

Ny kunnskap for sikker bruk av hydrogen på skip

Samfunnet vårt står ovenfor store utfordringer på klima og miljø, også innen maritim sektor. Norge har store ambisjoner og planer for å stimulere til grønn vekst i maritim industri. Sjøfartsdirektoratet har deltatt i prosjektet *H2Maritime* for å bidra til forskning og utvikling av ny kompetanse på bruk av hydrogen og brenselceller i maritim sektor.

Sikkerhetsutfordringene med bruk av hydrogen er svært forskjellig sammenlignet med konvensjonelle drivstoff og krever andre sikkerhetstiltak og barrierer. Driftserfaring, opplæringsmateriell, sikkerhet knyttet til operasjon, sikkerhetsavstander og farlige soner er blant kunnskapshullene.

Prosjektet, som pågikk over en fireårsperiode (2019–2023), hadde som hovedmål å etablere designkriterier og driftsfilosofier for bunkring og lagring av hydrogen i skip og bruk av hydrogendrevne brenselceller for framdrift.

Institutt for energiteknikk (IFE) har koordinert og ledet prosjektet med støtte fra Forskningsrådet. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Universitetet i Sørøst-Norge (USN), Sjøfartsdirektoratet og fem industripartnere (Equinor, ABB Marine, Havyard Design and Solutions, Umoe Advanced Composites, Vysus Group) har deltatt i prosjektet.

Prosjektet har bestått av tre arbeidspakker (WP 1, WP 2 og WP 3). H2Maritime har bidratt til utvikling av nye metoder, modeller og simuleringsverktøy for å fremskaffe ny vitenskapelig og teknisk innsikt i følgende identifiserte utfordringer:

- hurtigfylling av trykksatt hydrogen (GH2) i tanker som er egnet for mindre fartøy
- effektiv bunkring av flytende hydrogen (LH2) og drift av LH2-tanker egnet for større fartøy
- dimensjonering av og effektiv drift av store hydrogendrevne brenselcellesystemer i kombinasjon med batterier for framdrift av skip
- sikkerhet rundt bruk av flytende og trykksatt hydrogen innen maritime anvendelsesområder

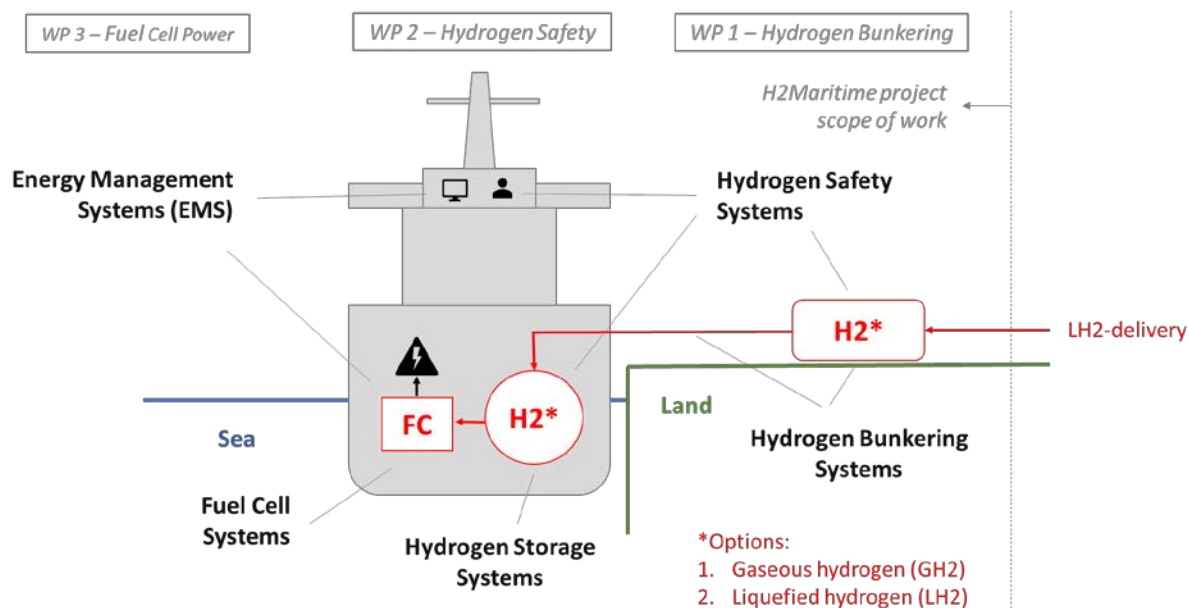
Faktaboks:

Hurtigfylling: mer enn 2000 kg/time

Trykksatt hydrogen i tanker for skip: 250–350 bar

Flytende hydrogen: < –253 °C

Store hydrogendrevne brenselcellesystemer: 1–10 MW



Bunkring og lagring av hydrogen (arbeidspakke 1)

Utgangspunktet for denne arbeidspakken var følgende problemstilling: «Hvordan kan hydrogenbunkring og tanksystemer for maritim bruk designes, og hvordan kan vi sørge for effektiv og sikker operasjon av slike systemer?». H2Maritime-prosjektet har tatt utgangspunkt i at flytende hydrogen leveres til bunkringsanlegget. Derfra kan hydrogenet overføres til skipet, enten i flytende form (LH2) eller trykksatt (GH2). Da prosjektet startet, fantes det ikke teknologi, systemer eller standarder for bunkring i maritim sammenheng eller retningslinjer for å sørge for sikker operasjon for personellet som er involvert.

Det ble identifisert tre hovedutfordringer knyttet til bunkring og oppbevaring av hydrogen. Ved bunkring av store H2-trykktanker for maritim bruk er utfordringen varmeutvikling i skipets H2-tank. Ved hurtigfylling vil temperaturen i tanken øke. I komposittanker (glassfiber eller karbonfiber) med innerliner av termoplast (HDPE) er det en temperaturbegrensning på grunn av termoplastens materialegenskaper. Maksimal temperatur i karbonfibertanker til personbiler er 85 °C, mens glassfibertanker egnet til maritim bruk har en maksimal temperatur på 65 °C.

Ved bunkring av flytende hydrogen (LH2) er utfordringen varmeoverføring og faseovergang i bunkringsanlegget, som kan lede til kavitasjon under strømning. Kavitasjon kan oppstå når strømningshastigheten lokalt øker, for eksempel i en innsnevring eller pumpe, slik at det statiske trykket faller såpass mye at det dannes gassbobler. Når strømningshastigheten igjen reduseres, kan trykket øke slik at gassboblene imploderer. Dette kan resultere i vibrasjoner og mekaniske skader.

Videre var det en teori knyttet til såkalt skvulping («sloshing») ved lagring i store LH2-tanker. En potensiell negativ effekt ved «sloshing» kan være økt fordamping og dermed tap av hydrogen i tanken. Prosjektet konkluderte med at videre forskning på dette ikke er nødvendig. Bevegelsene til LH2 anses å være mindre «voldsomme» enn bevegelse i vann.

Les mer om arbeidet som er blitt gjort i arbeidspakke 1 (utvalgte publikasjoner):

- Matematiske modeller laget i MATLAB og ANSYS Fluent:
 - Utvikling av modell for beregning av temperatur i trykksatte hydrogentanker under bunkring, inkludert varmetransport i tankvegg (Prasanna Welahettige, Per Morten Hansen, Knut Vågsæther, USN). Kontaktinformasjon: perha@usn.no / knutv@usn.no
 - Utviklet CFD-metode for hydrogenstrømning og tilstand i tank under bunkring av komprimert hydrogen (Netaji Ravikiran Kesana, IFE) Kontaktinformasjon: netk@equinor.com
- Publisert journalartikkel på strømning og hydrogentilstand i tanker under H₂-bunkring. (Netaji Ravikiran Kesana, Prasanna Welahettige, Per Morten Hansen, Øystein Ulleberg, Knut Vågsæther). Link: [Modelling of fast fueling of pressurized hydrogen tanks for maritime applications](#), *International Journal of Hydrogen Energy*
- Vågsæther K., Hansen P.M. (2023) Modelling of LH₂-bunkering, Report USN 7300-1700084
- Hansen P.M., Vågsæther K. (2023) Hydrogen process and system models using EES, Report USN 7300-4700113
- Helgesen G. (2023) Heat exchangers for hydrogen tank filling, Report IFE/E-2023/002 Kontaktinformasjon: geir.helgesen@ife.no
- Artikkel på «Explosive phase transition in LH₂», presentert på ICHS 2021 (Knut Vågsæther, Per Morten Hansen, Dag Bjerketvedt). Link: [Explosive phase transition in LH₂](#)

