



**Høgskulen
på Vestlandet**

HØGSKULEN på VESTLANDET –
Campus Bergen
Institutt for maskin- og marinfag

Prosjektoppgave MAS307
Hydrogenteknologi

Mulighetsstudie av ombygging av Fosna Orion



© Roger Solem
MarineTraffic.com

Mulighetsstudie av ombygging av Fosna Orion

Forord

Denne semesteroppgaven er skrevet i samarbeid med Norsk vindenergiserter og gitt i faget MAS307 ved Høgskulen på Vestlandet. Vi vil rette en takk til Lovise Johanne Sæte og Terje Bach ved NVS for å vise interesse for oppgaven og for å dele sin kunnskap. Vi vil også rette en takk mot vår veileder Velaug Myrseth Oltedal for å vise engasjement og for å inspirere til nye måter å belyse problemstillingen på. Videre vil vi takke Linde, Ballard og Hexagon for at de delte informasjon om de forskjellige komponentene.

Signert av:

- Runar Garnes
- Hallvard Valen
- Adrian Hjeltestad
- Jan William Jensen



Nomenklatur

<i>kWh</i>	<i>Kilowattimer</i>
<i>kW</i>	<i>Kilowatt</i>
<i>m³</i>	<i>Kubikkmeter</i>
<i>Fossilfri</i>	<i>Ingen fossil energi</i>
<i>CAPEX</i>	<i>Kapitalkostnad</i>
<i>OPEX</i>	<i>Operasjonskostnad</i>
<i>H₂</i>	<i>Hydrogen</i>
<i>η</i>	<i>Virkningsgrad</i>
<i>ρ</i>	<i>Tetthet</i>

Antagelser

- Gravimetrisk energitetthet til hydrogen = 33,32 kWh/kg
- $\eta_{\text{Brenselcelle}} = 0,6$
- $\rho_{\text{Flytende hydrogen}} = 70,85 \text{ kg/m}^3$
- Volumetrisk energitetthet ved 350 bar = 750 kWh/m³
- Brennverdi hydrogen = 42,7 MJ/kg
- $\rho_{\text{diesel}} = 0,84 \text{ kg/l}$
- $\eta_{\text{motor}} = 0.35$
- Kostnad diesel= 6.5 kr/l
- Nominell effekt brenselcelle= 175 KW
- $\eta_{\text{ved nominell effekt}}=49\%$

Innhold

Innholdsfortegnelse

INNLEDNING	8
SAMMENDRAG	9
ABSTRACT	9
METODE	10
1.	11
<i>Forbruk</i>	<i>12</i>
<i>Rute 1</i>	<i>12</i>
<i>Rute 2</i>	<i>13</i>
<i>Rute 3</i>	<i>14</i>
2. HYDROGEN	15
HYDROGEN SOM ENERGIBÆRER	<i>16</i>
HYDROGENPRODUKSJON	<i>17</i>
HYDROGEN FOR FREMTIDEN	<i>18</i>
3. DIMENSJONERING AV TANK	19
HEXAGON TYPE 4 SYLINDERE	<i>21</i>
HEXAGON MAGNUM SYLINDER	<i>23</i>
STANDARD UAC TYPE 4 SYLINDERE FRA UMOE	<i>24</i>
4. BRENSELCELLE	25
PEM – «PROTON-EXCHANGE MEMBRANE»	<i>26</i>
AFC – «ALKALINE FUEL CELL»	<i>26</i>
SAFC – «SOLID ACID FUEL CELL»	<i>27</i>
PAFC – «PHOSPHORIC ACID FUEL CELL»	<i>27</i>
SOFC - FASTSTOFFOKSID BRENSELCELLE	<i>27</i>
FORBRUK	<i>27</i>
AVKJØLING	<i>28</i>
STØRRELSE	<i>28</i>
5. BATTERIER	29
BLYAKKUMULATOR	<i>29</i>
NIKKEL-KADMIUM-AKKUMULATOREN	<i>30</i>
LITIUM-ION-BATTERI	<i>31</i>
BATTERI SOM NØDLØSNING	<i>32</i>
<i>Høyt estimat:</i>	<i>34</i>
<i>Lavt estimat:</i>	<i>34</i>
<i>Pris</i>	<i>35</i>
6. PRISESTIMATER	36
PRIS FOR HYDROGEN VED PRODUKSJON PÅ SMØLA	<i>36</i>
PRIS FOR HYDROGEN I NORGE	<i>38</i>
7. KONKLUSJON	39

Innledning

En viktig del av Norges havbruksnæring er de mange servicebåtene som sørger for at drifts- og serviceoppdrag utføres. I dag drives de fleste båter av diesel, noe som fører til store klimautslipp. Med et økende fokus på det fornybare skiftet og et mål om å fase ut bruken av fossile energikilder må det utvikles alternative løsninger. I bilindustrien er det et stort fokus på utviklingen av elbiler med batterier som energibærere, men på grunn av begrensninger som rekkevidde og fleksibilitet vil dette være utfordrende å implementere i båtindustrien. En løsning på dette kan være bruken av hydrogen. Med fleksibiliteten hydrogen gir kan båtene i stor grad driftes som de gjør i dag med dieseldrift.

Denne oppgaven er en del av et større prosjekt hvor målet er å utvikle et konsept for nullutslippsbåter med hydrogen som alternativ energibærer for arbeidsbåter i havbruksnæringen. Prosjektet skal legge til rette for å kunne utvikle en pilot, forenkle prosessen for aktører som vil bruke nullutslippsfartøy og bidra til at Abyss skal stå sterkere i konkurranse om fremtidige oppdrag hvor miljøet er i fokus.

I denne oppgaven skal gruppen se på den Abyss-eide båten Fosna Orion. Denne båten har tidligere blitt utstyrt med måleutstyr slik at informasjon som transportruter, hastighet, forbruk og effektbruk over tid under transport, samt arbeidsoppgaver på havbrukslokaliteter kan logføres. Ved å bruke denne informasjonen kombinert med tall fra en tidligere bacheloroppgave skal det dimensjoneres hydrogentank, batteri og brenselceller slik at båten kan drives av hydrogen som erstatning for diesel. I tillegg skal det også lages et prisestimat på alle komponentene slik at kostnadene til prosjektet kan kartlegges.

Rapporten har som formål å fremme kunnskap om hvordan hydrogen skal lagres og brukes til drift. Det skal legges frem flere løsninger før det konkluderes med hvilken løsning som er best egnet. Ved å bruke denne informasjonen er målet å svare på problemstillingen: "Er det teknisk mulig å bygge Fosna Orion om fra dieseldrift til hydrogendrift, eller bør det bygges en ny båt?"

Sammendrag

I dette prosjektet har det blitt sett på mulighetene for å bygge om servicebåten Fosna Orion fra diesel til hydrogen. Det er i all hovedsak fokusert på den tekniske biten, men det er tatt med noen kostnadsestimer. Det er blitt sett på tanker med forskjellige trykk, brenselcelle og forbruket den har, kostnader på hydrogen og batteri som nødløsning. Lokal Produksjon av hydrogen er også et av temaene som er blitt tatt opp. I dette prosjektet er Smøla vindpark en lokasjon som det er gjort beregninger på.

Teknologien er i dag kapabel til å erstatte diesel, men en av hovedutfordringene er vektbegrensningen til Fosna Orion. Teknologien er fortsatt på et tidlig stadie hvor statlig støtte er nødvendig for å tiltrekke seg frisk kapital. Det anses at en ny servicebåt som er beregnet for hydrogen er den beste løsningen for å få på plass et slikt system.

Abstract

This project have looked at possibilities of rebuilding the service boat Fosna Orion from diesel to hydrogen. The focus has mostly been on the technical part and some cost estimates have been included. This project has looked at hydrogentanks, at different pressures, fuel cell, consumption and battery as emergency solution. Local hydrogen production is also one of the topics that has been evaluated. In this project Smøla wind farm is a location that calculations are based on. The hydrogen technology today can replace diesel, but one of the main challenges is the weight limitation for Fosna Orion. There is also a risk for those who invest in technology today. It is still at an early stage where state aid is needed to attract fresh capital. A new service boat seems to be the best way to implement hydrogen technology in this case.

Metode

Måten problemstillingen ble valgt å angripes på var ved å hente inn informasjon fra aktuell faglitteratur og leverandører for ulike komponenter til en hydrogendreven båt. Arbeidet ble delt inn utfra de ulike komponentene og hver gruppedeltaker fikk sitt ansvarsområde og innhente informasjon fra. Denne fordeling av arbeidsoppgaver gjorde hele prosjektet mer oversiktlig og tanken var at om man kunne ha en person som spisset seg inn på et område, ville det føre til kontinuitet i arbeidet til hver enkelt, og totalsummen ville løftes som et resultat av dette. Det viste seg at det å innhente informasjon om komponenter til et system som representerer en relativt ny teknologi, var tidkrevende. Mye tid ble brukt på gjennomgang av ulike leverandører og diverse korrespondanse for å skape seg et helhetlig bilde over hvilke alternativer som fantes på markedet. Videre ble ligninger fra faglitteraturen for masseberegninger benyttet for å dimensjonere systemet. Fremtidige markedspriser og andre prisestimer er gjort ut ifra referanser som har nære bånd til industrien, og kvalifisert gjetning fra fagmiljøet, og det tas forbehold om at det er knyttet en del usikkerhet til disse beregningene.

1. Fosna Orion

Fosna Orion er en 18 meter lang og 7 meter bred servicebåt bygget av Moen Marin og eid av Abyss Aqua AS. Fosna Orions hovedhavn ligger i Kristiansund. Hovedoppgavene til skipet er å frakte utstyr og mannskap, samt å vedlikeholde og rengjøre anleggene brukt i oppdrettsnæringen. Dette er et typisk fartøy brukt i den nevnte industrien. Båten drives av to dieselmotorer som bruker maksimalt 882 kW. Det er 24 tonn lastekapasitet på dekk. Dette er et interessant fartøy for å se på mulighetene til konvertering fra diesel til bruk av grønt hydrogen fordi båten opererer i og rundt vindparkene i Smøla, det har et begrenset utvalg av reiser, og det er en stor forbruker av diesel.

