukaan bila dibandingkan dengan benda hitam pada temperatur yang sama

Catatan 1 untuk entri: Emisivitas pembakaran hidrogen atau udara bernilai kecil bila dibandingkan dengan sumber kalor lain yang sudah dikenal, misalnya, api kayu.

**3.37
entalpi**

sifat termodinamika suatu material yang setara dengan penjumlahan energi internal dengan hasil kali tekanan dan volume

**3.38
ledakan**

pembakaran berlanjut dari campuran gas yang melepaskan kalor, dan produk pembakaran panas ketika laju reaksi dalam campuran yang bereaksi meningkat seiring waktu hingga bahan bakar atau pengoksidasi habis atau hampir habis

Catatan 1 untuk entri: Definisi ini tidak termasuk sumber tekanan yang tidak terkait dengan reaksi kimia (seperti ledakan bejana bertekanan, BLEVE, dll.).

Catatan 2 untuk entri: Tidak ada terminologi standar atau definisi lain yang diakui secara umum untuk istilah "ledakan", tetapi sumber yang berbeda memberikan definisi yang berbeda, beberapa di antaranya bahkan tidak mengharuskan adanya pembakaran.

Catatan 3 untuk entri: Apabila hidrogen dan oksidator (udara) dibiarkan membentuk campuran sebelum penyulutan (campuran *premix*), setelah penyulutan, reaksi kimia berikutnya (gelombang pembakaran) akan merambat melalui area yang mudah terbakar. Proses pembakaran yang dihasilkan melepaskan kalor. Dilatasi produk yang dihasilkan, bila cukup cepat, dapat menyebabkan gelombang tekanan merambat dari sumbernya. Lihat Referensi [9] dan [11] dalam bibliografi untuk informasi lebih lanjut.

**3.39
fasilitas**

sekelompok bangunan atau peralatan yang digunakan untuk operasi tertentu di satu lokasi geografis

**3.40
fail-safe**

kemampuan untuk mempertahankan kegagalan tanpa menyebabkan kerusakan peralatan, cedera personel, atau hilangnya waktu operasi

**3.41
lelah (*fatigue*)**

deteriorasi bertahap pada material yang mengalami pembebanan berulang

Catatan 1 untuk entri: Lihat *siklus pembebanan* (3.62)

3.42**api**

pembakaran berkelanjutan dari jet bahan bakar yang dimanifestasikan oleh salah satu atau semua hal berikut: cahaya, nyala api, kalor, dan asap

3.43**segitiga api**

konsep visual yang menunjukkan persyaratan untuk pembakaran yang menggambarkan bahan bakar, oksidator, dan sumber penyulutan sebagai tiga sisi segitiga, yang menunjukkan bahwa pembakaran tidak dapat terjadi jika salah satu sisi tidak ada

3.44**nyala api**

zona pembakaran gas atau uap yang memancarkan cahaya dan kalor

Catatan 1 untuk entri: Nyala api mungkin tidak bergerak dengan campuran yang mudah terbakar yang dimasukkan ke dalam zona reaksi, atau nyala api dapat merambat melalui campuran yang mudah terbakar, seperti pada *deflagrasi* (3.22).

Catatan 2 untuk entri: Tidak seperti nyala api hidrokarbon, nyala api hidrogen memiliki radiasi yang lemah. Api ini memancar dalam *near UV* (biru pudar) dan *near IR* (kemerahan). Hanya jika partikel-partikel masuk ke dalam aliran dari sekelilingnya, maka nyala api akan memancar secara termal dan menghasilkan warna kuning. Karena hidrogen memiliki radiasi yang lemah dalam *near UV* dan *near IR*, maka sering kali sulit dilihat di siang hari.

3.45**flame front**

wilayah pembakaran atau reaksi kimia (biasanya dari fraksi hingga beberapa milimeter) yang memisahkan daerah yang terbakar dan tidak terbakar

3.46**kemudahan terbakar**

tingkatan suatu material dapat terbakar dalam lingkungan pengoksidasi

3.47**ambang batas titik bakar**

ambang batas ledakan

ambang batas bawah titik bakar (*Lower Flammability Limit/LFL*) dan ambang batas atas titik bakar (*Upper Flammability Limit/UFL*) konsentrasi bahan bakar gas dalam campuran yang mudah terbakar pada temperatur dan tekanan tertentu yang akan mempertahankan propagasi gelombang pembakaran

Catatan 1 untuk entri: Batas-batas ini merupakan fungsi temperatur, tekanan, diluen, dinamika fluida, dan energi penyulutan.

Catatan 2 untuk entri: Batas ini biasanya dinyatakan sebagai persen (fraksi volume bahan bakar gas).

Catatan 3 untuk entri: Nilai-nilai yang diberikan pada standar ini (lihat Tabel B.1) ditentukan menurut prosedur standar. Pengukuran "ambang batas ledakan" seperti yang didefinisikan misalnya dalam Referensi [5] dalam bibliografi pada dasarnya mengarah pada hasil yang sama dengan "ambang batas titik bakar" dalam standar ini seperti misalnya Referensi [6] dalam bibliografi.

3.48**flare flameout blow off**

padamnya api hidrogen dari sistem suar hidrogen, yang mengakibatkan hidrogen yang tidak terbakar dilepaskan ke atmosfer

3.49

sel bahan bakar

perangkat elektrokimia yang mengonversi energi kimia bahan bakar dan oksidan, termasuk yang disuplai dari luar, menjadi energi listrik dan produk sampingan, termasuk kalor

3.50

galling

perusakan atau pematahan permukaan ketika dua bagian bergesekan, menciptakan kalor dan keausan, yang akan menghasilkan partikel-partikel lepas

Catatan 1 untuk entri: *Galling* pada umumnya dijumpai apabila material dengan kekerasan yang identik atau serupa, saling bersentuhan secara geser atau putar.

Catatan 2 untuk entri: Potensi untuk *galling* meningkat dengan material yang memiliki komposisi kimia dan kekerasan yang serupa.

3.51

getter

zat yang menyerap gas pada tekanan yang sangat rendah melalui proses penyerapan

Catatan 1 untuk entri: Penggunaan utama *getter* adalah untuk meningkatkan atau mempertahankan ruang vakum dalam sistem tertutup.

3.52

pedoman

dokumen konsensus yang berasal dari salah satu dari sejumlah organisasi profesional yang berbeda dan memberikan informasi teknis tentang praktik dan prosedur yang aman

3.53

kekerasan

sifat komposit dari suatu material yang melibatkan ketahanan terhadap pelekukan, deformasi, dan/atau abrasi

Catatan 1 untuk entri: Diukur sebagai kekuatan luluh (*yield*), *work hardening*, *true tensile strength*, modulus elastisitas, dan karakteristik material lainnya.

3.54

bahaya

sumber potensial dari kerusakan

Catatan 1 untuk entri: Istilah bahaya dapat dikualifikasikan untuk mendefinisikan asal mula atau sifat bahaya yang telah diduga (misalnya bahaya kejutan listrik, bahaya hancur, bahaya terpotong, bahaya racun, bahaya kebakaran, bahaya tenggelam).

3.55

hidrida

senyawa yang mengandung hidrogen dan elemen lain

Catatan 1 untuk entri: Beberapa hidrida metal sedang diteliti sebagai media yang potensial untuk penyimpanan hidrogen.

3.56

penggetasan hidrogen (*hydrogen embrittlement*)

perubahan yang merusak sifat keuletan metal yang dapat disebabkan oleh paparan hidrogen

3.57 menyulut

menyebabkan terbakar atau menyala

Catatan 1 untuk entri: Proses ini melibatkan kenaikan suatu zat ke titik penyulutannya (temperatur minimum saat zat akan terus terbakar tanpa tambahan kalor eksternal)

3.58 energi penyulutan

energi yang diperlukan untuk memulai nyala api pada campuran yang mudah terbakar; fungsi dari konsentrasi campuran

Catatan 1 untuk entri: Lihat juga *energi penyulutan minimum* (3.65).

3.59 koefisien Joule-Thomson

koefisien yang mengaitkan perubahan temperatur dengan tekanan dalam *proses Joule-Thomson* (3.60)

Catatan 1 untuk entri: Jika koefisien Joule-Thomson positif, gas yang memuai akan mengalami pendinginan dan jika negatif, gas yang memuai akan mengalami pemanasan. Untuk hidrogen, koefisien ini negatif pada temperatur di atas 200 K (temperatur inversi).

3.60 proses Joule-Thomson

pendinginan atau pemanasan yang terjadi ketika gas yang sangat terkompresi dibiarkan memuai sedemikian rupa sehingga entalpi tetap konstan; secara ilmiah dikenal sebagai ekspansi isentalpik

3.61 aliran laminar

partikel fluida yang bergerak di sepanjang jalur yang lancar pada lapisan tipis dengan satu lapisan mengalir dengan lancar di atas lapisan yang berdekatan (hanya ada pertukaran momentum molekuler)

3.62 siklus beban

pembebanan berulang pada material sehingga mengalami tegangan berulang

Catatan 1 untuk entri: Lihat *lelah* (3.41).

CONTOH Pemberian tekanan dan penurunan tekanan berulang pada bejana penyimpanan.

3.63 tekanan kerja maksimum yang diizinkan (*maximum allowable working pressure*) MAWP

tekanan relatif maksimum yang diizinkan pada sebuah bejana penyimpanan atau sistem perpipaan untuk temperatur yang ditentukan

Catatan 1 untuk entri: MAWP adalah dasar untuk pengaturan tekanan pada perangkat pelepas tekanan yang melindungi bejana atau sistem perpipaan.

Catatan 2 untuk entri: MAWP juga dapat berupa *rating* tekanan operasi maksimum yang diizinkan untuk bejana bertekanan yang diproduksi sesuai dengan peraturan dan standar nasional bejana bertekanan.

Catatan 3 untuk entri: Tekanan ini dapat disebut dengan nama yang berbeda, tergantung pada sistem

dan sumber regulasi.

3.64
fraktur metal

peregangan material metalik hingga material tersebut patah atau gagal dalam perilaku ulet-getas

3.65
energi penyulutan minimum (*minimum ignition energy*)
MIE

sementara *energi penyulutan* (3.58) dari kombinasi gas yang diberikan bergantung pada konsentrasi campuran, energi penyulutan minimum adalah minimum absolut dari fungsi ini

Catatan 1 untuk entri: Konsentrasi saat MIE ditemukan selalu kurang lebih mendekati konsentrasi stoikiometri, tetapi umumnya menyimpang secara sistematis.

3.66
massa molekuler

massa total atom-atom di dalam molekul

3.67
campuran paling mudah disulut (*most easily ignitable mixture*)
MEIM

campuran bahan bakar gas dan oksidator yang memiliki energi penyulutan terendah [lihat *energi penyulutan minimum* (3.65)] sebagai fungsi dari konsentrasi

3.68
konveksi alami

gerak partikel fluida yang disebabkan oleh gaya apung yang muncul ketika benda panas menciptakan gradien temperatur dan densitas pada fluida

3.69
titik didih normal (*normal boiling point*)
NBP

temperatur ketika cairan mendidih pada tekanan atmosfer normal (101,325 kPa absolut)

3.70
hidrogen normal

75% ortohidrogen dan 25% parahidrogen

3.71
temperatur dan tekanan normal (*normal temperature and pressure*)
NTP

temperatur 293,15 K dan tekanan absolut 101,325 kPa

Catatan 1 untuk entri: Selalu periksa sumber data untuk memastikan bahwa sumber data tidak menganggap 273,15 K atau 288,15 K sebagai "normal".

3.72
senyawa NO_x

senyawa nitrogen dengan oksigen apapun; dapat dihasilkan dari pembakaran bahan bakar dengan udara pada temperatur tinggi

3.73**ortohidrogen**

molekul hidrogen yang rotasi spin inti dari tiap atom-atom dalam molekulnya berada dalam arah yang sama (paralel)

Catatan 1 untuk entri: Lihat *parahidrogen* (3.76)

3.74**tekanan berlebih**

<dalam gelombang ledakan> tekanan di atas tekanan atmosfer

3.75**tekanan berlebih**

<dalam struktur penahan> tekanan yang melebihi tekanan kerja maksimum yang diizinkan dari struktur penahan

3.76**parahidrogen**

molekul hidrogen yang rotasi spin inti dari tiap atom-atom dalam molekulnya berada dalam arah yang berlawanan (antiparalel)

Catatan 1 untuk entri: Lihat *ortohidrogen* (3.73)

3.77**sel bahan bakar PEM****sel bahan bakar elektrolit polimer****sel bahan bakar membran penukar proton**

sel bahan bakar (3.49) yang menggunakan membran resin penukar ion positif padat sebagai elektrolit

3.78**permeabilitas**

laju difusi gas bertekanan melalui material berpori

3.79**perembesan**

aliran fluida (gas) melalui material lain (umumnya padat) dengan difusi tanpa merusak atau membuka penutup

Catatan 1 untuk entri: Untuk membedakan dari aliran bocor yang tidak didasarkan pada difusi.

3.80**sistem fotovoltaik**

perangkat yang mampu menghasilkan potensial listrik saat terpapar radiasi elektromagnetik, termasuk radiasi matahari

3.81**deformasi plastis**

deformasi permanen yang terjadi pada material elastis ketika material tersebut ditarik melebihi batas elastisnya

3.82**regulator tekanan**

perangkat yang digunakan dalam sistem untuk mengatur tekanan ke nilai yang ditetapkan

Catatan 1 untuk entri: Regulator mengubah masukan variabel tekanan tinggi menjadi keluaran tekanan rendah yang konstan.

3.83

perangkat pelepas tekanan

perangkat keselamatan dasar yang digunakan untuk mencegah tekanan dalam sistem melebihi MAWP (3.63)

Catatan 1 untuk entri: Perangkat ini dipasang agar tekanan yang berlebih di dalam struktur penahan dapat dikurangi sebelum terjadi kerusakan pada struktur penahan.

Catatan 2 untuk entri: Perangkat pelepas tekanan adalah katup berisi pegas atau katup lain yang akan terbuka pada tekanan atau temperatur yang ditetapkan, atau cakram ruptur yang berisi membran yang dirancang untuk pecah pada tekanan yang ditetapkan.

3.84

Protium

Simbol H

isotop hidrogen dengan satu proton

Catatan 1 untuk entri: Protium adalah konstituen molekuler hidrogen yang paling umum.

3.85

pembilasan

proses yang digunakan untuk menghilangkan impuritas

Catatan 1 untuk entri: Sebagai contoh, sebelum memasukkan hidrogen ke dalam sistem, udara di dalam sistem dihilangkan untuk menghindari pembentukan campuran yang mudah terbakar di dalam sistem.

3.86

quench

menghentikan reaksi kimia atau propagasi nyala api

3.87

jarak quenching

dimensi celah yang diperlukan untuk mencegah propagasi nyala api terbuka melalui campuran bahan bakar atau udara yang mudah terbakar

3.88

celah quenching

<di antara elektroda> celah percikan antara dua pelat elektroda datar paralel yang mana penyulutan dari campuran bahan bakar atau udara yang mudah terbakar diredam

Catatan 1 untuk entri: Celah percikan yang lebih kecil antara elektroda yang sepenuhnya meredam penyulutan percikan

3.89

celah quenching

<pada sebuah laluan> dimensi celah pada laluan yang diperlukan untuk mencegah propagasi nyala api terbuka melalui campuran bahan bakar/udara yang mudah terbakar yang mengisi laluan

3.90

redundansi

penggunaan lebih dari satu cara independen untuk mencapai fungsi tertentu

3.91**reformer**

perangkat untuk memasok hidrogen dari bahan bakar lain dengan memisahkan atom hidrogen dari molekul

3.92**penyulutan resonansi**

penyulutan campuran yang mudah terbakar sebagai akibat dari *gelombang kejut* (3.94) berulang yang dapat terjadi selama aliran dalam sistem perpipaan

Catatan 1 untuk entri: Osilasi akustik dalam sebuah rongga resonansi yang dapat menyebabkan peningkatan temperatur secara cepat, yang lajunya lebih cepat dan mencapai nilai yang lebih tinggi jika terdapat partikel atau kecepatan gas yang tinggi.

3.93**risiko**

produk dari kerusakan yang akan disebabkan oleh potensi kecelakaan dan probabilitasnya

3.94**gelombang kejut**

gelombang kompresi dengan amplitudo besar yang padanya terjadi perubahan cepat dan besar pada densitas, tekanan, dan kecepatan partikel

Catatan 1 untuk entri: Gelombang kejut dapat disebabkan oleh tabrakan, ledakan, atau benturan yang keras. Transmisi energi selanjutnya bergerak sebagai gelombang dengan kecepatan yang lebih besar dari kecepatan suara relatif terhadap materi yang tidak terganggu.

3.95**toleransi kegagalan tunggal**

rancangan sistem yang memungkinkan kegagalan pada elemen tunggal untuk bekerja sebagaimana mestinya yang tidak menyebabkan seluruh sistem berfungsi secara tidak terprediksi atau katastrofe

Catatan 1 untuk entri: Sistem sebaiknya terus berfungsi sebagaimana mestinya.

3.96**barang lunak**

material non-metalik

CONTOH

Polimer, pelapis, atau pelumas.

Catatan 1 untuk entri: Sebagai contoh, pada katup, istilah barang lunak mengacu pada *item* seperti penyekat, kemungkinan dudukan, dan *O-ring*.

3.97**berat jenis**

rasio densitas suatu material terhadap densitas material standar seperti air (untuk cairan) atau udara (untuk gas)

3.98**kapasitas kalor spesifik**

rasio kalor (energi) yang diperlukan untuk mengubah temperatur satu unit massa suatu zat dengan perbedaan temperatur tertentu, sering kali diberikan dalam kondisi batas yang penting seperti tekanan yang dijaga tetap, atau volume yang dijaga tetap

3.99
standar

seperangkat kriteria yang disepakati secara umum yang secara khusus dirancang untuk mendefinisikan suatu produk, praktik, mekanisme, pengaturan, proses, atau lingkungan berdasarkan pengetahuan ilmiah dan eksperimental yang ada saat ini mengenai subjek atau ruang lingkup yang relevan; konsep dasar untuk perdagangan bebas barang dan jasa

3.100
campuran stoikiometri

campuran reaktan dalam reaksi kimia yang mengoptimalkan produksi produk reaksi

3.101
aliran berstrata

aliran fluida melalui tabung atau pipa yang fasa cair dari fluidanya mengalir di sepanjang bagian bawah tabung atau pipa dengan sedikit gangguan dengan fasa uap yang mengalir di atas fasa cair

Catatan 1 untuk entri: Jenis aliran ini terjadi apabila laju aliran uap relatif rendah.

3.102
tegangan

gaya internal per unit area yang terbentuk di dalam badan benda ketika benda terkait dengan sistem gaya eksternal, atau perubahan temperatur yang tidak seragam

3.103
sistem

rangkaian komponen tempat hidrogen dikirim, disimpan, atau digunakan

Catatan 1 untuk entri: Sebuah sistem dapat mencakup komponen seperti bejana penyimpanan, perpipaan, katup, perangkat pelepas tekanan, pompa, subsistem vakum, sambungan ekspansi, dan pengukur.

Catatan 2 untuk entri: Sistem dapat merujuk ke lokasi baru, fasilitas baru di lokasi, atau instalasi baru di fasilitas.

3.104
konduktivitas termal

laju perpindahan kalor per satuan luas material dibagi dengan gradien temperatur yang menyebabkan perpindahan kalor

Catatan 1 untuk entri: Konduktivitas termal biasanya bergantung pada temperatur, yaitu bervariasi dengan temperatur.

3.105
radiasi termal

radiasi elektromagnetik yang berasal dari suatu material sebagai konsekuensi dari temperaturnya

Catatan 1 untuk entri: Dari perspektif manusia, ini adalah radiasi panas.

3.106
tritium
T atau ^3H

isotop hidrogen yang memiliki dua neutron dan nomor massa tiga

3.107**turbulensi**

kondisi aliran ketika komponen radial atau pusaran ada bersamaan dengan gerakan fluida

3.108**ruang ullage**

volume yang tidak terisi sepenuhnya oleh cairan di dalam wadah penyimpanan

Catatan 1 untuk entri: Ruang *ullage* penting untuk keamanan operasi dari bejana dan biasanya ditentukan oleh regulasi dan standar yang berlaku.

3.109**berselubung vakum (*vacuum-jacketed*)**

terisolasi secara termal menggunakan teknik konstruksi dinding ganda yang ruang di antara dua dindingnya dievakuasi, menghasilkan ruang vakum antara dinding bagian dalam dan dinding luar

Catatan 1 untuk entri: Dinding luar dari konstruksi dinding ganda umumnya disebut sebagai jaket vakum.

3.110**viskositas**

resistensi fluida terhadap gerakan geser (gesekan internalnya)

4 Gambaran umum aplikasi hidrogen**4.1 Infrastruktur hidrogen dasar****4.1.1 Kategori infrastruktur**

Secara konseptual, tujuan dari aplikasi hidrogen dapat dikategorikan sebagai berikut:

- produksi;
- penyimpanan dan transportasi;
- penggunaan hidrogen.

Beberapa aplikasi mungkin melibatkan ketiga kategori tersebut.

4.1.2 Produksi

Hidrogen adalah elemen yang sangat berlimpah, dan banyak proses yang dapat digunakan untuk mengekstrak elemen dari senyawanya. Hidrogen dalam jumlah besar diproduksi dalam industri kimia sebagai produk sampingan. Produksi khusus hidrogen umumnya dilakukan dengan mereformasi gas alam [lihat ISO 16110 (semua bagian)]. Proses lainnya termasuk elektrolisis air [lihat ISO 22734 (semua bagian)], perpindahan hidrogen dari asam oleh metal, dehidrogenasi bahan kimia, pengolahan limbah, dll. Di masa mendatang, proses fotokimia dan tanaman atau mikroorganisme yang dirancang secara genetik juga dapat menjadi cara praktis untuk memproduksi hidrogen.

Berbagai cara produksi hidrogen digunakan untuk aplikasi khusus. Sebagai contoh, beberapa aplikasi berusaha meminimalkan penyimpanan atau bahaya dengan menyuplai hidrogen (atau oksigen dengan hidrogen sebagai produk sampingan) sesuai dengan permintaan. Beberapa teknologi *electrolyser* sedang dikembangkan untuk tujuan ini. Keluaran hidrogen dan oksigen dengan tingkat penelitian yang sangat murni dapat dihasilkan dari sistem ini.

4.1.3 Penyimpanan dan transportasi

4.1.3.1 Umum

Hidrogen yang diproduksi di suatu lokasi untuk digunakan di tempat lain harus diproses menjadi bentuk yang dapat dengan mudah disimpan dan ditransportasikan ke tempat aplikasi konsumen. Dibandingkan dengan bahan bakar konvensional, densitas hidrogen yang rendah di bawah kondisi lingkungan dan titik didihnya yang rendah menyulitkan penyimpanan dalam jumlah yang cukup untuk memenuhi kebutuhan aplikasi yang umum. Metode yang telah terbukti untuk meningkatkan densitas penyimpanan hidrogen meliputi penanganan hidrogen sebagai gas bertekanan atau cairan yang telah didinginkan, dan menggunakan transportasi darat, transportasi air, atau perpipaan untuk pengiriman. Hanya hidrogen dalam kuantitas yang sangat sedikit yang diizinkan untuk ditransportasikan menggunakan pesawat komersial. Di masa lalu, hidrogen digunakan secara luas sebagai komponen “gas kota” yang sering digunakan di dapur. Saat ini, ada beberapa jaringan pipa hidrogen dan jaringan pipa di area tertentu untuk industri kimia.

4.1.3.2 Penyimpanan dan transportasi gas

Ketika hidrogen dalam kuantitas yang sedikit hingga menengah dibutuhkan, hidrogen gas dikompresi dan disimpan dalam kontainer bertekanan tinggi. Tangki penyimpanan konvensional dari aluminium dan baja atau material yang semakin kompleks [Tabung Tekanan Berlapis Komposit (*Composite Overwrapped Pressure Vessels/COPV*)] secara rutin digunakan untuk menampung hidrogen pada tekanan hingga 40 MPa, dengan peningkatan hingga 70 MPa. Trailer tabung atau silinder dirancang untuk kuantitas pengangkutan servis transportasi darat dalam rentang 300 kg atau lebih.

4.1.3.3 Penyimpanan dan transportasi cairan

Pendekatan lain untuk penyimpanan hidrogen adalah dengan mengondensasikan gas menjadi cairan. Hal ini membutuhkan pendinginan hidrogen hingga temperatur mendekati titik didih normalnya, yaitu 20 K. Untuk mempertahankan hidrogen sebagai cairan kriogenik dalam penyimpanan, perpindahan kalor dari lingkungan ke cairan harus diminimalkan untuk menghindari hilangnya hidrogen secara berlebihan karena mendidih. Isolasi dari perpindahan kalor ini paling baik dilakukan dengan menggunakan kontainer berselubung vakum, seperti botol termos. Tidak ada isolasi yang sempurna, dan tanpa penangkapan dan pencairan kembali, kehilangan hidrogen secara perlahan (sekitar 1% per hari) ke lingkungan harus diterima ketika tangki dibiarkan begitu saja. Untuk tangki penyimpanan skala besar, kehilangan ini turun drastis hingga di bawah 0,03% per hari (yaitu 1% per bulan).

Transportasi hidrogen cair dilakukan dalam kontainer berselubung vakum dengan truk, gerbong kereta api, atau kapal tanker, dan setelah pengiriman, hidrogen cair dipindahkan ke bejana penyimpanan kriogenik berselubung vakum di lokasi penggunaan.

4.1.3.4 Opsi penyimpanan lainnya

Densitas hidrogen cair bahkan melebihi densitas *slush* (campuran hidrogen cair dan padat pada temperatur titik tripel 13,8 K). Kerugiannya adalah bahwa pembuatan campuran semacam itu membutuhkan lebih banyak energi daripada pencairan sederhana dan dapat stabil hanya jika tekanan titik tripel sekitar 7,2 kPa dipertahankan. Saat ini, hidrogen *slush* hanya dianggap sebagai propelan luar angkasa. Keekonomian untuk produksi tidak mendukung penggunaannya yang lebih luas.

