

Valg av Energibærere for Drift av Service Operasjonsskip i Flytende Offshore Vindparker:

En Sammenlignende Studie

Espen Bysheim Haukeland
Pål Hildre Dimmen
Steffen Askvik Gassmann

Bacheloroppgave i Havteknologi & Marinteknikk
Bergen, Norge 2023



Valg av Energibærere for Drift av Service Operasjonsskip i Flytende
Offshore Vindparker:

En Sammenlignende Studie

Espen Bysheim Haukeland
Pål Hildre Dimmen
Steffen Askvik Gassmann

Institutt for Maskin- og Marinfag
Høgskulen på Vestlandet
NO-5063 Bergen, Norge

IMM 2023-22. Mai

Høgskulen på Vestlandet
Fakultet for Ingeniør- og Naturvitskap
Institutt for maskin- og marinfag
Inndalsveien 28
NO-5063 Bergen, Norge

Omslag fotografi © Norbert Lümmer

English title:

Comparison of Energy Carriers for the Operation
of Service Operation Vessels in Offshore Wind Farms.

Forfatter(e), studentnummer: Espen Bysheim Haukeland, 590500
Pål Hildre Dimmen, 591079
Steffen Askvik Gassmann, 589045

Studieprogram: Havteknologi & Marinteknikk
Dato: Mai 2023
Rapportnummer: IMM 2023-M37
Veileder ved HVL: Thomas Henrik Hertzfelder Hansen
Oppdragsgiver: Breeze Ship Design
Oppdragsgivers referanse: Ove Wilhelmsen

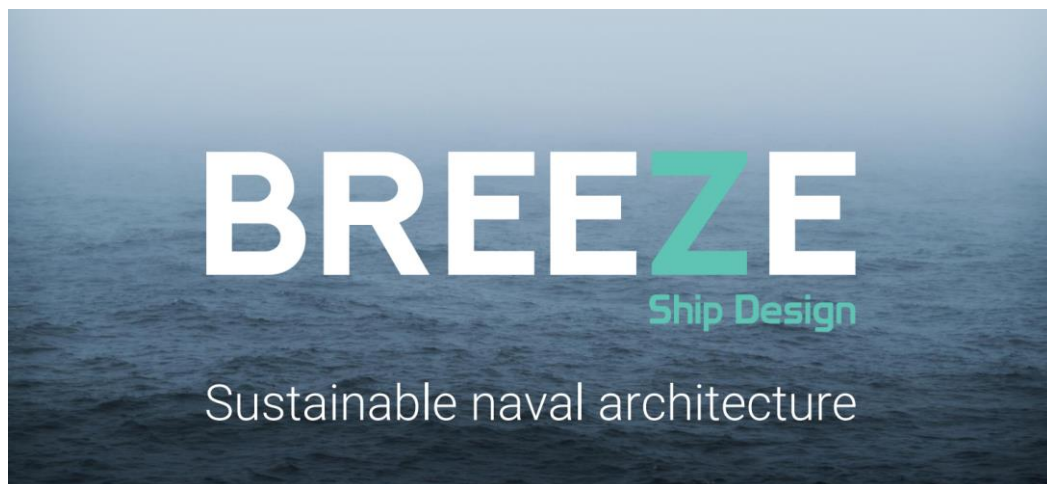
Antall filer levert digitalt: 11

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet av tre studenter på Institutt for Marin- og Maskinfag ved Høgskulen på Vestlandet. Oppgaven ble utarbeidet i samarbeid med Breeze Ship Design og omhandler energibærere for serviceoperasjonsskip. Det har vært en lærerik oppgave som har gitt et innblikk i både energibærere og maritim virksomhet.

Vi vil takke vår veileder Thomas Henrik Hertzfelder Hansen for god veiledning gjennom oppgaveskrivingen. Videre må vi gi stor takk til ansatte i Breeze som har bidratt med informasjon og innsikt, dette inkluderer blant andre, Ove H. Wilhelmsen, Tommy Hivand, Jon A. Folgrø-Holm og Arve Ytrehus.

Vi vil også takke Pål Ove Husøy fra Corvus Energy, Håvard Stave og Ida E. Selvig fra Hexagon Purus, Håvard Vollset Lien fra Vard Group og Tomas Fiksdal i Greenstat for nyttig informasjon og innspill til oppgaven.



Sammendrag

Denne avhandlingen oppsummerer de mest relevante energibærerne for drift av Service operasjonsfartøy (SOV) i flytende offshore vindparker. Energibærere spiller en avgjørende rolle i den maritime industrien da de gir nødvendig kraft for fartøydriфт. Valget av energibærere er av enorm betydning, både for å sikre effektiv og pålitelig fartøysytelse, og for å redusere miljøpåvirkningen fra maritime aktiviteter.

I lys av den presserende nødvendigheten av å håndtere klimaendringer og redusere klimagassutslipp, har valg av bærekraftige energibærere blitt en prioritet. Ved å bevege seg bort fra forurensende dieselmotorer kan vindkraftaktører omfavne renere alternativer som samsvarer med globale klimamål og bidrar til en grønnere profil. Denne avhandlingen vurderer ulike energibærere basert på deres egenskaper, funksjoner og ytelse for å identifisere de mest passende alternativene for SOVer, med det endelige målet om å oppnå en betydelig reduksjon i maritime utslipp innen 2050. Disse målene er i tråd med Den internasjonale sjøfartsorganisasjonens (IMO) mål om å redusere maritime utslipp med 70% innen 2050 sammenlignet med 2008.

Studien sammenligner ulike energibærere, inkludert marin diesololje (MDO), flytende naturgass (LNG), batteridrift, hydrogen og ammoniakk. Sammenligningen utføres basert på fem grunnleggende parametere: "Operasjon", "Økonomi", "Teknologisk modenhet (TRL)", "Helse, sikkerhet og miljø (HMS)" og "Utslipp". Resultatene presenteres i tabellform, og gir en omfattende og transparent oversikt over både subjektive og objektive vurderinger. Vurderingene i tabellen, og dermed sluttresultatet, kan justeres av leserne basert på deres egne oppfatninger av hver parameter. Til slutt justeres vurderingene for å ta hensyn til forventede fremtidige utviklinger, og den resulterende analysen presenteres deretter.

Basert på evalueringen konkluderer denne studien med at batteridrift for øyeblikket er det mest passende alternativet for SOV-er. Denne konklusjonen skyldes dets kompatibilitet med offshore ladeløsninger og tilgjengeligheten av både vindkraft og landstrøm ved vindparken. Imidlertid forventes hydrogenkraft å være likeverdig med batteridrift med forventede teknologiske fremskritt, forutsatt bruk av hydrogenlagring gjennom Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC). Disse funnene belyser industriens fokus på batteri- og hydrogenkraft i investeringer relatert til SOVer, noe som er bredt diskutert i media.

Abstract

This thesis provides a comprehensive overview of the most relevant energy carriers for operating Service Operation Vessels (SOV's) in floating offshore wind farms. Energy carriers are vital in the maritime industry as they supply the necessary power for vessel operations. The selection of energy carriers holds great significance, not only for ensuring efficient and reliable vessel performance but also for mitigating the environmental impact of maritime activities.

Given the urgent need to address climate change and reduce greenhouse gas emissions, the adoption of sustainable energy carriers has become a top priority. By transitioning away from polluting diesel engines, wind power operators can embrace cleaner alternatives that align with global climate goals and contribute to a greener profile. This thesis evaluates different energy carriers based on their properties, features, and performance to identify the most suitable options for SOVs, with the ultimate aim of achieving a significant reduction in maritime emissions by 2050. These objectives are aligned with the International Maritime Organization (IMO) goal of reducing 2050 maritime emissions by 70% compared to 2008.

The study compares various energy carriers, including Marine Diesel Oil (MDO), Liquefied Natural Gas (LNG), battery power, hydrogen, and ammonia. The comparison is conducted based on five fundamental parameters: "Operation," "Economy," "Technology Readiness Level," "Health, Safety, and Environment (HMS)," and "Emissions." The results are presented in a tabulated format, offering a comprehensive and transparent overview of both subjective and objective assessments. The assessments can be adjusted by readers based on their own perceptions of each parameter. Additionally, the assessments are adjusted to account for anticipated future developments, and the resulting analysis is presented accordingly.

Based on the evaluation, this study concludes that battery power is currently the most suitable option for SOVs. This conclusion stems from its compatibility with offshore charging solutions and the availability of both wind power and onshore power at the wind farm. However, with expected advancements in technology, hydrogen power is projected to be on par with battery power, assuming the utilization of hydrogen storage through Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC). These findings highlight the industry's focus on battery and hydrogen power within SOV investments, which are extensively discussed in the media.

Innhold

Forord.....	V
Sammendrag.....	VII
Abstract	IX
Nomenklatur.....	XIV
1. Innledning.....	1
2. Teori.....	4
2.1 Service Operation Vessel	4
2.2 Regulering	8
2.3 Energibærere	10
2.3.1 Marine Diesel Oil - MDO.....	10
2.3.2 Batteri	12
2.3.3 LNG.....	18
2.3.4 Hydrogen.....	19
2.3.5 Ammoniakk.....	24
2.4 Energikonvertering.....	26
2.4.1 Forbrenningsmotor	26
2.4.2 Brenselceller.....	27
2.5 Utslipp.....	32
2.5.1 Karbonoksider	32
2.5.2 Svoveloksider	32
2.5.3 Nitrogenoksider.....	33
2.5.4 Svevestøv.....	33
2.5.5 Oppsummering av utslipp.....	35
3. Metode.....	36
3.1 Tabellrangering	36
3.1.1 Operasjon.....	36
3.1.2 Økonomi.....	40
3.1.3 TRL	42
3.1.4 HMS	44

3.1.5	Utslipp	46
3.2	Vurdering	48
4.	Resultat	49
4.1	Operasjon	49
4.2	Økonomi	50
4.3	TRL	50
4.4	HMS	51
4.5	Utslipp	52
4.6	Vurdering	53
5.	Diskusjon	54
5.1	Energibærerne	54
5.2	Fremtidig vurdering	59
6.	Konklusjon	60
	Referanser	61
	Liste over Figurer	69
	Liste over Tabeller	70
	Vedlegg	71

Nomenklatur

Forkortelser:

FN	Forente Nasjoner
SOV	Serviceoperasjonsskip
EU	European Union
LNG	Liquified Natural Gas
HMS	Helse, Miljø og Sikkerhet
DP	Dynamisk Posisjonssystem
IMO	International Maritime Organization
MSC	Maritime Safety Committee
MEPC	Environment Protection Committee
SOLAS	Safety of Life at Sea Convention
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
IGC	The International Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquified gases in Bulk
IGF	International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels
ISM	The International Safety Management Code
DNV	Det Norske Veritas
GHG	Green House Gas
HFO	Heavy Fuel Oil
MDO	Marine Diesel Oil
MGO	Marine Gas Oil
LFP	Lithium Iron Phosphate

eCTV	Electric Crew Transport Vessel
CCS	Carbon Capture and Storage
PEM	Proton-exchange Membrane
FOBC	Fast-oxid Brenselcelle
H-B metoden	Haber-Boch metoden
SCR	Selective Catalytic Reduction
LT	Lav Temperatur
HT	Høy temperatur
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EGCS	Exhaust Gas Cleaning System
PM	Particulate Matter
TRL	Technology Readiness Level
PSV	Platform Supply Vessel
Q1	Første kvartal
P-kode	Forebyggende-kode
H-kode	Faresetnings-kode
NASA	National Aeronautics and Space Administration
USD	Amerikanske dollar
EUR	Euro
NOK	Norsk Krone

Kjemiske symboler:

CO ₂	Karbondioksid
CO	Karbonmonoksid
LiFePO ₄	Litium -Jernfosfat
LiCoO ₂	Litium-koboltoksid
Li	Litium
PO ₄	Fosfat
e	elektron
Fe	Jern
CH ₄	Metan
C ₂ H ₆	Etan
H ₂ S	Hydrogensulfid
C ₃ H ₈	Propan
C ₄ H ₁₀	Butan
H ₂ O	Vann
H ₂	Hydrogenmolekyl
l	Liquid
g	Gas
aq	Aqueous solution
O ₂	Oksygenmolekyl
HO	Hydroksid
C-H ₂	Komprimert hydrogen
L-H ₂	Flytende hydrogen
NH ₃	Ammoniakk
N ₂	Nitrogen
NO _x	Nitrogenoksid
SO _x	Svoveloksid
H ⁺	Hydrogenion
O ⁼	Oksygenion

Enheter:

%	Prosent
°C	Grader Celsius
Knop	En nautisk mil per time
m	Meter
m ³	Kubikmeter
kWh	Kilowatt timer
MWh	Megawatt timer
MJ/l	Megajoule per Liter
Kg/l	Kilogram per Liter
MJ/kg	Megajoule per kilo
Bar	Enhet for trykk
Kg/m ³	Kilo per kubikmeter
atm	Atmosfærisk trykk
wt%	Vektprosent
µm	Mikrometer
g/kWh	Gram per kilowatt timer
CO ₂ eq	CO ₂ ekvivalenter
g CO ₂ eq/kWh	Gram CO ₂ ekvivalenter per kilowatt timer

1. Innledning

De Forente Nasjoner (FN) har laget en liste over 17 bærekraftsmål og 169 delmål med et formål om å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030 [1]

Disse 17 målene har blitt demokratisk fremstilt, hvor nesten 10 millioner mennesker fikk sagt sin mening gjennom en spørreundersøkelse. Denne listen over bærekraftsmål ble vedtatt av FNs medlemsland i 2015, samme år som fristen for å nå Tusenårsmålene (2000-2015) gikk ut; og er et konkret tiltak for å ta over det man ikke klarte å gjennomføre i Tusenårsmålene inkludert noen ekstra punkter.

Serviceoperasjonsskip (SOV) spiller en avgjørende rolle i drift og vedlikehold av flytende offshore havvindmølleparker. For å oppfylle FNs bærekraftsmål nr. 13 “stoppe klimaendringene” og redusere utslipp av klimagasser er det nødvendig å dekarbonisere denne typen fartøy, som også reflekterer den grønne profilen til vindmølleparker [1].

Dersom man får dekarbonisert disse fartøyene vil det også ha en positiv effekt på bærekraftsmål nr. 14 “Livet i havet”, ettersom dagens dieseldrevne systemer ikke bare forurenses luften, men også havet. Utslipp som absorberes i havet vil ha en negativ innvirkning på den kjemiske balansen i havet, samt at større utslipp kan få katastrofale følger for havmiljøet [1].

Implementeringen av dekarboniseringsstrategier for en SOV vil også øke konkurransevnen til havvind ved å redusere driftskostnadene, øke energieffektiviteten og forbedre den bærekraftige teknologiske utviklingen. Effektiv og bærekraftig drift av havvindmølleparker bidrar igjen til bærekraftsmål nr. 7 “ren energi til alle”[1].



Figur 1: FNs bærekraftsmål 7, 13, 14

Det finnes mange potensielle grønne energibærere som kan implementeres i en SOV, som alle har sine fordeler og ulemper. I denne undersøkelsen presenteres et utvalg av de mest relevante alternativene, som

sammenlignes på grunnlag av de viktigste parameterne. Energibærerene som undersøkes er MDO (Marin dieselolje), LNG (naturgass), batteridrift, hydrogen og ammoniakk.

Metanol

Metanol er et lovende drivstoff for utslippsreduksjon, men eliminerer ikke utslipp i likhet med LNG. Metanol vil ha mange fordeler over LNG, men ingen av delene vil ha et sentralt fokus i denne undersøkelsen. Det vil fungere som et overgangsdrivstoff, men har ikke blitt inkludert her til fordel for LNG som et mer etablert overgangsdrivstoff. Skipsdesignet brukt i undersøkelsen er drevet av LNG, som gjør det naturlig å inkludere.

Breeze Ship Design

Breeze Ship Design er et uavhengig selskap som ble etablert i 2020. De tar bærekraftig skipsdesign på stort alvor og sitter i dag på en portefølje som inneholder over 4000 fartøy, deriblant noen av verdens mest avanserte miljøvennlige fartøy. Porteføljen inneholder alt fra fiskebåter til oljetankere og de ser etter innovative og bærekraftige løsninger på alle sine skip.



Figur 2: Breeze Ship Design

Breeze sitt uttalte mål er: “To accelerate sustainable solutions in naval architecture”.

2. Teori

Dette kapittelet tar for seg teori og informasjon som er innhentet for å kunne foreta en analyse av de ulike energibærerne. Dette innebærer reguleringer som er satt av internasjonale organer, produksjon og lagring av de ulike energibærerne, energikonvertering og utslipp.

2.1 Service Operation Vessel

Serviceoperasjonsskip (SOV) er et fartøy som er spesielt designet for å utføre vedlikehold og reparasjonsarbeid på havvindmølleparker. Fartøyet har som hovedfunksjon å tilby sikker og effektiv tilgang til vindturbinene for teknikerne og utstyret de trenger for å gjennomføre sitt arbeid, samt å fungere som et flytende hotell for teknikerne og mannskap. En SOV er designet og utstyrt i henhold til spesifikke behov og driftsforhold ved havvindmølleparken. SOV spiller en kritisk rolle i å opprettholde en effektiv drift av havvindmølleparker og minimere nedetid på turbinene.

Egenskaper på en SOV er noe varierende ut ifra spesifiserte kundekrav og driftsforhold, men en typisk SOV inkluderer:

- Dekkutstyr: Kraner, heiser og annet utstyr for lasting og lossing av personale og forsyninger. Gangvei, heiser og stiger for at teknikerne trygt skal nå vindturbinene.
- Dynamisk posisjonering: DP system som tillater fartøyet å bli værende på en bestemt posisjon uten å feste anker.
- Hotell/bolig areal: Lugarer, messe, oppholdsrom, treningsanlegg, garderober med mer, for teknikerne og mannskapet om bord.
- Sikkerhetsutstyr: Brannbekjempelsessystemer, redningsbåter/flåter og utstyr for å håndtere oljesøl.
- Helidekk: Plattform for helikoptertilgang. [2]

En vanlig arbeidssyklus for en SOV fra den forlater havnen til den returnerer tar 14 dager (kan variere ut ifra behov og værforhold.), og innebærer vanligvis:

- Havn: Lasting og lossing av utstyr og proviant, utskiftning av teknikere og mannskap (kan ha annen turnus enn teknikerne) og bunkring.
- Transit: Forflytning mellom havn og havvindmølleparken; tar vanligvis en dag å nå lokasjonen.
- På lokalitet: Dagen starter med en brief av teknikerne før dagsoperasjonen settes i gang; deretter vil SOV'en forflytte seg mellom turbinene for vedlikehold, før den avslutter ved å legge seg til ro for natten. En dag varer rundt 16 timer, med 8 timers opphold på nattestid.
- Transit: Forflytning tilbake til havnen.

Skipsdesign Z-4060 SOV-LNG

Sammenligningen tar utgangspunkt i Breeze sitt SOV design Z-4060 SOV-LNG. Dette er et design utarbeidet av Breeze hvor skipet er ment til å bruke LNG som energibærer. Valget av skip falt på Z-4060 SOV-LNG ettersom det er designet for bruk av LNG, men også fordi designet har stor plass på de to nederste dekkene og er tilrettelagt dersom man skal ta i bruk brenselceller, som vist i figur 4. Dette delkapittelet skal ta for seg skipets grunnleggende design og hvordan det kan rekonfigureres til å ta i bruk de alternative energibærerne som er beskrevet i kap. 2.3.2 - 2.3.4, med utgangspunkt i gjeldende reguleringer. Dimensjonene til Z-4060 SOV-LNG er vist under.

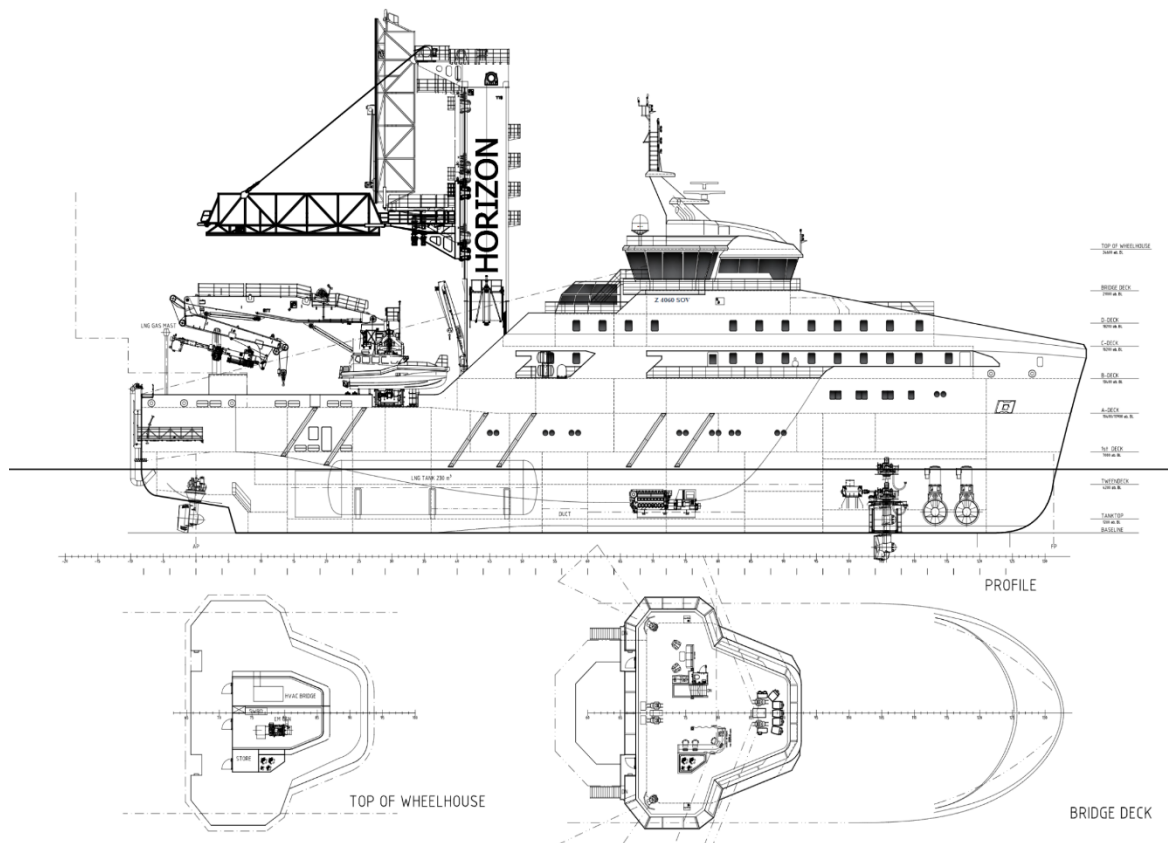
Z-4060: Informasjon	
Skipets levetid (År)	25
Fart (knop)	10
Skipets lengde (m)	86,8
Skipets bredde (m)	19
Skipets dybde til første dekk (m)	7
Oppdragssyklus (Dager)	14

Tabell 1: Informasjon Z-4060

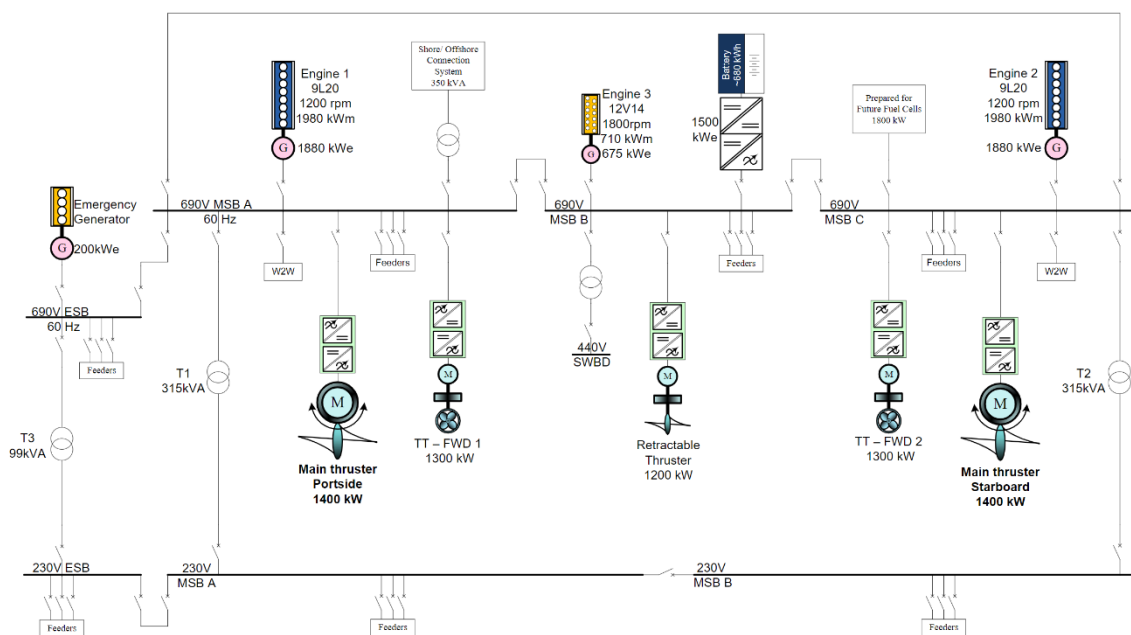
SOV - Energiforbruk					
Modus	Forbruk (m ³ /dag)	Forbruk kW	Prosent av drift	Tidsforbruk, prosent (timer)	Snitt pr dag (kWh)
Transit	8,9	1301,63	7	1,68	2186,73
Port	0,0	0,00	2	0,48	0,00
DP	4,8	702,00	48	11,52	8087,04
DP Transit	4,7	687,38	14	3,36	2309,58
Standby	3,5	511,88	25	6,00	3071,25
Waiting on weather	2,0	292,50	4	0,96	280,80
Sum	23,9		100	24,00	15935,40

Tabell 2: Energiforbruk SOV

Z-4060 SOV-LNG er konsept design tegnet av Breeze Ship Design, for en SOV som bruker LNG som energibærer. I likhet med Diesel-elektriske skip leverer motorene her elektrisk strøm som driver propellen og øvrige systemer, uten en direkte mekanisk kobling. Dette tillater den relativt enkle implementeringen av andre energibærere siden man kun har et behov for å generere den samme strømmen. Ellers fungerer skipet relativt likt i drift. Uten fundamentale endringer kan motorene byttes ut med brenselceller eller batterier.



