

Maritimt utslippsfritt drivstoff. Infrastruktur for LOHC – flytende organisk energibærer

LOHC er en nullutslippsenergibærer basert på hydrogen. Det er en organisk olje som binder til seg og frigir hydrogen som kan benyttes som drivstoff til skip. LOHC er en alternativ lagringsform for hydrogen, med lavere transportkostnader og bedre sikkerhetsegenskaper enn komprimert og flytende hydrogen. Denne piloten undersøker produksjon og bruk av LOHC som energibærer til skip i norske farvann.



Innholdsfortegnelse

	Side
• Introduksjon av pilotstudien med LOHC som energibærer	3
• Hovedfunn fra pilotstudien	4
• Oppskalering av landbasert LOHC infrastrukturen for å operere 180 middels store kystnære skip utslippsfritt	5
• LOHC i et helhetlig perspektiv fra energikilde til propell	6
• LOHC kan oppnå en høy virkningsgrad fra energikilde til propell	7
• Et LOHC produksjonsanlegg i Florø som kan drifte 3 skip	8
• Et LOHC produksjonsanlegg som kan drifte 18 skip	9
• Ti LOHC produksjonsanlegg for LOHC eller ammoniakk	10
• Logistikk, transport og distribusjon	11
• LOHC-løsningen om bord i et skip	12
• Kjerneteknologiene for å produsere energibæreren LOHC	13
• Økende globalt fokus på LOHC-produksjonsanlegg og distribusjon	14
• Pilotpartnere	15

Introduksjon til pilotstudien med LOHC som energibærer



Skipsfarten står for store klimagassutslipp og må, på linje med andre industrielle sektorer, **dekarboniseres**.

Det er i dag mange forskjellige piloter i Grønt Skipsfartsprogram, både pågående og gjennomførte, som undersøker flere mulige teknologier for å oppnå en grønn skipsfart.

Fram til nå er disse teknologiene undersøkt, hvor alle har fordeler og ulemper som må belyses:

- Landstrøm og batterier
- Biogass som erstatning for LNG
- Biodiesel av forskjellige typer
- Komprimert hydrogen
- Flytende hydrogen
- Ammoniakk
- Metanol

Denne piloten introduserer en **ny energibærer**. Piloten viser dens fordeler og ulemper, samt viser resultater fra detaljerte beregninger og planer for et anlegg som skal bruke grønn energi til å produsere denne energibæreren til bruk i skip.

LOHC er en nullutslippsenergibærer basert på hydrogen. Det er en organisk olje som binder til seg og frigir hydrogen som kan benyttes som drivstoff til skip. LOHC er en alternativ lagringsform for hydrogen, med lavere transportkostnader og bedre sikkerhetsegenskaper enn komprimert og flytende hydrogen. Denne piloten undersøker produksjon og bruk av LOHC som energibærer til skip i norske farvann.

Hovedfunn fra pilotstudien

Pilotstudien viser tre størrelser av produksjonsanlegg for energibæreren LOHC, som kan forsyne 3, 18 og 180 middelsstore skip med nullutslippsdrivstoff.

Av piloten fremgår behov for areal, fornybar energi, investeringskostnader og hva hydrogenprisen blir for energibæreren LOHC.

- Et produksjonsanlegg for å operere tre middels store skip vil kreve en investering på ca. 700 millioner kroner, arealbehov på ca. 5.600 m², energibehov 177 GWh, og som resulterer i en utslippsreduksjon på 25.000 tonn CO₂ i året.
- Et produksjonsanlegg for å operere 18 middels store skip vil kreve en investering på ca. 2 milliarder kroner, arealbehov 13.000 m², energibehov 1 060 GWh, dvs. ca. 1 TWh, og resulterer i en utslippsreduksjon på 150.000 tonn CO₂ i året.
- Ti standardiserte produksjonsanlegg langs kysten kan forsyne 180 middelstore skip med nullutslippsdrivstoff og vil kreve en investering på ca. 18 milliarder kroner ut ifra dagens tilgjengelige teknologi og kostnadsnivå
- Disse ti produksjonsanleggene langs kysten vil til sammen krevere 10,6 TWh fornybar energi, som tilsvarer ca. 8 % dagens elektrisitetsproduksjon i Norge.
- Samlet årlig utslippsreduksjon fra disse 180 middels store skipene vil bli ca. på 1,5 millioner tonn CO₂, tilsvarende 3 % av de totale utslipp i Norge.
- Ti standardiserte produksjonsanlegg vil resultere i en hydrogenpris på 30 kr/kg, og 2 000 kr/tonn LOHC
- Det er forutsatt at fornybar energi er tilgjengelig på lokasjonene.
- Plasseres anleggene der en har mulighet til å selge de store volumene av bi-produktene oksygen og den høyverdig termisk energien som genereres når hydrogen tilsettes termaloljen – hydrogenbæreren LOHC – så vil dette gi en redusert hydrogenkostnad og økt total virkningsgrad fra energikilde til propell.

Energibæreren LOHC har **lavere kostnader** ved, og **ingen utfordringer** med, transport, distribusjon, håndtering og lagring, i og med at energibæreren LOHC oppfører seg som diesel. I tillegg innebærer bruk av energibæreren LOHC **høyere sikkerhet** når det gjelder eksplosjonsfare enn ved bruk av komprimert og flytende hydrogen.

Oppskalering av den landbaserte LOHC infrastrukturen for å operere 180 middels store kystnære skip utslippsfritt

For å dekarbonisere skipsfarten må en se på drivstoffenes hele verdikjede, fra **energikilde til propell**, da det ikke kun handler om hvor optimal teknologien i skipet vil være, men en må se dette i sammenheng med den nødvendige infrastrukturen, distribusjon og håndtering, for å helhetsvurdere de alternative drivstoffene for de forskjellige skipstypene.

Miljøpåvirkning, sikkerhet og infrastrukturkostnader, samt energitapet fra energikilde-til-propell, er viktige elementer i en analyse av de alternative bærekraftige drivstoffene

En oppskalering i tre trinn for å operere 180 middels store skip utslippsfritt

- Et produksjonsanlegg for å operere tre middels store skip vil kreve 20 MW/177 GWh elektrisk kraft, et arealbehov på ca. 5600 m², med en investeringskostnad på ca. 700 millioner kroner. Resultatet blir en utslippsreduksjon på 25 000 tonn CO₂ i året.
- En oppskalering av produksjonsanlegget for å operere 18 middels store skip vil kreve 121 MW/1 060 GWh elektrisk kraft, et arealbehov på 13 000 m², med en investeringskostnad på ca. 2 milliarder kroner. Resultatet blir en utslippsreduksjon på 150 000 tonn CO₂.
- Ti slike oppskalerte anlegg kan legges langs kysten og forsyne 180 skip med hydrogen. Ett standardisert anlegg antas å koste ca. 1,8 milliarder kroner, og vil samlet kreve 10,6 TWh årlig, som vil gi en samlet årlig utslippsreduksjon på 1,5 millioner tonn CO₂.
- Slike produksjonsanlegg trenger ikke bare produsere energibæreren LOHC fra fornybar energi, men også produsere andre eFuels, som f.eks. ammoniakk, dvs. produksjons sentraler for forskjellige typer eFuels langs kysten
- Da energibæreren LOHC gir høy sikkerhet og lave transportkostnader så kan energibæreren LOHC også produseres sentralt og distribueres som dagens maritime diesel
- Å forutse investeringskostnadene for slike anlegg er en stor utfordring. Da en hittil har hatt en teknologi oppskalering på faktor 10 hvert 4-5 år, og en forventer tilsvarende utvikling i årene fremover, så er det rimelig å anta at en vil se betydelig lavere investeringskostnader

