



European Train the Trainer Programme for Responders

Leksjon 1

Introduksjon til hydrogenteknologi og sikkerhet for redningsetater

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 opplæringsmaterieill med nivåer I – IV :
Brannkonstabel, uttrykningsleder, 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



Co-funded by
the European Union



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 gir en oversikt over hydrogensikkerhet for nødetatene. Hydrogen har lenge vært benyttet i industrielle sammenhenger både som komprimert gass og i flytende form. Hydrogen er i utgangspunktet ikke farligere enn andre vanlige brensel, men det er annerledes. Det har sine egne egenskaper og tilhørende farer. En økende bruk av hydrogen brenselcelle applikasjoner krever en forståelse av prosessene, farer, sikkerhetssystemer og konsepter, men også profesjonell opplæring av personell som kan håndtere hendelser og ulykker på en trygg måte. Dette vil kreve en omstilling av sikkerhetskulturen, spesielt for nødetatene, som vil være de første som måter nødsituasjoner som kan innebære trykksatt eller flytende hydrogen, både innendørs og utendørs, i urbane bebygde områder, på veiene våre, i rurale områder og i mange andre situasjoner.

Denne leksjonen skal gi en oversikt over hydrogenbrenselcelle (FCH)-systemer og infrastruktur. Potensielle farer, risikoer, sikkerhetssystemer og konsepter knyttet til både stasjonære og mobile FCH applikasjoner blir presentert. En oversikt over den mest vanlige europeiske bruken av hydrogen, produksjonsmetoder, lagringsalternativer og distribusjonsmåter blir presentert.

HyResponder prosjektet anerkjenner at materialet som presenteres er en videreføring av det originale innholdet fra HyResponse leksjonene (<http://www.hyresponse.eu>).

Nøkkelord

Brenselceller, hydrogen, produksjon, lagring, applikasjoner, hydrogensikkerhet

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	3
Nøkkelord	3
1. Målgruppe.....	6
1.1 Rollebeskrivelse: Brannkonstabel	6
1.2 Kompetansenivå: Brannkonstabel.....	6
1.3 Tidligere opplæring: Brannkonstabel.....	6
2. Introduksjon, innhold og mål	6
3. Oversikt over H ₂ produksjon, lagring og industriell bruk	8
3.1 Hydrogenproduksjon.....	8
3.1.1 Elektrolyse av vann.....	8
3.1.2 PEM elektrolysatorer	9
3.1.3 Alkaliske elektrolysatorer	9
3.2 Lagring av hydrogen	10
3.3 Bruk av hydrogen og hendelser knyttet til sikkerhet	12
4. Brenselcellekjøretøy (FCV).....	13
4.1 Viktige komponenter i brenselcelle-kjøretøy	13
4.2 Brenselcellebiler.....	14
4.2.1 Hydrogen lagring i biler.....	15
4.2.2 Hydrogenforsyningen	16
4.2.3 Brenselcellesystemet.....	16
4.2.4 Elektrisk fremdrift og effektstyring	16
4.2.5 Sikkerhetssystemer og konsepter.....	16
4.3 Brenselcellebusser.....	18
4.3.1 Prosjekter knyttet til hydrogenbasert transport.....	18
4.3.2 Sikkerhetssystemer og håndtering	19
4.4 Brenselcelletruck.....	20
4.5 Luftfart	22
5. Hydrogentransport	24
5.1 Lastebil (HGV).....	24
5.1.1 Gasslastebiler	24
5.1.2 Lastebiler for kryogen væske.....	26
5.2 Tog	27
5.3 Rørledninger.....	28



6.	Stasjonære applikasjoner	31
6.1	Kraftvarmesystemer (CHP).....	31
6.2	Nødstrømsaggregat.....	31
7.	Marine applikasjoner	33
8.	Hydrogenbaserte energilagringssystemer	37
9.	Oversikt over hendelser og ulykker	41
9.1	Hendelser og ulykker på FCH-systemer og -infrastruktur	41
9.2	Ulykker som har inntruffet under hydrogenproduksjon.....	42
9.3	En hendelse på en tankstasjon.....	42
10.	Introduksjon til e-Laboratory	43



1. Målgruppe

Informasjonen i denne leksjonen er tilegnet nivå I: Brannkonstabel. Det er også leksjoner tilgjengelig 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. Introduksjon, innhold og mål

Brenselcelle- og hydrogen (FCH)-applikasjoner finnes i dag til både energisektoren og transportsektoren. Det er også ganske sannsynlig at nødetatene vil møte hendelser og ulykker knyttet til dette i nærmeste fremtid. I skrivende stund har det allerede vært flere ulykker knyttet til hydrogen i Norge, som eksplosjonen i Sandvika 10. juni 2019 [24].

Utviklingen av FCH-teknologi krever en bedre dyptgående forståelse fra nødetatene knyttet til farer, prosesser og sikkerhetssystemer knyttet til slikt utstyr og infrastruktur. Hydrogenproduksjon fra elektrolyse og naturgassreforming; Desentraliserte hydrogenproduksjons applikasjoner; flytende og gassfase lagring; hydrogen transportering og materialhåndterings applikasjoner, brenselcellekjøretøy (bil, buss, lastebil og truck); hydrogenstasjoner; stasjonære brenselcellesystemer; hydrogenbaserte energilagringssystemer. Dette er systemer og applikasjoner som til dels er ukjent for de fleste nødetater. I tillegg til



dette så er det en mangel på standardiserte innsatsprosedyrer for hendelser og ulykker knyttet til de overnevnte systemene og infrastrukturene.

Hensikten med denne leksjonen er å introdusere nødetatene for en rekke forskjellige FCH-applikasjoner slik at de kan bli kjent med dem og de tilhørende farene. Det skal gis en oversikt over de vanligste hydrogensikkerhetsmetodene. Nødetatene skal forstå at hydrogen ikke er mer eller mindre farlig enn andre vanlige brenselstyper. Hydrogen er annerledes, og kunnskap om egenskapene vil gi et godt grunnlag for å ta de rette avgjørelsene når det kreves. Nødetatene burde være trent og utdannet til å håndtere hydrogensystemer med trykk opp til 1000 bar (100MPa) og temperaturer ned til -253°C (flytende hydrogen) både utendørs og innendørs.

Denne leksjonen er den første i en serie på 12 leksjoner og bygger på et materiale som ble utviklet i EU prosjektet HyResponse (<http://www.hyresponse.eu/>). Det ble utviklet et internasjonalt pensum innen hydrogensikkerhetstrening for nødetatene. Dette var det første steget i etableringen av en europeisk treningsplattform for nødetater. Pensumet har videre blitt utviklet gjennom HyResponder prosjektet (finansiert av EU) (<https://hyresponder.eu>). Det skal inkludere og reflektere den nyeste kunnskapen og inkludere flytende hydrogen, innelukkede rom, trykksatt utstyr mm.

Dette dokumentet er oversatt til norsk og utvidet til å inkludere noe relevant norsk kontekst av André Gaathaug ved Universitetet i Sørøst-Norge, samt Anders L. Karlsen ved Grenland Brann og Redning og Tor Arne Elverum ved Oslo Brann og Redningsetat.

Dere som følger leksjonen, blir oppfordret til å benytte dette dokumentet til å søke ny og utvidet informasjon. Nå du har fullført denne leksjonen, skal du kunne:

- Verdsette omfanget av ny FCH teknologi i samfunnet
- Forstå rollen til hydrogen som en ny energibærer
- Kunne gjengi de vanligste formene for hydrogen produksjon, transport, lagring og bruk
- Kjenne til vanskelighetene knyttet til allmenn aksept knyttet til hydrogen teknologien
- Kjenne til de vanligste industrielle hydrogen produksjonsprosessene. Denne leksjonen gir ingen dyptgående kunnskap om produksjonsmetoder, men den gir en oversikt over reformer, PEM (proton exchange membrane) og alkaliske elektrolysatorer med et fokus på sikkerhet
- Forklare prinsippet bak en brenselcelle
- Forklare prinsippet og sikkerhetsaspektene knyttet til FCH applikasjoner som brenselcellekjøretøy, hydrogenstasjoner, stasjonære hydrogenlager, materialehåndtering og hydrogen distribusjon, back-up strøm fra brenselceller og systemer for kombinert strøm og varmeproduksjon.
- Gi eksempler på hendelser og ulykker som kan skje med FCH applikasjoner.



3. Oversikt over H₂ produksjon, lagring og industriell bruk

3.1 Hydrogenproduksjon

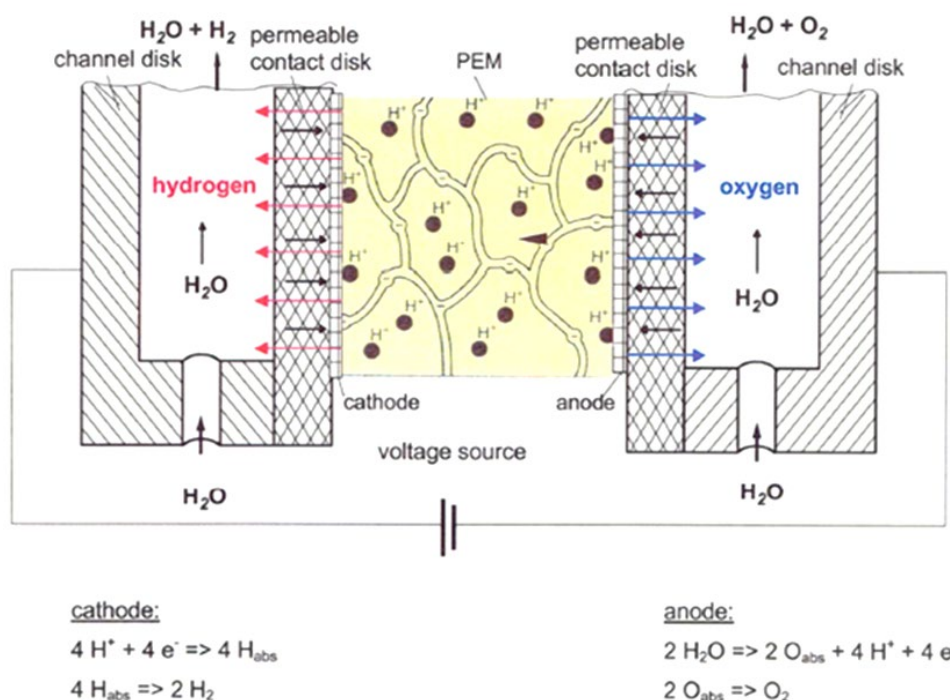
Hydrogen finnes ikke naturlig i store mengder som rent hydrogen. Det betyr at hydrogen må produseres fra andre stoffer som inneholder hydrogenatomer. Dette kan være vann, naturgass, metanol, ammoniakk, etanol, biomasse og lignende. Hydrogenproduksjon kan deles inn i to kategorier: sentralisert storskalaproduksjon og desentralisert produksjon i mindre skala. Den sentraliserte produksjonen refererer til etablerte kjemisk industri som masseproduserer hydrogen slik som Yara i Porsgrunn, Inovyn i Bamble eller Tjelbergodden i Aure. Disse anleggene benytter det produserte hydrogenet videre i sin egen produksjon. Andre steder kan man se for seg at hydrogen kan produseres sentralt og transporteres ut til kunder. Hydrogenet kan i noen land transporteres i rørledninger, mens andre steder vil vei, bane og sjø være transportruter. Air Liquide, Linde og Air Products opererer store damp-reformere som produserer hydrogen. Det er flere etablerte hydrogen produksjons teknologier tilgjengelig på markedet i dag. De vanligste produksjonsmåtene er elektrolyse av vann og damp-reformering av hydrokarboner.

3.1.1 Elektrolyse av vann

Elektrolyse av vann er en prosess, hvor vann spaltes til hydrogen og oksygen ved bruk av elektrisk energi. Dette er vist i ligning (1). Dette betyr at hydrogen produseres ved å sette elektrisk spenning på vann. De to vanligste teknologiene presenteres her.



3.1.2 PEM elektrolysatorer



Figur 1: Funksjonsprinsipp for PEM elektrolysator. Kilde: Areva, 2015

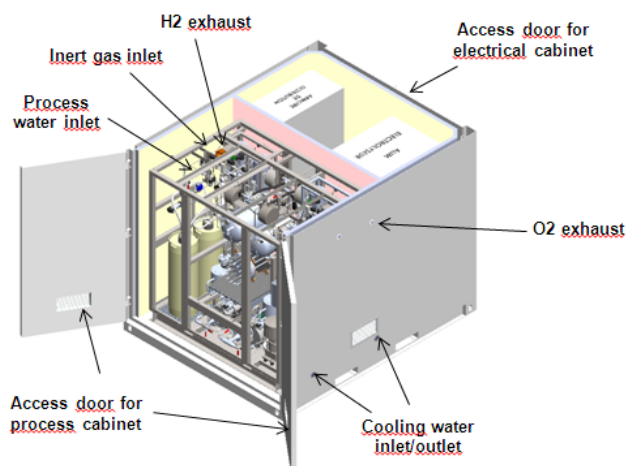
PEM elektrolysatorer er en teknologi som har vært anvendt siden 60-tallet. PEM betyr Polymer Electrolyte Membrane og kan på forstås som en faststoffelektrolytt som slipper gjennom protoner (H^+ ioner). Spenningskilden settes på hver side av membranen, med vann på begge sider. Den ene siden produserer hydrogen, mens den andre siden produserer oksygen [25]. Membranen er under 1 mm tykk.

3.1.3 Alkaliske elektrolysatorer

Elektrolyse av vann ble oppdaget på slutten av 1700-tallet, og siden var det alkaliske elektrolysatorer som var den ledende teknologien. Den er basert på en alkalisk væske som er delt i to med en membran. Ved å sette spenning over membranen så dannes det hydrogen på den ene siden og oksygen på den andre siden [25].