Figur 3: SOV designtegning



Figur 4: Koblingsskjema. Tilrettelagt for brenselceller

2.2 Regulering

Norge og Miljødirektoratet har svart på FN's klimamål ved å lage en liste over 24 klima- og miljømål som blir målt ved hjelp av 82 miljøindikatorer. De 24 målene er delt inn i seks kategorier: Naturmangfold, Kulturminner og kulturmiljø, Friluftsliv, Forurensing, Klima og Polarområdene. Det er spesielt punkt 5.-klima som vil være aktuelt å se på i henhold til dette prosjektet og disse punktene er i stor grad forankret i Lov om klimamål (Klimaloven). Klimaloven ble kunngjort den 16.06.17 og trådte i kraft den 01.01.18 [3]

Miljømål 5.3 sier at "Norge skal være klimanøytralt i 2030" og at målet kan nås gjennom nasjonale tiltak, EUs kvotemarked, internasjonalt samarbeid om utslippsreduksjoner, kvotehandel og prosjektbasert samarbeid. [4] Dette målet er delvis forankret i klimalovens §3 som forteller oss at klimagassutslippene skal reduseres med minst 50% fra utslippsnivået i 1990 innen 2030.

Miljømål 5.4 sier "Norge har lovfestet et mål om å bli et lavutslippssamfunn i 2050". [5] I klimaloven har Klima- og miljødepartementet fastsatt et lovfestet mål (§4) om at klimagassutslippene i 2050 reduseres med 90-95% fra utslippsnivået i referanseåret 1990.

Dette er ambisiøse målsetninger som er satt for å kunne oppfylle Paris-avtalens mål om en maksimal gjennomsnittlig økning i temperatur på 2°C før århundret er over. Alle landene som har skrevet under på denne avtalen har også som utgangspunkt å være klimanøytrale en gang mellom 2050 og 2100. [6] Reduksjon av klimagassutslipp i norsk industri vil dermed være helt avgjørende for å innfri målsettingen i Paris-avtalen.

Når man skal drive med skipsfart og alternative drivstoff er det mange nasjonale og internasjonale regelverk som må følges. Det finnes flere internasjonale konvensjoner som regulerer konstruksjon og utrustning til skipene, miljø- og klimautslipp og arbeiderenes leve- og arbeidsvilkår. [7] Ingen land er i utgangspunktet lovpålagt å følge disse konvensjonene og reglene, men de blir ofte brukt som utgangspunkt for nasjonale lovgivninger. Dersom en konvensjon blir ratifisert av Norge, har vi som plikt å implementere den inn i lovverket.

International Maritime Organization (IMO) er FN's hovedorgan for internasjonal regulering av sjøfart. IMO ble først og fremst etablert for å øke sikkerheten til sjøs. Ettersom skipsfart er en internasjonal bransje, innså man at det ville være gunstig med en felles manual for operasjoner til sjøs. Generalforsamlingen består av alle medlemslandene og er IMO's hovedorgan. Rådet er IMO's utøvende organ og består av 40 medlemsland. Norge har vært medlem av Rådet siden starten og har derfor et større ansvar innenfor IMO. [7] IMO består også av mange forskjellige komiteer, konvensjoner og

koder, ikke alle er sentrale for denne oppgaven. Videre skal de aktuelle komiteer, konvensjoner og koder redegjøres for.

Maritime Safety Committee (MSC) er hovedkomiteen til IMO. MSC tar for seg alle saker som omhandler sikkerhet når det kommer til tekniske og operasjonelle forhold, dette inkluderer, men er ikke begrenset til skipsdesign, brannsikkerhet og stabilitet. [7] Maritime Environment Protection Committee (MEPC) tar for seg miljøspørsmål under IMO sitt ansvarsområde. Dette inkluderer kontroll og forebygging av forurensing fra skip.

The Safety of Life at Sea Convention (SOLAS) har som hovedmål å øke sjøsikkerheten ved å fastsette et minimumskrav for konstruksjon, utstyr og drift av skip. Videre må skipene være sertifisert for å bevise at de innfrir kravene som stilles i SOLAS reguleringer. The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) er den neste aktuelle konvensjonen. MARPOL er det viktigste regelverket innen skipsfart som dekker miljø og forurensning. Regelverket i MARPOL tar blant annet for seg forurensning som kommer av den daglige driften, samt forurensning som følge av uhell fra skip. MARPOL inneholder blant annet seks vedlegg, hvor vedlegg seks (Annex VI) er mest relevant da den omhandler grenser for utslipp, krav til forbrenningsovner og kvalitet på bunkersolje.[7]

Under SOLAS er det utarbeidet koder som “*The international Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk*” (IGC). [8] og “*International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels*” (IGF). [9] Disse kodene fungerer som en internasjonal standard for konstruksjon av skip som bruker flytende gasser eller lettantennelig drivstoff. Målet med kodene er å beskytte og ivareta sikkerheten til skipet, mannskapet og miljøet ved å forebygge lekkasjer, brann og eksplosjoner. “*The International Safety Management Code*” (ISM) har som formål å være en standard for sikkerheten og utslipp under selve operasjonen av skipet. [10]

Det Norske Veritas (DNV) er et konsern stiftet i 1864 som driver virksomhet innen skipsklassifisering, sertifisering, rådgivning, inspeksjon, forskning og utvikling. [11] DNV tar utgangspunkt i IMO sine reguleringer og retningslinjer når de utvikler sine håndbøker og er en viktig kilde til informasjon gjennom denne analysen.

2.3 Energibærere

Nåværende energibærere innen skipsfart er i stor grad basert på hydrokarboner. Andelen hydrogen/karbon har stor betydning for drivstoffets effektivitet og utslipp, der en høyere andel hydrogen vil øke effektiviteten og minske utslippene av for eksempel CO₂. Dette var en av de store pådriverne for å bytte fra HFO til LNG, og tidligere fra kull til olje. [12] For å vurdere hvilket fremdriftssystem som er best egnet for drift av fartøyet må det gjennomføres teoretiske analyser av hvert enkelt drivstoff, for deretter å sammenligne det med det nåværende diesel-elektriske systemet. Det diesel-elektriske systemet vil altså være en “baseline” for sammenligning. Diesel-elektriske systemer er grundig utarbeidet og fungerer med lite problemer og har en sterk infrastruktur rundt produksjon og tilgjengelighet.

For å kunne gjennomføre en grundig vurdering og sammenligning av energibærerne er det viktig å tilstrekkelig informasjon om energibærerne som tas i bruk. Det er nødvendig å forstå den kjemiske oppbyggingen til drivstoffet da dette påvirker utslipp, men også muligheter for lagring og bunkring. Videre er drivstoffets energiinnhold og virkningsgrad er viktige faktorer som må tas høyde for i vurderingen. Hvordan drivstoffet produseres er også en viktig faktor, da det ikke kan regnes som et “nullutslippsdrivstoff” dersom produksjonen av drivstoffet fører til utslipp.

2.3.1 Marine Diesel Oil - MDO

Marin dieselolje (MDO) er en generell beskrivelse for marine drivstoff som er en blanding av destillater ofte satt sammen av marin gassolje (MGO) og tung fyringsolje (HFO). Marin dieselolje kan ligne på den dieselen som for eksempel biler og lastebiler bruker på land, men har en høyere tetthet og er ikke et rent destillat, som i motsetning til den vanlige pumpe-dieselen. For å kontrollere de forskjellige blandingsforholdene for marin dieselolje, kan man for eksempel blande ferdige marine brensler eller kontroll av direkte prosesser i raffineriet [13].

Tekniske spesifikasjoner for MDO:

- Flash Point (flammepunkt): 62 °C
- Maksimal tetthet: 900 kg/m³ @ 15 °C
- Maksimalt svovelinnhold: 2 % [14]

Produksjon

Marin dieselolje er som tidligere nevnt en blanding av destillater fra råolje, men tilhører den nedre delen av raffineringprosessen (MGO, MDO, HFO & restolje). Råoljen blir destillert ved at oljen blir varmet opp og fordampet for å separeres fra tunge til lette petroleumsdestillater. For å produsere mer drivstoff etter raffineringen behandles restoljen videre. Den tyngre og sure restoljen behandles med en “coker” (for den tyngste oljen) og/eller en katalytisk “cracker” (for den middels tunge oljen). De varmer opp og bryter oljen ned til lettere oljer som MDO og MGO som raffineres ut. MDO består generelt av en

blanding av destillat (MGO/MDO), og HFO (tyngre), og kan dermed inneholde spor av raffineriråstoff fra gjenværende HFO [14],[15].

Lagring

MDO lagres om bord i skipet i egne skott i skroget, på lik måte som vann og ballast. Drivstoffet kan på den måten brukes til ballastering etter behov. Tankene må være tilgjengelig for vedlikehold ettersom at forurensninger og mikroorganismer kan forurense tanken.

Hovedutfordringene rundt lagring av marin diesel er:

- **Vann**

Flere faktorer kan bidra til at vann og fuktighet bygger seg opp i drivstoffet. Luftfuktighet, kondens på tankvegger grunnet temperaturforskjell, lekkasjer og bevegelser i skipet. Over tid, spesielt med lav utskiftning av drivstoffet, vil dette kunne bygge seg opp til problematiske nivå. Det kan bidra til rust og effekttap. Potensielt viktigere er faren for bakterievekst i sjiktet mellom vannet og drivstoffet. Det kan produsere biomateriale som kan sette seg i maskineriet.

- **Sediment**

Over tid kan sedimenter bygges opp i tankene fra rusk og partikler i drivstoffer, rust og flak fra rør eller støv fra dårlig ventilasjonsfiltrering. Dette kan fysisk påvirke rør og maskineri om større ansamlinger løsner.

- **Katalytiske finstoffer**

Katalytiske partikler og finstoffer oppfører seg likt øvrige sedimenter, men er mer tilbøyelig til å løse seg i vanninnhold. [16]

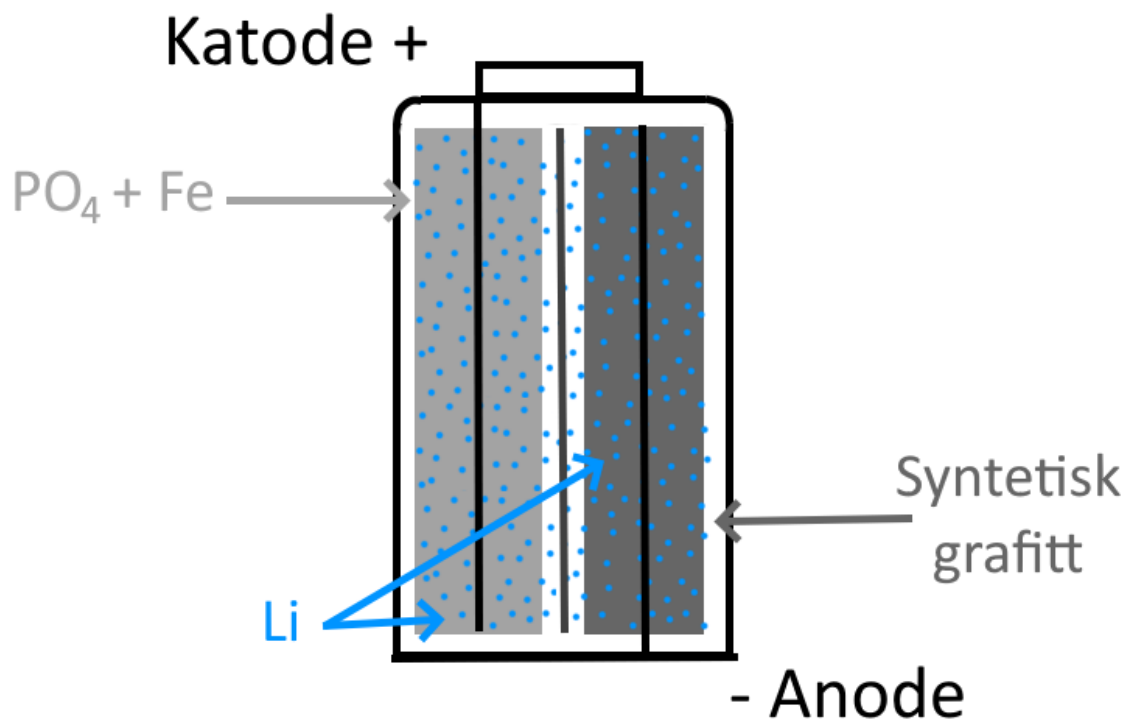
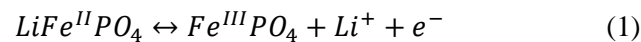
2.3.2 Batteri

Batterier generelt baserer seg på en anode og en katode, samt en elektrolytt. Cellen har en ubalanse i den potensielle spenningen fra den negative anoden (overskudd av elektroner) til den positive katoden (underskudd av elektroner). Forskjellen i ladningen på disse to elektrodene danner grunnlaget for spenningen til battericellen. Ubalansen jevnes ut ved elektrolytten som binder sammen elektrodene for å tillate ladede ioner å passere mellom sidene, og den elektriske kretsen som fører elektroner fra anoden til katoden. På veien fra anoden til katoden kobler man på alt som skal drives av strømmen, om det så er en lyspære, en elektrisk tannbørste eller et elektrisk offshore serviceskip [17].

Batteripakken leveres av Corvus energy. Blue whale systemet deres er tilpasset større skip og leveres som utskiftbare moduler som tillater vedlikehold og oppgradering uten store inngrep. Blue whale er et LFP batteri (Lithium Iron Phosphate) som gir økt sikkerhet sammenlignet med et ordinært litiumbatteri. Et jernbasert litiumbatteri reduserer også utslippene knyttet til utvinning av for eksempel kadmium og nikkel. Totalt kan det gi en reduksjon av produksjonsutslipp på over 40%. [18]

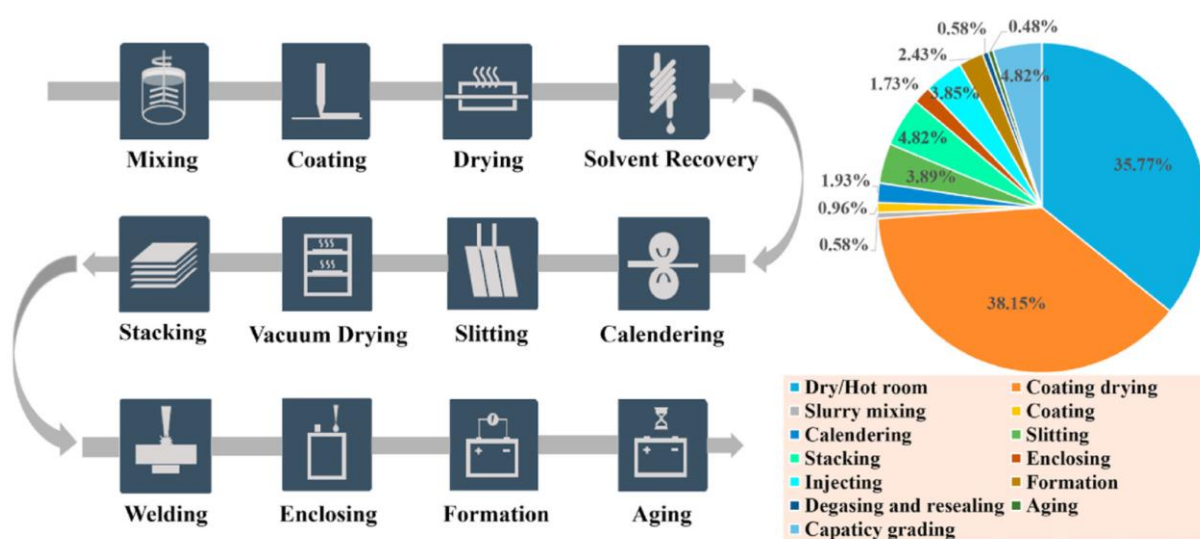
Katoden brukt i LFP-batterier er LiFePO_4 , som ikke har den samme tendensen som den tradisjonelle LiCoO_2 til å frigi oksygen ved ukontrollert oppvarming. Oksygenfrigjøring og varme skaper forbrenning og akselererer prosessen. Dette kalles «thermal runaway» og er grunnen til katastrofale batteribranner. Med LiFePO_4 -katoder reduseres denne risikoen. [19] Ulempen med jernbaserte katoder har vært at de har lavere konduktivitet og dårligere evne til å diffundere ioner gjennom materialet. Dette har blitt løst ved å redusere størrelsen på partikler som også tildekkes med ledende materialer som karbon-nanorør. Anoden i tradisjonelle batterier består gjerne av petroleumsprodukter, men er her erstattet med syntetisk grafitt [20].

Reaksjonsligningen ser slik ut:



Figur 5: LiFePO battericelle

Selve produksjonen involverer flere energikrevende prosesser for behandling av råmaterialet og så produksjon av battericellene. Energiforbruket for de ulike stegene kan se slik ut:

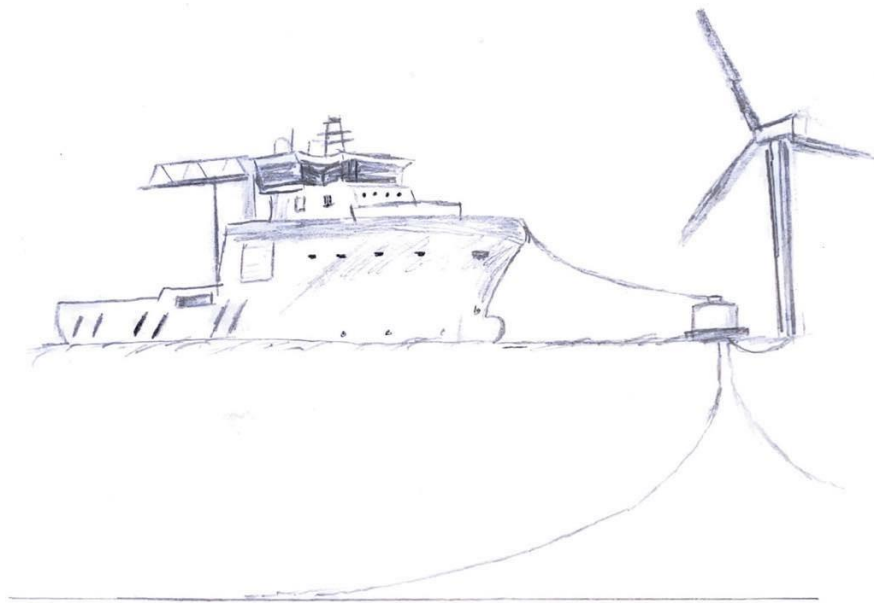


Figur 6: Utslipp ved batteriproduksjon [18]

Battericellene produseres av egne aktører og settes sammen til batterimoduler av Corvus. 100kWh tilsvarer 20 moduler. Cellene pakkes to og to slik at dersom thermal runaway oppstår, altså at en celle tar fyr, vil dette kun spre seg til en ekstra celle.