Senyawa kimia yang kaya akan ikatan hidrogen atau dihidrogenasi dengan tujuan tertentu, hidrogen yang dicampur dengan bahan bakar lain, hidrida, dan material dengan adsorpsi

permukaan hidrogen yang tinggi dapat diaplikasikan dalam sistem penyimpanan hidrogen (lihat Lampiran D). Alat yang disebut *reformer* ini dapat digunakan untuk mendapatkan hidrogen dari tempat penyimpanan. Jika sistem ini menggunakan bahan kimia selain hidrogen, pertimbangan keamanan khusus yang unik untuk material tersebut sebaiknya diterapkan selain pertimbangan untuk hidrogen. Pertimbangan semacam itu berada di luar cakupan Standar ini.

Cara yang relatif baru untuk menyimpan hidrogen adalah dengan memperlakukannya sebagai fluida superkritis tepat di atas titik kritis ("*cryo-compressed*"). Hal ini mempertahankan beberapa keuntungan dari penyimpanan cairan (densitas tinggi), tetapi menghindari masalah yang terkait dengan penanganan dua fasa. Insulasi termal dari tangki semacam itu tidak harus serumit penyimpanan cairan karena isi tangki dapat dibiarkan untuk memanaskan hingga tingkat tertentu.

4.1.3.5 Sistem penyimpanan kendaraan

Volume hidrogen dan massa bejana penampung untuk sistem gas bertekanan tinggi atau sistem kriogenik merupakan tantangan bagi perancangan penyimpanan bahan bakar kendaraan. Untuk mengurangi volume dan massa tangki bahan bakar yang diusulkan untuk kendaraan berbahan bakar hidrogen, material komposit ringan sedang dikembangkan. Untuk mencapai rentang yang dapat diterima oleh pelanggan, sebagian besar pembuat mobil menggunakan silinder bertekanan dengan tekanan nominal maksimum 70 MPa (dua kali tekanan maksimum untuk silinder gas alam yang digunakan pada kendaraan). Persyaratan keselamatan yang dihasilkan untuk produksi, persetujuan, dan pengoperasian silinder seperti ini dibahas secara ekstensif dalam ISO 19881.

4.1.4 Aplikasi penggunaan hidrogen

Aplikasi penggunaan akhir hidrogen meliputi sel bahan bakar, mesin pembakaran bolak-balik dan mesin turbin, turbin, pendorong roket, pembakar, dan semua aplikasi yang menggunakan komponen-komponen ini. Berbagai aplikasi energi berdasarkan *electrolyser* dan sistem sel bahan bakar hidrogen akan segera tersedia secara komersial. Aplikasi ini memiliki rentang dari sistem portabel kecil yang dirancang untuk menggantikan baterai standar 1 kW sampai 10 kW hingga sistem yang lebih besar (ukuran kW hingga MW) yang dirancang untuk melengkapi jaringan listrik atau dirancang untuk sistem energi terpencil atau terdistribusi yang diperlukan untuk menyalakan listrik di rumah-rumah atau desa-desa terpencil. Sistem portabel biasanya mengandalkan suplai hidrogen yang diganti atau diisi ulang.

Sistem yang lebih besar direncanakan untuk menyesuaikan input energi variabel dari sumber terbarukan (angin, surya) sesuai dengan permintaan pelanggan yang juga bervariasi. Listrik tidak mudah disimpan tetapi dapat secara efisien diubah menjadi hidrogen oleh *electrolyser*. Sistem ini merupakan produsen dan konsumen dari hidrogen, karena ini mengubah kelebihan jumlah listrik menjadi energi kimia yang tersimpan sebagai hidrogen, menyimpan energi ini dalam perangkat yang sesuai, dan kemudian mengubahnya kembali menjadi listrik saat dibutuhkan atau menggunakannya sebagai bahan bakar. Konversi ulang menjadi daya listrik dapat dilakukan dengan sel bahan bakar, turbin gas, mesin pembakaran internal bolak-balik, atau unit pembangkit kombinasi listrik dan kalor untuk menghasilkan listrik (dan kalor) sesuai permintaan. Sistem tersebut dapat diintegrasikan lebih lanjut dan digunakan untuk menstabilkan jaringan listrik dan menangkap *waste heat* untuk pemanasan atau proses industri.

4.2 Komponen sistem hidrogen yang umum

4.2.1 Umum

Dalam sistem hidrogen umum, ada komponen utama dan pendukung yang relevan untuk keselamatan hidrogen. Contoh komponen yang menjalankan fungsi utama adalah pendorong roket di dalam motor roket untuk aplikasi luar angkasa, tumpukan sel di dalam sel bahan bakar untuk aplikasi energi, mesin pembakaran internal untuk aplikasi transportasi, dan konverter katalitik pada kompor untuk penggunaan di rumah, dll.

Komponen pendukung yang memberikan dukungan penting untuk fungsi utama mungkin memiliki semua atau sebagian dari hal-hal berikut ini:

- penyimpanan hidrogen atau sumber hidrogen, dan penyimpanan oksidator atau sumber oksidator;
- jalur penyaluran fluida untuk menghubungkan hidrogen dan oksidator ke sistem reaksi;
- kontrol aliran;
- sistem pelepas tekanan yang dimasukkan ke dalam rancangan komponen yang disebutkan di atas;
- komponen deteksi.

4.2.2 Bejana penyimpanan

Rancangan, fungsi, dan material konstruksi yang digunakan pada bejana penyimpanan dan komponennya sebaiknya mencerminkan jenis servis, misalnya bejana gas bertekanan tinggi atau bejana cairan kriogenik. Jumlah yang besar sebaiknya ditempatkan di luar ruangan atau dalam struktur yang dirancang khusus. Konstruksi bejana sebaiknya mempertimbangkan keadaan teknologi. Bejana penyimpanan yang berisi hidrogen kriogenik menggunakan insulasi khusus atau selubung vakum (*vacuum jacketing*). Sebaiknya dipastikan bahwa cairan yang mendidih dilepaskan melalui perangkat yang sesuai, dibilas atau dikelola dengan benar, dan ketahanan api bejana diketahui.

4.2.3 Jalur penyaluran fluida, perpipaan, *joint*, dan penyekat

Hidrogen sebagai molekul terkecil memiliki kecenderungan tinggi untuk difusi dan perembesan. Hidrogen juga akan memiliki laju aliran tinggi jika terjadi kebocoran di suatu tempat dalam sistem. Perpipaan dan penyekat perlu disesuaikan untuk penggunaan hidrogen selama masa pakai sistem. Oleh karena itu, sambungan las (*welded joint*) lebih dipilih jika kebocoran tidak dapat ditoleransi. Jika *joint* atau penyekat mungkin memerlukan pembukaan secara berkala, perlu diambil tindakan untuk mencegah pembentukan campuran yang mudah tersulut dan munculnya sumber penyulutan.

4.2.4 Kontrol aliran

Berbagai komponen digunakan untuk mengontrol aliran hidrogen di dalam sistem. Katup, *check valve*, dan regulator adalah komponen mekanis yang paling umum. Komponen-komponen ini dapat dioperasikan secara manual atau dikontrol dari jarak jauh menggunakan aktuator listrik atau pneumatik. Aktuator harus dirancang secara khusus agar tidak menjadi sumber penyulut, khususnya jika bersifat elektrik. Kontrol juga mencakup sensor fluida seperti pengukur tekanan, meter aliran, indikator level cairan, dan sistem kontrol lainnya.

4.2.5 Sistem pelepas tekanan

Bejana dan perpipaan yang memerangkap atau berpotensi memerangkap hidrogen sebaiknya

diproteksi dari tekanan berlebih dengan sistem pelepas tekanan. Contoh keadaan yang dapat menyebabkan tekanan berlebih pada sistem hidrogen adalah kebakaran atau kegagalan regulator, yang melepaskan hidrogen bertekanan tinggi ke bagian sistem yang dirancang untuk tekanan yang lebih rendah. Sistem pelepas tekanan biasanya menggunakan katup pelepas tekanan dan cakram letup (ruptur) untuk mengarahkan hidrogen bertekanan berlebih ke sistem ventilasi. Katup pelepas tekanan biasanya memiliki penyekat pegas atau jenis lain yang terbuka ketika tekanan yang ditetapkan terlampaui. Cakram letup adalah perangkat serupa namun pelepasan tekanan terjadi saat pecahnya diafragma yang sensitif terhadap tekanan. Perangkat ini biasanya digunakan secara paralel dengan katup pelepas tekanan sebagai jalur *fail-safe* untuk tekanan berlebih atau secara seri (hulu) ketika masuknya udara berikutnya tidak dapat diterima. Perangkat yang diaktifkan secara termal juga dapat digunakan untuk sistem hidrogen. Bahkan ruang yang dievakuasi dalam jalur yang diberi selubung vakum pada sistem kriogenik perlu diproteksi dari kegagalan yang dapat menyebabkan hidrogen bertekanan tinggi.

4.2.6 Komponen deteksi

Di luar sistem hidrogen, sistem kontrol dapat memantau keberadaan gas hidrogen atau api hidrogen. Berbagai teknologi tersedia untuk mendeteksi gas hidrogen. Detektor hidrogen biasanya ditempatkan di atas titik yang mungkin terjadi kebocoran dan di tempat hidrogen mungkin terakumulasi, yang biasanya di titik tertinggi ruangan, atau di saluran masuk ventilasi. Sensitivitas silang dari sensor sebaiknya diperhitungkan. Kamera inframerah (IR) dapat mencitrakan kalor pada bidang pandang yang luas. Deteksi ultraviolet (UV) digunakan untuk secara khusus mendeteksi nyala api hidrogen, tetapi diperlukan kolimasi yang cermat pada bidang pandang sensor karena sinar matahari atau aktivitas pengelasan dapat dengan mudah memicu detektor ini. ISO 26142 mendefinisikan persyaratan yang berlaku untuk peralatan pendeteksi hidrogen yang digunakan dalam aplikasi stasioner.

4.2.7 Komponen lainnya

Sistem hidrogen dapat menggunakan konverter katalitik, membran pemisah, dan *getter* untuk menghilangkan hidrogen yang tidak diinginkan atau berlebih. Filter dapat digunakan menghilangkan impuritas dari hidrogen di dalam sistem atau dari sistem pendukung. Sebagai contoh, tumpukan membran penukar proton (*proton exchange membrane/ PEM*) yang digunakan dalam elektrolisis dan sel bahan bakar membutuhkan air murni yang disaring dan di-deionisasi dengan hati-hati. Alat penukar kalor, pendingin, dan radiator mungkin diperlukan dalam sistem hidrogen.

4.2.8 Pertimbangan untuk kondisi di luar sistem

Berikut ini adalah hal-hal yang inheren pada semua rancangan hidrogen:

- pertimbangan untuk kondisi ketika sistem dioperasikan (misalnya di dalam atau di luar ruangan);
- operasi *fail-safe* dan upaya-upaya keselamatan pasif yang memperhitungkan potensi mode kegagalan;
- rencana jangka panjang yang mencakup masa operasional sistem.

Sebagai contoh, sistem hidrogen yang tetap, harus ditempatkan dan dilayani sesuai dengan persyaratan khusus yang ditemukan dalam standar keselamatan yang relevan. Standar-standar ini mengidentifikasi persyaratan konstruksi dan material khusus untuk struktur, berdasarkan kuantitas hidrogen, apakah itu gas atau cair, dan lokasi yang diinginkan untuk penyimpanan hidrogen. Rancangan hidrogen sebaiknya memperhitungkan semua kemungkinan keadaan yang diantisipasi selama masa operasinya, dan rancangan sebaiknya menempatkan sistem dalam keadaan aman untuk semua mode kegagalan yang wajar.

4.3 Bahan bakar hidrogen

Bahan bakar hidrogen dapat mengandung impuritas yang ditinggalkan oleh proses produksi atau yang muncul selama penyimpanan dan penanganan pascaproduksi. Jumlah dan jenis impuritas dapat memengaruhi sistem konsumsi hidrogen. Impuritas mana yang dapat ditoleransi dan sejauh mana bergantung pada sifat sistem konsumsi. ISO 14687 dikembangkan untuk menentukan karakteristik kualitas bahan bakar hidrogen guna memastikan keseragaman produk bahan bakar hidrogen yang diproduksi untuk berbagai aplikasi.

4.4 Efek lingkungan

Efek lingkungan yang timbul akibat penggunaan sistem hidrogen diperkirakan tidak berbahaya. Dengan sedikit pengecualian, air murni adalah satu-satunya produk dari reaksi. Satu pengecualian penting adalah sistem pernapasan udara (*air-breathing*) yang membakar hidrogen pada temperatur tinggi dan dapat menghasilkan nitrogen oksida (NO_x). Namun, pilihan titik operasi yang baik dapat mengurangi emisi ke tingkat yang jauh di bawah ambang batas yang dimungkinkan untuk pembakaran hidrokarbon tanpa memerlukan teknologi pengolahan setelahnya. Selain itu, strategi pembakaran hidrogen yang disusun dengan hati-hati yang memungkinkan adanya NO_x konvensional setelah teknologi pengolahan dapat mengurangi emisi NO_x lebih lanjut hingga mendekati nol. Jika sesuai, oksidasi katalitik temperatur rendah dapat menghilangkan produksi NO_x sepenuhnya.

Efek gas hidrogen yang lepas ke lingkungan (misalnya, gas yang mendidih dari penyimpanan cair) dapat diabaikan. Memang dalam kondisi lingkungan, kecepatan translasi termal hidrogen molekuler lebih besar daripada kecepatan lepas bumi. Ketika hidrogen ditransportasikan ke atmosfer yang lebih tinggi, hidrogen akan teroksidasi menjadi air atau bereaksi dengan polutan atau lepas ke luar angkasa. Inilah sebabnya mengapa hanya ada sedikit hidrogen bebas di lingkungan.

5 Sifat dasar dari hidrogen

5.1 Sifat umum

5.1.1 Sifat atom dan molekuler

Hidrogen, yang dinamai dari kata Yunani *hydro* (air) dan *genes* (menghasilkan), adalah elemen paling sederhana dan paling melimpah di alam semesta. Atom hidrogen dapat memiliki salah satu dari tiga kemungkinan berat atom atau isotop: protium, deuterium, atau tritium. Protium, dengan massa atom sama dengan 1, adalah isotop yang paling umum. Tritium bersifat radioaktif (meluruh dengan emisi β , dengan waktu paruh 12,3 tahun). Sebagai zat murni, hidrogen ada dalam bentuk molekul, yaitu H_2 , yang dua atom hidrogennya membentuk ikatan kovalen. Ada dua bentuk molekuler: ortohidrogen (dengan susunan paralel dari spin inti kedua atom) dan parahidrogen (antiparalel). Hidrogen limbak, khususnya yang dalam bentuk gas, adalah campuran ortohidrogen dan parahidrogen yang temperaturnya menentukan jumlah kesetimbangan masing-masing bentuk. Pada temperatur dan tekanan normal (NTP), parahidrogen membentuk 25% dari total campuran. Campuran ini dikenal sebagai hidrogen normal. Pada temperatur yang lebih rendah, kesetimbangan mendukung keberadaan parahidrogen yang kurang energik, dengan hidrogen cair pada temperatur 20 K terdiri dari 99,8% parahidrogen.

Kompleksitas yang tampak dari isotop dan kondisi molekuler yang berbeda ini hanya sedikit berpengaruh pada pertimbangan keselamatan. Deuterium hanya ditemukan dalam jumlah kecil di alam, dan tritium diproduksi terutama oleh iradiasi material dalam reaktor nuklir. Kimia

hidrogen, dan khususnya kimia pembakaran, sedikit diubah dengan bentuk atom dan molekuler yang berbeda. Aplikasi energi non-nuklir umumnya menggunakan data material yang berlaku untuk hidrogen normal (2 atom protium yang tersusun dalam 75% sebagai ortohidrogen dan 25% sebagai molekul parahidrogen). Satu-satunya pengecualian terjadi pada aplikasi kriogenik seperti penyimpanan hidrogen cair atau kriogenik terkompresi, dengan panas merupakan parameter penting. Perbedaan sifat yang lebih besar antara ortohidrogen dan parahidrogen terjadi pada sifat-sifat yang mementingkan kalor (seperti entalpi, kapasitas kalor spesifik, dan konduktivitas termal), sedangkan sifat-sifat lain dari ortohidrogen, seperti densitas, sedikit berbeda dengan sifat-sifat parahidrogen.

CATATAN Jika terkonsentrasi, berat atom deuterium dan tritium yang lebih berat menghasilkan sifat fisik yang berbeda, dan dalam kasus radioaktivitas tritium dapat menjadi perhatian keselamatan.

5.1.2 Penampakan dan karakteristik umum

Gas hidrogen mudah terbakar, tidak beracun, dan tidak korosif. Gas hidrogen tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, dan tidak menyokong kehidupan (*asphyxiant*). Hidrogen cair transparan dengan warna biru muda dan tidak korosif.

5.2 Sifat termofisika yang dipilih

5.2.1 Umum

Data keteknikan hidrogen yang dipilih untuk fasa gas dan cair disajikan di sini untuk memberikan latar belakang yang cukup dalam memahami isu keselamatan hidrogen. Beberapa data numerik ditabulasikan dalam Lampiran A. Data lain yang juga dipilih pada gas lain disediakan di Lampiran A sebagai perbandingan.

5.2.2 Sifat termofisika yang dipilih dari gas hidrogen

5.2.2.1 Dispersi

Hidrogen memiliki gaya apung yang tinggi dan difusivitas yang lebih besar daripada gas lainnya. Dalam temperatur dan tekanan normal (NTP), hidrogen memiliki densitas $0,0838 \text{ kg/m}^3$ dan berat jenis $0,0696$ (udara = 1). Oleh karena itu, hidrogen kira-kira 14 kali kurang padat daripada udara, menjadikannya gas yang paling ringan di antara semua gas. Ukuran molekul hidrogen yang kecil memberikan difusivitas yang lebih besar daripada helium dan sekitar 3 kali lipat dari nitrogen di udara pada kondisi lingkungan sekitar. Gas hidrogen juga mudah berdifusi ke dalam padatan.

Dalam kasus kebocoran gas hidrogen, efek dinamika fluida (seperti angin, momentum atau aliran yang dikontrol gaya apung) dapat mendominasi difusi molekuler. Gaya apung hidrogen ketika dibiarkan naik akan menciptakan arus konveksi. Sebagai konsekuensi dari sifat ini, gas hidrogen memiliki kecenderungan untuk terdispersi dan berdifusi serta membentuk campuran yang mudah tersulut dengan udara. Dalam lingkungan yang tidak tertutup, campuran ini pada akhirnya akan terlarutkan ke tingkat di bawah ambang batas bawah titik bakar (LFL). Namun, hal ini sebaiknya tidak dianggap remeh karena hal ini akan terjadi dengan sangat cepat; kondisi batas dapat memberikan efek yang kuat. Perhatian sebaiknya dilakukan dalam menerapkan pengamatan ini ketika uap hidrogen pada temperatur kriogenik dilepaskan. Uap hidrogen pada temperatur 23 K atau lebih rendah, lebih padat daripada udara NTP. Umumnya, kondensasi humiditas lingkungan akan menambahkan air ke dalam awan campuran (membuatnya terlihat), sehingga membuatnya semakin padat.

5.2.2.2 Viskositas

Viskositas hidrogen yang rendah, yang merupakan efek dari ukuran molekul yang kecil, menyebabkan laju aliran yang relatif tinggi jika gas bocor melalui material berpori, *fitting*, atau penyekat. Efek negatif ini diimbangi hingga batas tertentu oleh kepadatan energi gas yang rendah dibandingkan dengan metana atau gas hidrokarbon lainnya.

5.2.2.3 Kapasitas kalor, konduktivitas termal, dan koefisien Joule-Thomson gas

Secara molar, kapasitas kalor hidrogen mirip dengan gas diatomik lainnya meskipun massa molekulnya rendah. Konduktivitas termal hidrogen secara signifikan lebih tinggi daripada gas lainnya.

Dalam proses Joule-Thomson (ekspansi isentalpik) yang dimulai pada temperatur lingkungan sekitar, temperatur hidrogen tidak akan turun, melainkan naik. Akan tetapi, kenaikan temperatur ini tidak cukup untuk menyebabkan penyulutan.

5.2.3 Sifat termofisika yang dipilih dari hidrogen cair kriogenik

5.2.3.1 Densitas dan ekspansi termal

Parahidrogen cair pada titik didih normalnya (NBP) memiliki densitas 70,78 kg/m³. Berat jenis yang sesuai adalah 0,071 (berat jenis air adalah 1). Hali ini berarti hidrogen cair kira-kira 14 kali kurang padat daripada air.

Dengan penambahan kalor, volume hidrogen cair mengembang secara signifikan lebih banyak daripada yang diduga berdasarkan pengalaman dengan air. Sifat ini ditunjukkan oleh koefisien ekspansi termal, yang pada NBP adalah 23 kali lipat dari air untuk kondisi lingkungan sekitar. Signifikansi untuk keselamatan muncul ketika bejana penyimpanan kriogenik memiliki ruang terbuka yang tidak mencukupi untuk mengakomodasi pemuaian cairan. Hal ini dapat menyebabkan tekanan berlebih pada bejana atau masuknya cairan ke dalam saluran pemindahan dan saluran ventilasi.

5.2.3.2 Volume gas ekuivalen

Peningkatan volume yang cukup besar dikaitkan dengan perubahan fasa hidrogen cair menjadi gas hidrogen, dan peningkatan bertahap volume lainnya terjadi untuk gas hidrogen yang dibiarkan memanaskan dari NBP ke NTP. Rasio volume akhir terhadap volume awal untuk perubahan fasa dari hidrogen cair menjadi gas hidrogen dan ekspansi gas yang dipanaskan adalah 847. Untuk sistem yang volumenya tetap, perubahan fasa ini dan kenaikan temperatur yang terkait ke NBP dari NTP akan menghasilkan tekanan 177 MPa.

5.2.3.3 Kapasitas kalor

Kalor spesifik pada tekanan konstan parahidrogen cair (9,688 kJ/kg.K) lebih dari dua kali lipat panas spesifik air dan lebih dari 5 kali lipat panas spesifik oksigen cair pada NBP-nya.

5.2.3.4 Konversi orto-para

Proses pencairan hidrogen sebaiknya tidak hanya menghilangkan panas sensibel dan panas laten, tetapi juga menghilangkan energi yang dilepaskan oleh konversi keadaan orto-para. Kalor konversi adalah 715,8 kJ/kg, yang merupakan 1,5 kali kalor penguapan. Ini adalah proses eksotermik yang sangat lambat dan dapat memakan waktu beberapa hari untuk menyelesaikannya. Proses pencairan dapat dipercepat dengan penggunaan katalis paramagnetik.

5.3 Sifat pembakaran dasar

5.3.1 Catatan umum tentang karakteristik keselamatan

Sifat-sifat yang berkaitan dengan keselamatan dari gas yang mudah terbakar, termasuk hidrogen, sering kali dibahas dalam hal karakteristik seperti ambang batas titik bakar atau energi penyulutan. Sebaiknya diingat bahwa karakteristik ini bukanlah sifat gas itu sendiri yang didefinisikan dengan baik secara ilmiah (seperti densitas, viskositas, massa molekul, dll.). Karakteristik ini sangat bergantung pada prosedur pengukuran. Karakteristik ini hanya dapat dibandingkan jika diukur dengan prosedur yang sama persis. Hal ini tercermin dari fakta bahwa saat ini terdapat tiga cara standar untuk mengukur ambang batas bawah titik bakar dari hidrogen pada campuran udara, yang memberikan hasil antara 3,6% dan 4,2% (dua di Referensi [5], satu di Referensi [6] pada bibliografi). Karena, dalam konteks ini, perilaku paling sering diperhatikan dalam kondisi lingkungan (NTP), tekanan dan temperatur biasanya dianggap seperti lingkungan sekitar ($\sim 20^{\circ}\text{C}$, dan 0,101 MPa), sehingga ambang batas titik bakar biasanya digunakan untuk menggambarkan ruang campuran yang diminati. Bila ragu, rujuklah ke standar yang berlaku (lihat Referensi [5] atau [6] dalam bibliografi).

Kemudahan terbakarnya hidrogen atau campuran udara juga merupakan fungsi dari arah propagasi nyala api, misalnya api yang arah propagasinya ke bawah memiliki ambang batas campuran miskin sekitar 9%, sedangkan api yang arah propagasinya ke atas memiliki ambang batas campuran miskin sekitar 4% (lihat Referensi [10] dalam bibliografi).

Ambang batas detonasi didefinisikan secara ambigu dalam literatur. Nilai ketika detonasi dapat terjadi adalah fungsi yang kuat dari geometri, dinamika fluida, dan rasio campuran. Nilai yang biasanya dilaporkan sebagai ambang batas detonasi bawah sebesar 18% sebaiknya tidak digunakan sebagai panduan kasar. Literatur pembakaran memberikan contoh-contoh detonasi yang terjadi serendah 11% dan mungkin lebih rendah lagi. Tidak ada prosedur pengukuran standar untuk sifat ini, tidak seperti ambang batas titik bakar.

5.3.2 Sifat pembakaran hidrogen yang dipilih

Pembakaran terjadi dalam tiga proses fisik yang berbeda, yaitu:

- a) sebagai nyala api non-premix;
- b) sebagai nyala api premix yang merambat sebagai gelombang deflagrasi (proses subsonik);
- c) sebagai nyala api premix dengan gelombang kejut yang merambat sebagai gelombang detonasi (proses supersonik).

Gelombang deflagrasi adalah proses subsonik ketika perubahan tekanan di seluruh nyala api dapat diabaikan. Detonasi adalah proses supersonik, yang memiliki peningkatan tekanan yang sangat signifikan di bagian depan (10 kali lipat atau lebih). Gelombang deflagrasi merambat melalui difusi kalor dan radikal kimia di depan gelombang untuk menyulut campuran, sedangkan detonasi merambat melalui pemanasan kejut adiabatik. Pada kondisi dinamika fluida yang sesuai, gelombang deflagrasi dapat berakselerasi hingga mendekati kecepatan suara dan bahkan dapat bertransisi menjadi gelombang detonasi (dikenal sebagai transisi deflagrasi menuju detonasi, atau DDT). Dalam kasus ini, gelombang deflagrasi yang cepat dapat menciptakan gelombang suara yang dapat didengar yang merambat secara sferis, mirip dengan gelombang yang diciptakan oleh gelombang detonasi.

