



European Train the Trainer Program for Responders

# Leksjon 3

## Hydrogenlagring

### 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 opplæringsmaterieil med nivåer I–IV: Brannkonstabel, utrykningsleder, innsatsleder og spesialist. Les introduksjonen til leksjonen for forventet forkunnskap og læringsutbytte

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



## Leksjon 3: Hydrogenlagring

### 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 introduserer ulike alternativer for lagring av hydrogen – komprimert, flytende og i faste stoffer, samt farer og sikkerhetsproblemer knyttet til dem. Spesielt katastrofale brudd i beholdere introduseres sammen med elektroniske verktøy som kan brukes.

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

## Stikkord

Hydrogenlagring, komprimert hydrogen, lagringstank, flytende hydrogen, hydrogenlagringsmaterialer, forebygging av revner, lekkasje uten revner

## Leksjon 3: Hydrogenlagring

**Innhold**

|   |    |
|---|----|
| Sammendrag.....   | 3  |
| Stikkord.....   | 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. Alternativer for hydrogenlagring.....  | 6  |
| 4. Lagring av hydrogen i gassform .....   | 8  |
| 4.1 Typer lagringstanker for cGH <sub>2</sub> .....   | 8  |
| 4.2 Innebygd hydrogenlagring .....  | 9  |
| 4.3 Trykkavlastningsutstyr.....   | 10 |
| 5. Konsekvenser av katastrofal svikt i høytrykkshydrogentank (eksplosjonsbølger, ildkuler, prosjektiler)..... | 10 |
| 5.1 Potensielle farer og sikkerhetsspørsmål knyttet til cGH <sub>2</sub> : oppsummering.....                  | 10 |
| 6. Sikkerhetsteknologi for lekkasje uten revner .....   | 11 |
| 6.1 Ny trend i 2020.....  | 11 |
| 7. Utnyttelse av e-Laboratory.....  | 12 |
| Referanser .....  | 12 |

## Leksjon 3: Hydrogenlagring

### 1. Målgruppe

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

Rollebeskrivelser, kompetansenivå og læringsutbytter for brannkonstabel er beskrevet nedenfor.

#### 1.1 Rollebeskrivelse: Brannkonstabel

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

#### 1.2 Kompetansenivå: Brannkonstabel

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

#### 1.3 Tidligere opplæring: Brannkonstabel

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

## 2. Innledning og mål

Hydrogen lagres og transporteres vanligvis i to former: som komprimert hydrogengass eller som kryogen væske. Den vanligste måten å lagre hydrogen på, er i metall- eller komposittsylindere/-tanker med ulike størrelser og kapasiteter. Noen ganger kan de kobles sammen til en bunt eller samles i en kurv (crate) for transport. Siden molekylene er så små, har hydrogen lett for å lekke gjennom noen materialer, sprekker eller dårlige skjøter i lagertankene, i motsetning til andre vanlige gasser ved tilsvarende trykk. Selv om hydrogen generelt ikke er etsende og ikke reagerer med materialene som brukes til lagringsbeholdere, kan det ved visse temperatur- og trykkforhold diffundere inn i gitterstrukturen til et metall, og forårsaker et fenomen som kalles *hydrogensprøhet*. Ved brann kan i tillegg komposittmaterialene som brukes til lagringsbeholdere, forringes, og det kan oppstå lekkasje av hydrogen. I verste fall kan dette føre til en katastrofalt revne i en hydrogentank og generere en trykkbølge etterfulgt av en ildkule og flygende prosjektiler. Av denne grunn må lagringsutstyr for hydrogen designes og vedlikeholdes i henhold til høye sikkerhetsstandarder for å sikre at beholderen forblir uskadd.

### Leksjon 3: Hydrogenlagring

Denne leksjonen gir en oversikt over alternativer for lagring av hydrogen og tar også for seg de viktigste sikkerhetsutfordringene og de tekniske problemene knyttet til dem. Den dekker også temaene hydrogens påvirkning på forskjellige typer materialer og hydrogenpermeasjon, som er svært relevant for teknologier for lagring av hydrogen. Det skal nevnes at temaet hydrogenlagring er stort. Derfor er denne leksjonen hovedsakelig fokusert på systemer for lagring av hydrogen under høyt trykk, flytende hydrogen og hydrogen lagret inne i metaller, med størst oppmerksomhet på høytrykkslagringsteknologi siden det er vanligst. Fenomener som utslipp, branner og eksplosjoner vil bli diskutert i de påfølgende leksjonene.