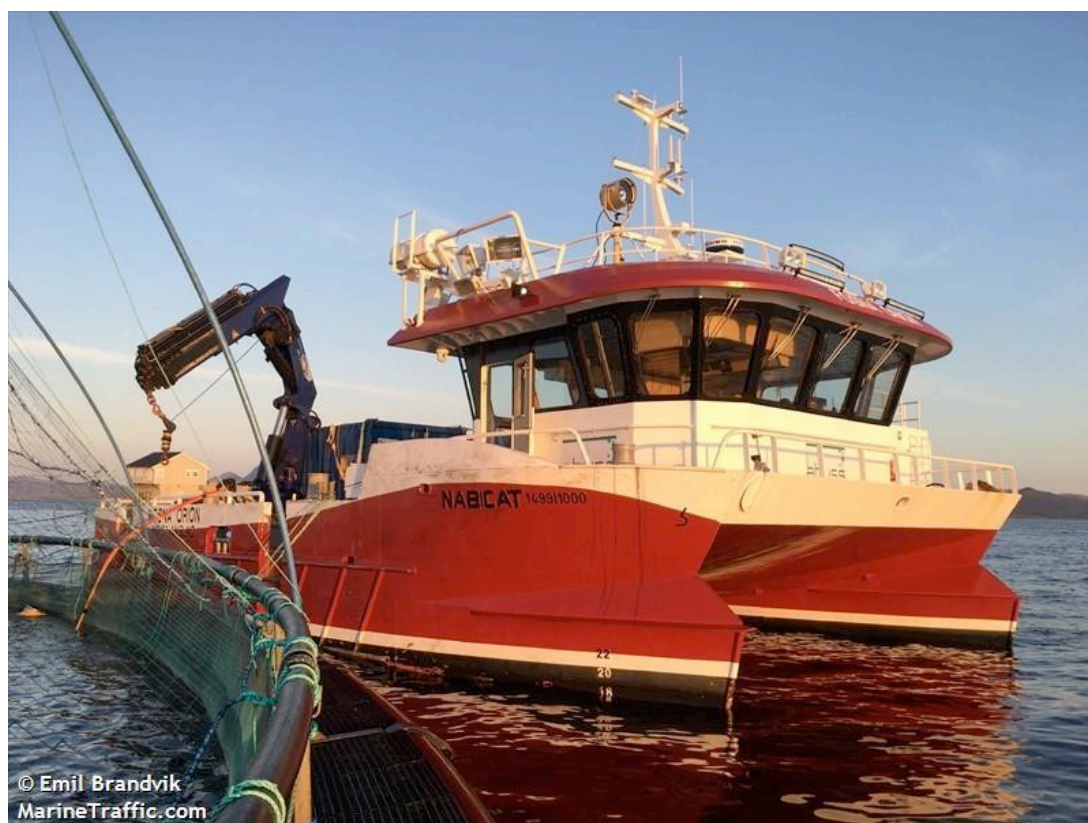


Figure 1-1 Fosna Orion

Formålet med å bygge om Fosna Orion til en nullutslippsbåt er å minske utslippet av CO₂. På bakgrunn av dette var det ønskelig å se på hvor store utslipp som kommer fra Fosna Orion i løpet av et år. Det er mange forskjellige typer diesel med forskjellig mengde utslipp av CO₂. Rapporten fra «NTNU» har allerede gjort disse beregningene, og den forklarer at «From communications with the owners, an estimate of 100.000 litres of diesel was consumed each year by the vessel. Applying the calculations in table 13, the vessel puts out 265 tonnes of CO₂ each year.» [1]

	Molar weight
Carbon	12 [g/mol]
Hydrogen	1 [g/mol]
Oxygen	16 [g/mol]
C ₁₂ H ₂₃	167 [g/mol]
CO ₂	48 [g/mol]
Balanced equation	$4\text{C}_{12}\text{H}_{23} + 71\text{O}_2 \longrightarrow 46\text{H}_2\text{O} + 48\text{CO}_2$
Ratio	$\text{C}_{12}\text{H}_{23} = 12\text{CO}_2 = (12 \cdot 48) / 167 = 3.45 \text{ [kg CO}_2\text{/kg diesel]}$
Diesel density	0.840 [kg/liter] Appendix C
Diesel emission	$3.45 \cdot 0.840 = 2.65 \text{ [kg CO}_2\text{/liter diesel]}$

Figure 1-2 Calculating CO₂ emissions from diesel fuel

For å sette dette i perspektiv slipper en gjennomsnittlig bil ut 2.3 tonn pr år. Dette betyr at ombyggingen av Fosna Orion kan være med på å redusere CO₂ utslipp som tilsvarer 115 biler i året. [1]

Forbruk

For å finne ut hvor mye diesel Fosna Orion bruker må man se på hvor lange ruter den kjører, i hvilken hastighet og hva effektforbruket er. I rapporten fra NTNU så de på tre forskjellige ruter Fosna Orion kjører.

Rute 1

Fosna Orion reiser fra Kristiansund til Aukra for å rengjøre anlegget brukt i oppdrettsnæringen. Oppdraget gjennomføres med en gjennomsnittsfart på 16.2 km/t over en distanse på 88 km, noe som tilsvarer et energiforbruk på 5000 kWh. Fremme med oppdrettsanlegget brukte den 3 timer til å rense, dette med et energiforbruk på 1269 kWh. Det totale energiforbruket i løpet av dagen medregnet både transitt og drift er estimert til 6561,4 kWh. Det totale CO₂-Utslippet var på 4346 kg CO₂.

Route 1		
Total distance traveled	88 km	47.5 nm
Transit duration		7.5 hours
Average speed transit	16.2 km/h	8.75 knots
Average speed operation	2.1 km/h	1.13 knots
Peak power per engine	410 kW	549.8 hp
Transit energy output (Mode 1)		
Distance	86 km	46,4 nm
Propulsion		4795 kWh
Generator 25 % load		120 kWh
Total transit energy output		4915 kWh
Energy output per distance	57.2 kWh/km	106 kWh/nm
Operation energy output (Mode 2)		
Distance	2 km	1.07 nm
Propulsion		350 kWh
Generator (75% load)		169 kWh
Generator (25 % load)		28 kWh
NCS		1100 kWh
Operation duration		3.0 hours
Total operation energy output		1646 kWh
Energy output per hour		549 kWh/h
Energy summary		
	Fuel in [l]	Energy out [kWh]
Propulsion	1286.3	5145
Generator 25 % load	37	148
Generator 75 % load	42	169
NCS	275	1100
Total	1640 l	6562 kWh
CO ₂ emissions	4346 kg CO ₂	
CO ₂ emissions per kilometres	49 kgCO ₂ /km	

Figure 1-3 Rute 1 [1]

Rute 2

Her var transitturen på 7 timer og over 157 km, fra Kristiansund til Frøya. Gjennomsnittsfarten var på 15.5 km/h. Effekttoppen var på 400 kW og det ble estimert et totalt energiforbruk på 7715 kWh, som gir et CO₂ utslipp på 5000 kg.

Route 2		
Total distance traveled	156.6 km	84.5 nm
Transit duration		7.0 hours
Average speed transit	15.5 km/h	8.34 knots
Peak power per engine	400 kW	543.8 hp
CO ₂ emissions per kilometers		33 kg CO ₂ /km
CO ₂ emissions		~5100 kg CO ₂

Transit energy output (Mode 1)	Fuel in [l]	Energy out[kWh]
Propulsion	1904	7616
Generator 25% load	25	99 kWh
Total energy output	1929	7715 kWh
Energy output per distance	49.3 kWh/km	91.3 kWh/nm

Tabell 1-4 Rute 2

Rute 3

På denne dagen hadde Fosna Orion tre forskjellige transittdistanser som ga en total distanse på 39.5 km med en gjennomsnittsfart på 11.4 km/h. Dette tilsvarer et energiforbruk på 2150 kWh. Mellom den første og andre transitten ble det gjort et arbeide i tre timer. I denne tidsperioden opererte generatoren på 75%, mens den opererte på 25% når den kjørte mellom operasjoner. Det totale energiforbruket ble på 3741 kWh, som tilsvarer et CO₂ utslipp på 2500 kg CO₂.

Route 3		
Total distance traveled	40.5 km	21.9 nm
Operation duration		3.0 hours
Average speed transit	11.4 km/h	6.16 knots
Average speed operation	1.9 km/h	1.03 knots
Peak power per engine	380 kW	516.6 hp
Transit (Mode 1)		
Distance	39.5 km	21.3 nm
Propulsion		2100 kWh
Generator 25% load		49 kWh
Total transit energy output		2150
Energy output per distance	54 kWh/km	101 kWh/nm
Operation (Mode 2)		
Distance	1 km	0.54 nm
Transit duration		3.5 hours
Propulsion		570 kWh
Generator (75% load)		127 kWh
Generator (25 % load)		71 kWh
NCS		825 kWh
Total energy output		1592 kWh
Energy output per hour		455 kWh/h
Energy summary		
	Fuel in [l]	Energy out [kWh]
Propulsion	668	2670
Generator 25 % load	30	120
Generator 75 % load	31	127
NCS	206	825
Total energy	936 l	3742 kWh
CO ₂ emissions		~2500 kg CO ₂
CO ₂ emissions per kilometers		61 kg CO ₂ /km

Figure 1-5 Route 3

Det ble bestemt at for videre beregninger skulle man ta utgangspunkt i et energiforbruk på 8000 kWh. Dette er fordi gjennom den lengste transitten var det et totalt energiforbruk på 7715kWh.

2. Hydrogen

Hydrogen er et fargeløst, luktfritt, smakløst og brennbart gassformet stoff som er det enkleste medlemmet i det periodiske systemet. Hydrogenatomet har en kjerne som består av et proton som har en positiv elektrisk ladning og et elektron som har en negativ ladning. Under vanlige forhold er hydrogengass en løs aggregering av hydrogenmolekyler, som hver består av et par atomer, et diatomisk molekyl, H₂. Den tidligst kjente viktige egenskapen til hydrogen er at det brenner med oksygen for å danne vann, H₂O. Navnet hydrogen er faktisk hentet fra det greske ordet som betyr «vannprodusent».

Selv om hydrogen er det mest tallrike elementet i universet utgjør det bare 0,14 prosent av jordskorpen etter vekt. Det forekommer imidlertid i store mengder som en del av vannet i havet, elver, innsjøer og i atmosfæren. Hydrogen finnes også i utallige karbonforbindelser og hydrogen danner et mangfold av forbindelser med alle andre elementer (unntatt edle gasser).