Forberede nye skip for fremtiden

- Når energibæreren LOHC lagres og håndteres som dieselolje kan skipene forberedes for et fremtidig drivstoffskifte fra diesel til LOHC som utslippsfritt drivstoff
- Når energibæreren LOHC lagres ved normal utetemperatur og atmosfærisk trykk, blir kostnadene forbundet med skipet relativt beskjedne og en får utnyttet skipets linjer optimalt
- Skip som bygges i dag og er forberedt for energibæreren LOHC, kan først driftes på dieselolje inntil infrastruktur og teknologi for energibæreren LOHC er på plass

LOHC lagringsenhet – landbasert produksjonsanlegg:

- Å binde kjemisk hydrogen til kjemikalium, olje eller væske er kjente industrielle prosesser
- I denne prosessen frigis høyverdig termisk energi tilsvarende 9 kWh/kg hydrogen

LOHC frigjøringsenhet – om bord i skipet:

- Teknologien er i bruk i mindre enheter
- Teknologien trenger å bli skalert opp til de størrelser en trenger om bord i større skip
- I denne prosessen kreves tilført termisk energi tilsvarende 12 kWh/kg hydrogen

Hydrogenbæreren LOHC kjennetegnes med: Lav kostnad for hydrogen distribusjon

- Bruker eksisterende infrastruktur for diesel
- ## Rask og kjent drivstoffylling
- Drivstoffet er en flytende væske i normale omgivelser

Lav kostnad for å lagre ombord

- Bruker eksisterende drivstofftanker

Høy sikkerhet

- Minimale mengder molekylært hydrogen
- Lik diesel mht. giftighet og eksplosjonsfare

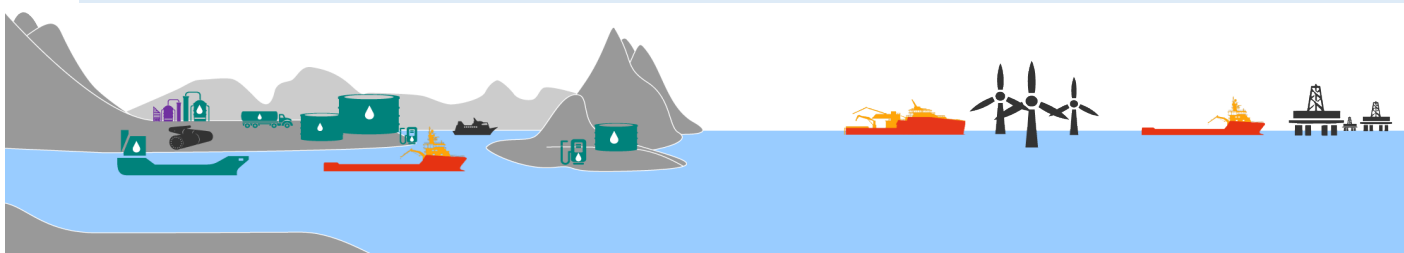
Gjenbruk

- Blir hverken brukt eller forbrent
- Blir tilført nytt hydrogen på landanlegget

LOHC-teknologien kan oppnå en høy samlet virkningsgrad fra energikilde-til-propell:

- Utnytte den høyverdige frigjorte termiske energien fra produksjonsanlegget til nærliggende industri
- Utnytte den frigjorte termiske energien fra brenselcellene i LOHC-frigjøringsprosessen

Den gjennomsnittlige netto nåværende kostnad for hydrogenproduksjon for et LOHC-produksjonsanlegg i løpet av levetiden (LCOE) vil reduseres fra 35 kr til 30 kr pr kg hydrogen i oppskaleringen fra fase 1 til 3, med de angitte forutsetningene



LOHC i et helhetlig perspektiv fra energikilde til propell

Redusere CO2-utslipp fra skipsfarten – flere løsninger

Å redusere utslipp fra globale skipsflåten, som er på mer enn 1.000 millioner tonn CO₂, er en formidabel utfordring, selv om dette utgjør kun 3 % av menneskelige utslipp. Skipsflåten er meget differensiert fra f.eks. 10 m lange kyst-fiskebåter til mega-skip. Et mega-skip forbruker alene like mye fossilt drivstoff som 35 000 fossilbiler. For å redusere utslippene er det ikke bare én teknologi som er løsningen, da dette er avhengig av skipstype. Vi vil se mange teknologiske løsninger som vil utvikles, prøves og feiles, og flere vil kommersialiseres.

Fra energikilde til propell

Naturressursene er ikke uuttømmelige. Den totale energigjerrigheten/virkningsgraden, CO₂-fotavtrykk, helsefare, sikkerhet og livsløpskostnader med mer, må vurderes. Helheten igjennom verdikjeden må vurderes for de kommende bærekraftige fremdriftssystemene for skipsnæringen. Disse elementene påvirkes igjen av infrastruktur, distribusjon og håndtering. At en lav- eller nullutslippsløsning er optimal sett for skipets kostnad og operasjon er et bra utgangspunkt, dvs. fra bunkerstanken til propellen - **Tank-to-Propeller**. Men dette valget må sees sammen med verdikjeden før drivstoffet blir bunkret, dvs. **Well-to-Tank**, med bl.a. aspekter som distribusjonskostnader, sikkerhetsmessige aspekter (inkl. brannfare og giftighet) så vel som det volum som må håndteres.

Fra energikilde til tank

Denne pilot-studien har sett på energikilde-til-tank verdikjeden for energibæreren LOHC. Hydrogen produseres med fornybar elektrisk energi. Energikilden som her er vann- eller vindkraft, omvandles til elektrisk energi og hydrogen blir produsert i en elektrolyse-prosess. Hydrogenbæreren LOHC er en termalolje, hvor hydrogen igjennom en kjemisk reaksjon bindes i termaloljen. Energibæreren LOHC kan transporteres, distribueres, lagres og håndteres på samme måte som dieselolje gjøres i dag. Sikkerhetselementene, som brannfare eller giftighet, er tilsvarende som for dieselolje.

Fra tank til propell

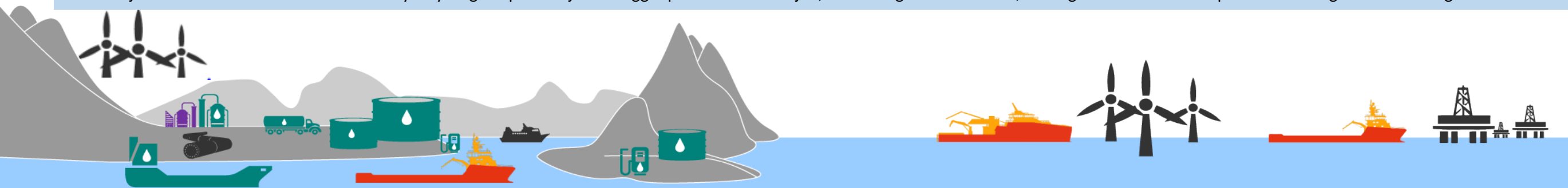
Energibæreren LOHC håndteres ombord i skipet som dieselolje. En katalysator-enhet vil frigi den mengden hydrogen som til enhver tid er nødvendig for å dekke skipets energibehov. Disse små mengdene hydrogen, i kilogram-området, har ikke de samme sikkerhetsutfordringene som f.eks. tonnevis med lagret komprimert eller flytende hydrogen. Det frigjorte hydrogenet blir benyttet i brenselceller for å produsere elektrisk energi, tilsvarende som en generator. Energibæreren, LOHC, som har fått frigjort hydrogenet blir så ført tilbake på en tom bunkerstank.