Dannelsen av et hydrogen-oksygen ATEX i utskilleren kan skyldes en feil i vannoverføringsledningen eller en membranperforering. Følgende sikkerhetstiltak vurderes for å unngå ATEX-hendelse i utskilleren:

- iverksette en minimum vannstand i gassutskilleren over 55 % av høyden
- kontrollere vannivået i H_2 - og O_2 -gassutskillerne
- kontrollere trykket og trykkforskjellen mellom H_2 - og O_2 -ledningene
- kontrollere hydrogenskonsentrasjonen ved utgangen av oksyngengassutskilleren



Figur 2. Opplegget til en PEM -elektrolysator [1]

3.2 Lagring av hydrogen

Dette kapittelet gir en oversikt over lagringsmulighetene for hydrogen. Lekkasjer, brann og eksplosjoner samt hvordan hydrogen påvirker andre materialer ved lagring er veldig viktig å forstå, men det dekkes i de kommende leksjonene. Hydrogenlagring er en muliggjørende teknologi for alt fra brenselcelle applikasjoner til hydrogenbiler og stasjonære energilager. Det finnes ingen altomfattende løsning som dekker alle behov, men lager må velges til hvert system. I noen tilfeller vil vekt og volum være styrende, slik som i passasjerbiler og gaffeltrucker. Gode løsninger for lagring av hydrogen er en av hovedutfordringene for hydrogen-økonomien. Det investeres mye fra både industri og forskning på å finne gode og sikre lagringsløsninger. I Norge er Umoe Advanced Composites og Hexagon Composites to store internasjonale leverandører av hydrogentanker.

Lagring av store mengder hydrogen i lengre perioder er viktig i utbyggingen av en FCH-økonomi. Det vil styre konsum og produksjon av hydrogen og påvirke stabiliteten av levering til kundene. Forskjellige undergrunnslager til hydrogen blir undersøkt i Europa. En mulighet er å lagre hydrogen i tomme gassfelt eller i saltgruver. Andre muligheter er undergrunnslager med nedgravde tanker, hvor hydrogen kan være lagret i både flytende og i væskefase. TechnipFMC leder prosjektet Deep Purple hvor de vurderer å lagre store mengder hydrogen i tanker på havets bunn [26].

Det finnes flere typer hydrogenlagring som er tilgjengelig på markedet. Disse kan deles inn tre hovedgrupper:

- Lagring av komprimert gass
- Lagring av flytende hydrogen
- Lagring i faststoff

Det er mest vanlig å lagre hydrogen som flytende eller trykksatt gass i metall- eller komposittflasker eller tanker (se figur 2). Det finnes også noen løsninger hvor man bruker cryo-

compressed lagring. Det vil si lagring under trykk og ved lave temperaturer. Hydrogen-flasker og -tanker finnes i forskjellige størrelser (ofte fra 20 til 300 liter) og trykk mellom 20 og 70 MPa (200 og 700 bar). Noen ganger kan flere flasker kobles sammen til en pakke, mens andre ganger leveres flere separate flasker sammen i en kurv (crate).



a



b



c

Figur 2. Lagringstank i bil (a), flaskepakke med hydrogen (b) og et crate med hydrogenflasker (c).

I praktiske applikasjoner vil gassfase hydrogen gjerne være komprimert til trykk mellom 20 og 100 MPa (200 til 1000 bar). Utfordring med å lagre komprimert hydrogen er at:

- Det kreves mye energi til komprimeringsarbeidet
- Den iboende sikkerhetsutfordringen høye trykk
- Ekstra kostnader tilknyttet og vekten på hydrogen flasker og tanker

I Europa har hydrogenflasker kun en stengeventil som eneste sikkerhetssystem. I USA skal transportable flasker utstyres med trykkavlastningsventiler. Dette er et noe omstridt tiltak siden slike sikkerhetsventiler er den hyppigste årsaken til lekkasjer. For stasjonære hydrogenlager eller lagring i FCH kjøretøy er systemet gjerne integrert med egne sikkerhetssystemer [1].

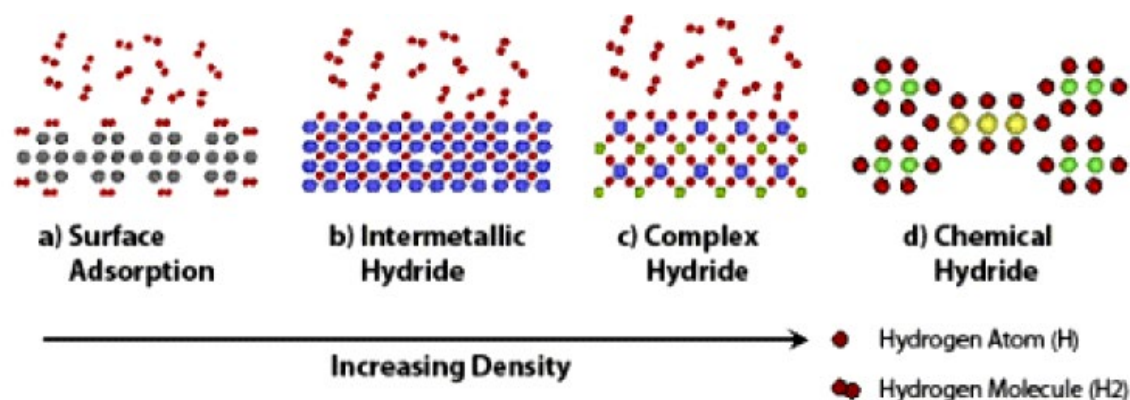
Kryogent hydrogen (flytende) blir dannet når det kjøles ned til temperaturer under kokepunktet på 20K (-253 °C). Dette er den andre vanlige måten å lagre hydrogen på. I Norge vurderes flytende hydrogen som en god løsning for hydrogen på skip. Når hydrogenet er flytende, kan det transporteres eller lagres for en periode, men det vil koke av og forsvinne etter hvert. Denne måten å lagre hydrogen på er mer kostbar på grunn av energien som må til for å kjøle det ned. Det kreves også spesialisert utstyr med god isolasjon for å holde det flytende.

Hydrogen kan også lagres inne i eller på overflaten av visse typer faste materialer. Denne metoden krever ikke veldig høye trykk, ei heller lave temperaturer. Det er en åpenbar sikkerhetsfordel. Det er tre forskjellige metoder for å lagre hydrogen i faste materialer:

- Absorpsjon, hvor hydrogen lagres inne i materialet (som vann i en svamp).
- Adsorpsjon (Figur 3 a), hvor hydrogen festes på overflaten til materialet.

- Kjemiske reaksjoner (Figur 3 b, c og d).

Lagring av hydrogen i fast stoff metaller gir utfordringer knyttet til veldig stor masse av tanken i forhold til massen hydrogen som lagres inne i den.



Figur 3. Faststoff som kan brukes til å lagre hydrogen [2].

Alle disse metodene har sine fordeler og ulemper, sikkerhetsaspektene er også forskjellig og vil bli grundigere vurdert i leksjon 3 «Sikkerhet ved hydrogenlagring». Forskjellige hydrogenlager brukes til forskjellige applikasjoner. Noe passer godt til transport andre til permanente lager og andre igjen til lagertanker på kjøretøy eller skip.

3.3 Bruk av hydrogen og hendelser knyttet til sikkerhet

Hydrogen har blitt brukt i industrien i over hundre år, både som væske og komprimert gass. Et eksempel på tidlig produksjon av hydrogen var på Vemork i Rjukan. Andre steder brukes hydrogen til foredling av råolje; til avkjøling i store turbiner og generatorer; drivstoff (flytende) i raketter og missiler; til produksjon av kunstgjødsel; som reduksjonsmiddel i metallurgisk industri; i halvledere; i glassproduksjon; farmasøytisk industri; i petrokjemisk industri; kjemisk industri og matproduksjon samt mange flere. I Norge kan vi nevne store hydrogen tilknyttede industrier som

- Yara, Porsgrunn – produksjon av kunstgjødsel.
- Inovy, Bamble – produksjon av PVC hvor hydrogen er et biprodukt.
- Tjeldbergodden, Aure – produksjon av metanol.
- TiZir Titanium og Iron, Tyssedal – produksjon av jern og titanslagg [27].

De fleste hendelser og ulykker som er rapportert i [3] har skjedd i laboratorier (omtrent 32 %). De lavere andelen av hendelser i andre settinger kan være på grunn av strenge sikkerhetstiltak knyttet til produksjon og hos sluttbrukere av hydrogen. Den noe lave hyppigheten av hydrogen hendelser og ulykker kan komme til å endre seg de kommende årene ettersom det vil bli langt flere FCH-applikasjoner i drift, både i næringsliv og hos privatpersoner. Mange av disse applikasjonene og bruken av teknologien vil bli gjort av personer uten spesiell



sikkerhetsopplæring. Hendelsesrapporteringen viser at så langt er det 4,6 % av hendelsene som har resultert i tap av menneskeliv [4]. I dag håndteres hydrogen godt i industrien og industrivernet er stort sett oppdatert på håndtering og farer knyttet til hydrogen. Det er likevel et behov for mer opplæring spesielt med tanke på nødetater som skal håndtere hendelser og ulykker i transport sektoren, i offentlige rom og i private hjem. Mye er knyttet opp til farene ved høyt trykk og stor brennbarhet på hydrogen.

Hydrogen er ikke mer eller mindre farlig enn andre brennbare drivstoff inkludert bensin og naturgass. Noen av egenskapene til hydrogen gjør at det kan være et tryggere drivstoff, dette er fordi det er den letteste gassen som finnes og dermed forsvinner den opp og vekk ganske fort. Det er likevel slik, som med alle brennbare brensel, at det må behandles med varsomhet. Akkurat som med bensin og naturgass så er hydrogen brennbart og vil være farlig i gitte sammenhenger. Hydrogen kan håndteres sikkert hvis man følger enkle retningslinjer og hvis brukeren har gode kunnskaper om egenskapene til hydrogen. En slik forståelse og god kjennskap til FCH applikasjoner fører til en sikker implementering av hydrogen som drivstoff og råstoff. Det er nødvendig å tilføre nye elementer i vår allerede etablerte sikkerhetskultur i samfunnet, utvikle innovative sikkerhetsstrategier og finne gode tekniske løsninger. Det er forventet at nye tekniske løsninger i samfunnet er like trygge som de løsningene de erstatter, derfor må hydrogen som drivstoff være like sikkert som bensin og diesel. Sikkerheten til hydrogen ved produksjon, lagring og bruk vil direkte påvirke dets konkurransedyktighet på markedet [5].

4. Brenselcellekjøretøy (FCV)

Hydrogenbrenselcelle (FCH)-teknologi for veitransport er viktig i dag. Noen bilprodusenter, slik som Toyota (Mirai), Honda (Clarity) og Hyundai (Nexo) har biler på markedet i områder hvor det er hydrogenstasjoner i drift. Eksempler på hydrogenkjøretøy inkluderer personbiler; busser, scootere og små lastebiler. De bruker hydrogen som drivstoff, men har ingen forbrenningsmotor. I stedet produseres det strøm fra brenselcellene til et batteri som igjen driver en elektromotor. En tilgjengelig infrastruktur er vital for storstilt implementering av slik teknologi. Disse kjøretøyene ser ut som vanlige biler, men i Norge har de første bilene fått kjennemerket HY XXXXX. I motsetning til vanlige forbrenningsmotorer så slippes det ikke ut forurensende eksos og de er veldig stille i drift. FCV kjøretøy slipper i prinsippet kun ut vanndamp. Et annet segment av kjøretøy er spesialkjøretøy. Det er kjøretøy designet for en spesiell oppgave og opererer gjerne i en flåte av like kjøretøy. FCH gaffeltrucker er et vanlig eksempel i Europa. Et slikt kjøretøy krever gjerne mellom 1.5 til 10kW effekt. For tiden er det mange firmaer som investerer i FC trucker, og da er en fyllestasjon med et tilhørende lager viktig å ha i nærheten. I Norge har ASKO også etablert en flåte av hydrogendrevne lastebiler i Midt-Norge [28].

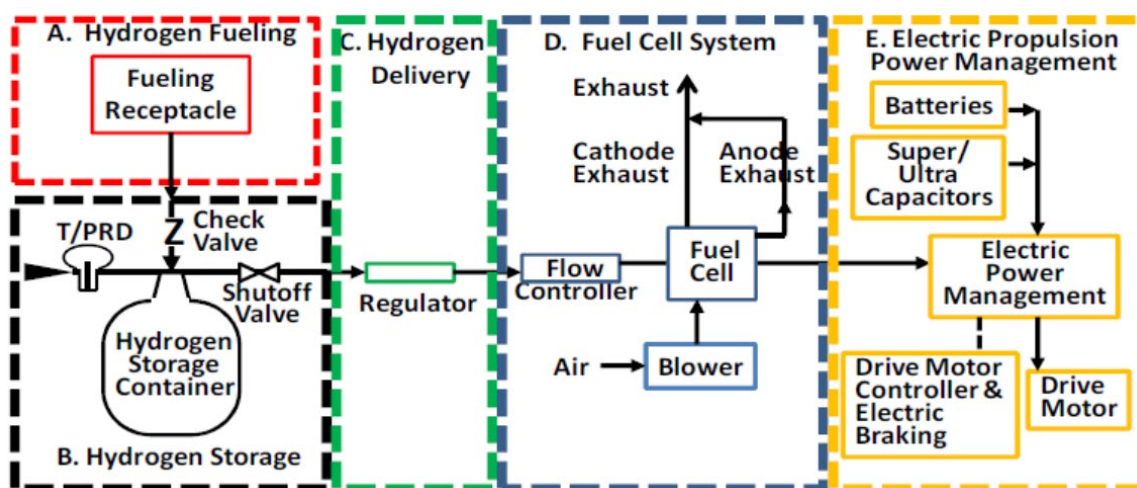
4.1 Viktige komponenter i brenselcelle-kjøretøy

Brenselcellekjøretøy, forkortet FCV, har elektrisk fremdrift som drives av en brenselcelle for å generere strøm fra hydrogen. De har også et batteri hvor elektrisiteten lagres, dette er likt det

systemet som brukes i el-biler, men batteriet er mindre. Batteriet i en brenselcellebil brukes til å levere elektrisk energi raskt (peak power) og lagre energi fra regenerativ bremsing. Det finnes mange forskjellige FCV, men alle har følgende nøkkelkomponenter, se figur 4 [6]:

- Hydrogenfyllesystem
- Hydrogenlagringssystem
- Hydrogenbrenselforsyning
- Brenselcellesystem
- Batterisystem med høy spenning for lagring av elektrisk energi
- Elektrisk fremdriftssystem og effektstyringssystem.