Hydrogen er mest anvendt i industriell forbindelse i fremstilling av ammoniakk (en forbindelse av hydrogen og nitrogen, NH_3) og i hydrogenering av karbonmonoksid og organiske forbindelser. [2] Hydrogen er som nevnt det minste kjemiske elementet fordi det kun består av et proton i kjernen. Symbolet for hydrogen er H, og atomnummeret i det periodiske systemet er 1. Monoatomisk hydrogen er sjeldent på jorden, dette er fordi dets tilbøyelighet til å danne kovalente bindinger med de fleste andre elementer. Ved standard temperatur og trykk er hydrogen en ikke-giftig, ikke- metallisk og svært brennbar gass. Hydrogen har et smeltepunkt på $-259,14$ grader celsius og et kokepunkt på $-252,87$ grader celsius og har lavere tetthet enn luft ($0,08988$ g/L). Den har to forskjellige oksidasjonstilstander (+1,-1) som gjør det i stand til å fungere som både et oksiderende og reduserende middel. Hydrogen er tilgjengelig i forskjellige former, for eksempel komprimert gass, flytende og slaps (sammensatt av flytende og fast stoff) , så vel som faste og metalliske former. [3]

Hydrogen som energibærer

Det oppleves en økende interesse i verden rundt hydrogen som en energibærer, hvor den blir brukt som drivstoff istedenfor som råstoff. Dette kan tilskrives hovedsakelig den potensielle rollen hydrogen kan ha i henhold til den globale avkarboniseringen. En av de viktigste spørsmålene som dukker opp er om hydrogen som energibærer kan være konkurransedyktig i forhold til andre energibærere. De viktigste applikasjonene hydrogen kan bli brukt til er:

- Hydrogen som drivstoff for mobilitet
- Hydrogen som oppvarming i bygninger
- Hydrogen for avkarbonisering av industrielle prosesser
- Hydrogenproduksjon fra overskuddsstrøm fra variabel fornybar kraft

Hydrogen er et rent drivstoff som, når det forbrukes i en brenselcelle, bare produserer vann, elektrisitet og varme. Hydrogen og brenselceller kan spille en viktig rolle i vår nasjonale energistrategi, med potensialet for bruk i et bredt spekter av bruksområder, på tvers av nesten alle sektorer.

Den største utfordringen til hydrogen som energibærer, spesielt fra fornybare ressurser, er å tilby hydrogen i markedet til konkurransedyktige priser sammenlignet med andre energibærere. I transportnæringen må hydrogen være konkurransedyktig med konvensjonelle drivstoff og teknologier i kroner pr. kilometer. Dette betyr at kostnadene for hydrogen, uavhengig av produksjonsteknologi, må være mindre enn ca. 40 kroner pr. gallon bensinekvivalenter. For å redusere de samlede hydrogenkostnadene, er forskningen rettet mot å forbedre effektiviteten og levetiden til hydrogenproduksjonsteknologier, samt å redusere kostnadene for kapitalutstyr, drift og vedlikehold.

Hydrogenproduksjon

Hydrogen kan produseres på flere måter, som vist i figur 1. Imidlertid er den primære driveren for å satse på hydrogen som energibærer at det skal bidra til dekarboniseringen globalt. Dette innebærer at det vil bli lagt vekt på å produsere hydrogen på måter som gjør at verdikjeden for hydrogen kan ha et lavere karbonavtrykk enn alternative konkurrerende verdikjeder, inkludert alternative hydrogenproduksjons-metoder.

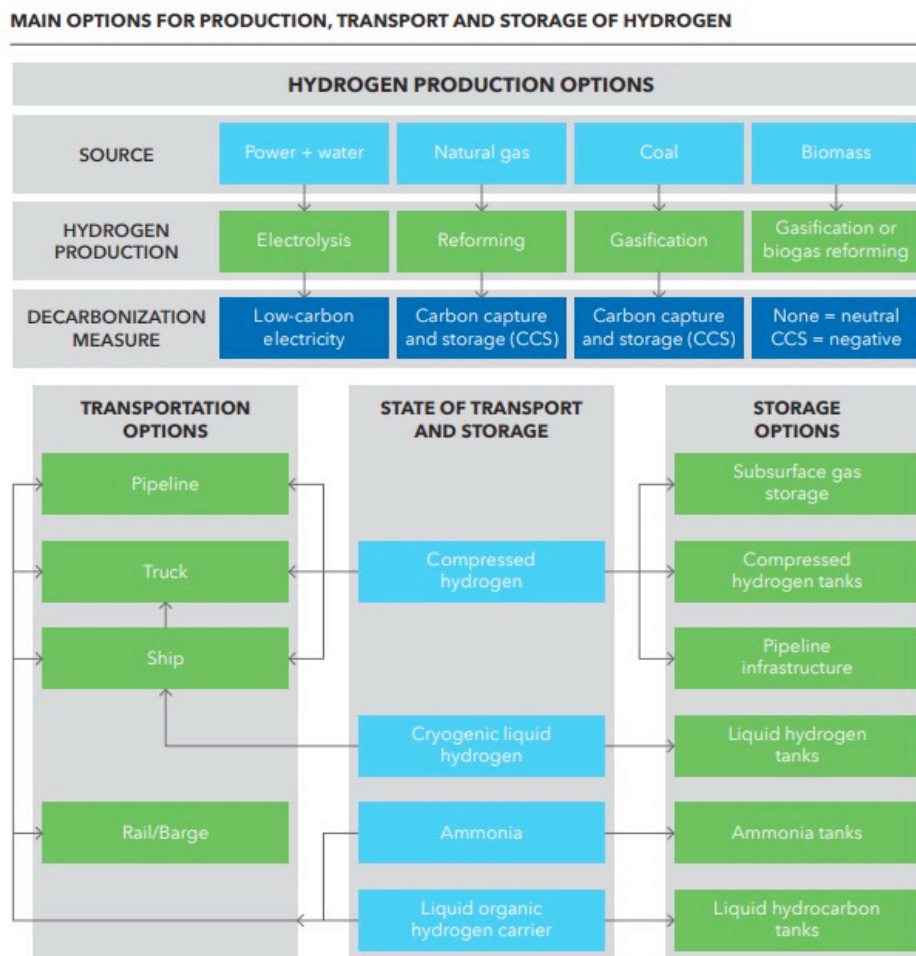


Figure 2-1 Hydrogen produksjonsmuligheter

Hydrogen produsert ved gassreforming uten karbonfangst og lagring (CCS) som er den vanligste metoden for å produsere hydrogen i dag, har et karbonavtrykk på rundt 10-12 kg CO₂ pr. kilo hydrogen. Hydrogen kan produseres fra elektrolyse med lavere karbonavtrykk hvis elektrisiteten som brukes har et karbonavtrykk som er mindre enn 250 kg CO₂ pr. MWh (Mega Watt Hour), omtrent 55% av utslippsintensiteten til et moderne naturgassfyrt kraftverk. [4] I denne rapporten blir det sett på produksjon av hydrogen fra vindkraft hvor vekselstrøm omdannes til likestrøm før strømmen deretter blir brukt til å produsere hydrogen fra vann igjennom en elektrolysør, før det blir komprimert til riktig lagringstrykk. Deretter lagres hydrogenet for senere bruk på en hydrogendrivstoffstasjon hvor det kan benyttes av båter som Fosna Orion. Hydrogenet kan også lagres og anvendes i flytende form. Flytende hydrogen har en høyere energitetthet enn komprimert hydrogen, men til gjengjeld krever det mye mer

energi å kondensere hydrogen enn det gjør å komprimere til relevant trykk. Videre så kan flytende hydrogen utgjøre en større sikkerhetsrisiko enn trykksatt. For eksempel vil en lekkasje ut i friluft fra komprimert hydrogentanker stige på grunn av oppdriften, og vil vanligvis forsvinne raskt. I kontrast vil en lekkasje i flytende hydrogen i friluft fryse omgivende luft, bli en tung gass, og kan akkumuleres på bakken. Dette er relevante aspekter å ta hensyn til når hydrogen skal fraktes, og oppbevares i tanker.

Hydrogen for fremtiden

Tiden er inne for å utnytte hydrogens potensiale til å spille en nøkkelrolle i en ren, sikker og rimelig energiframtid. Hydrogenteknologiene skal oppskaleres og kostnadene skal ned slik at hydrogen blir brukt.

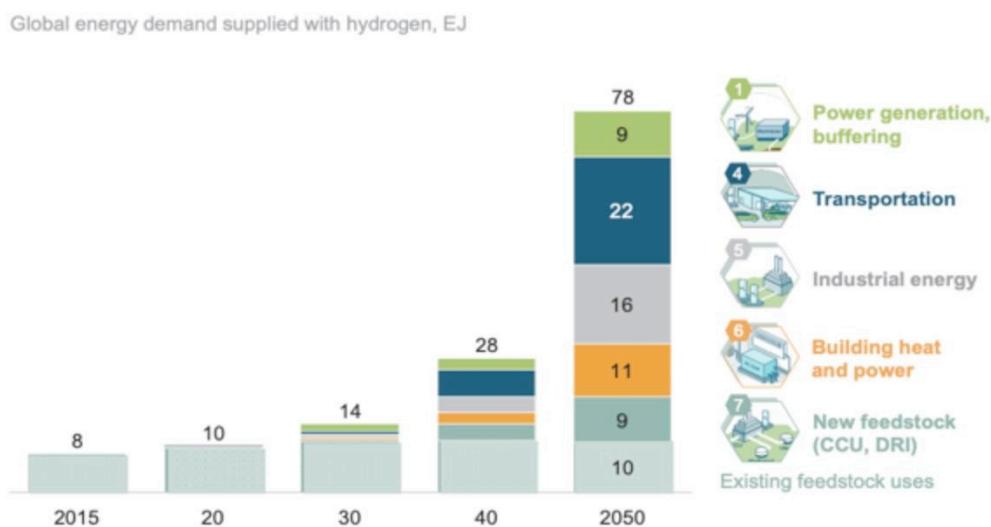


Figure 2-2 Estimert energietterspørsel 2050.

Hydrogen kan bidra til å takle ulike energiuutfordringer, og tilbyr måter å avkarbonisere en rekke sektorer, samt være med på å forbedre luftkvaliteten hvor dette er et problem, og styrke energisikkerheten. Selv om det ble satt særs ambisiøse klimamål, nådde energirelaterte CO₂ utslipp nye høyder i 2018. Luftforurensning er et økende problem, med rundt 3 millioner mennesker som dør hvert år. Hydrogen kan gjøre det mulig for fornybare energikilder å gi et enda større bidrag, den har som nevnt potensial til å hjelpe den variable energiforsyningen fra for eksempel solcelleanlegg og vindkraft dersom tilgjengeligheten ikke stemmer overens med etterspørselen (overskuddsenergi). Hydrogen er en av de ledende alternativer for lagring av energi fra akkurat fornybar energi og ser lovende ut til å være det rimeligste alternativet for lagring av energi over dager, uker og til og med måneder. Hydrogen kan transporteres over lange avstander. Nylige suksess innen solcelle PV, vind, batterier og elektriske kjøretøy har vist at politikk og teknologiinnovasjon har makt til å bygge globale industrier innen ren energi. Med en global energisektor i fluks, tiltrekker allsidigheten til hydrogen sterkere interesse fra mangfoldige grupper av regjeringer og selskaper. [5]

3. Dimensjonering av tank

Når det gjelder dimensjonering av tank er plass og vekt viktige faktorer å ta hensyn til. Det må gjøres beregninger for å anslå hvor mye hydrogen som er nødvendig å ha lagret på servicebåten for å dekke energibehovet. Det kommer til å bli sett på egenskaper og dimensjoner ved henholdsvis 350 Bar og 700 Bar. Ved 350 Bar har hydrogen en volumetrisk energitetthet antatt å ligge på 750 kWh/m^3 . For å dekke det estimerte energibehovet på 8000 kWh fra hydrogentankene blir dette tilsvarende et volum på: [6]

$$\text{Energi inn} = \frac{8000 \text{ kWh}}{0.49} = 16326.5 \text{ kWh}$$

$$\text{Volum} = \frac{16326.5 \text{ kWh}}{750 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 21.77 \text{ m}^3$$

Hydrogentankene som kan anvendes er enten tradisjonelle stålbeholdere eller kompositt trykkbeholdere. Stålbeholderne er det tyngste og rimeligste alternativet og er generelt oppgitt til å ha en vekt på 80kg stål/kg H_2 , kompositt beholderne er vesentlig letere og lagringssystemets egenvekt reduseres til ca. 22 kg komposittbeholder/ kg H_2 . For å beregne egenvekt på lagringssystemet må tettheten til hydrogen ved 350 Bar og temperatur satt til 25°C beregnes.