Hydrogensikkerhet (arbeidspakke 2)

Utgangspunktet for denne arbeidspakken var følgende problemstilling: «Hvordan bør systemene for maritime hydrogenbunkringsanlegg designes og opereres sikkert?». I denne arbeidspakken ble det fokusert på flytende hydrogen (LH₂).

Hoveddelen av resultatene fra arbeidspakke 2 er sammenfattet i IFEs rapport *H₂ Safety in Human Operations*. Det ble gjennomført en casestudie med scenariobasert risikoanalyse på bunkring av LH₂.

Ulike skip, H₂-systemer og bunkringsmetoder krever ulik tilnærming til risiko. Prosjektet valgte en casestudie med fokus på et passasjerfartøy, der hydrogenanlegget og lagringstanken var plassert over dekk.

Metoden som ble brukt er en del av en CRIOP-analyse (*Crisis Intervention and Operability Analysis*) og har en tilnærming der man vurderer svake punkter (problemer/utfordringer) knyttet til menneskelige faktorer. Sluttrapporten gir anbefalinger angående tiltak og/eller barrierer for sikker bunkring av LH₂ ved menneskelig operasjon.

I casestudien fokuserte scenarioanalysen på menneskelige funksjoner, ansvar, roller, oppgaver og samarbeid under bunkringsoperasjoner. Ved å analysere to scenarier så man mulige farekilder, og man identifiserte også informasjon som bør være i kontrollsystemets grensesnitt for menneske-maskin-interaksjon (MMI/HSI). Begge scenariene inkluderte lekkasje fra en slangekobling. I det første

scenariet var det en liten lekkasje som utviklet og spredte seg. I det andre scenariet var det en plutselig lekkasje.

Det ble avdekket 55 læringspunkter, som kan grupperes i følgende kategorier:

- teamarbeid, oppgavefordeling og kommunikasjon
- HSI og situasjonsforståelse
- utforming av fasiliteter
- systemdesign
- arbeidstid (tid på døgnet)
- arbeidsmiljø
- kompetanse og trening
- prosedyrer
- beredskap
- tidsbegrensninger i bunkringsoperasjon

IFE har i sin rapport foreslått tiltak eller barrierer knyttet til funnene. Et eksempel på dette er at en operatør i casestudiet hadde sin arbeidsposisjon på land ved siden av bunkringstårnet og ikke hadde mulighet til å oppdage lekkasjen på grunn av hindringer i siktelinjen. Det ble foreslått flere ulike tiltak, blant annet å vurdere om operatøren kan utføre sine oppgaver på trygg avstand fra bunkringssystemet ved å bruke overvåkingskameraer. Et lite kontrollrom på kaien med tilgang til kontrollsystemet og skjermer for overvåking av anlegget nevnes også som et tiltak for å unngå at operatørens oppmerksomhet blir påvirket av det å stå ute om natten, eventuelt i regn og kaldt vær, under en timelang bunkringsprosess.

Studien indikerer at for å oppnå en vellykket implementering av et H2-bunkringssystem for maritime formål er det essensielt å inkludere en menneskesentrert tilnærming. Dette innebærer å fokusere på de menneskelige faktorene og hvordan man kan gi støtte til de som opererer systemet for å oppnå suksess. Videre konkluderer rapporten med viktigheten av å involvere sluttbrukere i både utviklings- og evalueringsprosessen. Det største potensialet for forbedringer ligger i de tidlige fasene, før det blir for kostbart å gjennomføre endringer.

