



European Train the Trainer Program for Responders

Leksjon 2

Egenskaper for hydrogen som er relevante for sikkerhet

NIVÅ I

Brannkonstabel

Informasjonen i denne leksjonen er tilegnet **brannkonstabler (og tilsvarende)** og høyere nivåer.

Dette emnet er også tilgjengelig på nivå IV (spesialist).

Denne leksjonen er en del av et opplæringsmaterieell med nivåer I–IV: Brannkonstabel, utrykningsleder, innsatsleder og spesialist. Les introduksjonen til leksjonen for forventet forkunnskap og læringsutbytte

Merk: Dette materiellet tilhører HyResponder Consortium og skal krediteres deretter, resultatene fra HyResponse har blitt brukt som grunnlag





Ansvarsfraskrivelse

Til tross for at dette dokumentet er nøye utarbeidet, gjelder følgende ansvarsfraskrivelse: Informasjonen i dette dokumentet er gitt som den er, og det gis ingen garanti om at informasjonen er egnet for et bestemt formål. Brukeren av den tar i bruk informasjonen på egen risiko og ansvar.

Dokumentet gjenspeiler bare forfatterens syn. FCH JU og EU er ikke ansvarlig for bruk av informasjonen i det.

Takk

Prosjektet har fått finansiering fra Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) (now Clean Hydrogen Partnership) under bevilgningsavtale nr. 875089. JU mottar støtte fra EUs forsknings- og innovasjonsprogram Horizon 2020 samt fra Storbritannia, Frankrike, Østerrike, Belgia, Spania, Tyskland, Italia, Tsjekkia, Sveits og Norge.



Sammendrag

Denne leksjonen beskriver egenskapene til hydrogen som er relevante for sikkerhet. Fordelene med hydrogen fremfor tradisjonelle hydrokarbonbaserte drivstoff er veldig klare:

- Det produserer ingen CO₂-utslipp under forbrenning.
- Hydrogen er i stand til å produsere mer energi per masseenheter.
- Det kan genereres fra en rekke fornybare kilder som vind, sol, tidevann og vannkraft.

Fra et sikkerhetsmessig synspunkt er ikke hydrogen mer eller mindre farlig enn annet drivstoff, men det er annerledes. Denne forskjellen er i hydrogenets spesifikke fysiske egenskaper og forbrenningsegenskaper. Ikke bare nødetatene, men også folk flest bør kjenne til disse egenskapene, siden de er direkte knyttet til hydrogenets risikable atferd. For eksempel er hydrogenlekkasjer vanskelige å oppdage med sansene fordi den er fargeløs, luktfri og smakløs. Hydrogen har en usynlig flamme når det brenner i en ren atmosfære. Det lekker lett, og hydrogenbranner kan eskalere til eksplosjoner. Likevel er den viktigste sikkerhetsegenskapen til hydrogen at den har den høyeste oppdriften av gasser, noe som gjør at den kan strømme ut av et hendelses-/ulykkessted og blandes med luft til et sikkert konsentrasjonsnivå.

Denne leksjonen setter hydrogenets strukturelle, fysiske og kjemiske egenskaper samt egenskaper for antenning og forbrenning og andre egenskaper i sammenheng med en rekke sikkerhetshensyn. Den sammenligner også hovedparameterne for hydrogen mot parameterne for tradisjonelle drivstoff som er i bruk.

HyResponse-prosjektet krediteres ettersom materialet som presenteres her, utvides basert på de originale HyResponse-leksjonene (<http://www.hyresponse.eu>).

Nøkkelord

Oppdrift, antenning, forbrenning, eksplosjonsgrenser, eksplosjon

Innhold

Sammendrag.....	3
Nøkkelord	3
1. Målgruppe.....	5
1.1 Rollebeskrivelse: Brannkonstabel	5
1.2 Kompetansenivå: Brannkonstabel.....	5
1.3 Tidligere opplæring: Brannkonstabel.....	5
2. Innledning og mål.....	5
3. Ulike former for hydrogen	7
3.1 Atomisk og molekylært hydrogen.....	7
3.2 Hydrogen i gassform, flytende form og faststoff.....	7
4. Fysiske egenskaper til hydrogen	10
4.1 Hydrogenoppdrift som en sikkerhetsressurs	10
4.2 Antenningssegenskaper	11
4.3 Flammestråling.....	13
4.4 Detonasjonsgrenser	13
5. Sammenligning av hydrogen med andre drivstoff.....	14
Referanser:	18

1. Målgruppe

Informasjonen i denne leksjonen er rettet mot NIVÅ 1: brannkonstabel Leksjoner er også tilgjengelige på nivå II, III og IV: utrykningsleder, innsatsleder og spesialist .

Rollebeskrivelser, kompetansenivå og læringsutbytter for brannkonstabel er beskrevet nedenfor.

1.1 Rollebeskrivelse: Brannkonstabel

En brannkonstabel er ansvarlig for og kompetent til å utføre oppgaver sikkert, iført korrekt bekledning inkludert pusteluft. Konstabelen kan anvende tilgjengelig utstyr som kjøretøy, stiger, slanger, slukkere, kommunikasjon og redningsverktøy under alle klimatiske forhold i områder og nødssituasjoner som krever respons.

1.2 Kompetansenivå: Brannkonstabel

Nødetatene må ha støtte i riktig kunnskap og praksis og er opplært i sikker og korrekt bruk av personlig verneutstyr, pusteluftutstyr og annet utstyr som det forventes at de skal bruke. Atferd som holder dem og andre kolleger trygge, skal beskrives i en standardprosedyre (SOP). Øvet evne til dynamisk å vurdere risiko for seg selv og andre er påkrevd.

1.3 Tidligere opplæring: Brannkonstabel

I henhold til det europeiske rammeverket for kvalifikasjon (EQF) er denne leksjonen tilegnet nivå 2 Faktabasert grunnkunnskap på et arbeids- eller studiefelt. Grunnleggende kognitive og praktiske ferdigheter som er nødvendig for å bruke relevant informasjon til å utføre oppgaver og løse rutinemessige problemer ved hjelp av enkle regler og verktøy. Arbeide eller studere under veiledning med noe autonomi.

2. Innledning og mål

Hydrogen som en ny energibærer har mange fordeler sammenlignet med tradisjonelle hydrokarbonbaserte drivstoff. Det er energieffektivt, miljøvennlig og kan hentes fra fornybare kilder. Potensielt kan det i fremtiden løse mange miljømessige problemer og energisikkerhetsspørsmål. I mer enn hundre år har hydrogen blitt produsert og brukt med høy sikkerhet for kommersielle og industrielle formål [1] . Imidlertid vil mer omfattende bruk av brenselcelle- og hydrogenteknologi (FCH) av allmennheten (ikke bare av utdannede fagfolk) kreve en ny sikkerhetskultur, innovative sikkerhetsstrategier og banebrytende tekniske løsninger. For å oppnå dette bør utrykningspersonell, ingeniører, designere, operasjonelt personell osv. være klar over alle spesifikke farer knyttet til håndtering og bruk av FCH-systemer. Interessant nok er de fleste av hydrogenets farer direkte knyttet til dets egenskaper. Derfor må kunnskapen om de generelle fysiske og kjemiske egenskapene, så vel som brennbarhet og antennelseegenskaper for hydrogen være tilgjengelig for nødetatene.