Temperature (°C)	Pressure (MPa)						
	0,1	1	5	10	30	50	100
-255	73,284	74,252					
-250	1,1212	68,747	73,672				
-225	0,5081	5,5430	36,621	54,812	75,287		
-200	0,3321	3,3817	17,662	33,380	62,118	74,261	
-175	0,2471	2,4760	12,298	23,483	51,204	65,036	
-150	0,1968	1,9617	9,5952	18,355	43,079	57,343	
-125	0,1636	1,6271	7,9181	15,179	37,109	51,090	71,606
-100	0,1399	1,3911	6,7608	12,992	32,614	46,013	66,660
-75	0,1223	1,2154	5,9085	11,382	29,124	41,848	62,322
-50	0,1086	1,0793	5,2521	10,141	26,336	38,384	58,503
-25	0,0976	0,9708	4,7297	9,1526	24,055	35,464	55,123
0	0,0887	0,8822	4,3036	8,3447	22,151	32,968	52,115
25	0,0813	0,8085	3,9490	7,6711	20,537	30,811	49,424
50	0,0750	0,7461	3,6490	7,1003	19,149	28,928	47,001
75	0,0696	0,6928	3,3918	6,6100	17,943	27,268	44,810
100	0,0649	0,6465	3,1688	6,1840	16,883	25,793	42,819
125	0,0609	0,6061	2,9736	5,8104	15,944	24,474	41,001

Figure 3-1 Tetthet av hydrogen ved ulike trykk og temperatur [24]

350 Bar:

Interpolering i tabell 1 ved 25 grader celsius og 350 Bar:

Hydrogen tetthet ved 25°C og 350 Bar:

$$\frac{x - 20,537}{30,811 - 20,537} = \frac{35 - 30}{50 - 30} \rightarrow x \approx 23,105 \text{ kg/m}^3$$

Vekt lagret i hydrogen

$$23,105 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 22,77 \text{ m}^3 = 526 \text{ kg}$$

Egenvekten på nødvendig mengde hydrogen er altså 503 kg ved 350 Bar.

700 Bar:

Interpolering i tabell 1 ved 25 grader celsius og 700 Bar:

$$\frac{x - 30,811}{49,424 - 30,811} = \frac{70 - 50}{100 - 50} \rightarrow x \approx 38,26 \text{ kg/m}^3$$

Gitt en gravimetrisk energitetthet på 33,32 kWh/m³ gir dette:

$$\text{Volumetrisk energitetthet} = 33,32 \text{ kWh/kg} * 38,26 \text{ kg/m}^3 = 1274,8 \text{ kWh/m}^3$$

$$\text{Nytt volum} = \frac{16326,5 \text{ kWh}}{1274,8 \text{ kWh/m}^3} = 12,8 \text{ m}^3$$

$$\text{Vekt lagret hydrogen} = 38,26 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 12,8 \text{ m}^3 \approx 489,7 \text{ kg}$$

Egenvekten på nødvendig mengde hydrogen er altså 489,7 kg ved 700 Bar.

Flytende:

$$\text{Volumetrisk energitetthet} = 33,32 \text{ kWh/kg} * 70,85 \text{ kg/m}^3 = 2360,7 \text{ kWh/m}^3$$

$$\text{Nytt volum} = \frac{8000 \text{ kWh}}{0,49 * 2360,7 \text{ kWh/m}^3} = 6,9 \text{ m}^3$$

Totalt volum for å drifte Fosna Orion med et forbruk på 8000 kWh er 6,9 m³ for flytende hydrogen.

Linde produserer tanker for flytende hydrogen i forskjellige størrelser. De har tanker som rommer 400 kg, 900 kg og 4600 kg, der samtlige er 1 bar med 95% utnyttelse. Det beste alternativet for dette scenarioet er tanken med kapasitet på 900kg. [7]

Hexagon Type 4 sylindere

Hexagon type 4 sylindere kan brukes til lagring av gass under trykk på passasjerfartøy.

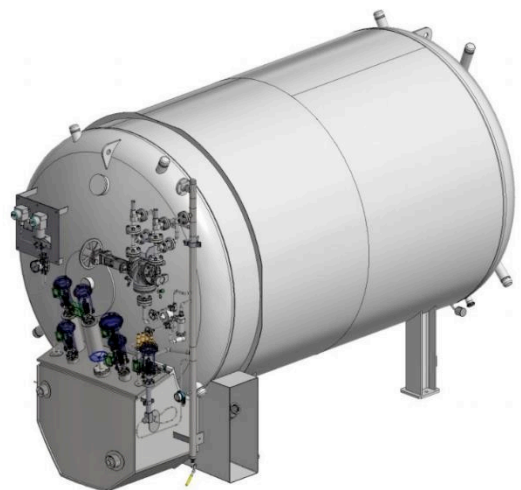


Figure 3-2 Hydrogentank

REF	NOMINAL WORKING PRESSURE (15° C) MPa	OUTSIDE DIAMETER MM	OVERALL LENGTH MM	WEIGHT KG	WATER VOLUME L	HYDROGEN CAPACITY KG
A~	20	315	1 060	16	46	0.7
B	25	541	2 783	164	450	8.0
C	25	503	2 342	94	350	6.0
D	30	509	2 342	112	350	7.2
E	35	420	3 190	101	312	7.5
F	35	509	2 342	112	350	8.4
G	50	565	3 277	280	530	16.5
H	50	531	2 424	229	347	10.7
I	70	319	906	34	36	1.4
J	70	238	1 600	29	39	1.6
K	70	420	845	43	64	2.6
L	70	440	1 050	59	76	3.1
M	95	515	2 783	365	254	12.4

Figure 3-3 Data Hexagon type 4 sylindere [9]

$$\text{Antall sylindere ved 350 bar} = \frac{503\text{kg}}{8,4\text{kg/sylinder}} = 59,88 \approx 60 \text{ stk}$$

Sylindrerne har en diameter på 0,509 meter og en lengde på 2,342 meter.

Ved 700 bar vil det være behov for enda flere sylindere av denne typen da disse har lavere kapasitet enn de ved 350. Det er ikke hensiktsmessig å ha et så høyt antall sylindere og det bør ses på en annen type tank for et så stort behov for lagret hydrogen.

Hexagon Magnum Cylinder

Et annet alternativ er Hexagons Magnumsylindere, disse tankene er fysisk større og kan ta et høyere volum enn type 4 tankene.

Magnum Cylinders	26"x95"	26"x174"	26"x224"
Approved Gases ¹	CNG (UN 1971) HELIUM (UN 1046) HYDROGEN (UN 1049) NITROGEN (UN 1066)	CNG (UN 1971) HELIUM (UN 1046) HYDROGEN (UN 1049) NITROGEN (UN 1066)	CNG (UN 1971) HELIUM (UN 1046) HYDROGEN (UN 1049) NITROGEN (UN 1066)
Certification	ABS	ABS	ABS
Maximum Fill Pressure, P _{max}	4,500 psi / 310 Bar	4,500 psi / 310 Bar	4,500 psi / 310 Bar
Operating Temperature Limits (settled)	-40° C to 65° C / -40° F to 149° F	-40° C to 65° C / -40° F to 149° F	-40° C to 65° C / -40° F to 149° F
Peak Fill and Discharge Gas Temperature	-40° C to 82° C / -40° F to 180° F	-40° C to 82° C / -40° F to 180° F	-40° C to 82° C / -40° F to 180° F
Cylinder Test Pressure, Pt (3/2 of P _w)	5,439 PSI / 375 bar	5,439 PSI / 375 bar	5,439 PSI / 375 bar
Vessel Diameter (unpressurized)	25.77 INCH / 654.56 mm	25.73 INCH / 653.54 mm	25.72 INCH / 653.28 mm
Vessel Length (unpressurized)	95 INCH / 2413 mm	174 INCH / 4419 mm	224 INCH / 5689 mm
Water Volume per Cylinder at 250 bar (approximate)	581 Liter / 153 Gallon	1170 Liter / 309 Gallon	1544 Liter / 408 Gallon
Weight per cylinder (Empty Tank)	147 KG / 324 lbs	267 KG / 588 lbs	342 KG / 754 lbs
Hydrogen Capacity	10,45kg	21,04kg	27,77kg

Figure 3-4 Data Hexagon Magnum sylinder [9]

Man tar utgangspunkt i den største sylindere på 26"x224" da Fosna Orion krever en relativt stor mengde hydrogen lagret. Disse holder 27,8 kg hydrogen ved 375 Bar, som kan ses fra figur 1.3. Det antas at hydrogen har cirka samme tetthet som ved 350 Bar og romtemperatur. Prisen på disse tankene er oppgitt fra leverandør til å ligge på 15 000 \$ pr. Stk. Denne prisen er kun for tanken og inkluderer ikke installasjon, rør, ventiler, automatikk, sikkerhetssystemer etc.

Diameter sylinder = 0,65328 meter

Lengde = 5,689 meter

$$Totalt\ volum\ sylinder = 19 * \left(\frac{\pi}{4}\right) * ((0,65328\ m)^2 * 5,689m) = 36,2\ m^3$$

$$Total\ vekt = (19 * 342\ kg) + 503\ kg\ H^2 \approx 7\ tonn$$

Dette lagringssystemet vil ha en egenvekt på ca. 7 tonn når tankene er fylt med hydrogen.

Standard UAC type 4 sylindere fra Umoe

Umoe kan levere type 4 trykkbeholdere om bord på fartøy. De leverer lagrings- og transportenheter med et trykk på 350 bar. Glassfiberbeholdere inkluderer vektbesparelse, temperaturtoleranse, lang levetid på design og forbedrede sikkerhetsnivåer, sammenlignet med trykkbeholdere av stål og de som er bygget i andre komposittmaterialer. Trykkbeholdere av glassfiber er rimeligere enn karbonfiberbeholdere. Det er ikke lyktes i å oppdrive egenvekt og pris på beholdere fra Umoe, men det antas at disse representerer et rimeligere og tyngre alternativ i forhold til Hexagons.