Les mer om arbeidet som er blitt gjort i arbeidspakke 2 (utvalgte publikasjoner):

- Konferanseartikkel som tar for seg hvordan CRIOP metoden er brukt i forbindelse med risikoanalyse av et casestudie. Den diskuterer også om CRIOP er et godt verktøy for å identifisere utfordringer og potensielle forbedringer basert på en foreløpig/tidlig analyse.
Lunde-Hanssen, L.S., Ulleberg, Ø. (2022). Safety in human operation during bunkering of liquid hydrogen - Preliminary findings of CRIOP scenario analysis. In Proceedings of the 10th International Seminar on Fire and Explosion Hazards (ISFEH 10, 2022). University of South-Eastern Norway
Link: <https://openarchive.usn.no/usn-xmlui/handle/11250/3030345>
- Sluttrapport som inkluderer resultater fra casestudie og gir anbefalinger angående tiltak og/eller barrierer for sikker bunkring av LH2 ved menneskelig operasjon (Linda Lunde-Hanssen og Øystein Ulleberg, IFE)
Lunde-Hanssen, L.S., Ulleberg, Ø. (2023). H2 Safety in Human Operations – and Safety guideline. IFE/E-2023/004. ISBN: 978-82-7017-945-9. Institute for Energy Technology, Halden, Norway.
Link: <https://ife.brage.unit.no/ife-xmlui/handle/11250/3065257>

Brenselceller (arbeidspakke 3)

Utgangspunktet for denne arbeidspakken var følgende problemstilling: «Hvordan kan energistyringssystemer (EMS) for hybride brenselcellesystemer optimaliseres slik at batteriene og brenselcellene blir mer effektive og får lengre levetid?» Målet var blant annet å redusere implementeringskostnaden og dermed terskelen for å ta i bruk teknologien. Kombinert bruk av brenselceller og batterier i hybride systemer antas å være ideelt for maritim bruk. Det primære målet for delprosjektet var å bygge opp inngående kunnskap om design og drift av hybride brenselcellesystemer for maritim bruk i størrelse 1–10 MW. Det eksisterer ingen standard eller retningslinjer for design og drift av hybride brenselcellesystem for maritime anvendelser. Det mangler også kunnskap om hvordan man optimaliserer energistyringssystemer og brenselcellesystemkontroller med tanke på levetid.

Arbeidspakken ble delt inn i to delstudier, der NTNU jobbet med «Modelleringen av kraft- og energistyring for brenselceller for maritim bruk» og IFE med «Eksperimentell validering av brenselcelleoperasjon for maritim bruk». På NTNU ble det med veiledning fra IFE gjennomført et doktorgradstudie på design av hybride brenselcellesystemer for maritime fartøy. Det kan her nevnes at studenten, rett etter gjennomført doktorgrad, ble ansatt som systemingeniør i Teco2030 for å utvikle maritime brenselceller.

IFE har videreutviklet et testlaboratorium med oppsett for testing av hydrogendrevne PEM-brenselceller i størrelser opp til 20 kW i hybrid oppsett med maritime batterisystem for testing og utvikling av brenselcellestyringsstrategier. PEM står for «Proton Exchange Membrane» og er lavtemperatur-brenselceller.

Prosjektet har sett på kostnadseffektiv design og energieffektiv drift. Det ble utviklet digitale verktøy for optimal dimensjonering av brenselcelle- og batterisystemer basert på faktisk operasjonsprofil for fartøy.

I tillegg har det blitt utviklet avanserte modeller av energisystemet på et fartøy for å undersøke effekten av kontrollfilosofi for samspillet mellom brenselceller og batteri på energieffektivitet. Dette er sett i sammenheng med levetid på brenselceller og batterier.