Energibæreren LOHC

- Dette er en termalolje, benzyltoluen, som brukes som medium for å frakte og oppbevare hydrogen på en sikker måte
- Termaloljen blir hverken brukt opp eller forbrent om bord i skip
- Håndteres som diesel
- Lave lagrings- og distribusjonskostnader
- Rask og kjent drivstoff-fylling
- Høy sikkerhet
- Ikke giftig

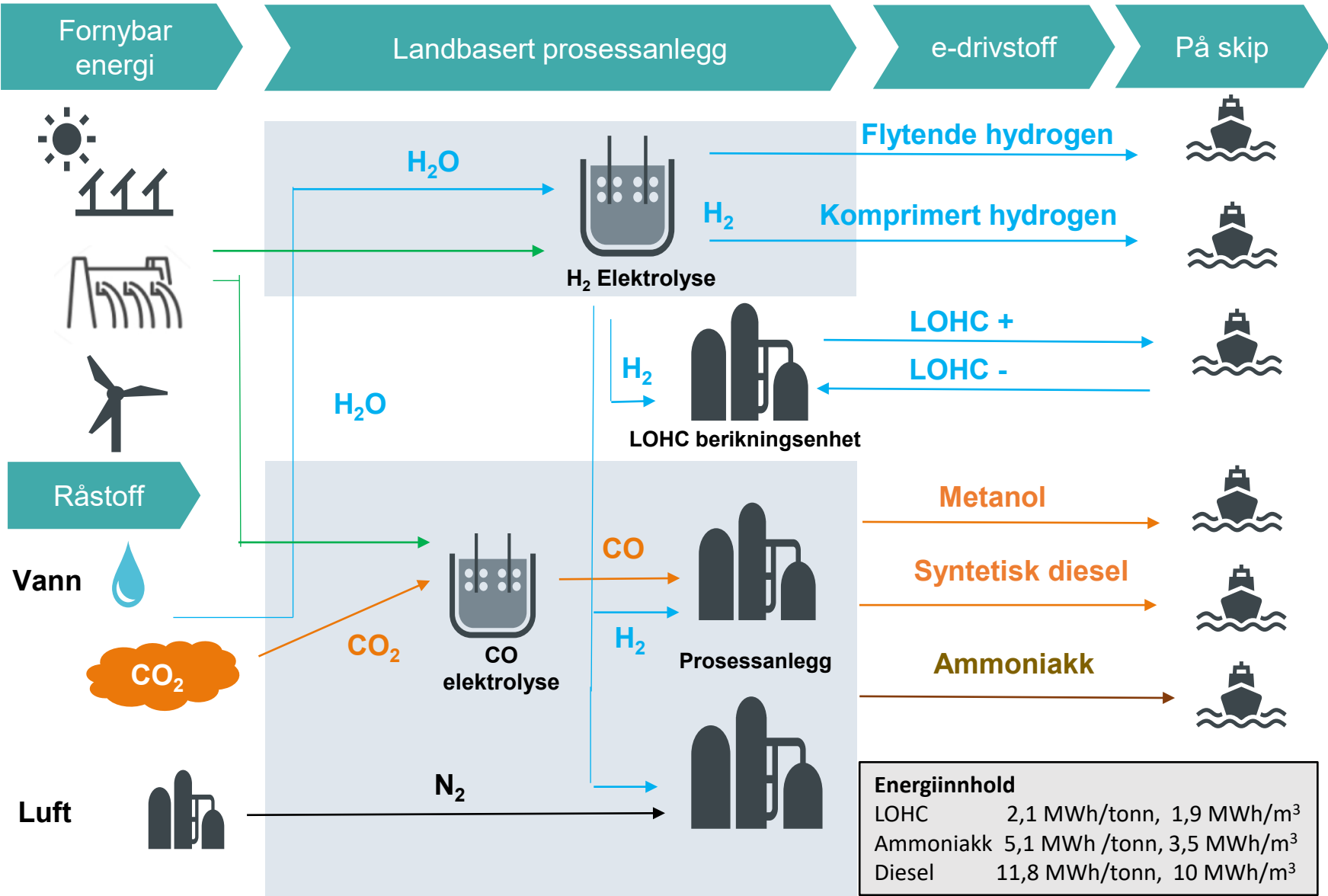
Termaloljen, energibæreren LOHC, blir hverken brukt eller forbrent om bord i skipet, men blir brukt til å frigjøre hydrogen og blir deretter ladet med nytt hydrogen – i et lukket kretsløp

Når skipet igjen skal bunkre drivstoff, dvs. hydrogen som er absorbert i termaloljen, så vil skipet samtidig levere tilbake den samme termaloljen hvor hydrogenet er frigjort for å skaffe energi til skipet. Termaloljen som leveres tilbake vil bli tilført nytt hydrogen i produksjonsanlegget på land. Termaloljen, dvs. energibæreren LOHC, vil da gå i et lukket kretsløp for å levere og bli tilført energi.



LOHC kan oppnå høy virkningsgrad fra energikilde til propell

Ved å utnytte den høyverdige termiske energien som frigis fra den eksotermiske kjemiske reaksjonen i LOHC berikningsprosessen i det landbaserte produksjonsanlegget, benytte Solid-Oxide-brenselceller (SOFC) og energi-optimalisere LOHC-prosessen om bord på skipet, forventes en høy samlet virkningsgrad fra energikilde-til-propell i forhold til de andre nevnte energibærerne.



Drivstoff produsert av elektrisk energi

Ved hjelp av de fire innsatsfaktorene nitrogen, CO₂, vann og elektroner kan en produsere de fleste typer drivstoff. Prosessene har til felles at en først produserer hydrogen ved elektrolyse av vann.

Frigjort høyverdig termisk energi ved produksjon av LOHC

Når hydrogenet blir bundet opp i termaloljen, LOHC, frigjøres høyverdig termisk energi ved 200°C. Denne prosessen gir fra seg varme, den bruker ikke varme. Ved å benytte denne termiske energien i f.eks. omkringliggende industri, så vil dette bidra til å øke den totale virkningsgraden for LOHC.

Produksjon av syntetisk diesel

Å produsere syntetisk diesel er den mest energikrevende prosessen av alle disse, og krever vesentlig mer energi å produsere enn de andre typene drivstoff.

Flytende hydrogen

Å gjøre hydrogen flytende er også en energikrevende prosess som krever tilsvarende 30 % av energiinnholdet i hydrogen.

Frigi hydrogen fra energibæreren LOHC om bord i skip

Å frigjøre hydrogen fra energibæreren LOHC kreves tilsvarende 30 % av energiinnholdet i hydrogenet. Ved å nyttiggjøre seg av tapsvarmen fra brenselcellene i prosessen for å frigjøre hydrogen fra energibæreren LOHC, vil virkningsgraden om bord økes. Alternativt kan varme fra diesel el. i et hybridsystem brukes for å øke virkningsgraden.