Standard type IV pressure vessels

Working pressure (bar)	Water volume (liter)	Length (mm)	Diameter (mm)	Hydrogen capacity (kg)
200	1 650	5 720	708	24
250	1 650	5 720	728	31
300	1 650	5 720	739	35
350	1 650	5 720	750	40
200	1 700	5 860	708	25
250	1 700	5 860	728	31
300	1 700	5 860	739	37
350	1 700	5 860	750	41
200	1 925	6 600	708	28
250	1 925	6 600	728	36
300	1 925	6 600	739	41
350	1 925	6 600	750	46

Figure 3-5 Umoe glassfiber tank type 4 [10]

Tas det igjen utgangspunkt i den største tanken ved 350 Bar fra leverandør får vi:

$$Antall\ sylindere = \frac{503kg}{46kg/sylinder} = 10,93 \approx 11\ stk$$

Diameter sylindere: 0,75 m

Lengde sylindere: 6,6m

$$\text{Totalt volum sylinder} = 11 * \left(\frac{\pi}{4}\right) * ((0,75 \text{ m})^2 * 6,6\text{m}) = 32 \text{ m}^3$$

Det totale volumet blir tilsvarende til tankene fra Hexagon. Vekten pr. Sylinder er ikke oppgitt i databladet, men tankene er i glassfiber og er dermed vesentlig tyngre enn de andre alternativene. Dette vil derimot reflekteres på prisen og glassfibertanker vil representere et rimeligere alternativ i forhold til de andre lagringssystemene representert i denne rapporten. Både Hexagon og Umoe tilbyr skreddersydde løsninger etter kundens behov og ved et slik stort lagringssystem kan det være hensiktsmessig å vurdere et spesiallaget system som passer servicebåtenes dimensjoner bedre enn hva de standardiserte produktene deres gjør. Hexagon Magnum og beholdere fra Umoe leveres ikke ved 700 Bars trykk, men det vil uansett være beholdere som er fysisk mindre og som fører til flere enheter, noe som ikke er gunstig for servicebåten. Samtidig er det verdt å nevne at et trykk på 350 Bar i systemet er det mest vanlige innen tungtransport (lastebiler etc.) og dette gjør at også disse kjøretøyene har muligheten til å benytte en eventuell fyllestasjon som tilhører området servicebåten opererer i. Lavere trykk er også hensiktsmessig sett fra et sikkerhetsmessig perspektiv, høyere trykk representerer en høyere risiko om noe går galt. Samtidig er det per dags dato ingen 700

Bars beholdere kommersielt tilgjengelig som dekker det volumet som kreves i dette systemet.

4. Brenselcelle

Brenselceller er elektrokjemiske maskiner som konverterer kjemisk potensial til elektrisitet. Det brukes hydrogen, oksygen og en katalysator for å starte reaksjonen. Bi-produktet til denne prosessen er vann. Strøm skapes når hydrogen kommer inn i brenselcellen og går gjennom et karbonfilter som kalles «Gas Defusion Layer» eller GDL. Dette laget sørger for at hydrogengassen er spredd ut over anoden. Når hydrogengassen kommer i kontakt med elektrolytten skjer det en anodereaksjon, kalt oksidasjon. Her gir hydrogenet fra seg et elektron for så å bevege seg gjennom elektrolytten. Når hydrogenatomet kommer ut på andre siden kommer det i kontakt med oksygen og det skapes vann. [8]

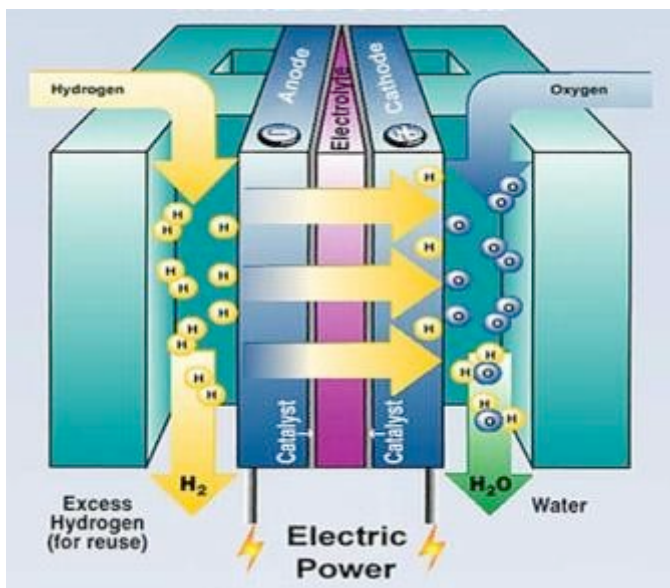


Figure 4-1 Brenselcelle

Spenningen som produseres fra hydrogenbrenselceller er 1.23 V [9], men det vil alltid være tap i systemet. Brenselceller blir derfor koblet sammen for å levere spenningen som er ønskelig. Dette er ofte kalt «Fuel Cell Stack». På figur 2 vises alle platene som er presset sammen for å levere høyere spenning. Konverteringsraten kan endres ved å justere temperatur, hvilken katalysator som brukes og arealet av platene.

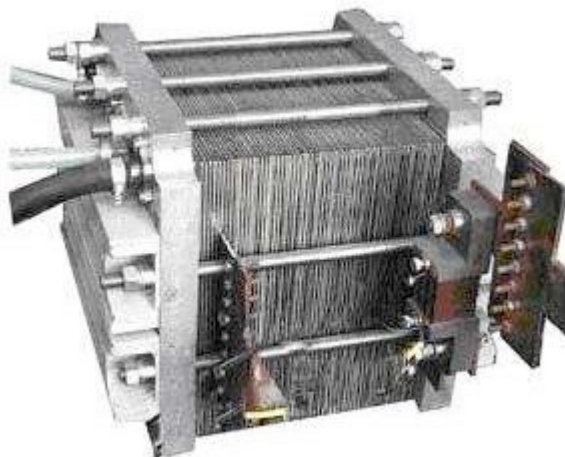
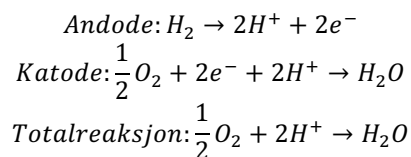


Figure 4-2 "fuel cell stack"

PEM – «Proton-exchange membrane»

PEM brenselceller henter energi fra en red-oks reaksjon hvor hydrogenet på anoden okisderes til $H^+ g^-$. Hydrogenet sendes gjennom elektrolytten og elektronet går gjennom ledninger til det apparatet som skal brukes. Reaksjonsraten kan økes ved å øke temperatur og elektrode arealet. Det er vanlig å benytte seg av en katalysator, oftest av platinum. PEM er godt egnet for kjøretøy, fordi det kan lages meget kompakt. En av de viktige tingene for at en PEM brenselcelle skal fungere godt er å holde kontroll på vannet som lages. Hvis temperaturen blir for høy vil vannet fordampe for fort og dette øker resistansen. På den andre siden, hvis vannet ikke fordampes nok hopper vannet seg opp og hindrer oksygenet fra å komme inn for å starte reaksjonen med hydrogenet. Reaksjonen som skjer i en PEM brenselcelle er [10]:



AFC – «Alkaline fuel cell»

En alkalist brenselcelle opererer i et baisk miljø. Denne brenselcellen benytter seg av ionet H^- (Hydroksidene).

Denne typen brenselceller har vært brukt til å lage strøm i verdensrommet. Den har en driftstemperatur på 60 - 100°C og 150°C ved trykk. Når temperaturen blir høyere får brenselcellen en mer konsentrert elektrolytt. Ved anoden brukes det nikkell (Ni) og ved katoden brukes sølv (Ag). Hydrogen er vanlig å bruke, men alkaliske brenselceller kan også anvendes med andre stoffer.

SAFC – «Solid acid fuel cell»

«Solid acid fuel cell» er en type Brenselceller som benytter seg av solide sure stoffer. Denne typen Brenselceller fungerer på mange måter likt som PEM, hydrogen brukes som drivstoff, reaksjonsstoffet er oksygen og biproduktet er vann.

PAFC – «Phosphoric acid fuel cell»

PAFC er en type Brenselceller som bruker flytende fosforsyre som elektrolytt. PAFC ble først utviklet på 1960 tallet og var den første kommersielle Brenselcellen på markedet. Disse Brenselcellene kjører på 150 - 200°C og vannet som kommer ut som biprodukt kan omgjøres til damp. Dette gjør at det har en teoretisk effektivitet opp mot 70%. PAFC er veldig robust. Den kan til og med kjøres på bensin, men da må svovelet fjernes.

SOFC - Faststoffoksid Brenselcelle

SOFC har en keramisk elektrolytt som leder. Det er kun to faser i et slikt system (Gass og fast stoff), noe som gjør det enkelt. Elektrolytten er en kombinasjon av zirkonia (₂) og yttria (₂₃). Anoden er et keramisk metall og katoden et elektrisk ledende keramisk materiale. Til sammen har dette en virkningsgrad på ca 50%. [12]

Forbruk

Ballard skal levere Brenselceller til Norled-fergen hvor det skal plasseres seks 200 kW Brenselceller. Det er tatt utgangspunkt i de samme 200 kW Brenselcellene i denne oppgaven hvor det blir sett på en servicebåt med navnet Fosna Orion. Fosna Orion har i dag to dieselmotorer (441 kW hver). Det er tatt utgangspunkt i samme data som Bacheloren fra NTNU hvor det er estimert at motorene leverer 400 kW [13]. Når dette skal byttes ut hydrogen og elektriske motorer må det settes inn Brenselceller. [14]

Med disse antakelsene regnes det ut hvor mye hydrogen som trengs per sekund for å drive Brenselcellen. Hydrogen har en energitetthet på 33,32 Wh/g eller 33,32 kWh/kg.

$$\frac{175kW * \frac{1h}{3600s} * \frac{1000}{1kW}}{\frac{33,32kWh}{g}} * \frac{1}{0,49} = \frac{2,98g}{s}$$

Brenselceller opererer mest effektivt når de går på 49% [2], det er derfor mer hensiktsmessig å overdimensjonere Brenselceller i stedet for hydrogentanker for å spare drivstoff og plass. Det estimeres derfor at 5 Brenselceller vil være optimalt og gir en total effekt på 1000 kW, men vil i normal drift levere 875 kW. 800 kW leveres til fremdrift og de resterende 75 kW drifter båten systemer og sekundære apparater. Når båten jobber på et anlegg dirigeres de 800 kW mot batteriet og andre apparater.

Avkjøling

Brenselcellene kan avkjøles med vann eller en blanding av vann og glykol med 1:1 forhold. Vann er den enkleste løsningen å bruke siden brenselceller opererer på temperaturer rundt 80°C [3]. D). Det er billig og har god varmeledningsevne. Siden glykol har et frysepunkt på -17°C [15] fungerer det bra på apparater som skal transportere varme vekk fra apparater ned mot 0°C.