## 3. Alternativer for hydrogenlagring

Hydrogenlagring er en muliggjørende teknologi for hele spekteret av bruksområder for brenselcelle og hydrogen (FCH), fra innebygd i kjøretøy til stasjonær og bærbar kraftproduksjon [1]. Det er ingen universell løsning for hydrogenlagring. I stedet må løsningen velges nøye for å møte spesifikke systemkrav. For eksempel er plass og vekt kritiske faktorer for FC-personbiler, mens vekt kan være en ønskelig egenskap for FC-gaffeltrucker eller marine applikasjoner. I romfart har NASA brukt flytende hydrogen i årevis [2].

Hydrogen er den letteste gassen med en lav normal tetthet på 0,09 g/L (ved 288 K og 1 bar). Som det følger av [tabell 1](#), har hydrogen et svært høyt energiinnhold per masse av alle drivstoff (omtrent tre ganger mer enn bensin). På grunn av den lave tettheten har imidlertid hydrogen et veldig lavt energiinnhold per volumenhet (omtrent fire ganger mindre enn bensin). Som et resultat er lagring av hydrogen, spesielt innenfor størrelsen og vektbegrensningene til et kjøretøy, en utfordring [3]. Forskning pågår for å utvikle trygg, pålitelig, kompakt, lett og kostnadseffektiv hydrogenlagringsteknologi.

*Volumetriske og gravimetrisk kapasiteter (tettheter)* er to termer som ofte brukes når man beskriver tilnærminger til lagring av gass. Når det gjelder hydrogen, er forskningsaktiviteter rettet mot å øke begge kapasitetene, dvs. høyere både volumetrisk (per volum) og gravimetrisk (per masse)<sup>1</sup> kapasitet er ønskelig. Som det er vist i [tabell 1](#), er det mer energi i 1 kg hydrogen enn i 1 kg bensin. Imidlertid er det også tydelig at den samme massen av hydrogen opptar et større volum. Hydrogen er ikke væske ved omgivelsestemperatur, og for å lagre mengden som er tilstrekkelig for en bestemt rekkevidde på et kjøretøy (over 500 km) er det nødvendig å enten komprimere hydrogenet til svært høyt trykk (for eksempel til 700 bar for bruk i bil), eller å avkjøle den betydelig for å oppnå flytende form. Disse ytterpunktene for trykk og temperatur gir sikkerhetsutfordringer for materialene som brukes og i tilfelle tap av inneslutning.

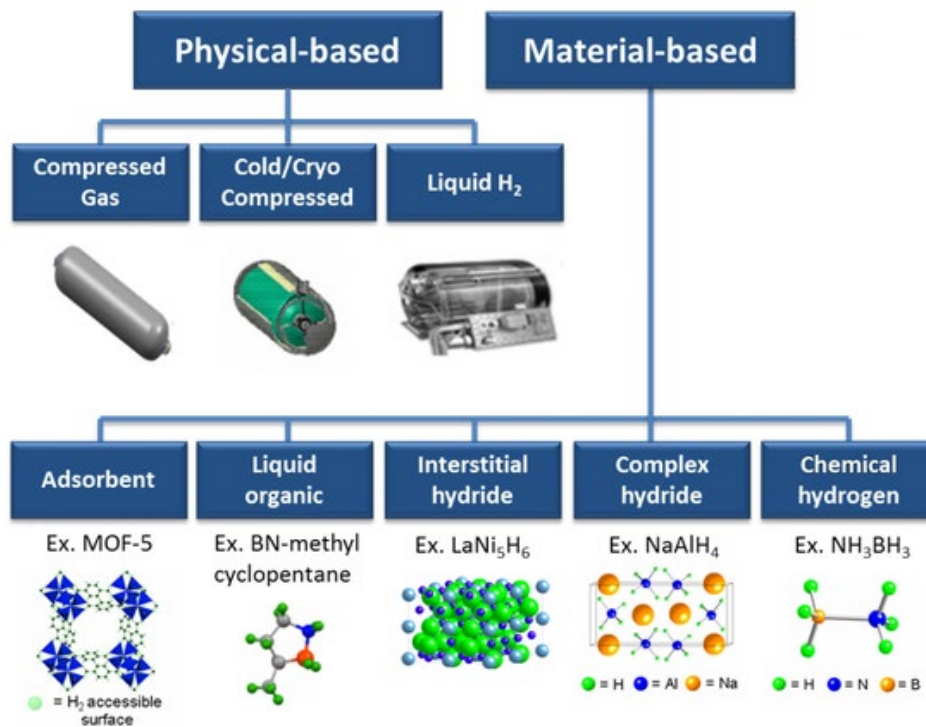
Tabell 1. Energiinnhold etter vekt og volum for hydrogen og andre vanlige drivstoff [4]