Formålet med denne leksjonen er å gi en viktig forståelse av de av hydrogenets egenskaper som er relevante for sikkerhet. Du skal forstå at hydrogen har et bestemt sett med egenskaper, noe som gjør det annerledes enn bærere av energi fra fossilt brensel som flytende petroleumsgass (LPG), trykksatt naturgass (CNG) og hydrokarbonbrensel. Denne leksjonen ser på effekten hydrogenets atom- og molekylstruktur har på sikkerhetsaspektene ved lagring (f.eks. termiske effekter av orto-para hydrogenkonvertering). Denne leksjonen diskuterer også sikkerhetshensynene knyttet til tre forskjellige aggregattilstandene til hydrogen: gass, væske og sørpe. Det er viktig å forstå at hydrogengass er luktfri, fargeløs og smakløs, og dermed kan de potensielle lekkasjene ikke oppdages av menneskelige sanser. Bruk av spesielle luktstoffer (slik som for eksempel med naturgass) er ikke gjennomførbart for hydrogensystemer, siden de kan forurense brenselceller [1]. Farene forbundet med kondenseringsprosessen og lagring/distribusjon/håndtering av flytende hydrogen dekkes også i denne leksjonen med flere detaljer i leksjon 5 – flytende hydrogen.

Den viktigste sikkerhetsfordelen med hydrogen er oppdriften, som er den høyeste av alle gasser på jorden. I denne leksjonen sammenlignes også hydrogenets gassetthet, diffusivitet, viskositet, spesifikk varmekapasitet og adiabateksponent ($\gamma = \frac{c_p}{c_v}$) samt andre parametere med tilsvarende for tradisjonelle drivstoff. Du vil i løpet av denne leksjonen lære om de viktigste antennelighetsegenskapene, antennelsesparametere, grenser for eksplosjonsevne for hydrogenluft og hydrogen-oksygen-blandinger. Ovennevnte egenskaper presenteres som en sammenligning med andre kjente drivstoff. Kunnskap om noen egenskaper som flammesynlighet, selvantennelsestemperatur, effekter av fortynningsmidler og hemmere på antennelighetsområdet, adiabatisk flammetemperatur, termisk stråling fra flammer, slukking og avblåsningsgrenser vil være svært nyttig for dem som skal håndtere direkte / slukke hydrogenbranner. Fysiologiske farer (helsefarer) ved hydrogen nevnes i denne leksjonen, men vil bli behandlet i større detalj i de påfølgende leksjonene. Det konkluderes med at sikkerhetshensynene for hydrogensystemer ikke er mer alvorlige, men annerledes enn for drivstoff som er i bruk[2].

Ved slutten av denne leksjonen skal du kunne:

- Forstå effekten atom- og molekylstrukturen har på sikkerhetshensyn for lagring og håndtering av hydrogen
- Tolke fasediagrammet for hydrogen og identifisere de tre aggregattilstandene
- Gjenkjenne fysiologiske farer forbundet med gassfase-hydrogen (GH₂) (kvelning) og flytende hydrogen (LH₂) (kryogene forbrenninger, frostskafer, hypotermi, lungeskade ved innånding av kald damp)
- Relatere den lave tettheten til gassfase H₂ til oppdriften som en viktig sikkerhetsressurs
- Forklare forbrenningsprosessen til hydrogen og de viktigste kjennetegnene



- Angi støkiometriske konsentrasjoner og brennbarhetsområde for hydrogen-luft- og hydrogen-oksygen-blandinger
- Forklare effekten av forskjellige faktorer (temperatur, trykk, retningen på flammespredningen, fortynningsmidler og hemmere, etc.) på antenneligheten til hydrogen
- Definere de viktigste antennesesegenskapene: minimum antennesesenergi, selvantennelsestemperatur, adiabatisk flammetemperatur, flammepunkt, minimum eksperimentell sikkerhetsavstand, laminær forbrenningshastighet
- Sammenligne grensene for hydrogens eksplosjonsevne med vanlige drivstoff og brennbarhetsområde for hydrogen
- Beskrive hydrogenmikroflammer og slukkingsparametere for hydrogenflamme (slukkeavstand, slukkeavstand, slukkegrenser, avblåsningsgrenser)
- Relatere fysiske og kjemiske egenskaper samt antenneses- og forbrenningsegenskaper til farer med hydrogen / farlige fenomener (lekkasjer, branner, eksplosjoner)
- Forklare forskjellene (og likhetene) i fysiske egenskaper / forbrenningsegenskaper/antennesesparametere mellom hydrogen og vanlige drivstoff.

3. Ulike former for hydrogen

3.1 Atomisk og molekylært hydrogen

Hydrogen (H) har atomnummer 1 i det periodiske system, og atommassen er 1,008 (avrundet til tre desimaler) [3].

3.2 Hydrogen i gassform, flytende form og faststoff

Ved standard temperatur og trykk (STP¹) er hydrogen en fargeløs, luktfri, smakløs gass. Derfor er hydrogenlekkasjer vanskelige å oppdage av menneskelige sanser. Dessverre kan ikke forbindelser som merkaptaner (vanligvis brukt som luktstoffer for å oppdage naturgasslekkasjer) tilsettes hydrogensystemer, fordi de vil forurense («forgifte») brenselcellene. Hydrogenmolekylene er dessuten små sammenlignet med molekylene i kjente luktstoffer, slik at hydrogen kan vandre/lekke gjennom åpninger som er for små til at luktstoffene kan passere. Hydrogen har en tendens til å bevege seg vekk fra kilden til lekkasjen raskere enn luktstoffene på grunn av oppdriften og den høye diffusiviteten. Hydrogen er en giftfri, ikke-etsende og brannfarlig forbindelse. Hydrogen kan imidlertid forårsake kvelning ved å fortynne oksygen i luften til under konsentrasjonsnivåene som er nødvendige for å opprettholde liv. Den er den letteste av alle kjente gasser. *Hydrogen i gassform* (GH₂) er 14 ganger lettere enn luft (tettheten til hydrogengass er 1; tettheten til luften er 14), noe som betyr

¹ Standardtemperatur og -trykk (STP): 273,15 K (0 °C) og 101 325 Pa.