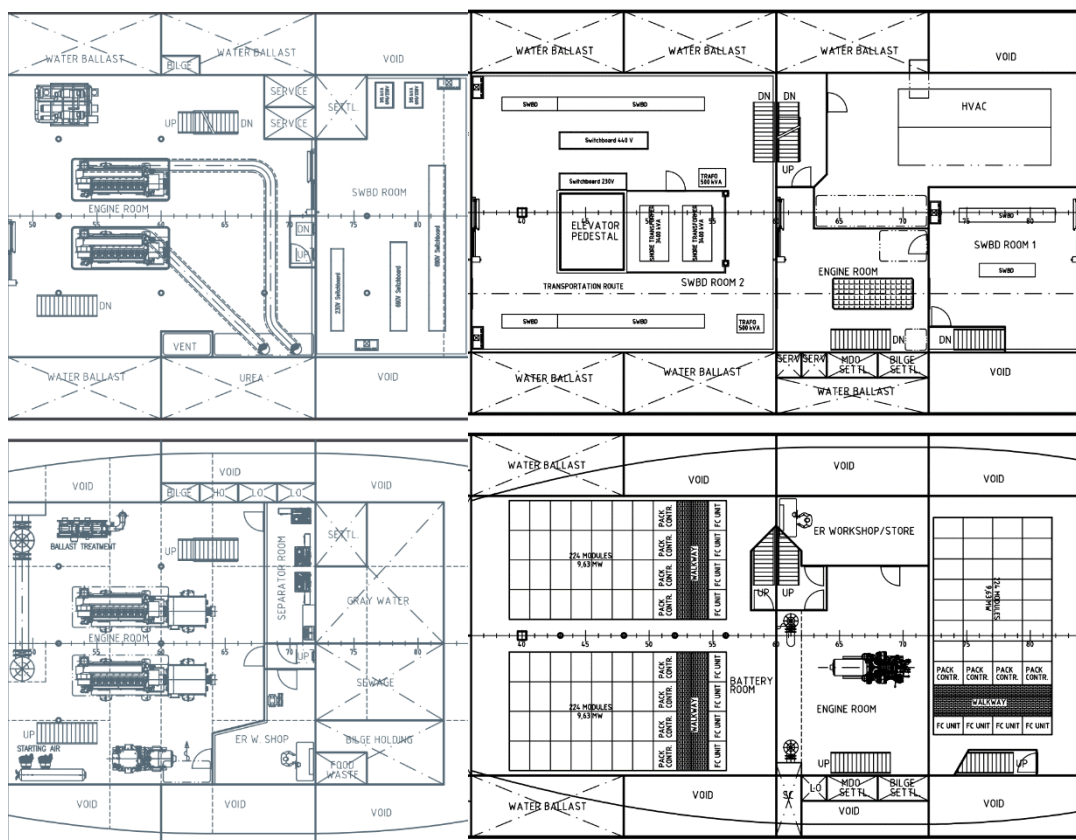
Den komplette batteripakken dimensjoneres etter bruksmønsteret for å kunne garantere tilstrekkelig kapasitet i 10 år, men batteriet er forventet å kunne vare ut skipets levetid (20-25 år) med vanlig vedlikehold. Når batterimodulene ikke lenger leverer den nødvendige kapasiteten, kan de anvendes til energilagring i bygg. Batteriene er oppgitt fra Corvus til å være 99% resirkulerbare. [21]

Batteridrift offshore er utfordrende på grunn av den relativt lave energitettheten i batteripakker sammenlignet med andre drivstoff. Offshore operasjoner krever gjerne drift over lengre tid, som for eksempel rundt to uker for en typisk SOV. En SOV står derimot i en spesielt gunstig situasjon for implementering av batteridrift siden skipene går mesteparten av tiden mellom vindturbiner. Vindmølleparker har nødvendigvis et utarbeidet strømnnett for å kunne levere strøm inn til land via en transformatorplattform, og dermed også ut til vindmølleparken ved behov. Med et ladesystem kan dermed batteriet lades hver natt uten behov for å forflyttes over lengre avstander.



Figur 7: Offshore ladeløsning

Hovedmotorene til diesel-halvbroen byttes ut med store batteripakker, som gir tilstrekkelig kapasitet til å kjøre helelektrisk. Man vil fremdeles ha tryggheten fra dieselgeneratoren dersom en ikke får ladet på grunn av vær eller sviktende teknikk.



Figur 8: Maskinrom diesel-elektrisk vs. batteri.

2.2.2.1 Maersk Stillstrom

Maersk Stillstrom baserer seg på en frittstående forankret enhet hvor skipet kan koble seg til. Styren til Stillstrom er at den tillater skipet å forankre via ladebøyen og dermed slippe å bruke DP. Det sparer energi under lading, siden det tillater at all strømmen går til lading og ikke motorkraft. Den relativt store ladeenheten og forankringsbehovet gir noe høyere kostnad, dog uten offentlige spesifikke priser [21]. På grunn av forankringen og funksjonaliteten til Stillstrom må den plasseres utenfor vindparken. Skipene må dermed reise litt for å lade, som koster både tid og energi. Det minimerer besparelsen ved forankring, men lander totalt sett i pluss.

2.2.2.2 VARD Oceancharger

Vard designer og bygger både skip og andre maritime installasjoner, og har i samarbeid med flere aktører ledet prosjektet "Ocean Charger". Ocean charger ladeløsningen baserer seg på en mindre bøye plassert tettere på vindmøllene. Løsningen fordrer bruk av DP under lading, og tillater ikke lading under like røffe sjøforhold. Man er avhengig av å ha to tilkomstretninger avhengig av vind og sjøforhold. Systemet er billigere å konstruere og vedlikeholde enn Maersk Stillstrom, men heller ikke her er konkrete priser tilgjengelig. Ocean charger kan monteres på eksisterende infrastruktur for å kutte kostnader og installasjonstid. Kapasiteten til systemet er rundt 20MWh på 4 timer.

2.2.2.3 MJR Power

MJR Power er et Britisk selskap som leverer ulike marine løsninger. Deres ladeløsning baserer seg på et system montert til vindmøllene og firer ned ladekabelen til skipet. Systemet tillater ikke forankring av båten og krever konstant DP-input. MJR power sitt system er primært utviklet mot eCTV, altså elektriske mannskapsfartøy av mindre størrelse. Deres system sikter mot å kunne lade en 2MWh batteripakke på under en time. [22] Det vil i sin nåværende form ikke være tilstrekkelig til å lade de nødvendige ~20 MWh en SOV trenger.

2.3.3 LNG

LNG står for “Liquefied Natural Gas” og er en naturgass som er gjort flytende ved hjelp av å nedkjøle gassen. LNG består hovedsakelig av metan og det lages av tørrgass, som er en vanlig betegnelse for naturgass bestående hovedsakelig av metan (CH_4) og eventuelt noe etan (C_2H_6). Volumet til LNG gassen reduseres med en faktor på omtrent 600 når den blir kondensert om til væskeform og kan som følge av dette bli fraktet over større avstander uten å være avhengig av god infrastruktur på gassrør og lignende. Som naturgass, er LNG regnet som miljøvennlig, men ikke like brukervennlig som for eksempel diesel eller petroleum. [23] [24] Energitettheten er også lavere, som blir spesifisert under:

- Energitetthet: 20 - 22 MJ/l
- Massetetthet: 0,4 - 0,5 kg/l
- Nedre brennverdi: 45 MJ/kg
- Koepunkt: $-161,4\text{ }^\circ\text{C}$

2.2.3.1 Produksjon

LNG blir produsert over hele verden og det meste av det går til eksport. Gassen som blir matet inn i LNG-anlegget skal filtreres for vann, karbondioksid (CO_2) og hydrogensulfid (H_2S), men også eventuelt tyngre hydrokarboner som etan (C_2H_6), propan (C_3H_8) og butan (C_4H_{10}). Disse gasskomponentene blir dermed rensert bort i ulik grad fra den opprinnelige gassen og der etter kjølt ned til under normalkoepunktet på $-161,4\text{ }^\circ\text{C}$ for å kunne fraktes videre. [23]

2.2.3.2 Lagring

LNG gass lagres og fraktes i nedkjølt tilstand og har egne skip som er konstruert for akkurat denne oppgaven, slik at den kan bli fraktet rundt om hele verden. LNG er luktfri, fargeløs, ikke korrosivt, ikke giftig og veier rundt 45% mindre enn vann. På grunn av at LNG som oftest består av minst 85 % metan, vil dette sammen med de andre egenskapene føre til flere ting å tenke på når man skal se etter alternativer for lagring. Den vanligste måten å lagre LNG på, er i større volumer, over bakken i lavtrykkstanker (mindre enn 0,345 bar trykk). Tankene er konstruert med en ytre tankvegg laget av karbonstål og en indre tankvegg laget av nikkelstål. Grunnen til at nikkelstål blir brukt som indre tankvegg istedenfor vanlig stål, er på grunn av at vanlig stål er for sprøtt til å klare å stå imot den direkte kontakten med LNG sine kryogeniske egenskaper. Den indre og ytre tanken separeres med et stort og tykt teppe av isolasjon for å holde på de kryogene temperaturene. Ved lagring av LNG i mindre tanker er det vanlig å bruke høyere trykk sammen med vakuumpappede tanker med doble vegger der den indre tankveggen er laget av aluminium. Disse tankene er vanligvis mindre enn rundt 265 m^3 og med trykk opp til rundt 17 bar. Det er også mulig å legge til en tredje ytre tankvegg laget av betong, for å få en større inneslutning og bedre isolasjonsgrad. [25]

2.3.4 Hydrogen

Hydrogen er det første grunnstoffet i periodesystemet og inneholder kun ett elektron og ett proton. Det er også det vanligste grunnstoffet i universet, hvor hele 90% av alle atomer er hydrogenatomer. Det meste av hydrogenet på jorden er bundet opp i vann med den kjemiske formelen H_2O . For å bruke hydrogen som energibærer trenger man hydrogengass (H_2) i ren form. [26] Hydrogen har et brennbarhetsområde i luft fra 4-77%, noe som betyr at gassen er svært brennbar og kan være eksplosiv. Hydrogengass er i tillegg en luktfri, ugiftig og usynlig gass, noe som gjør det vanskelig å oppdage eventuelle lekkasjer. [12]

- Energitetthet: 8,5 MJ/liter
- Spesifikk energi: 119,9 MJ/kg
- Kokepunkt: $-252,87\text{ }^\circ\text{C}$ [27]

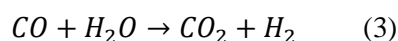
2.2.4.1 Produksjon

Det er mange måter å fremstille hydrogen til bruk som energibærer. De forskjellige kategoriene er inndelt i fargekoder som gir informasjon om produksjonsmetoden og bærekraftighet. Det finnes en hel rekke forskjellige kategorier hvor ikke alle er like relevant.

Dampreforming er den vanligste formen for hydrogenproduksjon og står for om lag 68% av verdens hydrogenproduksjon. [28] Metoden blir brukt for å produsere hydrogen av lette former for hydrokarboner slik som naturgass eller propan. [29] Produksjonsprosessen består av to trinn. Først reagerer hydrokarbonene med vanndamp i nærheten av en nikkelkatalysator ved rundt 800°C . [29] Nikkelkatalysatorens jobb er å øke hastigheten på reaksjonen, uten at den kjemiske likevekten endres. Dersom man tar utgangspunkt i naturgass (CH_4), vil man få en reaksjonsligning som ser slik ut:



Neste trinn kalles for vann/gass skiftreaksjon og går ut på å omdanne karbonmonoksid (CO) og vann (H_2O) til hydrogen (H). [28] I denne reaksjonen tar man i bruk en ny katalysator (kobber eller jern) samt at temperaturen reduseres til rundt 500°C . [29] Man vil da få reaksjonsligningen:

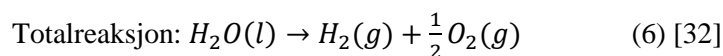
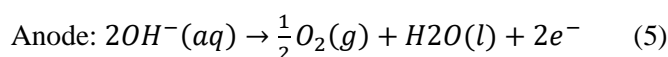
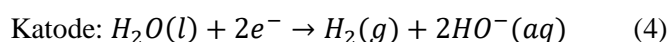


Etter det siste trinnet sitter man igjen med karbondioksid og hydrogen. Dette kalles “grått hydrogen” og regnes ikke som et lavkarbondrivstoff. [30] Dersom det skal regnes som “blått hydrogen” og som et

lavkarbondrivstoff må man fjerne karbondioksidet fra hydrogenstrømmen. Dette kan gjøres ved hjelp av CCS-teknologi (Carbon Capture and Storage). Dampreforming som metode for å produsere hydrogen vil ha et energitap på mellom 20-30% ved bruk av naturgass. [29]

Elektrolyse er en måte å produsere hydrogen ved å skille hydrogen og oksygen i vann ved hjelp av elektrisitet. Det finnes flere muligheter for hydrogenproduksjon ved hjelp av elektrolyse. De mest vanlige og utviklede metodene er alkalisk elektrolyse og proton elektrolytt membran elektrolyse (PEM) [28] men fastoksid brenselcelle (FOBC) er også mye brukt i dag.

Alkalisk elektrolyse er den formen for elektrolyse som har blitt brukt lengst i kommersiell sammenheng i Norge. Norsk Hydro begynte med alkalisk elektrolyse allerede i 1927, noe som gjør at teknologien er godt utredet og testet. Fordelen er at de er billige, driftssikre og krever minimalt med vedlikehold. [31] Metoden fungerer ved å plassere en positivt ladet anode og negativt ladet katode i en elektrolyttløsning med en membran imellom. Når elektrisk strøm sendes gjennom løsningen vil vannmolekylene spaltes til hydrogen- og oksygen-gass. Det kjemiske reaksjonen blir som følge:



Denne prosessen produserer hydrogen med svært høy grad av renhet og er derfor godt egnet som energibærer. [28]

2.2.4.2 Lagring

En av hovedutfordringene til bruk av hydrogen som energibærer er mulighetene for lagring. Hydrogen må komprimeres (C-H₂) eller gjøres om til flytende hydrogen (L-H₂) for å kunne brukes effektivt som energibærer. Dette gjøres for å øke den volumetriske tettheten til hydrogen som er forholdsvis lav. Generelt sett blir hydrogen lagret på 350 og 700bar. Dersom hydrogenet skal lagres som en flytende væske, må den kjøles ned til -253°C [12]. Dersom man lagrer hydrogenet i en trykksatt kryptank vil hydrogenet holde seg flytende opp til -240°C. [33] Det er også mulig å lagre hydrogen i faste stoffer ved å danne et metallhydrid, men dette vil være dårlig egnet for bruk i skipsfart og vil derfor ikke bli diskutert videre.

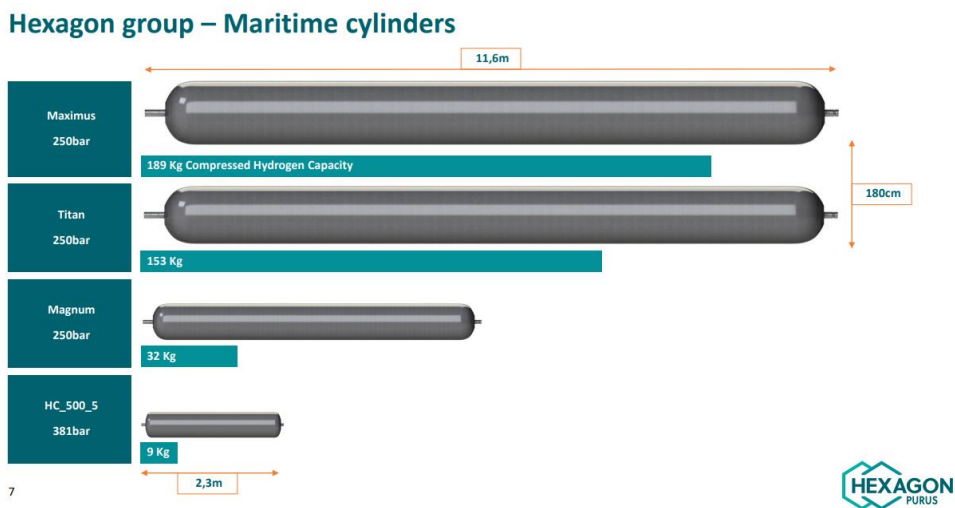
Komprimert hydrogen er den mest utbredte og utviklede formen for hydrogenlagring. Det er mulig å lagre hydrogen ved forskjellig trykk, men lagring ved 350- og 700bar er det mest relevante å vurdere i forbindelse med denne analysen [34].

Tanker for lagring av hydrogen er delt inn i fire ulike kategorier:

- I. Metall beholdere
- II. Bærende metall liner med kompositt omslag
- III. Ikke-bærende metall liner med kompositt omslag
- IV. Fullstendig kompositt konstruksjon [34] [35]

Tank type I og II er de mest vanlige å bruke for å lagre hydrogen ettersom produksjonskostnadene er lavere enn for type III og IV. [34]

Type III og IV er dyrere og mer avansert å produsere, men til gjengjeld tåler de høyere trykk og veier mindre. [35] Det vil være mest aktuelt for oppgaven å se på type III og IV ettersom det er behov for et høyt lagringstrykk for å oppnå høyest mulig energitetthet. Hexagon Purus vil være en mulig leverandør av denne typen tanker. Hexagon Purus er en ledende aktør innen hydrogen systemer og kan levere type IV beholdere beregnet for maritim bruk.



Figur 9: Type IV sylindre fra Hexagon Purus

Deres Maximus sylinder kan romme 189kg komprimert hydrogen. Disse sylindrene kan stables oppå hverandre slik som vist i Fig 10, hvor det da blir fire Maximus sylindre pluss fire Magnum (32kg C-H₂) sylindre per container. Dette gir totalt 884kg komprimert hydrogen per container. En standard 40 fot container har dimensjoner som vist i tabellen under: [36]

40 ft container	Dimensjon i meter
Lengde	12.19 m
Bredde	2.44 m
Høyde	2.59 m
High cube høyde	2.89 m

Tabell 3: Dimensjoner på en 40 fot container



Figur 10: Eksempel på stabling av hydrogensylindrer

Flytende hydrogen er en lagringsmulighet som øker den volumetriske lagringskapasiteten for hydrogen til rundt 70kg/m^3 , tilsvarende $2,31\text{MWh/m}^3$. Det er også mulig å lagre flytende hydrogen i omgivende trykk, noe som tillater bruk av større tanker enn ved lagring av komprimert hydrogen. [34] Men denne formen for lagring er teknisk krevende og må derfor vurderes nøye. Flytende hydrogen har et kokepunkt på -253°C , som gjør at lagringsprosessen blir svært energikrevende (inntil 30% av nedre brennverdi). [35] Ved bruk av større kryogeniske tanker oppstår også problemet med “boil-off gas”. Dette er gass innad i tanken som oppstår ved at hydrogenet fordampes som resultat av temperaturforskjeller mellom det flytende hydrogenet og dets omgivelser. Ved lagring av flytende hydrogen er det viktig at “boil-off raten” holdes til et minimum for å unngå oppbygging av trykk innad i tanken, samt energitap. [34] Dette problemet kan bedres ved å bruke ekstremt godt isolerte tanker, men det vil alltid være noe varmeutveksling med omgivelsene uansett. Videre er det viktig å installere sikkerhetsventil og trykkavlastingssystemer på tanken. [35]

Det finnes ingen leverandør av flytende hydrogen fra Norge i dag. Dersom man skal drifte et skip på flytende hydrogen avhenger det pr dags dato av leveranser fra Linde i Tyskland, som er løsningen ved fergen «M/F Hydra». Fergen får levert en lastebil med 3 tonn hydrogen hver 3. uke [37].

Flytende organiske hydrogenbærere (LOHC)

Det siste alternativet for hydrogenlagring er å binde hydrogen i LOHC/olje, nærmere bestemt benzyltoluen. [38] Ved hjelp av kjemiske forbindelser kan man oppbevare hydrogen oppløst i olje, som også oppfører seg som olje. Hydrogen løses i bæreren under trykk og varme, og oppbevares under normale omgivelser. For å friggi hydrogen varmes bæreren opp under vanlig trykk, og forbindelsen til hydrogen brytes. Reaksjonen skjer etter følgende formel:



Det gir lavere energitetthet sammenlignet med MDO, men en betydelig forbedret energitetthet sammenlignet med trykktanker eller flytende hydrogen. Eksplosjonsfaren reduseres betraktelig siden hydrogenet er bundet i olje, og vil saktere frigis til luften ved en lekkasje. Det skal dermed mer til å oppnå eksplosive konsentrasjoner i luften [40].

Energitettheten til hydrogen i LOHC er $6,84\text{ MJ/liter} = 1,9\text{ MWh/m}^3$

2.3.5 Ammoniakk

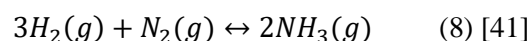
Ammoniakk egner seg godt til å være en av fremtidens grønne energibærere med at den er karbonfri og slipper ikke ut CO₂ under forbrenning, og på grunn av sitt høye innhold av Hydrogen. Det er en fargeløs gass som består av tre hydrogenatomer og ett nitrogenatom, med det kjemiske symbolet NH₃. Ammoniakk opptrer som en gass i vanlig romtemperatur og trykkforhold, men i motsetning til hydrogen, kan ammoniakk gjøres flytende ved hjelp av kondensering og fylles rett på tanker. Det er mange muligheter for å omdanne ammoniakk til nyttbar energi, der en av dem er å bruke ammoniakken som en hydrogenkilde. Men man kan også bruke ammoniakk direkte eller indirekte i for eksempel brenselceller, forbrenningsmotorer eller turbiner, som gjør at den kan fungere som drivstoff på skip, tog, biler og i industrielle prosesser. I skipsfarten kan bruken av ammoniakk være veldig aktuelt på grunn av sin evne til å kunne lagres over lengre tid med en høy energitetthet. For flytende ammoniakk, er:

- Energitettheten: 12,7 MJ/Liter
- Spesifikke energi: 18,6 MJ/kg
- Kokepunktet: -33,4 °C [27]

2.2.5.1 Produksjon

I likhet med hydrogen finnes det flere måter å fremstille ammoniakk. De forskjellige fremstillingsmetodene for ammoniakk er også kategorisert i fargekoder som forteller noe om produksjonsmetoden og bærekraftighet. Det er to former for fremstilling som skal vurderes; Haber-Bosch metoden og elektrolyse.

Haber-Boch metoden er den vanligste formen for produksjon av ammoniakk. H-B-metoden baserer seg på å konvertere naturgass som for eksempel metan til hydrogen ved hjelp av dampreforming, som videre blir blandet med nitrogen. [41] Trykk og temperatur er viktig i denne prosessen da reaksjonen skjer under volumkontraksjon og varmeutvikling. [42] opererer vanligvis i området 325-600°C og 150-350 atm. med jern-basert katalysator. [41] [42] Reaksjonsligningen for H-B-metoden er som følge:



Denne metoden produserer grå ammoniakk, ettersom den bruker naturgass som kilde for hydrogen. Dersom man tar i bruk metoder for CO₂-fangst og lagring vil ammoniakken som produseres bli kategorisert som "blå ammoniakk" på samme måte som dampreformeringsmetoden for hydrogen som beskrevet i kap. 2.3.2.1. Om man vil ha grønn ammoniakk må man bruke grønt hydrogen fremstilt av

elektrolyse av vann ved hjelp av strøm fra fornybare kilder i kombinasjon med nitrogen hentet fra luft. Man vil da kunne bruke H-B-metoden til å fremstille grønn ammoniakk. [41]

2.2.5.2 Lagring

Lagring av ammoniakk byr på noen utfordringer, hvor hovedutfordringen er relatert til korrosjon. [43] Lagring og transport av ammoniakk i tanker skal etter IGC-koden kun gjøres i godkjente, frittstående tanker som ikke er en del av skipets skrog. Disse tankene er klassifisert som type A, B og C. [44]

Spesifikasjonene til disse tankene står beskrevet i IGC kapittel 4 “Cargo Containment” under seksjon 6 “Tank Types”. [45] Ammoniakk kan lagres i romtemperatur ved trykk under ti atmosfærer og kan dermed transporteres i trykksatte tanker. Grunnet den lave spesifikke energien til ammoniakk trenger man en del lagringsplass, inntil 3 ganger plassen man trenger for å lagre dieselolje. [27] Dette kan også by på utfordringer dersom man skal bruke ammoniakk som energibærer på et skip da det er begrenset plass om bord i et skip.