---

<sup>1</sup> Gravimetrisk kapasitet bestemmer den nødvendige vekten til en lagertank for lagring av en gitt mengde av H<sub>2</sub>

### Leksjon 3: Hydrogenlagring

|                              | Hydrogen                   | Naturgass                    | Bensin    |
|------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------|
| Energiinnhold per masseenhet | 2,8 ganger mer enn bensin  | ~ 1,2 ganger mer enn bensin  | 43 MJ/kg  |
| Energiinnhold per volumenhet | 4 ganger mindre enn bensin | 1,5 ganger mindre enn bensin | 31,7 MJ/l |



Kilde: Det amerikanske energidepartementet (DoE): <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>

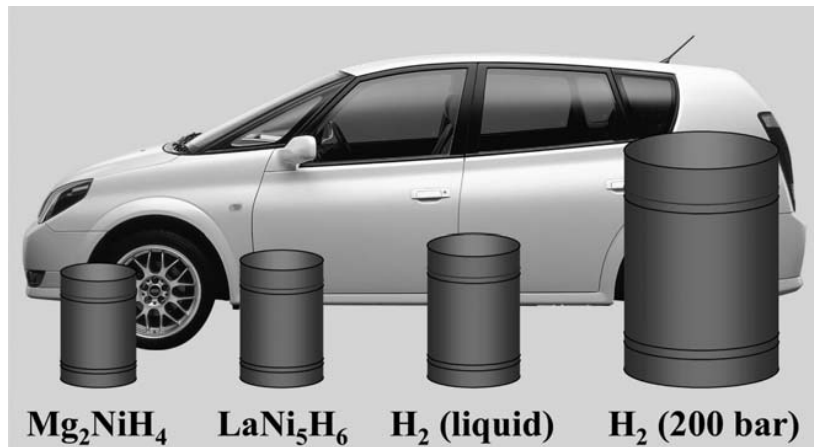
Figur 1. En oversikt over hydrogenlagringsteknologier

Hydrogen kan lagres *fysisk* som komprimert gass (cGH<sub>2</sub>) eller som en kryogen væske (LH<sub>2</sub>). De lagringssystemene for hydrogen i gassform krever vanligvis beholdere for komprimert gass, dvs. tanker (som tåler opptil 700 bar trykk). Lagring av hydrogen som væske krever ekstremt lave temperaturer fordi kokepunktet ved 1 atm trykk er -253 °C. LH<sub>2</sub>-lagring brukes ofte til lagring og transport av hydrogen i bulk (se leksjonen «Introduksjon til FCH -bruk og hydrogensikkerhet»). Hydrogen kan også lagres i *faste stoffer*: på overflater av faste stoffer (ved adsorpsjon) eller i faste stoffer (ved absorpsjon) [1]. En oversikt over hydrogenlagringsalternativer gis i figur 1.

Figur 2 fra referanser [5, 6] illustrerer de volumetriske tetthetene som ble oppnådd for 20 år siden for de forskjellige lagringsalternativene i bruk i kjøretøy. Det amerikanske

### Leksjon 3: Hydrogenlagring

energidepartementet har satt mål i sitt forskningsprogram [7] for hver av parameterne, slik at forskning kunne avbrytes hvis det ser ut til at et av målene ikke kunne nås.



Kilde: Risø Energy Report 3, 2004.

