



European Train the Trainer Program for Responders

Leksjon 9

Fareavstander fra hydrogenflammer og brannslukking

NIVÅ I

Brannkonstabel

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

Dette emnet er også tilgjengelig på nivå I–III.

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 materialet tilhører HyResponder Consortium og skal krediteres deretter, resultatene fra HyResponse har blitt brukt som grunnlag



Leksjon 9: Avstander fra hydrogenflammer og brannslukking

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 konsentrerer seg om antente hydrogenutslipp. En nyttig terminologi blir introdusert i starten. Deretter gis en klassifisering av forskjellige typer hydrogenbranner

Nøkkelord

Hydrogenbrann, flammelengde

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. Hovedterminologi	6
4. Typer hydrogenbranner og -flammer	8
5. Varmestrålingsfluks fra jetbranner og ildkuler	9
5.1 Varmestrålingsfluks fra jetbranner.....	9
5.2 Hydrogenjetbranner kontra jetbranner av vanlige drivstoff.....	9
6. Brann i FC-bil	11
Takk.....	12
Referanser.....	12

Leksjon 9: Avstander fra hydrogenflammer og brannslukking

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 2) 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

Ofte omtales «sikkerhet» som en «ikke-teknisk» barriere for fremvoksende FCH-teknologier. Men det er flere tekniske utfordringer som må løses før man ruller ut disse teknologiene på markedet. En av dem er reduksjon av flammelengden til hydrogenstråle fra nåværende verdi på 10–15 m fra FC-kjøretøyets innbygde tank for at nødetatene skal kunne evakuere, redde og beskytte passasjerer. Et annet viktig uløst problem er å øke brannmotstandsgraden til innebygde hydrogentanker fra 1 til 7 minutter (gjeldende verdi for type IV-beholdere) for å ha lengre tid til tømning av tanker. Dette kan forhindre alvorlig skade på sivile bygninger som garasjer under utilsiktet hydrogenutslipp. I tillegg vil det utelukke selv en sjanse for at det dannes store hydrogen-luft-skyer inne i tunneler, som kan føre til dødsulykker i hele tunnellengden ved brann. Den høyere brannmotstandsgraden til hydrogentanker vil tillate sikker evakuering av sivile fra et ulykkessted, noe som redder livet til passasjerer og utrykningspersonell [1].

Nødetatene vil utvilsomt måtte håndtere hendelser eller ulykker som involverer hydrogenflammer, fordi hydrogenbrann er et typisk scenario for mange ulykker. Kunnskap om

Leksjon 9: Avstander fra hydrogenflammer og brannslukking

mulig hydrogenflammelengde og tilhørende separasjonsavstander er avgjørende for nødetatene. Det vil også være varmestråling fra en brann, som kan forårsake skade på mennesker og konstruksjoner, bygninger, utstyr osv. på avstander utover flammelengden. Flere faktorer som påvirker omfanget av en jetbrann og tilhørende varmestrålingsfluks, inkludert hydrogenlagertrykk og en lekkasjestørrelse, vil bli diskutert i leksjonen. Metoder for deteksjon av hydrogenbrann samt teknikker for demping og slukking av hydrogenbranner vurderes også i denne leksjonen.

Ved slutten av denne leksjonen skal du kunne følgende:

- Skille mellom forskjellige typer hydrogenbranner: fra mikroflammer til jetbranner og ildkuler.
- Vurdere hydrogenflammelengder ved hjelp av nomogram, dimensjonsriktige og dimensjonløse korrelasjoner,
- Vurdere gjennomsnittlig plassering av jetflammespissen
- Forutsi fastsettelse av separasjonsavstander for å beskytte mennesker og bygninger
- Forklare effekten ulike faktorer har på flammelengden til jetbrann: størrelse og form på drivstoffpistol, strålerørfeste, oppdrift, barrierer eller vegger
- Sammenligne flammelengder og varmeflukser fra jetbranner mellom hydrogen og andre vanlige drivstofftyper (CNG og LPG),
- Forklare trykkvirkningene av hydrogenjetbranner
- Identifisere de viktigste metodene for deteksjon av hydrogenbranner
- Gjenkjenne dempingsteknikker for hydrogenbranner
- Implementere slokkepraksis for hydrogenbranner
- Forstå de viktigste sikkerhetsutfordringene knyttet til den nåværende statusen for FCH-teknologier.

3. Hovedterminologi

For å fullt ut forstå hydrogenbranner og andre beslektede fenomener (for eksempel mikroflammer, kvelning, lift-off-, blow-off- og utblåsningsfenomener, varmestråling, flammesynlighet, flammelengde og -hastighet, pågående jetbranner osv.) vil det være nyttig å lære noen definisjoner oppført nedenfor. Vær oppmerksom på de dimensjonsløse størrelsene, som vil bli ofte brukt i denne og ytterligere leksjoner.