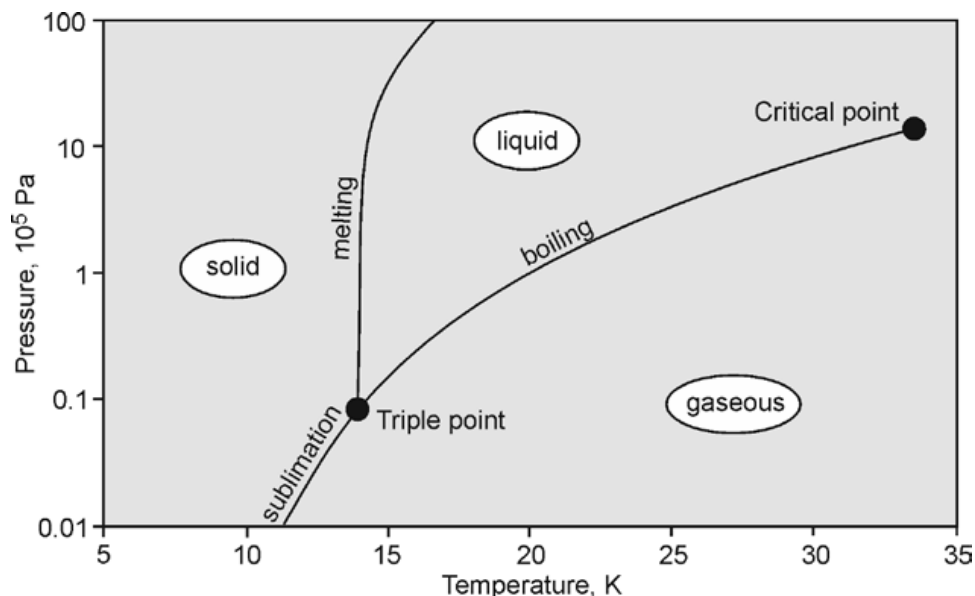
at den vil stige og spres raskt ved utslipp i luften. Hydrogen er mye brukt som reduksjonsmiddel i en rekke kjemiske prosesser. Selv om hydrogen er ikke-etsende og ikke-reaktivt ved standardbetingelser, er det i stand til å redusere mekanisk styrke for enkelte materialer gjennom en rekke interaksjonsprosesser som kalles hydrogensprøhet.

Flytende hydrogen (LH₂) er en fargeløs, luktfri, ikke-etsende og ikke veldig reaktiv væske. Det er en kryogen væske (væsker med temperaturer under -73 °C er kjent som kryogene) [3]. Flytende hydrogen som spruter på huden eller i øynene, kan forårsake alvorlige kuldeskader fra forfrysninger eller nedkjøling. LH₂ vil raskt koke eller bli til gass hvis den utsettes for eller helles i et miljø med normal temperatur. Oppvarming av LH₂ til omgivelsestemperatur kan føre til svært høyt trykk i trange rom. Vær oppmerksom på at inhalering av kalde damper kan føre til ubehag i luftveiene og til slutt kvelning.

Det volumetriske forholdet mellom LH₂ og GH₂ er 1:848. LH₂ ekspanderer omtrent 850 ganger ved omdanning til gass ved normal temperatur og trykk (NTP²), derfor lagres den ved relativt lave trykk i dobbeltveggede, vakuumisolerte beholdere utstyrt med sikringsskiver, ventiler og trykkavlastningsutstyr. Den har den laveste tettheten av flytende gass. I motsetning til for propan, gjør ikke komprimering av gassformig hydrogen det flytende. Derfor er LH₂ -fasen fraværende i tanker med hydrogen i gassform, og ved brann er risikoen for BLEVE fraværende [7]. Lagringstanker for GH₂ er også utstyrt med trykkavlastningsutstyr for å tillate en kontrollert lufting av hydrogengass. Dette vil bli behandlet nærmere i leksjonen om sikkerhet ved lagring av hydrogen.

Fasediagrammet for hydrogen vises i [figur 1](#). Det er tre kurver på fasediagrammet for hydrogen. Én kurve viser endringen i temperaturen for koking (eller kondensering for motsatt faseovergang) med trykk, en annen kurve viser endringen i smeltetemperatur (eller frysing) ved trykk, og den tredje viser trykk og temperaturer for sublimasjon. Prosessen for å gjøre hydrogen flytende, kalles kondensering [3].

² Normaltemperatur og -trykk (NTP): 293,15 K (20 °C) og 101 325 Pa.



Figur 1. Fasediagram for hydrogen [3]

Hydrogen finnes i gassform, flytende form og sørpe. LH₂ er en klar væske med en lyseblå fargetone. Hydrogen i sørpeform er en blanding av fast og flytende hydrogen ved trippelpunkttemperaturen. Overgangen mellom gass, væske og faste faser av hydrogen domineres av de lave temperaturene.

LH₂ har en tetthet på 70,78 kg/m³, som er omtrent 14 ganger mindre tett enn vann: Den *spesifikke vekten* til LH₂ er 0,071 i motsetning til 1 for vann. Den høye tettheten til mettet hydrogendamp ved lave temperaturer kan føre til at hydrogenskyen flyter horisontalt eller til og med nedover umiddelbart etter utslipp hvis det oppstår et LH₂-utslipp eller en lekkasje oppstår, eller gass ved en temperatur under 193 K luftes ut [8]. Disse faktaene må redegjøres for av nødetatene på et ulykkessted [3].

Et viktig sikkerhetshensyn ved bruk av LH₂ er at alle gassene, med unntak av helium, vil bli kondensert og overført til fast form ved så lav temperatur (hvis de utsettes for det). Lekkasje av luft eller andre gasser som er direkte utsatt for flytende hydrogen kan føre til flere farer [6]. Gasser i fast form kan tette rør, åpninger og blokkere ventiler på grunn av isdannelsen. I en prosess kjent som kryopumping kan reduksjonen i volumet til kondenserende gasser skape vakuum som kan trekke inn enda mer gass, f.eks. oksidanter som luft. Store mengder kondenserte eller størknede stoffer kan akkumulere og fortrenge LH₂ hvis lekkasjen vedvarer over lengre tid. Hvis systemet på et tidspunkt varmes opp for vedlikehold, vil disse størknede materialene fordampe og muligens resultere i høyt trykk eller danne eksplosive blandinger. Disse andre gassene kan også bidra til å føre varme inn i flytende hydrogen og forårsake forsterkede fordampningstap eller «uventet» trykkøkning[3].