Ambang batas titik bakar, energi penyulutan, dan temperatur swasulut adalah variabel utama yang digunakan untuk mengarakterisasi keadaan saat pembakaran dapat terjadi. Ambang batas detonasi berkorelasi dengan ukuran sel detonasi. Beberapa data pembakaran hidrogen diberikan pada Lampiran B. Data pembakaran yang dipilih untuk beberapa bahan bakar umum juga diberikan pada Lampiran B sebagai perbandingan.

5.3.3 Ledakan

Ketika hidrogen dan oksidator (udara) dibiarkan membentuk campuran dalam ambang batas titik bakar sebelum penyulutan (campuran premix), setelah penyulutan, reaksi kimia berikutnya (pembakaran) dapat merambat melalui daerah yang mudah terbakar. Proses pembakaran yang dihasilkan melepaskan kalor. Pemuaihan produk yang dihasilkan, jika cukup cepat, dapat menyebabkan gelombang tekanan merambat dari sumbernya. Untuk tujuan standar ini, "Ledakan" didefinisikan sebagai pembakaran berlanjut dari campuran gas yang melepaskan kalor dan produk pembakaran yang panas.

Dalam istilah umum, istilah "Ledakan" sering kali juga mencakup proses lain yang menghasilkan pelepasan energi secara cepat yang menyebabkan ledakan, misalnya, meledaknya bejana karena tekanan berlebih. Perhatian sebaiknya diberikan untuk membedakan fenomena tersebut dari yang lain.

5.3.4 Deflagrasi

Proses nyala api yang bergantung pada reaksi kimia yang terkait dengan kalor kompleks dan mekanisme perpindahan massa yang merambat secara subsonik ke dalam wilayah campuran yang tidak terbakar dikenal sebagai deflagrasi. Konsentrasi, tekanan, dan temperatur media yang tidak terbakar harus berada di dalam ambang batas titik bakar. Dalam campuran stasioner di tempat terbuka tanpa *confinement*, nyala api akan merambat dengan laminar atau "aliran halus" dengan kecepatan pembakaran ke dalam campuran yang tidak terbakar dalam rentang 2 m/s sampai 3 m/s (yang sekitar 10 kali lebih cepat daripada nyala api hidrokarbon). Untuk campuran hidrogen-udara, kecepatan rambat yang terlihat bisa lebih tinggi daripada kecepatan pembakaran. Hal ini dapat disebabkan oleh ekspansi produk pembakaran panas di belakang nyala api yang menambahkan kecepatan konveksi ke kecepatan rambat nyala api. Sebagai contoh, jika sebuah tabung terbuka pada salah satu ujungnya yang berisi gas premix, dan tersulut pada ujung yang terbuka, maka kecepatan propagasi nyala api TIDAK akan terpengaruh oleh gas yang mengembang. Namun, untuk konfigurasi tabung yang sama dan menyulutnya di ujung tertutup, nyala api akan berakselerasi karena gas memuai di belakang nyala api pada ujung tabung yang tertutup memuai.

Confinement, seperti yang ditemukan di antara dinding, di dalam pipa dan saluran, dapat menjebak pemuaihan produk reaksi dan menghasilkan aliran limbak, yang pada gilirannya, mendorong *flame front* lebih cepat ke dalam campuran yang tidak terbakar. Dengan terciptanya aliran limbak, permukaan yang berdekatan dengan nyala api dan halangan di depan nyala api dapat meningkatkan pencampuran campuran yang tidak terbakar dengan nyala api, sehingga meningkatkan laju pembakaran. Proses ini dapat mempercepat nyala api hingga ratusan meter per detik dengan pembentukan tekanan berlebih yang cukup besar, mencapai ratusan kPa. Kecepatan propagasi maksimum dari gelombang deflagrasi dalam medan aliran turbulen terbatas pada kecepatan suara dalam campuran gas yang tidak terbakar (975 m/s untuk rasio stoikiometri campuran hidrogen/udara di bawah NTP). Turbulensi aliran dan berbagai ketidakstabilan *flame front*, misalnya akibat *confinement* dan halangan, bahkan dapat mengakselerasi nyala api hingga transisi deflagrasi menuju detonasi (DDT).

Beberapa deflagrasi berlangsung sangat lambat sehingga hampir tidak menciptakan gelombang tekanan. Untuk tujuan praktis dan agar tetap berada dalam kerangka standarisasi yang ada, "ledakan" dalam standar ini adalah reaksi pembakaran yang terjadi dalam campuran yang memiliki tekanan, temperatur, dan konsentrasi dalam ambang batas titik bakar.

Selain menggunakan data ambang batas titik bakar dan energi penyulutan, sulit untuk mengukur efek yang menghasilkan akselerasi nyala api. *Confinement* diperlukan dan, dengan kondisi awal seperti campuran rasio stoikiometri yang dekat dan sumber inisiasi yang kuat,

deflagrasi cepat di ambang transisi menuju detonasi dapat terjadi dalam jarak satu meter. Pengujian untuk skenario tertentu diperlukan untuk menentukan potensi deflagrasi cepat atau bahkan untuk detonasi.

5.3.5 Detonasi

5.3.5.1 Umum

Detonasi berbeda dengan deflagrasi karena ada gelombang kejut utama, yang bersamaan dengan gelombang pembakaran. Detonasi campuran gas merambat dengan kecepatan yang lebih besar daripada kecepatan suara di dalam media yang tidak terbakar, biasanya 1.500 m/s hingga 2.000 m/s dengan peningkatan tekanan yang menyertainya dalam rentang 1,5 MPa hingga 2 MPa mulai dari tekanan atmosfer (0,1 MPa). *Detonation wave front* tidak terdiri dari satu gelombang kejut yang seragam, tetapi memiliki banyak gelombang transversal yang menghasilkan struktur sel. Lebar sel detonasi tergantung pada komposisi campuran, tekanan, dan temperatur campuran gas. Untuk bahan bakar dan oksidator tertentu, umumnya lebar sel terkecil untuk campuran yang mendekati komposisi campuran rasio stoikiometri. Struktur halus sebenarnya dari *detonation front* sangat rumit dan sulit untuk disimulasikan bahkan pada skala moderat.

Inisiasi langsung detonasi membutuhkan campuran hidrogen-oksidator yang mendekati komposisi rasio stoikiometri dan sumber penyulutan dengan energi yang secara signifikan lebih dari yang dibutuhkan untuk deflagrasi. Sebagai contoh, di tempat terbuka, muatan bahan peledak yang cukup kuat diperlukan untuk inisiasi langsung detonasi dalam campuran hidrogen-udara.

5.3.5.2 Ambang batas detonasi

Dibandingkan dengan deflagrasi, inisiasi langsung dari proses detonasi memerlukan campuran yang lebih mendekati rasio stoikiometri dan sumber inisiasi yang lebih kuat. Oleh karena itu, ambang batas detonasi selalu berada dalam ambang batas titik bakar. Namun, jika detonasi mampu untuk merambat bergantung tidak hanya pada konsentrasi campuran, tetapi juga pada hubungan antara ukuran sel detonasi dan kondisi batas geometris sebagaimana pada tingkat turbulensi fluida yang bereaksi. Lebar sel detonasi bergantung pada komposisi campuran dan parameter lainnya. Data lebar sel bervariasi, tidak hanya dengan konsentrasi campuran, namun juga dengan faktor-faktor lain termasuk tekanan, keberadaan diluen, dan temperatur. Dengan pengetahuan tentang konsentrasi campuran dan lebar sel, pendekatan umum untuk mengevaluasi ambang batas detonasi adalah untuk menentukan apakah memungkinkan sumber dengan energi yang cukup untuk inisiasi langsung di atas energi kritis untuk inisiasi detonasi. Peningkatan energi inisiasi akan menyebabkan ambang batas detonasi yang lebih luas. Karakteristik geometris, pada tingkat kepadatan tertentu (rasio penyumbatan) dan *confinement*, dievaluasi untuk melihat apakah detonasi dapat diinduksi setelah fase akselerasi nyala api. Maka, tidak memungkinkan untuk memberikan gambaran komposisi sederhana sebagai kondisi untuk kemungkinan terjadinya detonasi dari sebuah campuran. Tidak ada prosedur standar untuk penentuan ambang batas detonasi.

5.3.6 Ambang batas titik bakar

Hidrogen, dengan sendirinya dalam limbah, tidak mengalami reaksi kimia ketika terpapar pada sumber penyulutan. Agar pembakaran dapat terjadi, hidrogen harus dicampur dengan oksidator dalam jumlah yang cukup untuk membentuk campuran yang mudah terbakar. Bagian terbesar dari pembahasan dalam standar ini adalah tentang pembakaran awan gas premix.

Campuran yang optimum, atau campuran dengan rasio stoikiometri, memberikan rasio

reaktan yang tepat sehingga semua komponen bahan bakar dan oksidator reaktan dapat terbakar sempurna untuk menghasilkan produk reaksi dan kalor. Sebagai contoh, dua molekul hidrogen bereaksi dengan satu molekul oksigen untuk menghasilkan dua molekul air. Secara volumetrik, ini adalah campuran dua bagian hidrogen (67%) dengan satu bagian oksigen murni. Untuk campuran hidrogen dengan udara, yang terdapat tambahan nitrogen, rasio campuran stoikiometriknya adalah 29,5% hidrogen.

Campuran non-stoikiometri yang kaya bahan bakar (lebih banyak bahan bakar daripada yang diperlukan untuk reaksi optimum) atau miskin bahan bakar (lebih sedikit bahan bakar daripada yang diperlukan untuk reaksi optimum) juga dapat mendukung pembakaran, tetapi tidak semua reaktan dikonsumsi. Untuk seperangkat reaktan dan kondisi tertentu (misalnya, temperatur dan tekanan), pembakaran terbatas pada rentang komposisi campuran tertentu, batas-batas campuran yang mudah terbakar ini adalah ambang batas titik bakar.

Ambang batas titik bakar adalah cara yang mudah untuk menyampaikan rentang komposisi campuran bahan bakar/pengoksidasi, rentang temperatur dan tekanan yang mampu mendukung pembakaran (merambatkan api). Batas ini dinyatakan sebagai ambang batas titik bakar bawah (LFL) untuk persentase minimum bahan bakar yang mendukung pembakaran untuk tekanan dan temperatur tertentu dan ambang batas titik bakar atas (UFL) untuk persentase maksimum bahan bakar yang mendukung pembakaran untuk tekanan dan temperatur tertentu. Dalam literatur keselamatan, ambang batas ini umumnya dinyatakan sebagai fraksi campuran berdasarkan fraksi volume (persentase). Ambang batas titik bakar untuk hidrogen di udara pada kondisi lingkungan sekitar ditunjukkan pada B.3. Dibandingkan dengan bahan bakar yang lebih umum seperti metana atau propana, rentang ini sangat luas karena ambang batas atasnya jauh lebih tinggi daripada bahan bakar lainnya.

Data pembakaran khusus sebaiknya dikonsultasikan untuk hidrogen yang dimasukkan ke dalam lingkungan bertekanan tinggi atau rendah, lingkungan yang mengandung bahan kimia, atau lingkungan yang berubah karena kegagalan sistem hidrogen. Berbagai faktor termasuk temperatur, tekanan, diluen, kuat sumber penyulutan, aliran, jarak antara permukaan pembatas yang berdekatan, dan arah propagasi nyala api dapat mengubah ambang batas titik bakar. Hal ini diilustrasikan oleh efek konveksi alami, yang memperluas ambang batas titik bakar untuk pembakaran hidrogen yang merambat ke atas dan mengurangi ambang batas titik bakar untuk pembakaran hidrogen yang merambat ke bawah dalam campuran hidrogen/udara di bawah NTP. Dalam hal ini, kecepatan ke atas yang diinduksi oleh gaya apung dari gas yang panas dan terbakar akan memperlambat nyala api yang merambat ke bawah, tetapi mendorong nyala api yang merambat ke atas. Adanya humiditas lingkungan, pelumas, atau hidrokarbon lainnya juga dapat memberikan sifat campuran, yang sangat berbeda dari campuran hidrogen-udara murni.

Permukaan menghilangkan energi dari nyala api dan sumber penyulutan, sehingga jika permukaannya cukup dekat, pembakaran tidak dapat dilanjutkan atau diinisiasi. Nyala api hidrogen yang memasuki wilayah tersebut akan tertahan atau terpadamkan, seperti pada penahan nyala api. Celah pemadaman untuk campuran stoikiometri hidrogen dan udara pada NTP adalah 0,64 mm dan berkurang seiring peningkatan tekanan dan temperatur.

Untuk informasi lebih lanjut tentang “Ambang batas titik bakar”, lihat 3.48.

5.3.7 Energi penyulutan dan energi penyulutan minimum seperti diterapkan pada deflagrasi

Berbagai proses, termasuk nyala api, percikan listrik, kabel yang menyatu, pembakar, permukaan panas (termasuk katalis), pemanasan, kompresi adiabatik yang cepat, atau gelombang kejut dapat menjadi sumber penyulut untuk campuran hidrogen/oksidator. Hasilnya adalah nyala api yang merambat ke seluruh campuran. Untuk campuran yang mudah

terbakar dan jenis penyulutan tertentu, ada konsentrasi yang bergantung pada energi minimum di bawahnya sehingga penyulutan tidak terjadi. Hal ini dikenal sebagai energi penyulutan, dan biasanya diukur dengan peralatan standar.

Energi penyulutan bervariasi terhadap komposisi campuran. Energi ini menjadi tak terbatas pada ambang batas titik bakar. Di antara ambang batas ini, energi penyulutan memiliki nilai minimum, umumnya pada konsentrasi yang sedikit lebih rendah daripada konsentrasi stoikiometri (untuk gas bahan bakar yang lebih ringan daripada udara). Campuran yang paling mudah disulut (MEIM) untuk hidrogen dapat ditemukan pada rentang antara 22% dan 26% (lihat Referensi [1] dalam bibliografi). Di luar rentang titik bakar (tekanan dan temperatur tertentu) campuran hidrogen/udara, energi penyulutan bervariasi hampir tiga kali lipat dan paling rendahnya 0,017 mJ untuk campuran yang paling mudah disulut (energi penyulutan minimum, atau MIE). Selain komposisi campuran, faktor lain seperti celah percikan api, tekanan gas awal, dan temperatur dapat memengaruhi energi penyulutan. Karena hampir semua sumber penyulutan menghasilkan lebih dari 10 mJ, semua bahan bakar yang terdaftar dalam Tabel B.2 akan tersulut jika rasio bahan bakar/udara melebihi ambang batas titik bakar bawah. Sumber penyulutan yang kuat yang mampu membentuk kejut, seperti pelepasan percikan api berenergi tinggi dan bahan peledak, dapat secara langsung memicu detonasi. Perlu diperhatikan bahwa penggunaan alat bebas percikan api bukan jaminan mutlak bahwa tidak akan terjadi percikan api. Bahkan alat-alat ini dapat menyalurkan energi yang cukup ke material atau kombinasi material untuk menciptakan titik panas atau merusak partikel yang terbakar.

6 Pertimbangan keselamatan untuk penggunaan hidrogen gas dan cair

6.1 Umum

Sifat-sifat hidrogen, yang membuatnya berharga sebagai pembawa energi atau bahan bakar, memerlukan rancangan dan operasi yang tepat untuk menghindari terjadinya bahaya seperti halnya pembawa energi lainnya.

Kombinasi perilaku hidrogen dan atribut tertentu dari sistem hidrogen menentukan sifat potensi bahaya yang dihadapi operator. Misalnya, apakah sistem beroperasi dengan hidrogen bertekanan tinggi atau beroperasi pada temperatur kriogenik menentukan sifat potensi bahaya.

Bahaya dan isu utama yang terkait dengan sistem hidrogen dapat dikategorikan dan diprioritaskan sebagai berikut:

- kemudahan terbakar:
 - efek termal;
 - efek tekanan
 - kemudahan tersulut pada beberapa campuran;
- ukuran molekul yang kecil:
 - viskositas rendah;
 - laju difusi tinggi;
 - gaya apung tinggi
- interaksi dengan material (penggetasan metal tertentu)
- bahaya asfiksia bila hidrogen tergantikan;
- bahaya yang terkait dengan prosedur penyimpanan:
 - peningkatan tekanan penyimpanan gas;
 - temperatur rendah untuk cairan kriogenik;

- lainnya untuk metode lain, seperti metal hidrida.

Daftar ini hanya menekankan pada bagian mana perhatian sebaiknya difokuskan dalam rancangan dan operasi sistem hidrogen. Perhatikan bahwa daftar ini tidak merinci bahaya spesifik, atau kemungkinan bahwa elemen yang berbeda dalam daftar bersamaan membentuk bahaya secara keseluruhan. Bahaya dan isu ini sebaiknya dipertimbangkan ketika mengevaluasi bahaya hidrogen.

Beberapa sifat yang disebutkan di atas dapat meningkatkan atau mengurangi bahaya dari situasi tertentu, tergantung pada situasinya. Difusivitas gas hidrogen yang tinggi menyebabkan awan campuran akan menyebar dengan cepat ke segala arah (termasuk ke bawah) dan dapat mencapai sumber penyulut, jika ada. Pada saat yang sama, gas ini dapat mengencer dan menjadi tidak reaktif jika akumulasi hidrogen dihilangkan.

Meskipun difusi hidrogen yang cepat dapat mengencerkan awan gas yang terlepas, hal ini sebaiknya tidak dianggap pasti terjadi secara otomatis. Dalam sebagian besar kondisi, pelepasan hidrogen akan menghasilkan gerakan dinamika fluida yang akan mendominasi perpindahan dan menjaga hidrogen agar tidak berdifusi menjauh dari jet. Dalam kasus aliran yang diakibatkan oleh gaya apung, dinamika fluida yang terjadi akan membentuk semburan turbulen yang naik dengan cepat dan akan mendominasi proses difusi. Demikian juga, dalam pelepasan hidrogen dari bejana bertekanan yang tekanannya lebih besar dari 0,2 MPa (dua atmosfer), jet yang keluar akan menjadi hasil dari aliran yang tersumbat dan sekali lagi dinamika fluida akan mendominasi difusi molekuler dan efek gaya apung hidrogen.

6.2 Bahaya yang terlibat sebagai konsekuensi dari sifat hidrogen

6.2.1 Umum

Diskusi terkait hubungan antara sifat hidrogen dan potensi bahaya yang terkait memberikan wawasan tentang isu keselamatan. Meskipun kekhawatiran akan bahaya pembakaran adalah hal yang umum terjadi pada semua sistem hidrogen, bahaya ini dapat muncul baik berupa hidrogen sebagai cairan atau gas bertekanan tinggi atau dalam bentuk bahan padat sebagai hidrida.

Beberapa sifat umum terkait keselamatan hidrogen dalam bentuk gas dan cairan dibahas di bawah ini. Informasi tambahan tentang sifat umum hidrogen yang terkait dengan keselamatan sebagai gas dan cairan dirangkum dalam Pasal 5 dan beberapa data sifat-sifat yang dipilih ditabulasikan dalam Lampiran A.

6.2.2 Gas hidrogen

Gas hidrogen tidak memiliki warna atau bau yang khas. Hidrogen merupakan molekul terkecil dan paling ringan dari semua gas (sekitar 14 kali lebih ringan dari udara). Akibatnya, gas hidrogen lebih mudah merembes melalui material, melewati jalur kebocoran yang lebih kecil, berdifusi lebih cepat di media sekitar, dan memiliki gaya apung yang lebih besar daripada gas lainnya. Konsekuensi yang timbul dari sifat-sifat ini adalah bahwa hidrogen yang dilepaskan memiliki kecenderungan untuk naik dan berdifusi, tetapi jika terperangkap, hidrogen dapat terakumulasi di titik-titik tinggi dan mencapai sumber penyulut yang terletak di sana (misalnya lampu langit-langit).

Bejana hidrogen dan sistem perpipaan membutuhkan penyekat yang baik, dan kebocoran selalu menjadi perhatian. Selain itu, kebocoran hidrogen sulit dideteksi dengan indera tanpa bantuan, jika tidak menimbulkan suara yang dapat didengar. Telah dibuktikan bahwa hidrogen dapat merembes secara perlahan melalui dinding pembatas. Laju perembesan bervariasi untuk berbagai jenis material. Untuk metal seperti baja, pada temperatur lingkungan, laju

perembesannya sangat rendah dengan jumlah yang tidak signifikan dalam waktu yang sangat lama. Sebaiknya berhati-hati dengan bahan polimer, yang memungkinkan perembesan yang lebih besar dan oleh karena itu jumlah hidrogen yang signifikan dapat terakumulasi, jika aliran memasuki volume kecil yang tidak berventilasi; namun, biasanya, proses perembesan berlangsung cukup lambat sehingga campuran yang dapat terbakar tidak terbentuk. Gas hidrogen yang terlarut dalam cairan dapat merembes ke dalam material bejana yang berdampingan.

Karena densitas hidrogen yang rendah pada kondisi lingkungan sekitar, maka umumnya hidrogen disimpan dan diangkut dalam bentuk gas pada tekanan tinggi atau dalam bentuk cair. Pilihan lain untuk penyimpanan adalah penggunaan senyawa kimia seperti hidrida.

6.2.3 Hidrogen cair

Hidrogen cair tampak jernih dengan sedikit warna biru. Hidrogen cair memiliki titik didih yang sangat rendah (20,3 K), densitas yang rendah untuk cairan (sekitar 70 kg/m³), kapasitas kalor yang rendah, dan ekspansi volumetrik yang besar ketika dipanaskan menjadi gas seperti yang umum terjadi pada sebagian besar cairan kriogenik (rasio volume gas/cairan sekitar 850).

Hidrogen cair dengan titik didih yang rendah akan dengan cepat mendidih atau seketika menjadi gas jika terpapar atau tumpah ke lingkungan bertemperatur normal. Meningkatkan temperatur hidrogen cair menjadi gas bertemperatur lingkungan dapat menyebabkan tekanan yang sangat tinggi ketika hidrogen tersebut terkurung.

Konsekuensi lain dari temperatur rendah hidrogen cair adalah semua gas akan terkondensasi dan menjadi padat jika terpapar dengannya, kecuali helium. Kebocoran udara, nitrogen, atau gas lainnya yang terpapar langsung dengan hidrogen cair dapat menyebabkan beberapa bahaya. Gas yang dipadatkan dapat menyumbat pipa dan lubang serta membuat katup macet. Dalam proses yang dikenal sebagai *cryopumping*, pengurangan volume gas yang mengembun dapat menciptakan ruang vakum yang dapat menarik lebih banyak gas. Jika kebocoran terus berlanjut dalam waktu lama, sejumlah besar material dapat terakumulasi menggantikan hidrogen cair. Pada titik tertentu, jika temperatur sistem dinaikkan untuk pemeliharaan, material-material beku ini akan kembali menjadi gas yang mungkin menghasilkan tekanan tinggi dari campuran reaktif. Di sisi lain, gas-gas lain ini juga dapat membawa kalor ke dalam hidrogen cair dan menyebabkan penguapan yang lebih besar atau peningkatan tekanan.

Di luar sistem hidrogen cair, pipa dan bejana yang tidak terisolasi yang berisi hidrogen cair dapat mengembun gas seperti udara ke dalam bentuk padat dan cair pada permukaan luarnya. Kondensat cair mengalir dan terlihat seperti air cair. Karena oksigen memiliki titik didih yang lebih tinggi (90 K) daripada nitrogen (77 K), pengayaan oksigen dimungkinkan. Jika komponen oksigen dalam udara cair bersentuhan dengan material yang mudah terbakar, bahaya pembakaran dapat terjadi bahkan dengan material yang umumnya tidak dianggap mudah terbakar.

6.3 Faktor-faktor yang terlibat dalam bahaya pembakaran

6.3.1 Aspek pembakaran

Bahaya utama yang ditimbulkan oleh sistem hidrogen adalah pembakaran yang tidak terkendali dari hidrogen yang dilepaskan secara tidak sengaja. Hal ini terjadi karena tingginya potensi kebocoran dan pembentukan campuran yang mudah terbakar, kemudahan penyulutan dari campuran ini dalam keadaan yang lebih memungkinkan, dan potensi pelepasan energi yang tinggi dapat terjadi sebagai kebakaran atau ledakan.

Agar hidrogen terbakar, dua elemen tambahan harus ada: oksidator seperti udara dan sumber penyulutan. Setiap faktor yang diperlukan untuk pembakaran (bahan bakar, oksidator, dan sumber penyulutan) dapat diwakili oleh salah satu sisi dari segitiga, konsep ini dikenal sebagai segitiga api. Api hanya mungkin ada jika ketiga sisi tersebut ada. Campuran hidrogen dan oksidator mudah terbakar pada berbagai konsentrasi, tekanan, dan temperatur. Campuran yang mendekati stoikiometri sangat mudah tersulut. Berbagai proses fisik yang umum terjadi (nyala api terbuka, permukaan panas, gesekan, dll.) dapat menjadi sumber penyulutan, termasuk percikan statis yang berada di bawah ambang batas yang dapat dirasakan manusia. Bahkan penyulutan tanpa sumber energi yang disediakan secara artifisial dimungkinkan dalam kondisi pelepasan tiba-tiba tertentu ke lingkungan yang mengoksidasi (penyulutan tidak terencana dari pelepasan tiba-tiba ke dalam perpipaan udara dapat terjadi pada tekanan penyimpanan serendah 0,2 hingga 0,3 MPa). Akibat kemudahan penyulutan campuran hidrogen/oksidator, sebagian besar metode untuk mengurangi risiko pembakaran hidrogen bergantung pada pemisahan hidrogen dari oksidator (upaya perlindungan ledakan utama: mencegah pembentukan campuran reaktif).