2.4 Energikonvertering

Energikonvertering er en prosess hvor man omdanner energi fra en form til en annen. Ettersom SOV-en er avhengig av elektrisitet for å opprettholde sine funksjoner og fremdrift, trenger man en måte å omdanne den kjemiske energien i energibærerne til elektrisk energi. Dette kan gjøres ved hjelp av batteri, brenselceller eller forbrenningsmotorer. Dette delkapittelet skal redegjøre for ulike metoder for energikonvertering.

2.4.1 Forbrenningsmotor

Forbrenningsmotorer er den mest brukte formen for energikonvertering. Det finnes mange ulike former for forbrenningsmotorer, hvor det stilles ulike krav til brennstoff. Felles for de fleste forbrenningsmotorer er at forbrenningsgassene skyver et stempel eller turbinhjul for å omgjøre den kjemiske energien i brennstoffet til mekanisk energi. [46] Forbrenningsmotorer har også en uønsket effekt når det kommer til utslipp og forurensning, da de som kjent slipper ut stoffer som CO, CO₂, NO_x, SO_x samt svevestøv og andre miljø- og helseskadelige stoffer. Videre er det også en lite effektiv form for energikonvertering da effektiviteten ligger på rundt 20-40%. [12] En av hovedårsakene til den lave effektiviteten er varmetap ved forbrenning.

En “**Dual-fuel**” motor er en forbrenningsmotor som kan benytte seg av drivstoff i både flytende og gassform. Disse motorene bruker vanligvis diesel og naturgass, men kan også bruke andre energibærere slik som metanol, ammoniakk, biodiesel med mer. [47] Når motoren drives i “gass modus” opererer den som en ottomotor, mens den fungerer som en “vanlig” dieselmotor når den går på diesel. Byttet mellom de to modusene skjer sømløst uten at det har noe påvirkning på ytelsen, og motoren er designet slik at den har samme output uavhengig av hvilket drivstoff den opererer med. [48] Ettersom naturgass har mindre utslipp en tungolje så vil bruken av en dual-fuel motor redusere utslippene sammenlignet med en standard dieselmotor. Men det er viktig å notere seg at denne motoren ikke vil være noe nullutslippsmotor, men den vil ha mindre utslipp enn en standard dieselmotor. Det vil også være økonomisk gunstig med en dual-fuel motor som benytter naturgass kontra en standard dieselmotor da prisen er lavere og effektiviteten blir høyere. Både Wärtsilä og MAN Energy Solutions leverer dual-fuel motorer som kan kjøre på LNG og diesel.

Ammoniakk er en mulig energibærer å bruke i en dual-fuel motor, men det kommer med en del utfordringer. De mest åpenbare utfordringene går på ammoniakks korroderende egenskaper, lekkasjer og ufullstendig forbrenning. MAN Energy Solutions har i samarbeid flere partnere startet arbeidet med å lage en to-takts dual-fuel motor som kjører på ammoniakk med diesel som pilot-fuel og planlegger å ha den klar for kommersiell bruk i 2024. [49] Denne motoren vil ta i bruk rør med doble vegger hvor systemet vil være utstyrt med “sniffere” som kan oppdage lekkasjer mellom rørveggene. Dersom dette

oppdages, vil systemet automatisk gå over til diesel uten at det påvirker ytelsen. [50] Dersom man ikke oppnår full forbrenning av ammoniakken, kan dette by på problemer ettersom det i veldig stor grad er giftig. Det eksisterer metoder for å løse dette ved å filtrere eksosen gjennom vann. Dersom det er snakk om små mengder, kan det reduseres i en SCR. [50]

Hydrogen er også en mulig energibærer å bruke i en dual-fuel motor, men er nok mindre egnet enn andre alternative drivstoff slik som ammoniakk. Det vil derimot kunne lønne seg å blande inn hydrogen med andre brennstoff slik at forbrennings- og utslippsegenskapene forbedres. [51] MAN Energy Solutions har laget en V12 dual fuel hydrogen motor kalt MAND2862. En V12 motor er langt ifra det man trenger for å operer større skip som en SOV, men det beviser at det lar seg gjøre å bygge fungerende forbrenningsmotorer som benytter hydrogen. [52]

2.4.2 Brenselceller

Brenselceller er en innretning som benytter seg av en elektrokjemisk reaksjon for å produsere elektrisitet fra kjemisk energi. Den kjemiske energien kan komme fra blant annet hydrogen, LNG og ammoniakk. Så lenge en brenselcelle har kontinuerlig tilgang på drivstoff og oksygen vil den produsere elektrisitet. [43]

En av fordelene med å bruke brenselceller kontra en forbrenningsmotor er økt effektivitet. [53] Økt effektivitet vil ha stor betydning for kostnader og utslipp relatert til den daglige driften.

Det finnes mange ulike typer brenselceller, men designet på dem er relativt likt. De består vanligvis av en anode, katode og en elektrolytt. Det er som oftest valget av elektrolytt som navngir brenselcellen. [28]

Type	Temperaturspenn (°C)	Elektrolytt	Effekt	Energi-effektivitet*	Kapitalkost kNOK/kW _{el}	Levetid (tusen timer)	Modenhet	Anvendelse
Alkalisik brenselcelle	60 – 90	Kaliumhydroksid	Opptil 250 kW	60 - 70 %	1,7 – 6	5 – 8	Etablert, men for spesielle anvendelser	Romfart, ubåter
Polymer brenselcelle	50 – 90 (LT) til 180 (HT)	Polymermembran	500 W til 400 kW	35 – 70 %	Stasjonær: 25 – 35 Mobil: ~ 4 – 4,5	Stasjonær: 60 Mobil: 5	Tidlig marked, markedsledende	Transport, romfart, stasjonær, reservekraft
Fosforsyre brenselcelle	160 – 220	Fosforsyre	Opptil flere titalls MW	35 – 45 %	4 – 5	30 – 60	Moden, men lav produksjon	Produksjon av kraft og kraft+varme
Smeltekarbonat brenselcelle	600 – 700	Flytende karbonat	Fra noen få 100 kW til flere MW	65 – 70 %	4 – 6	20 – 40	Tidlig marked	Produksjon av kraft og kraft+varme
Fast-oksik brenselcelle	700 – 1000	Keramisk fast-oksik	Fra noen få 100 kW til flere MW	60 – 80 %	3 – 4	Opptil 90	Moden, økende produksjon	Produksjon av kraft og kraft+varme

Tabell 4: Oversikt over typer brenselceller

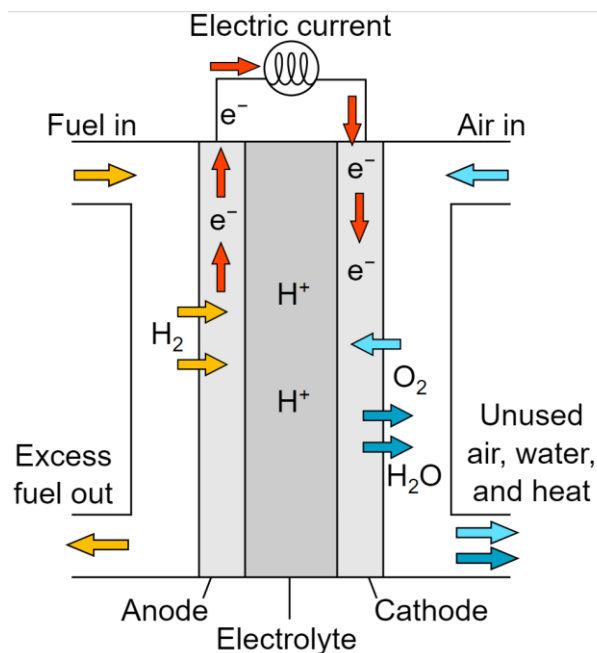
*Hydrogen til elektrisitet basert på lavere brennverdi for hydrogen. [28]

Da denne analysen baserer seg på energibærere til maritim bruk vil polymer brenselcelle (PEMBC) og fast-oksid brenselcelle (FOBC) være de best egnede brenselcellene. [53]

Polymer brenselcelle

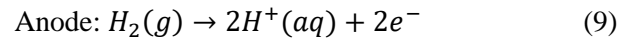
Polymer brenselcelle (PEMBC) ble først utviklet av NASA på 1960-tallet for deres romfartøy. De består grovt sett av en anode, elektrolytt og katode som er satt sammen til én svært tynn enhet. [54] Det finnes både "lav temperatur" og "høy temperatur" PEMBC (LT-PEMBC og HT-PEMBC). Prinsippet for begge typen PEMBC er det samme og hovedforskjellen er om de opererer under eller over 100°C. [55] Det er også andre forskjeller som hvilke membraner som blir brukt, toleranse for urenheter i hydrogenet og output med mer.

Forskjellige firma produserer forskjellige polymer elektrolytt membraner til bruk i LT-PEMBC, men det vanlige er å bruke en sulfonert fluorpolymer. Den mest kjente av disse er Nafion (®Dupont), og den blir sett på som en slags industri standard. [54] Nafion membranen er porøs og svært sensitiv for endringer i fuktighetsnivå. Man er derfor avhengig av et vann- og varmebehandlingssystem både for å unngå at membranen tørker ut da dette vil medføre at resistansen innad i cellen øker betraktelig. For mye vann vil også skape problemer ettersom en oversvømmelse kan medføre at oksygenet ikke klarer å reagere med katoden i cellen. [56] Et annet problem med LT-PEMBC er ømfintligheten for urenheter. LT-PEMBC er avhengig av hydrogen med en renhet på 99.99% for å unngå å skade katalysatoren som består av edle metall som platina. [56] Hydrogen med denne renhetsgraden er svært dyrt og vanskelig å få tak i.

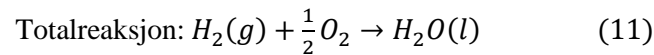
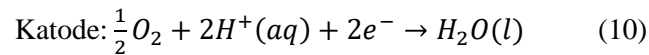


Figur 11: Skisse av PEMBC [57]

Figur 11 er en skisse som i grove trekk forklarer hvordan en PEMBC fungerer. Her ser man hvordan hydrogenet kommer inn og blir oksidert ved anoden og danner elektroner og protoner i form av hydrogenioner. [58]



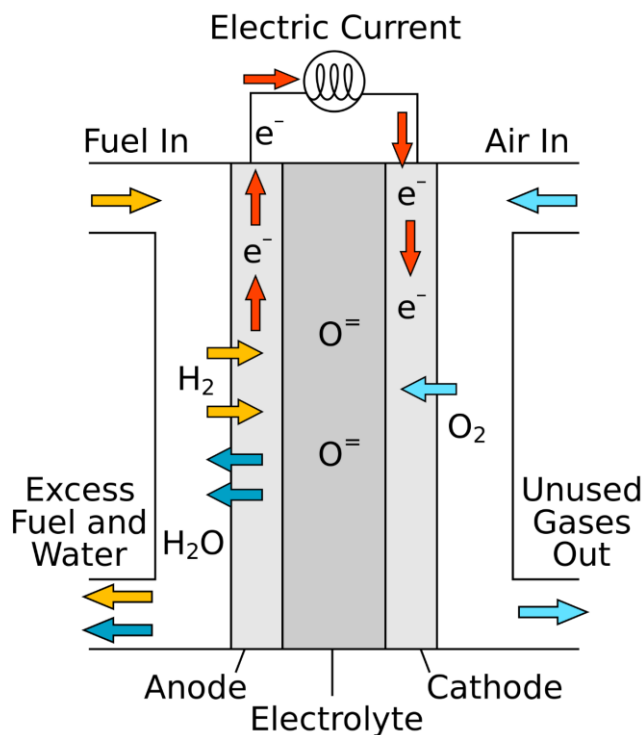
Protonene forflytter seg så fra anoden til katoden gjennom elektrolytt membranen, mens elektronene forflytter seg via en ekstern elektrisk krets. På katode siden strømmer det inn luft fra et eget innløp. Her vil oksygenmolekylene i luften reagere med protonene (H^+) og elektronene som migrerte fra anodesiden og danne vannmolekyler. [58]



Når hele reaksjonen er fullført vil man sitte igjen med vann, varme og elektrisk energi. Vannet og varmen produsert her er grunnen til at det er behov for et vann- og varmebehandlingssystem for å ivareta en optimal funksjon [58].

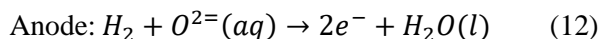
Fast-oksid brenselcelle

Fast-oksid brenselceller (FOBC) er i prinsippet veldig lik en PEMBC. Hovedforskjellene på de to brenselcellene er valg av elektrolytt og temperatur. Elektrolytten i en FOBC består av et porøst fast keramisk materiale. Elektrolytten er en ionisk leder og tillater oksygenioner å bevege seg gjennom den. En FOBC opererer med svært høye temperaturer på inntil 1000°C. Den høye temperaturen gjør at FOBC ikke trenger elektroder bestående av edle metaller slik som PEMBC gjør. Høy temperatur muliggjør også bruk av hydrogenbærere slik som ammoniakk og LNG. [28]

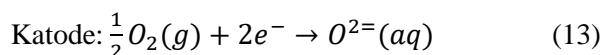


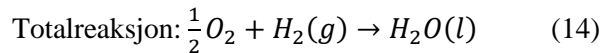
Figur 12: Skisse av FOBC [59]

Skissen over viser hvordan en FOBC fungerer. Som man ser, så er den tilnærmet lik skissen av PEMBC vist tidligere. Drivstoff (i dette tilfellet, H₂) kommer inn på anode siden hvor det oksideres til elektroner og oksygenioner [58].



I likhet med PEMBC forflytter oksygenionene seg gjennom elektrolytten, mens elektronene forflytter seg gjennom en ekstern elektrisk krets. På katode siden er det et luftinntak. Her reagerer oksygenionene som beveger seg gjennom elektrolytten med elektronene og danner oksygenmolekyler [58].

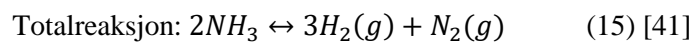




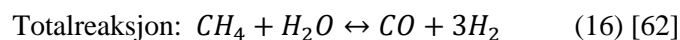
Etter reaksjonen er ferdig vil man igjen sitte med vann, varme og elektrisk energi slik som i en PEMBC [58].

Cracking er en prosess hvor man bryter opp større molekyler til mindre mer brukbare molekyler. Eksempler på dette er å gjøre LNG og ammoniakk om til hydrogen slik at man kan bruke det i en brenselcelle. En PEMBC som skal bruke ammoniakk som energibærer er avhengig av denne prosessen slik at den får rent hydrogen, men enkelte brenselceller som en SOFC trenger ikke nødvendigvis denne cracking prosessen i forkant, men kan gjøre det internt i cellen.

I ligning 7 under kapittel 2.2.5.1 ser man hvordan H-B-metoden brukes til å produsere ammoniakk ved å fusjonere hydrogen og nitrogen. Cracking av ammoniakk er en reversert H-B-metode hvor ammoniakk spaltes til hydrogen og nitrogen. Denne prosessen krever høy temperatur, hvor den mest effektive temperaturen avhenger av hvilken katalysator som er brukt. [60] Ammoniakk spaltes etter følgende ligning:



LNG består typisk av 85% metan, 5-10% etan og litt propan og butan. den nøyaktige komposisjonen avhenger av kilden den kommer fra, samt produksjonsmetodene som er brukt [61] Dersom LNG skal brukes til en brenselcelle er man avhengig av cracking før det sprøytes inn i brenselcellen for å frigjøre hydrogenet i metanen. Dette er for å unngå avsetning av karbon på anodesiden av brenselcellen, også kalt koksing. Det eksisterer andre metoder for å fjerne/minske den negative effekten av koksing, men å cracke metanen før den brukes ser ut til å være det enkleste alternativet. Dette kan gjøres ved hjelp av dampreforming:



I ligning 15 og 16 kan man observere biproduktene N_2 og CO . Som diskutert i kapittel 2.3.2 under avsnittet "polymer brenselcelle" krever PEMBC hydrogen med 99,99% renhet. Det bør derfor gjøres en nøye vurdering om hydrogen produsert fra ammoniakk eller LNG burde brukes i en PEMBC.

2.5 Utslipp

Sjøfartsindustrien slipper ut mange former for miljøskadelige stoffer i form av utslipp. Disse stoffene kan ha stor påvirkning på menneskers og dyrs helse, miljø og klima. De største negative bidragsyterne når det kommer til utslipp er nitrogenoksider (NO_x), Svoveloksider (SO_x), svevestøv og drivhusgassene karbonmonoksid (CO) og karbondioksid (CO_2). Det estimeres at utslipp fra skip har forårsaket 64.000 tidlige dødsfall i tettbeboede kystområder årlig. [63] Det er IMO som står for reguleringen av disse utslippene i sjøfartsindustrien.

2.5.1 Karbonoksider

Karbonoksidene CO og CO_2 er et produkt av forbrenning av fossile brennstoff. Disse gassene har en negativ innvirkning på helse og klima, og det er derfor viktig å minimere utslipp av karbonoksider. Sjøfartsindustrien er ansvarlig for 3,1% av de globale menneskeskapte CO_2 -utslippene hvert år, samt 2,8% av de globale menneskeskapte utslippene av drivhusgasser [64]. I 2018 var CO_2 utslippene på 90% av nivået i 2008, og det er antatt å stige til mellom 90-130% av 2008-nivået innen 2050. [65] Dette står i sterk kontrast til Parisavtalens mål om å redusere CO_2 utslipp med 40% innen 2030 og 70% innen 2050, i forhold til utslippsnivået i 2008. [66] IMO har iverksatt en rekke tiltak og anbefalinger for å redusere CO_x utslippene fra skipsindustrien. EEDI (Energy Efficiency Design Index) har satt effektiviteten til skipene som ble bygget mellom 1999 og 2009 som en "baseline", og alle skip bygget etter dette skal ha forbedret effektivitet. Skip bygget mellom 2020 og 2024 skal være 20% mer effektiv og etter 2025 skal effektiviteten øke med 30% fra "baseline". Denne forbedringen av effektivitet kan gjennomføres ved å forbedre forbrenningsmotorene til å oppnå fullstendig forbrenning av drivstoffet som blir brukt, bedre planlegging og optimering av operasjonen som skal gjennomføres og kjøre på optimale hastigheter for lavest mulig forbruk. [66]

2.5.2 Svoveloksider

Svoveloksider (SO_x) fremkommer ved forbrenning av svovelholdig drivstoff. Det er hovedsakelig SO_2 som er et stort problem, da skipsfartsindustrien står for om lag 13% av det menneskeskapte utslippene av SO_2 . [67] Utslipp av SO_x er svært uheldig da svovel i atmosfæren vil føre til sur nedbør som kan være skadelig for vegetasjon og senke pH i lukkede vann og vassdrag. Dersom pH verdiene i vann og vassdrag senkes for mye eller over tid vil det påvirke dyrelivet i og ved vann og vassdraget. Videre har en studie av Winnes og Fridell vist at skip bidrar med >10% av forsuren av nordiske kystområder. [63] IMO begynte å regulere SO_x utslipp i 2005, og det har siden 2012 vært satt en øvre grense på 3,5wt% SO_x innhold i marine drivstoff. [66] I 2020 bestemte IMO at SO_x utslippene skal reduseres til 0,5wt% på generell basis, og reduseres til 0,1% i enkelte utslippskontrollerte områder. [68] Dersom dette

ikke skjer/utsettes, vil det ifølge en studie Finland har sendt inn til IMO's Marine Environment Protection Committee (MEPC) kunne føre til ytterligere 570,000 tidlige dødsfall på verdensbasis i perioden 2020-2025. [68] Mulighetene for å redusere utslipp av SO_x er å bytte drivstoff til et med lavere eller null svovelinnehold, eller bruke system kalt «Exhaust Gas Cleaning System» (EGCS) hvor eksosen fra skipet renses [66].

2.5.3 Nitrogenoksider

Nitrogenoksider er giftige stoffer som dannes ved at luft reagerer med brennbare stoffer ved høy temperatur. Høyere temperatur i forbrenningsmotoren øker mengden NO_x som dannes. Nitrogendioksid (NO₂) er den giftigste av de nitrøse gassene og danner salpetersyre (HNO₃) når det reagerer med vann [69] NO_x som kommer ut i atmosfæren vil også danne ozon (O₃) i troposfæren og kan bidra til sur nedbør. Den sure nedbøren vil kunne påvirke kvaliteten i vann og vassdrag, hvor små vann og innsjøer er spesielt utsatt for eutrofiering. Sjøfartsindustrien står f. om lag 15% av menneskeskapte NO_x utslipp. I 2008 ble MARPOL Annex VI endret av MEPC og IMO til å redusere utslippsstandardene for NO_x, hvor de nåværende reguleringene tar utgangspunkt i motorens effekt og hastighet. [66] I motsetning til de andre utslippsgassene vil ikke utslipp av NO_x forsvinne dersom man bytter drivstoff så lenge man benytter en forbrenningsmotor. Men dersom man bruker hydrogen som drivstoff, vil en elektrokjemisk brenselcelle kunne danne elektrisitet direkte uten å produsere NO_x [70] Metodene for å redusere utslipp av NO_x når man bruker en forbrenningsmotor går ut på å modifisere motoren slik at den produserer mindre NO_x, eller behandle eksosen før den når ut i atmosfæren. Den mest effektive metoden er ved bruk av "Selective Catalytic Reduction". SCR fungerer ved innsprøytning av et reduksjonsmiddel, typisk ammoniakk, slik at det reagerer med eksosen [66]. Når ammoniakk reagerer med NO_x, produserer det nitrogen og vann. Denne teknologien kan redusere utslippene av NO_x til atmosfæren med 90%. [71]

2.5.4 Svevestøv

Svevestøv (partikler, PM) består av små solide og flytende partikler som ofte skapes i forbrenningsmotorer og spres ut i luften via eksos. Partiklene er målt i mikrometer (µm) og blir delt inn i forskjellige fraksjoner. Det er fire størrelsesgrupper som er spesielt viktig [72]:

- PM_{0,1} (Ultrafin fraksjon)
- PM_{2,5} (finfraksjon)
- PM_{10-2,5} (Grovfraksjon)
- PM₁₀ (grovfraksjon + finfraksjon)

Svevestøv kan inneholde mange former for forurensninger som gjør forskjellig skade på både miljø og helse. Dersom størrelsen på partiklene er under 10µm, er de lett å inhalere slik at de skader lungene og respirasjonssystemet hos mennesker. [66] Eksponering for svevestøv er en stor bidragsyter for økt dødelighet og en av de aller viktigste miljøårsakene for tidlig død. Eksponering for svevestøv i lange og korte perioder vil kunne føre til [72]:

- Forverring av symptomer til mennesker med luftveis- og hjerte- karsykdommer.
- Utvikling av luftveis- og hjerte- karsykdommer.
- Forsterkning av allergi
- Effekter på:
 - Nervesystemet
 - Fosterutvikling
 - Reproduksjon
 - Stoffskiftet

Svevestøv er også en stor utfordring for miljøet. Partiklene kan bli tatt med av vinden og spredt ut til forskjellige økosystemer, blant annet innsjøer, jorder, skoger osv... Her kan partiklene endre surhets- og næringsbalansen slik at det skader det lokale økosystemet. [66]

SO_x og NO_x kan være med på å øke utslippene av svevestøv. Derfor vil drivstoff med lavt innhold av svovel og lavere temperatur under forbrenningen for å redusere NO_x være nødvendig for å minimere utslipp av svevestøv. [66] IMO har i sin 13 og 14 regulering i Annex VI satt grenser for utslipp av SO_x og NO_x, som igjen fører til mindre svevestøv. [73] [74] Andre metoder for å minimere svevestøv til atmosfæren inkluderer:

- Riktig og regelmessig vedlikehold av motor for å oppnå optimal ytelse.
- Redusere farten for å redusere drivstofforbruket.
- Elektrifisering av fartøyet eller deler av det.
- Installere rensesystemer som for eksempel partikkelfiltre for å fange opp svevestøv.