Trykkreduksjon er en prosess der beholdertrykket reduseres over tid på grunn av en lekkasje [1].

Blow-off er når en flamme slukker ved høy hastighet uten lift-off [2].

Blow-out er når en flamme slukker ved høy hastighet med lift-off [2].

Blow-out-grense er hastighetsgrensen for drivstoffstrømmingen der en løftet flamme oppnår blow-out [2].

Leksjon 9: Avstander fra hydrogenflammer og brannslukking

Deflagrasjon er prosessen etter en svak antennelse i en brennbar blanding, som spres seg i en subsonisk hastighet til fersk, ubrent blanding [3].

Detonasjon er prosessen der forbrenningsbølgen spres seg med en supersonisk hastighet i det ureagerte mediet [3].

Drop-back er når en løftet flamme fester seg til dysen igjen når lift-off-hastigheten reduseres [2].

Effektiv diameter er strålediameteren på stedet der ekspansjon ned til 1 bar finner sted, i en under-ekspandert stråle [4].

Ekspandert stråle er strålen med et trykk ved dyseutgangen lik atmosfærisk trykk [1].

Brannmotstandsklassifisering er et mål på tiden et passivt brannbeskyttelsessystem motstår en standard brannmotstandstest [1].

Flamme-lift-off er tilstanden der flammen og en brenner blir atskilt.

Flammehastighet er flammens hastighet i forhold til en fast observatør [3].

Flammepunkt (eng. *flashpoint*) er den laveste temperaturen der drivstoffet avgir tilstrekkelig mengde gass til å danne en brennbar blanding med luft på overflaten [1].

Froudes tall (*Fr*) er det dimensjonsløse tallet som uttrykker forholdet mellom treghetskrefter og tyngdekrefter [1].

Fareavstand er avstand fra (kilden til) fare til en bestemt (ved fysisk eller numerisk modellering eller ved forskrift) fysisk effektverdi (vanligvis varme eller trykk) som kan føre til en skadesituasjon (fra «ingen skade» til «maksimal skade») på mennesker, utstyr eller miljø.

Laminær forbrenningshastighet er flammespredningshastigheten i forhold til hastigheten til den ubrente gassen som ligger foran den, under angitte betingelser for sammensetning, temperatur og trykk for den ubrente gassen [1].

Lift-off-høyde er høyden fra dyseutgangen til bunnen av en løftet flamme [2].

Lift-off-hastighet er drivstoffets strømningshastighet som gjør at en flamme løsnes fra dysen [2].

Machtall (*M*) er det dimensjonsløse tallet som uttrykker forholdet mellom den lokale strømningshastigheten og den lokale lydshastigheten [1].

Maksimalt tillatt driftstrykk (*MAWP*) er det maksimale trykket som en komponent eller del av trykksystemet kan utsettes for i hele området av dimensjonerende utetemperaturer [5].

Normale temperatur- og trykkforhold (*NTP*) er: temperatur 293,15 K og trykk 101,325 kPa [1].

Diffusjonsflamme er en flamme der oksidant og drivstoff ikke blandes før det når en flammefront. Under forbrenning kombineres oksidanten med et drivstoff ved diffusjon. Flammehastigheten er begrenset av diffusjonshastigheten.

Leksjon 9: Avstander fra hydrogenflammer og brannslukking

Overtrykk er trykket i en eksplosjonsbølge over atmosfæretrykket, eller trykket i en inneslutningsstruktur som overstiger det maksimalt tillatte driftstrykket til inneslutningsstrukturen [5].

Forhåndsblandet flamme er en flamme der oksidanten er blandet med drivstoffet før den når flammefronten. Forbrenning av ferdigblandet drivstoff og oksidant danner en tynn flammefront fordi reaktantene er lett tilgjengelige.

Kvelningsavstand er gnistavstanden mellom to flate parallelle elektroder der antennelse av brennbare drivstoff-luft-blandinger undertrykkes. Kvelningsavstanden er kravet til avstanden i en passasje for å forhindre spredning av åpen flamme gjennom en brennbar drivstoff-luft-blanding som fyller passasjen [1].

Reynolds-tall (Re) er det dimensjonsløse tallet som uttrykker målet på forholdet mellom treghetskrefter og viskøse krefter [1].