Figur 2. Volumet 4 kg hydrogen opptar lagret på forskjellige måter, i forhold til størrelsen på en bil. I dag er det vanlig å lagre hydrogen ved 700bar.

## 4. Lagring av hydrogen i gassform

Den vanligste måten å lagre hydrogen på nå, er som en komprimert gass i metall- og komposittmantlede rør ved forskjellige trykk. Som det ble vist i tidligere leksjoner, bruker mange FC-applikasjoner hydrogen ved høyt trykk.

### 4.1 Typer lagringstanker for $cGH_2$

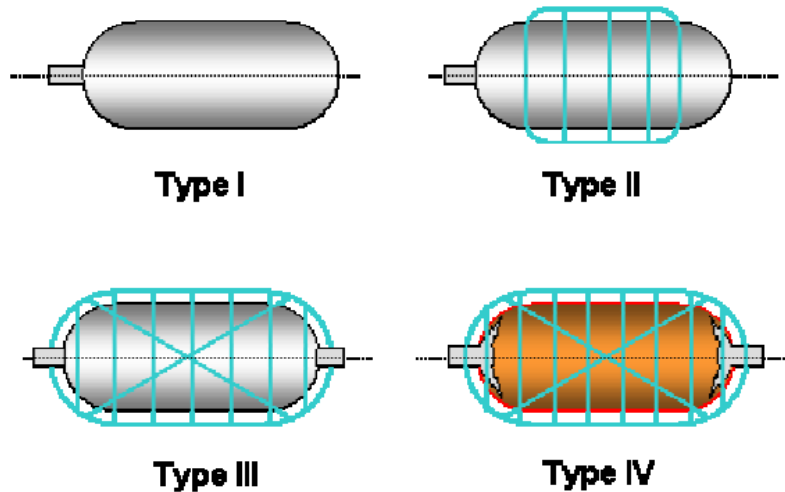
På grunn av en rekke unike hydrogenegenskaper (se leksjonen «Egenskaper for hydrogen som er relevante for sikkerhet»), bør hydrogen være kompatibelt med materialene veggene i lagringstankene er laget av. Fire typer tanker er utviklet og blir brukt til transport og lagring av hydrogen:

- Type I: laget av metall sømløs metallbeholder
- Type II: sømløs metallbeholder hopp-mantlet med fiberharpikskomposit
- Type III: metalliske fôringer fullstendig mantlet med fiberharpikskomposit
- Type IV: polymerfôring fullstendig mantlet med fiberharpikskomposit

I 2014 ble den første prototypen av type V-tank produsert. Det er en helkomposittbeholder uten fôring [8]. De skjematiske fremstillingene av beholdertypene som brukes for  $cGH_2$ , vises i figur 3.



## Leksjon 3: Hydrogenlagring



Kilde: Barthelemy, 2009 [10] .

Figur 3. Typer hydrogentanker som brukes til lagring av komprimert hydrogengass  
 Eksempler på lagringsbeholdere som kan finnes til stasjonær bruk, omfatter: en bunt eller kurv med sylindere, faste rørbunter eller rørhenger som brukes til å levere hydrogen til tankstasjoner (figur 4).



Kilde: AirLiquide Image Bank

Figur 4. Eksempler på hydrogentanker som er vanlige for stasjonær bruk:  
 (a) fast bunt med sylindere, (b) kurv med sylindere.

## 4.2 Innebygd hydrogenlagring

Som nevnt tidligere er type III og type IV de best egnede beholderne for lagring av hydrogen i kjøretøy . Disse teknologiene er også mye brukt til lagring av andre gasser (f.eks. naturgass eller luft), men hovedforskjellen er behovet for mye høyere trykk i det innebygde hydrogenlageret: 35 til 70 MPa for hydrogen sammenlignet med 20 MPa for naturgass. Innebygde hydrogenlagringssystemer bør utføre følgende funksjoner:

- motta hydrogen ved tanking
- oppbevare hydrogenet til det skal brukes

### Leksjon 3: Hydrogenlagring

- frigjøre hydrogen til brenselcellesystemet for å drive kjøretøyet.

