

Forslag til
Drivstoffsystem for
Lavutslippsfartøy

Anders Joseph Tysse

Isak Øvsthus Jordal

Jedrzej Rutkowski

Bacheloroppgave i Marinteknikk

Bergen, Norge 2022



Forslag til
Drivstoffsystem for
Lavutslippsfartøy

Anders Joseph Tysse

Isak Øvsthus Jordal

Jedrzej Rutkowski

Institutt for Maskin- og Marinfag

Høgskulen på Vestlandet

NO-5063 Bergen, Norge

IMM 2022-M38

Høgskulen på Vestlandet
Institutt for Maskin- og Marinfag
Inndalsveien 28,
NO-5063 Bergen, Norge

Cover and backside images © Norbert Lümmer

English title: Proposal for Fuel System Within
a Low Emission Vessel

Forfatter(e), studentnummer: Anders Joseph Tysse-585046
Isak Øvsthus Jordal-585049
Jedrzej Rutkowski-585050

Studieprogram: Marinteknikk

Dato: Mai 2022

Rapportnummer: IMM 2022-M 38

Veileder ved HVL: Gloria Stenfelt

Uppdragsgiver: Salt Ship Design

Oppdragsgivers referanse: Trym Sandvik Steinshamn

Antall vedlegg levert digitalt: 6

Forord

Denne oppgaven var skrevet av studenter fra Institutt for Marin- og Maskiningeniører på Høgskulen på Vestlandet (HVL), som en del av Bachelorprogrammet Marinteknikk. Oppgaven ble tildelt gruppen på vegne av Salt Ship Design AS, som også bidro med oppgavens eksterne veileder, Trym Sandvik Steinshamn. Den interne veilederen for denne oppgaven er Førsteamanuensis Gloria Stenfelt.

Vi har lyst å takke veilederne våre, Gloria og Trym, for deres veiledning gjennom denne oppgaven. Ekstra takk til Jonathan Økland Torstensen, Velaug Myrseth Oltedal, Peter Koch og Jan Michael Simon Bartl for deres kunnskap og bidrag til oppgaven.



Sammendrag

Maritim sektor er essensiell i dagens verdensøkonomi, hvor den står for omlag 80-90% av verdenshandelfrakten. Med dette medføres også store globale klimagassutslipp. Med utslippsreduksjon sentralt i FNs fremtidsrettede bærekraftsmål, har flere maritime organisasjoner nå rettet fokus mot inntredelsen av lav-/nullutslipps fartøy innenfor sjøfarten. Med dette medfølger hyppigere utvikling av lavutslipps skipsteknologi, hvor stadig flere prosjekt rettet mot utslippsreduksjon blir prioritert av maritime aktører.

Opgaven undersøker muligheten for å installere et lavutslipps drivstoffsystem basert på en eksisterende brønnbåt designet av Salt Ship Design AS. Ved innføring av ny teknologi i skip, må grundige sikkerhetsprotokoller vektlegges. Disse protokollene baseres på klaseselskap sine regelverk og håndbøker for konstruksjon og installering av maskineri i maritim sammenheng. Undersøkelsen av anvendelsen bak utslippsreduert skipsteknologi krever dermed en grundig gjennomgang av påbudte sikkerhetsfaktorer.

Brenselceller er kjent teknologi med stor potensiale som energikilde for maritime fartøy, hvor flere skipsrederi ser på muligheten for installasjon av slik teknologi i eksisterende skip. En brenselcelle produserer kjemisk elektrisitet ved jevn innstrømning av drivstoff og det vil ikke føre til klimagassutslipp. I likhet med forbrenningsmotorer, finnes det forskjellige typer brenselceller som drives på forskjellige typer drivstoff.

En reduksjon i utslipp kan også oppnås ved anvendelsen av såkalte dual-fuel motorer. Slike motorer reduserer utslipp av miljøskadelige klimagasser ved å kombinere forskjellige drivstoffalternativ, som for eksempel LNG og metanol. Dette alternativet vil kun medføre en reduksjon i utslipp, og skadelig eksos vil fortsatt slippes ut i atmosfæren. Dermed vil ikke denne teknologien bli ansett som utslippsfritt, slik som brenselceller.