PEM brenselceller

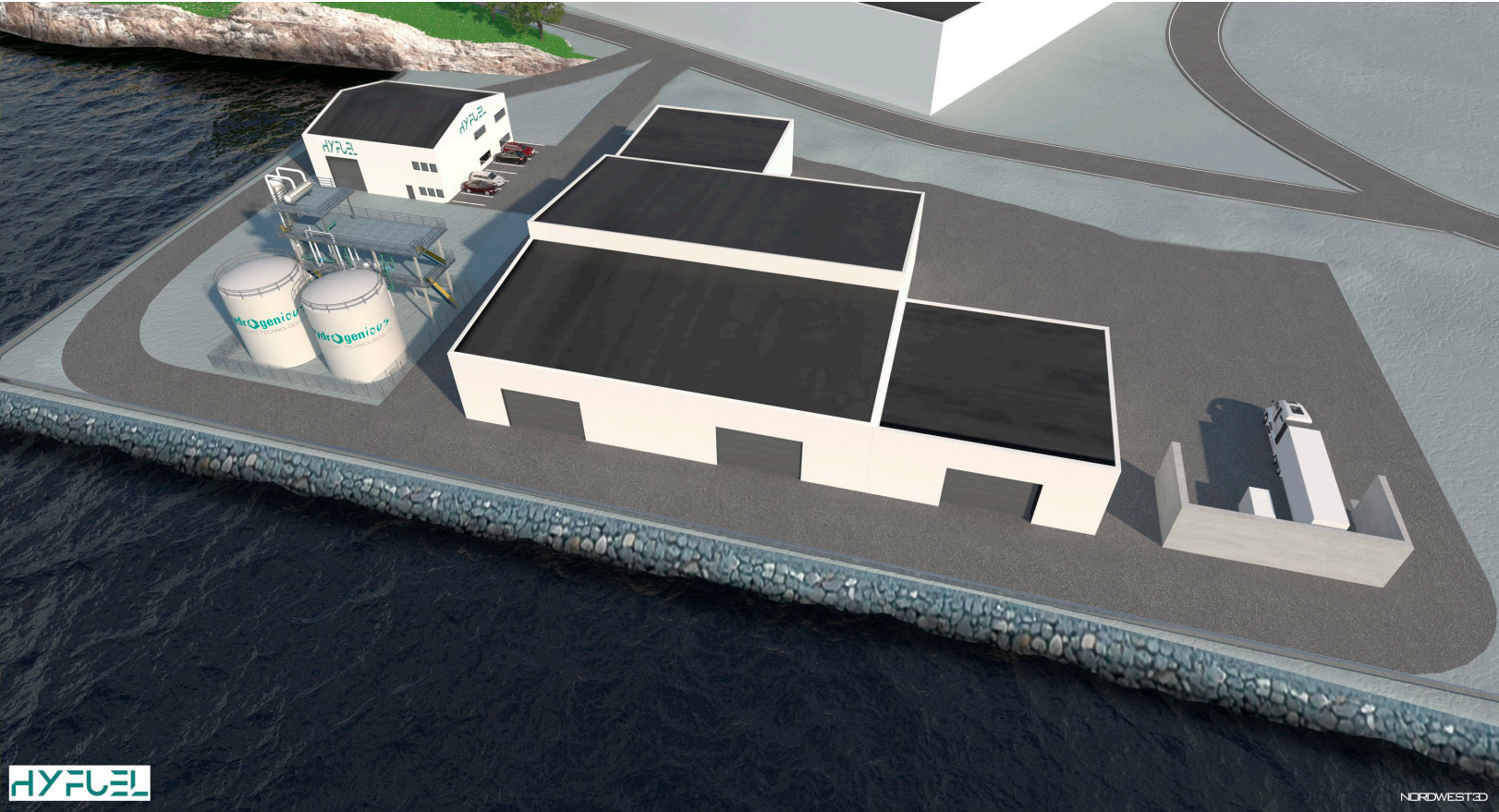
PEM brenselceller er i dag tilgjengelige for maritimt bruk, men tapsvarmen fra disse brenselcellene er lavere enn 100°C og antas å ikke føre til en betydelig økt virkningsgrad i frigjøringsprosessen.

SOFC brenselceller

SOFC brenselcelle-teknologien avgir en tapsvarme på over 500°C, og vil kunne øke vesentlig den totale virkningsgraden ved å gjenbrukes i frigjøringsprosessen.

Et LOHC produksjonsanlegg i Florø som kan drifte 3 skip

I piloten er det utredet for produksjon på forsyningsbasen Fjord Base i Florø, driftet av selskapet HyFuel. Fjord Base har om lag 2 000 årlige skipsanløp og hydrogenproduksjonen kan foregå i nærhet til kaianlegg, som vil begrense behovet for transport. For å kostnadseffektivisere hydrogenproduksjonen vil oksygenet fra elektrolysen og restvarmen fra LOHC-anlegget selges videre til et nærliggende landbasert anlegg for fiskeoppdrett. Utnyttelse av alle restprodukter vil gi en bærekraftig produksjon etter sirkulærøkonomiske prinsipper. LOHC+ vil lagres i 2 standardtanker, hver på 500 m³.



Areal

Det samlede brutto arealbehovet for et slikt anlegg vil være ca. 5 600 m².

Hovedelementene i anlegget

- Elektrolyseør
- Mellomspennings-system
- Likeretter
- Vannbehandlingsanlegg
- Hydrogenkompressorer
- Sjøvannskjøling av lavtemperaturvarmen fra elektrolyseøren (50°C til 35°C)
- LOHC-lagringsanlegg
- Lagringstanker for LOHC

Termisk energi

Hydrogeneringsprosessen som binder hydrogen til LOHC er en eksotermisk prosess og den frigir en varmeeffekt på 2,8 MW ved 200°C.

Denne termiske energien er tenkt benyttet i det landbaserte fiskeoppdrettsanlegget på Fjord Base i Florø. En bruk av denne frigjorte høyverdige termiske energien vil gi en markant økning av den totale virkningsgraden fra energikilde til skipets propell, og samtidig redusere kostnaden på produsert hydrogen og LOHC.