Størrelse

Fosna Orion har kapasitet til å ta med seg 13 Tonn med ekstra vekt [13], og når de fem brenselcellene har en vekt på 4 375 kg blir vektgrensen et punkt som det må tas hensyn til. Hydrogentank, ledninger, slanger, elektrisk motor og Batterier kommer i tillegg. Det har blitt sett på forskjellige oppsett for å utnytte plassen best mulig. De oppgitte dimensjonene er som følger: [14]

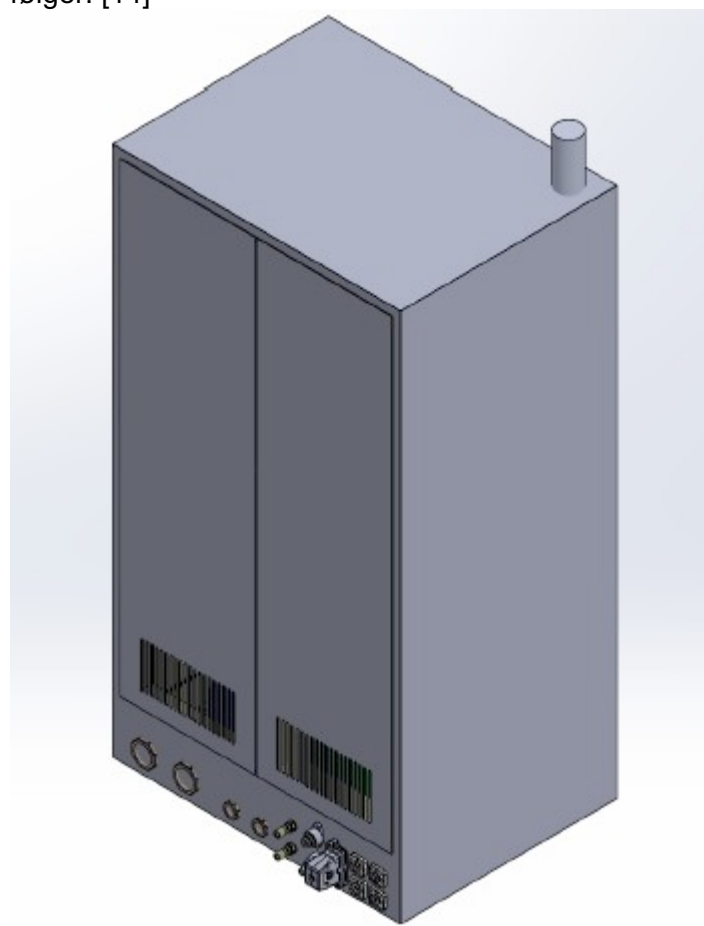


Figure 4-3 Brenselcelleskap

5. Batterier

Et batteri er en innretning som omformer kjemisk energi til elektrisk energi og det består av et eller flere galvaniske elementer med en bestemt spenning. Forskjellige typer batterier kan lagre en gitt mengde energi, basert på mengden aktivt elektrodemateriale det har. Mengden energi et batteri kan oppbevare oppgis som oftest i Wh og er produktet av batteriets spenning, utladestrøm og utladetid. Et viktig aspekt å huske er at oppgitt kapasitet er satt ved ideelle forhold og kan reduseres dersom batteriet overbelastes eller utsettes for unormalt høye eller lave temperaturer. [16]

Batterier deles inn i to hovedkategorier, primærbatterier og sekundærbatterier. Primærbatterier er engangsbatterier og vil ikke kunne lades opp igjen når de er tom. Dette gjør at disse er uaktuelle for dette prosjektet. Den andre kategorien er sekundærbatterier, og kan brukes gjentatte ganger dersom de lades opp. I denne delen skal det sees på ulike typer sekundærbatterier for å avgjøre hvilken batteritype som bør brukes i Fosna Orion.

Blyakkumulator

Blyakkumulatoren er den eldste typen oppladbart batteri og brukes ofte på steder hvor nyere batterityper vil være for dyre. Et av bruksområdene for batteriet er som bilbatteri, og finnes i de fleste biler. Batteriet består av en positiv elektrode av blyoksid, en negativ elektrode av porøst bly, samt en elektrolytt av svovelsyre, når det er ladet. [16]. En av fordelene med denne typen batteri er at det har svært lav selvutladning, og holder derfor godt på ladning over tid. Denne batteritypen er i tillegg en moden og pålitelig teknologi, og kan ha god holdbarhet dersom det brukes på rett måte.

På en annen side er det også flere ulemper med å bruke en slik batteritype. Et av hovedproblemene er at energitettheten er lav. Dette betyr at mengden energi som kan lagres er liten sett opp mot vekten av batteriet. Et annet problem er at denne typen batteri tåler svært dårlig såkalte "deep cycles". Det dette betyr er at batteriet tåler dårlig at ladningen nærmer seg både 0% og 100%, og det kan ta stor skade av å bli fullstendig utladet. I tillegg er denne batteritypen sett på som lite gunstig miljømessig, da det inneholder både bly og svovelsyre.



Figure 5-1 batteri

Nikkel-kadmium-akkumulatoren

Nikkel-kadmium-akkumulatoren består av en positiv elektrode av nikkelhydroksid, en negativ elektrode av kadmium, og en elektrolytt av kaliumhydroksid. Batteriet blir blant annet brukt i flyindustrien og i elektronikkapparater, og er et pålitelig batteri dersom det tas vare på. Nikkel-kadmium-akkumulatoren har flere fordeler i forhold til blyakkumulatoren. En av fordelene er at det kan oppbevares utladet uten å ta skade av det. I tillegg til dette fungerer det bedre enn blyakkumulatoren i lave temperaturer. En annen fordel med dette batteriet er at det har høyere energitetthet enn blyakkumulatoren. Dette kan være avgjørende dersom vekt og størrelse er viktig for forbrukeren.

Det finnes også en del ulemper med denne batteritypen. En av ulempene er den høye selvutladningen, noe som fører til at batteriet vil trenge å lades etter lagring. En annen ulempe er at batteriet har en såkalt "memory effect". Det dette betyr er at batteriet kan miste kapasitet dersom det ikke regelmessig lades helt ut før det lades fullt. Grunnen til dette er at batteriet tilpasser seg en rutine. [17]



Figure 5-2 Nikkel-kadmium-akkumulatoren

Litium-ion-batteri

Litium-ion-batteriet er vanlig å finne i moderne elektronikk som mobiltelefoner, datamaskiner og elektriske biler. Batteriet består av en positiv elektrode av litium-koboltoksid, en separator og en negativ elektrode av karbon. Batteriet kjennetegnes av lav vekt og liten størrelse, noe som fører til en høy energitetthet. Sett opp mot nikkel-kadmium-akkumulatoren har det rundt dobbel så stor energitetthet. Batteriet trenger i tillegg lite vedlikehold, og har ingen "memory effect". Selvutladingen er også lav for denne batteritypen.

En av ulempene med denne batteritypen er prisen. Litium-ion-batterier er omtrent 40% dyrere å produsere enn nikkel-kadmium-batterier. Et annet problem er at denne typen batteri har liten motstandsdyktighet mot kulde. Lave temperaturer vil føre til at kapasiteten reduseres betraktelig. [18]



eastarbattery.en.alibaba.com

Figure 5-3 Lithiumbatteri

Batteri som nødløsning

Ettersom Fosna Orion skal ha hydrogen, et relativt lite brukt drivstoff i stor skala, som drivstoff er det ønskelig å ha en reserveløsning som kan brukes dersom systemet slutter å virke. På den måten vil batteriet ha nok energi lagret til å komme seg til land, ved et nødstilfelle. I den sammenheng er det flere løsninger som kan brukes, men ettersom prosjektet handler om det som skal bli en nullutslippsbåt er en løsning hvor batteri brukes å foretrekke. Det antas at batteridriften kun skal sørge for at båten skal komme seg i en rett linje inn mot land. I tillegg antas det at batteriet dimensjoneres etter det som oppfattes som maksimal avstand fra land ut fra kartdataene gruppen har fått utlevert.

I prosessen med å dimensjonere et batteri er det viktig å ta hensyn til flere faktorer. Lav vekt og liten størrelse er avgjørende da dette er noen av hovedbegrensningene på båten. Det tas derfor utgangspunkt i et litium-ion-batteri. Denne typen batterier brukes blant annet i elektriske biler, og er som nevnt mye brukt på grunn av den lave vekten og størrelsen sett opp mot energiinnholdet. Pris er en faktor som og må tas med i beregningen og disse batteriene er relativt rimelige sett opp mot batterier med lignende energitetthet, samt at prisene er stadig synkende. [19]

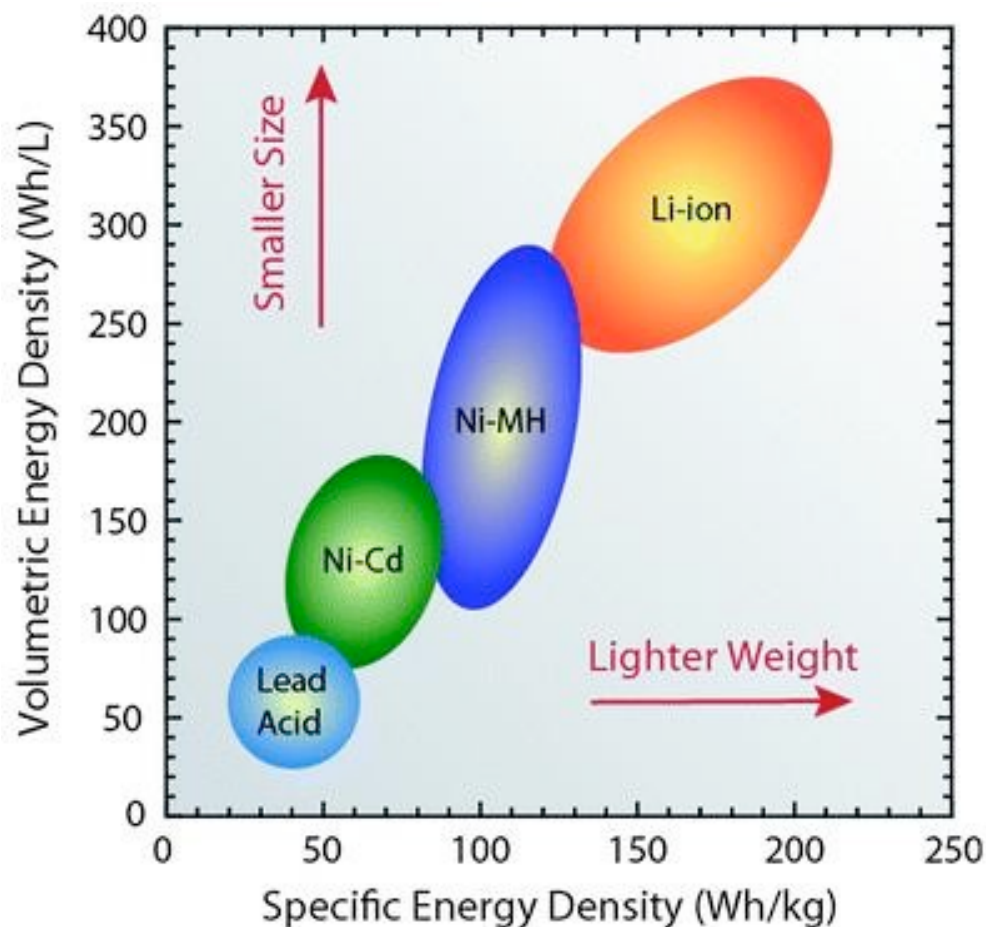


Figure 5-4 Volum til vekt forhold

For å finne ut hvilken rekkevidde batteriet måtte levere ble det tatt utgangspunkt i kartdata utlevert, og gjennom å regne på forhold ved hjelp av skalaen på «google maps». Resultatet ble at lengste avstand båten befinner seg fra land på de tre rutene oppgitt var 6,25 kilometer. Ved å bruke tall fra bacheloren som ble skrevet våren 2019 er det oppgitt at Fosna Orion har et energiforbruk på 49,3 kWh/km ved transitt. [6] Ut ifra dette kan kapasiteten på batteriet beregnes:

$$49,3 \frac{kWh}{km} \times 6,25 km = 308,13 kWh$$

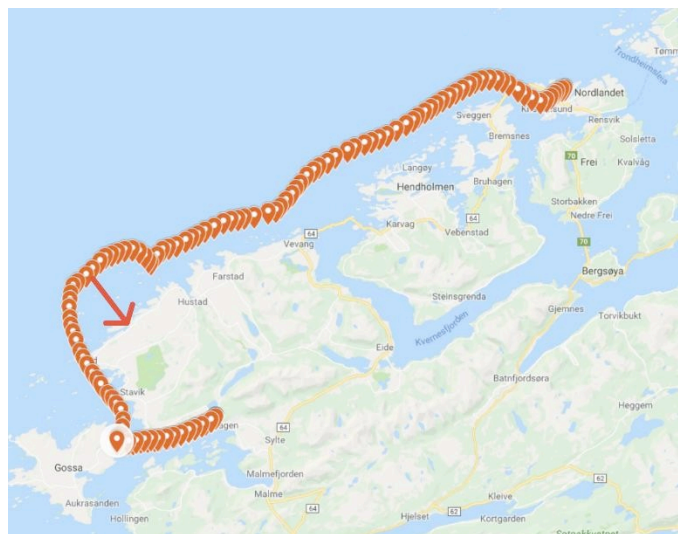


Figure 5-5 Rute 2 for Fosna Orion

Som nevnt tidligere vil batteriet som brukes være av typen litium-ion, som har en oppgitt energitetthet på $100-265 \frac{Wh}{kg}$, eller $250-670 \frac{Wh}{l}$ [19]. Fordi verdiene har et så stort intervall

lages det et høyt, og et lavt estimat av batteriets vekt og størrelse. I tillegg lages det to estimat for batteriets vekt, per kilometer båten skal gå.

Høyt estimat:

$$Vekt = \frac{308,13 * 10^3 Wh}{100 Wh/kg} = 3081,3 kg$$

$$Størrelse = \frac{308,13 * 10^3 wh}{250 \frac{wh}{l}} = 1232,52 l = 1,23 m^3$$

$$\frac{Vekt}{Avstand} = \frac{3081,3 kg}{6,25 km} = 493 \frac{kg}{km}$$

Lavt estimat:

$$Vekt = \frac{308,13 * 10^3 Wh}{265 Wh/kg} = 1162,8 kg$$

$$Størrelse = \frac{308,13 * 10^3 wh}{670 \frac{wh}{l}} = 459,9 l = 0,46 m^3$$

$$\frac{Vekt}{Avstand} = \frac{1162,8 kg}{6,25 km} = 186 \frac{kg}{km}$$

Pris

For å beregne prisen på batteriet brukes det gjennomsnittstall fra 2018 da disse er de mest nøyaktige. Det settes dermed en pris på 176 \$/kWh. Det forventes også at prisene i fremtiden vil fortsette å falle og kan synke til 62 \$/kWh i 2030 [20]. I beregningene er det også brukt en dollarpris på 9,1kr.

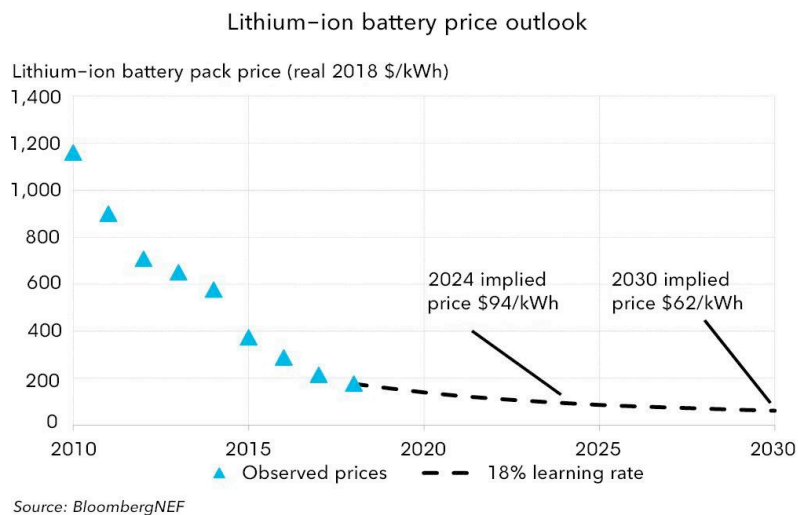


Figure 5-6 Prisestimat på batterier

$$308,13 \text{ kWh} * 176 \text{ $/kWh} * 9,1 \text{ kroner/\$} = 493.501 \text{ kr}$$

Prisen på batteriet vil da være 493.501 kroner dersom priser fra 2018 benyttes. Det antas som nevnt også at prisene vil synke betydelig i fremtiden, og vil allerede være betraktelig lavere når prosjektet iverksettes.

6. Prisestimater

Prisen til hydrogen er vanskelig å fastsette. Dette er fordi omtrent 70% av kostnadene til elektrolyse kommer fra strømprisen. For å finne et estimat for pris ses det på to scenarier. I det første scenarioet skal hydrogenet produseres på Smøla, både som flytende hydrogen og trykksatt ved 350 bar. I det andre scenarioet skal det ses på prisen Hub for ocean og andre aktører bruker når de ser på kostnad for hydrogen i Norge.

For å finne et godt anslag på hva flytendegjøring av hydrogen vil koste er energiforbruket som kreves i prosessen i forhold til produksjon av trykksatt hydrogen en viktig faktor. DNV GLs rapport gir et anslag på at produksjon av flytende hydrogen vil være 40% dyrere enn produksjon av komprimert. Den samme rapporten fastslår også at det trengs 50 kWh/kg for produksjon av hydrogen. [21] Dette betyr at det trengs 20 kWh/kgLH₂ til flytendegjøring. Under en presentasjon i Shanghai, 16. Nov. 2017, presenterte Linde tall fra "Recent Studies on H₂ Liquefaction. Specific Energy Consumption". [22]

	<i>Current Technology</i>		<i>Short Term Future</i>	<i>Medium Term Future</i>
<i>Liquefaction Capacity, tpd</i>	<3	2 - 15	15 - 30	<200
<i>Main Refrigeration Cycle</i>	Brayton	Claude	Claude	Claude
<i>Refrigeration Medium</i>	Helium	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen
<i>Pre-cooling Cycle</i>	LN ₂	LN ₂	Chiller & N ₂ Cycle	N ₂ / Mixed Refrigerant Cycle
<i>Compressor Type</i>	Oil Flooded Screw	Piston	Piston	Piston
<i>Feed Pressure (Bar)</i>	10 - 15	15 - 20	20 - 25	> 20
<i>Specific Power (kWh / kg H₂ (Including feed gas compression & precooling)</i>	13,4 - 12,3	12,7 - 10,8	10,8 - 7,7	9 - 7,5
<i>Operating Cost (OPEX)</i>	Highest	Low	Lower	Lowest
<i>Investment Cost (CAPEX)</i>	Low	Medium	Higher	Highest

Figure 6-1 Fremtidige estimater

Rapporten ble skrevet i 2015, derfor ses det på «short term future» hvor det blir påstått at strømforbruket til flytendegjøring av hydrogen er 10 kWh/kg. Det blir da en prisforskjell mellom flytende og trykksatt hydrogen på 20%. I estimatene fremover blir det brukt et gjennomsnitt på 15 kWh/kg ekstra, altså 30% prisøkning.

Pris for hydrogen ved produksjon på Smøla

I rapporten "Smøla hydrogen value chain" legges det frem 2 caser, case A og case B. Sluttprisen for produksjon av hydrogen ved 350 bar vil være for case A 47.3 kr/kg og ved Case B 27.0kr/kg. Det kan produseres henholdsvis 2098 kg/dag og 1049 kg/dag, dette er nok for forbruk forbruket til Fosna Orion. Det ses også på muligheten for å få prisen ned til 41.2 kr/kg og 21.6 kr/kg med hjelp av pilot-E støtte. Dette blir sett bort fra, fordi det er stor usikkerhet om det er støtte å få. [5]

Pris for flytende hydrogen produsert på Smøla

$$\text{Pris flytende hydrogen} = 27 \text{ kr/kg} * 0,3 + 27\text{kr/kg} \approx 35.1 \text{ kr}$$

Pris 16000 kWh flytende hydrogen= 35,1 kr/kg * 500 kg $\approx$ 17550 kr

Pris 16000 kWh hydrogen ved 350 bar= 27,0 kr/kg * 500 kg

$\approx$ 13500kr

Prisen for en full tank med flytende hydrogen er da omtrent 17000 kr. Det interessante blir å se på er hvor mye dyrere dette er enn en full tank med diesel.

Antagelser

Antall liter diesel for forbruk av 8000 kWh

$$\frac{\frac{3,6MJ}{kWh} * 8000kWh}{\frac{42.7MJ}{kg} * \frac{0,84kg}{l} * 0,35} = 2294 l$$

Pris for 8000 kWh diesel = 6,5 kr/l * 2294.1 L ≈
14911,6 kr

Dette vil si at trykksatt hydrogen fra Smøla er billigere mens flytende er litt dyrere enn diesel.