Hydrogen, ammoniakk og metanol er de alternative drivstoffene det er vanligst å sammenlikne når det diskuteres fremtidig maritim teknologi. Anvendeligheten bak disse som drivstoffkilde blir nøye sammenliknet i oppgaven, hvor resultatet baseres på lagring, effektivitet og sikkerhet. Undersøkelsen viste at for hydrogen og ammoniakk, var brenselceller svært effektive, men ved å ta i bruk metanol som drivstoffalternativ må en forbrenningsmotor brukes.

Abstract

The maritime sector is essential for the world economy, as it accounts for approximately 80-90% of world trade. This results in profound greenhouse gas emissions. Emission reduction is a central part of UN's future-oriented sustainability goals. Several maritime organizations are now focusing on implementing low-/zero emission technology in existing vessels. This contributes to accelerating the development of low emissions ship technology, where more projects aiming at emission reduction are prioritized by prominent companies within the maritime sector.

This thesis investigates the applicability behind installation of low-emission propulsion systems, based on an existing well-boat designed by Salt Ship Design AS. With the implementation of new ship technology, a thorough investigation into safety protocols is emphasized. These protocols are based on classification companies' regulations and manuals for construction and installation of machinery for maritime usage. The examination of the applicability of emission-reducing ship technology requires a thorough review of mandatory safety protocols.

Fuel cells are well-known technology with great potential as an energy source for maritime vessels, thus more shipowners are now investigating the possibility of using this technology in existing ships. A fuel cell produces electricity through a steady intake of fuel, with no greenhouse gases emitted. Similarly to combustion engines, different types of fuel cells are fueled by different fuel alternatives.

A reduction in emissions can also be achieved through the use of so-called dual-fuel engines. Such engines reduce emissions of environmentally harmful greenhouse gases by combining different fuel alternatives, such as LNG and methanol. Dual-fuel engines will only result in a reduction of emissions, as harmful greenhouse gases will continue to be released into the atmosphere. Thus, this technology will not be considered emission-free.

In addition to the previously mentioned technology, hydrogen, ammonia and methanol are fuel alternatives most commonly compared when future marine technology is discussed. The applicability behind these as a fuel source is extensively analyzed through this thesis, where the result is based on storage-, efficiency- and safety-factors. The study concluded fuel cells fueled by hydrogen or ammonia were highly efficient, and that for the maritime fuel application of methanol, a dual-fuel combustion engine is the most efficient option.

Innhold

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Figurer	X
Tabeller	XII
1 Innledning	1
2 Metode	3
2.1 Reguleringer	3
2.2 Alternative drivstoff	5
2.2.1 Hydrogen	5
2.2.2 Ammoniakk	7
2.2.3 Metanol	10
2.2.4 Oppsummering av drivstoff	12
2.3 Energikonvertering	13
2.3.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell	13
2.3.2 Solide Oxide Fuel Cell	15
2.3.3 Dual-Fual forbrenningsmotor	17
2.3.4 Oppsummering av energikonvertering	18
2.4 Sikkerhet og håndtering	20
2.5 Undersøkelse av system for brønnbåt	22
2.5.1 Driftsprofil og energibehov	22
2.5.2 Drivstoff behov	23
2.5.3 Valg av tank	24
2.5.4 Frihetsgrader og Stabilitet	26
2.5.5 Vektendringer	29
3 Design	31
3.1 Faresoner og Systemkomponenter	31
3.1.1 Faresoner	31