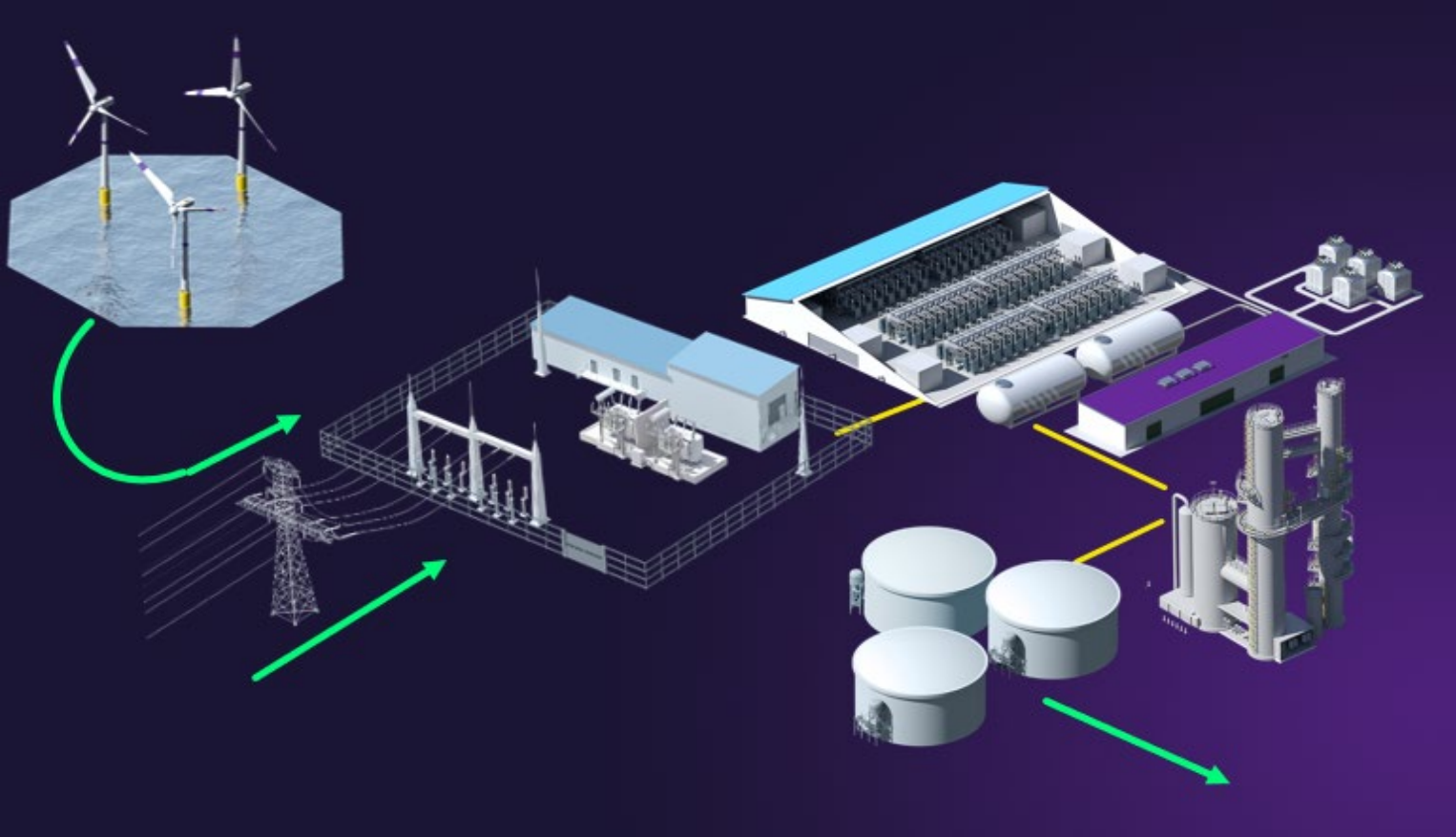
Solenergi

Hvis takene på dette anlegget dekkes med solceller, så kan det gi en årlig kraftproduksjon på 100 MWh.

Produksjon			Innsatsfaktorer			Kostnader **)			Salgspris på hydrogen levert i LOHC **)		
Hydrogen	8	tonn/dag	Spenningsnivå	22	kV	CAPEX	700 000 000	NOK	Andel oksygen solgt	50 %	2 kr/kg *)
LOHC+	174	m ³ /dag	Elektrisk energi	484	MWh/dag	Strøm og nettleie	76 900 000	NOK/år	Andel varme solgt	60 %	0,2 kr/kWh
Oksygen	63	tonn/dag	Elektrisk energi	177	GWh/år	Vann	500 000	NOK/år	Diskonteringsrente	4 %	
Restvarme	68	MWh/dag	Vann	82	m ³ /dag	SUM	77 400 000	NOK/år	Hydrogenpris	35	kr/kg
*) Hvis det er kun mulig å selge kun 20 % av det produserte oksygen så vil prisen for det produserte hydrogen øke til 40 kr/kg											
**) De angitte økonomiske nøkkeltallene er lokasjonsuavhengig og representerer ikke Hyfuel's lokasjon i Florø											
LOHC pris									2 320 kr/tonn		

Et LOHC produksjonsanlegg som kan drifte 18 skip

Gjennom piloten er det utredet for en produksjonslokasjon på forsyningsbasen Fjord Base i Florø, av selskapet HyFuel. Fjord Base har om lag 2000 årlige skipsanløp og hydrogenproduksjonen kan foregå i nærhet til kaianlegg, som vil begrense behovet for transport. I elektrolysen vil vann spaltes til hydrogen og oksygen. For å kostnadseffektivisere hydrogenproduksjonen vil oksygenet og restvarmen fra LOHC-anlegget selges videre til et nærliggende landbasert anlegg for fiskeoppdrett. Utnyttelse av alle restprodukter vil gi en bærekraftig produksjon etter sirkulærøkonomiske prinsipper. Hydrogenberiket LOHC vil lagres i 2 standardtanker hver på 3000 m³.



Areal
Det samlede brutto arealbehovet for et slikt anlegg vil være ca. 13 000 m².

Hovedelementene i anlegget

- Høy- og mellomspennings-anlegg
- Likeretter
- Elektrolysør
- Vannbehandlingsanlegg
- Hydrogen-kompressorer
- Sjøvannskjøling av lavtemperatur varmen fra elektrolysøren (50°C til 35°C)
- LOHC-lagringsanlegg
- Lagringstanker for LOHC

Termisk energi
Hydrogeneringsprosessen som binder hydrogen til LOHC er en eksotermisk prosess og den frigir en varmeeffekt på 17 MW ved 200°C.

Denne termiske energien er tenkt benyttet i det landbaserte fiskeoppdrettsanlegget på Fjord Base i Florø. En bruk av denne frigjorte høyverdige termiske energien vil gi en markant økning av den totale virkningsgraden fra energikilde til skipets propell, og samtidig redusere kostnaden på produsert hydrogen og LOHC.

Solenergi
Hvis takene på dette anlegget dekkes med solceller, så kan det gi en årlig kraftproduksjon på 425 MWh.

Produksjon			Innsatsfaktorer.			Kostnader tilknyttet lokasjon **)			Salgspris på hydrogen levert i LOHC **)		
Hydrogen	47,5	tonn/dag	Spenningsnivå	132	kV	CAPEX	2050	MNOK	Andel oksygen solgt	50 %	2 kr/kg *)
LOHC+	1040	m ³ /dag	Elektrisk energi	2 910	MWh/dag	Strøm og nettleie	456	MNOK/år	Andel varme solgt	60 %	0,2 kr/kWh
Oksygen	380	tonn/dag	Elektrisk energi	1 060	GWh/år	Vann	2.8	MNOK/år	Diskonteringsrente	4 %	
Restvarme	407	MWh/dag	Vann	490	m ³ /dag	SUM	459	NOK/år	Hydrogenpris	32	kr/kg
										LOHC pris	2 100 kr/tonn

*) Hvis det er kun mulig å selge kun 20 % av det produserte oksygen så vil prisen for det produserte hydrogen øke til 34 kr/kg