Ada beberapa mode pembakaran hidrogen: pembakaran (api) *non-premix* pada sumber titik, deflagrasi, dan detonasi. Masing-masing dapat menimbulkan bahaya, dan tergantung pada keadaan bagaimana hidrogen terpapar pada oksidator. Dalam aplikasi terestrial standar, udara adalah oksidator yang umum. *Electrolysers* dan beberapa sistem sel bahan bakar berpotensi terjadinya pencampuran oksigen dengan hidrogen jika terjadi kerusakan.

Data pembakaran hidrogen dasar tersedia di Lampiran B.

6.3.2 Proses pembakaran *non-premix*

Sumber hidrogen, misalnya terjadi kebocoran, ketika dikelilingi oleh oksidator seperti udara, dapat tersulut untuk menghasilkan nyala api serupa seperti pembakar (*burner*). Bergantung pada tingkat pelepasan hidrogen dari sumbernya, proses pembakaran ini dapat menghasilkan keluaran mulai dari api mikro yang tidak terlihat sampai seperti lilin kecil hingga menyerupai api jet bertekanan tinggi yang besar dengan panjang nyala api 10 m hingga 15 m. Jika kebakaran terjadi di wilayah tertutup, kenaikan tekanan akan terjadi. Berbeda dengan bahan bakar hidrokarbon seperti bensin, yang menghasilkan sebagian besar radiasinya sebagai cahaya tampak dan kalor, nyala api hidrogen memancarkan lebih sedikit kalor dan praktis tidak terlihat di siang hari. Sebagian besar emisi berada di sekitar 311 nm. *Chemiluminescence* sekitar 350 nm juga telah terukur. Radiasi ini berada di luar jangkauan yang terlihat pada spektrum *near* ultraviolet (UV). Cahaya yang melewati gradien termal dalam nyala api atau aliran produk panas terkadang menghasilkan pola terang/gelap yang berkedip-kedip.

Bagi indera manusia, karakteristik ini membuat pendeteksian nyala api hidrogen yang kecil menjadi sulit dibandingkan dengan nyala api hidrokarbon. Oleh karena itu, tanpa peralatan pendeteksian yang sesuai, indikasi pertama nyala api kecil kemungkinan besar adalah bunyi desis dari kebocoran gas dan mungkin bayangan intermiten dari gradien termal nyala api.

6.3.3 Ledakan

6.3.3.1 Umum

Ledakan dapat dimanifestasikan melalui deflagrasi atau detonasi. Bila deflagrasi cukup cepat, maka dapat menghasilkan gelombang ledakan yang mirip dengan detonasi. Hanya saja, suara ledakan detonasi akan terdengar lebih keras dibandingkan suara ledakan deflagrasi. Inisiasi deflagrasi membutuhkan energi penyulutan yang jauh lebih kecil dibandingkan inisiasi langsung dari detonasi.

Gelombang kejut dan produk gas panas yang mengenai lingkungan di luar area yang mudah

terbakar juga dapat disebut sebagai gelombang ledakan. Tidak ada pembakaran dalam gelombang ledakan, tetapi hal tersebut secara fisik memindahkan gas (yang tidak bereaksi) dan material lepasan (serpihan) di sekitarnya.

6.3.3.2 Transisi deflagrasi menuju detonasi

Adanya permukaan pembatas dan halangan seperti pipa, bejana, dan dinding *enclosure* dapat secara signifikan meningkatkan kecepatan nyala api hingga ratusan meter per detik dalam proses yang dikenal sebagai akselerasi nyala api (deflagrasi lambat/cepat). Jika nyala api mencapai kecepatan yang cukup tinggi dan mengalami turbulensi serta ketidakstabilan nyala api, proses deflagrasi dapat berubah menjadi detonasi. Hal ini disebut transisi deflagrasi menuju detonasi (DDT).

6.3.3.3 Detonasi

Detonasi yang mengenai permukaan akan dipantulkan. Gelombang tekanan yang dipantulkan umumnya menghasilkan tekanan puncak yang lebih besar, yaitu 2 hingga 3 kali lipat dari tekanan kejut yang terjadi. Detonasi awan gas yang tidak dibatasi memiliki kecenderungan untuk lebih mudah terjadi seiring meningkatnya ukuran awan.

6.3.3.4 Pertimbangan keselamatan

Pertimbangan keselamatan yang muncul dari perilaku deflagrasi dan detonasi hidrogen meliputi pemahaman berikut ini:

- apakah kegagalan sistem dapat mengakibatkan terbentuknya campuran hidrogen-oksidador;
- pengaruh *confinement* dan penumpukan baik di dalam maupun di luar sistem;
- konsekuensi dari terbentuknya tekanan tinggi, *hot post flame gas*, radiasi, dan propagasi cepat dari *front* nyala api.

Deflagrasi campuran gas hidrogen-udara dapat menghasilkan tekanan sebesar 8 kali tekanan awal, bahkan lebih pada geometri khusus. Detonasi campuran hidrogen-udara dapat menghasilkan tekanan sebesar 20 kali tekanan awal (untuk durasi yang sangat singkat bahkan lebih) dan dengan pantulan, tekanan menjadi 50 kali tekanan awal. Salah satu pertimbangan penting adalah bahwa sistem pelepasan, yang dirancang untuk melindungi sistem hidrogen dari tekanan berlebih, bergantung pada pendeteksian penumpukan tekanan. Karena gelombang detonasi bergerak lebih cepat daripada kecepatan suara, sistem pelepasan tidak mendeteksi gelombang ledakan yang mendekat dan tidak dapat bereaksi tepat waktu untuk melindungi sistem dari kenaikan tekanan yang cepat. Cakram ruptur, panel pelepas, dll. hanya berguna untuk menangani fenomena pembakaran yang berlangsung lebih lambat daripada kecepatan suara (deflagrasi, bukan detonasi).

6.4 Faktor-faktor yang terlibat dalam bahaya tekanan

6.4.1 Umum

Banyak aplikasi hidrogen menggunakan hidrogen dalam bentuk gas bertekanan tinggi atau sebagai cairan kriogenik. Dalam kedua bentuk ini, hidrogen mempunyai beberapa bahaya terkait tekanan. Efek tekanan merupakan karakteristik dan dapat berbahaya untuk skenario yang melibatkan pelepasan yang tidak tersulut dalam *enclosure* berventilasi, tahap awal api jet, deflagrasi, dan detonasi. Dua efek tekanan yang paling relevan yang sebaiknya diperhatikan dari perancangan dan pengoperasian komponen atau sistem hidrogen adalah tekanan berlebih semu dan efek tekanan dinamis pada elemen struktural. Jarak yang cukup antara penyimpanan hidrogen dan area kerja atau publik dapat menjadi upaya mitigasi yang

sesuai.

Penanganan dan penyimpanan hidrogen dalam pengaturan komersial adalah topik dari Standar Internasional lainnya seperti ISO 19880-1 yang mencakup persyaratan yang berlaku untuk stasiun pengisian bahan bakar gas hidrogen.

6.4.2 Penyimpanan gas

Gas hidrogen dapat dikompresi hingga bertekanan sangat tinggi. Pada tekanan tersebut, hidrogen memiliki potensi energi (tersimpan) yang cukup besar, seperti gas lainnya. Pelepasan energi ini dapat menghasilkan efek tekanan yang kuat, tergantung pada laju pelepasan, bahkan tanpa diikuti dengan pembakaran. Perhatian perlu diberikan pada laju aliran pelepasan hidrogen (tidak disengaja maupun disengaja) di dalam *enclosure* (lihat Referensi [14] di bibliografi untuk rinciannya).

6.4.3 Hidrogen cair

Peningkatan volume secara tiba-tiba dikaitkan dengan perubahan fasa hidrogen cair menjadi gas hidrogen, dan peningkatan volume secara bertahap lainnya terjadi untuk gas hidrogen yang dinaikkan temperaturnya dari temperatur cair ke temperatur lingkungan sekitar.

Pada sistem hidrogen cair, peningkatan volume untuk perubahan fasa hidrogen cair menjadi gas hidrogen dan ekspansi gas yang dipanaskan dapat menyebabkan tekanan berlebih, dalam hitungan detik, struktur penahan seperti bejana penyimpanan atau perpipaan dapat meledak. Bahaya semacam ini umumnya diatasi dengan penggunaan perangkat pelepasan di semua bagian sistem hidrogen yang memungkinkan hidrogen cair atau gas dingin dapat terperangkap, seperti di antara dua katup. Pelepasan yang tidak memadai dapat menyebabkan kegagalan komponen yang luar biasa, dan mengakibatkan gelombang ledakan dan/atau serpihan berkecepatan tinggi.

6.5 Faktor yang terlibat dalam bahaya temperatur rendah

Banyak bahan yang mengalami pengurangan ukuran dan penurunan keuletan secara drastis, serta penurunan kalor jenis ketika didinginkan hingga mencapai temperatur hidrogen cair.

Perlu diperhatikan untuk memastikan bahwa material struktural tetap mempertahankan keuletan dan kekuatan yang cukup, dan rancangan sistem memperhitungkan penyusutan material. Konsekuensi dari kegagalan material dalam sistem hidrogen adalah pelepasan hidrogen baik secara internal ke sistem (misalnya melalui *valve seat*), atau eksternal ke sistem (misalnya melalui penyekat).

6.6 Faktor yang terlibat dalam bahaya penggetasan hidrogen

6.6.1 Penggetasan hidrogen

Beberapa material metalik yang digunakan dalam bejana atau komponen lain dapat mengalami kehilangan keuletan yang signifikan ketika terpapar hidrogen. Fenomena ini dikenal sebagai penggetasan hidrogen, dan terjadi ketika hidrogen atau senyawa hidrogen merembes ke dalam struktur kisi material. Pada tingkat atom, agar penggetasan terjadi, molekul hidrogen mulanya harus terdisosiasi menjadi atom-atom sebelum dapat berdifusi ke dalam struktur metal. Pada temperatur yang mendekati temperatur lingkungan, sejumlah material metal rentan terhadap penggetasan hidrogen, terutama yang memiliki struktur kisi kristal *body-centered cubic*. Penggetasan ini menjadi masalah khusus pada banyak baja feritik ketika mengalami tekanan mekanis. Proses ini terjadi pada permukaan metal yang baru dibuat yang kemungkinan besar akan terbentuk pada cacat permukaan atau konsentrasi tegangan lainnya dan sebagai akibat dari proses deformasi plastis lokal yang disebabkan oleh tegangan.

Impuritas seperti hidrogen sulfida terdisosiasi menjadi atom hidrogen bahkan lebih mudah dibandingkan dengan hidrogen molekuler. Baja berkekuatan tarik tinggi sering kali ditemukan lebih rentan terhadap penggetasan daripada baja berkekuatan tarik rendah.

Degradasi material yang disebabkan oleh penggetasan dapat mengakibatkan kegagalan luar biasa pada struktur penahan (seperti tabung Bourdon pada pengukur tekanan, atau bejana penyimpanan). Penggetasan hidrogen dapat diatasi dengan rancangan dan pemilihan material yang tepat (lihat Lampiran C).

6.6.2 Serangan hidrogen

Pada temperatur di atas 200°C, banyak baja struktural dengan aloi rendah dapat mengalami fenomena penggetasan terkait hidrogen yang dikenal sebagai serangan hidrogen. Ini adalah degradasi non-reversibel dari struktur mikro baja yang disebabkan oleh reaksi kimia antara hidrogen yang terdifusi dan karbon dalam baja, yang menyebabkan pembentukan metana. Tingkat keparahan serangan hidrogen meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur dan tekanan.

6.7 Bahaya kesehatan

6.7.1 Cold burns

Kontak langsung kulit dengan gas dingin, hidrogen cair, atau bagian metal yang didinginkan oleh gas dingin dan hidrogen cair, dapat menyebabkan mati rasa, warna keputihan pada kulit, atau *frost bite*. Pertimbangan tambahan adalah bahwa paparan yang terlalu lama pada seluruh tubuh terhadap temperatur dingin dapat menyebabkan hipotermia. Personel sebaiknya tidak menyentuh bagian metal yang dingin dan mereka sebaiknya mengenakan pakaian pelindung.

6.7.2 Luka bakar temperatur tinggi

Kontak langsung dengan hidrogen yang terbakar atau gas panas pasca nyala api yang dihasilkan dari pembakaran hidrogen akan menyebabkan luka bakar yang parah. Temperatur nyala api dari campuran hidrogen/udara stoikiometri adalah sekitar 2.300 K, serupa dengan temperatur nyala api lainnya. Api hidrogen di udara sulit dilihat di siang hari. Karena rendahnya perpindahan kalor radiatif api hidrogen, personel yang berada di dekat api hidrogen mungkin tidak merasakan kedekatan api tersebut.

6.7.3 Asfiksia

Hidrogen tidak beracun, tetapi juga tidak mendukung metabolisme. Sebagaimana gas lainnya (kecuali oksigen), risiko asfiksia ada terutama di area tertutup akibat penipisan oksigen.

Penghirupan asap, salah satu penyebab utama cedera dan konsekuensi utama dari api, dianggap tidak terlalu serius dalam kasus hidrogen, karena satu-satunya produk pembakaran adalah uap air. Namun, kebakaran sekunder dapat menghasilkan asap atau produk pembakaran lainnya yang dapat membahayakan kesehatan.

6.8 Pendekatan tim dan pendidikan atau pelatihan yang diperlukan untuk penggunaan hidrogen yang aman

Penyebab utama kecelakaan pada sistem hidrogen adalah karena kesalahan manusia (lihat 7.1.2). Dasar kecelakaan dan tingkat konsekuensinya tidak hanya terletak pada operator langsung sistem, tetapi mungkin sebagian disebabkan oleh bagaimana hidrogen dan aplikasi khususnya dilihat oleh semua personel dalam suatu organisasi. Batasan pada rancangan sistem khusus untuk hidrogen, persyaratan operasi dan pemeliharannya, dan potensi paparan personel dan masyarakat umum terhadap bahaya sebaiknya dipahami dengan tepat

oleh semua pihak.

Penanganan hidrogen dan sistem hidrogen yang aman merupakan upaya tim yang membutuhkan komunikasi, pelatihan, dan kontrol organisasi yang efektif. Individu di semua tingkatan sebaiknya menerima pelatihan yang sesuai dengan keterlibatan dan tanggung jawab mereka. Ketika hidrogen dalam jumlah besar ditangani, mungkin perlu mengoordinasikan aktivitas dengan masyarakat sekitar, termasuk petugas pemadam kebakaran dan perencana tanggap darurat masyarakat. Upaya-upaya yang diambil oleh organisasi yang cermat dijelaskan dalam Pasal 7.

7 Mitigasi dan kontrol terhadap bahaya dan risiko

7.1 Mitigasi dan kontrol bahaya serta risiko secara umum

7.1.1 Umum

Ada beberapa prinsip umum, panduan, dan praktik yang direkomendasikan yang penting untuk penggunaan hidrogen yang aman. Meskipun ada banyak aplikasi hidrogen yang berbeda, prioritas dapat dilihat dalam penerapan prinsip-prinsip umum ini berdasarkan pengalaman dan pelajaran yang dipetik dari insiden yang melibatkan hidrogen yang dijelaskan dalam 7.1.2. Perspektif tentang bagaimana pemahaman tentang bahaya hidrogen dapat didekati disediakan dalam 7.1.3 dan pedoman umum tentang cara meminimalkan bahaya disediakan dalam 7.1.4. Informasi yang lebih spesifik telah disusun ke dalam beberapa bagian yang mencakup rancangan sistem hidrogen, kemudahan terbakar, deteksi, fasilitas, operasi, dan rekomendasi untuk organisasi.

Sejauh mana prinsip-prinsip ini sebaiknya diterapkan akan bervariasi sesuai dengan kebutuhan. Sistem hidrogen yang dikembangkan untuk digunakan oleh publik sebaiknya memiliki fitur rancangan yang melekat yang mendorong keselamatan dengan persyaratan minimum untuk pengawasan dan pelatihan. Sistem hidrogen yang digunakan dalam pengaturan industri mungkin memerlukan semua pertimbangan yang disajikan.

Dikarenakan pengoperasian sistem hidrogen dapat melibatkan banyak orang, upaya ini sebaiknya dianggap sebagai upaya tim. Siapa pun yang terlibat dalam penggunaan hidrogen sebaiknya memahami sifat-sifat hidrogen yang berhubungan dengan keselamatan dan bahaya yang terkait dengan sifat-sifat tersebut.

7.1.2 Pelajaran yang dipetik dari pengalaman masa lalu

Pelajaran yang dipetik dari pengalaman masa lalu memberikan wawasan berharga tentang prioritas yang sebaiknya ditetapkan untuk penerapan praktik dan pedoman yang direkomendasikan. Sebuah studi tentang kecelakaan yang melibatkan hidrogen (lihat Referensi [4] dalam bibliografi) mengidentifikasi dan mengategorikan faktor-faktor penyebab. Ringkasan hasil studi tersebut disajikan di bawah ini dengan asesmen persentase yang terlibat. Lebih dari satu faktor mungkin terlibat dalam beberapa kecelakaan, akibatnya persentase yang ditunjukkan untuk kategori-kategori ini berjumlah lebih dari 100%.

Beberapa kategori berdasarkan kesalahan manusia telah diidentifikasi. Kekurangan operasional dan area kerja ditemukan bertanggung jawab atas 26% kecelakaan. Kecelakaan ini disebabkan oleh kondisi kerja yang tidak memadai selama instalasi, pemeliharaan, fabrikasi, dan pembersihan; dan kurangnya pelatihan, instruksi khusus, atau keduanya. Kekurangan prosedural ditemukan bertanggung jawab atas 25% kecelakaan. Kategori ini mencakup kegagalan untuk mengikuti prosedur yang telah ditetapkan, atau menyiapkan prosedur yang tepat. Kekurangan rancangan ditemukan bertanggung jawab atas 22%

kecelakaan. Di sini, rancangan komponen atau sistem yang tidak memadai, termasuk kegagalan dalam menentukan perangkat keselamatan dan pengabaian atas informasi penting lainnya, kegagalan dalam menentukan tegangan dan lelah, kesalahan dalam pemilihan material (seperti kesalahan administratif dalam gambar dan spesifikasi) dijelaskan sebagai penyebabnya. Kekurangan perencanaan yang diidentifikasi sebagai perencanaan terbatas, seperti kegagalan dalam menyiapkan rencana pengujian atau menyiapkan studi bahaya, bertanggung jawab atas 14% kecelakaan.

Kategori lain yang diidentifikasi termasuk malafungsi, kegagalan material, inkompatibilitas material, dan kontaminasi. Malafungsi, didefinisikan sebagai anomali yang terjadi, seperti komponen dalam sistem yang gagal berfungsi sebagaimana mestinya, bertanggung jawab atas 8 % kecelakaan. Kegagalan material, bertanggung jawab atas 3% kecelakaan, termasuk kegagalan material dan komponen sebagai akibat dari tegangan yang telah dipertimbangkan dalam batasan rancangan. Inkompatibilitas material, seperti material yang tidak cocok baik yang disatukan secara tidak disengaja atau dirancang ke dalam sistem, bertanggung jawab atas 3% kecelakaan. Penggunaan material terkontaminasi bertanggung jawab atas 1 % kecelakaan.

Empat kategori pertama menyumbang atas 87% dari kecelakaan. Dari jumlah tersebut, kategori pertama dan kedua menyumbang atas 51% dan melibatkan prosedur operasional. Kategori ketiga dan keempat menyumbang atas 36% dan melibatkan rancangan dan perencanaan. Dengan demikian, keempat kategori ini menyumbang sebagian besar kecelakaan dan melibatkan kesalahan manusia. Meskipun tidak ditunjukkan pada angka di atas, katup terlibat dalam 20% kecelakaan, dan sistem terkontaminasi dengan udara terlibat dalam 21% kecelakaan.

Statistik di atas menunjukkan dua tujuan utama dalam perancangan dan pengoperasian sebuah sistem hidrogen:

- meminimalkan probabilitas terjadinya kesalahan manusia;
- memiliki sistem yang mampu tetap aman jika ada kesalahan manusia.

Pengalaman terbaru tentang kecelakaan dan insiden hidrogen telah dikompilasi dalam basis data yang dapat diakses melalui internet. Yang paling penting di antaranya adalah *Hydrogen Incident and Accident Database (HIAD)* oleh HySafe dan *h2incidents.org* oleh US DoE.

7.1.3 Mengatasi bahaya

Langkah pertama adalah mengidentifikasi adanya bahaya dan konsekuensi yang mungkin ditimbulkannya. Berbagai pilihan yang tersedia untuk mengatasinya: mengeliminasi, mencegah, menghindari, memitigasi, atau menerima. Contoh-contoh dari setiap pilihan diberikan di bawah ini.

Pilihan yang lebih disukai untuk menangani suatu bahaya adalah mengeliminasinya. Pilihan ini dapat diilustrasikan dengan memilih untuk menggunakan gas inert bila memungkinkan.

Jika suatu bahaya tidak dapat dieliminasi, maka mungkin bahaya tersebut dapat dikurangi. Penggunaan material yang tidak rentan terhadap getas akibat hidrogen, misalnya, akan mengurangi bahaya getas akibat hidrogen. Dalam contoh ini, dibandingkan dengan contoh di atas, hidrogen masih digunakan, tetapi material yang rentan terhadap getas tidak digunakan.

Pilihan yang tersedia jika suatu bahaya tidak dapat dieliminasi atau dicegah adalah menghindari bahaya tersebut sebisa mungkin. Misalnya, batasi paparan orang terhadap bahaya baik dengan membatasi waktu paparan dan jumlah orang yang akan terpapar.

Pilihan yang sering kali menjadi satu-satunya pilihan yang praktis adalah dengan memitigasi bahaya. Hal ini melibatkan pengendalian elemen-elemen bahaya termasuk konsekuensinya, bukan mengeliminasi, mencegah, atau menghindarinya. Hal ini dapat dilakukan, misalnya, membatasi tekanan atau laju aliran yang digunakan dalam operasi.

Jika konsekuensi dari suatu bahaya tidak signifikan atau dapat ditoleransi, maka pilihan yang tersedia adalah menerima bahaya tersebut. Pilihan ini biasanya melibatkan pemeriksaan yang cermat terhadap bahaya dan konsekuensinya untuk menjustifikasi keputusan bahwa bahaya tersebut dapat diterima.

7.1.4 Meminimalkan tingkat keparahan konsekuensi dari bahaya

Prinsip penting yang mendasari penggunaan hidrogen yang aman adalah mencari rancangan dan operasi yang meminimalkan tingkat keparahan konsekuensi dari kecelakaan yang potensial. Hal ini dapat dicapai dengan beberapa cara, seperti berikut ini (perhatikan bahwa tidak semua upaya ini diperlukan untuk semua aplikasi hidrogen):

- meminimalkan jumlah hidrogen yang disimpan dan terlibat dalam suatu operasi;
- meminimalkan diameter pipa dan tekanan operasional untuk memenuhi persyaratan teknologi untuk laju aliran massa bila sesuai;
- mengisolasi hidrogen dari oksidator, bahan berbahaya, dan peralatan berbahaya;
- mengidentifikasi dan, bila memungkinkan, memisahkan atau mengeliminasi sumber penyulut yang potensial;
- memisahkan orang dan fasilitas dari efek potensial dari pelepasan yang tidak tersulut, kebakaran, deflagrasi, atau detonasi yang berasal dari kegagalan peralatan atau sistem penyimpanan;
- meninggikan sistem hidrogen dan melepaskannya di atas fasilitas lain;
- mencegah campuran hidrogen/oksidator terakumulasi di ruang terbatas (di bawah langit-langit atap, di dalam pondok atau kabinet peralatan, maupun di dalam penutup peralatan atau selubung);
- meminimalkan paparan personel dengan membatasi jumlah orang yang terpapar, waktu paparan personel;
- menggunakan alarm dan perangkat peringatan (termasuk detektor hidrogen dan api), dan kontrol area di sekitar sistem hidrogen;
- menggunakan alat pelindung diri;
- mempraktikkan *housekeeping* yang baik, seperti menjaga akses dan rute evakuasi tetap steril dan menjauhkan *weeds* dan reruntuhan lainnya dari sistem hidrogen;
- mematuhi persyaratan operasional yang aman, seperti bekerja secara berpasangan ketika mengoperasikan dalam situasi berbahaya.

7.2 Mitigasi bahaya dan risiko rancangan

7.2.1 Rancangan yang secara inheren lebih aman

Sebagaimana semua pembawa energi memiliki bahaya inheren (bahaya yang merupakan bagian dari sifat dasar pembawa energi tersebut), sistem atau fasilitas hidrogen sebaiknya memiliki fitur keselamatan yang inheren (keselamatan adalah karakteristik penting yang harus ada di dalamnya). Fitur keselamatan inheren yang umum termasuk rancangan *fail-safe*, operasi keselamatan otomatis dan pasif, *caution devices*, dan *warning devices*.

Rancangan *fail-safe* melibatkan upaya-upaya seperti fitur keselamatan yang berulang (misalnya perangkat pelepas tekanan), cadangan komponen dan sistem kritis, posisi *fail-safe*

untuk katup dan komponen serupa (misalnya katup sebaiknya secara otomatis berubah ke posisi aman ketika terjadi kegagalan daya); dan toleransi terhadap kegagalan tunggal atau ganda sesuai kebutuhan, tergantung pada konsekuensi bahayanya.

Rancangan keselamatan otomatis mencakup fitur-fitur seperti pemantauan jarak jauh terhadap informasi kritis, pengoperasian jarak jauh, dan pembatasan otomatis kondisi pengoperasian (misalnya tekanan atau laju alir) atau pengoperasian otomatis peralatan yang sesuai jika terdeteksi adanya hidrogen. Ini akan mencakup operasi seperti: menutup katup pemutus, menyalakan atau mematikan ventilasi sesuai kebutuhan, dan memulai operasi penghentian yang sesuai.

Sistem hidrogen sebaiknya menyertakan *caution devices* dan *warning devices* yang diperlukan untuk memperingatkan personel jika terjadi kondisi abnormal, malfungsi, atau kegagalan. Perangkat semacam itu sebaiknya memberikan waktu yang cukup bagi personel untuk merespons kejadian tersebut. Sebagai bagian dari pertimbangan ini, ketahanan api dari komponen utama seperti bejana penyimpanan sebaiknya diketahui dan tersedia untuk menyiapkan rencana keselamatan untuk mengelola insiden atau kecelakaan potensial.