3.1.2	Tank Connection Space	33
3.1.3	Airlock og Hatch	33
3.1.4	Bunkring	34
3.1.5	Dobbelveggede rør	35
3.1.6	Ventiler	35
3.1.7	Boil-Off Gas Håndtering	35
3.2	Hydrogen PEMFC System	36
3.2.1	Tankrom	36
3.2.2	Drivstoffhåndtering	37
3.2.3	Propulsjonsrom	38
3.2.4	Inertering	39
3.2.5	Ventilasjonsmast	40
3.3	Ammoniakk SOFC System	41
3.3.1	Tankrom	41
3.3.2	Drivstoffhåndtering	42
3.3.3	Propulsjonsrom	43
3.3.4	Inertering	44
3.3.5	Ventilasjonsmast	44
3.4	Metanol Dual Fuel System	45
3.4.1	Tankrom	45
3.4.2	Drivstoffbehandling	46
3.4.3	Propulsjonrom	47
3.4.4	Inertering	47
3.4.5	Tilleggsutstyr	48
3.4.6	Eksosmast	48
4	Resultat	49
4.1	Forslag til Lavutslipps Drivstoffsystem	49
4.1.1	Hydrogen	49
4.1.2	Ammoniakk	51
4.1.3	Metanol	53
4.2	Stabilitetskontroll på Vektendringer	54
5	Diskusjon	55

5.1	Fremtidige Endringer i Krav fra Klasseselskap	55
5.2	Unøyaktigheter i Stabilitetsjekk	55
5.3	Avgjørende Faktorer for Implementering	56
6	Konklusjon	58
7	Videre arbeid	59
	Referanser	60
	Vedlegg	69

Figurer

1	Eksempel på brønnbåt designet av Salt	2
2	Illustrasjon av hydrogenmolekyl	5
3	Illustrasjon av ammoniakkmolekyl	8
4	Illustrasjon av metanolmolekyl	10
5	Energiverdier for drivstoffalternativer	12
6	Skissering av PEMFC basert på skisse fra ABB	14
7	Skisse av SOFC	16
8	Dual-Fuel metanol motor fra Man Energy	17
9	Type-C tank	24
10	Komprimert tanksystem fra Hexagon	24
11	Utvidelse av eksisterende tank gitt i mm	25
12	Frihetsgrader for skip	26
13	Stabilitets punkt for skip, GM, B, G, M	27
14	Visualisering av GM	28
15	Fare soner - Hazardous-Areas markeringer i sonekart	32
16	Skisse av soner for ventilasjons innløp og utløp	32
17	Praktisk anvendelse av soner	33
18	Eksempel på airlock og hatch	34
19	Skisse av bunkringstasjon	34
20	Skisse av BOG behandling	35
21	Hydrogen tankrom	36
22	Hydrogen drivstoffhåndtering	37
23	Hydrogen propulsjonsrom	38
24	Inertgassystem for PEMFC	39
25	Ventilasjonsmast for PEMFC system	40
26	Tankrom for ammoniakk system	41
27	Drivstoffhåndtering for ammoniakk system	42
28	Propulsjonsrom for ammoniakk system	43
29	Ventilasjonsmast for SOFC system	44
30	Tankrom for metanol system	45
31	Drivstoffbehandlingsrom for metanol system	46
32	Propulsjonsrom for metanol system	47

33	Produksjonsrom for inertgass	47
34	Fuel-Drip for metanol system	48
35	Eksosmast for metanol system	48
36	Hydrogen system forslag	49
37	Brenselcellecontainer i propulsjonsrom fra top	50
38	Brenselcellecontainer i propulsjonsrom fra siden	50
39	Amoniakk system forslag	51
40	Radius for utslipp av ammoniakk gjennom mast gitt i cm	52
41	Metanol system forslag	53
42	Tankendring i DF system	54

Tabeller

1	Spesifikk energi og energitetthet for Hydrogen ved ulike tilstander	6
2	Fargekode for produksjon av hydrogen	7
3	Spesifikk energi og energitetthet for Ammoniakk i ulike tilstander	8
4	Fargekode for produksjon av ammoniakk	9
5	Spesifikk energi og energitetthet for Metanol	10
6	Modenhet av energikonvertering	18
7	Oversikt av brennbarhet og giftighet til de ulike stoffene	20
8	Dimensjoner til skipet	22
9	Driftsprofil for brønnbåt	22
10	Totalt drivstoffbehov for en periode på 13 dager	23
11	Vekt av utstyr	29
12	Total vekt av drivstoff for operasjons periode på 13 dager	29
13	Vekt av system alternativ	30
14	Totalvektdifferanse ved implementering av systemalternativ	30