Flytende hydrogen transporteres vanligvis i vakuumisolerte rør. Når kaldt hydrogen strømmer i rør med utilstrekkelig varmeisolasjon, kan dette imidlertid lett kjøle ned systemet til under 90 K, slik at kondensert luft med oksygeninnhold på opptil 52 % kan være til stede (NBP for

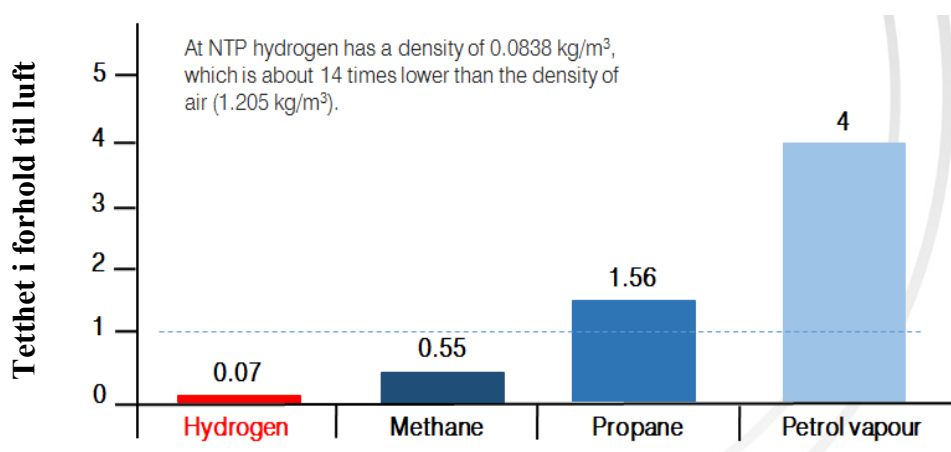
nitrogen er 77,36 K, NBP for oksygen er 90,15 K, NBP for karbondioksid er 216,6 K). Det flytende kondensatet ser ut og oppfører seg som vann. Dette oksygenberikede kondensatet øker brennbarheten til materialer og får materialene, som normalt ikke er brannfarlige, til å brenne. Dette inkluderer for eksempel asfaltholdige veidekker. Dette er spesielt viktig ved transport av store mengder hydrogen. Hvis utstyr ikke kan isoleres ordentlig, bør området under det være fritt for organiske materialer [3]. Oksygenberikelse kan øke brennbarheten og til og med føre til dannelse av forbindelser som er følsomme for støt. Hvis en oksygenberiket partikkel forurenser kryogen hydrogengass, kan denne blandingen til og med eksplodere. Beholderne med LH₂ må varmes opp og renses med jevne mellomrom for å holde det akkumulerte oksygeninnholdet i beholderen under 2 % [6]. Vær forsiktig hvis karbondioksid brukes som spylegass. Det kan være vanskelig å fjerne all karbondioksidet fra de lave punktene i systemet der gassen kan samle seg [3].

Selv om elektrisk strøm kan passeres gjennom LH₂, kan denne strømmen forklares i form av ladningsbærere dannet av bakgrunnsstråling. Den nåværende bæreevnen er således liten og mer eller mindre uavhengig av den pålagte spenningen. Undersøkelser har vist at akkumulering av elektrisk ladning i strømmende LH₂ med høy renhet ikke er en stor bekymring [8].

4. Fysiske egenskaper til hydrogen

4.1 Hydrogenoppdrift som en sikkerhetsressurs

Hydrogen i gassform har en tetthet på 0,0838 kg/m³ (ved NTP), som er mer enn 14 ganger lavere enn for luft (1,205 kg/m³) ved de samme forholdene. De spesifikke vektene til hydrogen og luft ved NTP er henholdsvis 0,07 og 1,0 (figur 2). Derfor er hydrogengass lettere enn luft, og i omgivelsestilstand vil den stige og spre seg i et åpent miljø [7]. Når det gjelder andre drivstoff, er propan- og bensindamp tyngre enn luft, mens metan, dvs. naturgass, er to ganger lettere enn luft, men nesten åtte ganger tyngre enn hydrogengass.



Figur 2. Tetthet i forhold til luft for hydrogen og andre vanlige drivstoff

Dermed resulterer den lave damptettheten til hydrogen i at gassen har svært stor *flyteevne* sammenlignet med andre forbindelser. Faktisk har hydrogen den høyeste oppdriften på



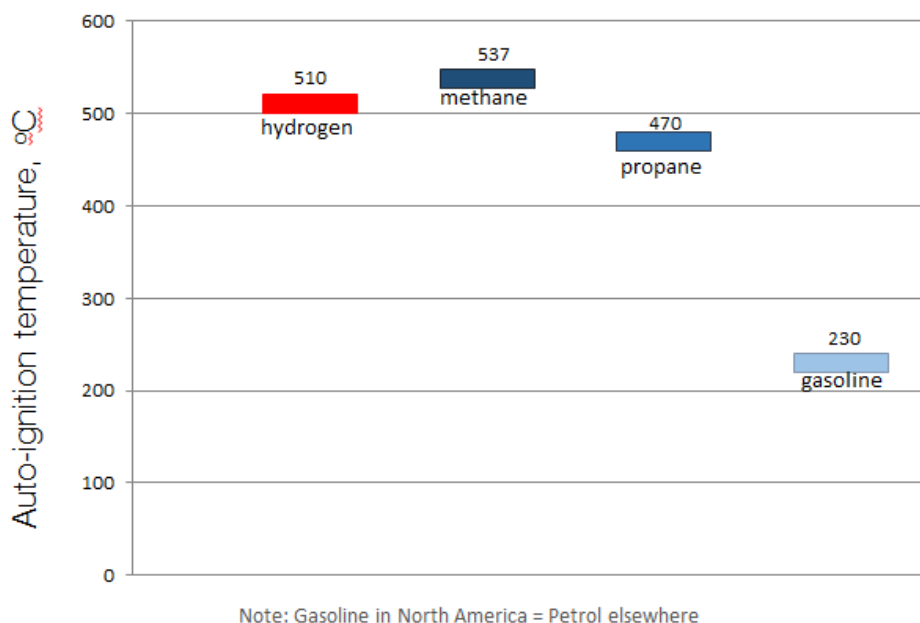
jorden. Dette er det viktigste sikkerhetsaspektet ved hydrogen, det vil si at ved hydrogenutslipp, vil det stige og spre seg raskt. De uønskede konsekvensene av hydrogenutslipp i den åpne atmosfæren og i delvis lukkede rom (uten opphopning av hydrogen) reduseres drastisk av oppdriften [3]. De tyngre hydrokarbonbaserte drivstoffene kan danne ganske store brennbare skyer, som ved de katastrofale eksplosjonene i Flixborough, 1974 [9] og Buncefield, 2005 [10]. I mange virkelige situasjoner kan hydrokarboner utgjøre mer alvorlige brann- og eksplosjonsfarer enn hydrogen.

Rent hydrogen er har positiv oppdrift over en temperatur på 22 K, dvs. i nesten hele temperaturområdet for når hydrogenet har gassform [4].

