

## **Vedleggsbeskrivelse**

Vedlegget er en samling av lagrings- og brenselcelleteknologi. Grunnet oppgavens omfang valgte vi å ekskludere de fra selve oppgaven. I et perspektiv av teknologiforståelse ser vi det fremdeles som gunstig å inkludere som vedlegg.

Ingen av teknologiene er kommersialiserte, og enkelte er utelukkende teoretiske. Disse teknologiene har etter vår mening ingen innvirkning på teknologivalg, eller på vår oppgave.

## **Innholdsfortegnelse**

<b>Vedleggsbeskrivelse</b> .....	1
<b>Lagring av hydrogen</b> .....	3
Absorbert hydrogen .....	3
Metallhydrider .....	3
Intermetalliske hydrider .....	4
Komplekse metallhydrider .....	4
Kjemiske hydrider .....	4
<b>Brenselceller</b> .....	6
SOFC .....	6
PAFC .....	6
MCFC .....	6
<b>Referanseliste</b> .....	7

# Lagring av hydrogen

## Absorbert hydrogen

Van der Waals-binding kan bli utnyttet for å absorbere hydrogenet med et annet molekyl (Helseth, 2022). Grunnet svakheter ved Van der Waals-bindinger må en benytte lave temperaturer og høyt trykk for å oppnå signifikant tetthet ved absorbering av hydrogen (Berenguer-Murcia et al., 2018). Kombinasjonen av lave temperaturer og høyt trykk blir målt opp mot komprimert og flytende hydrogen. Trykk mellom 10-100 bar er normalt, ved høyere trykk vil komprimert hydrogen være mer effektivt grunnet temperaturreduksjonen. Det samme gjelder da for temperatur, dersom en går for lavt vil flytende hydrogen være mer effektivt (Klebanoff et al., 2014). Det hele er en avveining på hva som gir størst tetthet opp mot energiforbruk. Den største utfordringen ved absorbering er behandling av varmen som oppstår. Prosessen er eksoterm, og produserer en betydelig mengde varme. For effektiv absorbering må varmen ledes bort. Vanligst er det å benytte flytende nitrogen, som og krever betydelige mengder energi. Absorberingsprosessen har et energitap på rundt 80% (Adametz et al., 2014).

## Metallhydrider

Metallhydrider er en klasse materialer som inneholder metall bundet med hydrogen. Båndene er sterkere enn de fysiske båndene oppnådd ved absorbering, som resulterer i større massetetthet. Samtidig kreves det mer energi for å friggi hydrogenet fra bindingen. De sterke båndene gjør og til at produksjon og oppbevaring kan foregå ved mer normale forhold enn absorbering, komprimering og flytendegjøring av hydrogen (Bellosta von Colbe et al., 2019). Frigjøringen kan gjøres i en reaksjon med vann, eller eksponering til varme. Tilnærmingene er radikalt ulike: eksponering til varme er endoterm og reaksjon med vann er eksoterm; varmeeksponering er reversibel, mens reaksjon med vann er irreversibel; varmeeksponering skjer i fast form, mens reaksjon med vann skjer i en løsning; varmeeksponering krever forhøyet temperatur, mens reaksjon med vann kan skje spontant i romtemperatur (Klebanoff et al., 2014).

De fleste elementære metaller kan danne binære sammensetninger med hydrogen. Grunnet termodynamikk og/eller lagringskapasitet er få av disse egnet for lagring (Sandrock, 1999). De mest lovende for storskala lagring er aluminium hydrid og magnesium hydrid.

Aluminium hydrid er en relativt svak binding. Løsrivning av hydrogen skjer hurtig ved 100°C og er irreversibel grunnet behovet for trykk ved danning. Dette gjør aluminium hydrid til en ettertraktet form for lagring, men krever en effektiv løsning for danning av hydridet (Graetz et al., 2011). Magnesium hydrid har to kvaliteter: magnesium er billig, og har høy teoretisk lagringsevne for hydrogen (Yartys et al., 2019). Bindingen er derimot sterk, og krever en temperatur på over 300 °C for å effektivt hente ut hydrogenet igjen. Flere framgangsmåter er testet for å effektivisere bindingen og uthenting av hydrogen. Disse går ut på å forbedre de termodynamiske og kinetiske egenskapene til magnesium (Sun et al., 2018).