7.2.2 Pertimbangan dalam pemilihan material konstruksi yang sesuai

7.2.2.1 Umum

Material yang sesuai sebaiknya digunakan untuk layanan hidrogen dan kondisi yang memungkinkan terpapar hidrogen. Material yang kontak dengan material lain sebaiknya kompatibel satu sama lain, serta kompatibel dengan hidrogen dan kondisi penggunaan.

Pertimbangan material untuk sistem hidrogen akan melibatkan metal dan non-metal (seperti polimer dan komposit). Beberapa pertimbangan yang terlibat dalam memilih material meliputi: efek temperatur, efek penggetasan oleh hidrogen, permeabilitas dan porositas, dan kompatibilitas metal yang berbeda ketika digunakan bersama.

7.2.2.2 Pertimbangan rancangan temperatur rendah

Sifat ketahanan temperatur rendah dari material metal dipengaruhi erat oleh struktur kisiannya. Metal dan aloi dengan struktur *face-centred cubic*, seperti baja austenit dan banyak aloi aluminium, tembaga, dan nikel, hanya menunjukkan penurunan moderat dari ketahanannya pada temperatur kriogenik (jika ada). Material komposit yang diperkuat serat (*fibre-reinforced*) dan struktur laminasi yang menggunakan kaca, poliamida, atau karbon juga dapat digunakan untuk memberikan sifat ketahanan yang memuaskan dalam *cryogenic service*.

Rancangan peralatan untuk temperatur rendah sebaiknya memperhitungkan tegangan yang disebabkan oleh ekspansi atau kontraksi termal pada komponen. Ada perbedaan yang cukup besar dalam kontraksi linear total antara berbagai material, misalnya polimer memiliki kontraksi yang jauh lebih besar daripada metal. Rancangan yang tepat sebaiknya mengakomodasi ekspansi termal dari berbagai material yang terlibat.

Kondensasi dan pepadatan kontaminan di dalam sistem kriogenik atau pada permukaan luar yang dingin dari struktur penahan mungkin tidak dapat diterima untuk kriteria rancangan. Di dalam sistem, kontaminan sebaiknya selalu diminimalkan. Permukaan eksternal dapat diinsulasi menggunakan selubung vakum atau insulator. Perhatian sebaiknya diberikan jika insulator yang terbuat dari busa yang mudah terbakar atau bahan yang mudah terbakar lainnya terpapar langsung ke udara cair yang terkondensasi. Pengayaan oksigen dapat meningkatkan kemudahan terbakar dan bahkan menyebabkan pembentukan senyawa yang peka terhadap guncangan.

Ketika kondisi penggunaan berpotensi terhadap terpaparnya manusia yang tidak terlindungi, insulasi sebaiknya digunakan untuk melindungi dari luka bakar kriogenik (*frost bite*).

7.2.2.3 Penggetasan dan serangan oleh hidrogen

Secara umum, kerentanan terhadap penggetasan oleh hidrogen dapat dikurangi dengan tindakan-tindakan berikut ini:

- membatasi tingkat kekuatan material yang digunakan sesuai batas yang diperlukan;
- menurunkan tingkat tegangan yang diberikan;
- meminimalkan tegangan residu, sebagai contoh, dengan *stress-relieving* setelah pengelasan;
- menormalkan atau melakukan *annealing* sepenuhnya material yang berkaitan dengan *cold-work*;
- menghindari atau meminimalkan deformasi plastis dingin dari operasi seperti *cold bending* atau *cold forming*;
- menghindari situasi yang dapat menyebabkan lelah lokal (*local fatigue*) pada komponen yang sering mengalami siklus pembebanan, karena hidrogen diketahui mempercepat kemungkinan inisiasi dan propagasi retakan lelah (*fatigue cracks*) secara signifikan yang terjadi pada struktur;
- menggunakan *stainless steel* austenit, yang secara umum tidak terlalu rentan terhadap penggetasan oleh hidrogen dan umumnya digunakan sebagai material struktural untuk peralatan hidrogen karena ketahanannya yang sangat baik pada temperatur kriogenik;
- menggunakan metode pengujian yang ditentukan dalam ISO 11114-4 untuk memilih material metal yang tahan terhadap penggetasan oleh hidrogen.

Solusi rekayasa praktis untuk menghindari serangan oleh hidrogen sebaiknya juga dipertimbangkan. Solusi ini melibatkan penggunaan baja aloi rendah yang mengandung penstabil karbida untuk mengurangi reaktivitas karbon dengan hidrogen yang terserap.

7.2.2.4 Material non-metalik

Aplikasi material non-metalik (karet atau plastik) sebagai perekat memiliki sejarah panjang dalam penggunaan pada layanan hidrogen. Polimer biasanya tidak menimbulkan masalah sehubungan dengan hidrogen dalam hal kimia atau fisika (penggetasan seperti pada metal tidak dapat terjadi karena tidak memiliki kisi). Namun, hidrogen dapat berdifusi melalui material tersebut (tanpa merusaknya) jauh lebih mudah daripada melalui metal. Jumlahnya biasanya tidak cukup untuk membuat campuran yang mudah terbakar di luar bejana, tetapi dapat menyebabkan hilangnya gas dalam jangka waktu yang lama, atau dapat merusak vakum insulasi.

Perawatan yang tepat sebaiknya dilakukan dalam pemilihan material organik yang digunakan sebagai perekat untuk layanan hidrogen bertekanan tinggi. Perembesan hidrogen ke dalam material ini dalam jangka waktu yang lama, diikuti dengan penurunan tekanan yang cepat, dapat mengakibatkan kegagalan mekanis atau rusak *seal*.

Polimer yang diperkuat serat (*fibre-reinforced polymers/FRP*) menjadi semakin penting sebagai material untuk bejana bertekanan. *Liner* (umumnya polimer lain, terkadang metal) umumnya ditempatkan di dalam bejana untuk menahan hidrogen sehingga bahan FRP tidak kontak langsung dengan hidrogen. Rincian tentang rancangan silinder diberikan di beberapa bagian dari ISO 11119 untuk aplikasi pengangkutan, ISO 19881 untuk aplikasi *onboard*, dan ISO 19884 untuk aplikasi stasioner. Ketahanan api dari material tersebut mungkin rendah dibandingkan dengan metal, namun harus lulus uji kualifikasi yang sesuai.

7.2.3 Pertimbangan untuk bejana dan komponen

Panduan berikut ini berlaku untuk sistem gas hidrogen dan cair, kecuali hanya salah satu yang ditentukan. Bejana (kontainer) penyimpanan hidrogen sebaiknya:

- dirancang, dibuat, dan diuji sesuai dengan standar dan peraturan bejana bertekanan yang berlaku,
- dibuat dengan material yang sesuai,
- mengurangi laju aliran, tekanan, diameter ke batas minimal yang diperlukan oleh kebutuhan teknologi,
- diinsulasi dengan insulasi termal yang sesuai (terutama kontainer penyimpanan hidrogen cair),
- dilengkapi dengan katup pemutus pada titik pelepasan, sedekat mungkin dengan bejana,
- dilengkapi dengan sistem kontrol tekanan (terutama bejana penyimpanan hidrogen cair),
- dilengkapi dengan sistem ventilasi yang disetujui,
- dilengkapi dengan perangkat pelepas tekanan yang dirancang agar sesuai dengan ketahanan api dari bejana dan untuk mencegah kegagalan struktural selama pelepasan,
- ditempatkan sesuai dengan peraturan yang berlaku, dan
- ditandai dengan jelas dengan nama “Hidrogen/*Hydrogen*” atau “Hidrogen Cair- Gas Mudah Terbakar/*Liquid Hydrogen-Flammable Gas*” untuk kontainer gas atau cairan yang sesuai atau serupa.

Tangki hidrogen cair yang dikosongkan dan dibiarkan kembali ke kondisi lingkungan harus diperiksa untuk mengetahui adanya akumulasi impuritas seperti oksigen dan nitrogen. Hal ini dapat dilakukan sebagai bagian dari praktik pemeliharaan rutin. Campuran partikulat oksigen yang mendekati stoikiometri dalam hidrogen cair berpotensi terdetonasi. Partikel oksigen dalam gas hidrogen kriogenik bahkan dapat terdetonasi. Udara padat dalam sistem perpipaan hidrogen cair dapat menyumbat saluran dan lubang, serta dapat mengganggu pengoperasian katup dan peralatan lainnya. Akumulasi oksigen dalam hidrogen yang tersimpan tidak boleh melebihi 2% fraksi volume ketika campuran mengalami kenaikan temperatur hingga menjadi gas di dalam *confinement*.

7.2.4 Pencegahan tekanan berlebih

Khususnya pada sistem penyimpanan hidrogen cair, terdapat potensi untuk peningkatan tekanan yang dapat melebihi kapabilitas penahanan karena peningkatan volume sebagai akibat dari perubahan fasa cair menjadi gas. Jika hal ini terjadi dengan cara yang tidak terkendali, bahaya ini umumnya diatasi dengan penggunaan perangkat pelepas tekanan.

7.2.5 Pertimbangan untuk perpipaan, sambungan, dan koneksi

Beberapa pertimbangan umum untuk perpipaan gas hidrogen dan hidrogen cair meliputi hal-hal berikut:

- dirancang, dibuat, dan diuji sesuai dengan peraturan serta standar yang berlaku;
- dibuat dengan material yang sesuai;
- memiliki fleksibilitas yang sesuai (seperti *expansion joints*, *loops* dan *offsets*);
- ditempatkan berdasarkan standar yang sesuai;
- tidak ditempatkan di bawah kabel listrik;
- jika jalur dipendam, pertimbangkan efek korosi galvanis; kesulitan dalam melakukan inspeksi visual untuk integritas jalur; kemungkinan kebocoran dapat mengalir ke lokasi tidak terduga, yang mengakibatkan akumulasi dan bahaya ledakan. Pemeriksaan

kebocoran sulit dilakukan pada jalur terpendam, dengan pengecualian teknik peluruhan tekanan;

- korosi galvanis dapat terjadi pada logam yang berbeda, terutama bila terdapat kelembaban, dan sebaiknya juga dipertimbangkan pada sambungan pipa tipe soket. Material yang lebih korosif (kurang mulia) akan lebih mudah terkorosi dan sebaiknya digunakan untuk bagian penerima (*female*);
- menggunakan penyangga, pemandu, dan pengunci yang sesuai;
- menggunakan perangkat pelepas tekanan yang sesuai;
- menginsulasi dengan insulasi termal yang sesuai (terutama perpipaan untuk hidrogen cair dan gas hidrogen dingin);
- memberi label mengenai isi dan arah aliran.

Pengelasan atau pematian adalah metode yang diminati untuk membuat sambungan perpipaan; namun, *flanged*, *threaded*, *socket*, *slip*, atau *fitting* kompresi dapat digunakan tergantung pada kondisi pengoperasian. *Gasket* dan *sealant* ulir cocok untuk layanan hidrogen dalam bentuk gas. Beberapa jenis sambungan, *gasket*, dan perekat tidak cocok untuk digunakan pada temperatur rendah. Sambungan bayonet umumnya digunakan untuk sambungan pada perpipaan hidrogen cair, ketika penyambungan dan pemutusan frekuensi diperlukan (seperti pada saluran pengisian). Jika hal ini tidak memungkinkan, detektor gas hidrogen atau api sebaiknya memantau daerah di sekitar sambungan. Sambungan solder lunak (titik leleh rendah) mungkin tidak cocok untuk aplikasi yang melibatkan tekanan tinggi, temperatur tinggi, atau vibrasi.

Saluran non-metallik dapat berfungsi dengan baik untuk penggunaan jangka pendek, jika tersedia ventilasi yang memadai dan pendeteksian hidrogen.

7.2.6 Pertimbangan pembersihan

Membersihkan sistem hidrogen dan menjaganya tetap bersih sangat penting jika hidrogen dapat membawa jejak material lain ke dalam sistem atau jika kemurnian hidrogen sangat penting untuk reliabilitas sistem.

Dalam kasus ini, sistem, termasuk komponennya, sebaiknya dirancang dan dipasang untuk dapat dibersihkan, dan dijaga kebersihannya secara efektif. Pembersihan yang efektif sebaiknya menghilangkan gemuk, minyak, dan bahan organik lainnya serta partikel kerak, karat, kotoran, *weld splatter*, dan *weld flux*. Kompatibilitas zat pembersih dengan seluruh material konstruksi sebaiknya ditetapkan sebelum digunakan. Metode pembersihan yang umum termasuk pembersihan uap atau air panas, pembersihan kerak secara mekanis, penghilangan gemuk dengan uap, penghilangan gemuk dengan pelarut (pencucian), penghilangan gemuk dengan detergen (pencucian alkali), pembersihan asam (*pickling*), dan pembilasan. Prosedur pembersihan sebaiknya dibuat dan ditinjau untuk efektivitas dan masalah keselamatan.

7.2.7 Pertimbangan komponen

7.2.7.1 Umum

Sistem hidrogen umumnya melibatkan sejumlah besar komponen, seperti katup, perangkat pelepas tekanan, pengatur tekanan, *check valves*, filter, instrumentasi, dan pompa. Komponen-komponen ini merupakan elemen penting dari sistem dan dapat menjadi krusial untuk keselamatan sistem.

Komponen dalam sistem hidrogen, termasuk *soft goods* sepertiudukan dan penyekat,

sebaiknya dibuat dari material yang kompatibel dengan kondisi pengoperasian, seperti temperatur dan tekanan, dan satu sama lain jika melibatkan lebih dari satu material.

7.2.7.2 Perangkat pelepas tekanan

Perangkat pelepas tekanan yang tepat sebaiknya dipasang pada setiap volume yang mengandung hidrogen atau di tempat hidrogen mungkin dapat terperangkap, untuk mencegah tekanan berlebih.

Perangkat pelepas sebaiknya diatur untuk membatasi tekanan sehingga tidak melebihi tekanan kerja maksimum yang diizinkan dari sistem yang dilindungi. Perangkat pelepas sebaiknya dirancang untuk kapasitas aliran yang memadai pada kondisi paling ekstrem yang mungkin dihadapi. Efek yang mungkin terjadi, seperti pendinginan, oleh aliran gas itu sendiri sebaiknya dipertimbangkan. Hidrogen yang dilepaskan dari titik pelepasan (*outlet*) dari alat pelepas sebaiknya tidak mengenai komponen lain atau personel; kemungkinan penyulutan gas sebaiknya dipertimbangkan. Jika beberapa perangkat pelepas diarahkan dan disatukan ke lubang ventilasi yang sama, perhatian sebaiknya diberikan untuk memastikan bahwa pengoperasian satu perangkat tidak membatasi aliran atau memengaruhi tekanan pembukaan perangkat pelepas lainnya. Redundansi dalam jumlah dan jenis perangkat pelepas (seperti katup pelepas dan cakram ruptur) umumnya digunakan.

Katup pemutus sebaiknya tidak dipasang sedemikian rupa sehingga dapat menghalangi jalur antara perangkat pelepas dengan volume yang dilindunginya.

Sistem penyimpanan *onboard* sebaiknya dilengkapi dengan perangkat pelepas tekanan, yang parameternya sebaiknya sesuai dengan rating ketahanan api penyimpanan *onboard*. Jika sistem hidrogen secara keseluruhan berada di dalam *enclosure* lain, *enclosure tersebut* sebaiknya mampu menahan atau melepaskan tekanan berlebih jika terjadi pelepasan yang tidak disengaja.

7.2.7.3 Filter

Filter berguna untuk mengurangi bahaya yang terkait dengan kontaminasi, terutama dari partikel padat, dan dalam sistem hidrogen cair dari partikel padat yang dapat mencakup oksigen, tetapi filter tersebut juga bisa menjadi penghalang aliran. Tujuan utama filter adalah untuk mengumpulkan impuritas dalam sistem hidrogen. Beberapa rekomendasi mengenai filter termasuk yang berikut ini:

- Filter sebaiknya dapat diakses dan mampu diisolasi untuk dibersihkan.
- Filter sebaiknya tidak dibersihkan dengan melakukan pembilasan balik melalui sistem.
- Filter sebaiknya dibersihkan dan diganti secara berkala atau setiap kali penurunan tekanan pada filter mencapai nilai tertentu.
- Jumlah dan lokasi filter sebaiknya ditentukan sesuai kebutuhan untuk meminimalkan impuritas dalam sistem (jalur isi ulang atau suplai ulang adalah lokasi utama untuk filter).

7.2.7.4 Instrumentasi dan kontrol

Instrumentasi menyediakan sarana untuk berkomunikasi dengan proses fisik untuk mendapatkan pengukuran kuantitatif dari perilakunya atau keadaan proses. Kontrol menyediakan sarana untuk mempertahankan atau mengubah perilakunya atau status proses. Hal ini adalah elemen penting dari sistem hidrogen untuk pengoperasian sistem dan untuk keselamatan sistem. Sistem sebaiknya memiliki instrumentasi dan kontrol yang memadai untuk memastikan bahwa operasi berada dalam batasan yang dapat diterima.

7.3 Pencegahan dan mitigasi dari bahaya dan risiko kebakaran serta ledakan

7.3.1 Umum

Campuran hidrogen/udara dan hidrogen/oksigen mudah disulut pada rentang yang luas komposisi campuran, tekanan, dan temperatur. Campuran yang mendekati stoikiometri pada tekanan lingkungan mudah tersulut. Oleh karena itu, perancang, evaluator keselamatan, dan pihak lain sebaiknya mengasumsikan adanya sumber penyulutan, meskipun tindakan ketat untuk menghilangkan sumber penyulutan telah dilakukan.

7.3.2 Pencegahan campuran hidrogen/oksidator yang tidak diinginkan

Pencegahan pembentukan campuran hidrogen/oksidator yang tidak diinginkan dikenal sebagai “proteksi ledakan primer”. Ini adalah bagian penting dari sistem keselamatan apa pun. Hal ini dilakukan dengan memisahkan hidrogen dan oksidator seperti udara. Berikut ini adalah beberapa teknik yang dapat digunakan untuk mencapai tujuan ini.

Pembilasan (*purging*): Sebuah sistem sebaiknya dibilas dengan gas inert, ketika berurusan dengan hidrogen cair maka helium harus digunakan, untuk menghilangkan udara sebelum memasukkan hidrogen ke dalam sistem dan sistem sebaiknya dibilas dari hidrogen sebelum membukanya ke udara.

Sistem bebas kebocoran: Sistem yang mengandung hidrogen sebaiknya diuji kebocorannya dan bebas kebocoran sebelum memasukkan hidrogen. Uji kebocoran secara berkala sebaiknya dilakukan dan setiap kebocoran yang ditemukan sebaiknya diperbaiki.

Pembuangan: Hidrogen yang dilepas ke lingkungan sebaiknya dilakukan melalui sistem ventilasi yang dirancang dan ditempatkan dengan benar.

Ventilasi: Ruang tertutup seperti ruangan atau bangunan tempat hidrogen dapat terakumulasi sebaiknya dilengkapi dengan ventilasi yang memadai untuk mencegah terbentuknya campuran yang mudah terbakar.

Menjaga tekanan positif: Sistem hidrogen, terutama sistem hidrogen cair, sebaiknya dijaga pada tekanan positif untuk mencegah masuknya udara dari bagian luar sistem.

Pemanasan sistem hidrogen cair secara berkala: Bila diperlukan, bejana penyimpanan cairan dapat dihangatkan secara berkala agar impuritas seperti udara dapat diuapkan dan dibilas dari sistem.

Filter: Filter dapat digunakan pada sistem hidrogen cair untuk menangkap impuritas yang dapat berupa udara padat. Filter semacam itu sebaiknya diisolasi, dihangatkan, dan dibilas secara berkala untuk menghilangkan impuritas tersebut.

7.3.3 Penyulutan

7.3.3.1 Sumber penyulutan listrik

Kunci lain untuk mencegah kebakaran, deflagrasi, atau detonasi adalah untuk mengeliminasi sumber penyulutan (“proteksi ledakan sekunder”). Banyak sumber penyulutan listrik, termal, dan mekanis yang memungkinkan. Pada beberapa kasus, misalnya pada pelepasan gas secara tiba-tiba dari sistem bertekanan tinggi, mungkin sulit atau tidak memungkinkan untuk mengetahui dari mana tepatnya energi tersebut berasal.

Fenomena berikut ini harus dipertimbangkan sebagai sumber penyulut listrik yang potensial.

Akumulasi muatan yang menyebabkan pelepasan muatan statis: Muatan statis disebabkan oleh akumulasi elektron pada suatu permukaan dan terjadi berdasarkan konduktivitas listrik dan parameter kekuatan dielektrik material. Laju relatif akumulasi muatan dan disipasi muatan, di dalam fluida yang mengalir, menentukan jumlah akumulasi muatan. Efek ini sangat kecil untuk hidrogen murni yang mengalir, baik sebagai gas maupun cair, namun partikel padat dalam aliran dapat sangat meningkatkan penumpukan muatan listrik. Jenis gas atau partikel yang membeku (oksigen, karbon dioksida, nitrogen, hidrogen, pasir, metal, serpihan oksida dari dinding pipa, dll.) dapat menjadi hal yang penting. Potensi pembangkitan listrik statis dapat menjadi masalah khusus untuk sistem metal hidrida, yang partikel hidrida kecilnya dapat tersuspensi dalam hidrogen yang mengalir. Penggunaan filter non-metallik untuk menjebak partikel dapat meningkatkan masalah dan dapat menghasilkan 10 hingga 200 kali lebih banyak muatan daripada sistem tanpa filter. Luas permukaan filter yang besar memungkinkan muatan statis terakumulasi dengan lebih mudah. Sebagai contoh, gesekan dari satu material yang bergesekan dengan material lain, seperti dengan kain pakaian atau aliran dua fase, dapat menyebabkan akumulasi muatan elektrostatik.

Pelepasan muatan listrik statis: Pelepasan listrik statis dapat menghasilkan temperatur tinggi, sering kali cukup untuk menyebabkan material mencapai temperatur penyulutannya.

Muatan listrik yang dibangkitkan dari pengoperasian peralatan: Peralatan yang dapat menghasilkan muatan listrik termasuk kompresor, generator, kendaraan, dan peralatan konstruksi lainnya.

Busur listrik: Busur listrik dapat memberikan energi untuk menyalakan campuran hidrogen/udara atau hidrogen/oksigen yang mudah terbakar. Sumber normal termasuk sakelar, motor listrik, telepon portabel, penyeranta, dan radio.

Pelepasan petir: Sambaran petir dan potensi medan listrik dapat terjadi selama mendekati dan melewati sistem badai.

Korsleting listrik: Korsleting atau kegagalan peralatan listrik lainnya dapat menghasilkan temperatur permukaan yang tinggi, busur api, dan percikan api.

Metode pentanahan sebaiknya dievaluasi untuk meminimalkan risiko pelepasan muatan listrik statis dan potensi sambaran petir di lingkungan *outdoor*. Material yang dipilih untuk digunakan di lingkungan hidrogen sebaiknya dievaluasi untuk mengetahui kemampuannya dalam melepaskan listrik statis. Material insulasi seperti kayu, kertas, dan beberapa kain umumnya akan membentuk lapisan bersifat konduktif yang dapat mencegah penumpukan listrik statis dengan menyerap air dari udara di lingkungan yang humiditas relatifnya lebih besar dari 50%. Praktik yang direkomendasikan untuk metode pentanahan guna mencegah muatan listrik statis dapat ditemukan dalam berbagai standar nasional dan internasional yang mencakup pemasangan peralatan listrik di lingkungan berbahaya.

Peralatan listrik yang dipilih untuk digunakan pada lingkungan hidrogen juga dapat menjadi sumber percikan api atau pembangkitan panas, dan sebaiknya diperhatikan untuk mengikuti Standar Listrik Nasional dan Internasional yang sesuai untuk pemasangan.

7.3.3.2 Sumber penyulutan mekanis

Fenomena yang perlu dipertimbangkan sebagai sumber penyulutan mekanis yang potensial adalah sebagai berikut:

- benturan dan/atau gesekan mekanis dan lengketnya metal (*galling*);
- fraktur metal;
- getaran mekanis dan pelenturan berulang.

7.3.3.3 Sumber penyulutan termal

Fenomena berikut ini dipertimbangkan sebagai sumber penyulutan termal yang potensial:

- nyala api terbuka dan/atau permukaan yang panas (misalnya pengelasan dan personel yang merokok);
- pembuangan (misalnya mesin pembakaran dan cerobong pembuangan);
- muatan bahan peledak (misalnya muatan yang digunakan dalam piranti konstruksi, kembang api, atau piroteknik)
- katalis dan bahan kimia reaktif: Temperatur tinggi dapat terjadi akibat interaksi hidrogen dengan katalis atau reaktan kimia lainnya. Beberapa aplikasi yang menggunakan bahan tersebut termasuk menggabungkan kembali hidrogen yang dipancarkan dari baterai timbal-asam untuk menghasilkan instrumen pendeteksi air dan hidrogen;
- pemanasan oleh jet berkecepatan tinggi, sebagaimana yang mungkin terjadi akibat pecahnya tangki atau bejana;
- gelombang kejut dan/atau fragmen, sebagaimana yang mungkin terjadi akibat pecahnya tangki atau bejana;
- gelombang akustik dan kejut yang dipantulkan atau diulang yang mungkin terjadi dalam sistem yang mengalir.

7.3.4 Deflagrasi dan detonasi

Potensi deflagrasi dan detonasi sebaiknya dinilai (*assessed*) pada rancangan, fasilitas, dan operasi hidrogen. Strategi untuk meminimalkan potensi pencampuran awal reaktan, untuk percepatan atau detonasi api meliputi hal-hal berikut ini:

- menghindari *confinement* dan penyumbatan ketika campuran hidrogen yang mudah terbakar dapat terbentuk;
- menggunakan penahan api, *orifice* kecil, atau saluran untuk mencegah deflagrasi dan peledakan merambat di dalam sistem;
- menggunakan pengencer, seperti uap air atau CO₂, atau teknik deplesi oksigen jika memungkinkan untuk memperlambat percepatan nyala api;
- mengurangi ukuran sistem jika memungkinkan untuk mempersempit batasan detonasi.