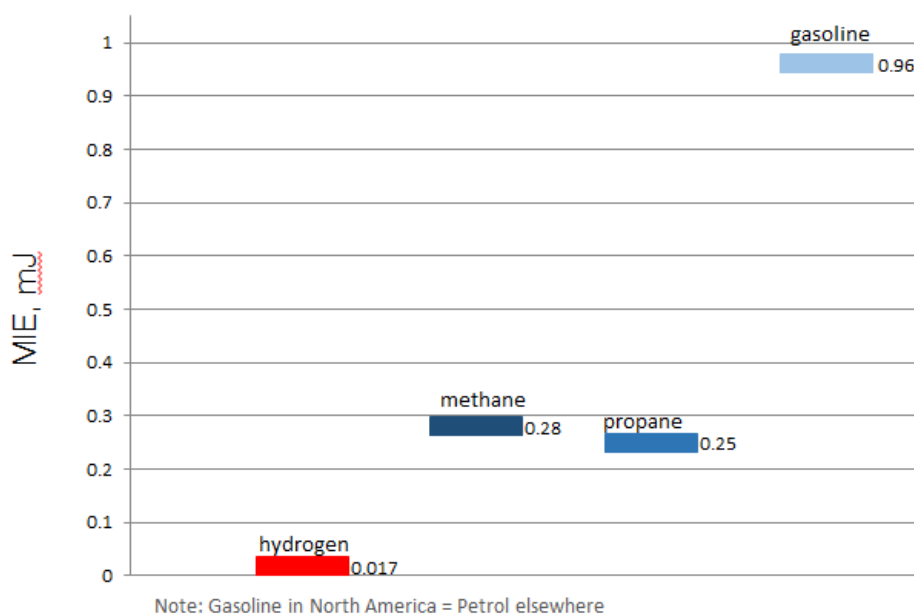
4.2 Antenningsegenskaper

Hydrogen antennes svært lett [5]. Potensielle antenneskilder inkluderer mekaniske gnister fra ventiler som lukkes raskt, elektrostatisk utladninger i ujordede partikkelfiltre, gnister fra elektrisk utstyr, katalysatorpartikler, varmeutstyr, lynnedslag i nærheten av avluftningsstuss osv. Derfor må antenneskildene elimineres eller isoleres på egnet måte, og all drift bør utføres som om det kan oppstå uforutsette antenneskilder [3].

Selvantennelsestemperaturen er minimumstemperaturen som kreves for å starte forbrenningsreaksjonen for brensel-oxidant-blandingen ved fravær av en ekstern antenneskilde. Standard selvantennelsestemperatur for hydrogen i luft er over 510 °C [14]. Det er relativt høyt sammenlignet med hydrokarboner som har lange molekyler. Den kan imidlertid senkes av katalytiske overflater. Gjenstander med temperaturer fra 500 til 580 °C kan antenne hydrogen-luft- eller hydrogen-oksygen-blandinger ved atmosfæretrykk. Betydelig kjøligere gjenstander på omtrent 320 °C kan forårsake antennelse ved langvarig kontakt ved mindre enn atmosfæretrykk [5]. Antennelsestemperatur ved varmluftstråle er 670 °C [4]. Den rapporterte temperaturen avhenger sterkt av systemet, og verdiene som er valgt for sammenligning, bør bare brukes på lignende systemer. Som vist i figur 3 har hydrogen, propan og naturgass (dvs. metan) nesten lignende verdier for selvantennelsestemperaturer. Alle tre drivstoffene har selvantennelsestemperaturer som er minst dobbelt så høye som selvantennelsestemperaturen for bensindamp [7].



Figur 3. Selvantennelsestemperaturene, basert på data publisert i [3], for hydrogen og annet drivstoff.



Figur 4. MIE-verdier, basert på data publisert i [3], for hydrogen og annet drivstoff.

Minste antennesenergi (MIE) for brannfarlige gasser og damper er minimumsverdien av elektrisk energi, lagret i utladningskretsen med et så lite tap i ledningene som mulig, som (ved utladning over et gnistgap) bare antenner den stillestående blandingen i den mest antannelige blandingen [3]. En svak gnist forårsaket av utladning av statisk elektrisitet fra en menneskekropp kan være tilstrekkelig til å antenne noen av drivstoffene vist nedenfor på figur 4.



Flammepunktet (eng: *Flashpoint*) er den laveste temperaturen der drivstoffet avgir tilstrekkelig mengde gass på overflaten til å danne en brennbar blanding med luft [3]. Flammepunktene for hydrogen og andre vanlige drivstoff, fra [3, 14] oppsummeres i tabell 1.

Tabell 1. Flammepunkter for hydrogen og andre vanlige drivstoff

	Hydrogen	Metan	Propan	Bensin	Diesel
Flammepunkt, °C	-253	-188	-96	-(11-45)	37-110

Maksimal eksperimentell sikkerhetsåpning (eng: *Maximum experimental safe gap MESG*) for brennbare gasser og damp er den laveste verdien til sikkerhetsavstanden målt i henhold til IEC 60079-1-1 (2002) ved å variere sammensetningen av blandingen. Sikkerhetsavstanden er bredden (bestemt med en lengde på 25 mm) der flammertilbakeslag ikke forekommer ved en gitt sammensetning av blandingen [3].

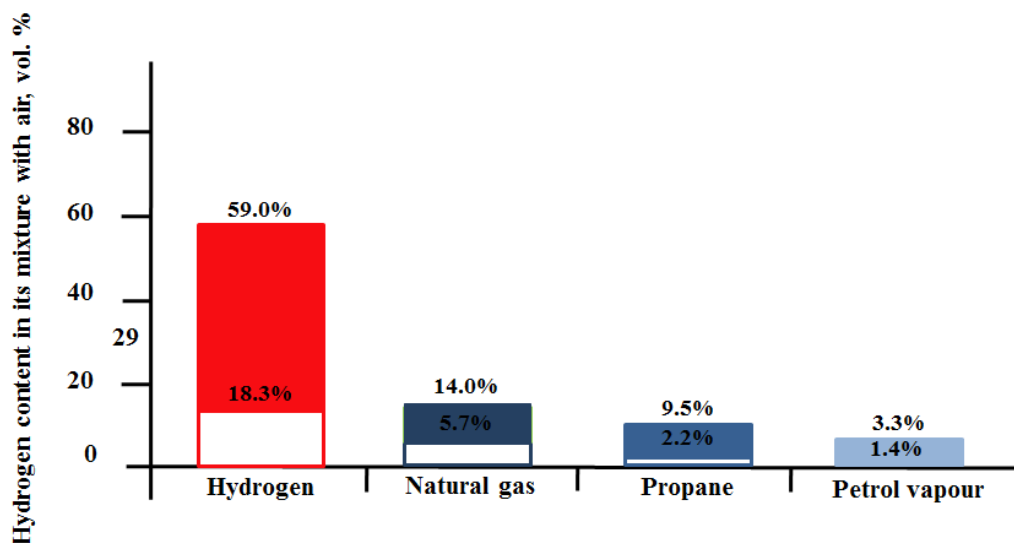
Flammetemperaturen for 19,6 volumprosent hydrogen i luft er målt til 2318 K [20]. En åpenbar fare som følge av denne egenskapen er alvorlige forbrenninger på personer som er direkte utsatt for hydrogenflammer. Den maksimale hydrogenflammetemperaturen er 2400 K [8].