En skisse over nøkkelkomponentene i en FCV er vist i figur 4, fra [6]. Under fylling blir bilens tank forsynt med hydrogen fra en fyllepistol (nozzle) som festes på bilen (A). Derfra strømmer det til lagringssystemet (B). Hydrogenet er da lagret, ofte i gassfase. Når bilen startes så strømmer hydrogenen fra lagringstankene, og reguleres av et system med regulatorer (C) i forsyningssystemet. Disse reduserer trykket fra 700 bars tanken og ned til ca. 10 bar inn mot brenselcellesystemet. Dette kan variere fra produsent til produsent. I brenselcellen (D) blir hydrogen kombinert med oksygen fra luften i en elektrokjemisk reaksjon som produserer strøm. Den elektriske strømmen forsyner elmotoren og overskuddet lader batteriet og ultra-kondensatorer.



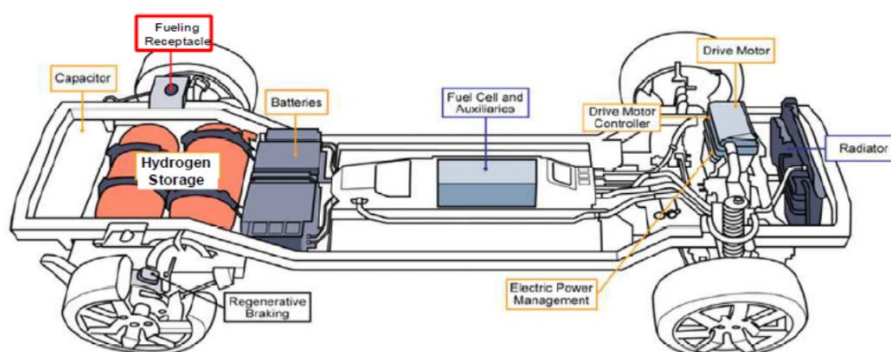
Figur 4. Hovedsystemene i en brenselcellebil [6]

4.2 Brenselcellebiler

Figur 5 illustrerer hvordan de ulike komponentene kan være plassert i en brenselcellebil [6]. Fyllstussen er markert med rødt rektangel (Fueling Receptacle). Den er plassert på den bakre halvdel av bilen, ganske likt andre biler. Akkurat som bensin- og dieseltanker er hydrogentankene gjerne plassert på tvers bakerst i bilen. Det finnes også løsninger hvor tankene er plassert etter hverandre langs midten av bilen, eller en kombinasjon [29]. Brenselcellene

med tilbehøret er gjerne plassert under baksetet eller langs midten av bilen sammen med batteriet. Motorene og effektstyringen er ofte plassert foran i bilen. Vi må likevel forvente at de fleste bilprodusentene velger forskjellige løsninger for plassering av komponenter.

Bilen fylles gjerne opp med hydrogen fra en stasjon. Da er det vanlig at bilen fylles til 125% av arbeidstrykket (NWP, Nominal Working Pressure) for å kompensere for at gassen varmes opp under fylling.



Figur 5. Eksempel på en brenselcellebil [6]

4.2.1 Hydrogen lagring i biler

Hovenfunksjonen til hydrogenlagringen er å motta hydrogen under fylling, oppbevare det til det skal brukes og deretter levere hydrogen til brenselcellene som produserer strøm til bilen. Til nå har det vært mest vanlig å lagre hydrogen i biler i form av komprimert gass (GH₂, Gaseous H₂). Det er utviklet gasstanker som både er lette og sterke. De er laget for å holde 70 MPa (700 bar). Det høye trykket er nødvendig for å lagre store nok mengder hydrogen, slik at bilene har god rekkevidde. En Toyota Mirai har en oppgitt rekkevidde på 650 km og bruker 5 minutter på å fylle tankene [2]. De to vanligste typene tanker som brukes i FCV er vist i figur 6. Det er Type III som er laget av metall innerst og type IV som har plastikk innerst. Begge to er spunnet inn i en fiber-kompositt-struktur. Mye arbeid gjøres for å redusere prisen på slike tanker. Mer informasjon om slike lagringssystemer kommer i senere leksjoner.



Figur 6. 700 bar sylindertypor utviklet og testet innenfor det europeiske STORHY-prosjektet: (a) Type III-teknologi, (b) Type IV-teknologi.



4.2.2 Hydrogenforsyningen

Systemet for å styre hydrogen forsyningen sørger for at gassen leveres ved korrekt trykk og temperatur slik at brenselcellen virker optimalt. Dette justeres med flere ventiler og trykkregulatorer, med filter og varmevekslere, hvor alt er koblet sammen med rør. Fargen på rørene er gjerne sølv/metall, men noen bruker også rød farge på rørene. Hvis det skjer en ulykke og tankene stenges, vil det være små mengder hydrogen i disse rørene. Det er likevel ikke tilrådelig å kutte hydrogenrørene (hvis mulig) ved frigjøring fra biler.

4.2.3 Brenselcellesystemet

Brenselcellesystemet produserer den elektriske strømmen som driver motoren og lader batteriene og/eller super-kondensatorene. Det finnes flere typer brenselceller, men PEM celler er mest vanlig i biler siden de opererer ved lavere temperaturer og derfor ikke krever lang oppstartstid. PEM brenselceller kombinerer hydrogen og oksygen elektrokjemisk og produserer elektrisk strøm. Brenselceller produserer strøm hele tiden og det slippes ikke ut CO₂, bare vann. Det er heller ingen annen forurensning fra utslippet. Generelt er det 400 VDC fra brenselcellesystemet. En omformer brukes for å koble det til batteriet.

4.2.4 Elektrisk fremdrift og effektstyring

Den elektriske strømmen fra brenselcellesystemet brukes til å drive de elektriske motorene, samt drive luftkompressor og aircondition- kompressoren. Mange passasjerbiler med brenselceller har forhjulsdrift, hvor el-motoren er plassert foran under panseret, det finnes likevel løsninger med bakhjulsdrift. Vi kan også forvente at firehjulstrekk vil bli vanlig. Høyspent-batteriet vil gjerne være plassert i en metallbeholder sentralt plassert på rammen til bilen. Forskjellige produsenter vil bruke forskjellige typer batterier. Andre høyspentkomponenter inkluderer kobling til brenselcellen; batteri styrings enhet (BMS, Battery Management System); DC-DC omformer; elmotorer og elektrisk oppvarming. Elektrisiteten fra brenselcellesystemet og høyspent-batteriet ledes gjennom forskjellige kabler. Disse er gjerne plassert nær høyspentsystemet eller lavt nede i bilen. De er lett gjenkjennelige ved sine oransje deksel og rør.

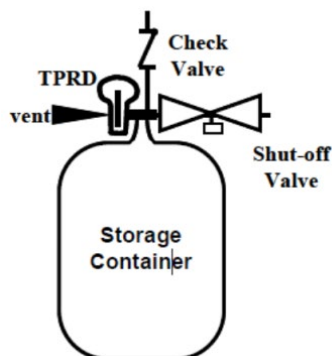
4.2.5 Sikkerhetssystemer og konsepter

FCV blir fylt fra spesielle standardiserte fyllepistoler fra hydrogenstasjonen. Den kobles fast til bilens fylle-stuss og utgjør da et lukket system fra stasjonens lagertank til bilens hydrogentanker. Fyllestussen på bilen har en tilbakeslagsventil og andre systemer som forhindrer lekkasje når fyllepistolen kobles fra bilen.

Komponentene til en typisk komprimert hydrogentank er vist i figur 7, fra [6]. Systemet inkluderer en tank og andre komponenter som utgjør primær-barrierene som forhindrer at hydrogen slippes ut. Det er tre vanlige sikkerhetskomponenter for GH2:

- Tilbakeslagsventil

- Stengeventil
- Termisk aktivert trykkavlastningsventil (TPRD)



Figur 7. Et vanlig lagringssystem for trykksatt hydrogen [6]

Når tankene fylles, strømmer hydrogen gjennom tilbakeslagsventilen. Den er laget for å forhindre at det strømmer feil vei i rørene. En automatisk stengeventil forhindrer at det strømmer ut av tankene når bilen ikke er i drift, eller hvis det oppstår en feil som krever at hydrogentanken kobles fra resten av bilens systemer. Hvis det oppstår en brann, vil den termisk aktiverte trykkavlastningsventilen (TPRD) åpnes og tømme tanken for hydrogen slik at brannen ikke svekker strukturen til tanken så mye at den eksploderer. TPRD er laget for å tømme tankens innhold ganske raskt. Når de først er åpnet så vil de ikke stenge igjen. Tanker som har blitt utsatt for en varmebelastning som førte til at TPRD åpnet, skal ikke benyttes videre, de må skiftes ut og ødelegges. Hydrogen ventileres gjerne ut på utsiden av FCV. Mest vanlig er bak under bilen, i nærheten av tankene [6].

Hydrogenforsyningssystemet skal redusere trykket fra tanktrykket til brenselcellens arbeidstrykk. Ofte må trykket reduseres fra over 70MPa (700bar) ned til under 1MPa (10 bar). Ofte krever det flere steg med trykkreduksjon for stabil massestrøm og beskyttelse mot for høyt trykk i brenselcellesystemet. Denne beskyttelsen kan innebære at det må ventileres ut hydrogen og/eller at forsyningen fra tanken stenges [6].

Det er ofte flere hydrogensensorer plassert inne i bilen. Hvis det oppdages en potensiell farlig lekkasje av hydrogen, så skal systemet stenge forsyningen fra tanken. Det er flere steder hvor produsentene plasserer hydrogensensorene. Ved dashboardet; over hydrogentankene; nær eksosrøret (kun vann); underpanseret; over kupétrekket inne i bilen og andre steder. Når bilen er på så vil disse sensorene hele tiden overvåke konsentrasjonen av hydrogen. Det er gitt i US First Responder SOP (Standard Operating Procedure), at hvis det oppdages en lekkasje over «Warning Level» så skal føreren gjøres oppmerksom på dette ved en H₂ lampe på instrumentpanelet. Det skal gis informasjon i panelet at det er oppdaget en lekkasje. Hvis det oppdages en lekkasje over «Alarm Level», så skal H₂ lampen blinke og det skal varsles med et lydsignal, det skal også informeres at det er oppdaget en lekkasje og at kjøretøyet må



evakueres [7]. Det er verdt å merke seg at det finnes forskjellige standarder for hvilke nivåer (konsentrasjoner av hydrogen) som brukes, men stort sett er SOPene like i de fleste land.

4.3 Brenselcellebusser

Brenselcelle-busser bruker den samme teknologien som brenselcellebiler. Hydrogenet er gjerne lagret i tanker på taket av bussen. Kapasiteten er omkring 40kg. Brenselcellemodulen er ofte plassert i det bakre motorrommet. Brenselcellesystemet på busser er større enn på personbiler og genererer også ofte høyere spenning, rundt 600 V. Fordelen til slike busser i forhold til vanlige dieselbusser er det reduserte utslippet av forurensing og klimagasser, samt noe høyere virkningsgrad og lavere støy.

4.3.1 Prosjekter knyttet til hydrogenbasert transport

Det er en rekke med europeiske prosjekter som undersøker hydrogen-basert transport. Noen eksempler er Clean Energy Partnership (CEP) [8], et prosjekt som tester og demonstrerer brenselcelle og hydrogen (FCH) teknologi til transportsektoren. Prosjektet startet i 2002 som et internasjonalt samarbeid med flere partnere blant annet: BMW Group, Honda, Daimler, Ford, Hyundai, GM/Opel, Toyota and Volkswagen. I 2011 startet den tredje fasen av CEP med markeds forberedende tiltak. Et annet prosjekt er HyFLEET-CUTE som forsøker å utvikle og drifte verdens største flåte av brenselcellebusser. HyFLEET-CUTE prosjektet opererer i dag 47 busser rundt om i Europa [9]. En av byene som har disse bussene er Oslo, hvor Air Liquide opererer en fyllstasjon for hydrogen. Bussene i prosjektet har gitt veldig mye og viktige data til utviklere og operatører. Dette innebærer faktisk bruk og drift under harde forhold, uavbrutt drift og ved noen tøffe klimatiske forhold. Et annet viktig aspekt ved prosjektet har vært å gjøre brukerne oppmerksom på den nye teknologien og oppnå en viss offentlig aksept for bruk av teknologien [9]. Et seksårig FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking) prosjekt, JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe), som startet i 2017 hadde som mål å rulle ut 139 nye hydrogenbusser med tilhørende fyllstasjoner i 5 europeiske land. Dette ble raskt fulgt opp av det neste prosjektet JIVE2 i 2018 som vil rulle ut 300 hydrogenbusser i 22 land. Norge er med som en av de planlagte landene hvor det skal komme JIVE2 busser (<https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/jivejive2mehrlin-leaflet>). Figur 8 viser en hydrogenbuss på veien i London.



Figur 8. Wright Pulsar 2 hydrogendrevet buss på rute RV1 i London.