2.5.5 Oppsummering av utslipp

Det har aldri vært viktigere å ha kontroll på utslippene fra fartøy enn det er i dag. Den maritime sektoren står ovenfor en stor omstillingsprosess for å innfri de målene som er satt av internasjonale organer som IMO. Skal disse målene innfris er det helt nødvendig å bytte over til grønnere drivstoff med færre miljøskadelige stoffer, samt ta i bruk teknologi som «scrubbere», EGCS, SCR etc. på eksisterende skip. Som beskrevet over er det ikke bare klima som påvirkes av disse utslippene, de har også en direkte påvirkning på mennesker og dyrs helse. Derfor er det ekstra viktig med **internasjonale** reguleringer for å belyse utslippsproblematikken slik at vi kan få globale virkninger. Selskaper fra “høyinntektsland” slik som Norge som driver maritim virksomhet har også et spesielt ansvar for å sørge for at utslippene blir så lave som mulig, spesielt dersom man driver internasjonalt. Tabellen under viser en enkel oversikt over forskjellige reduksjonsmetoder for utslipp av stoffene beskrevet i 2.41-2.4.4.

Component	Reduction method	Potential reduction
NOx	Selective catalytic reduction (SCR)	95%
	Emulsification	20-25%
	Humid air	70%
	Engine tuning	50-60%
	Exhaust gas re-circulation	10-30%
SOx	Fuel Switching Process*	60-90%
	Sea water scrubbing. Exhaust below water line	Up to 95%
CO ₂	Energy Management	1-10%
PM	Electrostatic filters	Up to 85%

*Switching from residual fuel to distillate fuel

Tabell 5: Tilgjengelige reduksjonsmetoder for utslipp fra skip [75]

3. Metode

Vurderingen av de ulike fremdriftsløsningene utføres med en systematisk tabell. Den rangerer ulike kriterier for tekniske og miljømessige parametere for å gi en samlet poengsum. Det innebærer ikke et direkte forsøk eller en spesifikk beregning, men heller en sammensatt analyse. Både empiriske verdier og subjektive vurderinger sammenstilles til å gi en samlet vurdering. Ved å presentere alle vurderingene i en tabell kan verdier justeres og enkelt vise påvirkningen av det, dersom en verdi endres eller vurderes ulikt av andre. På den måten sikres et så etterrettelig resultat som mulig, selv ved kombinasjonen av konkrete objektive verdier og subjektive vurderinger.

3.1 Tabellrangering

For å kunne vurdere hvilken energibærer som er best egnet for SOV, må informasjon om følgende kriterier innhentes:

- Operasjon
- Økonomi
- TRL
- HMS
- Utslipp

Dette presenteres i tabeller med egne parametere for de ulike kriteriene. Siden parameterne varierer i stor grad fra kriterier til kriterier, gis hver kategori en poengsum på maksimalt 20 poeng. Dette gir hver energibærer en totalsum ut av maksimalt 100 poeng.

3.1.1 Operasjon

Operasjonskriteriet baserer seg på hvor enkelt og omfattende arbeid som kreves for å drifte systemet. Dersom mange tidkrevende prosesser er involvert, vil resultatet trekkes ned. Kriteriet baserer seg på den totale arbeidsmengden som går med til å operere fremdriftsløsningen.

For å kunne regne ut forbruket og parametere som bygger videre på dette, er det nødvendig med en oversikt over forbruket til et SOV-skip som vist i tabell 6. Disse tallene ble gitt av Breeze, og er ytterligere bygget videre på. Utgangspunktet for disse verdiene, er en MDO drevet SOV, for å kunne få en gjennomsnittlig oversikt over forbruk og energiforbruk til videre bruk i operasjonstabellen.

Energiforbruket i tabell 6, er regnet ut ifra drivstoff-forbruket i m³/dag, som er gitt av Breeze. Dette er forbruket som SOV-en bruker i gjennomsnitt hver dag hvis den hadde operert hele dagen i de ulike

modusene Transit, Port, DP, DP Transit, Standby og Waiting on weather. Ved Port modus er det tatt utgangspunkt i at SOV-en går på landstrøm mens den ligger til kai og vil dermed ikke ha noe forbruk i de 2 prosentene av totaltiden det utgjør. Ut ifra denne informasjonen, kan man regne ut det samme forbruket i kWh ved å bruke følgende formel:

$$Forbruk \text{ i kWh} = \frac{\text{Forbruk} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{dag}}\right) * \text{Energitetthet} \left(\frac{\text{MWh}}{\text{m}^3}\right) * 1000 * \left(\frac{\text{Effektivitet}(\% \text{energiutnyttelse})}{100}\right)}{24} \quad (17)$$

I denne formelen, er energitettheten og effektiviteten hentet fra operasjonstabellen.

Prosent av drift er også gitt av Breeze, og disse prosentene beskriver hvor mye av tiden SOV-en faktisk bruker i de ulike modusene. Dette er på grunn av at den aldri kommer til å operere i alle modusene samtidig, som er det forbrukene tar utgangspunktet i. For å kunne få det riktige gjennomsnittsforkbruket, gjør man først prosenten av drift om til tidsforbruket i løpet av en dag. Dette gjøres ved følgende formel:

$$Tidsforbruk \text{ i timer} = \frac{24}{100} * \text{Prosent av drift} \quad (18)$$

Deretter finner man det gjennomsnittlige forbruket i kWh per dag, ved å bruke denne formelen:

$$\text{Snitt Forbruk i kWh per dag} = \text{Forbruk(kWh)} * 0,01 * \text{Prosent av drift} * 24 \quad (19)$$

Nå vil man kunne legge sammen snittforbruket i kWh per dag fra alle modusene, og få en totalverdi av det gjennomsnittlige forbruket i kWh per dag, som SOV-en bruker. Denne verdien leser man av til 15 935,4 kWh og er nyttig for videre utregning i operasjonstabellen.

SOV - Energiforbruk					
Modus	Forbruk (m ³ /dag)	Forbruk kW	Prosent av drift	Tidsforbruk, prosent (timer)	Snitt pr dag (kWh)
Transit	8,9	1301,63	7	1,68	2186,73
Port	0,0	0,00	2	0,48	0,00
DP	4,8	702,00	48	11,52	8087,04
DP Transit	4,7	687,38	14	3,36	2309,58
Standby	3,5	511,88	25	6,00	3071,25
Waiting on weather	2,0	292,50	4	0,96	280,80
Sum	23,9		100	24,00	15935,40

Tabell 6: Gjennomsnittlig energiforbruk pr dag

Operasjonstabellen basert på både utregninger, noen gitte verdier og tabell 6 (energiforbruk). Forklaringene på hvordan tabellen er laget, blir gitt i rekkefølgen tabellen viser og ikke nødvendigvis rekkefølgen parameterne blir brukt. Dette er for å gjøre utregningene mer oversiktlig.

Kapasiteten for batteri er gitt av Breeze, med plantegning Z 4090 e-C SOV, der det er 3 x 9,63 MW batteripakker (se vedlegg 3). For MDO, LNG, Hydrogen og Ammoniakk, er kapasiteten regnet ut med følgende formel:

$$Kapasitet (kWh) = \text{Tankstørrelse}(m^3) * \text{Energitetthet} \left(\frac{MWh}{m^3} \right) * 1000 \quad (20)$$

Det vil også være et energitap i denne sammenhengen og forbruket inkludert energitapet etter en 14 dagers arbeidsperiode, kan finnes ved hjelp av denne formelen:

$$\text{Forbruk 14 d inkludert energitap (kWh)} = \frac{\text{Forbruk 14 dager(kWh)}}{\text{Effektivitet(\%energiutnyttelse)/100}} \quad (21)$$

Margin kapasitet er en enkel utregning som forteller om hvor mye den faktiske kapasiteten til skipet har med de ulike energibærerne. Dette blir altså kapasiteten skipet får med full tank eller med fulladet batteri. Verdien som blir presentert vil illustrere hvor mye kapasitet SOV-en har igjen etter en 14 dagers arbeidsperiode i kWh. Utrekningen for å komme frem til dette resultatet, er følgende formel:

$$\text{Margin kapasitet (kWh)} = \text{Kapasitet(kWh)} - \text{Forbruk 14 d inkludert energitap(kWh)} \quad (22)$$

Forbruket i snitt per dag i kWh er regnet ut i tabell 6 - Energiforbruk, og vil være det samme forbrukstallet som bli brukt i operasjonstabellen.

Parameteren forbruk 14 dager vil være forbruket i snitt per dag over en 14 dagers arbeidsperiode. Dette er regnet ut ved å ta forbruket i snitt per dag (kWh) og multiplisere dette med tallet 14, som er verdien i antall dager. Da vil man få det totale forbruket for 14 dager og dette vil være likt for alle energibærerne i dette tilfelle.

Tankstørrelsen er oppgitt i m³ og er volumet som hver av energibærerne kan romme av drivstoff om bord på SOV-en. Dette med unntak av batteri, som ikke trenger en tank for å romme energien sin da dette bare er energipakker. Disse tallene er oppgitte tall og tankstørrelsen for MDO, LNG og

Ammoniakk, er verdier som er oppgitt fra Breeze. For hydrogen er det sagt fra Hexagon at man kan forvente kapasitet på rundt 3 tonn. Forutsatt lagring ved romtemperatur og 250 bar som gir hydrogen tetthet på 18 kg/m^3 tilsvarer 3 tonn $166,66\text{m}^3$. [76]

Parameterne energitetthet i MWh/m^3 og effektivitet i % energiutnyttelse er verdier som er hentet fra eksterne kilder [12].

Den volumetriske energitettheten til hydrogen er beregnet fra massetetthet 18 kg/m^3 og energitetthet 33kWh/kg etter følgende formel:

$$\frac{\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000\text{kWh/mWh}} = \text{MWh/m}^3 \quad (23)$$

Bunkring og brukervennlighet er en subjektiv vurdering og blir oppgitt som et tall mellom 1-20, der 1 er dårligst og 20 er best. Dette er gjort for å enkelt kunne illustrere forskjellene mellom energibærerne sin brukervennlighet når det kommer til bunkring og lading. Denne verdien kan naturligvis vurderes ulikt av andre, eller påvirkes av fremtidige utviklinger.

Totalvurderingen av operasjonstabellen er basert på margin kapasitet, bunkring og effektivitet. De andre parameterne legger grunnlaget for margin kapasitet. Operasjonstabellen blir presentert i Tabell 7.

Operasjon						
Parametere	Benevning	MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
Kapasitet	kWh					
Forbruk 14d inkl energitap	kWh					
Margin kapasitet	kWh					
Forbruk	Snitt per dag i kWh					
Forbruk 14 dager	kWh					
Tankstørrelse	m^3					
Energitetthet	MWh/m^3					
Bunkring	Karakter 1-20 tid og brukervennlighet					
Effektivitet	% energiutnyttelse					
Hovedvurderinger:	Margin kapasitet					
	Bunkring					
	Effektivitet					

Tabell 7: Operasjon

3.1.2 Økonomi

Utgiftene består av konstruksjonskostnader og driftskostnader. Omfanget varierer i stor grad mellom de ulike løsningene hvor for eksempel diesel er billigere å bygge, men elektrisk er billigere i drift. Rangeringen av økonomiske parametere baserer seg på kostnad per kWh, og forutsetter likt forbruk av kraft (etter konvertering til strøm). I Tabell 8, blir alle parameterne i økonomitabellen presentert.

Kostnaden per kWh for de ulike drivstoffene varierer betydelig over tid, og en kan anta at prisene vil være drastisk endret i løpet av levetiden til en SOV. Sammenligningen baserer seg på de mest representative prisene for dagens situasjon eller forventet kostnad når infrastrukturen er på plass.

Produksjonskostnaden for en diesel-elektrisk SOV med kapasitet på 60 personer ligger på rundt 55-60 millioner euro [2]. 57,5 millioner euro er brukt som utgangspunkt for prisingen av de ulike skipene, hvorav 2,5 millioner er knyttet til dieseldriften. Anslaget for pris ved LNG-drift er 10% ekstra sammenlignet med diesel, basert på Breeze sine tidligere priser for PSV-skip. Konstruksjon av ammoniakkskip er satt til 30% ekstra og hydrogen til 35% ekstra etter samtaler med Breeze ship design. Mer nøyaktige kostnader er vanskelig å oppdrive grunnet hemmelighold blant aktører og teknologi under utvikling.

For batteridrift brukes 55 millioner euro som utgangspunkt uten dieselmotor, og kostnaden for batteri legges til. Corvus er den dominerende leverandøren av maritime batterier og brenselceller, og er brukt som utgangspunkt i designene til Breeze. Corvus estimerer prisen per kWh i sine Blue Whale batterier til 550 USD per kWh.

Euro- og dollarkursen er stadig i endring, og har variert betydelig bare i 2023. Siden en nøyaktig kurs fra en spesifikk dag fort mister betydning, er kursene satt til et grovt snitt fra Q1 2023. Euro-NOK er satt til 11kr, og USD-NOK er satt til 10kr.

Prisen på MDO er satt til 593 USD/tonn. Med energitetthet på $11,7 \frac{MWh}{m^3} = 11700 kWh/m^3$ og massetetthet på 920kg/m³ gir det 0,46kr pr kWh etter formelen

$$\frac{\frac{\$}{kg} * 10kr / \frac{\$}{kg}}{\frac{kWh}{m^3}} = \frac{kr}{kWh} \quad (24)$$



Figur 13: MDO-priser April 2023 [77]

Elektrisk strøm fra havvind er satt til 116 øre pr kWh. Det er basert på kostpris pr kWh for å bygge og drifte havvind over vindturbinenes levetid. Strømprisen vil avhenge av markedsprisen siden strøm til en SOV er «tapt inntekt». Her er det tatt utgangspunkt i at strøm til SOV bakes inn i kostnaden for å bygge og drive en vindpark [78].

LNG er priset 36 øre pr kWh. [79]

I samtaler med Tomas Fiksdal fra Green Hydrogen [80] under Greenstat ASA er det sagt at grønn hydrogen kan kjøpes for 40-50kr pr kg. Med 33,33kWh/kg gir det en pris på

$$\frac{45kr}{33,33kWh} = 1,35 kr/kWh \quad (25)$$

Ammoniakk er forventet å kunne kjøpes for rundt 1,06\$/kg. [81]

Med 18,6MJ/kg spesifikk energi (kapittel 2, ammoniakk) regnes pris pr kWh slik:

$$\frac{1,06\$*10kr}{18,6MJ*0,2777 kWh/MJ} = 2,05 kr/kWh \quad (26)$$

Økonomi						
Parametere	Benevning	MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
Væddene pris	USD/kg					
Væddene pris per kWh	NOK					
Produksjonskostnad per skip	NOK					
Pris per kWh etter % energituttelse	NOK					
Totalkostnad over skipets levetid	25 år - her tilsvarer 308 dager/år					
Kostnad over en 2 ukers arbeidsperiode	Drivstoff i NOK					
Hovedvurderinger:	Pris per kWh etter % energituttelse					
	Totalkostnad over skipets levetid					

Tabell 8: Økonomi

3.1.3 TRL

Technology readiness level er en skala fra 1-9 utviklet av NASA på 1970-tallet, og har over tid blitt tilpasset som EU-standarden for evaluering av teknologier. [82] Innovasjon Norges versjon benyttes her og denne tabellen blir presentert i Tabell 9. Den består av 9 kategorier som beskriver kriteriene for å oppfylle en karakter. 9 tilsvarer en teknologi som har vært kommersiell bruk over tid, og 1 er et konsept som enda ikke er kommet lenger enn idéfasen. Her inndeles TRL til å vurdere systemet om bord i skipet og den nødvendige infrastrukturen hver for seg, ettersom at nivået på infrastrukturen varierer betydelig mellom teknologiene.

TRL for skipssystem (9p) og infrastruktur (9p) legges sammen og regnes om til maksimalt 20 poeng etter formelen:

$$\frac{TRL_{skip} + TRL_{inf}}{18} \cdot 20 \quad (27)$$

Skalaen fra Innovasjon Norge, som nevnt over, blir presentert under i tabell 9, og her forklares de ulike karakterene som blir brukt for å bestemme karakterene i denne rapporten. [83] Grunnen til at TRL-karakterene i denne rapporten blir vist fra 0-20 istedenfor 0-9, som det gjør på Innovasjon Norge sin, er for at totalsummen for vurdering skal samsvare med de fire andre vurderingstabellene til en totalt samlet sum fra 0-100.

TRL	Beskrivelse av oppnådd TRL	Typisk dokumentasjon ved oppnådd TRL
1	Grunnleggende prinsipper er observert.	Det er gjennomført og dokumentert vitenskapelige observasjoner av teknologiens grunnleggende egenskaper.
2	Teknologikonsept er definert	Det er gjennomført analytiske studier av teknologien, der man vurderer mulige anvendelser. Plan for eksperimentering på TRL3 foreligger.
3	Eksperimentelt konseptbevis (proof of concept) foreligger	Det er gjennomført innledende forskning for å få bekreftet mulige konsepter (proof of concept). Det er gjennomført studier og laboratoriemålinger for å validere teorier. Det er utarbeidet en plan for TRL4, validering av teknologien i laboratorie-skala.
4	Teknologien er validert i laboratoriet	Teknologien er validert i lab-skala, gjennom systematisk utprøving av teknologien for tenkt anvendelse. Resultatene viser at forventede krav til ytelse for teknologien kan være oppnåelige. Det er klart for å teste teknologien på TRL5, under simulerte betingelser.
5	Teknologien er testet i laboratorieskala, som del av systemløsning under relevante driftsbetingelser.	Det foreligger resultater fra testing av integrert systemløsning under simulerte driftsbetingelser.
6	Pilotskala systemløsning validert under relevante driftsbetingelser. Pilotanlegget oppfyller alle funksjonskrav. Tidsbegrenset testing.	Det foreligger resultater fra uttesting av et pilotskala-system under relevante driftsbetingelser. Relevans av testmiljø er beskrevet (skala, valg av driftsbetingelser, sikkerhetsfunksjoner). Tydelig og omfattende teknologibeskrivelse tilgjengelig (funksjonskrav, driftsbetingelser, utført designprosess, etc.). Plan for oppnåelse av TRL7 foreligger.
7	Fullskala prototype eller demonstrasjonsanlegg i markedsrelevant skala er testet ut under reelle driftsbetingelser.	Det foreligger testresultater fra utprøving av prototype systemløsning i reell/markedsrelevant skala under reelle driftsbetingelser. Evaluering av risikoprofil. Beskrivelse av testomfang, utførte valideringsaktiviteter, plan for oppnå TRL8, etc.
8	Reelt komplett systemløsning ferdigstilt og kvalifisert gjennom test og demonstrasjon. Siste utviklingstrinn, oppfyllelse av nivået representerer slutten av utvikling av systemløsningen. Drift under kommersielle rammer, fortsatt evaluering av resultater/effekter.	Det foreligger dokumentasjon av drift av endelig systemløsning under reelle driftsbetingelser, men fortsatt med noe begrenset driftserfaring. Evaluering av måloppnåelse av krav (ytelses- og funksjonskrav). Operasjonsprosedyrer/driftsplaner utviklet.
9	Teknologien er kommersielt tilgjengelig og har vært i drift over tid under kommersielle rammer og i alle forventede driftssituasjoner. Formål med prosjektet er kommersiell bruk.	Dokumentasjon som bekrefter drift under alle forventede reelle driftsbetingelser over tid. Driftsrapporter, vedlikeholdsplaner, ferdigstilte operasjonsmanualer og prosedyrer foreligger.

Tabell 9: TRL kriterier [84]

I Tabell 10 blir TRL-karakterene fra denne rapporten presentert og regnet om til en verdi mellom 0-20 ved hjelp av formel 27.

TRL					
Parametere	MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
Skipssystem					
Infrastruktur					
Vurdering:					

Tabell 10: TRL

3.1.4 HMS

HMS-tabellen er en oppsummering basert i hovedsak på “REGULATION (EC) No 1272/2008 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT” og delvis HMS-datablad for de ulike drivstoffene, som igjen baserer seg på den samme EC 1272/2008. Den er fordelt i tre kategorier: Klassifisering, Merking og Forholdsregler. Klassifisering tar for seg alle relevante farekoder, hvor merking er primært de aktuelle farene som en forbruker vil møte på som produsentene derav er pålagt å merke substansen med. Farekodene er i formatet H*** hvor det første tallet representerer kategori for faren. Farekodene relevant for drivstoffene i denne oppgaven er oppsummert i tabell 13. Forholdsreglene er koder i format P*** som representerer spesifikke sikkerhetstiltak, eventuelt P*** + P*** som beskriver tiltak X dersom hendelse Y har funnet sted. Forholdsreglene er oppsummert i tabell gitt som vedlegg og selve operasjonstabellen er presentert i Tabell 11.

Energibærerne vil vurderes i henhold til hvor bra de scorer individuelt i de ulike parameterne i forhold til hverandre. Det vil bli gitt en endelig karakter i den gule vurderingsraden der alle kodene blir samlet og representert som en tallverdi mellom 0-20, der 0 er dårligst og 20 er best.