Fareavstand (eller separasjonsavstand) er en minimumsavstand som skiller «spesifikke mål (f.eks. mennesker, bygninger eller utstyr) fra konsekvensene av potensielle ulykker knyttet til driften av et hydrogenanlegg» [6].

Underekspandert stråle er strålen med et trykk ved dyseutgangen over atmosfærisk trykk [1].

Synlig flammelengde er midtlinjeavstanden fra tuppen av dysen til flammeenden [2]. Synlige, infrarøde (IR) og ultrafiolette (UV) digitale bilder brukes ofte til måling av flammelengde, og de målte flammelengdene varierer mellom forskjellige bilder [8].

4. Typer hydrogenbranner og -flammer

Hydrogen kan brenne på ulike måter, blant annet flash-brann, jetbrann, deflagrasjon, detonasjon, etc. Hydrogenbranner kan variere fra mikroflammer med massestrømningshastighet på 10^{-9} kg/s til flammer med høy massestrømningshastighet (flere hundre kg/s). Hydrogenutslipp kan brenne som laminær diffusjon eller turbulente diffusjonsflammer avhengig av Reynolds-tallet (Re) ved lekkasjen. Flammer kan være oppdriftskontrollert og dominert av momentum. De fleste farlige hydrogenutslippene vil være i et momentumdominert regime. Jetbrannene kan, avhengig av forholdene ved lekkasjen, være subsoniske (mach $M < 1$), soniske og sterkt underekspandert supersoniske. I scenariene der revning av tanken med umiddelbart utslipp av hydrogen til atmosfæren rundt, kan det dannes store ildkuler (titalls meter). Eventuelle hindringer, overflater og innkapslinger påvirker jetflammen betydelig. Et spesielt tilfelle er brann som involverer flytende hydrogen (LH_2). Foreløpig er det bare noe kunnskap tilgjengelig om LH_2 -branner. Det er et kunnskapshull med en indikasjon på at kondensering og viskositetsøkning av oksygenet (fra atmosfæren) ved LH_2 -lekkasje/søl ved visse forhold kan føre til eksplosive blandinger.

5. Varmestrålingsfluks fra jetbranner og ildkuler

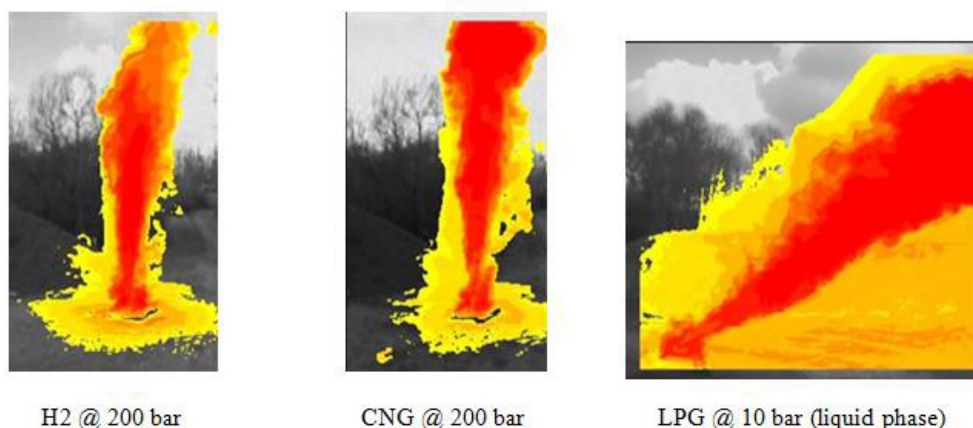
5.1 Varmestrålingsfluks fra jetbranner

Hydrogen brenner med en usynlig flamme i en ren atmosfære. Den har en noe høyere adiabatisk forhåndsblendet flamme-temperatur for en støkiometrisk blanding i luft på 2403 K sammenlignet med andre drivstoff. Denne temperaturen kan være en årsak til alvorlig skade på et ulykkessted, spesielt i rene laboratoriemiljøer der hydrogenflammen praktisk talt er usynlig. Imidlertid vil forbrenning av hydrogen og varme strømmer forårsake endringer i omgivelsene som kan brukes til å oppdage flammen. Selv om den ikke-lysende hydrogenflammen vanskeliggjør visuell deteksjon, er det en sterk effekt av varme og turbulens på den omkringliggende atmosfæren og en stigende søyle av varme forbrenningsprodukter. Disse endringene kalles *brannsignatur*.