Zaetta og Madden skrev i 2011 en rapport til Next HyLights prosjektet [10] at:

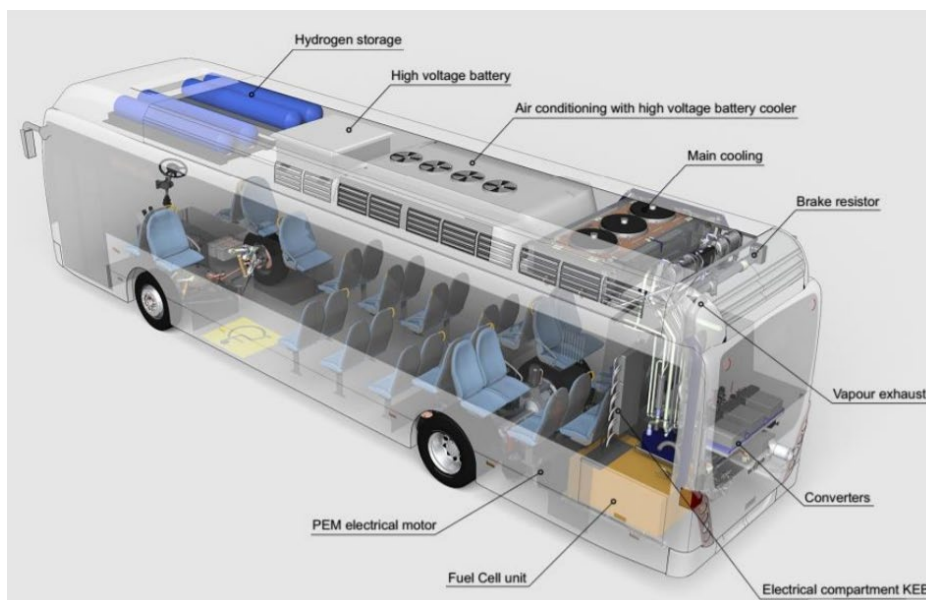
«Brenselcellebuss har utviklet seg veldig mye det siste tiåret. Mange forskjellige design konfigurasjoner har blitt brukt. Dette inkluderer forbrenningsmotorer med stempel og forskjellige brenselcelleteknologier. Det har blitt benyttet direkte drivlinjer og hybride systemer, hvor batterier og ultra-kondensatorer har blitt brukt som energilager for å redusere effekttoppene og lagre energi fra regenerative bremses». (fritt oversatt).

Det er tydelig at mye utvikling har skjedd de siste ti årene etter at dette ble skrevet. Adams [12] forsket på optimale løsninger for å lagre trykksatt hydrogen på bussene. Det ble konkludert med at det måtte være en løsning for å forhindre overfylling av tankene. Det var også et behov for standardiserte enheter slik som fyllpistolen på stasjonene. Dette ville både redusere utviklingskostnadene og samtidig redusere risikoen knyttet til feil bruk ved fylling. Energien som er lagret i en gitt mengde komprimert gass øker når trykket øker, derfor vil høyere trykk gi verre konsekvenser hvis tanken eksploderer. For busser ble det da vurdert at, siden de ikke har like store begrensninger på volum, kan de lagre hydrogen ved lavere trykk enn personbiler. Da gjerne ved 20 eller 35 MPa (200 eller 350 bar) [12].

4.3.2 Sikkerhetssystemer og håndtering

Sikkerhetssystemet til hydrogenbusser er ganske likt det som er for personbiler (FCV). Trykkavlastningsventilen (TPRD) er en termisk aktivert ventil som ikke lukker igjen. Den er designet for å tømme tanken slik at den ikke ryker hvis den blir utsatt for en ekstern brann. Den er laget slik at tanken tømmes og trykket reduseres slik at tanken ikke eksploderer fordi trykket blir for høyt i forhold til materialstyrken til tanken (som gjerne svekkes i en brann). Man må være oppmerksom på at en brann som forårsaker at TPRD ventilen åpner kan føre til at hydrogenet tenner i utslippet og at det oppstår en hydrogenbrann (jet-brann). Hvis det ikke antenner med én gang, kan det dannes en eksplosiv sky av hydrogen og luft. Alle hydrogentanker på busser skal ha en TPRD og det benyttes syrefaste rør til hydrogensystemet.

Bryteren for nødstopning av systemet (ESD, Emergency Shut-down Device) skal være plassert både på førerpanelet og på brenselcellesystemet i motorrommet. En typisk oversikt over en brenselcellebuss er vist i figur 9. (All forklaring er på engelsk).



Figur 9. Oppbygning av hovedkomponentene i en brenselcellebuss [11]

Nødetatene må vite hvordan man håndterer FCV kjøretøy ved trafikkulykker. Den største faren er knyttet til høyspent (opp til 600 V) og høytrykk-hydrogen (opptil 70 MPa, men ofte lavere). I henhold til forskrift EC79/2009 sammen med EC406/2019 så kreves det merking av brenselcellekjøretøy. For lette kjøretøy så skal merket være synlig ved fyllestussen og inne i motorrommet. Det jobbes videre med oppdaterte retningslinjer for merking av kjøretøyene. I Norge fikk de første kjøretøyene HY-skilte.

Redningsdatablad burde være tilgjengelig for alle brenselcellebiler, og burde være tilgjengelig på kjøretøyet. Ideelt sett vil redningsetatene ha tilgang via elektroniske kommunikasjonsmidler. Det er likevel kjent at dette ikke alltid er tilfelle. Kjøretøysinformasjonen burde inneholde høytrykk og høyspent informasjon til nødetatene på forhånd. Likt som for kjøretøy med vanlige brensel vil de vanlige farene også være til stedet, slik som: fjærer; dempere; dekk; panser og koffert dempere; airbag; setebeltestrammere; air-condition systemet og batteriene (12V og høyspenning). Legg merke til at ved å bryte strømmen til lav-spenningssystemet så vil kjøretøyet også skrues av (dette innebærer også hydrogen lager, høyspenning og lavspenningssystemene).

4.4 Brenselcelletruck

Mange europeiske firmaer med store varehus og distribusjonssenter bruker i dag brenselcelletrucker til å flytte gods, gjerne døgkontinuerlig drift [1]. FCV-trucker er hybridkjøretøy som kobler brenselceller, vanligvis fra 1.5 til 10kW, med et batteri. Hydrogenflasker er gjerne lagret



utenfor bygningen. Hydrogenet levers gjerne fra en leverandør eller produseres på stedet ved elektrolyse av vann eller gassreformering. Fylling av truckene skjer vanligvis innendørs (det er også mulig med utendørsløsninger) og det tar kun noen minutter å fylle tanken. Sammenlignet med batteridrevne spesialbiler har FC-trucker lengre levetid. De har mer strøm over lengre tid og tanken kan fylles på mindre enn 3 minutter. En annen fordel med FC-trucker er lavere driftskostnader og økt produktivitet på grunn av færre turer til en batteriladestasjon. Siden det ikke er behov for batteriladere, lagring eller batteribytteområder, blir mer lagerplass tilgjengelig for annen bruk. De største industrielle leverandørene selger innendørs fyllestasjoner for hydrogen til FC-trucker. Et eksempel på en FC-truck og brenselcellen vises i figur 10.



En FC-truck

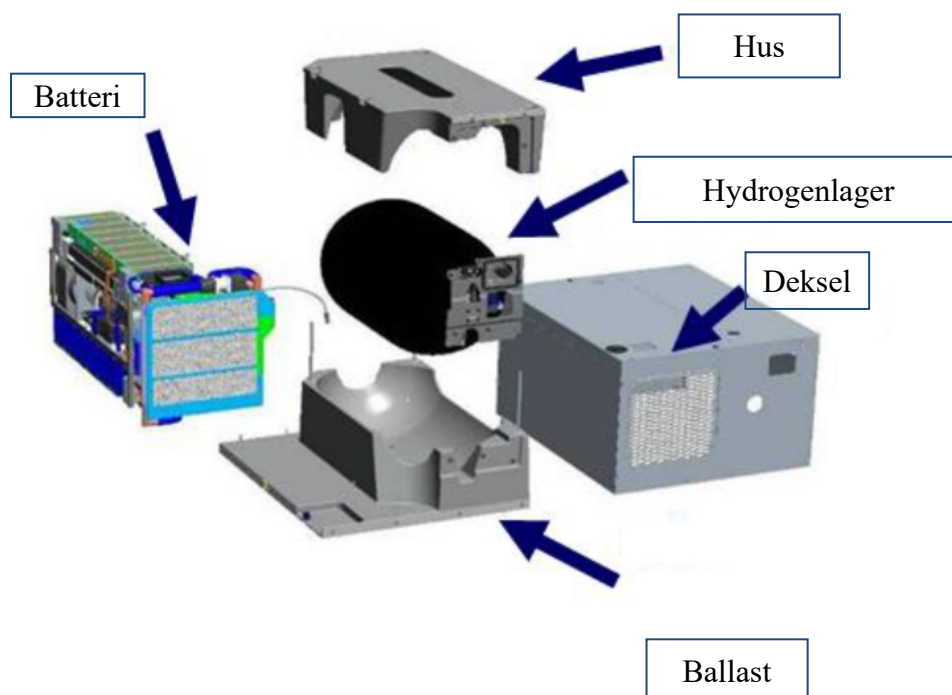


FC-brenselcelle til truck

Figur 10. En FC-truck med FC-brenselcelle [1]

Hovedkomponentene i en FC-enhet er vist på figur 11. De omfatter:

- Brenselcelle (kalt PAC);
- tilleggskomponenter til brenselcelle;
- hydrogentank, der volumet varierer mellom 20 og 70 l og som er utstyrt med et regulatorsystem;
- litiumionbatteri, som har bestått de nødvendige testene fra FN (UNO) spesifisert i FNs testmanual (Manuel of Tests and Criteria), kapittel 38.3;
- vannoppsamlingstank.



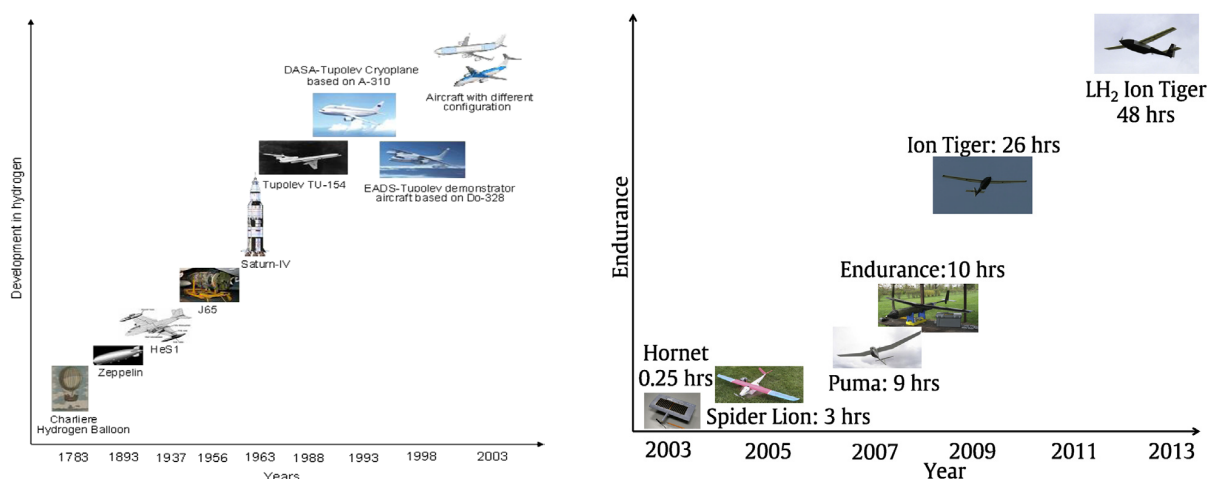
Figur 11. Komponentene i drivstoffcelle for truck

Fra et sikkerhetsmessig synspunkt er hydrogenlageret beskyttet med en TPRD (utløst av en termisk sikring) som er plassert mellom isolasjonsventilen og tanken på trucken. Sikringen åpnes ved 109 °C og tillater rask tømning av hydrogen under trykk. Det er også en tilbakeslagsventil på påfyllingsstussen for å forhindre at gass i lageret slipper ut. Alle komponentene i FC er i tillegg innebygd i et støpejernshus, som igjen er beskyttet av et deksel. Det er to fordeler med dette støpejernshuset: Det gir beskyttelse mot ytre mekaniske skader, og det gjør at hydrogenstrømmen kan ventileres ut ved ekstern termisk påvirkning.

4.5 Luftfart

Studien av bruk av hydrogen som drivstoff i fly startet i 1956. USA fløy et B57 Canberra-fly som brukte hydrogenbrensel trykksatt med helium i en av motorene [13]. Etter B57 testet Sovjet eksperimentell konvertering av en tidlig produksjon av Tu-154, som hadde en motor

som kjørte på hydrogen i 1988. Motoren som gikk på flytende hydrogen, ble testet i høyder opptil 7000 m og akselerert til 900 km/t. Dessverre ble flytende hydrogen (LH)-programmet redusert til bare fem flyvninger, og det ble besluttet å ikke fortsette med slike drivstoff på grunn av høye kostnader og mangel på infrastruktur for hydrogen [14]. Fram til i dag ble mange hydrogenprototypefly som Tupolev Tu-155 (Tupolev, 2009), Antares DLR-H2 (Fuel Cell Works, 2009), Boeing Phantom Eye (Jackson og Haddox, 2010) og ENFICA-FC Rapid 200 - FC (European Commission, 2011) bygd med komprimering og flytende lagringsmetoder [15]. Den historiske utviklingstiden for flytende hydrogen og brenselcelledrevne fly er illustrert i figur 11. I september 2016 gjennomførte verdens første hydrogenbrenselcelledrevne fireseters passasjerfly, HY4, sin første flytur fra Stuttgart lufthavn. I denne fremtidige elektriske drosjen lagres hydrogenbrenselet ved et trykk mellom 4300 PSI og 5800 PSI i to karbonfibertanker som begge er plassert i de to flykroppene. I flyet, som har en maksimal hastighet på 200 km/t, konverterer brenselcellen hydrogenet direkte til elektrisitet, og det eneste avfallsproduktet som kommer ut av denne prosessen er vann [16]. 21. september 2020 avslørte Airbus tre konsepter for verdens første kommersielle nullutslippsfly som kan komme i drift innen 2035. Disse konseptene representerer hver sin tilnærming til nullutslippsflyging, og utforsker ulike teknologier og aerodynamiske konfigurasjoner for å støtte opp om selskapets ambisjon om å gå foran i avkarboniseringen av hele luftfartsindustrien. Alle disse konseptene er avhengige av hydrogen som en primær kraftkilde – et alternativ som Airbus mener har et eksepsjonelt potensial som et rent flydrivstoff, og som sannsynligvis vil være en løsning for romfart og mange andre næringer slik at de kan nå sine klimanøytrale mål.