HMS						
Parametere		MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
Relevante Index-nummer						
Klassifisering	Fareklasse					
	Fare-Kategorikode					
	Faresetningskoder					
Merking	Piktogram (faresymbol)					
	Signalordkode					
	Faresetningskoder					
Notater tilordnet en oppføring						
Forholdsregler	Forebyggende					
	Respons					
	Lagring					
	Avfallshåndtering					
Vurdering:						

Tabell 11: HMS







I tabellene 12, 13 og 14 finner man kodene som er blitt brukt i HMS Tabell 11. Forklaringene er tatt fra samme standarden “REGULATION (EC) No 1272/2008 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT” som er blitt brukt tidligere. Tabellene viser kodene som er blitt brukt i HMS tabellen, betydningen på de forskjellige og hva de innebærer. P-kodene er også bare en oppsummering på relevante koder som er blitt brukt i denne oppgaven og tar heller ikke med seg alle forklaringene fra standarden sin fulle oversikt over koder. P-kodene er en ganske omfattende liste, så disse forklaringene legges ved som vedlegg, da det blir for omfattende å inkludere i rapporten. Signalkoder og notater tilført en oppfordring, er også lagt ved som vedlegg for å unngå for å gjøre selve rapporten mer oversiktlig.

Fare-kategorikode	Betydning	Forklaring
Carc. 1B	Kreftfremkallende egenskaper	Presumed to have carcinogenic potential for humans, classification largely based on animal evidence.
Carc. 2	Kreftfremkallende egenskaper	Suspected human carcinogens
Asp. Tox. 1	Aspirasjonsfare	Substances known to cause human aspiration toxicity hazards or to be regarded as if they cause human aspiration toxicity hazard
Aquatic Acute 1	Farlig for vannmiljøet	Acute aquatic danger. Generic cut-off: 0,1% by weight (or <0,1% where relevant)
Acute Tox. 3 *	Akutt forgiftning	Acute toxicity estimate-ATE (Category 3): Oral(mg/kg body weight): 50<ATE≤300, Dermal(mg/kg body weight): 200<ATE≤1000 Gases(ppmV): 500<ATE≤2500, Vapours(mg/l): 2,0<ATE≤10,0, Dust/mist(mg/l):0,5<ATE≤1,0 *The reference * is indicated by the minimum classification for a category"
Skin Corr. 1B	Etsende/irriterende på hud	where responses are described following exposure between 3 minutes and 1 hour and observations up to 14 days
Press. Gas	Gass under trykk	A gas which when packaged under pressure is entirely gaseous at - 50 C; including all gases with a critical temperature ≤ - 50 C.
Flam.Gas 1	Brennbar gass	Gases, which at 20 C and a standard pressure of 101,3 kPa: (a) are ignitable when in a mixture of 13 % or less by volume in air; or (b) have a flammable range with air of at least 12 percentage points regardless of the lower flammable limit.
Flam.Gas 2	Brennbar gass	Gases, other than those of Category 1, which, at 20 C and a standard pressure of 101,3 kPa, have a flammable range while mixed in air.

Tabell 12: Fare-kategorikode

Faresetningskode	Forklaring
H220	Extremely flammable gas
H221	Flammable gas
H280	Contains gas under pressure
H302	Harmful if swallowed
H304	May be fatal if swallowed and enters airways
H314	Causes severe skin burns and eye damage
H319	Causes serious eye irritation
H331	Toxic if inhaled
H332	Harmful if inhaled
H350	May cause cancer (state route of exposure if it is conclusively proven that no other routes of exposure cause the hazard)
H351	Suspected of causing cancer (state route of exposure if it is conclusively proven that no other routes of exposure cause the hazard)
H400	Very toxic to aquatic life

Tabell 13: Faresetningskode

Piktogram	Symbol	Forklaring
GHS02		Flammable gases, hazard category 1
GHS04		Gases under pressure Compressed gases Liquefied gases
GHS05		Skin corrosion, hazard categories 1B
GHS06		Acute toxicity (oral, dermal, inhalation), hazard categories 1, 2, 3
GHS08		Carcinogenicity, hazard categories 1A, 1B, 2 Aspiration hazard, hazard category 1
GHS09		Hazardous to the aquatic environment, Acute hazard category 1

Tabell 14: Piktogram

3.1.5 Utslipp

Utslippene vurderes etter totalutslipp av CO₂ over skipets levetid, utslipp av NO_x, CO og SO_x pr dag. Batteridrift har ikke direkte utslipp i drift, men har store utslipp tilknyttet produksjon. Derfor betraktes her batteriproduksjonens CO₂ utslipp som totalutslipp over skipets levetid. Utslippstabellen blir presentert i Tabell 15.

Utslippene er beregnet etter det gjennomsnittlige energiforbruket med utslippsfaktorer fra Statistisk sentralbyrå.

Utslippsfaktorene er oppgitt i kg utslipp pr tonn diesel, eller kg utslipp pr 1000Sm³ (Standard kubikkmeter) som tilsvarer 760kg LNG. [85]

Det daglige energiforbruket er regnet ut fra dieselforbruket oppgitt fra Breeze. I snitt bruker skipet 4,6m³ MDO daglig. Med en tetthet på 900 kg/m³ tilsvarer det 4,14 tonn MDO. For å finne utslipp pr kWh setter man da opp:

$$\frac{\text{utslippsfaktor} \left(\frac{\text{kg}}{\text{tonn}} \right) * 4,14 \left(\frac{\text{tonn MDO}}{\text{dag}} \right) * 1000 \left(\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right)}{15935,4 \text{ kWh/dag}} = g \text{ utslipp/kWh} \quad (28)$$

For LNG er det tatt utgangspunkt i en tetthet (for flytende LNG) på 450kg LNG/m³. [86] Med energitetthet på 6,5 Mwh/m³ og 58% effektivitet kan man sette opp:

$$6500\text{kWh/m}^3 = \frac{450\text{kg LNG/m}^3}{0,58} = 776\text{kg LNG} \quad (29)$$

Ved å dele både forbruk og utslippsfaktor (f.eks. CO₂) på kg LNG får man:

$$\frac{\text{utslippsfaktor} \left(\frac{\text{kg}}{\text{tonn}} \right)}{760\text{kg LNG}} = \frac{6500\text{kWh}}{776\text{kg LNG}} \quad (30)$$

$$\frac{\text{utslippsfaktor} \left(\frac{\text{kg CO}_2}{\text{tonn}} \right)}{0,76 \text{ tonn LNG}} \div \frac{6500\text{kWh}}{776\text{kg LNG}} = g\text{CO}_2/\text{kWh} \quad (31)$$

Utslipp for LNG er	Utslipp for MDO er
CO ₂ : 1990kg/tonn LNG	CO ₂ : 3170kg/tonn MDO
SO _x : 0kg/tonn LNG	SO _x : 1,158kg/tonn MDO
NO _x : 4kg/tonn LNG	NO _x : 43,76kg/tonn MDO
CO: 2,143kg/tonn LNG	CO: 2,9kg/tonn MDO

[87]

For utslipp ved batteriproduksjon brukes verdien 91,21kg/kwh fra litium-nikkel-kobalt batterier. Med 42% utslippsreduksjon ved litium-jern batterier gir det

$$91,21 \frac{kg}{kWh} * (1 - 0,42) = 52,9 \text{ kg/kWh} \quad (32)$$

Ved gitt kapasitet får man:

$$52,9 \frac{kg}{kWh} * \frac{28890kWh}{1000kg / tonn} = 1528,33 \text{ tonn CO}_2 \quad (33)$$

Hydrogen og ammoniakk forutsettes å være utslippsfritt ved bruk av brenselceller, men det kan forekomme noe utslipp av NO_x ved bruk av ammoniakk.

Utslipp							
Parametere	Bruk	Benevning	MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
CO ₂	Tank To Wake	g/kWh					
SO _x	Tank To Wake	g/kWh					
NO _x	Tank To Wake	g/kWh					
CO	Tank To Wake	g/kWh					
CO ₂ -Utslipp over skipets levetid	I vanlig drift	Tonn CO ₂					
Vurdering:							

Tabell 15: Utslipp

3.2 Vurdering

Vurderingstabellen er den endelige tabellen hvor oversikten over resultatene fra operasjons-, økonomi-, TRL-, HMS- & utslippstabellene, som vist i Tabell 16. Her summeres alle poengene i de ulike kriteriene til en endelig karakter fra 0-100, der 0 er dårligst og 100 er best. På denne måten kan man lett se hvordan de ulike fremdriftssystemene gjør det i forhold til hverandre. Selve vurderingstabellen er delt inn i tekniske parametere og miljø parametere. Dette er gjort for å kunne vekte miljøparameterne, HMS og Utslipp, tyngre i forhold til de tekniske parameterne for å få et mer bærekraftig og miljøvennlig resultat med tanke på det grønne skifte.

Ved å vekte parameterne ulikt på denne måten, vil man kunne komme frem til forskjellige resultater som kan være mer relevant mot fremtidige løsninger. Som et eksempel, kan priser på drivstoff og strøm variere en god del i tidsrommet denne oppgaven er skrevet på, og dette må man tenke på når man skal vurderer økonomi parameterne i forhold til de andre.

Vurdering						
Fremdriftssystem	Tekniske parametere			Miljø parametere		Karakter
	Operasjon	Økonomi	TRL	HMS	Utslipp	Skala fra 0 - 100
MDO						0
Batteri						0
LNG						0
Hydrogen (grønn)						0
Ammoniakk (grønn)						0

Tabell 16: Vurdering

4. Resultat

I dette kapittelet presenteres resultatene som er utarbeidet i Excel. Dette er en fremstilling av alle tall fra regnestykker og eksterne kilder i alle de individuelle tabellene. Det vil være karakterer fra hver tabell som vil gi et samlet sluttresultat i vurderingstabellen. Det kommende resultatet som vil bli presentert her, vil være et resultat som er tatt ut ifra nåtiden situasjon. Dette vil selvfølgelig kunne endre seg over tid, da ny teknologi vil kunne endre på dagens løsninger.

4.1 Operasjon

Resultatene fra operasjonstabellen blir hovedsakelig vurdert fra de tre parameterne margin kapasitet, bunkring og effektivitet. De andre verdiene har også betydning, men for selve vurderingen, var dette den mest fornuftige måten å skille de ulike energibærerne på. Her ender MDO og LNG på en delt førsteplass med 18 av 20 mulige poeng, etterfulgt av ammoniakk med 16, batteri med 14 og til slutt hydrogen med 4 poeng. Årsaken til at batteri og hydrogen har minusverdier på margin kapasitet, er at denne verdien er det de trenger påfyll av strøm og drivstoff for å kunne operere i 14 dager. Batteri er avhengig av å kunne lade gjennom arbeidsperioden og hydrogen er avhengig av å kunne fylle på drivstoff gjennom arbeidsperioden for at de begge skal kunne fungere like bra som de andre energibærerne. Grunnen til at batteri bare fikk 10 av 20 poeng på bunkring, er på grunn av at den egentlig må lade etter hver dag i arbeid og at dette trekker ned brukervennligheten til batteri som en energibærer i forhold til de andre. Til slutt, så gjør batteri det best på effektivitet med hele 90 % energiutnyttelse. Deretter følger LNG, hydrogen og ammoniakk etter, der alle tre gjør det ganske jevnt mellom seg. På bunnen har vi MDO med bare 30 % energiutnyttelse.

Operasjon						
Parametere	Benevning	MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
Kapasitet	kWh	5265000	28890	1495000	99000	869400
Forbruk 14d inkl energitap	kWh	743652	247884	384648	405628	446191
Margin kapasitet	kWh	4521348	-218994	1110352	-306628	423209
Forbruk	Snitt per dag i kWh	15935	15935	15935	15935	15935
Forbruk 14 dager	kWh	223096	223096	223096	223096	223096
Tankstørrelse	m ³	450	-	230	166,7	230
Energitetthet	MWh/m ³	11,7	0,3	6,5	0,594	3,78
Bunkring	Karakter 1-20 tid og brukervennlighet	20	10	18	15	15
Effektivitet	% energiutnyttelse	30	90	58	55	50
Hovedvurderinger:	Margin kapasitet	18	14	18	4	16
	Bunkring					
	Effektivitet					

Tabell 17: Operasjon - resultat

4.2 Økonomi

Resultatene i økonomitabellen er rangert som følgende, der LNG gjør det best, med 20 av 20 mulige poeng. MDO kommer på en sterk andreplass med 18 poeng, etterfulgt av batteri med 16, hydrogen med 10 og ammoniakk på bunn med 8 poeng. Denne rangeringen har også hatt et hovedfokus i vurderingen, som har vært fra parameterne pris per kWh etter % energiutnyttelse og totalkostnad over skipets levetid. Da kan man se at både ammoniakk og hydrogen skiller seg ut fra de andre med sine totalkostnader over skipets levetid og pris per kWh etter energiutnyttelsen.

Økonomi						
Parametere	Benevning	MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
Veiledene pris	USD/kg	0,59			5,00	1,06
Veiledene pris per kWh	NOK	0,46	1,16	0,36	1,35	2,05
Produksjonskostnad per skip	NOK	632500000	770000000	695750000	853875000	822250000
Pris per kWh etter % energiutnyttelse	NOK	1,52	1,29	0,62	2,45	4,10
Totalkostnad over skipets levetid	25 år - her tilsvarer 308 dager/år	819070846,00	928149992,00	771910222,07	1155054060,00	1325726388,75
Kostnad over en 2 ukers arbeidsperiode	Drivstoff i NOK	339220	287545	138473	547598	915412
Hovedvurderinger:	Pris per kWh etter % energiutnyttelse	18	16	20	10	8
	Totalkostnad over skipets levetid					

Tabell 18: Økonomi - resultat

4.3 TRL

TRL resultatene viser at MDO og LNG gjør det best med tanke på både skipssystemer og infrastrukturen, der MDO vinner med ett poeng over LNG med 20 av 20 mulige poeng. Deretter mangler det litt infrastruktur på batteri som gjør det mulig å lade offshore med vindmøllepark og lignende og som derfor ender på 17 poeng. På hydrogen og ammoniakk mangler det både litt på skipssystem og på infrastrukturen for at disse to energibærerene skal kunne måle seg med de andre. Dette omhandler skipsløsninger, reglement og bunkringssystemer som er nødt til å utbedres før de eventuelt kan konkurrere med de godt etablerte løsningene som MDO og LNG.

TRL					
Parametere	MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
Skipssystem	9	8	9	7	7
Infrastruktur	9	7	8	7	6
Vurdering:	20	17	19	16	14

Tabell 19: TRL - resultat

4.4 HMS

Resultatene i HMS-tabellen er en total vurdering av alle farene og tiltakene ved hver enkelt energibærer og alle kodene er hentet fra en internasjonal standard. I denne vurderingen ender MDO og batteri på delt førsteplass med begge 18 av 20 poeng totalt. Batteri har en del flere farekoder og tiltakskoder enn MDO, men er kategorisert som en akseptert risiko ombord på skip. Likevel får den ikke toppkarakter på grunn av konsekvensene som skulle oppstå hvis alt gikk galt og det eventuelt skulle komme skade på battericellene som resulterer i ukontrollerte brannfarer. MDO er det også svært lav risiko ved, men der kan det også oppstå ulykker ved dårlig håndtering av drivstoffet. LNG er kategorisert som litt farligere enn MDO og batteri med 14 poeng på grunn av sine farekoder og tiltak. Hydrogen og ammoniakk er vurdert som dårligst av alle med begge en karakter på 8 av 20 poeng. Årsaken til at begge er vurdert likt på denne måten, er på grunn av hydrogen sin eksplosivitetssfare og ammoniakk sin giftighet. Begge blir sett på som farlige og risikofylte energibærere ombord på et SOV-skip. Men med riktig forebyggende sikkerhetstiltak og prosedyrer, er det mulig å minske denne risikoen betraktelig, og dette gjelder selvfølgelig med alle energibærerne.

HMS						
Parametere		MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
Relevante Index-nummer		649-224-00-6	003-001-00-4	649-347-00-5	001-001-00-9	007-001-01-2
Klassifisering	Fareklasse	Kreftfremkallende egenskaper	"This product is not classified as hazardous according to Regulation (EC) No. 1272/2008"	Kreftfremkallende egenskaper Aspirasjonfare Gass under trykk	Brennbar gass Gass under trykk	Brennbar gass Gass under trykk Akutt forgiftning Hudetsing-/irritasjon Farlig for vannmiljøet
	Fare-Kategori	Carc. 2 Carc. 1B	Not applicable	Carc. 1B Asp. Tox. 1 Press. Gas	Flam. Gas 1 Press. Gas	Flam. Gas 2 Press. Gas Acute Tox. 3 * Skin Corr. 1B Aquatic Acute 1
	Faresetningskoder	H351 H350	Ved punktert celle: H332 H302 H319 H314	H350 H304 H280	H220 H280	H221 H331 H314 H400 H280
Merking	Piktogram (faresymbol)	GHS08	Not applicable	GHS08	GHS02 GHS04	GHS04 GHS06 GHS05 GHS09
	Signalord	Wng Dgr	Not applicable	Dgr	Dgr	Dgr
	Faresetningskoder	H350 H351	Not applicable	H350 H304	H220	GHS04 GHS06 GHS05 GHS09
Notater tilordnet en oppføring		H	-	H P	U	U
Forholdsregler	Forebyggende	P201 P202 P281	P261 P260 P271 P264 P270 P280	P201 P202 P281	P210	P210 P261 P271 P260 P264 P280 P273
		Respons	P308 + P313	P304 + P340 P312 P301 + P312 P330 P305 + P351 + P338 P337 + P313 P301 + P330 + P331 P303 + P361 + P353 P363 P310 P321	P308 + P313 P301 + P310 P331	P377 P381
	Lagring		P405	P405	P405 P410 + P403	P403 P410 + P403
	Avfallshåndtering	P501	P501	P501	-	P501
Vurdering:		18	18	14	8	8

Tabell 20: HMS - resultat

4.5 Utslipp

Resultatene fra utslippstabellen viser at MDO, som antatt, gjør det desidert dårligst av alle energibærerne. Den får 2 av 20 mulige poeng og slipper ut over dobbelt så mye som andreplassen, LNG med 8 poeng, i løpet av skipets levetid. Her vinner hydrogen med 20 av 20 mulige poeng over ammoniakk med veldig små marginer, som endte opp med 19 av 20 mulige poeng. Grunnen til dette, er fordi det er utslipp av NO_x fra ammoniakk, men ingen eksterne kilder kunne vise dette utslippstallet med sikkerhet. Batteri har ingen utslipp ved vanlig drift av SOV-en, men den har noe utslipp på grunn produksjonen av batteripakkene. Dette betraktes som utslipp over skipets levetid og derfor ender batteri opp med 16 poeng. Men det er også mulig å resirkulere batteriene etter levetiden sin i SOV-en, og dette er med på å redusere forurensningen fra batteriene.

Utslipp							
Parametere	Bruk	Benevning	MDO	Batteri	LNG	Hydrogen	Ammoniakk
CO ₂	Tank To Wake	g/kWh	824	0	312,60	0	0
SO _x	Tank To Wake	g/kWh	0,30	0	0,00	0	0
NO _x	Tank To Wake	g/kWh	11	0	0,63	0	***
CO	Tank To Wake	g/kWh	0,77	0	0,337	0	0
CO ₂ -Utslipp over skipets levetid	I vanlig drift	Tonn CO ₂	101053,26	1528,33	38356,73	0	0
Vurdering:			2	16	8	20	19

Tabell 21: Utslipp - resultat

*** → Det forekommer utslipp av NO_x, men det faktiske utslippstallet er ukjent, og avhenger av scrubbere og rensesystemer i eksosen som reduserer utslippet.

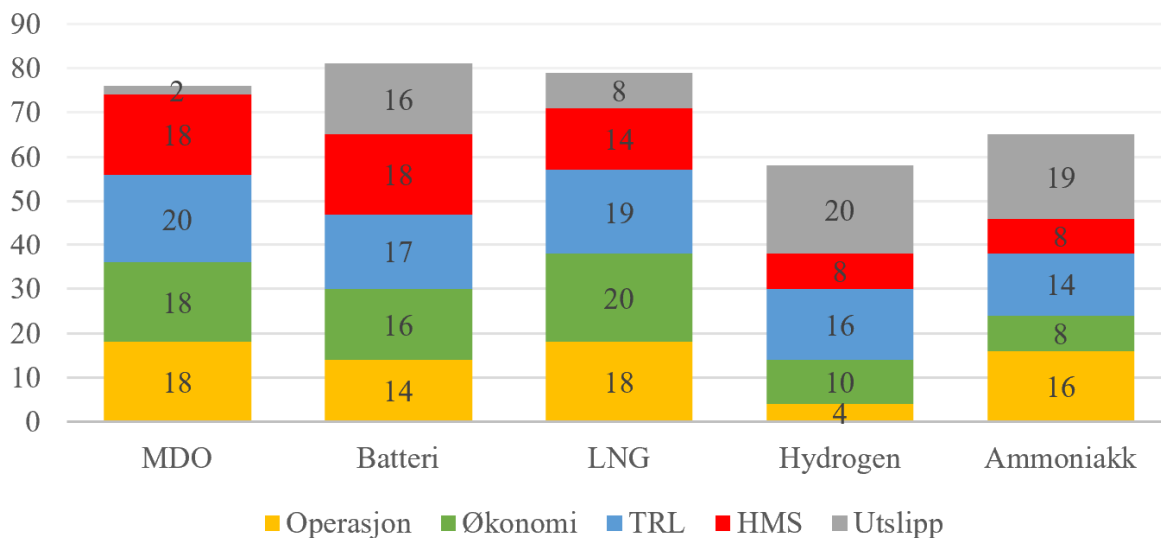
4.6 Vurdering

Som en endelig vurdering og resultat av alle energibærerne i de ulike tabellene, kan man se at batteri er den energibæreren som vil egne seg best til dagens bruk som en bærekraftig energibærer på et SOV skip. Dette forutsetter tilgjengeligheten for offshore lading ved vindmølleparkene, noe som flere aktører allerede har mulige løsninger på. MDO og LNG gjør det også veldig bra totalt, men disse vil det være en del utslipp fra, som vil måtte endre seg for å nå klimamålene fremover. Hydrogen og ammoniakk gjør det ikke fullt så bra pr dags dato. Disse to er det stort fokus på videre som bærekraftige løsninger i skipsfarten.

Vurdering						
Fremdriftssystem	Tekniske parametere			Miljø parametere		Karakter
	Operasjon	Økonomi	TRL	HMS	Utslipp	Skala fra 0 - 100
MDO	18	18	20	18	2	76
Batteri	14	16	17	18	16	81
LNG	18	20	19	14	8	79
Hydrogen (grønn)	4	10	16	8	20	58
Ammoniakk (grønn)	16	8	14	8	19	65

Tabell 22: Vurdering - resultat

OVERSIKT RESULTATER



Figur 14: Resultater

5. Diskusjon

I resultatene i kapittel 4 kommer det frem at batteridrift er den beste alternative energibæreren for SOV. Dette kapittelet vil ta for seg en diskusjon av de energibærerne som ikke nådde opp, hvorfor de ikke nådde opp og hva som eventuelt må endres for at de skal bli mer aktuelle. Videre blir det gjort en fremtidig vurdering hvor vektingen av parameterne endres noe.

5.1 Energibærerne

MDO er den nåværende energibæreren til de aller fleste SOV'er og er inkludert i denne undersøkelsen nettopp av den grunn. Skipsfartsindustrien har lang og god erfaring med MDO som energibærer. Gjennom årene har MDO blitt godt etablert i verdensmarkedet. Alt fra regelverk, produksjon, transport og bunkring, sikkerhet, tilgjengelighet og bruk er vel etablert i industrien. MDO byr på relativt få problemer med uønskede og uheldige hendelser.