Jika potensi deflagrasi dan detonasi tidak dapat dihilangkan, maka rancangan dan operasi sistem hidrogen sebaiknya mempertimbangkan kemungkinan terjadinya hal tersebut. Ini termasuk rancangan dengan kekuatan yang cukup untuk menahan tekanan tinggi atau operasi jarak jauh untuk melindungi fasilitas dan personel.

7.3.5 Pengayaan oksigen

Ketika hidrogen cair umumnya dipindahkan dalam saluran dengan insulasi vakum, hidrogen dingin yang mengalir melalui tabung yang tidak cukup terisolasi secara termal dapat dengan mudah mendinginkan sistem di bawah 90 K sehingga udara terkondensasi dengan kandungan oksigen hingga 52% tercapai. Kondensat yang diperkaya oksigen ini meningkatkan sifat mudah terbakar material dan membuat material menjadi mudah terbakar yang normalnya tidak. Jika sebuah jalur tidak dapat diisolasi, area di bawahnya sebaiknya bebas dari bahan organik apa pun. Ini termasuk penutup jalan aspal dan material serupa. Hal ini menjadi perhatian khusus ketika memindahkan hidrogen dalam jumlah besar.

7.4 Pertimbangan deteksi

7.4.1 Deteksi gas hidrogen

Karena keterbatasan indera manusia, diperlukan cara lain untuk mendeteksi hidrogen. Berbagai metode dan jenis detektor tersedia secara komersial untuk mendeteksi keberadaan hidrogen. Banyak dari detektor-detektor ini cocok untuk digunakan dalam sistem peringatan dan pengoperasian otomatis. Lihat ISO 26142 untuk rincian mengenai sistem stasioner.

Direkomendasikan agar detektor hidrogen digunakan dimanapun hidrogen digunakan. Kemungkinan sensitivitas silang sebaiknya dipertimbangkan. Beberapa lokasi yang disarankan untuk detektor hidrogen adalah sebagai berikut:

- lokasi kebocoran atau tumpahan hidrogen mungkin terjadi;
- pada sambungan hidrogen yang secara rutin dilepaskan (misalnya porta pengisian ulang bahan bakar hidrogen);
- lokasi-lokasi hidrogen mungkin terakumulasi;
- dalam saluran masuk udara, jika hidrogen dapat terbawa ke dalam bangunan;
- dalam saluran pembuangan, jika hidrogen dapat dilepas di dalam bangunan.

Beberapa faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan sensor hidrogen adalah sebagai berikut:

- akurasi;
- reliabilitas;
- sensitivitas silang;
- kemudahan pemeliharaan;
- kalibrasi;
- *zero drift*;
- batasan deteksi (tinggi dan rendah);
- waktu respons;
- *recovering* atau *non-recovering* seiring waktu;
- teknik aktif atau pasif dengan dan tanpa suplai energi;
- kompatibilitas dengan sistem.

Selain sistem deteksi stasioner, operator sistem hidrogen juga sebaiknya memiliki detektor hidrogen portabel yang dapat digunakan di dalam dan di sekitar sistem hidrogen. Level konsentrasi yang umum digunakan untuk alarm utama adalah 1% hidrogen (fraksi volume) di udara, yang setara dengan sekitar 25% dari ambang batas titik bakar bawah. Level ini umumnya sebaiknya memberikan waktu yang cukup untuk merespons dengan cara yang tepat, seperti mematikan sistem, mengevakuasi personel, atau upaya lain yang diperlukan. Peringatan dapat diberikan lebih awal.

7.4.2 Deteksi kebakaran

Dengan tidak adanya impuritas, nyala api hidrogen/udara nyaris tidak terlihat oleh mata manusia pada siang hari. Selain itu, radiasi nyala api hidrogen juga rendah. Oleh karena itu, nyala api hidrogen sulit dilihat dan radiasinya sulit dirasakan. Sebagai konsekuensi dari dua karakteristik nyala api hidrogen ini, disarankan agar disediakan sarana untuk mendeteksi keberadaan nyala api hidrogen di semua area kebocoran, tumpahan, atau akumulasi hidrogen yang berbahaya dapat terjadi. Berbagai metode dan jenis detektor tersedia untuk mendeteksi nyala api hidrogen.

Beberapa faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan detektor nyala api hidrogen adalah sebagai berikut:

- jarak deteksi dan area yang dicakup;
- kerentanan terhadap alarm palsu dari sumber-sumber seperti matahari, petir, pengelasan, sumber penerangan, dan tumpukan *background flare*;
- waktu respons;
- sensitivitas terhadap spektrum radiasi yang sesuai.

Operator sistem hidrogen sebaiknya memiliki detektor nyala api hidrogen portabel yang tersedia untuk digunakan di dalam dan di sekitar sistem hidrogen. Sapu jerami umum yang direntangkan ke area yang dicurigai terdapat nyala api dapat digunakan sebagai detektor. Peringatan sebaiknya diperhatikan ketika hanya mengandalkan detektor nyala api portabel untuk perlindungan di sekitar fasilitas hidrogen yang besar. Detektor ini mungkin gagal mendeteksi kebocoran hidrogen yang terbakar dalam jumlah besar ditambah dengan aliran angin yang turbulen yang dapat mengimpit personel dan memotong jalur mundur yang aman.

7.5 Pertimbangan untuk fasilitas

7.5.1 Umum

Uji coba fasilitas yang menggunakan hidrogen membutuhkan level pertimbangan yang sama untuk rancangan dan keselamatan seperti halnya rancangan komponen dan sistem hidrogen.

Standar ini membahas upaya-upaya untuk keselamatan teknis fasilitas, bukan keamanan terhadap serangan dari luar.

7.5.2 Lokasi

Menjaga fasilitas atau sistem hidrogen cukup jauh dari manusia dan fasilitas lain dapat meminimalkan efek dari suatu peristiwa seperti kebakaran, deflagrasi, atau detonasi. Jarak pemisahan yang sesuai juga memberikan perlindungan bagi fasilitas hidrogen dari insiden di fasilitas lain di dekatnya. Umumnya, pada rentang tekanan tertentu, semakin besar jumlah hidrogen yang terlibat, semakin besar pula jarak pemisahan yang direkomendasikan. Dalam beberapa keadaan, hidrogen dalam jumlah kecil dapat disimpan dan digunakan di dalam ruangan atau bangunan, tetapi umumnya penyimpanan di *outdoor* direkomendasikan. Jarak pemisahan dapat ditentukan untuk potensi kejadian hidrogen atau untuk potensi kejadian di fasilitas lain, mana saja yang membutuhkan jarak yang lebih besar. Namun, rancangan dan pengoperasian fasilitas yang aman sebaiknya tidak digantikan oleh jarak pemisahan yang lebih lebar.

Beberapa faktor penting dalam menentukan tata letak yang sesuai untuk fasilitas hidrogen meliputi hal-hal berikut ini:

- peristiwa yang paling mungkin terjadi, yang akan melibatkan parameter seperti
 - jumlah hidrogen yang terlibat,
 - tekanan gas,
 - kondisi hidrogen (gas, cair, tekanan, temperatur, dll.),
 - kemungkinan ukuran kebocoran (diameter pipa) dan konsentrasi awan,
 - efek dari kemungkinan migrasi awan yang dapat terbakar sebelum disulut, dan
 - adanya bahan bakar atau oksidator lain;
- perlindungan yang diberikan dengan pelindung, barikade, atau cara lain;
- tipe aktivitas yang terlibat pada fasilitas hidrogen (sebagai contoh, pengujian propulsi).

7.5.3 Area pengecualian

Area dengan ukuran yang sesuai di sekitar fasilitas hidrogen, terutama area penyimpanan hidrogen, sebaiknya dikontrol. Kontrol ini sebaiknya mencakup hal-hal berikut:

- membatasi akses ke personel yang berwenang yang diperlukan, yang sebaiknya memenuhi persyaratan pelatihan yang diperlukan, serta berpakaian dan dilengkapi dengan baik;
- peralatan yang disetujui (memenuhi persyaratan yang ditentukan, seperti mengeliminasi atau mengontrol sumber penyulutan, nilai ketahanan api, dll.);
- operasi yang disetujui (yang konsisten dengan persyaratan keselamatan personel dan mengurangi risiko terhadap fasilitas yang berdekatan);
- menyediakan rambu-rambu di area terkontrol dengan peringatan yang sesuai sehingga personel menyadari potensi bahaya di area;
- mempertimbangkan penggunaan pagar yang tepat untuk mengontrol akses ke area-area kritis.

Metode untuk melacak personel yang masuk dan keluar dari area terkontrol juga sebaiknya dipertimbangkan. Hal ini akan membatasi jumlah personel yang berada di dalam area pengecualian pada waktu yang sama.

7.5.4 Barikade pelindung

Jika ada kemungkinan tertentu yang tidak akan hilang untuk ledakan bagian sistem hidrogen, barikade dapat digunakan untuk melindungi fasilitas lain di dekatnya dari serpihan dan pecahan yang dapat diakibatkan oleh ledakan di fasilitas hidrogen. Hal yang sama berlaku jika potensi ledakan sistem di lingkungan sekitar membuatnya perlu untuk melindungi fasilitas hidrogen. Gundukan tanah dan alas ledakan adalah jenis barikade yang umum. Barikade juga dapat mencakup penghalang fisik untuk melindungi fasilitas atau sistem hidrogen dari kendaraan bermotor.

Barikade atau perangkat penahan lainnya di sekitar fasilitas atau sistem hidrogen sebaiknya hanya digunakan dengan sangat hati-hati, karena meningkatnya kemungkinan terjadinya pencampuran awal yang menyebabkan peningkatan efek detonasi yang terkait dengan *confinement*.

Barikade juga dapat mencakup penghalang fisik untuk melindungi fasilitas atau sistem hidrogen dari kendaraan bermotor.

7.5.5 Peralatan kontrol keselamatan

Fasilitas atau sistem hidrogen sebaiknya dilengkapi dengan berbagai peralatan kontrol keselamatan, seperti berikut ini.

Sistem peringatan: Sistem peringatan sebaiknya dipasang untuk mendeteksi kondisi abnormal, malafungsi, dan untuk mengindikasikan kegagalan yang baru terjadi. Transmisi data sistem peringatan dengan sinyal terlihat dan terdengar sebaiknya memiliki redundansi yang cukup untuk mencegah kegagalan satu titik yang dapat menonaktifkan sistem.

Kontrol aliran: Katup pengaman dan perangkat pengatur aliran sebaiknya dipasang untuk merespons secara memadai demi melindungi personel dan peralatan selama penyimpanan, penanganan, dan penggunaan hidrogen.

Fitur keselamatan: Fitur keselamatan sistem dan peralatan sebaiknya dipasang untuk secara otomatis mengontrol peralatan yang diperlukan untuk mengurangi bahaya yang disarankan

oleh sistem perhatian (*caution*) dan peringatan (*warning*). Kontrol manual dalam sistem sebaiknya dibatasi oleh perangkat pembatas otomatis untuk mencegah jangkauan yang berlebihan.

Setiap instrumentasi, perangkat lunak, dan komputer yang digunakan untuk kontrol keselamatan sebaiknya:

- independen pada peralatan serupa untuk operasi normal, dan
- memiliki redundansi yang memadai untuk mencegah kegagalan satu titik mana pun yang dapat menonaktifkan peralatan.

Sub-sistem gas inert diperlukan jika operasi pembersihan diperkirakan akan dilakukan. Peralatan hidrogen sebaiknya dibilas dengan gas inert sebelum dan sesudah menggunakan hidrogen di dalam peralatan. Udara dalam sistem sebaiknya dibilas dengan gas inert sebelum memasukkan hidrogen ke dalamnya, dan hidrogen sebaiknya dibilas dari sistem dengan gas inert sebelum membuka sistem dan memasukkan udara. Perhatian sebaiknya diberikan jika karbon dioksida digunakan sebagai gas pembilas. Mungkin sulit untuk menghilangkan semua karbon dioksida dari titik rendah sistem pada tempat gas dapat terakumulasi.

Teknik pembilasan yang umum dilakukan adalah sebagai berikut:

- evakuasi dan penggantian gas isi (*backfill*)
- pemberian tekanan dan pelepasan;
- *flow-through*.

Pemilihan teknik pembilasan yang tepat memerlukan evaluasi peralatan yang akan dibilas. Parameter pembilasan yang penting meliputi laju aliran, durasi, pencampuran, dan pengenceran. Sub-sistem gas inert sebaiknya dilindungi dengan cara yang sesuai terhadap kontaminasi hidrogen.

7.5.6 Pembuangan hidrogen

Hidrogen sebaiknya selalu dibuang sesuai dengan metode yang disetujui. Pembuangan hidrogen yang disengaja umumnya dilakukan dengan melepaskan ke lingkungan sekitar melalui ventilasi (ketika hidrogen tidak dibakar) atau sistem *flare* (bila hidrogen dinyalakan pada titik pelepasan dan dibakar). Titik pelepasan untuk ventilasi sebaiknya berada di atas titik tertinggi pada lingkungan sekitar dan jauh dari jalur listrik atau sumber penyulut potensial lainnya. Pembakaran lebih dipilih untuk gas hidrogen dalam jumlah yang lebih besar. Kondisi spesifik lokasi dan laju pelepasan hidrogen adalah dua faktor yang terlibat dalam menentukan sistem yang sesuai. Penyulut campuran gas *pre-mixed* sebaiknya dihindari.

Faktor-faktor pembuangan yang sebaiknya dipertimbangkan adalah sebagai berikut:

- jumlah dan konsentrasi hidrogen yang mungkin ada pada awan yang dapat terbakar;
- seberapa jauh awan yang dapat terbakar menyebar;
- radiasi termal dari nyala api (dari sistem *flare* atau sistem ventilasi api);
- kondisi lokasi seperti ukuran area pengecualian, lokasi bangunan, kontrol personel, dan cuaca.

Aliran balik dari udara ke dalam sistem ventilasi sebaiknya dicegah. Air sebaiknya tidak pernah disemprotkan sehingga dapat masuk ke dalam sistem ventilasi hidrogen cair yang cukup dingin untuk membekukan air, karena es dapat menyumbat sistem ventilasi. Mungkin berguna untuk menambahkan gas inert ke ventilasi untuk membatasi masuknya udara saat hidrogen tidak mengalir.

Hidrogen yang dilepaskan dari sistem ventilasi sering kali tersulut oleh petir atau mekanisme lain, menghasilkan nyala api yang sulit dideteksi secara visual. Ukuran nyala api adalah fungsi dari hasil kali laju aliran massa hidrogen dan diameter kebocoran.

Radiasi termal dari sistem *flare* sebaiknya dievaluasi dan jarak pemisahan yang sesuai diterapkan untuk melindungi personel. Efek angin sebaiknya diperhitungkan.

Ventilasi di atap sebaiknya ditempatkan sedemikian rupa sehingga hidrogen tidak masuk ke saluran masuk udara gedung. Proteksi petir sebaiknya disediakan.

Ventilasi hidrogen basah mungkin perlu untuk mempertimbangkan proteksi pembekuan.

7.5.7 Bangunan

Rancangan bangunan dan ruangan tempat hidrogen disimpan atau digunakan sebaiknya memperhatikan masalah keselamatan seperti berikut ini, untuk meminimalkan bahaya hidrogen:

- penggunaan material yang tidak mudah terbakar;
- tidak ada ruang untuk hidrogen dapat terakumulasi;
- meminimalkan sumber penyulutan;
- sistem pelepasan tekanan untuk mengurangi deflagrasi dengan teknik pelepasan;
- ventilasi yang memadai;
- penggunaan detektor hidrogen yang tepat.

7.5.8 Ventilasi

Pertimbangan untuk ventilasi sebaiknya secara tepat memperhatikan skenario

- keberadaan hidrogen di dalam ruang terbatas, dan
- migrasi hidrogen ke dalam ruang terbatas dari sumber di luar ruang terbatas.

Dalam skenario pertama, sistem ventilasi sebaiknya menghilangkan hidrogen dari ruang terbatas atau setidaknya menjaga konsentrasinya di bawah ambang batas titik bakar bawah (ambang batas titik bakar adalah fungsi dari tekanan dan temperatur yang akan menyimpang dari yang diperoleh dalam kondisi sekitar). Dalam skenario kedua, sistem ventilasi sebaiknya tidak memasukkan hidrogen ke dalam ruang terbatas, kecuali jika *shut down*.

Kebocoran atau tumpahan hidrogen di ruang terbatas yang tidak berventilasi dapat dengan mudah membentuk campuran gas yang dapat tersulut. Oleh karena itu, ruang terbatas yang berisi peralatan untuk menangani atau menyimpan hidrogen sebaiknya selalu memiliki sistem ventilasi aktif atau pasif. Ruang terbatas sebaiknya memiliki detektor hidrogen untuk mendeteksi keberadaan hidrogen dan untuk menghindari penumpukan campuran yang mudah terbakar.

Berikut ini adalah beberapa pertimbangan lain untuk sistem ventilasi.

- Bergantung pada konfigurasi geometris dan jumlah ventilasi alami (atau bukan paksa), ventilasi mekanis (atau paksa) dapat saling bertautan dengan deteksi hidrogen atau ditetapkan sebelum hidrogen dimasukkan ke dalam ruang terbatas dan terus berlanjut hingga hidrogen dibuang dari ruang terbatas.
- Ventilasi sebaiknya tidak dimatikan sebagai fungsi dari prosedur *shut down* darurat kecuali jika sumber hidrogen berada di luar ruang terbatas.

- Langit-langit gantung dan kantung terbalik pada ruang terbatas sebaiknya dihindari atau ventilasi yang memadai dari ruang ini sebaiknya dipastikan.
- Peralatan elektris dalam sistem ventilasi sebaiknya memenuhi ketentuan yang sesuai untuk pengoperasian di lingkungan yang mudah terbakar.
- Rancangan ventilator sebaiknya sedemikian rupa sehingga bahkan jika terjadi kegagalan, ventilator tidak dapat menghasilkan percikan api mekanis akibat pergerakan komponen yang relatif satu sama lain.

7.5.9 Komponen elektris

Pertimbangan yang cermat sebaiknya diberikan pada peralatan elektris atau kabel yang berada di dekat lokasi yang campuran hidrogen/udara yang dapat tersulut dapat ada pada situasi-situasi berikut:

- dalam kondisi pengoperasian normal (sebagai contoh, porta pengisian);
- karena seringnya perbaikan, operasi pemeliharaan, atau kebocoran;
- karena pelepasan hidrogen sebagai akibat dari kerusakan, atau kesalahan pengoperasian peralatan, atau proses yang juga dapat menyebabkan kegagalan peralatan elektris secara bersamaan.

Dalam kondisi-kondisi ini, peralatan elektris dan kabel sebaiknya

- disetujui untuk digunakan pada lingkungan hidrogen,
- secara intrinsik aman untuk digunakan dalam lingkungan hidrogen, atau
- ditempatkan di dalam *enclosure* yang telah disetujui yang dibilas menggunakan gas inert.

Peralatan tahan ledakan sebaiknya digunakan di semua lokasi yang dijelaskan di atas kecuali jika dapat ditunjukkan bahwa peralatan tersebut tidak diperlukan.

Peralatan elektris dan kabel yang terletak di dekat lokasi seperti yang dijelaskan di atas atau ke bejana penyimpanan hidrogen sebaiknya juga dipertimbangkan dengan cermat, tetapi persyaratannya agak kurang ketat dibandingkan dengan lokasi yang lebih dekat yang dijelaskan di atas.

Proteksi petir sebaiknya disediakan untuk peralatan hidrogen.

Peralatan hidrogen sebaiknya secara elektris di-*bonding*, terutama pada sambungan dengan segel polimer, dan ditanahkan. Peralatan hidrogen yang mudah berpindah sebaiknya ditanahkan secara elektris sebelum disambungkan ke peralatan hidrogen lainnya. Pembangkitan muatan statis dan percikan api sebaiknya dihindari.

7.5.10 Alarm dan perangkat peringatan

Sistem peringatan sebaiknya dipasang untuk memberikan alarm jika terjadi situasi yang berpotensi berbahaya, dengan waktu yang cukup untuk memungkinkan penghentian sistem hidrogen yang aman dan evakuasi orang jika diperlukan. Situasi berbahaya tidak terbatas pada lepasnya gas yang mudah terbakar.

Sistem peringatan sebaiknya menyediakan alarm yang dapat didengar atau dilihat, atau keduanya.

Beberapa kondisi sistem alarm/peringatan adalah sebagai berikut:

- tekanan (tinggi atau rendah, sesuai kebutuhan);
- hidrogen pada jalur masuk ventilasi bangunan;

- padamnya suar;
- hilangnya insulasi vakum;
- posisi katup (terbuka atau tertutup, sesuai kebutuhan);
- kecepatan pompa (tinggi atau rendah, sesuai kebutuhan);
- tekanan diferensial filter;
- kebocoran hidrogen;
- kebakaran.

Sistem mana yang akan digunakan sebaiknya ditentukan berdasarkan kondisi di lokasi.

7.5.11 Proteksi kebakaran dan pemadaman kebakaran

Subsistem proteksi kebakaran sebaiknya dipertimbangkan untuk fasilitas atau sistem hidrogen. Upaya-upaya proteksi kebakaran dapat mencakup hal-hal berikut ini:

- sistem penghentian proses (otomatis dan/atau manual);
- sistem penyemprotan;
- sistem *deluge*;
- sistem pemadaman dengan bahan kimia kering.

Kebakaran kecil dapat dipadamkan dengan alat pemadam berbahan kimia kering, alat pemadam karbon dioksida, nitrogen, atau uap air.

Normalnya, kebakaran hidrogen tidak boleh dipadamkan hingga sumber hidrogen telah diisolasi, karena bahaya penyulutan awan campuran yang dapat terbakar *pre-mixed* yang dapat berkembang dari hidrogen yang tidak terbakar.

Jika memungkinkan, komponen sistem di sekitar nyala api dapat didinginkan dengan air untuk mencegah kerusakan mekanis akibat penurunan kekuatan pada temperatur yang meningkat.

7.6 Pertimbangan untuk operasi

7.6.1 Umum

Fasilitas atau sistem hidrogen umumnya melibatkan sejumlah operasi yang dilakukan selama fungsi normalnya. Operasi ini tidak hanya melibatkan peralatan dan komponen sistem, tetapi juga personel yang melakukan operasi, peralatan khusus yang diperlukan untuk melakukan operasi, dan alat pelindung diri yang diperlukan untuk melindungi personel yang melakukan operasi. Perilaku berbahaya seperti merokok sebaiknya tidak diperbolehkan. Selain operasi normal yang terkait dengan fasilitas atau sistem hidrogen, ada operasi darurat yang mungkin diperlukan jika terjadi kegagalan atau kecelakaan.

7.6.2 Prosedur pengoperasian

Prosedur dan daftar periksa yang telah disetujui sebaiknya diikuti dalam semua operasi yang melibatkan sistem hidrogen. Prosedur dan daftar periksa sebaiknya dikembangkan oleh personel yang memiliki pengetahuan, ditinjau dan disetujui oleh personel yang sesuai sebelum digunakan. Prosedur dan daftar periksa adalah elemen penting dalam pengoperasian sistem hidrogen yang aman. Standar-standar ini sebaiknya memberikan informasi yang mencakup instruksi tentang langkah-langkah yang perlu diambil jika terjadi kebocoran atau kejadian abnormal lainnya, dan cara menggunakan peralatan khusus (seperti alat pelindung diri dan peralatan pemantauan). Prosedur dan daftar periksa sebaiknya ditinjau secara berkala untuk memverifikasi efektivitasnya.

Prosedur sebaiknya dibuat untuk operasi-operasi berikut ini: pembersihan, pendinginan, pengoperasian, pembilasan, penyimpanan (terutama pengisian), pemindahan hidrogen, pemeriksaan kebocoran, modifikasi, perbaikan, pemeliharaan, dan penonaktifan.

Prosedur sebaiknya mudah diakses oleh semua orang yang mungkin memerlukannya. Disarankan untuk memasang versi terbaru di ruangan tempat pekerjaan dilakukan.

7.6.3 Alat pelindung diri

Personel yang melakukan operasi di fasilitas atau sistem hidrogen dapat mengurangi kemungkinan konsekuensi bahaya dengan menggunakan peralatan pelindung yang sesuai. Personel sebaiknya terlindungi dari kondisi-kondisi berikut: paparan temperatur kriogenik, temperatur nyala api, radiasi termal dari nyala api hidrogen, dan kekurangan oksigen dalam lingkungan hidrogen atau gas bilas inert seperti nitrogen dan helium. Sifat pekerjaan menentukan jenis yang sebaiknya digunakan.

Prosedur yang ditetapkan untuk operasi yang melibatkan hidrogen sebaiknya menjelaskan alat pelindung diri (APD) yang diperlukan untuk operasi yang akan dilakukan. Beberapa panduan umum untuk APD yang sebaiknya dipertimbangkan untuk digunakan saat bekerja dengan hidrogen dirangkum di bawah ini. Panduan ini tidak membahas APD yang sebaiknya dipertimbangkan ketika terlibat dalam kegiatan lain seperti bekerja pada sirkuit listrik atau melakukan operasi pembersihan atau dekontaminasi.

Bagian APD yang diperlukan atau wajib harus dipilih berdasarkan kondisi di lokasi. Berikut ini beberapa rekomendasi spesifik untuk APD sehubungan dengan sistem hidrogen.