### Intermetalliske hydrider

Siden bare to elementære metalliske bindinger, aluminium og magnesium, er attraktive, er det blitt forsket på bruk av metallisk legering for å oppnå bedre resultater. Ettersom det relative forholdet mellom metall x og metall y resulterer i ulike kjemiske egenskaper, finnes det i praksis et uendelig antall intermetalliske hydrider. Teorien er å nytte et metall x som binder hydrogenet sterkt, og et metall y som binder hydrogenet svakt, for så å utnytte dette i absorberingen og frigjøringen av hydrogen (Sandrock, 1999). Det er en generell konsensus om at intermetalliske hydrider absorberer for lite hydrogen til å nyttes i stor skala, fremdeles er det potensiale for nisjer av stasjonære applikasjoner (Sakintuna et al., 2007).

### Komplekse metallhydrider

Her er hydrogen en del av et komplekst anion som binder seg til et metallisk kation (Pedersen, 2020a; Pedersen, 2020b). I motsetning til intermetalliske hydrider består komplekse metallhydrider av relativt lette element. Dette resulterer i at komplekse metallhydrider har høyere gravimetrisk lagringskapasitet (Pasini et al., 2013). Ulempen er at disse krever høye temperaturer under frigjøringen av hydrogen, og kun et fåtall er reversible (Møller et al., 2017).

### Kjemiske hydrider

Kjemiske hydrider består av lettere elementer enn metalliske hydrider. Egenskapene er derfor ulike hverandre. Kjemiske hydrider er generelt flytende ved normale forhold, noe som gjør det radikalt lettere å transportere og lagre, så vel som bortføring av varme og masse under hydrogenering og dehydrogenering (Pedersen, 2023).

Ammoniakk er det mest attraktive lagringsmediet innen kjemiske hydrider. Det har høy lagringstetthet, og syntesen, håndtering, transportering, og oppbevaring er modnet gjennom bruk til gjødselproduksjon (Klerke et al., 2008). Produksjonsanlegg for ammoniakk kan lett omstilles til å bruke hydrogen isteden for naturgass, slik de gjorde før 60-tallet (Pfromm, 2017; Philibert, 2017). Produksjonsprosessen er eksoterm, og krever trykk på 200-350 bar, og temperaturer på 300-500°C (Klerke et al., 2008). Varmen kan nyttes til å danne damp for å holde trykket oppe. Slik kan storskala produksjon være effektivt til tross for de ekstreme forholdene (Tunå et al., 2013). Ammoniakk er og ekstremt giftig, som legger føringer for sikre rammer for bruk av ammoniakk som energibærer (CDC, 2017).

Syntetisering av metanol er en kommersialisert prosess. Fornybar metanol produseres gjennom hydrogenering av CO<sub>2</sub> (Cuezzo et al., 2023). Hydrogen kan frigjøres på flere måter, dampreforming, reaksjon med oksygen, eller gjennom termolyse (Özcan & Akin, 2019). Dampreforming har fordelen av at tre hydrogenmolekyl frigjøres, fremfor to. Dette fordi vannet også inneholder et hydrogenmolekyl. Det kreves derimot temperaturer på rundt 230-330 °C. Ettersom at både vanndamp og metanol er endoterm, må temperaturen nås ved tilførsel av ekstern varme (Ploner et al., 2021).

Produksjon av maursyre skjer ved hydrolysering av metyl formater. Samtidig er maursyre et biprodukt ved produksjon av eddiksyre (Davies et al., 2011). Av ammoniakk, metanol, og maursyre, er det maursyre som har lavest lagringsevne. Fordelen er at frigjøring av hydrogen oppstår ved midle forhold, ganske nær romtemperatur (van Putten et al., 2019).