Dagens lette hydrogenbiler (FCV) lagrer vanligvis opptil 6 kg hydrogen om bord som trengs for å gi en rekkevidde i området 400–500 km [4]. I likhet med CNG-busser lagrer hydrogenbussene hydrogen på taket i flere tanker. Brenselcellene er vanligvis plassert i bussens bakre motorrom. Opptil 50 kg hydrogen kan lagres i en FC-buss.

#### 4.3 Trykkavlastningsutstyr

Hovedsikkerhetsfunksjonen til hydrogenlagringssystemene (både for biler og stasjonære bruksområder) er *trykkavlastningsenheter* (PRD, eng: *Pressure Relief Device*), med følgende definisjon: en PRD er en sikkerhetsinnretning som beskytter mot svikt i en lagringstank ved å slippe ut noe av eller hele tankinnholdet ved høye temperaturer, høyt trykk eller en kombinasjon av begge [9]. Ved brann gir *termisk aktivert trykkavlastningsutstyr* (TPRD) et kontrollert utslipp av hydrogen i gassform  $\text{GH}_2$  fra en høytrykksbeholder før veggene svekkes av høye temperaturer og fører til et *katastrofalt brudd*. TPRD lufter ut hele innholdet i beholderen raskt. De forsegles ikke på nytt og tillater ikke ny trykksetting av beholderen for hydrogensystemer.

## 5. Konsekvenser av katastrofal svikt i høytrykkshydrogentank (eksplosjonsbølger, ildkuler, prosjektiler)

Hva skjer hvis TRPD ikke aktiveres i en brann? Studiene utført ved Southwest Research Institute, USA [10, 11] viste at det vil oppstå katastrofale bruddet i tanken.

### 5.1 Potensielle farer og sikkerhetsspørsmål knyttet til $\text{cGH}_2$ : oppsummering

De potensielle farene forbundet med innebygd lagring av komprimert hydrogen i gassform inkluderer:

- Vanskeligheter med å identifisere hydrogenutslipp ettersom gassen er luktfri, fargeløs og smakløs. Luktstoffer kan ikke tilsettes hydrogen.
- Hydrogen kan føre til *sprøhet* i noen metaller. Dette kan resultere i redusert materialstyrke og følgelig til brist i beholdere, noe som kan føre til hydrogenlekkasje.
- Akkumulering av hydrogen over en lengre periode i lukkede rom som en garasje eller et verksted, kupeen i en bil. *Kvelning* kan oppstå fordi hydrogen fortrenger luft.
- Dannelse av brennbare hydrogen-oksygen- eller hydrogen-luft-blandinger. Inntak av brannfarlig blanding i et ventilasjonssystem i en bygning kan føre til deflagrasjon eller til og med detonasjon.
- Høytrykkshydrogenstråler kan skade bar hud [12].

### Leksjon 3: Hydrogenlagring

- Overtrykk og impuls kan føre til: trommehinneskade på personer, lungeødem, tankbrudd, flygende bruddstykker, knust glass, etc.
- *Pressure peaking phenomenon* kan føre til en at en garasje kollapser på bare ett sekund (dette kommer vi nærmere inn på i de påfølgende leksjonene).
- Hydrogen kan lett antennes siden MIE er 0,017 mJ (som er 10 ganger lavere enn andre drivstoff). En statisk gnist kan antenne hydrogen.
- Når rent hydrogen brenner, kanflammene være usynlige i dagslys.
- Hydrogen brenner raskt og produserer ikke røyk.
- En ekstern brann, varme eller termisk stråling kan forårsake et mekanisk brudd i en tank på grunn av termisk nedbrytning av polymere materialer og komposittmaterialer. Den nåværende verdien av brannmotstand (offentlig tilgjengelig) er opptil 12 minutter før den katastrofale svikten kan oppstå.
- Ved TPRD-funksjonsfeil er et verst tenkelig scenario mulig: et brudd (dvs. en katastrofal svikt) i hydrogentanken som produserer en ildkule, trykkbølger og brennende prosjektiler.