4.3 Flammestråling

Hydrogen brenner med veldig blek-blå flammer og avgir verken synlig lys på dagtid (fordi hydrogenflammen ikke blir synlig i sollyset) eller røyk (hydrogen produserer kun vann når det brenner i luft) med mindre natriumholdige partikler eller støvpartikler blir trekkes inn og brenner sammen med den brennbare blandingen. Sammenlignet med forbrenning av hydrokarboner, utstråler hydrogenflammer betydelig mindre varme. Dermed merker ikke personer denne varmen fysisk før de har direkte kontakt med flammen. En hydrogenbrann kan forbli uoppdaget og vil spre seg til tross for at personer direkte overvåker områdene der hydrogen kan lekke, renne ut eller samle seg og danne potensielt brennbare blandinger. Derfor er konvektiv varme fluks og varmestrålingsfluks viktige parametere og må vurderes for beskyttelse av liv, eiendom og miljø.

4.4 Detonasjonsgrenser

En detonasjon er det verste tenkelige scenarioet for en ulykke som involverer hydrogen. Hydrogen har et større detonasjonsområde sammenlignet med andre drivstoff (figur 5). Diagrammet viser øvre og nedre detonasjonsgrense for fire drivstoff [6].



Figur 5. Eksplosjonsområde i henhold til data publisert i [6] for hydrogen og andre vanlige drivstoff

Detonasjonsområdet nevnt i den tekniske rapporten [6] er mellom 18 og 59 volumprosent hydrogen i luft. Dette området er mindre enn og innenfor brennbarhetsområdet på 4–75 volumprosent. Detonasjonsområdet på 13–70 volumprosent rapporteres for hydrogen-luftblandinger i et rør med en diameter på 43 cm [23]. En nedre detonasjonsgrense på 12,5 volumprosent ble observert i det russiske eksplosjonstestlaboratoriet RUT [3]. Det største detonasjonsområdet for hydrogen i luft 11–59 volumprosent anbefales av Alcock et al. [13].

5. Sammenligning av hydrogen med andre drivstoff

Hydrogen er ikke mer eller mindre farlig enn noe annet konvensjonelt drivstoff. Hydrogen er et uvanlig drivstoff. Den har et unikt sett med egenskaper som skiller seg fra andre kjente drivstoff. Og det følger av materialene som ble gjennomgått tidligere i denne lekkasjer, at hydrogenlekkasjer gir grunnlag for forbrenning ved strømningshastigheter som er mye lavere enn lekkasjer av andre drivstoff [27]. Hydrogenflammer stråler minst av drivstofflammene, og avblåsningsgrensene for massestrømhastighet er høyere enn for metan og propan. Hydrogenflammer forårsaker mye raskere korrosjon enn metanflammer når de treffer prøver laget av aluminium, rustfritt stål og silisiumkarbidfibre [31]. Den volumetriske lekkasjeraten til hydrogen gjennom den samme lekkasjen med samme baktrykk, ble funnet å være betydelig høyere enn for metan og propan [36]. Hydrogen har de laveste verdiene av molekylmasse, tetthet og viskositet. Varmeledningsevnen til hydrogen er betydelig høyere enn for andre gasser. Diffusjonskoeffisienten i luft er den høyeste blant alle gasser. De uønskede konsekvensene av hydrogenutslipp i åpne eller delvis lukkede rom (uten opphopning av



hydrogen), reduseres drastisk av oppdriften, sikkerhetselementet til hydrogen. Hydrogen vil strømme ut fra et hendelsessted og blandes med omgivelsesluften til et sikkert konsentrasjonsnivå, dvs. under LFL (4 volumprosent i luft).

Hydrogen har den høyeste brennverdien per masseenheter og lavest per volumenhet. For å gi en konkurransedyktig rekkevidde må hydrogen lagres som trykksatt gass eller gjøres flytende. Dette har åpenbare sikkerhetskonsekvenser. Oppsummeringen av de viktigste fysiske parameterne vises i [tabell 8](#).

Den nedre flammegrensen (LEL, Lower Explosion Limit eller LFL, Lower Flammability Limit) for hydrogen er høy sammenlignet med de fleste hydrokarboner. Den nærstøkiometriske konsentrasjonen av hydrogen i luft (29,5 volumprosent) er mye høyere enn den for hydrokarboner (vanligvis bare noen få prosent). Ved LEL er behovet for antennelsesenergi for hydrogen det samme som for metan, og svake antennelseskilder som gnister fra elektrisk utstyr, elektrostatiske gnister eller gnister fra truffede gjenstander, innebærer vanligvis mer energi enn det som er nødvendig for å tenne disse brennbare blandingerne [37].

Tabell 2. Egenskaper for hydrogen sammenlignet med andre drivstoff [7]

	Hydrogen	Natural gas	Petrol
Colour	No	No	Yes
Toxicity	None	Some	High
Odour	Odourless	<u>Mercaptan</u>	Yes
Buoyancy relative to air	14 times lighter	2 times lighter	3.75 times heavier
Energy by weight	2.8 times more than petrol	~1.2 times more than petrol	43 MJ/kg
Energy by volume	4 times less than petrol	1.5 times less than petrol	120 MJ/Gallon

En sammenligning av viktige brennbarhets- og eksplosjonsindekser for hydrogen og annet drivstoff vises i [tabell 3](#).

Tabell 3. Sammenligning av brennbarhets- og eksplosjonsindekser for hydrogen og annet drivstoff [6, 7]

	Hydrogen	Natural gas	Petrol vapour
Flammability in air (LFL – UFL), vol. %	4.1 - 75	5.3 - 15	0.8 - 8.1
Detonability in air (LDL – UDL), vol. %	18.3 - 59	5.7 - 14	1.4 - 3.3
Stoichiometric mixture in air, vol. %	29.59	9	2
Flame temperature (°C)	2130	1961	1977

Den laminære forbrenningshastigheten til støkiometrisk hydrogen-luft-blanding på ca. 2 m/s er svært stor sammenlignet med de fleste hydrokarboner, der hastighetene ligger i området 0,30–0,45 m/s. Hydrogen er mer utsatt for overgang fra deflagrasjon til detonasjon (DDT) sammenlignet med de fleste andre brennbare gasser [3].