MDO byr også på en del problematiske utfordringer. MDO er som kjent et fossilt brensel og med sine store utslipp av miljø- og helseskadelige stoffer som CO og CO₂, NO_x, SO_x, svevestøv med mer, bringer med seg betydelige konsekvenser. Som nevnt i kapittel 2.4.1-2.4.4 vil utslipp av karbonholdige stoffer som CO og CO₂ bidra til å akselerere klimaendringene, mens stoffer som NO_x, SO_x og svevestøv har en svært negativ effekt på mennesker og dyrs helse. Effektene av NO_x, SO_x, og svevestøv vil aller mest merkes ved kystnære områder og kan i tillegg påvirke sensitive økosystemer i stor grad. FN har gjennom sine 17 bærekraftsmål uttalt at viktigheten av å redusere utslippene fra fossilt brensel og etter hvert kutte dem ut. Som det har blitt lagt frem i kapittel 2.4.1-2.4.4 har IMO gjennom sine komiteer, konvensjoner og koder laget internasjonalt gjeldende reguleringer for utslipp. Videre har Norge gjennom miljøloven pålagt seg selv å redusere utslipp og etter hvert bli klimanøytralt. Med bakgrunn i alt dette er det en absolutt nødvendighet å gå vekk fra fossile brensel slik som MDO, da det ikke vil være mulig å nå målene som er satt, selv ved hjelp av rensesystemer og andre utslippsreducerende tiltak.

Det er helt klart at det i dagens marked er for gunstig å fortsette i gamle baner med å bruke fossilt brensel. Så lenge det er økonomisk gunstig å bruke brensel som HFO, MGO, MDO og lignende, vil det alltid være et marked for det. Dermed må nasjonale og internasjonale myndigheter gjøre det mindre lukrativt å bruke disse formene for energibærere i maritim sektor. EU er i gang med å implementere nye skatteregler for energiprodukter hvor de lover å fjerne intensivene til å bruke fossilt brensel [88]. Når de nye skattene blir en realitet og prisene på fossilt brensel øker, vil det ikke lenger være like lønnsomt å drifte skip ved disse, kontra mer miljøvennlige energibærere. Dette vil i stor grad kunne bidra til en raskere og mer omfattende teknologisk utvikling når det kommer til alternative energibærere.

LNG betraktes som en attraktiv energibærer for skipsfart og er et interessant alternativ for SOV. Z-4060 SOV-LNG er skipet denne analysen tar utgangspunkt i og er et skip som benytter LNG som energibærer. LNG som energibærer er et velprøvd og utarbeidet konsept som har mange fordeler sammenlignet med MDO. Med sin høye energieffektivitet, lave kostnader, reduserte utslipp og velprøvde teknologier som er kompatible med eksisterende skipsmotorer har LNG blitt et populært valg blant rederier.

Når man skal konstruere et skip som benytter seg av LNG som energibærer er det flere reguleringer som skal følges. Dette er for å opprettholde sikkerheten og integriteten til skipet. Som omtalt i kapittel 2.1 har SOLAS i sin IGF-kode gitt retningslinjer for krav for design, bygging og drift av skip som bruker gass som drivstoff, dette inkluderer LNG. IGF-koden dekker aspekter som sikkerhet, brannbeskyttelse, gass deteksjonssystemer og nødprosedyrer. Videre har IGC-koden tatt for seg sikkerhetskravene til skip som transporterer flytende gass. Denne koden er også gjeldende for LNG og inneholder retningslinjer for konstruksjon, struktur, sikkerhetssystemer og beskyttelse mot eksplosjon med mer. Det er viktig å merke seg at reglene og forskriftene kan variere noe fra skip til skip avhengig av størrelse, kapasitet og bruksområde. Til tross for et strengere regelverk for LNG, er det en relativt lite krevende prosess å konstruere et nytt LNG skip eller ombygge et skip fra MDO til LNG i forhold til å konstruere skip som skal drives av hydrogen eller ammoniakk.

Etterspørselen etter LNG i ulike sektorer, inkludert skipsfart, har vært økende de senere årene. Eu har anerkjent viktigheten av LNG i det globale energimarkedet og etter Russlands invasjon av Ukraina og sprengningen av Nord Stream 1 og 2, har viktigheten av tilgang på naturgass blitt enda mer åpenbar. Tilgjengeligheten på LNG i Europa har økt betydelig de senere årene. Flere land i Europa har åpnet øynene for mulighetene LNG gir, vel og merke på kort sikt. Det er et økende antall LNG terminaler rundt om i Europa hvor land som Spania, Frankrike, Nederland, Belgia og Storbritannia har etablert LNG terminaler. Flere land er i gang med å følge etter. Det blir også etablert flere bunkringsstasjoner rundt den europeiske kysten som kan betjene LNG-drevne fartøy. Rørledninger frakter LNG rundt mellom landene etter behov.

LNG er som kjent et fossilt brensel som inneholder karbon, men som energibærer gir det flere fordeler når det kommer til utslipp sammenlignet med tradisjonelle energibærere som MDO. Bruken av LNG kontra MDO bidrar til reduserte utslipp av klima- og miljøskadelige stoffer slik som CO_x, SO_x, og NO_x. Sammenlignet med MDO vil utslipp av CO₂ reduseres med ca. 25%. Denne reduksjonen er absolutt en positiv egenskap, men det vil ikke være nok dersom man skal nå IMO 2050 målene om en reduksjon på 40% innen 2030 og 70% innen 2050 som diskutert i kapittel 2.4.1. Bruken av LNG vil også redusere utslippene av andre luftforurensende stoffer slik som SO_x, NO_x og svevestøv. LNG inneholder svært lite

svovel, noe som fører til at utslippene av SO_x nesten elimineres. Når det kommer til NO_x, vil bruk av LNG redusere utslippene med inntil 80%. [89] Denne reduksjonen i NO_x innebærer at man bruker utslippsreducerende tiltak som SCR. Videre vil utslipp av svevestøv drastisk reduseres da LNG inneholder færre partikler og brenner renere enn MDO. Det er altså mye positivt å si om LNG som energibærer, men det vil ikke holde mål på alle punkter når det kommer til utslipp. LNG blir derfor vurdert som et overgangsdrivstoff fremfor en reel løsning på klima- og miljøproblematikken.

Hydrogen er en spennende og lovende energibærer for flere bransjer, inkludert maritim sektor, med mål om utslippsreduksjon. Dersom man bruker grønt eller evt. blått hydrogen vil alle målsetningene for redusert utslipp satt av både IMO og senere den norske regjering bli nådd. Bruk av hydrogen som energibærer er ikke enkelt og det gjenstår en del problemer som må løses.

Det første og potensielt største problemet med hydrogen som energibærer er kapasiteten. Dersom fartøyet skal operer utelukkende på C-H₂, vil det være behov for ca. 1 tonn hver dag. Det vil da være behov for 14 tonn pluss 3 tonn ekstra som buffer, som tilsvarer totalt 17 tonn. Etersom hver container inneholder 884kg, vil det være behov for litt i overkant av 19 (runder opp til 20) containere med C-H₂. Som Tabell 3 viser under kapittel 2.2.4.2, vil det med dimensjonene til en 40 fot container være umulig å frakte med seg 20 containere med C-H₂ på fartøyet.

Med komprimert hydrogen ender en opp med en negativ margin på kapasitet, som vist i resultatene. Det reflekterer at den ikke har kapasitet til å gå hele syklusen. Offshore bunkring av hydrogen er en mulig fremtidig løsning som er under utvikling.

Dersom man vil benytte seg av L-H₂ for å maksimere den volumetriske tettheten til hydrogen, kan man bruke større tanker enn ved bruk av C-H₂. Hvis det tas utgangspunkt i tankstørrelsen på den allerede eksisterende SOV'en Z-4060 på 230m³, vil den kunne bære med seg 16100kg L-H₂. Dette er forutsatt at den volumetriske tettheten på 70kg/m³ oppnås. Problematikken her oppstår da lagringsprosessen vil kreve inntil 30% av nedre brennverdi, noe som igjen gjør at den totale kapasiteten blir for lav.

Margin kapasitet forutsatt 230 m³, 2,31MWh/ m³ og 30% tap av kapasitet til kjøling blir -33718kWh.

I 2021 ble SOV'en Edda Brint sjøsatt. Dette er en SOV utviklet av Edda Wind, og er såkalt «hydrogen ready». Det vil si at den i utgangspunktet skal ha mulighet til å kjøre utelukkende på hydrogen, og det loves en kapasitet på inntil fire uker. [90] Dette er tenkt ved bruk av LOHC. Forutsatt 1,9MWh/m³ og tilsvarende MDO 450 m³ tankstørrelse, vil hydrogen få margin på kapasitet på 449371 kWh, og dermed oppfylle kravet med bedre margin enn ammoniakk.

Det økonomiske aspektet setter en demper for hydrogen som energibærer på en SOV. Det finnes foreløpig ingen SOV'er som utelukkende drives av hydrogen, noe som gjør det vanskelig å anslå produksjonskostnad for skipet. Men som forklart under kapittel 3.1.2 er det anslått at produksjon av en hydrogendrevet SOV kan være 35% dyrere enn for en klassisk MDO drevet SOV. Prisen for konstruksjon med LOHC kan avvike. Videre er prisen på grønt hydrogen anslått til å være 1,35kr/kWh, noe som er betydelig høyere enn prisen for MDO eller LNG, henholdsvis 0,47kr/kWh og 0,36kr/kWh. Den høye byggekostnaden kombinert med de høye drivstoffprisene vil kunne være avgjørende for dem som eier og drifter fartøyet. Da denne analysen baserer seg på grønt hydrogen produsert ved hjelp av elektrolyse fra fornybar energi, vil også prisene i stor grad basere seg på strømprisene. Dermed vil det med dagens usikkerheter i energimarkedet mulig kunne bli enda dyrere å produsere grønt hydrogen, noe som vil presse prisene oppover.

HMS er i stor grad en fellende kategori for hydrogen. Som man kan se under kap. 4.4 har hydrogen faresetningskode H220 som sier at hydrogen klassifiseres som «Extremely flammable gas». Dette kombinert med et brennbarhetsområde i luft mellom 4-77% betyr at bruk av hydrogen er ekstremt sensitivt for lekkasjer. Hydrogen er det minste molekylet som fører til at hydrogenet lekker grunnet diffusjon. Det er svært vanskelig å oppdage lekkasjer da hydrogen er luktfri, ugiftig og usynlig, og man er derfor avhengig av teknologiske løsninger for å oppdage lekkasjer. Ved hjelp av preventive tiltak som å unngå åpne flammer, «sniffere» til å oppdage lekkasjer og grundig opplæring av mannskapet vil det være mulig å senke risikoen for uønskede hendelser forbundet med hydrogen. Det er først og fremst konsekvensene forbundet med uønskede hendelser som er utslagsgivende for hydrogen. Dersom ulykken først oppstår og flere tonn hydrogen eksploderer, vil konsekvensene være brutale. I ytterste konsekvens vil det få fatale følger for personene om bord, og skipet kan bli permanent ødelagt.

Infrastrukturen rundt hydrogen har fremdeles en vei å gå. Det skjer mye spennende for tiden, og stadig flere kommuner og bedrifter ser på produksjon av grønt hydrogen fra overskuddskraft. Her er det i all hovedsak snakk om hydrogen i gassform, som for eksempel fra Green Hydrogen som har vært intervjuet. Som nevnt i kapittel 2.2.4.2 er fergen «M/F Hydra» avhengig av 3 tonn flytende hydrogen via lastebil fra Tyskland hver 3. uke. Dersom en SOV skal få levert opp mot 17 tonn hver 2. uke tilsvarer det 5-6 lastebiler. Miljøaspektet og det økonomiske ved slik drift svekkes betydelig.

Det bør også nevnes at undersøkelsen ikke reflekterer hvor godt egnet en energibærer er til all bruk. Selv om bruk av for eksempel hydrogen ikke egner seg til SOV, vil det kunne stille mye sterkere til bruk på arbeidsbåter med hyppigere bunkringsintervaller som for eksempel en PSV.

Ammoniakk er en karbonfri energibærer som kan få en stor betydning for maritim sektor fremover. Man kan ved hjelp av grønn eller blå ammoniakk få en tilnærmet utslippsfri SOV, med unntak av små mengder NO_x som oppstår ved høye temperaturer i en SOBC eller forbrenningsmotor. Men til tross for disse små mengdene vil man være godt innenfor IMO og regjeringen sine målsetninger når det kommer til utslipp. I likhet med hydrogen vil ammoniakk by på en rekke utfordringer som gjør implementeringen av an ammoniakk som energibærer komplisert og kostbar.

Den største utfordringen til ammoniakk som energibærer går på sikkerhet. Ammoniakk er klassifisert som en brennbar gass, etsende mot hud, kan forårsake akutt forgiftning ved inhalering og det er farlig for vannmiljøet. Som man kan se i kapittel 4.4 er det en rekke preventive tiltak som må iverksettes for å ta i bruk ammoniakk som energibærer. Giftigheten til ammoniakk krever høy grad av ventilasjon hvor ammoniakk lagres, og det er viktig å ventilere ut på en trygg måte som minimerer risiko for mannskapet på dekk. Selv små mengde kan være skadelig og potensielt dødelig for mannskapet om bord dersom det er dårlig ventilering eller det oppstår lekkasjer. IGF-koden kapittel 6.7.2.8 forteller at ventilasjonsmaster skal befinne seg 6m over skipets øverste arbeidsdekk og minimum 10m fra nærmeste luftinntak, åpninger til bolig-, service og kontrollrom eller andre områder som skal anses å være ufarlige å befinne seg samt eksosutløp. [91] Dette vil være svært vanskelig å gjennomføre på en SOV ettersom øverste arbeidsdekk vil være gangwayen som er skipets høyeste punkt. Dermed må en eventuell ventilasjonsmast være uforholdsmessig høy for å unngå problemer.

Konstruksjonen av et skip som benytter ammoniakk er anslått til å være om lag 30% høyere enn for MDO, hovedsakelig i materialer. Ettersom ammoniakk er ekstremt korrosivt, vil rørsystemene måtte endres for å kunne håndtere dette problemet. Den korrosive naturen til ammoniakk krever dyrere og mer komplekse materialvalg enn MDO. Varslingssystemer behøves for lekkasjer og korrosjon enn ved bruk av tradisjonelle energibærere. Doble vegger i tanker og rør trengs, hvor «sniffere» plasseres for å oppdage en eventuell lekkasje mellom veggene. Systemet settes i så fall over til nødgeneratoren.

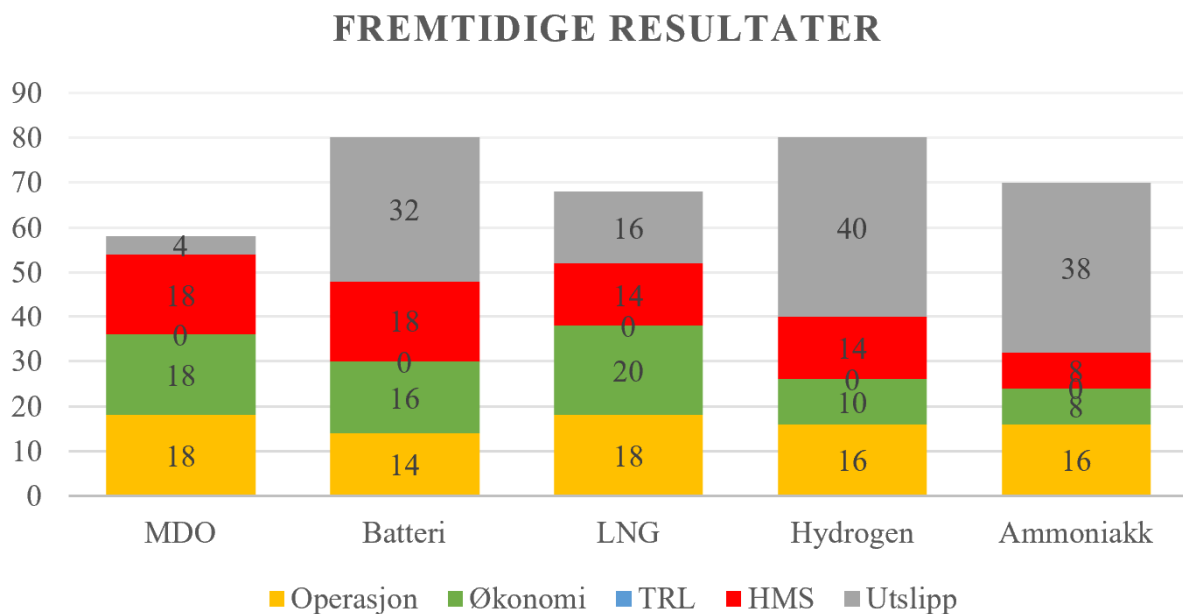
Når det kommer til økonomi var det ammoniakk som kom dårligst ut i denne analysen. Som skrevet over er det anslått å være 30% å konstruere et ammoniakkdrevet skip kontra MDO. I tillegg til dette er ammoniakk også den dyreste energibæreren med en pris på 2,05kr/kWh for grønt hydrogen. Dette gir en drivstoffpris som er nesten 5 og 6 ganger høyere enn for MDO og LNG per kWh. Dette er en så stor differanse i pris at det blir vanskelig å argumentere for at det vil være økonomisk holdbart å bruke ammoniakk, spesielt når man allerede har en byggekostnad som er 30% høyere enn for MDO. For å unngå mest mulig utslipp av NO_x, vil det også være behov for en SOBC fremfor en forbrenningsmotor. Dette er en nyskapende og avansert løsning, noe som vil reflekteres i prisen. Det vil i teorien være mulig å bruke en billigere LT-PEMBC, men da er man helt avhengig av cracking. Det vil også være større kostnader forbundet med vedlikehold/utskiftning av celler da LT-PEMBC er veldig ømfintlig for urenheter.

5.2 Fremtidig vurdering

Resultatet er presentert som et øyeblikksbilde som representerer dagens status. Enkelte punkter vil endres i tiden fremover som vil påvirke utfallet av sammenligningen. Her er de viktigste punktene:

- Større vektlegging av utslipp:
Utslppsreduksjon får et større og større fokus, og reguleringer blir strengere og strengere. Økte priser på forurensende drivstoff og begrensninger på utslipp vil spille en stor rolle i valg av energibærer. Utslpps vurderingen vektes dermed dobbelt for å representere dette.
- Utvikling innen energibærere: TRL trekkes fra vurderingen, og det forutsettes at alle energibærerne på et tidspunkt er langt utviklet og klar til bruk.
- LOHC-lagring for hydrogen: Hydrogen per dags dato er basert på komprimert hydrogen, som ikke strekker til på kapasitet. Dersom en forutsetter LOHC-lagring vil kapasiteten bli på nivå med ammoniakk, og operasjon for hydrogen settes opp til samme vurdering (16). Med redusert eksplosjonsfare økes HMS for hydrogen til lik vurdering som LNG (14p).

Med disse endringene vil fordelingen se slik ut:



Figur 15: Fremtidige resultater

Hydrogen kommer opp til en delt 1. plass med batteridrift på 80 av 100 poeng. Ammoniakk gjør det bedre enn batteri og MDO med 70 av 100 poeng og MDO faller helt ned til sisteplass med bare 58 av 100 poeng.

6. Konklusjon

Menneskeskapte klimaendringer er blant de største truslene mot velferden til både mennesker og dyr på jorden. Stigende temperaturer vil føre med seg stigende havnivåer, ekstremvær, tørke og sykdommer med mer. Det er satt mange mål knyttet til utslipp av miljø- og klimagasser. IMO vil kutte utslippene fra sjøfartsindustrien med 70% sammenlignet med referanseåret 2008 innen 2050. Samtidig har Paris-avtalen som mål å unngå en gjennomsnittlig økning av temperatur på over 2°C, men aller helst under 1,5°C. Dersom disse målene skal ha mulighet for å gjennomføres, må endringer gjøres nå.

Det finnes flere mulige løsninger som kan bidra til å dekarbonisere fartøyer som SOV, men det gjenstår fremdeles mye teknologiutvikling og testing. Dersom presset øker på rederier verden over til å skifte ut gammel teknologi basert på fossile brensler vil det igjen føre til en vekst i teknologisk utvikling, denne effekten er noe man allerede kan observere.

Dekarbonisering av SOV'er i seg selv er et lite tiltak i det store bildet. Selv om selve utslippene fra en SOV ikke er de mest utslagsgivende i henhold til målene om reduserte klimautslipp er de allikevel svært viktig. Dersom havvindmøllerparker kan fronte med at de ikke bare produserer grønn energi, men at de samtidig drifter produksjonen på en grønn og bærekraftig måte vil dette kunne bidra som inspirasjon til andre bransjer verden over. Selskaper som Breeze Ship Design kan være med å bidra til ny teknologiutvikling med sine nye inspirerende design som tar klima- og miljøproblematikken på alvor. Deres uttalte mål om å akselerere bærekraftige løsninger innen marinearkitektur er allerede med på å inspirere selskaper til å utvikle og teste ny teknologi som er mer bærekraftig, forsvarlig og økonomisk gunstig sammenligner med dagens løsninger.

Etter analysering av de vurderte energibærerne ble det konkludert at batteridrift til SOV er det beste alternativet slik situasjonen er nå. LFP batterier levert av Corvus Energy er trygge i bruk, krever lite vedlikehold og man unngår å måtte gjøre omfattende og dyre endringer på allerede eksisterende design. Kapasiteten på disse batteriene er også tilstrekkelig til å kunne operere en vanlig arbeidsdag pluss litt ekstra om nødvendig. Men bruk av ren batteridrift (foruten om en nød generator), forutsetter en enkel og stabil offshore ladeløsning. Det er flere løsninger under utvikling når det gjelder offshore ladeløsninger, og Vard Ocean Charger ser ut til på være en lovende løsning på dette problemet. Denne lademuligheten gir også ekstra fleksibilitet dersom man må bli ute i felt noen ekstra dager ettersom man ikke er avhengig av å dra til land for å bunkre.

Fremtiden bringer med seg mange spennende muligheter innenfor energi og skipsdesign. Selv om det konkluderes med at batteri er den beste løsningen akkurat nå, utelukkes det ikke at dette vil kunne endre seg med tiden. Det kommer stadig nye løsninger på problematikken rundt de ulike energibærerne og hva som egner seg best om 10-15år kan være vanskelig å forutse.