Les mer om arbeidet som er blitt gjort i arbeidspakke 3 (utvalgte publikasjoner):

- Balestra L., Yang R., Schjøberg I., Utne I., Ulleberg Ø. (2021) Towards Safety Barrier Analysis of Hydrogen Powered Maritime Vessels, International Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering (OMAЕ), in *ASME Transactions*, <https://doi.org/10.1115/OMAЕ2021-60451>
 - Balestra L., Schjøberg I. (2021) Energy management strategies for a zero-emission hybrid domestic ferry, *International Journal of Hydrogen Energy*, [10.1016/j.ijhydene.2021.09.091](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.09.091)
 - Balestra L., Schjøberg I. (2021) Modelling and simulation of a zero-emission hybrid power plant for a domestic ferry, *International Journal of Hydrogen Energy*, [10.1016/j.ijhydene.2020.12.187](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.187)
- Balestra L. (2022) Design of Hybrid Fuel Cell/Battery Systems for Maritime Vessels, PhD thesis, NTNU, <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/3028532>

Oppsummering

Det har i *H2Maritime*-prosjektet blitt utviklet ulike modeller og metoder for bunkring av flytende hydrogen (LH₂) og komprimert hydrogen (GH₂). *H2Maritime*-prosjektet har gitt ny innsikt i hvordan man kan fylle drivstoff på en sikker og effektiv måte, og hvordan man kan designe og drifte brenselceller for maritime fremdriftssystemer. Metodene og simuleringsverktøyene utviklet i prosjektet har blitt brukt og validert mot virkelige bruks-eksempler. Kunnskapen tilegnet i *H2Maritime*-prosjektet har blitt og vil fortsatt bli overført til mange maritime applikasjoner og næringer i Norge.

Videre er det utviklet detaljerte simuleringsverktøy for bruk av de tre forskningspartnerne, de fem industripartnerne og Sjøfartsdirektoratet. Dokumentasjon på disse simuleringsverktøyene kan på forespørsel gjøres tilgjengelig fra IFE, NTNU og USN. Resultatene fra *H2Maritime*-prosjektet viser at kjøling av gassen kan være nødvendig ved GH₂-fylling. Ved hurtigfylling av trykksatt hydrogen vil en temperaturøkning i tanken være en hovedutfordring dersom makstemperaturen skal holdes under 65 °C.

Forskningsaktivitetene i *H2Maritime*-prosjektet på hurtigfylling av trykksatte hydrogentanker er relevant for flere av de siste hydrogenprosjektene som for tiden utvikles langs kysten av Norge. Flere selskaper har vist interesse for arbeidet som er gjort i prosjektet med H₂-tanking. Forskningsaktiviteten knyttet til hydrogenbunkring forsetter ved IFE, gjennom *Rail4EARTH*-prosjektet.

Sikkerhetsstrategier må gjennomføres for å sikre trygg drift under påfylling og bunkring av hydrogen. Trykkavlastning av gass i nødsituasjoner må for eksempel sikre lavest mulig risiko. Forskningsaktivitetene på hydrogensikkerhet i menneskelige operasjoner ble gjennomført i en casestudie av en flytende hydrogenbunkringsprosess for et skip. Kunnskapen som bygges opp om lagring av flytende hydrogen vil også bli videreført i nye forskningsprosjekter ved IFE og USN.

Forskningsaktiviteten på lavtemperatur PEM-brenselcellesystemer er svært relevant for leverandører av kraftsystemintegrasjon og maritime brenselcellesystemer i Norge. Forskingen knyttet til brenselcellesystemer fortsetter i *MoZEEs*- og *HYDROGENi*-prosjektene. To nøkkelpersoner fra *H2Maritime*-prosjektet (én fra IFE og én fra NTNU) har begynt i relevant maritim næring (*Teco2030*).

Regjeringen varslet i fjor høst at de forsterker sitt mål om utslippskutt til 55 % innen 2030. For å nå dette målet er det satt i gang flere prosjekter der hydrogen og brenselceller blir brukt på skip. Sjøfartsdirektoratet er involvert i flere av disse.

Det er behov for mer forskning på områder som *H2Maritime*-prosjektet tar opp, både innenfor det menneskelige, teknologiske og organisatoriske aspektet.