Sammenlignet med andre drivstoff er hydrogen det som er mest utsatt for spontan antennelse ved plutselige utslipp til luft pga. den såkalte diffusjonsmekanismen; når luft med høy temperatur, oppvarmet av et sjokk, blandes med kaldt hydrogen på kontaktflaten mellom de to gassene, og kjemiske reaksjoner kan starte når kritiske forhold er nådd. Faktisk kan plutselige hydrogenutslipp til et rør fylt med luft, ved revne i en sikringsskive, spontant antennes ved trykk så lave som ca. 2 MPa [37]. På den annen side er standard selvantennelsestemperatur for hydrogen i luft over 520 °C, noe som er høyere enn for hydrokarboner. Interessant nok er antennelsestemperaturen ved varmluftstråle lavere for hydrogen sammenlignet med alle hydrokarboner, og reduseres ytterligere med økningen i strålediameter [37].

Ytelsen til oktan (dvs. hydrokarbon) brukes som en standard for å måle motstand mot banking i forbrenningsmotorer, og har et relativt oktantal på 100. Drivstoff med et oktantal over 100 har mer motstand mot selvantennelse enn selve oktanet. Hydrogen har et svært høyt forskningsoktantall og er derfor motstandsdyktig mot banking (forbrenning under magre forhold), dvs. 130+ (mager forbrenning) sammenlignet med andre drivstoff: metan (125), propan (105), bensin (87), diesel (30). Oktantallet har ingen relevans for bruk av hydrogen med brenselceller [1]. Kvelningsavstanden (dvs. den minimale rørdiameteren som en ferdigblandet flamme kan spre seg gjennom) for hydrogen, metan og propan er henholdsvis 0,51 mm; 2,3 mm og 1,78 mm [26]. Dermed har hydrogen den laveste Kvelningsavstanden [3].

Hydrogenbranner slukkes normalt ikke før tilførselen av hydrogen er stengt av, på grunn av fare for gjentenning og «eksplosjon». Creitz [38] publiserte resultater om slukking av diffusjonsflammer på en brenner plassert i en Pyrex-mantel for seks forskjellige drivstoff. Forskjellen i slukningseffektiviteten til en hemmer som er introdusert på de to sidene av reaksjonssonen for diffusjonsflammer er målt som en funksjon av oksygenkonsentrasjon i

oksygen-nitrogen-blandingen som tilføres flammene. Sammenligning av slukkeegenskapene til nitrogen (N_2), metylbromid (CH_3Br), bromotrifluormetan (CF_3Br) for forskjellige drivstoff som brenner i luft vises i tabell 4 (i volumprosent).

Tabell 4. Sammenligning av slukkeegenskaper for nitrogen, metylbromid og bromotrifluormetan [38]

Drivstoff	Andel hemmer i luft eller drivstoff ved slukking						Effektivitet i forhold til nitrogen			
	Tilsatt luft			Tilsatt drivstoff			Tilsatt luft		Tilsatt drivstoff	
	N_2	CH_3Br r	CF_3Br r	N_2	CH_3Br r	CF_3Br r	CH_3Br r	CF_3Br r	CH_3Br r	CF_3Br r
Hydrogen	94,1	11,7	17,7	52,4	58,1	52,6	8,0	5,3	0,9	1,0
Metan	83,1	2,5	1,5	51,0	28,1	22,9	33,2	55,4	1,8	2,2
Etan	85,6	4,0	3,0	57,3	36,6	35,1	21,4	28,5	1,6	1,6
Propan	83,7	3,1	2,7	58,3	34,0	37,6	27,0	31,0	1,7	1,6
Butan	83,7	2,8	2,4	56,8	40,0	37,9	29,9	34,9	1,4	1,5
Karbonmonoksid	90,0	7,2	0,8	42,8	19,9	-	12,5	112	2,2	-

Det ble funnet at når hemmeren ble tilsatt drivstoffet, var volumprosenten som kreves for slukking, mye større enn når den ble tilsatt til oksygensiden av reaksjonssonen, med det eneste unntaket av CO-flammer som ble hemmet av bromotrifluormetan. Resultatet til Creitz [38] kan forklares av prinsippet om medrivning, som sier at massestrømhastigheten til det medrevne stoffet inn i en søyle som omgir gass, øker med avstanden fra drivstoffkilden og med søylens impulsfluks. Det er velkjent fra brannsikkerhetsfagene at mengden luft som trekkes inn i en brann i flammehøyde er omtrent to størrelsesordener større enn mengden frigjort drivstoff [3]. Over oksygenkonsentrasjoner i størrelsesorden 25 volumprosent var metylbromid fullstendig ineffektivt når det ble tilsatt oksygensiden av reaksjonssonen, og over ca. 32 % oksygen var det ineffektivt når det ble tilsatt drivstoffet, siden det ved denne oksygenkonsentrasjonen brenner uten ekstra drivstoff.

Slukking av en diffusjonsflamme (les: gassflamme) kan påvirkes av en rekke faktorer, blant annet hastigheten brennstoffet tilføres brenneren i, og hastigheten til sekundærluften forbi flammen [38]. Den siste effekten ble funnet å være viktig ved ganske lave eller svært høye strømningshastigheter. Når hastigheten på drivstofftilførselen var for lav for en gitt brennerstørrelse, ville ikke flammen brenne, og omvendt, når hastigheten var for høy, oppsto



oppdrift, og flammen hadde en tendens til å flyte vekk og bli slukket. Den sistnevnte observasjonen i Creitz [38] kan skyldes skjermvirkningen til Pyrex-mantelen som begrenser hvordan oksidanten trekkes inn i flammen. Denne spesielle testbetingelsen begrenser betydningen av konklusjonene fra slike eksperimenter [3].

I testen utført av Creitz [38] er betingelsene for slukking av hydrogen de vanskeligste blant drivstoffene som er testet, og krever mer hemmer. Metyl bromid er mer effektivt for å slukke hydrogendiffusjonsflamme i luft sammenlignet med bromotrifluormetan. Arbeidet til Creitz [38] kan betraktes som en sammenlignende studie av slukkingseffektiviteten til utvalgte hemmere for forskjellige drivstoff heller enn kvantitativ anbefaling om konsentrasjoner for hemmere for slukking av virkelige flammer, spesielt turbulente gassflammer, som er karakteristiske for hydrogenteknologier [3].