Referanser

- [1] «FNs bærekraftsmål», 2. august 2023. <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (åpnet 15. mai 2023).
- [2] Wilhemsen Ove, «Møte», 23. januar 2023.
- [3] «Lov om klimamål (klimaloven) - Lovdata». <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2017-06-16-60> (åpnet 15. mai 2023).
- [4] «Miljømål 5.3», *Miljøstatus*, 20. juni 2022. <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/klima/miljomal-5.3> (åpnet 16. mai 2023).
- [5] «Miljømål 5.4», *Miljøstatus*, 7. oktober 2022. <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/klima/miljomal-5.4> (åpnet 16. mai 2023).
- [6] FN-sambandet, «Parisavtalen», 22. desember 2020. <https://www.fn.no/om-fn/avtaler/miljoe-og-klima/parisavtalen> (åpnet 16. mai 2023).
- [7] N. handelsdepartementet, «NOU 2005: 14», *024001-020011*, 10. august 2005. <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2005-14/id154924/> (åpnet 16. mai 2023).
- [8] «IGC Code». <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igc-code.aspx> (åpnet 16. mai 2023).
- [9] «International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)». <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igf-code.aspx> (åpnet 16. mai 2023).
- [10] International Maritime Organization (IMO), «The International Safety Management (ISM) Code», 16. mai 2023. <https://www.imo.org/en/ourwork/humanelement/pages/ISMCode.aspx> (åpnet 16. mai 2023).
- [11] G. Paulsen, «DNV», *Store norske leksikon*. 25. januar 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/DNV>
- [12] C. J. McKinlay, S. R. Turnock, og D. A. Hudson, «Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? | Elsevier Enhanced Reader». <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360319921022175?token=738675EA16E7957D66AA36FDE3E6D8A56BE25D38F819DC45650D4E99FFAF5A12763362228E1593C6066A269616DD1BC5&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230516113934> (åpnet 16. mai 2023).
- [13] «Bomin | Marine Diesel Oil (MDO)». <https://www.bomin.com/en/news-info/glossary/marine-diesel-oil-mdo.html> (åpnet 16. mai 2023).
- [14] D. Shafran, «What Are MGO And MDO Fuels? Marine Fuels Explained!», 10. august 2022. <https://maritimepage.com/what-are-mgo-and-mdo-fuels-marine-fuels-explained/> (åpnet 16. mai 2023).

- [15] S. Blumsack, «The process of crude oil refining | EME 801: Energy Markets, Policy, and Regulation», 16. mai 2023. <https://www.e-education.psu.edu/eme801/node/470> (åpnet 16. mai 2023).
- [16] «Marine fuel storage, treatment and handling per ISO 8217 | ExxonMobil Marine». <https://www.exxonmobil.com/en/marine/technicalresource/marine-resources/fuel-storage-treatment-handling-iso-8217> (åpnet 20. mai 2023).
- [17] I. Gunvaldsen, S. Mathiesen, og K. A. Rosvold, «batteri», *Store norske leksikon*. 15. mai 2023. Åpnet: 20. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/batteri>
- [18] Q. Chen *mfl.*, «Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China | Elsevier Enhanced Reader». <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652622029286?token=01E8B441344FE8431BC7D06C454D4EDA8E5871D74FE1E535225DB2B4B92274D71C90228B7BDBA474B5D8A8BBD1E2D243&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230516112359> (åpnet 16. mai 2023).
- [19] B. Zollo, «Preventing Li-Ion Thermal Runaway During Battery-Cell Test», *Electronic Design*, november 2020. <https://www.electronicdesign.com/technologies/power/whitepaper/21146115/keysight-technologies-preventing-liion-thermal-runaway-during-battery-cell-test> (åpnet 16. mai 2023).
- [20] S. Sepasi, «Adaptive state of charge estimation for battery packs», UMI Dissertation Publishing, Hawaii, USA, Thesis, PhD 3691727, aug. 2015. Åpnet: 21. mars 2023. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/280886489_Adaptive_state_of_charge_estimation_for_battery_packs
- [21] P. O. Husøy, «Corvus», 21. mars 2023.
- [22] W. Brindley, «Offshore Wind Turbine Vessel Charging», ORE Catapult, PN000510-RPT-003 – Rev. 1, jul. 2022. [Online]. Tilgjengelig på: <https://energycentral.com/system/files/ece/nodes/556365/pn000510-rpt-003-rev-1-offshore-wind-turbine-vessel-charging.pdf>
- [23] K. Hofstad, «LNG», *Store norske leksikon*. 7. november 2021. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/LNG>
- [24] K. Hofstad, «tørrgass», *Store norske leksikon*. 25. januar 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/t%C3%B8rrgass>

- [25] Department of Energy and Environmental Protection og Public Utilities Regulatory Authority, «What is LNG», 16. mai 2023. <https://portal.ct.gov/PURA/Gas-Pipeline-Safety/What-is-LNG> (åpnet 16. mai 2023).
- [26] P. K. Kofstad, B. Pedersen, T. Kaland, og Allkunne, «hydrogen», *Store norske leksikon*. 26. april 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/hydrogen>
- [27] K. Hofstad, «ammoniakk – energibærer», *Store norske leksikon*. 26. januar 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: https://snl.no/ammoniakk_-_energib%C3%A6rer
- [28] J. Aarnes, G. P. Haugorm, og B. Norheim, «Produksjon og bruk av hydrogen i Norge», DNV GL, Oslo, Norge, Synteserapport 2019–0039, Rev 1, jan. 2019. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.regjeringen.no/contentassets/0762c0682ad04e6abd66a9555e7468df/hydrogen-i-norge---synteserapport.pdf>
- [29] K. Hofstad, «dampreforming», *Store norske leksikon*. 26. januar 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/dampreforming>
- [30] A. K. Dey, «Colors of Hydrogen: Green, Blue, Grey, Black, Brown, Pink, Turquoise, Yellow, Red, and White Hydrogen (PDF)», *What is Piping*, 19. januar 2023. <https://whatispiping.com/colors-of-hydrogen/> (åpnet 16. mai 2023).
- [31] «Hydrogen som klimaløsning», *klimastiftelsen.no*, 22. mars 2023. <https://klimastiftelsen.no/publikasjoner/hydrogen-som-klimalosning/> (åpnet 20. mai 2023).
- [32] J. Brauns og T. Turek, «Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review», *Processes*, bd. 8, nr. 2, Art. nr. 2, feb. 2020, doi: 10.3390/pr8020248.
- [33] K. Hofstad, «hydrogenlagring», *Store norske leksikon*. 22. januar 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/hydrogenlagring>
- [34] O. Inal, C. Dere, og C. Deniz, «Onboard Hydrogen Storage for Ships: An Overview», mai 2021.
- [35] T. E. E. Berntsen, «Energieffektiv hydrogenlagring», [Online]. Tilgjengelig på: <http://hdl.handle.net/11250/234813>
- [36] K. Fagereng, «Oversikt over vanlige container størrelser | RCONTAINER®», *Rcontainer*, 11. desember 2018. <https://rcontainer.no/oversikt-over-de-vanligste-container-dimensjoner/> (åpnet 16. mai 2023).
- [37] Stave, «Hexagon Purus», 25. april 2023.
- [38] R. Skipsrevyen, «Lanserer felles utviklingsavtale for grøn skipsfart», 7. mars 2023. <https://www.skipsrevyen.no/alma-clean-power-hydrogen-hydrogenious-lohc-maritime/lanserer-felles-utviklingsavtale-for-gron-skipsfart/1496945> (åpnet 20. mai 2023).

- [39] B. U. Melcher, M. George, og C. Paetz, «Liquid Organic Hydrogen Carriers - A Technology to Overcome Common Risks of Hydrogen Storage», presentert på International Conference on Hydrogen Safety, Erlangen, Tyskland: ICHS, sep. 2021, s. 7. Åpnet: 25. april 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://hysafe.info/uploads/papers/2021/5.pdf>
- [40] K. Hofstad, «LOHC – energibærer», *Store norske leksikon*. 26. januar 2023. Åpnet: 20. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: https://snl.no/LOHC_-_energib%C3%A6rer
- [41] G. Jeerh, M. Zhang, og S. Tao, «Recent progress in ammonia fuel cells and their potential applications», *J. Mater. Chem. A*, bd. 9, nr. 2, s. 727–752, 2021, doi: 10.1039/D0TA08810B.
- [42] B. Pedersen, «Haber-Bosch-metoden», *Store norske leksikon*. 22. januar 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/Haber-Bosch-metoden>
- [43] webmaster, «Potential of Ammonia as Fuel in Shipping». <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html> (åpnet 20. mai 2023).
- [44] H. Brinks og E. A. Hektor, «Ammonia as a Marine Fuel». DNV GL - Maritime, 2020. Åpnet: 20. april 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385>
- [45] Clasifications Register Group Limited, International Maritime Organization, International Labour Organization or Maritime and Coastguard Agency., «Section 6 Tank types», 16. mai 2023. <https://www.imorules.com/GUID-95B96003-34A8-4390-8DD8-46346570C319.html#GUID-95B96003-34A8-4390-8DD8-46346570C319> (åpnet 16. mai 2023).
- [46] A. Sarsten og G. O. Fiskaa, «forbrenningsmotor», *Store norske leksikon*. 21. januar 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/forbrenningsmotor>
- [47] A. Yuksel, «What is a dual fuel engine, and its benefits for oil and gas applications?», *Cummins Inc.*, 29. september 2021. <https://www.cummins.com/news/2021/09/29/what-dual-fuel-engine-and-its-benefits-oil-and-gas-applications> (åpnet 16. mai 2023).
- [48] «Dual-fuel engines from Wärtsilä», *Wartsila.com*, 16. mai 2023. <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/dual-fuel-engines-from-wartsila> (åpnet 16. mai 2023).
- [49] Det Norske Veritas group, «Ammonia-fuelled engines for carbon free shipping», *DNV*, 16. mai 2023. <https://www.dnv.com/Default> (åpnet 16. mai 2023).
- [50] H. K. Haram, «Ammonia as a Marine Fuel Safety Handbook», [Online]. Tilgjengelig på: <https://grontskipsfartsprogram.no/wp-content/uploads/2022/03/Ammonia-as-Marine-Fuel-Safety-Handbook-Rev-01.pdf>

- [51] M. Wold, J. Frimann-Dahl, C. Chryssakis, M. S. Eide, Ø. Endresen, og H. Hustad, «Comparison of Alternative Marine Fuels», DNV GL Maritime, Høvik, Norge, 2019–0567, Rev. 4, sep. 2019. Åpnet: 11. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: https://sea-Ing.org/wp-content/uploads/2020/04/Alternative-Marine-Fuels-Study_final_report_25.09.19.pdf
- [52] M. T. & B. SE, «man dual fuel marine engine | MAN Engines». <https://www.man.eu/engines/en/products/marine/man-dual-fuel-marine-engine.html> (åpnet 16. mai 2023).
- [53] A. Melson og N. Astrup, «Fuel cell technology for the shipping industry», 22. februar 2022. <https://nor-shipping.com/fuel-cell-technology/> (åpnet 16. mai 2023).
- [54] J. Larminie og A. L. Dicks, «Fuel Cell Systems Explained, 2nd Edition | Wiley», *Wiley.com*, 16. mai 2023. <https://www.wiley.com/en-us/Fuel+Cell+Systems+Explained%2C+2nd+Edition-p-9781118878330> (åpnet 2. mai 2023).
- [55] A. Parekh, «Recent developments of proton exchange membranes for PEMFC: A review», *Front. Energy Res.*, bd. 10, 2022, Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.956132>
- [56] R. E. Rosli *mfl.*, «A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system | Elsevier Enhanced Reader», 16. mai 2023. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0360319915313069?token=7DDECC0A4E8A0F36EC6A07E56FAA41C1293E1F2CABBAB63C6869BB649DE6D136C7228443667C56FF578363E1009365D5&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230516123142> (åpnet 5. mai 2023).
- [57] «Proton-exchange membrane fuel cell», *Wikipedia*. 10. mai 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Proton-exchange_membrane_fuel_cell&oldid=1154179225
- [58] X. Li, *Principles of Fuel Cells*, 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2005. doi: 10.1201/9780203942338.
- [59] «Solid oxide fuel cell», *Wikipedia*. 14. mai 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Solid_oxide_fuel_cell&oldid=1154743106
- [60] G. Thomas og G. Parks, «Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy», *US Dep. Energy*, s. 23, feb. 2006.
- [61] N. H. Lundberg, N. Nesse, J. Hagland, og K. Hofstad, «naturgass», *Store norske leksikon*. 5. oktober 2022. Åpnet: 9. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/naturgass>
- [62] H. A. Shabri, M. H. D. Othman, M. A. Mohamed, T. A. Kurniawan, og S. M. Jamil, «Recent progress in metal-ceramic anode of solid oxide fuel cell for direct hydrocarbon fuel utilization_ A

review | Elsevier Enhanced Reader», 16. mai 2023.

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0378382020309176?token=F60770BEFC6CE0E65DA63D4EA4A70EB82B0F92504520E97627CE918B6C405076A873C3B309580D4D615C3FDF37DFA8EC&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230516122751> (åpnet 16. mai 2023).

- [63] H. Winnes og E. Fridell, «Particle Emissions from Ships: Dependence on Fuel Type», *Particle Emissions from Ships: Dependence on Fuel Type*. Department of Shipping and Marine Technology, Gøteborg, Sweden, 24. desember 2012. Åpnet: 16. februar 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.3155/1047-3289.59.12.1391?needAccess=true&role=button>
- [64] «Third IMO GHG Study 2014».
<https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/greenhouse-gas-studies-2014.aspx> (åpnet 16. mai 2023).
- [65] «Fourth Greenhouse Gas Study 2020».
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx> (åpnet 16. mai 2023).
- [66] A. K. Dalai, N. Baquerizo, og S. Vedachalam, «Review on impacts of low sulfur regulations on marine fuels and compliance options | Elsevier Enhanced Reader», 16. mai 2023.
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0016236121021189?token=22423DC526DC35ED71C436E2D664BAB91E7B24D970F33FEE116EDB555D29BD26193A693C29BC49327AAB28570E5FA178&originRegion=eu-west-1&originCreation=20230516122025> (åpnet 16. februar 2023).
- [67] C. Sui, P. de Vos, D. Stapersma, K. Visser, og Y. Ding, «Fuel Consumption and Emissions of Ocean-Going Cargo Ship with Hybrid Propulsion and Different Fuels over Voyage», *J. Mar. Sci. Eng.*, bd. 8, nr. 8, Art. nr. 8, aug. 2020, doi: 10.3390/jmse8080588.
- [68] International Maritime Organization (IMO), «IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions», 16. mai 2023. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HofTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx> (åpnet 16. mai 2023).
- [69] B. Pedersen, «NOx», *Store norske leksikon*. 23. januar 2023. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på: <https://snl.no/NOx>
- [70] A. C. Lewis, «Optimising air quality co-benefits in a hydrogen economy: a case for hydrogen-specific standards for NOx emissions», *Environ. Sci. Atmospheres*, bd. 1, nr. 5, s. 201–207, jul. 2021, doi: 10.1039/D1EA00037C.
- [71] D. Kim og C. Lee, «SCR Performance Evaluations in Relation to Experimental Parameters in a Marine Generator Engine», *J. Mar. Sci. Eng.*, bd. 7, nr. 3, Art. nr. 3, mar. 2019, doi: 10.3390/jmse7030067.

- [72] M. Låg og A. K. Bølling, «Luftforurensning i Norge», *Folkehelseinstituttet*, 30. juni 2014. <https://www.fhi.no/nettpub/hin/miljo/luftforureining--i-noreg/> (åpnet 17. februar 2023).
- [73] «Annex VI - Regulation 13 - Nitrogen oxides (NO_x)». http://www.marpoltraining.com/MMSKOREAN/MARPOL/Annex_VI/r13.htm (åpnet 16. mai 2023).
- [74] «Annex VI - Regulation 14 - Sulphur oxides (SO_x)». http://www.marpoltraining.com/MMSKOREAN/MARPOL/Annex_VI/r14.htm (åpnet 16. mai 2023).
- [75] I. S. Seddiek og M. M. Elgohary, «Eco-friendly selection of ship emissions reduction strategies with emphasis on SO_x and NO_x emissions», *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, bd. 6, nr. 3, s. 737–748, sep. 2014, doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0209.
- [76] «Figure 2.3-2. Storage of hydrogen at ~ 250 bar pressure can be...», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/2-Storage-of-hydrogen-at-250-bar-pressure-can-be-implemented-at-any-temperature_fig10_265108369 (åpnet 16. mai 2023).
- [77] «Bunker Prices Worldwide». <http://www.bunkerportsnews.com//BunkerPrices.aspx?ElementID=26f6ad53-6e88-4490-8f2b-a1cc4925f82c> (åpnet 16. mai 2023).
- [78] B. Amundsen, «Nå er vindkraft den billigste energi-formen i Norge», 22. september 2022. <https://forskning.no/finans/na-er-vindkraft-den-billigste-energiformen-i-norge/2081656> (åpnet 2. mai 2023).
- [79] Global and regional LNG markets, «Spot LNG price assessments for EU LNG imports – May 02 | Global LNG Hub», 3. mai 2023. <https://globallnghub.com/report-presentation/spot-lng-price-assessments-for-eu-lng-imports-may-02> (åpnet 2. mai 2023).
- [80] T. Fiksdal, «Hydrogen i Norge: TRL, ammoniakk, infrastruktur og prising», 24. februar 2023.
- [81] «Green Ammonia – An Alternative Fuel», *FutureBridge*, 3. november 2022. <https://www.futurebridge.com/industry/perspectives-energy/green-ammonia-an-alternative-fuel/> (åpnet 16. mai 2023).
- [82] M. Héder, «From NASA to EU: The Evolution of the THR Scale in Public Sector Innovation», *Innov. J. Public Sect. Innov. J.*, bd. 22(2), nr. 3, 2017, Åpnet: 15. april 2023. [Online]. Tilgjengelig på: https://web.archive.org/web/20171011071816/https://www.innovation.cc/discussion-papers/22_2_3_heder_nasa-to-eu-trl-scale.pdf

- [83] Innovasjon Norge, «Technology Readiness Level (TRL)», 16. mai 2023.
<https://www.innovasjon norge.no/no/tjenester/innovasjon-og-utvikling/finansiering-for-innovasjon-og-utvikling/finansiering-av-innovasjonsprosjekt/technology-readiness-level-trl/>
(åpnet 16. mai 2023).
- [84] «Technology Readiness Level (TRL)».
<https://www.innovasjon norge.no/no/tjenester/innovasjon-og-utvikling/finansiering-for-innovasjon-og-utvikling/finansiering-av-innovasjonsprosjekt/technology-readiness-level-trl/>
(åpnet 16. mai 2023).
- [85] «Natural Gas Conversion Chart», *H-Energy*. [henergy.com/conversion](https://www.henergy.com/conversion) (åpnet 12. mai 2023).
- [86] «LNG Information Paper No. 1». The international Group of Liquefied Natural Gas Importers, 28. august 2009.
- [87] «Emission factors used in the estimations of emissions from combustion». Statistisk Sentralbyrå SSB, 2016. Åpnet: 15. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på:
https://www.ssb.no/_attachment/288060/binary/93858?_version=539789
- [88] *Proposal for a COUNCIL DIRECTIVE restructuring the Union framework for the taxation of energy products and electricity (recast)*. 2021. Åpnet: 16. mai 2023. [Online]. Tilgjengelig på:
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0563>
- [89] Det Norske Veritas group, «LNG as Marine Fuel», *DNV*, 16. mai 2023.
<https://www.dnv.com/Default> (åpnet 16. mai 2023).
- [90] A. Memija, «Edda Wind Takes Delivery of Hydrogen-Ready SOV Destined for Seagreen», *Offshore Wind*, 26. oktober 2022. <https://www.offshorewind.biz/2022/10/26/edda-wind-takes-delivery-of-hydrogen-ready-sov-destined-for-seagreen/> (åpnet 16. mai 2023).
- [91] «6 Fuel Containment System». <https://www.imorules.com/GUID-0B9B8E81-D896-4ABE-BA39-2FD315A1754F.html> (åpnet 19. mai 2023).

Liste over Figurer

Figur 1: FNs bærekraftsmål 7, 13, 14.....	1
Figur 2: Breeze Ship Design	3
Figur 3: SOV designtegning.....	7
Figur 4: Koblingsskjema. Tilrettelagt for brenselceller.....	7
Figur 5: LiFePO battericelle.....	13
Figur 6: Utslipp ved batteriproduksjon [18].....	14
Figur 7: Offshore ladeløsning.....	15
Figur 8: Maskinrom diesel-elektrisk vs batteri.....	16
Figur 9: Type IV sylindre fra Hexagon Purus	22
Figur 10: Eksempel på stabling av hydrogensylindrer	22
Figur 11: Skisse av PEMBC [57].....	28
Figur 12: Skisse av FOBC [59]	30
Figur 13: MDO-priser April 2023 [77]	41
Figur 14: Resultater	53
Figur 15: Fremtidige resultater.....	59

Liste over Tabeller

Tabell 1: Informasjon Z-4060	6
Tabell 2: Energiforbruk SOV	6
Tabell 3: Dimensjoner på en 40 fot container	22
Tabell 4: Oversikt over typer brenselceller	27
Tabell 5: Tilgjengelige reduksjonsmetoder for utslipp fra skip	35
Tabell 6: Gjennomsnittlig energiforbruk pr dag.....	37
Tabell 7: Operasjon	39
Tabell 8: Økonomi	41
Tabell 9: TRL kriterier	43
Tabell 10: TRL	43
Tabell 11: HMS	44
Tabell 12: Fare-kategorikode	45
Tabell 13: Faresetningskode.....	45
Tabell 14: Piktogram.....	45
Tabell 15: Utslipp.....	47
Tabell 16: Vurdering	48
Tabell 17: Operasjon - resultat	49
Tabell 18: Økonomi - resultat	50
Tabell 19: TRL - resultat.....	50
Tabell 20: HMS - resultat.....	51
Tabell 21: Utslipp - resultat.....	52
Tabell 22: Vurdering - resultat	53

Vedlegg

Vedlegg 1

Bachelor Breeze Tabellrangering

Leveret som Excel-fil:

Bachelor Breeze Tabellrangeringer.xlsx

Vedlegg 2

General Arrangement

Leveret som PDF-fil:

10008-101-001 General Arrangement rev. 2-kopi

Vedlegg 3

Fuel Alternatives SOV

Leveret som PowerPoint-fil:

10226 Z 4060 SOV - Fuel alternatives rev. 3.pptx

Vedlegg 4

REGULATION (EC) No 1272/2008 (HMS Tabell)

Leveret som PDF-fil:

CELEX_32008R1272_EN_TXT

Vedlegg 5

Emission factors fra Breeze

Leveret som PDF-fil:

Emission factors.pdf

Vedlegg 6

Corvus Energy Batteripakker og H2

Leveret som PDF-fil:

Corvus Energy_OSJ_London-23

Vedlegg 7

10226 Z 4060 SOV generell informasjon

Leveret som PDF-fil:

10226 Z 4060 SOV.pdf

Vedlegg 8

Maritime Fuel Cell systems

Leveret som PDF-fil:

20230112-FC Slides - released to sale

Vedlegg 9

SOV General Arrangement Battery driven

Leveret som PDF-fil:

10319-101-001 General Arrangement - rev 0.pdf

Vedlegg 10

Fuel cons Breeze

Leveret som PNG-Bilde:

Fuel cons Breeze

Vedlegg 11

Utslippstall fra Breeze

Leveret som PNG-Bilde:

Utslippstall.png