Figur 12 Historisk tidslinje for utviklingen av fly drevet med hydrogen (venstre) og brenselcelle (høyre)

Et fly har en maksimal startvekt på opptil 640 tonn. Til å bære denne lasten trengs store og kraftige motorer, og disse motorene krever mye drivstoff. Dette drivstoffbehovet gir fordeler og utfordringer knyttet til drivstoffsikkerhet, drivstoffkostnader, spesifikk energi og tilsvarende energieffektivitet. I dag bruker fly i hovedsak petroleumbaserte drivstoff hentet fra fossilt brensel. Blant disse drivstoffene er kostnaden for den mest brukte jetparafinen lavere enn andre



drivstoff [15, 17]. Selv om jetparafin og noen blandinger av bensin var å foretrekke som drivstoff for luftfart, er reservene begrenset, og økte klimagassutslipp påvirker miljøet negativt. På bakgrunn av dette vurderer forskere og produsenter nye måter og former for energihåndtering med alternative/fornybare drivstoff.

På bakgrunn av dette erstattes konvensjonelle fossile drivstoff som brukes i luftfarten, med alternative drivstoff. Et av de viktigste elementene i drivstoffamilien er hydrogen. Hydrogen har blitt fokus for forskere og eksperter på forbrenning de siste årene på grunn av tilgjengelighet, bedre spesifikke energiegenskaper og miljøfordeler.

Det er to alternativer der hydrogen vanligvis brukes i fly, enten som drivstoff i stedet for jetparafin i store fly eller som drivstoff i PEM-brenselceller i jetmotorer i små propellfly [15].

5. Hydrogentransport

Som du har lært ble hydrogen brukt i industrien i mange tiår. Etter at hydrogen er produsert på et sentralisert produksjonssted, blir det vanligvis transportert til sluttbrukerne eller til de relevante FC-applikasjonene. Hydrogen kan transporteres enten som en komprimert gass eller som en kryogen væske. Dermed er det en rekke alternativer for bulktransport: på veier i lastebiler/tilhengere og containere eller via rør.

5.1 Lastebil (HGV)

5.1.1 Gasslastebiler

Lastebilflåter brukes for tiden av industrigasselskaper til å transportere sømløse ståltanker med komprimert hydrogen i gassform (CGH₂) over avstander på 200–300 km fra et sentralisert produksjonssted. Ensyndrede flasker, bunter med flere flasker eller lange sylindriske rør monteres på tilhengere (figur 13). Lagringstrykket varierer fra 200 til 300 bar, og en tilhenger kan transportere fra 2000 til 6200 Nm³ CGH₂ for lastebiler underlagt en vektbegrensning på 40 tonn. Mengden hydrogen som transporteres på denne måten, er relativt lav (fra 180 til 540 kg avhengig av antall rør eller bunter), som representerer omtrent 1–2 % av lastebilens totale masse. Nåværende tilhengere bruker type I lagringstanker (dvs. helmetall). For å øke ytelsen kan det brukes flere lette hoop-mantlede tanker eller rør av komposittmateriale (type II). Denne leveringsmåten er relativt enkel, men den må tilpasses hydrogenmengder og avstander for å være konkurransedyktig. De viktigste begrensningene i transport av komprimert gass på lastebil er kapitalkostnader, drift og vedlikehold, inkludert sjåførs arbeidskraft og drivstoffkostnader.



(a)



(b)

Kilde: AirLiquide, 2014.

Figur 13. To typer CGH2-tilhengere som drives av AirLiquide i Europa: (a) rørhenger med 2000 til 3000 Nm³ hydrogen og (b) komposittankhengere med 6200 Nm³ hydrogen.

Transport med gasslastebil (rørhenger, tank) er en av de mest utviklede måtene som er valgt for transport over korte avstander og for små mengder hydrogen. De største begrensningene er lav lagringskapasitet for kunder med høyt forbruk (som krever hyppig levering) og lavt trykk på hydrogen som leveres, noe som krever ytterligere komprimering for eksempel på en tankstasjon. Dermed blir alternative teknologier med høyere trykk, høyere kapasitet og billigere systemer undersøkt som beskrevet nedenfor. Lincoln Composites utvikler komposittrør med høyere kapasitet. Materialet i en tank er en plastføring fullstendig mantlet med epoksyimpregnert karbonfiber for transport av hydrogen i gassform på rørhenger. For eksempel fungerer TITANTM-tanken (1,08 meter diameter, 11,5 lengde, 8400 liter vannvolum og 2,087 kg vekt) ved et trykk på 250 bar. Den kan levere 2–3 ganger mer hydrogen sammenlignet med mengden hydrogen lagret/transportert i ståltanker med lignende masser. Figur 14 viser lagringsenheten med fire komposittanker med en kapasitet på 600 kg hydrogen ved 250 bar. Tankene som er egnet for høyere trykk er under utvikling.



Kilde: Lincoln Composites, 2014.

Figur 14. En tilhenger med fire komposittanker utviklet av Lincoln Composites.

Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) forsker på hybridteknologier, for eksempel kryokomprimering som kombinerer trykk og lav temperatur for å øke mengden hydrogen som kan lagres per volumenhet, og for å unngå «energistraffene» (energy penalties) knyttet til å



gjøre hydrogen flytende. Komprimert hydrogengass ved kryogene temperaturer er mye tettere enn i vanlige komprimerte tanker ved omgivelsestemperaturer. Disse nye tankene vil ha potensial til å lagre hydrogen ved temperaturer så lave som 80 K ved trykk på 200–400 bar. Denne tilnærmingen krever at det utvikles isolerte kompositt trykktanker. Alternativt kan man vurdere å bruke kalde hydrogengasstanker som krever mindre kjøling. Det kan finnes en optimal kombinasjon av trykk og temperatur i området 80–200 K. Nylig har LLNL identifisert rimelige glassfibernmaterialer for lagring av kald hydrogengass (~ 150 K og opptil 500 bar), og forventer 50 % reduksjon i tilhengerkostnader.

De viktigste sikkerhetsinnretningene som brukes i gasslastebiler, er manuelle sikkerhetsventiler. Under transport isoleres alle hydrogentankene med en ventil. Det er forskjellige sikkerhetsinnretninger og prosedyrer i bruk:

Proseduren for bytte av semitrailer foregår som følger:

- Føreren parkerer semitraileren på angitt sted.
- Føreren setter på plass stoppeklosser og støtteben,
- Føreren kobler fra trekkvognen.
- Føreren kobler slangen fra hele semitraileren, tester tetningen på tappeslangen og kobler fra den tomme semitraileren.
- Føreren kobler den tomme semitraileren til trekkvognen og kjører.

- En manuell tetthetsprøve ved tilkobling av en semitrailer. Dette utføres i følgende trinn. Operatøren kobler semitrailerslangen til tilkoblingspunktet. Slangen trykkes. Operatøren utfører en tetthetsprøve ved hjelp av såpevann og stabilisering av trykket målt lokalt ved hjelp av en trykkmåler.

5.1.2 Lastebiler for kryogen væske

Hydrogen kan også transporteres på vei i flytende form (nedkjølt til under 20 K eller -253 °C) for å transportere større mengder. Når det gjelder vektkapasitet, kan superisolert lastebiler for flytende hydrogen (LH₂) transportere opptil ti ganger mer hydrogen enn rørhengere som brukes til å transportere CGH₂. LH₂-lastebiler som opererer ved atmosfærisk trykk, har en volumetrisk kapasitet på omtrent 50 000–60 000 liter og kan transportere opptil 4000 kg (figur 15). Det er en foretrukket transportmåte for mellomstore/store mengder hydrogen over lange avstander, noe som forklarer at LH₂-bransjen har blitt utviklet mest i Nord-Amerika (kapasiteten til å gjøre hydrogen flytende er omtrent ti ganger større i Nord-Amerika enn i Europa). Det flytende hydrogenet som transporteres i lastebilen, fordampes deretter til et høytrykksprodukt til bruk hos en kunde.



Kilde: AirLiquide Image Bank, 2015

Figur 15. Tankbil som drives av Air Liquide for å transportere LH₂ til sluttbrukeren.

Hovedproblemet med denne transportmåten er en kapitalkrevende kondenseringssprosess. Kondenseringssprosessen er også kostbar. Energitilførselen for kondensering utgjør 30–40 % av den nedre brennverdien til hydrogen (sammenlignet med 10 % for komprimering av gass) [21]. Strømkostnader utgjør 50–80 % av kondenseringsskostnadene. Avstand er hovedfaktoren som avgjør i valget mellom transport av LH₂ og hydrogen i gassform CGH₂. Antall LH₂-lastebiler avhenger av hydrogenetterspørselen og hvor stedet for kondensering ligger. Lastebilkapasiteten for flytende hydrogen er mye høyere enn lastebiler for komprimert gass, men den leveringsmåten er mindre avhengig av transportavstanden. Kapitalkostnad og driftskostnad (drivstoff, arbeidskraft) for lastebilen er mye lavere. Som en konsekvens er lastebiltransport av væske mer økonomisk enn lastebiltransport av gass over lange avstander (fra omtrent 400 km til tusenvis av kilometer) og middels mengder hydrogen. Man må imidlertid vurdere tilgjengeligheten av LH₂. For tiden betjenes det industrielle hydrogenmarkedet av fire leverandører av flytende gass i Europa og ti i Nord-Amerika. Større markeder ville rettferdiggjøre bygging av nye kondenseringssanlegg. Betydelige kostnadsreduksjoner på grunn av skalerings effekter for kondenseringssutstyr er mulig. Denne leveringsmåten er imidlertid avhengig av strømprisen og beslutningen om å opprette nye kondenseringssanlegg. Bedre teknologier kan gi muligheter for å redusere kapitalkostnader, forbedre energieffektiviteten i kondenseringssprosessen og redusere mengden hydrogen som går tapt på grunn av fordampningstap under lagring og transport (fordampningshastigheten som avhenger av beholderens størrelse, form og isolasjon samt lagringstid, er vanligvis i størrelsesorden 0,2 %/dag for en 100 m³ beholder). En rekke studier pågår for å forbedre kondenseringsteknologier og for å foreslå nye tilnærminger (for eksempel forbedring av orto-para-konvertering, utvikling av magnetisk kjøling etc.).

5.2 Tog

Det første hydrogentoget i Storbritannia, som ble utviklet gjennom HydroFLEX-prosjektet, startet sin første reise på et jernbanespor i Warwickshire i september 2020. Flere brenselcelletog skal settes i drift over hele Tyskland de neste årene. Men spørsmålet gjenstår



om hvordan man best leverer hydrogenet til tankstasjoner for togene. En potensiell rute er med jernbane, og dette støttes av Landes Energi Agentur (det delstatlige energibyrået) i Hessen. Det ga DB Energie, energileverandøren til den tyske jernbaneoperatøren Deutsche Bahn, i oppdrag å undersøke hvordan dette kan oppnås når det gjelder teknisk, operativ og juridisk gjennomførbarhet. Dette spørsmålet ble undersøkt basert på en eksisterende hydrogenkilde i Höchst industripark i Frankfurt am Main på to spesifikke ruter i Rhinen-Main-området (se figur 16).



Kilde: NPROXX, 2020

Figur 16. Hydrogentransport på jernbane.

Det var gjennomførbart å forsyne fyllingsinfrastrukturen med hydrogen via jernbane, konkluderte DB Energie-ekspertene. Sammenlignet med veien er det mange fordeler, for eksempel presis planlegging av transporttider, høy pålitelighet og sikkerhet, mulighet for transport av store mengder og avlastning på veitrafikken i storbyområder. Det er ingenting fra et teknisk og juridisk synspunkt som taler mot jernbanetransport. Imidlertid er det foreløpig ingen hydrogentanker som er godkjent for togtrafikk – bare for veitrafikk. Siden kravene er veldig like, kan det forventes at sertifisering for bruk på jernbane kan oppnås ganske snart. For å finne ut gjennomførbarhet og økonomisk effektivitet bør en separat studie analyseres for å se om jernbanetransport er mer økonomisk enn transport på vei. På de to undersøkte rutene gikk togtrafikken noe dårligere. Men generelle påstander kunne ikke utledes av dette.