Referanser:

1. Rigas, F og Amyotte, P (2013). Hydrogen safety. Boca Raton: CRC press. Taylor og Francis Group.
2. Rigas, F og Amyotte, P (2013). Myths and facts about hydrogen hazards. Chemical Engineering Transactions. Vol. 31.
3. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Tilgjengelig fra: www.bookboon.com, gratis nedlasting av e-bok.
4. BRHS, Biennial Report on Hydrogen Safety (2009). The European network of excellence wSafety of hydrogen as an energy carrier» (NoE HySafe). Tilgjengelig fra: www.hysafe.org [6.11.20].
5. NASA (1997). Safety standard for hydrogen and hydrogen systems. Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation. Teknisk rapport NSS 1740.16, Office of safety and mission assurance, Washington. Tilgjengelig fra: <http://www.hq.nasa.gov/office/codeq/doctree/canceled/871916.pdf> ble trukket tilbake 25. juli 2005 [6.11.20].
6. ISO/TR 15916 (2004). Basic considerations for the safety of hydrogen systems. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneve.
7. US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders. Tilgjengelig fra: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [6.1.20].
8. AIAA standard G-095-2004 (2004). Guide to safety of hydrogen and hydrogen systems. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, USA.
9. Health and Safety Executive (1975). The Flixborough disaster: report of the court of inquiry, HMSO, ISBN 0113610750, 1975.

10. Buncefield Investigation (2010). The Buncefield major incident investigation board. Tilgjengelig fra: <https://www.hse.gov.uk/comah/buncefield/policyproceduresreport.pdf> [6.11.20].
11. Lind, CD (1975). What causes unconfined vapour cloud explosions? *Loss Prevention*, 9, pp. 101–105.
12. McCarty, RD, Hord, J og Roder, HM (1981). Selected Properties of Hydrogen. NBS Monograph 168, National Bureau of Standards, Boulder, CO, February 1981.
13. Alcock, JL, Shirvill, LC og Cracknell, RF (2001). Comparison of existing safety data on hydrogen and comparative fuels. Deliverable report of European FP5 project EIHP2, mai 2001. Tilgjengelig fra: http://www.eihp.org/public/documents/CompilationExistingSafetyData_on_H2_and_C omparativeFuels_S..pdf [6.11.20].
14. Baratov, AN, Korolchenko, AY og Kravchuk, GN (red.) (1990). Fire and explosion hazards of substances and materials. Moskva: Khimia. 496 s., ISBN 5-7245-0603-3 del 1, ISBN 5-7245-0408-1 del 2 (på russisk).
15. Yang, JC, Pitts, WM, Fernandez, M og Kuldeep, P (2011). Measurements of effective diffusion coefficients of helium and hydrogen through gypsum. Proceedings of the Fourth International Conference on Hydrogen Safety, paper ID 144, 12–14 september 2011, San Francisco, USA.
16. Walker, G (1983). Cryocoolers, Part 1: Fundamentals. New York: Plenum Press.
17. Coward, HF og Jones, GW (1952). Limits of flammability of gases and vapors, Bulletin 503, Bureau of Mines, p. 155.
18. Schroeder, V og Holtappels, K (2005). Explosion characteristics of hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures at elevated pressures. 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy.
19. Ono, R, Nifuku, M, Fujiwara, S, Horiguchi, S, Oda, T (2007). Minimum ignition energy of hydrogen-air mixture: Effect of humidity and spark duration. *Journal of Electrostatics*, 65. s. 87–93.
20. Zuettel, A, Borgschulte, A, Schlapbach, L, Red. 2008 Hydrogen as a Future Energy Carrier, Wiley-VCH Verlag, Berlin, Germany, kap. 4, s. 90–93.
21. Zabetakis, MG og Burgess, DS (1961). Research on the hazards associated with the production and handling of liquid hydrogen. Bureau of Mines Report of Investigation RI 5707, US Department of Interior.
22. Hord, J (1978). Is hydrogen a safe fuel? *International Journal of Hydrogen Energy*, 3, s. 157.

23. Tieszen, SR, Sherman, MP, Benedick, WB, Shepherd, JE, Knystautas, R og Lee, JHS (1986). Detonation cell size measurements in hydrogen-air-steam mixtures. *Progress in Astronautics Aeronautics*. Vol. 106, s. 205–219.
24. Van Dolah, RW, et al. (1963). Review of Fire and Explosion Hazards of Flight Vehicle Combustibles. BM-IC-8137, Bureau of Mines, Pittsburgh, PA.
25. Wionsky, SG (1972). Predicting Flammable Material Classifications. *Chemical Engineering*, 79 (26). s. 81–86.
26. Kanury, AM (1975). Introduction to combustion phenomena: (for fire, incineration, pollution and energy applications). New York; London: Gordon and Breach.
27. Butler, MS, Moran, CW, Sunderland, PB og Axelbaum, RL (2009). Limits for hydrogen leaks that can support stable flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34. s. 5174–5182.
28. SAE J2579 (2009). Technical information report for fuel systems in fuel cell and other hydrogen vehicles, SAE International, Detroit, Michigan, USA, January, 2009.
29. Lecoustre, VR, Sunderland, PB, Chao, BH og Axelbaum, RL (2010). Extremely weak hydrogen flames, *Combustion and Flame*. Vol. 157, s. 2209–2210.
30. Cheng, TS, Chao, YC, Wu, CY, Li, YH, Nakamura, Y, Lee, KY et al. (2005). Experimental and numerical investigation of microscale hydrogen diffusion flames. *Proceedings of Combustion Institute*, 30, s. 2489–2497.
31. Sunderland, PB (2010). Hydrogen microflame hazards, Proceedings of the 8th International Short Course and Advanced Research Workshop i serien «Progress in Hydrogen Safety», Hydrogen and Fuel Cell Early Market Applications, 11–15 oktober 2010, University of Ulster, Belfast.
32. Kalghatgi, GT (1981). Blow-out stability of gaseous jet diffusion flames. Part I: in still air. *Combustion Science and Technology*, 26(5), s. 233–239.
33. Matta, LM, Neumeier, Y, Lemon, B og Zinn, BT (2002). Characteristics of microscale diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 29, s. 933–938.
34. Cheng, TS, Chen, CP, Chen, CS, Li, YH, Wu, CY og Chao, YC (2006). Characteristics of microjet methane diffusion flames. *Combustion Theory and Modelling*, 10, s. 861–881.
35. Lee, ID, Smith, OI og Karagozian, AR (2003) Hydrogen and helium leak rates from micromachined orifices. *AIAA Journal*, vol. 41, s. 457–463.
36. Swain, MR og Swain, MN (1992). A comparison of H₂, CH₄, and C₃H₈ fuel leakage in residential settings. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 17, s. 807–815.



37. Dryer, FL, Chaos, M, Zhao, Z, Stein, JN, Alpert JY og Homer, CJ (2007). Spontaneous ignition of pressurized releases of hydrogen and natural gas into air. *Combustion Science and Technology*. Vol. 179, s. 663–694.
38. Creitz, EC (1961). Inhibition of diffusion flames by methyl bromide and trifluoromethyl-bromide applied to the fuel and oxygen sides of the reaction zone. *Journal of Research for Applied Physics and Chemistry*. Vol. 65A, s. 389–396.