**) De angitte økonomiske nøkkeltallene er lokasjonsuavhengig og representerer ikke Hyfuel's lokasjon i Florø

Ti produksjonsanlegg for LOHC eller ammoniakk

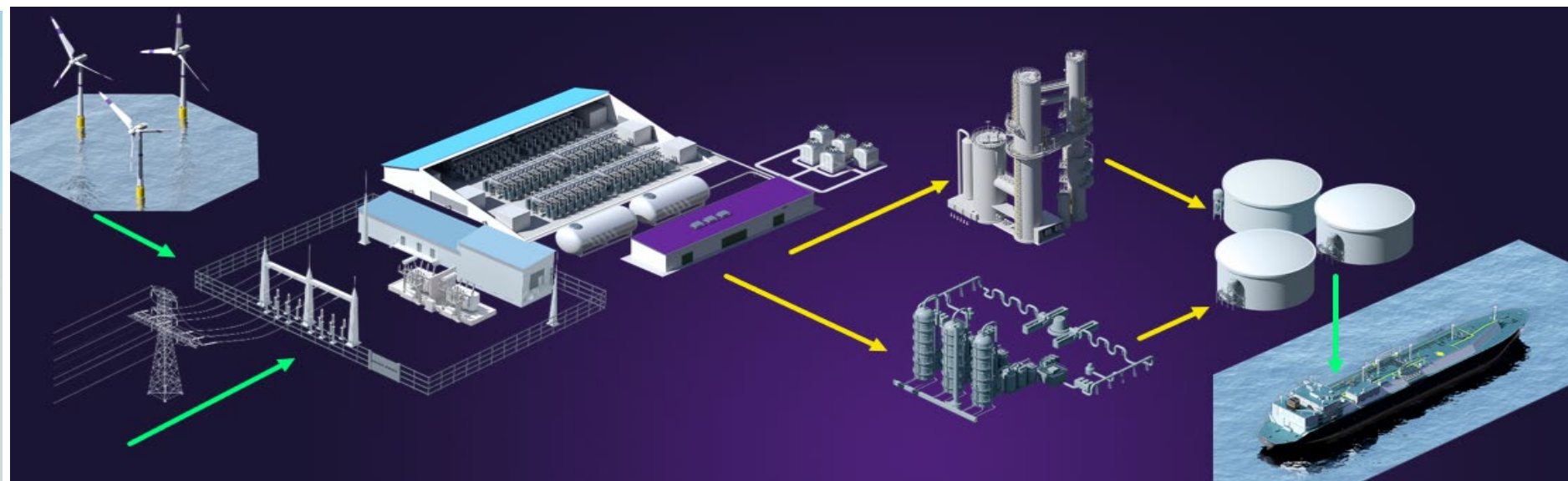
For å drifte mange skip med nullutslippsteknologien LOHC langs Norskekysten vil det være aktuelt å bygge flere like anlegg som presentert på foregående side, og fordele disse langs kysten.

Vi ser ikke på ett anlegg med ti ganger større effekt, da det vil være en utfordring med å sikre en kontinuerlig effektuttak på mer enn et par hundrede MW i el-nettet.

10 slike anlegg vil kreve 10,6 TWh og kan drifte 180 skip utslippsfritt. Dette vil redusere CO₂-utslippene med ca. **1,5 millioner tonn, en reduksjon på 3 % av Norge sine totale utslipp.**

Dette er da skip som i størrelse med f.eks. kystnære frakteskip, offshore vindservice eller supply-skip.

Det første produksjonstrinnet i et slikt anlegg er elektrolyseanlegget for fremstilling av hydrogen. Neste produksjonstrinn kan være at hydrogen brukes til å produsere LOHC, ammoniakk eller metanol. Et slikt produksjonsanlegg kan produsere én eller flere typer drivstoff, eller andre typer eFuels.



Produksjon av 100.000 tonn ammoniakk

Et produksjonsanlegg for ammoniakk krever en viss størrelse for å oppnå lønnsomhet, noe vi kan oppnå ved ti like anlegg, hvor hvert anlegg kan produsere 50 tonn hydrogen i døgnet, og med det kunne produsere **100 000 tonn grønn ammoniakk i året.**

Analyser av investeringsbehov og driftskostnader for et slikt anlegg gir et estimat på en levert pris på grønn ammoniakk på **4.500-7.000 kr/tonn.**

Transportkostnader for grønn ammoniakk levert direkte til et skip med skip-til-skip bunkring estimeres til å være på **800-1.100 kr/tonn.**

Energibehov

For å produsere 100 000 tonn i året kreves det elektrolyseanlegg som leverer 50 tonn hydrogen pr døgn, og som vil være identisk med det elektrolyseanlegget som er beskrevet på forrige side, med 1 060 GWh, dvs. ca. 1 TWh, i årlig energibehov. Med kontinuerlig effektuttak fra el-nettet på 121 MW.

Produksjon av ammoniakk

Å produsere ammoniakk etter Haber-Bosch-prosessen har enn 100-årig historie, en velkjent og kommersialisert prosess.

Ved høyt trykk i et Haber-Bosch anlegg gjennomgår nitrogen og hydrogen ammoniakksyntesen. Nitrogen hentes fra uteluften. Ammoniakken kjøles så ned til -33°C og blir flytende, og kan nå fraktes, distribueres og brukes som drivstoff.



De to store fordelene til LOHC er **bedret sikkerhet** og **lave transportkostnader**.

Siden hydrogenet er bundet til hydrogenoljen er det ikke fritt hydrogen under lagring. Det reduserer risiko og samtidig kostnader for transport, siden LOHC kan transporteres i konvensjonelle tankskip.

Forretningsmodeller for LOHC må utvikles for å avklare spørsmål som:

- Hvem skal eie energibæreren (LOHC)?
- Hva betaler rederen for? Levert energi, levert hydrogen eller levert LOHC?

Energibæreren LOHC er en organisk termalolje som finnes i forskjellige varianter og som kan gjenbrukes. Den må produseres og etter hvert erstattes. Kostnaden for kjøp av LOHC er estimert til å gi et påslag på 1-3 kr per kg hydrogen levert via LOHC.

Halve produksjonen i Fjord Base sendes til Vestbase

Eksempel for anlegg på 50 t/d: Et anlegg på Fjord Base sender halvparten av produksjonen til Vestbase for bunkring der. Formålet er å kunne nå flere skip enn bare de som bruker Fjord Base.

Estimater på transportkostnader over 150 nm (277 km) gir et tillegg på omtrent **1,5 kr per kg hydrogen** levert via energibæreren LOHC.

Estimater på investerings- og driftskostnader på tankanlegg på Vestbase gir et tillegg på **0,94 kr per kg hydrogen** levert via energibæreren LOHC.

Et påslag på omtrent 2,5 kr per kg hydrogen for en transport over 150 nautiske mil er vesentlig lavere enn for komprimert eller flytende hydrogen, og viser at LOHC er et godt alternativ for produksjon på flere forskjellige steder, ikke bare der skip bunkrer.

Global hydrogen distribusjon via LOHC

Skipstransport Internasjonal



- Bruk av eksisterende oljetankere og drivstoff infrastruktur
- Internasjonal sjø-transport

Jernbanetransport Internasjonal /nasjonal



- Multi-tonn transport på eksisterende infrastruktur
- Fleksibelt jernbanenett

Veitransport Nasjonal / regional



- Høy kapasitet på leveranse via veinettet for distribusjon

LOHC-løsningen om bord i et skip

- hydrogen produserer elektrisk energi for å operere hele skipet

Ombord i skipet er LOHC frigjøringsenheten sammen med brenselcellen kjerne-teknologiene. De frigir hydrogen fra energibæreren LOHC, termaloljen, og deretter genererer de elektrisk energi fra det frigjorte hydrogenet. Den elektriske energien brukes til å drive propellene med elektriske motorer, samt å forsyne skipets øvrige forbrukere av energi. Batterier blir benyttet i skipets elektriske system for å ta hånd om raske påkrevde belastnings-endringer, f.eks. fra propellene. I LOHC hydrogen frigjøringsenheten, foregår en dehydrogenererings-prosess, hvor hydrogen-molekylene frigjøres fra termaloljen igjennom en katalytisk reaksjon, når termaloljen er varmet opp til ca. 300°C. For å varme opp termaloljen kreves 12 kWh termisk energi per kg frigitt hydrogen. Fra hver m³ termalolje kan 57 kg hydrogen bli frigitt igjennom LOHC frigjøringsenheten.

Det frigjorte hydrogenet blir ført frem til brenselcellene, som omdanner hydrogen og oksygen til vann og elektrisk energi. Her vil LOHC frigjøringsenheten frigjøre kun den mengden hydrogen som skipet til enhver tid trenger. Dette betyr at det til enhver tid er svært små mengder fritt molekylært hydrogen om bord i skipet. Kun hydrogen mellom LOHC frigjøringsenheten og brenselcellene. Denne lave mengden fritt hydrogen utgjør en vesentlig lavere sikkerhetsrisiko enn om alt hydrogenet var lagret i fri form, og muliggjør å etablere et enkelt sikkerhetskonsept for et LOHC skip.