Nomenklatur

Enheter	
%	prosent
BAR	enhet for trykk
°C	grader celcius
mm	millimeter
cm	centimeter
m	meter
m ³	kubikkmeter
kg	kilogram
Tonn	1000 kg
knop	en nautisk mil per time
kW	Kilowatt
kWh	kilowatt timer
MW	megawatt
ppm	parts per million
t	timer
vol %	volum

Forkortelser	
BOG	Boil off gas
BOR	Boil off rate
BV	Bureau Veritas
CFD	Computational Fluid Dynamics
DF	Dual Fueal
DMFC	Direct Membrane Fuel Cell
DNV	Det Norske Veritas
DWG	Autocad drawing file
FC	Fuel Cell
FN	De Forente Nasjoner
iht	I henhold til
PEM	Proton exchange membrane
PEMFC	Proton exchange membrane fuel cell
HT-PEMFC	High temperature Proton exchange membrane fuel cell
HZ	Hazardous zone
HZ0	Hazardous zone 0
HZ1	Hazardous zone 1
HZ2	Hazardous zone 2
IMO	International Maritime Organization
LNG	Liquefied Natural Gas
MGO	Marine Gas Oil (ISO8217)
P/V	Pressure Valve
PDF	Portable Document Format
SCR	Selective Catalytic Reduction
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SOLAS	Safety of Life at Sea
TCS	Tank Connection Space

Kjemiske symbol	
aq	aqueous
C-H ₂	Komprimert Hydrogen
CH ₃ OH	Metanol molekyl
CO	Karbon monoksid
CO ₂	Karbon dioksid
e	elektron
g	gass
H	Hydrogenatom
H ₂	Hydrogen molekyl
H ₂ O	Vann molekyl
l	Liquid
L-H ₂	Flytende Hydrogen
N ₂	Nitrogen gass
NH ₃	Amoniakk molekyl
NO _x	Nitrogenoksid
O ₂	Oksygen gass
SO _x	Svoveloksid
Variabler	
B	Oppdriftspunkt
B'	Nytt oppdriftspunkt
E _{skip}	energi behov for skip
E _{tot}	totalt energibehov
G	Tyngdepunkt
K	Kjøøl
M	Metasenter
BM	Avstand fra oppdriftspunkt til metasenter
GM	Avstand fra tyngdepunkt til metasenter
KB	Avstand fra kjøøl til oppdriftspunkt
KG	Avstand fra kjøøl til tyngdepunkt
KM	Avstand fra kjøøl til metasenter
I _x	Andrea arealsmoment
M _i	Masse andel
P	Effekt
u	Energitetthet
V _{drivstoff}	Volum av drivstoff i kubikk meter
V _i	Neddykket volumandel
x	Avstand på x akse
y	Avstand på y akse
z	Avstand på z akse
e	spesfikk energi
η	Virkningsgrad
∇	Volum deplasemang
θ	Krengvinkel
ρ	Massetetthet
ρ _{sjø}	Massetetthet av sjø
φ	Trimvinkel
Ψ	Gir vinkel

1 Innledning

Et av målene De Forente Nasjoner (FN) har satt for å bekjempe klimaendringer er å redusere utslippet av drivhusgasser. Norges svar på dette var å øke avgiften på klimagassutslipp, samt redusere avgiftene for klimavennlige løsninger. Handlingsplanen til regjeringen som ble lagt fram i 2021 har som mål å gjøre Norge til et lavutslipps samfunn innen 2050. For å nå dette skal utslippene reduseres med 95% i forhold til utslippsnivåene fra 1990 [1]. Den globale sjøfarten står for 2-3% av all klimagassutslipp, og reduksjon av utslipp i denne sektoren vil kunne bidra til bekjempelsen av global oppvarming [2].