Den følgende delen er basert på arbeidet som ble utført på Ulster på HySAFER-senteret [7]. Før vi diskuterer varmemestrålingsfluks, er det verdt å merke seg at en hydrogenflamme avgir minimal infrarød stråling og praktisk talt ingen synlig stråling. På grunn av fraværet av CO₂-strålingsspekter og den sterke absorpsjonen av vanndamp i omgivelsene er forholdet mellom synlige og infrarøde hydrogenstråleflammer 0,88, og forholdet mellom ultrafiolett og infrarød flammelengde er 0,78 [9]. Likevel er konvektive varme flukser og varmemestrålingsfluks fortsatt viktige og må vurderes for beskyttelse av liv, eiendom og miljø.

Effekt av varmemestrålingsfluks på mennesker, miljø og bygninger diskuteres nærmere i leksjon 6 – Skadekriterier for mennesker og eiendom.

5.2 Hydrogenjetbranner kontra jetbranner av vanlige drivstoff

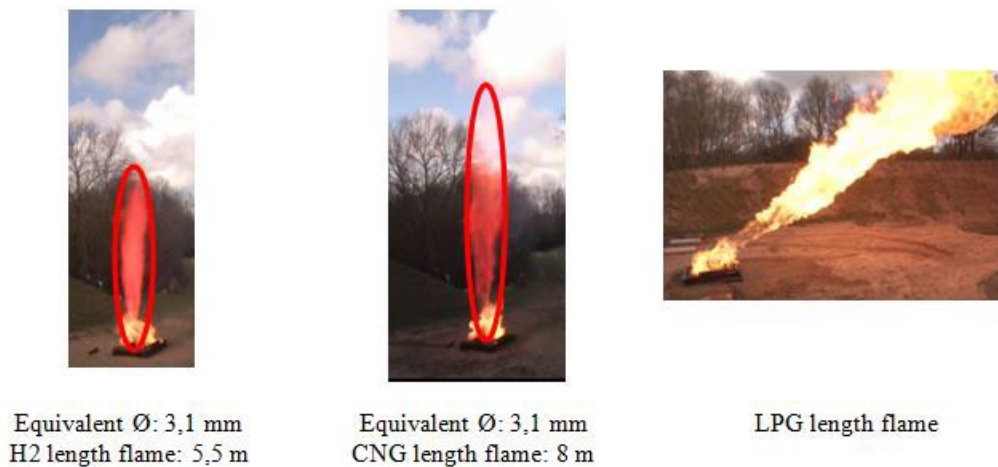


Figur 1. Infrarødt bilde av jetbranner som viser varmemestråling produsert av forbrenning av hydrogen (200 bar), CNG (200 bar) og LPG (10 bar).

Som figur 1 viser produserer CNG og LPG på grunn av ufullstendig forbrenning CO₂, CO, sot og andre produkter som har høyere effekt på strålingen sammenlignet med hydrogen. Dette fenomenet forklarer hvorfor hydrogenforbrenning er preget av lavere termiske effekter enn andre vanlige drivstofftyper, selv om temperaturen overstiger den i en CNG -flamme. Figur 1

Leksjon 9: Avstander fra hydrogenflammer og brannslukking

viser sammenligning av varmestråling produsert av hydrogen (200 bar), CNG (200 bar) og LPG (10 bar) – varmesignaturen til hydrogenjetbrann er litt mindre enn for CNG, og begge er vesentlig mindre enn varmestrålingen fra LPG-brann.



Figur 2. Sammenligning av flammelengder for jetbranner av hydrogen (åpningsdiameter 3,1 mm), CNG (åpningsdiameter 3,1 mm) og LPG.

I tabell 1 vises de beregnede flammelengdene som en funksjon av TPRD-diameter i noen få typiske tilfeller. Verktøyet «Flame length correlation and three hazard distances for jet fires» i e-Laboratory (<https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>) brukes for å få resultatene.

Tabell 1 Beregnet flammelengde vs. TPRD-diameter i typiske tilfeller

Lagringstrykk (bar)	Åpningsdiameter (mm)	Tanktemperatur (°C)	Flammelengde (m)
350	1,0	20	2,6
700	1,0	20	3,3
350	1,0	50	2,5
700	1,0	50	3,2
350	3,0	20	7,8
700	3,0	20	9,9
350	3,0	50	7,5
700	3,0	50	9,6
350	1,0	100	3,1
700	3,0	100	9,2

6. Brann i FC-bil

Brenselcellebil (FC-bil) er et av hovedbruksområdene for FCH-teknologier som er i raskest utvikling. I likhet med en batteri-elektrisk bil har ikke en brenselcellebil forbrenningsmotor. Brenselceller konverterer energien som er lagret i kjemisk form, direkte til elektrisk energi som driver bilene. På verdensbasis er det etablert flere tusen brenselcellebiler, og små flåter av brenselcellebiler brukes spesielt av selskaper og offentlige etater, men også privatpersoner. Dette inkluderer utgitte seriemodeller fra Hyundai (iX35 brenselcelle og NEXO) og Toyota Mirai I- og II -modeller. Mer enn tusen biler kjører i Tyskland med hundre hydrogenstasjoner i drift! Noen brannbiler er også brenselcellebiler.