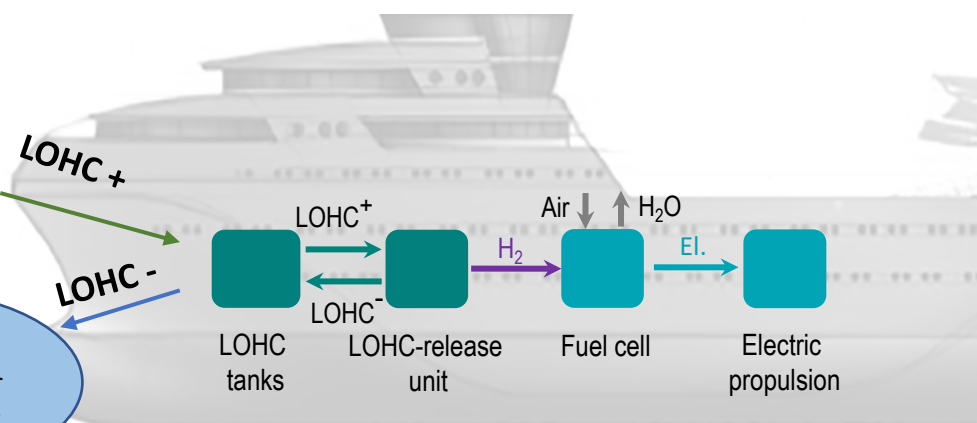
Energibæreren LOHC

Energibæreren LOHC, termaloljen benzyltoluen (med betegnelsen BT) har følgende egenskaper

- Oppfører seg som diesel
- Høyt flammepunkt
- Flytende ned til - 35°C
- Lagres i vanlige omgivelsesbetingelser
- Energibæreren LOHC forbrukes ikke, og kan derfor med fordel benyttes til å stabilisere skipets ballastsystem

Skipet bunkrer termalolje med opptatt hydrogen

Skipet leverer tilbake termaloljen hvor hydrogen er tatt ut



Det elektriske systemet

Brenselcellene omdanner hydrogen til elektrisk energi. Den sentrale delen i det elektriske systemet har batterier for å ta opp skipets belastningsvariasjoner slik at LOHC hydrogen frigjøringsenheten og brenselcellene kan generere en konstant elektrisk effekt uten raske effektendringer.

Redusert behov for ballastering

Bruk av energibæreren LOHC reduserer behovet for å pumpe sjøvann inn og ut av skipet. Dette er fordi hydrogenbæreren ikke blir brukt, men blir kun brukt til å frakte hydrogen til skipet.

Etter at hydrogenet er frigjort føres energibæreren LOHC tilbake til bunkerstankene.

Det reduserte behovet for utskifting av ballastvann er en positiv miljøeffekt, samtidig som energiforbruket med å pumpe ballastvann blir betydelig redusert.

Minimal mengde frigitt molekylært hydrogen

Hydrogen blir kun frigitt når både katalysator og varme er til stede.

Hydrogen frigjøres kun ved behov.

Hydrogen buffertank kan være nødvendig, avhengig av skipets energibehovssyklus.

Bunkring og pumping av termaloljen

Energibæreren LOHC, termaloljen, krever ikke noe annet bunkringsutstyr enn konvensjonell diesel:

- Rask bunkring
- Bruk av konvensjonelle pumper
- Skip kan losses og lastes samtidig under bunkring
- Bruk av eksisterende bunkringsinfrastruktur

Skipets drivstofftanker

Termaloljen LOHC+ kan lagres på tanker som er beregnet for å lagre diesel. Når en etterfyller drivstoff, hydrogenbæreren LOHC, så må en bestandig starte med en tom tank. Da LOHC enheten frigjør hydrogen fra termaloljen (LOHC+), føres termaloljen som har fått frigjort hydrogen (LOHC-) tilbake på en tom tank. Etterhvert som mer hydrogen blir frigjort fra termaloljen fylles disse tankene med termalolje som har fått frigjort hydrogen (LOHC-). Bruk av energibæreren LOHC i stedet for diesel innebærer en endring på rør- og pumpe-systemene for drivstofftankene. Når skipet kommer til land for å bunkre på nytt, så blir samtidig termaloljen hvor hydrogen er frigjort (LOHC-) levert på land for å berikes med nytt hydrogen. Termal-oljen forbrukes ikke.



Kjerneteknologiene for å produsere energibæreren LOHC

- Elektrolyse og hydrogen-berikningsenhet

Teknologioppskalering med en faktor 10 hvert siste 4 – 5 år

Det har vært en rivende utvikling innen teknologi og oppskalering av produksjon for både elektrolysører og LOHC berikningsenheter. Denne utviklingen vil fortsette og om noen år vil det være nye enheter innen disse teknologiene med andre, og forventet lavere, kostnader. Derfor er det utfordrende å kunne estimere kostnader for en storstilt oppskalering av denne teknologien. I denne studien har vi prøvd å balansere mellom bruk av dagens teknologi og forventet utvikling av teknologien.

Hovedprinsippet i produksjon av energibæreren LOHC

Innsatsfaktorene er:

- Termaloljen BT uten hydrogen
- Elektrisk energi
- Vann av drikkevannskvalitet

Ut av prosessen kommer

- Termaloljen BT som er beriket med hydrogen
- Termisk energi
- Oksygen

Salgbare bi-produkter

Det produserte oksygenet er et salgbart produkt som kan transporteres eller benyttes i nærliggende industri, for eksempel i fiskeoppdrett.

Den høyverdige termiske energien bør benyttes enten som fjernvarme eller i industrielle prosesser i nærheten av et slikt planlagt anlegg.

Energibæreren LOHC

Energibæreren LOHC som er blitt beriket med hydrogen benevnes som LOHC+. LOHC+ blir distribuert og lagret om bord i skipet. Om bord i skipet vil hydrogen bli frigjort fra energibæreren, og benevnes da som LOHC- etter at hydrogenet er frigjort. LOHC- blir levert til land i forbindelse med at skipet får bunkret ny LOHC+. LOHC- blir ført tilbake til en LOHC berikningsenhet for å bli tilført hydrogen. Energibæreren LOHC, termaloljen BT, sirkulerer da i et kretsløp.

Energibæreren LOHC – benzytoluen (BT)

Den flytende organiske energibæreren LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) er en termalolje hvor hydrogen blir beriket i denne oljen i en LOHC berikningsenhet. Om bord i skip blir hydrogen frigitt fra den organiske oljen. Denne oljen vil ikke bli forbrent, men bringes til havn for igjen å bli beriket med hydrogen, og benyttes på nytt. Termaloljen har betegnelsen BT (benzytoluen). Over tid vil det skje en degradering av den organiske oljen BT, som gjør at den må re-prosesseres etter 300 sykluser.

- håndteres, transporteres og lagres som dieselolje
- ikke eksplosiv, høyt flammepunkt
- er en kommersiell Heat Transfer Oil (3 – 5 €/kg i dag, kan synke til 1,5 €/kg ved større volum)

PEM-elektrolyse

I dag finnes er det to hovedtyper av elektrolysører, alkalisk- og PEM -elektrolyse (PEM står for *proton exchange membrane*). Pilot-studien har basert seg på PEM-elektrolysøren Silyzer 300 med følgende nøkkeldata:

Input:

- Elektrisk effekt 17 MW
- Vannforbruk 5 m³/time

Output:

- Oksygen 2,6 tonn/time
- Hydrogen 0,33 tonn/time
- Hydrogenrenhet 99,8 %

Elektrolysøren Silyzer 300 har en virkningsgrad på 77 %. Den termiske energien fra energitapet tas ut med kjølevann med temperatur på 50°C som skal kjøles ned til 35°C. Det er kostbart å nyttiggjøre seg av denne varmen, så derfor er det her lagt opp til sjøvannskjøling.