- Pelindung mata sebaiknya dikenakan jika sesuai (misalnya, pelindung wajah lengkap sebaiknya dikenakan ketika menghubungkan atau memutus sambungan saluran atau komponen atau kacamata selama menangani cairan kriogenik).
- Sarung tangan yang diinsulasi dengan benar sebaiknya dikenakan ketika menangani apa pun yang bersentuhan dengan hidrogen cair atau gas hidrogen dingin. Sarung tangan sebaiknya longgar, mudah dilepas, dan tidak memiliki manset yang besar.
- Celana panjang, disarankan tanpa lipatan, sebaiknya dikenakan dengan kaki celana tetap berada di bagian luar bot atau sepatu kerja. Pakaian dari serat aramida yang tahan api umum digunakan di industri.
- Sepatu dengan ujung tertutup sebaiknya dikenakan (sepatu terbuka atau berpori sebaiknya tidak dikenakan).
- Pakaian yang terbuat dari katun biasa, katun tahan api, atau material antistatis sebaiknya dikenakan. Hindari mengenakan pakaian yang terbuat dari nilon atau material sintetis lainnya, sutra atau wol karena material-material ini dapat menghasilkan muatan listrik statis yang dapat menyulut campuran yang mudah terbakar. Material sintetis (pakaian) dapat meleleh dan menempel pada daging, sehingga menyebabkan dampak luka bakar yang lebih parah. Setiap pakaian yang tersemprot atau terciprat hidrogen sebaiknya dilepas hingga benar-benar bebas dari gas hidrogen.
- Sarung tangan *gauntlet*, pakaian ketat, atau pakaian yang menahan atau memerangkap (kantong) cairan pada tubuh sebaiknya dihindari.
- Pelindung pendengaran sebaiknya dikenakan bila fasilitas atau sistem hidrogen melibatkan peralatan yang menimbulkan derau keras.
- Topi keras sebaiknya digunakan bila fasilitas atau sistem hidrogen melibatkan bahaya apa pun dari benda jatuh.
- Peralatan pernapasan mandiri sebaiknya dipakai ketika bekerja di ruang tertutup yang mungkin memiliki lingkungan yang kekurangan oksigen.

- Peralatan deteksi hidrogen dan kebakaran portabel sebaiknya digunakan untuk memberi peringatan adanya kebocoran hidrogen dan kebakaran.
- Personel sebaiknya mentanahkan diri mereka sebelum menyentuh atau menggunakan alat pada sistem hidrogen jika ada hidrogen atau diduga berada di area tersebut.

7.6.4 Pendinginan

Pendinginan sistem hidrogen cair dari kondisi lingkungan sekitar ke temperatur operasinya (pada atau dekat NBP) adalah proses yang sebaiknya dilakukan oleh karyawan terlatih sesuai dengan prosedur yang disetujui, sehingga prosesnya berjalan secara terkendali. Proses pendinginan dapat melibatkan beberapa teknik seperti aliran cairan, aliran gas dingin, perendaman cairan, dan prapendinginan dengan nitrogen cair. Petunjuk pengoperasian sebaiknya diikuti secara cermat.

Proses pendinginan dapat mengakibatkan gradien temperatur yang besar, baik melingkar maupun radial, yang dapat menimbulkan tegangan yang besar pada struktur penahan atau komponen seperti katup. Selain itu, pendinginan dapat mengakibatkan kontraksi termal (terutama pada saluran yang panjang), yang dapat menimbulkan tegangan yang besar pada saluran. Pendinginan yang tidak seragam dapat terjadi ketika aliran dua fasa terjadi. Aliran bertingkat dapat mengakibatkan gradien temperatur melingkar yang besar, yang pada waktunya akan menimbulkan tegangan yang besar dalam pipa. Aliran bertingkat atau gelombang (umumnya terkait dengan laju aliran rendah) dapat mengakibatkan pembengkokan pipa, yang dihasilkan ketika bagian bawah pipa berkontraksi lebih banyak daripada bagian atas, karena bagian bawah didinginkan oleh cairan dan bagian atas didinginkan oleh gas.

Proses pendinginan umumnya menghasilkan gas dalam jumlah besar yang perlu ditangani dengan aman. Sistem sebaiknya dirancang untuk mengakomodasi aliran gas yang besar yang diperlukan untuk mencapai pendinginan sebuah sistem.

7.6.5 Transportasi

Hidrogen sebaiknya ditransportasikan sebagaimana layaknya zat berbahaya (mudah terbakar, bertekanan). Personel yang melakukan transportasi sebaiknya dilatih untuk menangani keadaan darurat yang mungkin timbul saat kendaraan transportasi berada di jalan. Suar umumnya digunakan untuk identifikasi atau peringatan kecelakaan kendaraan di jalan raya sebaiknya tidak digunakan di dekat kendaraan yang mengangkut hidrogen.

7.6.6 Operasi penyimpanan dan pemindahan

Berikut ini adalah beberapa panduan umum untuk operasi penyimpanan dan pemindahan. Prosedur rinci bergantung pada kondisi batas lokal dan aplikasi yang spesifik.

- Selalu pertimbangkan kondisi yang berlaku secara lokal, termasuk prosedur perusahaan atau petunjuk dari pabrikan.
- Jangan mengisi berlebih bejana penyimpanan cair.
- Jangan memberikan tekanan berlebih pada bagian mana pun dari sistem.
- Hindari siklus termal pada sistem pelepasan tekanan.
- Hangatkan dan bilas bejana hidrogen cair secara berkala untuk menjaga akumulasi kandungan oksigen di dalam bejana kurang dari 2%.
- Mentanahkan secara elektrik sistem yang mobil dan stasioner sebelum melakukan koneksi lainnya.
- Waspada terhadap kebocoran dan jangan lanjutkan operasi bila terjadi kebocoran atau kebakaran.

- Jangan mendinginkan bejana penyimpanan hidrogen cair terlalu cepat.
- Periksa sistem dari korosi atau kerusakan lainnya.
- Jaga kebersihan di sekitar sistem hidrogen.
- Batalkan atau jangan lanjutkan operasi selama badai listrik, atau kapan pun badai listrik mendekat.
- Jauhkan area penyimpanan dan pemindahan dari personel dan peralatan yang tidak penting.
- Buang sumber penyulut dari area operasional.
- Bekerja berpasangan bila sesuai.
- Gunakan benda-benda seperti barikade, rambu peringatan, dan tali untuk menetapkan kontrol akses ke area operasional.

7.6.7 Prosedur keselamatan

7.6.7.1 Umum

Keselamatan personel di dan dekat fasilitas hidrogen sebaiknya ditinjau secara cermat, dan prosedur darurat dikembangkan pada tahap awal perencanaan dan perancangan. Perencanaan lanjutan untuk berbagai keadaan darurat, seperti kebakaran dan ledakan, sebaiknya dilakukan sehingga prioritas pertama adalah pengurangan bahaya dan risiko terhadap kehidupan.

Pertimbangan sebaiknya diberikan pada pengembangan dan pendidikan/pelatihan dalam prosedur darurat untuk peristiwa yang mungkin terjadi. Hal ini sebaiknya mencakup kejadian-kejadian seperti berikut ini:

- kebocoran hidrogen;
- kebakaran, deflagrasi, detonasi hidrogen;
- tekanan berlebih;
- kontaminasi hidrogen (dengan oksidator atau gas inert);
- ruptur pada saluran;
- tumpahan hidrogen cair;
- migrasi awan *pre-mixed* yang dapat terbakar;
- kebakaran listrik;
- kegagalan dari peralatan penting;
- ketidakmampuan untuk melepaskan pada sistem hidrogen gas dingin atau cair.

7.6.7.2 Prosedur darurat

Pertimbangan yang sebaiknya ditangani oleh prosedur darurat adalah sebagai berikut:

- prosedur penyelamatan diri darurat dan penunjukan rute penyelamatan diri darurat;
- prosedur yang diikuti oleh karyawan yang tetap mengoperasikan sistem penting sebelum mereka evakuasi;
- prosedur untuk memastikan keberadaan seluruh personel setelah evakuasi darurat telah selesai dilakukan;
- tugas penyelamatan dan medis bagi karyawan yang akan melakukannya;
- cara yang lebih dipilih untuk melaporkan kebakaran dan keadaan darurat lainnya;
- nama dan jabatan tetap dari orang-orang yang bertanggung jawab untuk memberikan informasi lebih lanjut atau penjelasan mengenai tugas-tugas dalam rencana darurat;

- tindakan yang perlu dilakukan oleh personel tanggap awal;
- respons pemadaman kebakaran yang tepat;
- menetapkan dan menjaga komunikasi;
- respons medis yang sesuai;
- meminta bantuan dari luar;
- kemungkinan liputan media;
- operasi penyelamatan dan pemulihan;
- menetapkan pos komando dengan garis kewenangan yang telah dirancang sebelumnya;
- inventaris material berbahaya.

Sistem alarm darurat sebaiknya ditetapkan untuk memperingatkan personel bahwa terdapat situasi darurat. Prosedur keadaan darurat sebaiknya ditinjau secara berkala untuk memastikan bahwa prosedur tersebut relevan dan terkini. Personel keselamatan dan pemadam kebakaran sebaiknya dilibatkan dalam pengembangan prosedur darurat dan dalam latihan keadaan darurat.

Ketika sebuah perusahaan atau lembaga memiliki alarm dan sistem darurat umum, ketentuan untuk sistem hidrogen sebaiknya diintegrasikan di dalamnya.

7.6.7.3 Prosedur pemadaman kebakaran

Nyala api hidrogen sebaiknya tidak dipadamkan sebelum suplai gas diputus. Jika tidak, gas yang tidak terbakar dapat menciptakan campuran *premixed* yang mudah terbakar yang dapat meledak yang jika tersulut dapat menyebabkan situasi berbahaya yang signifikan. Penyemprotan air mungkin diperlukan untuk menjaga fasilitas-fasilitas yang berdekatan tetap dingin guna mencegah kegagalan mekanis pada komponen yang terpanasi.

7.6.7.4 Prosedur tumpahan cairan

Jika terjadi tumpahan cairan, alirannya sebaiknya diputus dengan menutup katup di bagian hulu. Upaya-upaya di sekitar lokasi tidak boleh dilakukan, dan area di dekatnya sebaiknya dievakuasi hingga waktu yang wajar telah berlalu untuk membiarkan cairan menguap dan gas terdispersi ke konsentrasi di bawah ambang batas titik bakar.

Hidrogen cair yang menguap akan dengan cepat menyebabkan kondensasi humiditas lingkungan, membentuk awan putih dari air yang terkondensasi. Perhatikan bahwa beberapa sumber informasi terkait keselamatan hidrogen akan menyatakan bahwa perluasan awan campuran hidrogen/udara dan campuran hidrogen/udara dapat menjadi lebih besar dibandingkan awan air yang terlihat.

7.7 Praktik-praktik yang direkomendasikan untuk organisasi

7.7.1 Umum

Organisasi yang terlibat dalam penggunaan hidrogen sebaiknya menetapkan dan menegakkan kebijakan dan prosedur yang diperlukan untuk memastikan bahwa hidrogen digunakan dengan cara yang aman. Kebijakan dan prosedur organisasi sebaiknya mencakup isu-isu seperti tanggung jawab keselamatan, manajemen bahaya dan risiko, dan standar yang berlaku, dan peraturan yang berlaku untuk operasi organisasi. Sebaiknya budaya keselamatan dibangun di antara personel organisasi untuk mendorong pemikiran tentang keselamatan setiap saat, terutama saat menjalankan tugasnya. Penekanan pada keselamatan dalam bekerja dengan hidrogen sebaiknya berasal dari level tertinggi pada organisasi, sebagai indikasi pentingnya keselamatan bagi organisasi.

Jika organisasi memiliki sistem manajemen mutu, disarankan agar kebijakan dan prosedur yang terkait dengan penggunaan hidrogen yang aman diintegrasikan ke dalamnya.

7.7.2 Kontrol melalui kebijakan dan prosedur organisasi

Manajemen puncak dari suatu organisasi sebaiknya menetapkan kebijakan dan prosedur organisasi dengan program atau proyek yang melibatkan hidrogen diarahkan, dilaksanakan, dikontrol, dipantau, dan dievaluasi. Manajemen puncak juga sebaiknya menyediakan kontrol, panduan, dan pengawasan terhadap program atau proyek semacam itu untuk memastikan bahwa perencanaan, pemantauan, pelaporan, evaluasi, dan asesmen program atau proyek yang tepat tercapai. Kebijakan dan prosedur organisasi yang tepat sebaiknya dibuat untuk memberikan kontrol "*conception to grave*" atas fasilitas, sistem, atau produk hidrogen.

Suatu organisasi dapat menggunakan dokumen seperti standar ini sebagai dasar atau pendukung kebijakan dan prosedurnya untuk memastikan bahwa hidrogen digunakan dengan aman.

7.7.3 Penggunaan prosedur dan daftar periksa yang disetujui

Prosedur dan daftar periksa sebaiknya disiapkan dan digunakan untuk semua operasi yang melibatkan sistem hidrogen. Prosedur yang tidak memadai dan kegagalan dalam mengikuti prosedur telah menjadi faktor umum dalam banyak kecelakaan hidrogen.

7.7.4 Melakukan peninjauan yang tepat

Peninjauan, seperti peninjauan rancangan, peninjauan keselamatan, analisis bahaya, dan peninjauan operasional memberikan verifikasi yang bermakna ketika dilakukan oleh tim yang berpengalaman dan terdiri dari personel berkualifikasi.

7.7.5 Program pemeliharaan dan kontrol mutu yang disetujui

Program pemeliharaan dan kontrol mutu sebaiknya digunakan untuk memastikan bahwa sistem hidrogen dipasang dan dijaga dalam kondisi aman melalui inspeksi dan penggantian komponen-komponen, baik sesuai kebutuhan maupun sesuai jadwal rutin.

7.7.6 Pendidikan/pelatihan personel

Program pelatihan keselamatan yang rinci yang mengakui kemampuan dan keterbatasan manusia sebaiknya diwajibkan bagi semua personel yang terlibat dalam penggunaan hidrogen. Tujuan utama dari program pelatihan keselamatan adalah untuk mengeliminasi kecelakaan dan meminimalkan tingkat keparahan kecelakaan yang terjadi.

Semua personel yang terlibat dengan penggunaan hidrogen (termasuk operator, teknisi, perancang, dan administrator) sebaiknya dididik/dilatih tentang pengetahuan terkait sifat fisika, kimia, dan bahaya hidrogen yang berkaitan dengan aplikasi yang mereka gunakan. Personel yang terlibat dalam kegiatan seperti perancangan peralatan dan perencanaan operasi sebaiknya dididik/dilatih untuk secara hati-hati mematuhi standar dan panduan yang diterima, dan untuk menaati peraturan dan persyaratan yang sesuai. Operator sebaiknya dididik/dilatih dalam penggunaan yang tepat dari peralatan dan sistem tertentu yang mereka terlibat dalam pengoperasian. Operator sebaiknya kompeten untuk mengoperasikan peralatan dan sistem tertentu.

Pelatihan sebaiknya mencakup tindakan yang diambil jika terjadi keadaan darurat, seperti pelepasan yang tidak tersulut, kebakaran atau deflagrasi atau detonasi. Personel sebaiknya dilatih untuk membantu evakuasi darurat yang aman dan teratur bagi personel. Pelatihan

sebaiknya mencakup prosedur preventif dan pertolongan pertama untuk perawatan darurat cedera, termasuk prosedur untuk cedera dingin dan kriogenik yang melibatkan gas hidrogen dingin atau hidrogen cair.

Pelatihan penyegaran bagi personel sebaiknya diberikan secara berkala (misalnya setiap tahun). Selain itu, program pelatihan keselamatan sebaiknya ditinjau secara berkala untuk memastikan bahwa program pelatihan tersebut relevan dan terkini.

7.7.7 Asesmen bahaya dan kemampuan operasi

Hidrogen umumnya diklasifikasikan sebagai material berbahaya berdasarkan sifat mudah terbakarnya. Ketika bekerja dengan hidrogen, berbagai aspek keselamatan sebaiknya dievaluasi untuk memastikan bahwa rancangan dan implementasi sistem secara memadai mencakup aspek-aspek keselamatan ini. Metode yang sangat baik untuk menangani semua aspek keselamatan adalah penggunaan asesmen bahaya. Asesmen bahaya mengidentifikasi bahaya dan kekurangan operasional dalam proses atau prosedur yang sedang dipelajari dan secara khusus mengevaluasi respons sistem terhadap deviasi dari maksud perancangan. Prosedur untuk melakukan asesmen bahaya terdiri dari pembuatan dokumen yang berisi daftar deviasi beserta penyebab, konsekuensi, perlindungan, dan rekomendasinya. Metode terbaik untuk membuat dokumen asesmen bahaya adalah dengan mempertemukan beberapa ahli dengan berbagai latar belakang dalam serangkaian sesi "*brainstorming*" yang terstruktur dan terfasilitasi. Industri kedirgantaraan, industri petrokimia, dan masyarakat kimia adalah sumber yang sangat baik sebagai contoh dan prosedur dalam melakukan asesmen bahaya.

Lampiran A
(informatif)
Sifat hidrogen

A.1 Umum

Tabel A.1 menyajikan sifat fisik dan termal-fisik terkait keselamatan yang dipilih dari hidrogen normal dan parahidrogen.

Tabel A.1 — Sifat fisik dan termal-fisik terkait keselamatan yang dipilih dari hidrogen normal dan parahidrogen

Sifat ^a	Hidrogen normal	Parahidrogen
Properti pada temperatur dan tekanan normal (NTP)		
Temperatur, K	293,15	
Tekanan (absolut), kPa	101,325	
Densitas, kg/m ³	0,08376	0,08376
Kalor jenis pada tekanan konstan (c_p), kJ/kg-K	14,33	14,89
Rasio kalor jenis (c_p/c_v)	1,416	1,383
Entalpi, kJ/kg	4.129,1	4.097,7
Energi internal, kJ/kg	2.919,5	2.888,0
Entropi, kJ/kg-K	70,251	64,437
Kecepatan suara, -m/s	1.294	1.294
Viskositas, $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	8,81	8,81
Konduktivitas termal, mW/m-K	183,8	191,4
Ekspansivitas volume, K ⁻¹	0,00333	0,00333
Kalor konversi dari normal ke parahidrogen pada 300 K, kJ/kg	27,56	
Sifat pada titik kritis (CP)		
Kalor laten penguapan, kJ/kg	-	
Temperatur, K	33,19	32,976
Tekanan (absolut), kPa	1.315	1.292,8
Densitas, kg/m ³	30,12	31,43
Kalor jenis pada tekanan konstan (c_p), kJ/kg-K	Sangat besar	Sangat besar
Rasio kalor jenis (c_p/c_v)	Besar	Besar
Entalpi, kJ/kg	577,4	38,5
Energi internal, kJ/kg	[data tidak tersedia]	2,8
Entropi, kJ/kg-K	27,07	17,6
Kecepatan suara, m/s	[data tidak tersedia]	350
Viskositas, $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	3,5	3,5
Konduktivitas termal, mW/m-K	Anomali besar	Anomali besar

Tabel A.1 (lanjutan)

Sifat ^a	Hidrogen normal	Parahidrogen
Sifat pada titik didih normal (NBP)		
Temperatur (K)	20,930	20,268
Tekanan (absolut), kPa	101,325	
Densitas, kg/m ³	1,331 (V) 70,96 (L)	1,338 (V) 70,78 (L)
Kalor laten penguapan, kJ/kg	446,0	445,6
Kalor jenis pada tekanan konstan (c_p), kJ/kg-K	12,20 (V) 9,772 (L)	12,15 (V) 9,688 (L)
Rasio kalor jenis (c_p/c_v)	1,683 (V) 1,698 (L)	1,869 (V) 1,688 (L)
Entalpi, kJ/kg	717,98 (V) 272,0 (L)	189,3 (V) -256,3 (L)
Energi internal, kJ/kg	641,9 (V) 270,7 (L)	113,6 (V) -257,7 (L)
Entropi, kJ/kg-K	39,16 (V) 17,32 (L)	29,97 (V) 7,976 (L)
Kecepatan suara, m/s	357 (V) 1 101 (L)	355 (V) 1 093 (L)
Viskositas, $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	1,1 (V) 13,2 (L)	1,1 (V) 13,2 (L)
Konduktivitas termal, mW/m-K	16,9 (V) 99,0 (L)	16,9 (V) 99,0 (L)
Ekspansi volume, K ⁻¹	0,0642 (V) 0,0164 (L)	0,0642 (V) 0,0164 (L)
Kalor konversi dari normal ke para-hidrogen, kJ/kg	527,14	
Sifat pada titik tripel (TP)		
Temperatur, K	13,957	13,803
Tekanan, kPa	7,205	7,042
Densitas, kg/m ³	0,129 8 (V) 77,21 (L) 86,71 (S)	0,125 6 (V) 77,021 (L) 86,50 (S)
Kalor jenis pada tekanan konstan (c_p), kJ/kg-K	10,53 (V) 6,563 (L) - (S)	10,52 (V) 6,513 (L) - (S)
Rasio kalor jenis (c_p/c_v)	1,695 (V) 1,388 (L) - (S)	1,693 (V) 1,382 (L) - (S)
Kalor laten penguapan, kJ/kg	452,0	449,2
Kalor laten fusi, kJ/kg	58,09	58,29
Kalor laten sublimasi, kJ/kg		507,39

Tabel A.1 (lanjutan)

Sifat ^a	Hidrogen normal	Parahidrogen
Entalpi, kJ/kg	669,67 (V)	140,3 (V)
	217,6 (L)	-308,9 (L)
	159,5 (S)	-367,2 (S)
Energi Internal, kJ/kg	612,52 (V)	84,23 (V)
	215,8 (L)	-309,0 (L)
	157,7 (S)	-367,3 (S)
Entropi, kJ/kg-K	46,4 (V)	37,52 (V)
	14,2 (L)	4,961 (L)
	10,1 (S)	0,739 (S)
Kecepatan suara, m/s	307 (V)	305 (V)
	1 282 (L)	1 273 (L)
	- (S)	- (S)
Viskositas, $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$	0,74 (V)	0,74 (V)
	26,0 (L)	26,0 (L)
Konduktivitas termal, mW/m-K	12,4 (V)	12,4 (V)
	73,0 (L)	73,0 (L)
	900 (S)	900 (S)
Ekspansi volume, K^{-1}	0,0752 (V)	0,0752 (V)
	0,0102 (L)	0,0102 (L)
		0,00494 (S)
Sifat lainnya		
Massa molekuler	2,01594	2,01594
Volume gas ekuivalen pada NTP/volume cairan NBP	847,1	845,1
Volume gas ekuivalen pada CP/volume cairan NBP	2,357	2,252
Volume gas ekuivalen pada NBP/volume cairan pada NBP	53,30	52,91
Volume gas ekuivalen pada TP/volume cairan NBP	546,3	563,8
Volume cairan ekuivalen pada TP/volume cairan NBP	0,9190	0,9190
Volume padatan ekuivalen pada TP/volume cairan NBP	0,8184	0,8181
Tekanan yang diperlukan untuk mempertahankan densitas cairan NBP dalam NTP GH_2 (volume tetap, tanpa pelepasan), MPa	172b	
Temperatur inversi maksimum Joule-Thomson, K	200	
Koefisien difusi di udara NTP, $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	0,61	
<p>CATATAN 1 (L): Fase cair.</p> <p>CATATAN 2 (S): Fase padat.</p> <p>CATATAN 3 (V): Fase uap.</p> <p>CATATAN 4 c_v: Kalor jenis pada volume konstan, kJ/kg-K.</p> <p>CATATAN 5 Angka dalam tanda kurung adalah perkiraan.</p> <p>^a Kecuali ditentukan lain, sumber data adalah Referensi [9] dalam bibliografi.</p> <p>^b Nilai yang dihitung.</p>		

A.2 Perbandingan dengan gas umum lainnya

Tabel A.2 menyajikan beberapa sifat termofisika terkait keselamatan dari gas hidrogen dan gas umum lainnya untuk tujuan perbandingan.

Tabel A.2 — Sifat termofisika dari gas-gas umum

Gas	Densitas pada 20 °C dan 100 kPa kg/m ³	Viskositas pada temperatur 20 °C dan 100 kPa μPa-s	Koefisien difusi di udara 10 ⁻⁴ m ² /s	Lower heating value MJ/kg
Hidrogen (H ₂)	0,082 7	8,814	0,61	119,93
Helium (He)	0,164 0	19,609	0,57	n/a
Metana (CH ₄)	0,659 4	11,023	0,16	50,02
Nitrogen (N ₂)	1,149 6	17,637	0,20	n/a

A.3 Perbandingan dengan gas yang dicairkan lainnya

Tabel A.3 menyajikan beberapa sifat kriogenik terkait keselamatan hidrogen cair dan gas yang dicairkan lainnya pada titik didih normalnya untuk tujuan perbandingan.