Pris for hydrogen i Norge

Når det gjelder prisestimat på trykksatt hydrogen spiller variabler som volum, tilgjengelighet og teknologisk utvikling en stor rolle. Dette er variabler som er vanskelig å forutsi, men sitert Trond Strømgren Seniorrådgivar fornybar energi og hydrogen verdikjede ved Hub for ocean «Den generelle forventningen i Norge og Europa er at trykksatt hydrogen vil være kommersielt tilgjengelig for rundt 40-50 kr/kg.» Som resultat av dette vil det antas en pris for denne rapportens formål på 45 kr/kg. [23]

Tanken fra Linde med kapasitet for 900 kg koster 2.5 million norske kroner, batteriet vil koste 500 000 kr, brenselcellene koster 550 000 kr og det antas at rør o.l. vil koste ca 30% av total kostnad. Dette blir en investering på 4.615 millioner. Det antas at servicebåten er i drift 145 dager i året, med et forbruk av 8000 kWh pr dag. Det er kun sett på produksjon på Smøla og det tas utgangspunkt i at Fosna Orion trenger 8000 kWh på hver tur. Prisen for et års forbruk av flytende hydrogen er 2.5 millioner kr. Til sammenligning vil prisen for diesel være 2.2 millioner kr.

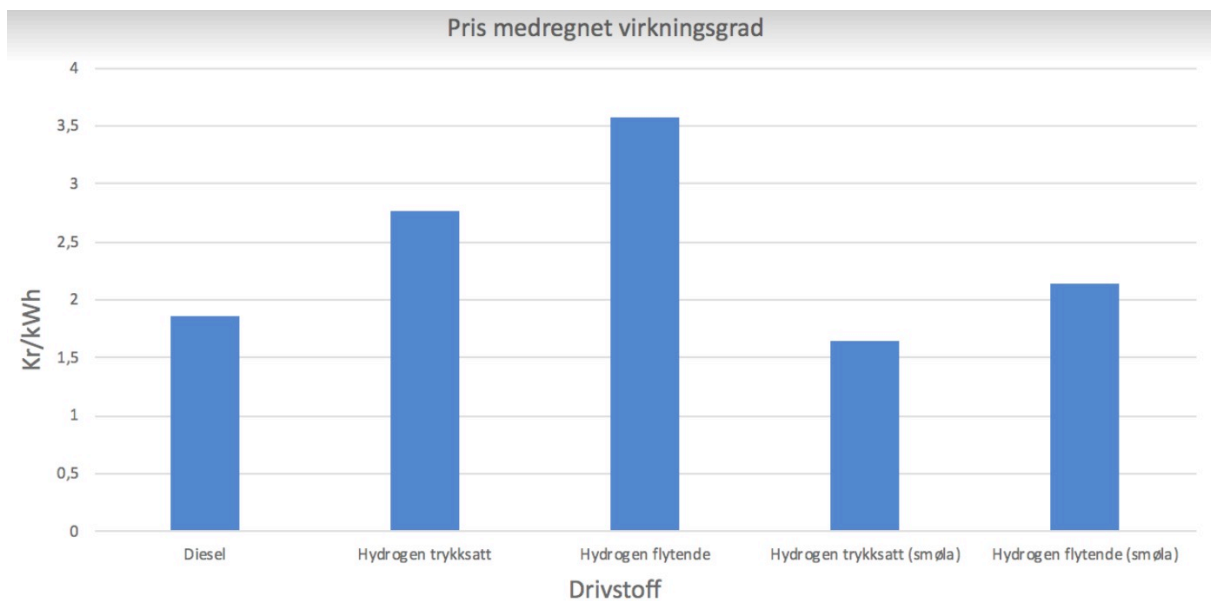


Figure 6-2 Pris på hydrogen

7. Konklusjon

Ut i fra tallene i denne rapporten vil prosessen å få en båt som Fosna Orion fra fossilt brensel til hydrogen by på en rekke utfordringer både fra et teknisk og økonomisk perspektiv.

Ombyggingen og komponentene som kreves er teknisk kompliserte, og faktorer som egenvekt, pris og ikke minst sikkerhet settes på prøve. En av de største utfordringene er at mengden hydrogen og derav energi som kreves for å dekke behovet til båten gjør at dimensjonene på spesielt lagringssystemet blir relativt stort. Og når det tas i betraktning at hydrogen skal lagres mot friluft gir dette begrensninger i form av disponibel plass på dekk. Brenselceller har generelt en for lav virkningsgrad og her kreves teknologisk utvikling slik at de kan havne på nivåer som gjør cellene mindre og mer effektive.

Med denne rapporten som grunnlag blir det ansett som krevende og meget kostbart å bygge om servicebåter som Fosna Orion, men å bruke de samme komponentene i et skrog som er designet og dimensjonert for å gå på hydrogen er en god mulighet. CAPEX vil fortsatt være høy for nye båter med hydrogenteknologi, men med god tilgang på hydrogen fra for eksempel Smøla, kan OPEX komme på konkurransedyktige nivåer. Dette er gitt av at volumet på produksjon/etterspørsel i området er stor nok slik at prisen på hydrogen havner på et konkurransedyktig nivå, et initiativ til å få opp volumet er å samhandle med transportnæringen i området slik at det tilrettelegges for flere enheter som går på hydrogen og dermed øker etterspørselen. Når de miljømessige gevinstene ved hydrogenteknologi tas med i regnestykket, noe denne rapporten ikke tar hensyn til, kan servicebåter på hydrogen være en spennende løsning for fremtiden. Et viktig poeng som ikke skal glemmes, som ikke handler om økonomi eller tekniske utfordringer går som følger: hydrogen skader ikke planeten vår, men er en fornybar og miljøvennlig resurs som tilbyr en mulighet til å redde planeten.

Figurliste

Figure 1-1 Fosna Orion	6
Figure 1-2.....	7
Figure 1-3 Rute 1	8
Figure 1-4 Rute 2	9
Figure 1-5 Rute 3	10
Figure 2-1 Hydrogen produksjonsmuligheter	12
Figure 2-2 Estimert energietterspørrelse 2050	13
Figure 3-1 Tetthet av hydrogen ved ulike trykk og temperatur [26]	15
Figure 3-2 Hydrogentank.....	16
Figure 3-3 Data Hexagon type 4 sylinder [9].....	17
Figure 3-4 Data Hexagon Magnum sylinder [9]	18
Figure 3-5 Umoe glassfiber tank type 4 [10].....	19
Figure 4-1 Brenselcelle	20
Figure 4-2 "fuel cell stack".....	21
Figure 4-3 Brenselcelleskap.....	23
Figure 5-1 batteri.....	24
Figure 5-2 Nikkel-kadmium-akkumulatoren	25
Figure 5-3 Lithiumbatteri	26
Figure 5-4 Volum til vekt forhold	27
Figure 5-5 Rute 2 for Fosna Orion	28
Figure 5-6 Prisestimat på batterier	29
Figure 6-1 Fremtidige estimater.....	30
Figure 6-2 Pris på hydrogen	32

Referanser

- [1] NRK, «NRK.no,» NRK, [Internett]. Available: <https://www.nrk.no/norge/okt-trafikk-gir-mer-utslipp-1.1988121>. [Funnet 05 11 2019].
- [2] Britannica, «Hydrogen,» [Internett]. Available: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>. [Funnet 06 11 2019].
- [3] Lumen, «Properties of Hydrogen,» [Internett]. Available: <https://courses.lumenlearning.com/introchem/chapter/properties-of-hydrogen/>. [Funnet 06 11 2019].
- [4] DNV GL, «Hydrogen as an energy carrier,» [Internett]. Available: http://images.e.dnvgl.com/Web/DNVGL/%7B12383a16-2ae0-4de4-8fdf-743d52bdcffc%7D_New_energy_value_chains_position_paper_261118_low_res_spreads2.pdf. [Funnet 06 11 2019].
- [5] Møre og Romsdal fylke, «mrfylke.no,» staten, 11 07 2019. [Internett]. Available: <https://mrfylke.no/content/download/5715/81721>. [Funnet 25 10 2019].
- [6] Y. Bjørndal, «Hydrogen-Powered Service Vessel for Norwegian Fish Farm Industry,» NTNU, Trondheim, 2019.
- [7] Linde, *Mailsamtale*, Bergen, 2019.

- [8] americanhistory, «americanhistory.si.edu,» [Internett]. Available: <https://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm>. [Funnet 05 10 2019].
- [9] Wikipedia, «wikipedia.org,» 29 10 2019. [Internett]. Available: https://no.wikipedia.org/wiki/Standard_reduksjonspotensial.
- [10] D. Bokach, «PEM fuel cells,» Prototech, Bergen, 2019.
]
- [11] T. Tønnessen, «UIA.brage.unit.no,» [Internett]. Available: <https://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/bitstream/handle/11250/135037/123e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Funnet 05 11 2019].
- [12] Wikipedia, SOFC, [Internett]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_oxide_fuel_cell. [Funnet 05 11 2019].
- [13] S. V. Nyaas Grue, D. A. Johansen, H. B. Kristiansen og V. Sandnes, «Hydrogendrevet Vedlikeholdsskip for den Norske fiskeoppdretts-industrien,» NTNU, Trondheim, 2018.
- [14] Ballard, *Ballard brenselcelle presentasjon, vedlegg 1*, Ballard, 2019.
]
- [15] Store Norske Leksikon, «Store Norske Leksikon,» [Internett]. Available: <https://snl.no/glykol>. [Funnet 18 10 2019].
- [16] SNL, «Batteri,» [Internett]. Available: <https://snl.no/batteri..> [Funnet 05 11 2019].
]
- [17] Batteryuniversity, «Nickel based batteries,» [Internett]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries. [Funnet 06 11 2019].
- [18] Battery university, «lithium ion battery,» [Internett]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery. [Funnet 06 11 2019].
- [19] Clean energy institute, «Clean energy institute,» [Internett]. Available: https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/?fbclid=IwAR3rtjdUDDOwsflo4HEurJiOi2VKeFiKm0h3TIO9L9Qb9BAe_nJYFaly30. [Funnet 22 10 2019].
- [20] bloomberg, «bloombergNEF,» [Internett]. Available: https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/?fbclid=IwAR22_8n9fpPFf7MZdb_pahjoLrbfo8Kalg7_c4jJ8NzzPZpDddPp6i1-lg. [Funnet 22 12 2019].
- [21] DNV GL, «Produksjon og bruk av hydrogen i Norge,» DNV GL, Høvik, 2019.
]
- [22] maritime cleantech, «Norwegian future value chains for liquid hydrogen,» 2015.
]
- [23] T. Strømgren, *Mailsamtale med Trond*, Bergen, 2019.
]
- [24] H. Tools, «h2tools.org,» [Internett]. Available: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/hydrogen-density-different-temperatures-and-pressures>.
- [25] Umoe, «uac.no,» [Internett]. Available: https://www.uac.no/wp-content/uploads/2018/10/Hydrogen_UAC-Datasheet_mail.pdf.

- [26 Hexagon, *Lagringstanker, mail samtale*, Bergen: Hexgaon, 2019.
]
- [27 «hypertextbox,» [Internett]. Available:
] <https://hypertextbook.com/facts/2005/MichelleFung.shtml>. [Funnet 14 10 2019].
- [28 IEA, «The Future of Hydrogen,» [Internett]. Available:
] <https://webstore.iea.org/download/summary/2803?fileName=English-Future-Hydrogen-ES.pdf>.