Flytende organiske hydrogenbærere (LOHC) er karakterisert ved reversibel hydrogenering, og er flytende både før og etter. Både metanol og maursyre er organiske og flytende, men er ikke en LOHC da dehydrogeneringen produserer hydrogengass (Kim et al., 2022). Behovet for fanging og lagring av CO<sub>2</sub> faller bort siden LOHC er flytende både ved absorbering og frigjøring. Hydrogenet beholder en relativt god renhetsgrad (Ordóñez et al., 2022). Karbon-til-karbon-bindingene i materialet bestemmer kostnaden og konkurransevnen til en LOHC. Dette fordi bindingene bestemmer antall sykluser med hydrogenering og dehydrogenering materialet tåler (Bourane et al., 2016).

# Brenselceller

## SOFC

SOFC opererer ved temperaturer mellom 700-1000°C (Damo et al., 2019). Dette medfører krav om spesifikke materielle egenskaper, som: stabilitet i oksiderende omgivelser, nok katalytisk aktivitet for oksygenreduksjon, og tilfredsstillende elektrisk ledningsevne (Jiao et al., 2016). Samtidig er det identifisert flere fordeler ved SOFC, 1) den høye operasjonelle temperaturen kan brukes til kraftvarme, 2) levetid på mellom 40' og 80' timer, og 3) benytter ikke edelt metall som katalysator (Stambouli & Traversa, 2002).

## PAFC

PAFC er den mest avanserte brenselcellen (Chen et al., 2015). Med operasjon på 200°C er den gunstig til bruk i stasjonære og operative installasjoner (Kuwabara, 2009). PAFC har fordel ved 1) stabil operasjon, 2) lavt damptrykk, 3) moderat temperatur, 4) tolerant ovenfor CO<sub>2</sub>, og 5) bruker luft som oksidant (Murahashi, 2009). Ulempene er lav energitetthet relativt til andre løsninger, og bruk av dyre edle metall som er sensitive til CO (Yang et al., 2016).

## MCFC

MCFC opererer mellom 550-750°C, hvor effektiviteten synker kraftig når en nærmer seg den øvre grensen (Bosio et al., 1999). Fordelene er 1) uavhengig av edelt metall til katalysator grunnet den høye operasjonelle temperaturen, 2) høy effektivitet, og kan benyttes som et CCS-system, og 3) kan samkjøres med en gass turbin som resulterer i effektiv energigenerering grunnet den høye temperaturen (Leo, 2012; Milewski et al., 2016; Arato et al., 2016).

## Referanseliste

- Adametz, P., Müller, K., & Arlt, W. (2014). Efficiency of low-temperature adsorptive hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(28), 15604–15613. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.07.157>
- Arato, E., Audasso, E., Barelli, L., Bosio, B., & Discepoli, G. (2016). Kinetic modelling of molten carbonate fuel cells: Effects of cathode water and electrode materials. *Journal of Power Sources*, 330, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.08.123>
- Bellosta von Colbe, J., Ares, J.-R., Barale, J., Baricco, M., Buckley, C., Capurso, G., Gallandat, N., Grant, D. M., Guzik, M. N., Jacob, I., Jensen, E. H., Jensen, T., Jepsen, J., Klassen, T., Lototsky, M. V., Manickam, K., Montone, A., Puszkiel, J., Sartori, S., & Sheppard, D. A. (2019). Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(15), 7780–7808. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.104>
- Berenguer-Murcia, Á., Marco-Lozar, J. P., & Cazorla-Amorós, D. (2018). Hydrogen Storage in Porous Materials: Status, Milestones, and Challenges. *The Chemical Record*, 18(7-8), 900–912. <https://doi.org/10.1002/tcr.201700067>
- Bosio, B., Costamagna, P., & Parodi, F. (1999). Modeling and experimentation of molten carbonate fuel cell reactors in a scale-up process. *Chemical Engineering Science*, 54(13-14), 2907–2916. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(98\)00414-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(98)00414-x)
- Bourane, A., Elanany, M., Pham, T. V., & Katikaneni, S. P. (2016). An overview of organic liquid phase hydrogen carriers. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(48), 23075–23091. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.167>
- CDC. (2017). *Ammonia | Medical Management Guidelines | Toxic Substance Portal | ATSDR*. Cdc.gov. <https://wwwn.cdc.gov/TSP/MMG/MMGDetails.aspx?mmgid=7&toxid=2>
- Chen, X., Wang, Y., Cai, L., & Zhou, Y. (2015). Maximum power output and load matching of a phosphoric acid fuel cell-thermoelectric generator hybrid system. *Journal of Power Sources*, 294, 430–436. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.06.085>
- Cuezzo, A. M., Araujo, P. Z., Wheeler, J., & Mele, F. D. (2023). Modeling and environmental implications of methanol production from biogenic CO<sub>2</sub> in the sugarcane industry. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 67, 102301. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102301>
- Damo, U. M., Ferrari, M. L., Turan, A., & Massardo, A. F. (2019). Solid oxide fuel cell hybrid system: A detailed review of an environmentally clean and efficient source of energy. *Energy*, 168, 235–246. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.091>
- Davies, S. M., Linforth, R. S., Wilkinson, S. J., Smart, K. A., & Cook, D. J. (2011). Rapid analysis of formic acid, acetic acid, and furfural in pretreated wheat straw hydrolysates and ethanol in a bioethanol fermentation using atmospheric pressure chemical ionisation mass spectrometry. *Biotechnology for Biofuels*, 4(1). <https://doi.org/10.1186/1754-6834-4-28>
- Graetz, J., Reilly, J. J., Yartys, V. A., Maehlen, J. P., Bulychev, B. M., Antonov, V. E., Tarasov, B. P., & Gabis, I. E. (2011). Aluminum hydride as a hydrogen and energy storage material: Past, present and future. *Journal of Alloys and Compounds*, 509, S517–S528. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.11.115>