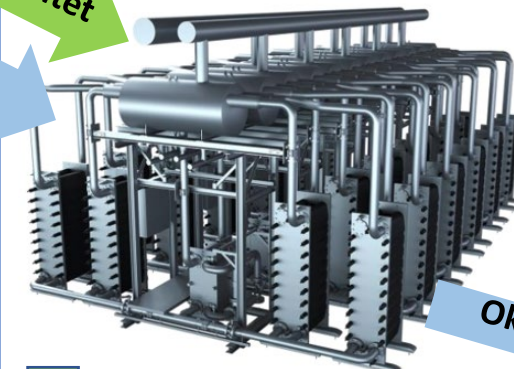
LOHC lagringsanlegg – LOHC Storage Unit

Å binde hydrogen til andre molekyler er kjente industriprosesser. I denne studien er Hydrogenious sitt hydrogen lagringsanlegg, LOHC Storage Unit, lagt til grunn. I LOHC Storage Unit, vil hydrogen bli absorbert i flytende organiske hydrogenbæreren BT, dvs. hydrogenmolekylene inngår i den kjemiske strukturen i termaloljen BT, på samme måte som hydrogen blir vann sammen med oksygen. Denne *hydrogeniserings*-prosessen er en eksotermisk reaksjon, dvs. prosessen gir fra seg termisk energi med temperatur høyere enn 200°C

- LOHC+ er energibæreren BT som er blitt beriket med hydrogen
- LOHC – er energibæreren BT hvor hydrogen er blitt frigitt om bord i skipet og som skal berikes med nytt hydrogen for å bli LOHC+
- lagrer 57 kg hydrogen pr m³ LOHC-termalolje

Elektrisitet

Vann



Oksygen

Hydrogen

PEM-elektrolyse

Silyzer 300. Produserer 8 tonn hydrogen pr døgn

Termisk energi



LOHC -

LOHC +

LOHC berikningsenhet, type 12 tpd

LOHC Storage Unit. Produserer 260 m³ LOHC pr døgn på basis av 12 tonn hydrogen

Økende globalt fokus på LOHC-produksjonsanlegg og distribusjon

Globalt er det mange prosjekter på å produsere energibæreren LOHC for også transportere hydrogen på en sikker og enkel måte over store avstander. Vedlagt finnes noen eksempler på produksjon og distribusjon av energibæreren LOHC

Chempark i Dormagen, Tyskland

Verdens største anlegg for å lagre grønt hydrogen i den flytende organiske energibæreren LOHC blir lagt til Chempark i Dormagen, Tyskland. Den planlagte kapasiteten er å lagre 1800 tonn hydrogen pr år i LOHC. Det hollandske selskapet Royal Vopak er med-investor i prosjektet og ser på LOHC distribusjon til Rotterdam



AquaVentus 10 GW offshore vind for å produsere hydrogen

AquaVentus har en målsetning om å produsere 1 million tonn hydrogen fra 10 GW offshore vindkraft i den tyske delen av Nordsjøen. Hydrogen skal produseres i Nordsjøen og bringes til land via en rørledning. Øya Helgoland er tiltenkt som et hydrogen-knutepunkt. En del av hydrogenet skal omdannes til LOHC og blant annet skipe ut LOHC over en eksisterende LNG terminal. I 2025 er den første distribusjonen av LOHC planlagt. Det er også planlagt at skipsoperasjonene i vindparkene skal foregå på basis av det produserte grønne hydrogenet.



Blue Danube – grønt hydrogen på den blå Donau

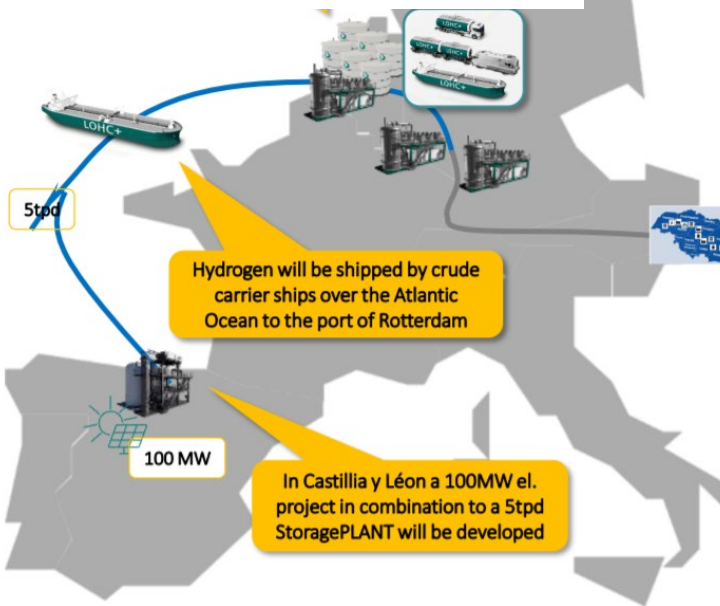
Verbund, Østerrikes største energiselskap, sammen med mange europeiske selskap, er i gang med et prosjekt for å etablere en verdikjede for grønt hydrogen langs Donau, basert på vindkraft og vannkraft i sør-øst Europa. Første del av prosjektet er å produsere 3000 tonn grønt hydrogen pr år og 400 tonn LOHC i Bayern, Tyskland. I fase 1 er det planlagt å produsere 27 000 tonn hydrogen pr år og i fase 2 hele 80 000 tonn hydrogen fra 2 GW fornybar energi.

The partners of the Pilot Study:

- Siemens Energy - Lead
- Ship owners
 - Østensjø
 - Wilhelmshaven
 - Grieg Edge
- Utility & electric power companies
 - Arendal Fossekompani
 - Sogn & Fjordane Kraft
- Maritime fuel infrastructure & distribution companies
 - Gasnor (Shell)
 - Wilhelmshaven
 - NorSea Group
 - HyFuel
- DNV



and further hydrogen by ships and trucks



Den spanske gass-nett-operatøren Enagas og energiselskapet Naturgy planlegger å bygge et 400 MW solcelleanlegg sammen med en elektrolysør på 100 MW. Prosjektet vil produsere opp til 9000 ton fornybar hydrogen pr år. En LOHC Storage Unit på 5 tonn hydrogen er planlagt som første trinn. Å transportere LOHC med skip til Amsterdam er planlagt

Delaktige partnere

Pilotstudien infrastruktur for LOHC, en flytende organisk energibærer som maritimt utslippsfritt drivstoff, har hatt delaktige partnere som dekker en stor del av verdikjeden fra *energikilde-til-propell*, dvs. fra produsenter av fornybar kraft til rederi som opererer skip, som har muliggjort å få belyst både de fordelaktige og utfordrende elementene som denne teknologiske løsningen resulterer i.

Siemens Energy - piloteier



Østensjø Rederi



Østensjø Rederi

Wilhelmsen



Grieg Edge



Gasnor



HyFuel



DNV - pilotkoordinator



Kontaktpersoner

Siemens Energy AS

Odd Moen

Tlf: 93 044 015

odd.moen@siemens-energy.com

DNV

Eirik Ovrum

Tlf: 414 40 936

eirik.ovrum@dnv.com