## 6. Sikkerhetsteknologi for lekkasje uten revner

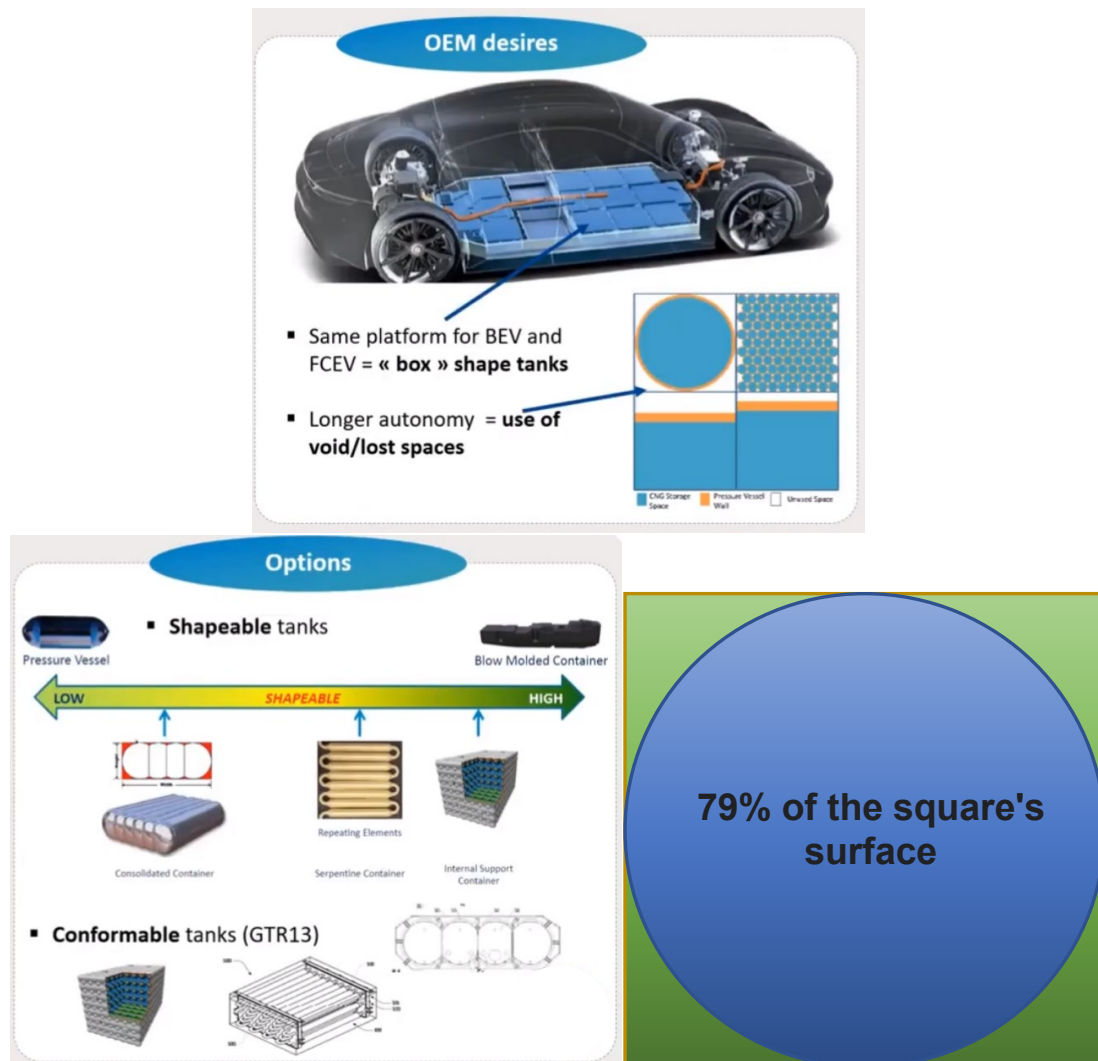
Komposittbeholdere for innebygd høytrykkshydrogen er produsert og tatt i bruk på vei, jernbane og i sjøfart og luftfart i mange land rundt om i verden. Det svakeste punktet for komposittbeholdere er hvordan de reagerer på brann. Ved for eksempel en brann på et begrenset sted kan det hende at TPRD ikke utløses, noe som har skjedd i ulykker med biler med komprimert naturgass i USA. Dessuten kan TPRD bli blokkert av brann i en ulykke e.l. Disse potensielle feilene i hydrogensikkerhet kan bli svært kritiske for beskyttelse av liv og eiendom på grunn av ødeleggende konsekvenser av tankbrudd, det vil si trykkbølge, ildkule og prosjektiler.