5.3 Rørledninger

En rekke kommersielle hydrogenrørledninger brukes i dag for å distribuere store mengder (titusenvise av m^3/t) hydrogen i gassform til industrimarkedet. Lengdene varierer fra mindre enn én kilometer til flere hundre. De viktigste aktørene er industrigasselskapene, nærmere bestemt Air Liquide, Air Products, Linde og Praxair. Som svar på en økt etterspørsel etter hydrogen fra i hovedsak raffinerier, utvides eksisterende nettverk og nye deler bygges. I mars 2009 kunngjorde for eksempel Air Products 60 km forlengelse av U.S. Gulf Coast



hydrogenrørnettverk i Louisiana. Hydrogennettverket er estimert til rundt 1600 km i Europa og 1100 km i Nord-Amerika. De fleste rørledningene er lokalisert der store mengder hydrogen forbrukes innen raffinerier og i kjemisk sektor. Dette inkluderer systemer i Nord-Europa, (som dekker Nederland, Nord-Frankrike og Belgia), Tyskland (Ruhr- og Leipzig-områdene), Storbritannia (Teesside) og i Nord-Amerika (Mexicogolfen, Texas–Louisiana, California, Alberta). Mindre systemer finnes også i Sør-Afrika, Brasil, Thailand, Korea, Singapore og Indonesia. Totalt sett er lengdene på disse rørledningene små sammenlignet med det verdensomspennende rørledningssystemet for naturgass, som overstiger 2 000 000 km.

Figur 17 viser deler av det verdensomspennende hydrogenrørnettverket. For eksempel har den 240 km lange rørledningen i Ruhr-området i Tyskland (figur 17 a), som ble kjøpt opp av Air Liquide i 1998, vært i drift siden 1938. Innenfor det europeiske prosjektet «Zero Region» for hydrogenenergiapplikasjoner har Linde lagt en 900 bar hydrogenrørledning (diameter én tomme) over en avstand på 1,7 km i industriparken Frankfurt-Höchst for å forsyne brenselcellebiler.

Leksjon 1: Introduksjon til hydrogensikkerhet for utrykningspersonell

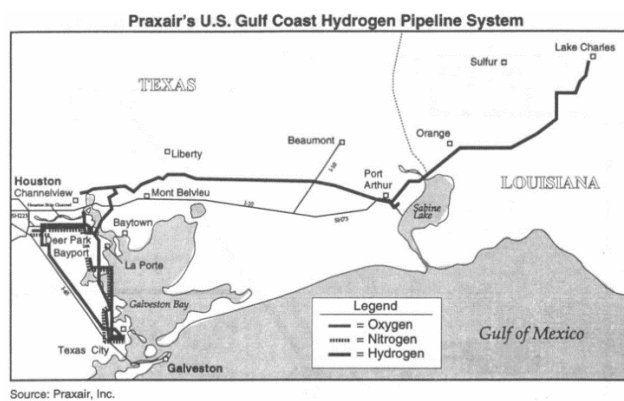


a

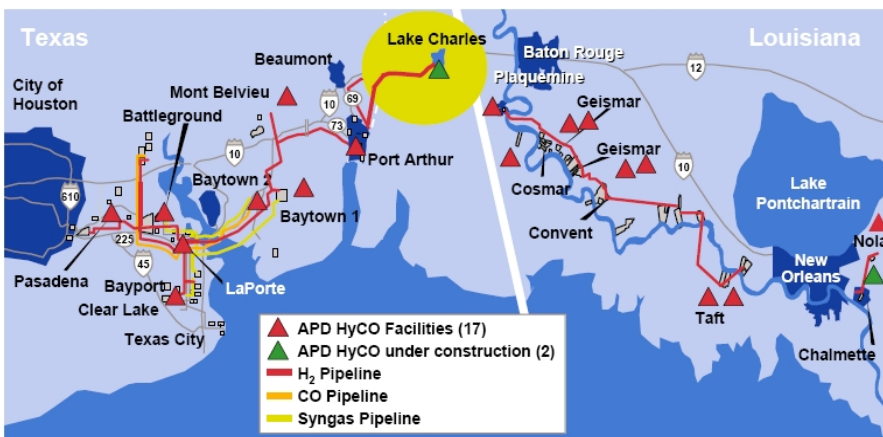
b



c



d



e

Figur 17. De viktigste hydrogenrørledningene i verden: (a) Air Liquide hydrogenrørledninger i Benelux, Frankrike og Tyskland (Ruhr-området); (b) Air Liquide hydrogenrørledninger på Gulfkysten (USA); (c) Linde hydrogenrørledninger i Tyskland; (d) Praxair hydrogenrørledninger på Gulfkysten (USA); (e) Air Product hydrogenrørledninger på Gulfkysten (USA).

6. Stasjonære applikasjoner

6.1 Kraftvarmesystemer (CHP)

I tradisjonelle kraftvarmeanlegg produseres elektrisitet og varme ved forbrenning av naturgass i forbrenningsmotoren eller turbinen. Kraftvarmesystemer basert på brenselcellegenerert elektrisitet, varmer opp vann i den elektrokjemiske reaksjonen beskrevet tidligere. To brenselcelleteknologier vurderes: Fast oksid brenselceller (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC) og protonutvekslende membran brenselcelle (PEM FC). Naturgass omdannes til å produsere hydrogen, og en blanding av hydrogen, karbondioksid og karbonmonoksid (kalt syntesegass eller syngas) med urenheter mates direkte til brenselcellen for å generere energi. I PEM FC-systemer, som bruker lavere temperaturer, trenger syntesegassen ytterligere rensing for å fjerne karbonmonoksid og svovelholdige forbindelser. Mikro kraftvarmeinstallasjoner er introdusert i Europa innenfor Callux-prosjektet (<http://enefield.eu/>).

6.2 Nødstrømsaggregat

Hovedmålet med denne typen teknologi er å gi øyeblikkelig strøm ved strømbrudd. Effektkapasiteten til dette anlegget er mellom 16 og 80 kW med opptil ni hydrogensylindere. De viktigste fordelene med denne applikasjonen er:

- Høy pålitelighet og rask oppstart.
- Skalerbar autonomi, bare avhengig av gasslagringsvolum.
- Lite vedlikehold.
- Ren og lydløs drift [1].

Potensielle brukere av denne typen applikasjoner inkluderer: telekom, datasentre, sykehus, militæret, industri, luksushoteller, etc. Et eksempel på systemet er avbildet i figur 18 som viser et brenselcelle-nødaggregat som brukes i IP Energy-prosjektet (Aix-en-Provence, Frankrike). 30 kW nødstrømsystem installert i 2008 er den første løsningen tilpasset container. Innvendig gasslagring tillot 4 timers driftskapasitet.



Figur 18. Et brenselcelle-nødstrømaggregat kombinert med IP Energy datasenter.



Sikkerhetsfunksjonene og konseptene for systemet er som følger:

- Brenselcellesystemet har to separate ventilasjonsrør, et for oksygen og et for hydrogen, som slipper ut gassen på taket av beholderen separert fra hverandre for å unngå blanding av oksygen og hydrogen under utslipp. Etter utslipp vil det være en restmengde av hydrogen i systemet.
- Prosessrommet er utstyrt med to hydrogensensorer som kan utløse en nødstoppp hvis hydrogenkonsentrasjonen i containerne er over 0,4 volumprosent. Hvis det registreres en unormal hydrogenkonsentrasjon, utløses en sikkerhetsstopp og følgende handlinger vil skje:
 - Stopp alle systemprosesser.
 - Aktiver de mekaniske ventilasjonene.
 - Isoler gasstankene ved å lukke magnetventilene.
- Registrering av hydrogen overvåkes kontinuerlig, selv når systemet er i standbymodus. Ved tap av registrering utløser systemet en sikkerhetsstopp.
- Containerne er utstyrt med brannvarslere. Hvis de aktiveres, bør følgende tiltak utføres:
 - Stopp alle systemprosesser.
 - Isoler gasstankene ved å lukke magnetventilene.
 - Steng av ventilasjonen.
- Den farlige eksplosive atmosfæren som følge av potensielle hydrogenlekkasjer eller -utslipp må forhindres i brenselcellekabinettet. Passive forebyggende tiltak inkluderer blant annet bruk av koblinger som er sikret permanent, og som er konstruert på en måte som begrenser den maksimale utslippshastigheten til en forutsigbar verdi samt naturlig ventilasjon. Aktive forebyggende tiltak inkluderer blant annet aktiv ventilasjon; et system for registrering av brannfarlig gass; andre måter for lekkasjeregistrering (f.eks. gjennom trykkmålinger relativt til kontrollinnstillinger).
- Innsiden av containeren, der hydrogen kan lekkes eller spres, er ikke klassifisert, siden sikkerhetsbarrierer sikrer at det ikke er farlig hydrogen ATEX ved lekkasjepunktet eller ved akkumulering. Ikke desto mindre er alt utstyr som er montert like under containertaket, og som kan antenne brannfarlige hydrogen–luft-blandinger, sertifisert for ATEX sone 2. Spesielt gjelder det hydrogen- og brannsensorene og ventilasjonssystemet. I tillegg er det elektriske rommet systematisk skilt fra prosessrommet.
- Oksygen er ikke brannfarlig i luft, men det støtter forbrenningsprosessen. En oksygenlekkasje kan være en årsak til en brann. Brannrisikoen øker når atmosfæren er beriket med oksygen. Enhver kontakt må unngås mellom oksygen og organiske stoffer på grunn av brannfaren.



- Det er inkludert generelle tiltak for risikoforebygging i designet og bruken av dette systemet:
 - Riktig materialvalg (dvs. avfettet rustfritt), bruk av beskyttede rør og uten brå rørbøyer, tette forbindelser, etc.
 - Begrensning av oksygenstrøm i henhold til trykket.
 - Beskyttelse av oksygenrørene med filtre for å fange opp støv som trolig vil antennes.
 - Naturlig og tvungen ventilasjon i prosessrommet.
 - Lengdereduksjon av rørene under høytrykk, tilstrekkelig fareavstand mellom rørene og de elektriske komponentene.
 - Omgruppering av enhetene som inneholder oksygen i en avgrenset sone (rom).
- Overholdelse av prosedyrer for kontroll og vedlikehold (periodiske tester) av anlegget [1].

7. Marine applikasjoner

Hydrogenbrenselceller har en utprøvd ytelse på en rekke bruksområder, inkludert busser, lastebiler, biler, gaffeltrucker og til og med passasjertog. Takket være suksessen med tunge landkjøretøy, blir brenselceller nå integrert i marinefartøy. Brenselceller vil spille en nøkkelrolle for å hjelpe marine næringer med å håndtere klimagassutslipp i vann og i havner.

Det er velkjent at skipsfart er en betydelig kilde til klimagassutslipp. De høye klimagassutslippene er et resultat av det tradisjonelle drivstoffet som brukes i skipsmotorer genererer høye utslipp. De siste årene har offentlig press rundt luftforurensning og klimaendringer fått regjeringer og andre myndigheter til å iverksette tiltak for å redusere dem. Som et resultat blir det iverksatt regler for reduksjon av klimagasser rettet mot skipspart rundt om i verden. For eksempel:

- [Stortinget](#) gjorde i 2018 et vedtak for å beskytte landets verdensarvfjorder. Dette [vedtaket](#) skal stoppe alle utslipp fra cruiseskip og ferger i fjordene innen 2026 [22].
- [Alaskas standard for synlige utslipp \(Visible Emissions Standards\)](#) begrenser opasiteten til alle marine fartøyer innenfor tre mil fra kysten.
- [Den internasjonale sjøfartsorganisasjonen \(IMO\)](#) har vedtatt obligatoriske tiltak for å redusere klimagassutslipp og fase dem helt ut ved slutten av dette århundret. Deres opprinnelige strategi vil redusere de totale klimagassutslippene fra internasjonal skipsfart med minst [50 % av 2008-nivåene innen 2050](#).
- [Det europeiske maritime sikkerhetsbyrået \(EMSA\)](#) planlegger å kutte EUs karbondioksidutslipp fra sjøtransport med minst [40 % \(fra 2005-nivå\) innen 2050](#).



Ytterligere utslippskontrollområder (ECAs) diskuteres for Arktis, Mellom-Amerika, Middelhavet og Svartehavet, Japan, Korea og Australia.

Disse utslippsreglene vil ha en betydelig innvirkning på maritime fartøy og organisasjonene som driver dem. For å tilpasse seg disse endringene trenger flåteoperatører løsninger som reduserer utslippene dramatisk. Med så mange forskjellige typer fartøy på vann trenger sjøfartsindustrien en ekte nullutslippsløsning som kan brukes på tvers av forskjellige fartøytyper.

Batterier er en nullutslipps energiløsning for mindre fartøyer som driver med korte sykluser, for eksempel små passasjerferger og servicebåter på innsjøer. Lavere effektivitet og større vekt begrenser imidlertid bruken av batterier på mange bruksområder. For marine fartøy er brenselceller det eneste gjennomførbare, ekte nullutslippsalternativet. Akkurat som batterier produserer brenselceller elektrisitet med høy effektivitet gjennom en elektrokjemisk prosess. Forskjellen er at med en brenselcelle lagres energi separat i form av hydrogendrivstoff. Så lenge drivstoff er tilgjengelig, vil brenselcellesystemene produsere elektrisitet som en generator. De eneste utslippene fra en brenselcelle er vanddamp og varme.

I tillegg kan hydrogendrivstoff produseres fra fornybare kilder, inkludert solenergi, vind, vannkraft og geotermisk energi. Og kostnaden for fornybart hydrogen fortsetter å [falle hvert år](#) – spesielt ettersom store produksjonsprosjekter begynner å dukke opp i Europa, Australia og Chile. Når det drives av fornybart hydrogen, er et brenselcellesystem en ekte nullutslipps kraftkilde i hele livssyklusen.

Overgangen til en ny energikilde er en stor forpliktelse. Når det gjelder brenselceller for marine fartøy, ligger hindringene i infrastrukturen for tanking og tilgjengeligheten av hydrogen i havner. Før operatører kan drive fartøyene sine ved hjelp av brenselceller, må hydrogentilgangen og infrastrukturen for tanking videreutvikles.