- Helseth, L. E. (2022, November 24). *Van der Waals-binding*. Store Norske Leksikon. [https://snl.no/van\\_der\\_Waals-binding](https://snl.no/van_der_Waals-binding)
- Jiao, Y., Zhang, L., An, W., Zhou, W., Sha, Y., Shao, Z., Bai, J., & Li, S.-D. (2016). Controlled deposition and utilization of carbon on Ni-YSZ anodes of SOFCs operating on dry methane. *Energy*, *113*, 432–443. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.063>
- Kim, C., Lee, Y., Kim, K., & Lee, U. (2022). Implementation of Formic Acid as a Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC): Techno-Economic Analysis and Life Cycle Assessment of Formic Acid Produced via CO<sub>2</sub> Utilization. *Catalysts*, *12*(10), 1113. <https://doi.org/10.3390/catal12101113>
- Klebanoff, L. E., Ott, K. C., Simpson, L. J., O'Malley, K., & Stetson, N. T. (2014). Accelerating the Understanding and Development of Hydrogen Storage Materials: A Review of the Five-Year Efforts of the Three DOE Hydrogen Storage Materials Centers of Excellence. *Metallurgical and Materials Transactions E*, *1*(2), 81–117. <https://doi.org/10.1007/s40553-014-0011-z>
- Klerke, A., Christensen, C. H., Nørskov, J. K., & Tejs Vegge. (2008). *Ammonia for hydrogen storage: challenges and opportunities*. *18*(20), 2304–2304. <https://doi.org/10.1039/b720020j>
- Kuwabara, T. (2009). FUEL CELLS – PHOSPHORIC ACID FUEL CELLS | Cathodes. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 557–563. <https://doi.org/10.1016/b978-044452745-5.00275-6>
- Leo, T. (2012). Molten Carbonate Fuel Cells. *Comprehensive Renewable Energy*, 247–259. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-087872-0.00408-x>
- Milewski, J., Futyma, K., & Szczęśniak, A. (2016). Molten carbonate fuel cell operation under high concentrations of SO<sub>2</sub> on the cathode side. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(41), 18769–18777. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.121>
- Møller, K., Sheppard, D., Ravnsbæk, D., Buckley, C., Akiba, E., Li, H.-W., & Jensen, T. (2017). Complex Metal Hydrides for Hydrogen, Thermal and Electrochemical Energy Storage. *Energies*, *10*(10), 1645. <https://doi.org/10.3390/en10101645>
- Murahashi, T. (2009). FUEL CELLS – PHOSPHORIC ACID FUEL CELLS | Electrolytes. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 564–567. <https://doi.org/10.1016/b978-044452745-5.00278-1>
- Ordóñez, S., Díaz, E., & Faba, L. (2022). Hydrogenation and Dehydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers: A New Opportunity for Carbon-Based Catalysts. *C*, *8*(1), 7. <https://doi.org/10.3390/c8010007>
- Özcan, O., & Akın, A. N. (2019). Thermodynamic analysis of methanol steam reforming to produce hydrogen for HT-PEMFC: An optimization study. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(27), 14117–14126. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.211>
- Pasini, J. M., Corgnale, C., van Hassel, B. A., Motyka, T., Kumar, S., & Simmons, K. L. (2013). Metal hydride material requirements for automotive hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, *38*(23), 9755–9765. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.08.112>
- Pedersen, B. (2020a, December 22). *Anion*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/anion>
- Pedersen, B. (2020b, December 22). *Kation*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/kation>
- Pedersen, B. (2023, January 22). *Hydrogenbinding*. Store Norske Leksikon. <https://snl.no/hydrogenbinding>
- Pfromm, P. H. (2017). Towards sustainable agriculture: Fossil-free ammonia. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *9*(3), 034702. <https://doi.org/10.1063/1.4985090>