Tabel A.3 — Beberapa sifat tertentu dari beberapa cairan kriogenik pada titik didih normalnya

Gas yang dicairkan	Temperatur didih K	Densitas cairan kg/m ³	Densitas gas kg/m ³	Kalor penguapan J/g
Hidrogen (H ₂)	20,3	70,8	1,34	454,6
Helium (He)	4,2	125,0	16,89	20,6
Metana (CH ₄)	111,6	422,5	1,82	510,4
Nitrogen (N ₂)	77,3	808,6	4,53	198,6

Lampiran B
(informatif)
Data pembakaran hidrogen

B.1 Sifat-sifat pembakaran yang berkaitan dengan keselamatan

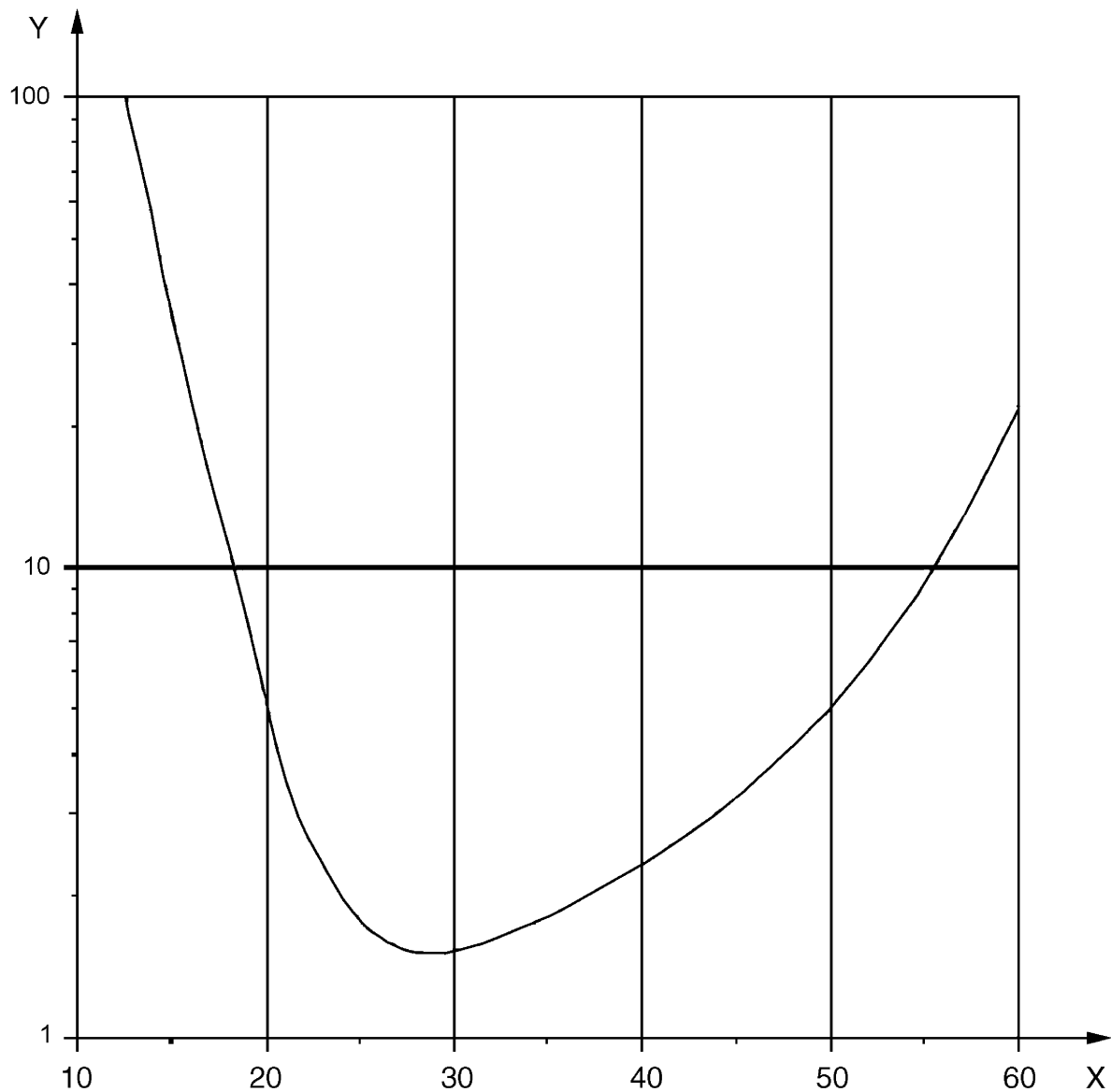
Tabel B.1 menyajikan sifat pembakaran hidrogen normal yang berkaitan dengan keselamatan.

Tabel B.1 — Sifat pembakaran hidrogen normal yang berkaitan dengan keselamatan

Sifat	Nilai ^a
Heating value, kJ/g	119,93 (lebih rendah) 141,86 (lebih tinggi)
Ambang batas titik bakar, fraksi vol, %	3,6 hingga 76,6 (di udara NTP, ^[5] Metode T) 4,2... 77,0 (di udara NTP, ^[5] metode B) 3,75... 75,1 (di udara NTP, ^[6]) 4,1 ... 94 (di oksigen NTP) ^c
Konsentrasi stoikiometri di udara, fraksi vol, %	29,53
Energi penyulutan (minimum) untuk penyulutan di udara, mJ	0,017
Konsentrasi saat energi penyulutan minimum ditemukan, fraksi vol, %	22 hingga 26
Temperatur swasulut, K	858 ^d
Temperatur penyulutan (<i>hot air jet</i>), K	943
Temperatur nyala api stoikiometri di udara, K	2 318
Energi termal yang dipancarkan dari nyala api ke sekelilingnya, %	17 hingga 25
Kecepatan pembakaran laminar maksimum di udara NTP, m/s	2,65 hingga 3,25
Kecepatan propagasi deflagrasi maksimum dalam NTP stoikiometri H ₂ /campuran udara, m/s	975
Kecepatan propagasi detonasi di udara NTP, m/s	1 480 hingga 2 150
<i>Maximum experimental safe gap</i> di udara NTP, mm	0,08
Celah <i>quenching</i> campuran stoikiometri di udara NTP, mm	0,64
Indeks batas oksigen, fraksi vol, %	5,0
Laju pembakaran dari <i>spilled liquid pool</i> , mm/s	0,5 hingga 1,1
<p>CATATAN 1 NTP: temperatur dan tekanan normal (293,15 K dan 101,325 kPa).</p> <p>CATATAN 2 NBP: titik didih normal (20.268 K dan 101.325 kPa).</p> <p>CATATAN 3 TNT: trinitrotoluena, simetris (energi ledakan = 4.602 J/g TNT).</p> <p>^a Kecuali ditentukan lain, sumber data adalah Referensi [9] dalam bibliografi.</p> <p>^b Nilai-nilai tersebut adalah nilai yang umum diberikan. Disarankan agar hanya digunakan sebagai panduan. Sifat-sifat ini merupakan fungsi dari banyak variabel yang dievaluasi untuk menentukan nilainya untuk aplikasi tertentu. Secara khusus, sifat-sifat ini hampir tidak berguna untuk mengevaluasi situasi kecelakaan yang realistis.</p> <p>^c Sumber data adalah Referensi [8] dalam bibliografi.</p> <p>^d Nilai yang berbeda telah dilaporkan untuk temperatur swasulut hidrogen di udara mulai dari 773 K hingga 858 K. Variasi ini mungkin disebabkan oleh pengaruh material yang berbeda yang digunakan untuk menampung hidrogen dalam alat uji. Lihat^c di atas untuk sumber data.</p> <p>^e Berdasarkan kalor pembakaran yang tinggi.</p>	

B.2 Lebar sel detonasi untuk campuran hidrogen/udara

Gambar B.1 menunjukkan lebar sel detonasi untuk campuran hidrogen/udara.



Keterangan

X konsentrasi hidrogen, fraksi volume (%)

Y lebar sel detonasi, cm

Gambar B.1 — Lebar sel detonasi untuk campuran hidrogen/udara pada 101,3 kPa (14,7 psia)^[10]

B.3 Perbandingan hidrogen dengan bahan bakar umum lainnya

Tabel B.2 membandingkan sifat penyulutan dan pembakaran hidrogen dengan bahan bakar umum lainnya.

Tabel B.2 — Sifat penyulutan dan pembakaran untuk campuran udara pada 25°C dan 101,3 kPa untuk beberapa bahan bakar yang umum

Bahan bakar	Ambang batas titik bakar bawah % fraksi vol.	Campuran stoikiometri % fraksi vol.	Ambang batas titik bakar atas % fraksi vol.	Energi penyulutan minimum mJ	Temperatur swasulut K	Kecepatan pembakaran laminar m/s
Hidrogen (H ₂) (lihat Tabel B.1)	4	29,5	77	0,017	858	2,70
Metanol (CH ₃ OH)	6,0	12,3	36,5	0,174	658	0,48
Metana (CH ₄)	5,3	9,5	17,0	0,274	810	0,37
Propana (C ₃ H ₈)	1,7	4,0	10,9	0,240	723	0,47
Bensin ^a (C ₈ H ₁₈)	1,0	1,9	6,0	0,240	488	0,30

Lampiran C (informatif) Data material

C.1 Kriteria pemilihan material

Komponen hidrogen dan sistem hidrogen umumnya melibatkan berbagai macam material, baik metal dan non-metal (seperti polimer). Setiap material yang terlibat (misalnya,udukan, penyekat, perekat, pelumas, insulasi listrik, pegas, baut, dan perpipaan) sebaiknya dievaluasi dengan cermat untuk penggunaannya di dalam perancangan, pengoperasian, dan kondisi darurat yang akan mengenainya.

Pemilihan material yang cocok untuk digunakan dalam sistem hidrogen melibatkan beberapa faktor. Beberapa pertimbangan yang terlibat dalam pemilihan material yang akan digunakan dalam sistem hidrogen meliputi hal-hal berikut ini:

- kompatibilitas dengan hidrogen (yang berkaitan dengan hal-hal seperti penggetasan hidrogen, serangan hidrogen, *hydriding*, porositas, perembesan, dan difusi);
- kompatibilitas dengan material yang berdampingan (pencocokan sifat di bawah perubahan temperatur dan tekanan, misalnya, dan efek perubahan pada bentuk dan dimensi material);
- kompatibilitas dengan kondisi penggunaan (efek temperatur dan tekanan, misalnya, pada keuletan, dan ekspansi/kontraksi; perubahan sifat yang terkait dengan perubahan kondisi operasi);
- kompatibilitas dengan lingkungan sekitar atau paparan (misalnya, lingkungan korosif atau temperatur tinggi dari kebakaran hidrogen atau kebakaran dari material di sekitarnya);
- toksisitas (penggunaan material yang toksik dengan cara apa pun, seperti selama fabrikasi, sebaiknya dipertimbangkan hanya jika benar-benar diperlukan);
- mode kegagalan (misalnya, ruptur getas yang cepat versus separasi ulet yang lambat);
- kemampuan untuk membuat fabrikasi ke dalam bentuk yang diinginkan (misalnya, pemesinan, pengelasan, dan pembengkokan);
- ekonomi;
- ketersediaan.

Sebagian besar pertimbangan-pertimbangan ini adalah hal yang umum untuk pemilihan material dengan tujuan apa pun. Namun, yang pertama khusus untuk hidrogen, dan dua yang berikutnya penting untuk aplikasi hidrogen cair, karena temperatur rendah (20 K). Diskusi singkat tentang tiga pertimbangan pertama tersebut diberikan di bawah ini.

C.2 Penggetasan hidrogen

Penggetasan hidrogen merupakan masalah serius bagi metal yang terpapar hidrogen. Penggetasan hidrogen dapat menyebabkan kerusakan yang signifikan pada sifat mekanis dari metal. Penggetasan hidrogen melibatkan sejumlah besar variabel seperti temperatur dan tekanan lingkungan; kemurnian, konsentrasi dan waktu terpapar hidrogen; serta kondisi tegangan, sifat fisik dan mekanis, struktur mikro, kondisi permukaan, dan sifat bawaan dari *crack front* apapun pada material. Kerentanan terhadap penggetasan hidrogen dari beberapa metal yang umum digunakan dirangkum dalam Tabel C.1.

Meskipun suatu material dapat mengalami penggetasan hidrogen (bahkan hingga sangat getas), material tersebut masih dapat digunakan dalam layanan hidrogen jika kondisi layanan memungkinkan penggunaannya (misalnya, tegangan yang cukup rendah).

Tabel C.1 — Kerentanan penggetasan hidrogen dari beberapa metal yang umum digunakan^a

Metal	Penggetasan ekstrem	Penggetasan parah	Penggetasan sedikit	Penggetasan dapat diabaikan
Aloi aluminium				
1100				X
6061-T6				X
7075-T73				X
Aloi Be-Cu 25				X
Tembaga, OFHC				X
Nikel 270		X		
Baja				
Baja aloi, 4140		X		
Baja karbon				
1020			X	
1042 (<i>normalized</i>)			X	
1042 (<i>quenched and tempered</i>)		X		
Baja <i>maraging</i> , 18Ni-250	X			
Baja tahan karat				
A286				X
17-7PH	X			
304 ELC		X		
305		X		
310			X	
316			X	
410		X		
440C		X		
Inconel 718	X			
Titanium dan aloi titanium				
Titanium			X	
Ti-5Al-2.5Sn (ELI)		X		
Ti-6Al-4V (<i>annealed</i>)		X		
Ti-6Al-4V (STA)		X		

^a ISO 11114-4 menjelaskan metode pengujian yang memungkinkan untuk memverifikasi sensitivitas yang tepat dari material baja dan metal terhadap penggetasan hidrogen.

C.3 Efek temperatur rendah pada metal

C.3.1 Umum

Pemilihan material struktural untuk digunakan dalam layanan hidrogen cair didasarkan

terutama pada sifat mekanis material, seperti kekuatan luluh dan kekuatan tarik, keuletan, kekuatan impak, dan *notch insensitivity*. Material sebaiknya memiliki nilai minimum tertentu untuk sifat-sifat ini di seluruh rentang temperatur operasi, dengan pertimbangan yang tepat untuk kondisi darurat seperti kebakaran hidrogen. Material sebaiknya stabil secara metalurgi, sehingga perubahan fasa dalam struktur kristalin tidak terjadi seiring waktu atau tidak mengalami *thermal cycling* berulang.

Pemilihan material untuk digunakan pada temperatur hidrogen cair 20 K melibatkan pertimbangan perilaku material seperti berikut ini:

- transisi dari ulet menuju getas sebagai fungsi temperatur;
- mode deformasi plastis, khususnya mode non-konvensional tertentu yang ditemukan pada temperatur yang sangat rendah;
- efek ketidakstabilan metalurgi dan transformasi fasa dalam struktur kristalin pada sifat mekanis dan elastis.

Dua pertimbangan utama dalam pemilihan material untuk layanan hidrogen cair adalah keuletan pada temperatur rendah (penggetasan pada temperatur rendah) dan kontraksi termal.

C.3.2 Penggetasan pada temperatur rendah

Banyak material berubah dari perilaku ulet menjadi getas saat temperaturnya diturunkan. Perubahan perilaku ini dapat terjadi pada temperatur yang jauh lebih tinggi daripada temperatur kriogenik.

Hasil uji impak Charpy sebagai fungsi temperatur dapat digunakan sebagai indikasi perilaku transisi suatu material dari ulet menuju getas. Indikasi lain perilaku suatu material dari ulet menjadi getas dapat diperoleh dengan hubungan kekuatan luluh dan kekuatan tarik dari suatu material sebagai fungsi temperatur. Jika kekuatan luluh suatu bahan mendekati kekuatan tarik material seiring dengan penurunan temperatur, maka material tersebut akan menjadi semakin getas.

Umumnya, material yang memiliki temperatur transisi ulet menuju getas di atas 20 K sebaiknya tidak digunakan dengan hidrogen cair, kecuali jika penggunaannya dipertimbangkan dengan cermat dan analisis menyeluruh. Sebagian besar polimer menjadi getas pada temperatur yang jauh lebih tinggi daripada temperatur hidrogen cair, dan akibatnya, penggunaannya dalam sistem hidrogen cair umumnya dihindari.

C.3.3 Kontraksi termal

Material pada umumnya memiliki koefisien muai positif, yaitu, material akan memuai saat temperaturnya naik (namun ada beberapa pengecualian untuk hal ini). Rentang temperatur dari temperatur lingkungan sekitar ke temperatur hidrogen cair adalah sekitar 280 K. Penurunan temperatur yang begitu besar dapat mengakibatkan kontraksi termal yang signifikan pada sebagian besar material. Kontraksi ini perlu diperhitungkan dalam penggunaan material pada temperatur hidrogen cair. Koefisien ekspansi termal itu sendiri adalah fungsi dari temperatur.

Nilai tipikal untuk kontraksi termal pada perubahan temperatur dari temperatur lingkungan menjadi temperatur kriogenik adalah sebagai berikut:

- sekitar 0,3% pada aloi berbasis besi;
- sedikit di atas 0,4% pada aluminium;
- lebih dari 1% pada banyak plastik.

Penggunaan material plastik di antara dua permukaan metal (misalnya penyekat) harus mengakomodasi sekitar 0,6% lebih banyak kontraksi yang akan dialami plastik dibandingkan dengan metal.

C.4 Kesesuaian material untuk layanan hidrogen

Material sebaiknya dievaluasi dengan hati-hati sebelum digunakan untuk layanan hidrogen. Suatu material sebaiknya tidak digunakan untuk layanan hidrogen kecuali jika tersedia data yang menunjukkan bahwa material tersebut sesuai untuk kondisi layanan yang dimaksudkan. Material yang telah berhasil digunakan dengan hidrogen sebaiknya lebih dipilih daripada material dengan sedikit atau tanpa riwayat penggunaan hidrogen. Kesesuaian beberapa material yang umum digunakan dengan hidrogen ditunjukkan pada Tabel C.2, yang disediakan sebagai pedoman dan hanya untuk tujuan informatif.

Tabel C.2 — Kesesuaian beberapa material terpilih untuk layanan hidrogen

Material	Layanan gas hidrogen (GH ₂)	Layanan hidrogen cair ^b (LH ₂)	Keterangan
METAL			
Aluminium dan aloinya	S	S	Hampir tidak rentan terhadap penggetasan hidrogen.
Tembaga dan aloinya (seperti kuningan, perunggu, dan tembaga-nikel)	S	S	Hampir tidak rentan terhadap penggetasan hidrogen.
Besi, cor, <i>grey</i> , ulet	NS	NS	Tidak diizinkan oleh regulasi dan standar yang relevan.
Nikel dan aloinya (seperti Inconel dan Monel)	E	E	Evaluasi diperlukan. Rentan terhadap penggetasan hidrogen.
Baja, baja tahan karat austenit dengan >7% nikel (seperti 304, 304L, 308, 316, 321, 347)	Lihat C.1	Lihat C.1	Dapat membuat konversi <i>martensitic</i> jika diberi tegangan di atas titik luluh pada temperatur rendah.
Baja, karbon (seperti 1020 dan 1042)	Lihat C.1	NS	Evaluasi diperlukan. Rentan terhadap penggetasan hidrogen. Terlalu getas untuk cryogenic service.
Baja, aloi rendah (seperti 4140)	E	NS	Evaluasi diperlukan. Rentan terhadap penggetasan hidrogen. Terlalu getas untuk cryogenic service.
Baja, baja tahan karat <i>martensitic</i> (seperti 410 dan 440C)	E	E	Evaluasi diperlukan. Rentan terhadap penggetasan hidrogen.
Baja, nikel (seperti 2,25; 3,5; 5 dan 9% Ni)	E	NS	Keuletan hilang pada temperatur hidrogen cair
Titanium dan aloinya	E	E	Evaluasi diperlukan. Rentan terhadap penggetasan hidrogen.

Tabel C.2 — Kesesuaian beberapa material terpilih untuk layanan hidrogen (*lanjutan*)

Material	Layanan gas hidrogen (GH ₂)	Layanan hidrogen cair ^b (LH ₂)	Keterangan
NONMETAL			
Asbes yang terimpregnasi dengan Politetrafluoroetilena (<i>Polytetrafluoroethylene</i> , PTFE) ^a	S	S	Hindari penggunaan karena bahaya karsinogenik.
Karet kloroprena (Polikloroprena ^a)	S	NS	Terlalu getas untuk cryogenic service.
Serat poliester (Dacron)	S	NS	Terlalu getas untuk cryogenic service.
Karet fluorokarbon (Viton ^a)	E	NS	Terlalu getas untuk cryogenic service.
Film poliester (Mylar) ^a	S	NS	Terlalu getas untuk cryogenic service.
Nitril (Buna-N ^a)	S	NS	Terlalu getas untuk cryogenic service.
Poliamida (nilon)	S	NS	Terlalu getas untuk cryogenic service.
Poliklorotrifluoroetilena (Kel-F) ^a	S	S	
Politetrafluoroetilena (<i>Polytetrafluoroethylene</i> , PTFE) ^a	S	S	
<p>CATATAN 1 S: Cocok untuk digunakan.</p> <p>CATATAN 2 NS: Tidak cocok untuk digunakan.</p> <p>CATATAN 3 E: Evaluasi diperlukan untuk menentukan apakah material tersebut sesuai untuk kondisi penggunaan.</p> <p>^a Politetrafluoroetilena (PTFE), Polikloroprena, Dacron, Mylar, Viton, Buna-N, dan Kel-F adalah contoh produk yang sesuai yang tersedia secara komersial. Informasi ini diberikan untuk kenyamanan pengguna standar ini dan bukan merupakan dukungan dari ISO terhadap produk ini.</p> <p>^b Perhatian sebaiknya diberikan ketika tangki cairan H₂ kurang lebih kosong, bagian atasnya dapat menjadi hangat. Dalam hal ini, kolom GH₂ berlaku sebagai pengganti LH₂ .</p>			

Lampiran D
(informatif)
Opsi penyimpanan lainnya

D.1 Umum

Sistem penyimpanan dan transportasi hidrogen dapat menggunakan senyawa kimia yang mengandung hidrogen dan cara lain untuk meningkatkan densitas energi untuk penyimpanan hidrogen dan untuk menghindari persyaratan penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi atau bertemperatur rendah. Senyawa kimia yang disebutkan adalah material energetik dengan pertimbangan keselamatannya sendiri, dan sebaiknya ditangani dengan tepat. Selain itu, interaksi senyawa kimia dengan sistem hidrogen sebaiknya dipertimbangkan.

Berbagai senyawa kimia yang menggunakan mekanisme fisik yang berbeda untuk penyimpanan hidrogen sedang diinvestigasi. Ini termasuk bahan bakar cair yang umum, metal hidrida (lihat ISO 16111), hidrida organik cair, dan material yang lebih baru seperti fuleren, tabung nano serat karbon, dan serta kaca yang berbentuk *microsphere*. Beberapa bahan bakar cair yang dipertimbangkan termasuk metanol, metilsikloheksana (MCH), amonia, bensin, dan hidrazin. Sistem hidrida dapat menggunakan aloi metal, katalis, dan *liquid slurries*. Pertimbangan keselamatan disajikan secara umum karena perbedaan fisik yang besar dalam senyawa kimia ini dan sistem yang menggunakannya, kurangnya karakterisasi bahaya dari material yang lebih baru, dan potensi sistem baru yang belum terdefinisi. Informasi spesifik untuk senyawa kimia yang umum digunakan dapat ditemukan dalam lembar data keselamatan material (*material safety data sheets*, MSDS) dan literatur keselamatan.

D.2 Pertimbangan keselamatan dasar untuk senyawa kimia

Pertimbangan keselamatan dasar termasuk memperhitungkan sifat fisik dan pembakaran, masalah penanganan dan toksisitas, serta masalah khusus lainnya. Minimal, informasi keselamatan berikut ini, bersama dengan MSDS pemasok, sebaiknya diperhitungkan dalam rancangan sistem dan disampaikan kepada mereka yang memiliki potensi risiko terpapar:

- penjelasan umum tentang bahaya umum atau khusus;
- sifat fisik;
- sifat pembakaran di udara;
- kompatibilitas material;
- informasi penanganan;
- toksisitas;
- pemadaman kebakaran.

Bibliografi

- [1] McCarty, R. D., Hord, J. and Roder, H. M., *Selected properties of hydrogen (engineering design data)*, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, DC, NBS Monograph 168, February 1981
- [2] Lee J.H.S. Hydrogen air detonations, *2nd International workshop on the impact of hydrogen on water reactor safety*, Albuquerque, New Mexico, 1982
- [3] Nettleton M.A. *Gaseous Detonations: their nature, effects, and control*. Chapman and Hall, London, New York, 1987, pp. 76.
- [4] Ordin, P. M., *Review of Hydrogen Accidents and Incidents in NASA Operations*, NASA TM X-71565, NASA Lewis Research Center, accession number N74-28457, 1974
- [5] EN 1839: *Determination of the explosion limits of gases and vapours*
- [6] ASTM E681-09: *Standard Test Method for Concentration Limits of Flammability of Chemicals (Vapors and Gases)*
- [7] Molkov V.V. Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering. 1st Edition, October 2012, eBook (Part 1 and 2) tersedia secara gratis di <http://bookboon.com/>.
- [8] Ono R., Oda T. Spark ignition of hydrogen-air mixture. J. Phys. Conf. Ser. 2008, 142 p. 012003. Tersedia di: <http://iposcience.iop.org/1742-6596/142/012003>
- [9] Glassman I., Yetter R.A. Combustion, Fourth Edition, Copyright 2008, Elsevier Inc. All rights reserved
- [10] Coward H.F., Jones G.W. Limits of Flammability of Gases and Vapors, Bulletin 503 Bureau of Mines, United States Government Printing Office, Washington; 1952
- [11] Cohen N. "Flammability and Explosion Limits of H₂ and H₂/CO: A Literature Review, Aerospace Report No. TR-92(2534), September 10, 1992
- [12] National [USA] Fire Protection Agency: NFPA 2: Hydrogen Technologies Code
- [13] National [USA] Fire Protection Agency: NFPA 55: Compressed Gas and Cryogenic Fluids
- [14] Sandia National [USA] Laboratories, Sandia's Hydrogen Program: *Technical Reference for Hydrogen Compatibility of Materials* <http://www.sandia.gov/matlsTechRef/>

Informasi perumus SNI

[1] Komite Teknis Perumusan SNI

Komite Teknis 27-11 Teknologi Hidrogen

[2] Susunan keanggotaan Komite Teknis Perumus SNI

Ketua : Eniya Listiani Dewi

Wakil Ketua : Tony Susandy

Sekretaris : Azizah Ayu Kartika

Anggota :

Diaz Ficry Arfianto

Eki Dwi Wijanarko

Ikrar Adilla

Deni Shidqi Khaerudini

Oka Pradipta Arjasa

Sri Djangkung Sumbogo Murti

Sandia Primeia

Hary Devianto

Firman Bagja Juangsa

Haryo Satria Oktaviano

Umar

Sri Mukartiningsih

Ricky Cahya Andrian

Abdul Rochim

[3] Konseptor Rancangan SNI

Eniya Listiani Dewi

Tony Susandy

Azizah Ayu Kartika

Diaz Ficry Arfianto

Eki Dwi Wijanarko

Ikrar Adilla

Deni Shidqi Khaerudini

Oka Pradipta Arjasa

Sri Djangkung Sumbogo Murti

Sandia Primeia

Hary Devianto

Firman Bagja Juangsa

Haryo Satria Oktaviano

Umar

Sri Mukartiningsih

Ricky Cahya Andrian

Abdul Rochim

Raditya Daffa Cepika

[4] Sekretariat pengelola Komite Teknis Perumus SNI

Direktorat Aneka Energi Baru dan Energi Terbarukan

Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi,

Kementerian ESDM