På kortere sikt er hybridløsninger med batteri og brenselcelle gjennomførbare. De krever mindre drivstoff og oppfyller fortsatt målet om nullutslipp. Disse løsningene:

- driver mindre fartøy, som ferger og elveskip.
- driver egenforbruk på større fartøy, for eksempel cruiseskip, der kravene til tilleggskraft er høye.
- leverer landstrøm til forankrede fartøyer.

Det er tre viktige fordeler med å bruke brenselceller til marint bruk:

- Modulære kraftsystemer kan tilpasses mange krav til strømforbruk.



Figur 19. Ballard 100 kW marin brenselcellemodul

Ballard PEM (protonutvekslende membran) brenselceller er modulære (figur 19), og kan brukes i forskjellige kombinasjoner parallelt for å gi kraften og systemreserven som et fartøy trenger, fra 100kW til 1MW eller mer.

- Likestrøm er kompatibel med elektriske arkitekturer.

Ballard PEM brenselceller er en kilde til betydelig likestrøm som er kompatibel med batterihybride elektriske arkitekturer. De kan distribueres i parallelle, utsendbare konfigurasjoner for å oppfylle de varierende kravene til kraft fra:

- hybrid elektrisk fremdriftsyttelse
- tilleggskraftsystemer.
- Brenselcellesystemer har fleksibel konfigurasjon.

I et brenselcellesystem er kraftproduksjonen og brensellagringselementene separate, noe som gir skipsarkitekter mer fleksibilitet enn batterier. Ballards brenselcellesystem har fleksibel konfigurasjon som vil tilpasse seg plassbegrensninger i fartøyets. Det kan deles inn i flere moduler, plassert på forskjellige steder. I tillegg kan Ballards eksperter evaluere arbeidssyklusene til et marinefartøy uansett størrelse eller type. De kan utvikle en gjennomførbar, praktisk løsning ved å fastslå optimal

- hybrid arkitektur
- brenselcellekraft
- krav til reduksjonsoversetting



- krav til lagring av drivstoff
- estimert drivstofforbruk

Brenselceller kan brukes på forskjellige typer fartøy, f.eks. ferger, cruiseskip, elveskip osv. For ferger kan modulære, skalerbare brenselcellesystemer gi nullutslippsdrift for små og store ferger. De [første nullutslippsfergene](#) forventes å bli drevet av en hybrid arkitektur av brenselceller og batterier. Det spesifikke forholdet mellom batterier og brenselceller vil avhenge av rutens varighet og tidsplan. Fordi brenselceller leverer betydelig likestrøm, kan de også levere strøm som kan distribueres i en ferge (eller et annet fartøy) for å levere kraft til fartøyets egenforbruk, for eksempel belysning, oppvarming, klimaanlegg, fartøyets instrumenter, nødsystemer, bysser og andre innebygde systemer. For ytterligere effektivitet kan overskuddsvarme generert av brenselcellene brukes til å varme opp vann til HVAC, tøyvask og andre formål. Vannet som produseres av brenselcellen, kan gjenvinnes om nødvendig.

Cruiseskip kan være blant de første marine bruksområdene for brenselceller. Noen cruiseskipshavner krever allerede nullutslipp. For cruiseskip inkluderer bruksområdene for brenselcellekraft generering av strøm til hotellforbruk, nødsystemer og en del av fremdriftskraften. For at bransjen skal nå sine nullutslippsmål i dette århundret, bør brenselceller gi 100 % av kraften på mange cruiseskip etter hvert som hydrogeninfrastrukturen modnes.

Brenselceller er en gjennomførbar løsning for nullutslippsdrift på elveskip, inkludert lektere som skyves eller slepes av bukserbåter og slepebåter, og skip med egen motor. Ballard jobber allerede med et demonstrasjonsprosjekt for elveskip i Lyon, Frankrike (figur 20). Prosjektet vil forsyne strøm til en bukserbåt som et nyttefartøy på en av verdens mest krevende elver, Rhône.



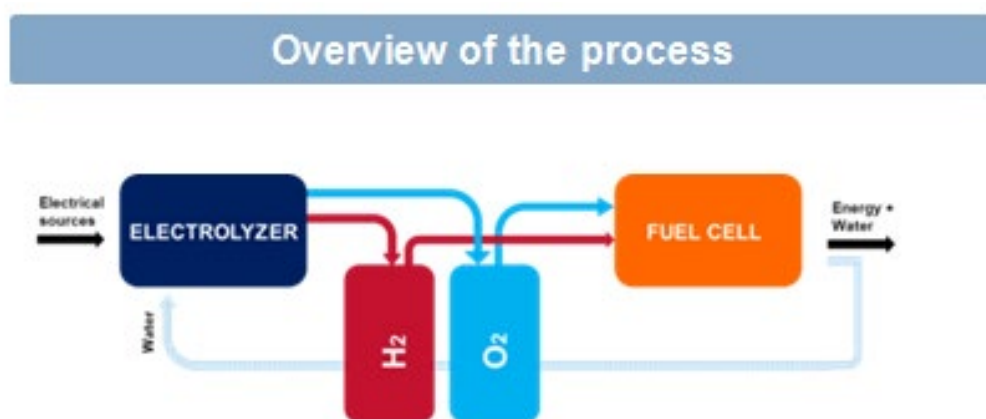
Figur 20. Ballards kraftprosjekt for elveskip i Lyon, Frankrike

I et forsøk på å redusere luftforurensning og karbonutslipp skjerper regjeringer, havnemyndigheter og organisasjoner over hele verden utslippsstandardene for marine fartøy. Som et resultat befinner sjøfartsindustrien seg under press for å møte de kommende nullutslippsreglene. Hydrogenbrenselcellekraft – en påvist nullutslippsløsning for å drive

transittbusser, lastebiler og annen tungtransport – gir et reelt potensial for en rekke marine fartøyer. Brenselcellesystemer er drevet av fornybart hydrogen, og er den mest praktiske, gjennomførbare nullutslippsløsningen. Implementering av denne teknologien er et viktig skritt for å redusere utslipp fra marine fartøy og redusere luftforurensningen for en mer levelig verden.

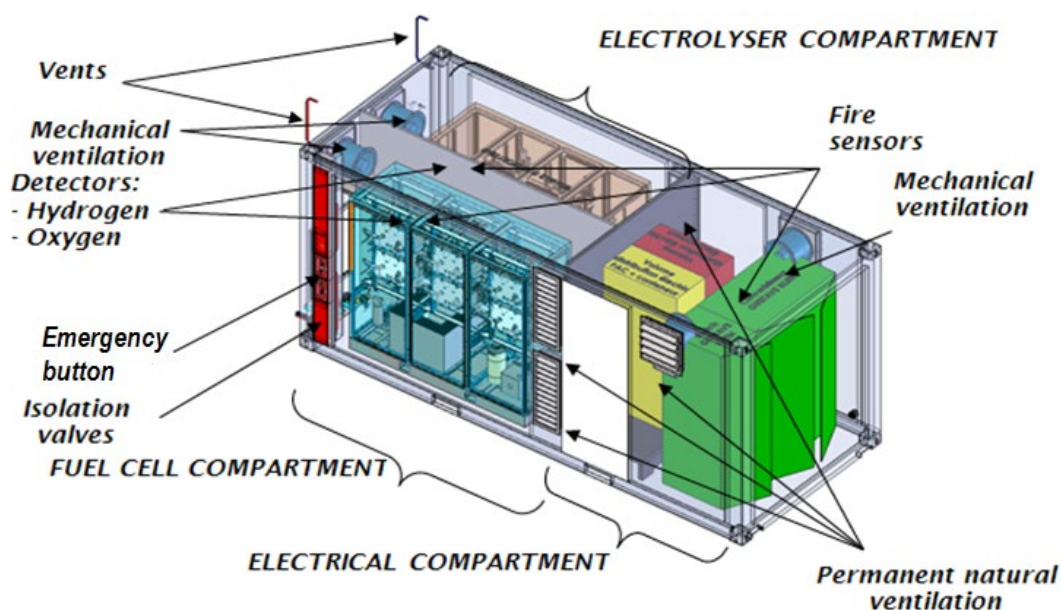
8. Hydrogenbaserte energilagringssystemer

Som et eksempel på et hydrogenbasert energilagringssystem vil vi se på Greenenergy Box. Greenenergy Box™ er en hydrogenkjede tilpasset container som består av en elektrolytator, en brenselcelle, et vann- og varmestyringssystem og elektriske omformersystemer kombinert med hydrogen- og oksygenlagre. Greenenergy Box™ er et integrert modulsystem som kan gi en effekt fra 50 til 500 kW med en lagringskapasitet fra 0,2 til 2 MW. Prinsippet vises i figur 21. Flere systemer kan kobles til for å øke effekten og energikapasiteten og gi funksjonen til et nødstrømsystem i noen timer ved høy effekt [1].



Figur 21. En oversikt over Greenenergy Box-prosessen.

Solcellepanelene gir strøm til det elektriske nettverket, og overskuddet brukes av elektrolytoren til å generere hydrogen og oksygen i gassform. Når det er produsert, blir hydrogen og oksygen i gassform lagret i atskilte tanker som er installert ved siden av Greenenergy Box™. På grunn av brenselcellesystemet kan lagret hydrogen og oksygen brukes til å produsere elektrisitet for å sikre delvis energiforsyningsautonomi i bygningene i tillegg til nødstrømsystem ved strømbrudd. Greenenergy Box™ forvalter selv strømmen som mottas av solcellepanelene til å elektrolysere vann eller levere strøm til nettet. Videre styres og valoriseres varme, som også produseres av systemet under både elektrolyse- og brenselcelleprosesser, til de tilstøtende bygningene. Den vanntette og vindtette Greenenergy Box™ har tre forskjellige rom: et elektrisk rom, et brenselcellerom og et elektrolytorrom som vist i figur 22.



Figur 22. En skjematisk oversikt over Greenenergy Box™[1]

Greenenergy Box™ er CE-sertifisert ved at den er i overensstemmelse med lavspenningsdirektivet LVD 73/23/EØF, direktivet om elektromagnetisk kompatibilitet EMC 89/336/EØF, maskindirektivet MD 98/37/EF, trykkutstyrsdirektivet PED 97/23/EF. Risikovurderingen for dette systemet utføres i tre trinn. Først utarbeides et dokument kalt «Basic safety considerations» som beskriver de viktigste sikkerhetskravene, som bør følges på arkitektur- og idéstadiene i hydrogenkjeden. Når systemets arkitektur er tilstrekkelig detaljert, utføres en HAZOP-undersøkelse (HAZard and OPERability Study) for hvert delsystem for å definere de potensielle årsakene til hvert prosessavvik, tilhørende potensielle konsekvenser og for å vurdere eksisterende barrierer. Som tredje trinn fullfører en feiltreanalyse HAZOP-undersøkelsen for å belyse feil i idéfase, feil systemkonfigurasjon og eksterne farekilder. Alle sikkerhetsstudiene er samlet i et dokument med tittelen «Synthesis of the safety studies of the Greenenergy Box™»[1]. Den overordnede sikkerhetsstrategien for hydrogenkjeden er beskrevet nedenfor i følgende forskjellige deler.

- Stansing og kontroll av lekkasje.
 - Utstyr og rørmaterialer er valgt for å være forlikelig med bruk av hydrogen og oksygen. Spesielt er mekanisk påkjenning fra hydrogen og korrosjon fra oksygen valgt fra IGC15/06, ISO/TR 15916 og ISO 11114-4. Stålsylindere brukes ofte til å lagre trykksatt hydrogen og oksygen. Den maksimale karbonekvivalenten for hydrogen er 0,43, som beskrevet i IGC 121/04, § 3.
 - Sveisede forbindelser foretrekkes og brukes på en praktisk måte for å minimere potensielle lekkasjekilder. Antall skjøter og tilkoblinger er minimert.



- Både elektrolytator- og brenselcellrommene i Greenenergy BoxTM er utstyrt med to hydrogensensorer og en oksygensensor. En sikkerhetsavstengningsventil utløses ved 10 % av nedre brennbarhetsgrense (LFL) for hydrogen (0,4 volumprosent H₂ i luft), og en nødstop skjer ved 25 % av LFL (1 volumprosent H₂ i luft). Oksygenregistrering utløses når oksygenkonsentrasjonen når mer enn 23 volumprosent i luften.
- Videre oppdages også hydrogen- og oksygenlekkasjer ved trykkforskjell i standby -fasen. Hvis en tank eller en del av røret mister trykk under en ventemodus, betyr det potensielt at det er lekkasje. Hvis det er et mindre tap av trykket i standby -fasen, utløses en alarm, og hvis trykktapet er for betydelig, vil systemet ikke kunne starte på nytt.
- Før igangkjøring utføres hydraulikk- og lekkasjetester som kreves av direktivet om trykkutstyr.
- Det organiseres regelmessige inspeksjoner og forebyggende vedlikeholdsprogram for å sikre maksimalt sikkerhetsnivå. Spesielt lekkasjetester på trykkregulatorer, ventiler, rør, skjøter og tilkoblinger etc. utføres regelmessig. Det organiseres regelmessige visuelle inspeksjoner for å kontrollere korrosjon. Informasjon om inspeksjons- og vedlikeholdsfrekvens finnes i vedlegg F til IGC 121/04 og IGC 13/02.
- Forebygging av dannelse av brannfarlig eller overoksygenert atmosfære.
 - Tre rom i Greenenergy BoxTM er naturlig ventilert takket være sideventiler plassert på begge sider av beholderen (Figur 22).
 - Brenselcelle- og elektrolytatorrommene er begge utstyrt med ventilasjon av typen ATEX som utløser hydrogen og oksygenkonsentrasjon over henholdsvis 0,4 vol. % hydrogen eller 23 vol. % oksygen i luften. Maksimal strømningshastighet er angitt for termisk spredning, dvs. 2500 m³/t for brenselcellerommet og 2700 m³/t for elektrolytatorrommet.
 - Modellering av en utilsiktet hydrogenlekkasje på 750 L/min strømningshastighet ved bruk av LES-tilnærmingen (Large Eddy Simulation) utviklet ved Ulster University fremhever at det tar omtrent 10 sekunder før en hydrogensensor oppdager en hydrogenkonsentrasjon større enn 0,4 volumprosent i det naturlig ventilerte elektrolytatorrommet. Med tanke på den konservative hypotesen på 30 sekunders responstid for hydrogensensoren, kan det observeres at etter 40 sekunder med kontinuerlig konstant frigjøring, er hydrogen-luft-konsentrasjonen dannet under taket fortsatt under LFL for hydrogen i luft, dvs. mindre enn 4 volumprosent i luft. Fra dette øyeblikket sender hydrogensensoren et signal til styrekommandoen som utløser luftinntaksviften til maksimal hastighet. Det kan observeres at hydrogenluftskyen er helt fortynnet på mindre enn 2 sekunder.