- Philibert, C. (2017, May 16). *Producing ammonia and fertilizers: new opportunities from renewables*. International Energy Agency; Renewable Energy Division. <https://www.ee.co.za/wp-content/uploads/2017/06/Producing-ammonia-and-fertilizers-new-opportunities-from-renewables.pdf>
- Ploner, K., Delir Kheyrollahi Nezhad, P., Watschinger, M., Schlicker, L., Bekheet, M. F., Gurlo, A., Gili, A., Doran, A., Schwarz, S., Stöger-Pollach, M., Bernardi, J., Armbrüster, M., Klötzer, B., & Penner, S. (2021). Steering the methanol steam reforming performance of Cu/ZrO<sub>2</sub> catalysts by modification of the Cu-ZrO<sub>2</sub> interface dimensions resulting from Cu loading variation. *Applied Catalysis A: General*, 623, 118279. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2021.118279>
- Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., & Hirscher, M. (2007). Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review☆. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(9), 1121–1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>
- Sandrock, G. (1999). A panoramic overview of hydrogen storage alloys from a gas reaction point of view. *Journal of Alloys and Compounds*, 293-295, 877–888. [https://doi.org/10.1016/s0925-8388\(99\)00384-9](https://doi.org/10.1016/s0925-8388(99)00384-9)
- Sambouli, A. Boudghene., & Traversa, E. (2002). Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(5), 433–455. [https://doi.org/10.1016/s1364-0321\(02\)00014-x](https://doi.org/10.1016/s1364-0321(02)00014-x)
- Sun, Y., Shen, C., Lai, Q., Liu, W., Wang, D.-W., & Aguey-Zinsou, K.-F. (2018). Tailoring magnesium based materials for hydrogen storage through synthesis: Current state of the art. *Energy Storage Materials*, 10, 168–198. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2017.01.010>
- Tunå, P., Hulteberg, C., & Ahlgren, S. (2013). Techno-economic assessment of nonfossil ammonia production. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(4), 1290–1297. <https://doi.org/10.1002/ep.11886>
- van Putten, R., Wissink, T., Swinkels, T., & Pidko, E. A. (2019). Fuelling the hydrogen economy: Scale-up of an integrated formic acid-to-power system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(53), 28533–28541. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.153>
- Yang, P., Zhang, H., & Hu, Z. (2016). Parametric study of a hybrid system integrating a phosphoric acid fuel cell with an absorption refrigerator for cooling purposes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(5), 3579–3590. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.10.149>
- Yartys, V. A., Lototsky, M. V., Akiba, E., Albert, R., Antonov, V. E., Ares, J. R., Baricco, M., Bourgeois, N., Buckley, C. E., Bellosta von Colbe, J. M., Crivello, J.-C. ., Cuevas, F., Denys, R. V., Dornheim, M., Felderhoff, M., Grant, D. M., Hauback, B. C., Humphries, T. D., Jacob, I., & Jensen, T. R. (2019). Magnesium based materials for hydrogen based energy storage: Past, present and future. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(15), 7809–7859. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.212>