### 6.1 Ny trend i 2020

I løpet av de siste 10 årene var store, komposittmantlede trykktanker en gjennomførbar løsning med tanke på integrering av hydrogenlagringssystemet i den eksisterende kjøretøyarkitekturen, som først og fremst er utviklet for forbrenningsmotorer. Med den raske ekspansjonen av elbiler over hele verden har bilprodusenter behov for å dele den samme bilarkitekturen og se etter ny design av lagringssystemer med konforme tanker. Integreringen av begge energisystemene i det samme karosseriet vil muliggjøre stordriftsfordeler, forenkle og redusere prosjekterings- og produksjonsprosesser og muliggjøre fleksibel produksjon, noe som kan dempe etterspørselssvingninger uten å gå på akkord med kundenes forventninger til plass, ytelse, sikkerhet eller kostnad. Som et resultat er begrunnelsen for de nye konfigurasjonene som bilprodusentene ønsker seg, på den ene siden å kunne bruke den samme plattformen for elbiler

### Leksjon 3: Hydrogenlagring

og hydrogenbiler (figur 5). Dette involverer tanker i «boksform». På den annen side å øke rekkevidden til kjøretøy ved å bruke plassen som er mistet.



Figur 5 Ny trend for integrering og konfigurering av komprimert lagringssystem

## 7. Utnyttelse av e-Laboratory

e-Laboratory for hydrogensikkerhet ble introdusert i leksjon 1. En rekke verktøy er spesielt nyttige for lagring. Disse inkluderer beregning av dynamisk tømning av en lagertank, tid til tankbrudd og korrelasjoner av ildkuler.

### Referanser

1. DoE. Hydrogen storage (2015). Tilgjengelig fra: <http://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage> [6.11.20].
2. NASA. Summary: space applications of hydrogen and fuel cells. Tilgjengelig fra: [http://www.nasa.gov/topics/technology/hydrogen/hydrogen\\_2009.html](http://www.nasa.gov/topics/technology/hydrogen/hydrogen_2009.html) [6.11.20].

## Leksjon 3: Hydrogenlagring

3. Introduction to Hydrogen for Code Officials, U.S. Department of Energy, Washington DC. Tilgjengelig fra: [http://www.hydrogen.energy.gov/training/code\\_official\\_training/](http://www.hydrogen.energy.gov/training/code_official_training/) [6.11.20].
4. US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders. Tilgjengelig fra: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [6.11.20].
5. Risø Energy Report 3: Hydrogen and its competitors (2004). Redigert av Larsen, H, Feidenhans, R og Petersen, LS. Risø National Laboratory. ISBN 87-550-3349-0.
6. Zuettel, A (2013). Hydrogen: production, storage, applications and safety. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells. 23.–27. september 2013, Kreta, Hellas.
7. DoE targets for on-board hydrogen storage systems for light-duty vehicles (2009). Publisert på DOE/EERE nettsted. Tilgjengelig fra: [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/targets\\_onboard\\_hydro\\_storage.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/targets_onboard_hydro_storage.pdf) [6.11.20].
8. Mafeld, A. (2015). CPVs: Regional trends in the global market. JEC Asia: Composite Pressure Vessels Forum. Singapore, 22. oktober 2015.
9. Sunderland, P (2010a). Hydrogen vehicles and safety regulations in the U.S. Teaching materials of the 8th ISCARW, Belfast, UK, juni 2010.
10. Zalosh, R (2007). Blast waves and fireballs generated by hydrogen fuel tank rupture during fire exposure. Proceedings on the 5<sup>th</sup> Seminar on Fire and Explosion Hazard, Edinburgh, UK, 23.–27. april 2007, s. 2154–2161.
11. Weyandt, N (2006). Vehicle bonfire to induce catastrophic failure of a 5000-psi hydrogen cylinder installed on a typical SUV, Motor Vehicle Fire Research Institute. Report. Desember, 2006. Tilgjengelig fra: [www.mvfri.org](http://www.mvfri.org) [6.11.20].
12. Hammer, W (1989). Occupational Safety Management and Engineering, 4. utgave, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989, ISBN 0-13-629379-4, kapittel 19.