Som et eksempel ble det ifølge brannstatistikk i Storbritannia [10] registrert 28 800 bilbranner i periode 2011–2012 i Storbritannia. Til sammenligning skjedde det i USA 172 500 bilbranner i samme periode. Ulike typer kjøretøy ble berørt: biler, lastebiler, lette lastebiler, kollektivtransport etc. Flertallet (65 %) av brannene skjedde i biler, 10 % var i varebiler, 4 % var i lastebiler og 2 % i busser eller minibusser [10]. Brannårsaken kan være utilsiktet, tilsiktet eller ukjent. Flertallet av tilsiktede branner (43 %) involverte kjøretøy på vei: 13 900 branner. Antall omkomne i branner i kjøretøy på vei i 2011–12 var 37 [10].

I perioden fra 2000 til 2006 ble det dokumentert 20 katastrofale CNG-tankfeil, 11 av dem har blitt tilskrevet kjøretøybranner [11]. Av disse 11 hendelsene antyder bevisene at flertallet av trykkavlastningsventilene ikke ble aktivert (i tilfelle lokal brann). «Testing har vist at alle drivstofftanker (både CNG og hydrogen) uavhengig av arbeidstrykk er svært utsatt for rask nedbrytning på grunn av lokale branner» [11]. Dette betyr at katastrofal svikt ikke kan utelukkes fra risikovurderingen [10].



Figur 3. Hydrogenjetbrann og bensinbrann: 3 s (venstre) og 60 s (høyre) etter starten av en bilbrann [13].

Fare og tilhørende risiko for brenselcellebiler må bevises og tolkes på en profesjonell måte, med full forståelse av konsekvensene for alle interessenter, fra FC-systemdesignere til regelgivere til brukere. Den første sammenligningen av «alvorlighetsgraden» til hydrogen- og bensinlekkasjer og -antennelser ble utført av Swain [13]. Figur 3 viser øyeblikksbilder av hydrogenjetbrann og bensinbrann 3 s (venstre) og 60 s (høyre) etter en bilbrann startet. Det må

Leksjon 9: Avstander fra hydrogenflammer og brannslukking

påpekes at disse tidlige bildene IKKE gjenspeiler nyere design av vinklede trykkavlastningsventiler med mindre diameter.

I tillegg må lydnivåene forbundet med hydrogenlekkasje og eksplosjon også vurderes.

Takk

HyResponse-prosjektet krediteres ettersom materialet som presenteres her, er utvidet basert på de originale HyResponse-leksjonene.

Referanser

1. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Tilgjengelig fra: www.bookboon.com, gratis nedlasting av e-bok.
2. Cheng, TS, Chiou, CR (1998). Experimental investigation of the characteristics of turbulent hydrogen jet flames. *Combustion Science and Technology*. Vol. 136, s. 81–84.
3. Dorofeev, SB (2009). Evaluation of hydrogen explosion hazards: phenomenology and potential flame acceleration and DDT. 4th European Summer School on Hydrogen Safety.
4. Birch, AD, Brown, MG, Dodson, MG, Swaffield, F (1984). The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas. *Combustion Science and Technology*. Vol. 36, s. 249–261.
5. NFPA® 52. Vehicular Natural Gas Fuel Systems Code, 2019 Edition.
6. LaChance, J, Tchouvelev, A og Engebo, A (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36 s. 2381–2388.
7. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. Ph.d.-avhandling. Universitetet i Ulster.
8. Schefer, RW, Houf, WG, Bourne, B og Colton, J (2006). Spatial and radiative properties of an open-flame hydrogen plume. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 31, s. 1332–1340.
9. Houf, WG og Schefer, RW (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, s. 136–151.
10. Case for safety. Relative frequency of failure modes. Tilgjengelig fra: http://h2safe.net/case_safety.html [25.11.20].
11. Fire statistics, Great Britain, 2011-2012. Department of Communities and Local Government.

Leksjon 9: Avstander fra hydrogenflammer og brannslukking

12. Gambone, LR og Wong, JY (2007). Fire protection strategy for compressed hydrogen-powered vehicles. 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spania, 11.–13. september, 2007.
13. Swain, MR (2001). Fuel leak simulation. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review. Tilgjengelig fra:
<https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535be.pdf> [25.11.20].