- Undertrykkelse/reduksjon av antennelseskilder.
 - Innsiden av Greenenergy BoxTM, der hydrogen kan lekkes eller spres, er ikke klassifisert, siden sikkerhetsbarrierer sikrer at det ikke er farlig hydrogen ATEX ved lekkasjepunktet eller ved akkumulering. Ikke desto mindre er alt utstyr som er montert like under containertaket, og som kan antenne en brannfarlig hydrogen/luft-blanding, sertifisert for ATEX sone 2. Spesielt gjelder det brannvarslere, hydrogen- og brannsensorene og ventilasjonssystemet.
 - Greenenergy BoxTM og reservoarene er jordet og potensialutjevnet for å beskytte mot farene ved vagabonderende elektriske strøm og statisk elektrisitet.
- Beskyttelse mot overtrykk.
 - Hver lagerbeholder og rørledninger fra Greenenergy BoxTM til lagertankene er utstyrt med en trykkavlastningsventil (PRV). Tartrykket for trykkavlastningsventilen er satt slik at ventilen aktiveres når trykket i lagerbeholderen når 1,15 av det maksimale driftstrykket.
 - Lagertankventilasjonsåpningene er montert vertikalt i minst 3 m høyde. De er utstyrt med en «hatt» hvor vekten er kalibrert for å løftes under trykk for å unngå at vann kommer inn i ventilasjonsåpningen.
 - Greenenergy BoxTM er utstyrt med to forskjellige hydrogen- og oksygenventilasjonsåpninger plassert i en minimumshøyde på 1 m over taket på beholderen og godt atskilt for å unngå oksygenberiket hydrogen–luft-blanding. Hvert enkelt ventilasjonsrør er felles for elektrolytoren og brenselcellen og tillater trykkavlastning av systemet på mindre enn 2 minutter ved nødstop.
- Nød- og sikkerhetsstopp.
 - Styrekommandoen som brukes til å automatisk lede systemet, brukes også til å utløse sikkerhetsfunksjonene. Omtrent 70 sikkerhetsfunksjoner er registrert i styrekommandoen for å oppdage prosessavvik eller gasslekkasje eller brann i systemet. Avhengig av omfanget til avviket sammenlignet med parameterens sikkerhetsverdi, utløses en nød- og/eller sikkerhetsstopp som etterfølges av avstenging av strømmen, trykkavlastning av systemet, aktivering av inertisering og ventilerings (unntatt ved brann).
 - De viktigste sikkerhetsfunksjonene, dvs. hydrogen-, oksygen- og brannalarmer, nødstopknapp og overvåkning av styrekommandoen realiseres med digitalkabel og er i henhold til sikkerhetsintegritetsnivå (SIL) 1 [1].

9. Oversikt over hendelser og ulykker

9.1 Hendelser og ulykker på FCH-systemer og -infrastruktur

En hendelse er en begivenhet som kan føre til tap eller brudd i drift, tjenester eller funksjoner – og som, hvis den ikke håndteres, kan eskalere til en nødsituasjon, krise eller katastrofe [43]. En ulykke er en uforutsett og uplanlagt begivenhet eller omstendighet som forårsaker tap eller skade. Rapportering av hendelser/ulykker som har skjedd på FCH-systemene eller -infrastrukturene, samt en kompleks evaluering av de viktigste årsakene og lærdommene fra dem, er en ekstremt verdifull øvelse for både privat og offentlig sektor. Informasjon om ulykker eller hendelser relatert til FCH-teknologier finnes i følgende kjente databaser:

- Hydrogenlærdommer fra hendelser til nestenulykker: <http://h2tools.org/lessons/>
- Hydrogenhendelser og ulykkesdatabase HIAD-database: <https://odin.jrc.ec.europa.eu/odin/index.jsp>
- Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industries (BARPI) <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/?lang=enbarpi/>

Alle databasene skal oppdateres jevnlig.

H2Incidents-databasen (nylig omdøpt til Hydrogen Tools. Lessons Learned) har for eksempel blitt opprettet av Pacific Northwest National Laboratory med finansiering fra det amerikanske energidepartementet (<https://h2tools.org/lessons>). I denne databasen rapporteres hendelser og nestenulykker uten å inkludere navnene på selskapene og andre detaljer, slik at konfidensialitet oppmuntrer til å rapportere hendelsene. Hendelsene er klassifisert etter innstillinger, utstyr, materialskader og personskader, sannsynlige årsaker og medvirkende faktorer [3].

Rigas og Amyotte [3] definerte følgende hovedårsaker til hendelser/ulykker:

- Feil på mekanisk materiale eller utstyr
- Korrosjonsangrep
- Overtrykk
- Mekanisk påkjenning fra hydrogen ved lave temperaturer
- Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE)
- Lagertankbrudd på grunn av støt fra sjokkbølger eller prosjektiler fra tilstøtende eksplosjoner
- Menneskelig feil

I denne første leksjonen vil vi bare diskutere noen få eksempler på hendelser/ulykker knyttet til FCH-teknologier. De følgende leksjonene vil imidlertid inneholde en rekke relevante eksempler for hvert FCH-system som studeres.

9.2 Ulykker som har inntruffet under hydrogenproduksjon



Kilde: Millet et al, 2011 [45]

Figur 23. Skadde deler av høytrykks PEM-elektrolytator.

En eksplosjon i en elektrolytator ved driftstrykk på 40 MPa skjedde 7. desember 2005 på en demonstrasjonsstand for hydrogen ved Kyushu universitet (Japan) [19]. En intern hydrogen–oxygen-jetbrann kan ha oppstått etter en membranlekkasje og førte til en metallbrann (titan) og eksplosjon eller brudd i elektrolytatorhuset. Den innvendige væsken og forbrenningsproduktene ble sluppet ut i omgivelsene, inkludert parkeringsområdet utenfor laboratoriebygningen. Frontruten til flere kjøretøyer ble skadet på grunn av eksponeringen for hydrogenfluorid som dannet seg under nedbrytningen av et membranpolymermateriale [19]. En fransk-russisk studie [20] rapporterte analysen av feilmekanismer for PEM vannelektrolyseceller, som kan føre til ødeleggelse av elektrolytatoren. En to-trinnsprosess som i utgangspunktet involverer lokal perforering av den faste polymerelektrolytten etterfulgt av en katalytisk rekombinering av hydrogen og oksygen lagret i elektrolyserommene er bevist. Fotografiene av en rørdel i rustfritt stål og en mutter perforert av en hydrogen-oksygen-flamme som er dannet inne i PEM-stacken, vises i figur 23.

9.3 En hendelse på en tankstasjon

Hydrogengassutslipp skjedde på Emeryvile tankstasjon [23]. Det var feil på en trykkavlastningsventil, 300 kg hydrogen slapp ut og antente deretter. Gassen antente ved utløpet av ventilasjonsrøret og brant i 2,5 timer til teknikere fikk lov fra det lokale brannvesenet å komme inn på stasjonen og stoppe gasstrømmen. Under denne hendelsen evakuerte brannvesenet nærliggende virksomheter og skoler og stengte tilstøtende gater.

De identifiserte grunnårsakene til denne hendelsen er:

- bruk av inkompatible materialer ved produksjonen av trykkavlastningsventilen
- feil montering som resulterte i for hard tiltrekking av den innvendige enheten.
- overherding av de innvendige materialene hos ventilprodusenten.



Disse problemene kunne vært unngått ved tilfredsstillende prosedyrer for kvalitetssikring/kvalitetskontroll under design- og sikkerhetsundersøkelser.

10. Introduksjon til e-Laboratory

Utdanning og opplæring for den nye brenselcelle- og hydrogen-sektoren (FCH) er avgjørende for faglig utvikling av nåværende og fremtidige arbeidsstyrke. Dette underbygger lederskapet og konkurransekraften for europeiske FCH-produkter. Et nettbasert arkiv av digitale verktøy – e-Laboratory – ble først utviklet som del av det europeiske prosjektet «Novel Education and Training Tools based on digital Applications related to Hydrogen and Fuel Cell Technology» (NET-Tools). Det originale NET-Tools e-Laboratory inneholder en omfattende pakke med digitale verktøy. Verktøyene som anses som mest relevante for utrykningspersonell, er gjort tilgjengelig via e-Laboratory for Hydrogen Safety, som du kan få tilgang til via HyResponder e-Plattform (<https://hyresponder.eu/e-platform/>) eller direkte på <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>

Ytelsesbasert beregning av fareavstander, termen som nylig ble introdusert av ISO TC197 Hydrogen Technologies, er et sentralt element i hydrogensikkerhetsteknikk for FCH-systemer og -infrastruktur, f.eks. tankstasjoner. Prinsippene bak e-Laboratory of Hydrogen Safety gjør det mulig å vurdere fareavstander for uantente utslipp (størrelse på antennelighetsområdet); antente utslipp (jetbranner); trykkbølgedemping fra deflagrasjoner, detonasjoner og brist i høytrykkshydrogentank i en brann, ildkuler osv. Denne verktøykassen som hydrogenbransjen har ventet lenge på, gir fastsettelse av fareavstander for ikke-antente utslipp og jetbranner i interaktivt regime, f.eks. ved å variere systemparametere som trykk og rørdiameter (lekkasje). De toppmoderne sikkerhetsverktøyene til e-Laboratory of Hydrogen Safety er en åpen utvidet europeisk analogi til HyRAM (Hydrogen Risk Assessment Methods)-verktøyet som har blitt utviklet av Sandia National Laboratories (SNL) i løpet av siste tiår med finansiering fra det amerikanske energidepartementet. E-Laboratory viser europeisk lederskap innen hydrogensikkerhetsteknologi, f.eks. ved evne til å beregne fareavstander bestemt av termiske effekter og trykkeffekter fra en ildkule og trykkbølge etter brist i tank i en brann, noe som mangler i HyRAM-verktøyet og det lignende kanadiske (UTRQ) rammeverket og er implementert ved hjelp av Smalltalk Seaside webutviklingsmiljø.

Lecture 1: Introduction to hydrogen safety for responders

Referanser:

1. HyResponse Deliverable D2.1-Description of selected FCH systems and infrastructure, relevant safety features and concepts (2014). Tilgjengelig fra: <http://www.hyresponse.eu> [10.10.20].
2. Mays, T. 2014 Scientific progress and technological bottlenecks in hydrogen storage. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells. 23.–27. juni 2014, Kreta, Hellas.
3. Rigas, F og Amyotte, P (2013). Hydrogen safety. Boca Raton: CRC press. Taylor og Francis Group.
4. Rigas, F og Amyotte, P (2013). Myths and facts about hydrogen hazards. Chemical Engineering Transactions. Vol. 31.
5. ENVIRONMENTAL GRAFFITI ALPHA (2010). The Hindenburg Disaster in Pictures. Tilgjengelig fra: <http://www.environmentalgraffiti.com/anthropology-and-history/news-hindenburgdisaster-accident-waiting-happen>. [24.12.11].
6. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29), 160. sesjon, Genève, 25.–28. juni 2013.
7. US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders. Tilgjengelig fra: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [6.11.20].
8. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Tilgjengelig fra: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=no> [1.5.14].
9. HyFLEETE-CUTE (2006-2009). Tilgjengelig fra: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/hyfleet-cute-2006-2009> [4.11.2020].
10. Zaetta, R og Madden, B (2011). Next HyLights project. Deliverable 3.1: Hydrogen Fuel Cell Bus Technology State of the Art Review.
11. California Fuel Cells Partnership, 2014. Tilgjengelig fra: <http://cafcp.org/> [6.11.20].
12. Adams, P (2004). Identification of the optimum on-board storage pressure for gaseous hydrogen city buses. European Integrated Hydrogen project – Phase 2 (EIHP2), mars 2004.
13. Şenel, K. (2007), Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımı. yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. <http://ram-home.com/ram-old/tu-155.html> [6.11.2020]
15. Dincer, I., Acar, C. 2016 A review on potential use of hydrogen in aviation applications. International Journal of Sustainable Aviation, 2: 74-100

Lecture 1: Introduction to hydrogen safety for responders

16. <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/> [6.11.2020].
17. Bicer, Y., Dincer, I. 2017 Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. International Journal of Hydrogen Energy, 42: 10722-10738
18. Bird, L. (2011). Dictionary of Business Continuity Management Terms. Business Continuity Institute. Tilgjengelig fra: <http://www.thebci.org/glossary.pdf> [27.12.15].
19. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Tilgjengelig fra: www.bookboon.com, gratis nedlasting av e-bok.
20. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Tilgjengelig fra: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=no>
21. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. Int J Hydrogen Energy (2017) 42:7254-7262.
22. Norwegian parliament adopts zero-emission regulations in World Heritage fjords. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/norway-adopts-zero-emission-regulations-in-world-heritage-fjords-24820> [4.11.2020]
23. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Investigation of the hydrogen release incident at the AC transit Emeryville facility (Revised). Sandia report. SAND2012-8642.