I 2019 vedtok regjeringen at utslippene fra innenriks shipping skal halveres innen 2030 [3]. Med slike utslippskrav står skipsnæringen ovenfor en stor utfordring i nærmeste fremtid, hvor karbonbasert drivstoff må fases ut med nye og grønnere alternativ. Mellom 80- og 90% av all handel fraktes til sjøs, hvor den norske maritime sektor er en stor bidragsyter til det internasjonale handelssamfunnet [4]. Norsk shipping står for omlag 2% av den samlede maritime verdenstonnasjen, og består av over 1700 skip som tilsammen utgjør den fjerde største flåteverdien i verden [5]. For å halvere utslippene på disse skipene må ny teknologi utvikles og innføres raskt hvor hovedfokuset ved drivstoffsystemene må være bærekraftighet.

International Maritime Organization (IMO) er en datter organisasjon av FN, som blant annet bestemmer utslippsgrenser innenfor sjøfart. I januar 2020 reduserte IMO utslippsgrensen for svoveloksider (SO_x) fra 0.5% til 0.1%. Denne reduksjonen ble en del av bestemmelsene som gjelder for skip opererende på den Baltiske sjøen og Nordsjøen [6]. Norge har også forpliktet seg til store nitrogenoksid (NO_x) reduksjoner ved å signere Göteborgprotokollen i 1990. Den maksimale utslippsgrensen av NO_x gasser staten forpliktet seg til var 156 000 tonn per år [7]. Dette har ført til en økning i NO_x avgifter satt av regjeringen.

Aktører som står bak maritim transport og industri følger krav satt av IMO og Göteborgprotokollen. Flere aktører investerer i utvikling av miljøvennlige fartøy som tar i bruk miljøvennlige drivstoff. Salt Ship Design er et eksempel på privat design firma som følger det grønne skiftet. Bedriften designer skip til selskap innenfor akvakultur og offshorevirksomhet, samt private kunder. Bedriften står for designprosess og koordinering mellom kunde, verft og klassifiserings byrå. Kundene som direkte blir truffet av regjeringen sine reguleringer fokuserer på økonomiske og miljøvennlige alternativ. Med dette utvikler Salt flere grønne løsninger og investerer i nye og innovative prosjekt. Salt Ship Design driver den maritime sektoren mot grønnere framtid med “*Passion for ship design*”[8].

Salt Ship Design har kontorer på Leirvik - Norge, Gdynia - Polen, og Novi Sad - Serbia. Med Regjeringen sine krav om å halvere utslipp av innenlands skipsfart innen 2030, må prominente aktører se på løsninger som kan tas i bruk med dagens teknologi. Skipsdesignfirma jobber nå med å omstille eksisterende design for å gi skipseierne et innblikk i hvilken teknologi som er den beste løsningen, med hensyn på kostnad, effektivitet, utslipp og tilgjengelighet bak omstillingsprosessen.

Målet med denne oppgaven er å bestemme det ideelle lavutslippsdrivstoffsystemet som kan anvendes i en brønnbåt designet av Salt. I bakgrunnen av dette ligger gjennomgang av Bureau Veritas (BV) og Det Norske Veritas (DNV) sine lover og regler. Det vil bli utført en sammenlikning av kraftytelsen og virkningsgrad, samt hvilket drivstoffalternativ som er mest hensiktsmessig å plassere i brønnbåten. Grunnlaget til drivstoff alternativ som blir undersøkt i denne rapporten finner man i *DNV maritime forecast 2050* gitt ut av DNV [9]. Oppgaven diskuterer bruk av ammoniakk, hydrogen og metanol som drivstoffalternativ. Denne artikkelen er et viktig fundament for dette studiet.



Figur 1: Eksempel på brønnbåt designet av Salt [8]

2 Metode

Metoden tar for seg en gjennomgang av reguleringer først. Det er for å gi en gjennomgang av grunnleggende undersøkelser som vil følge resten av metoden. Det vil også bli utført en litteraturlanalyse av hvert drivstoff og energikonvertering for å ta de i bruk. Denne delen av metoden vil basere seg på vitenskapelige tekster og studier for å gi en forståelse for de lovene og reglene som eksisterer. Det vil videre bli gjort en case-studie av et system for en brønnbåt der det grunnleggende arbeidet som ble utført tidligere i metoden vil bli satt sammen. Denne delen av metoden vil basere seg lite på ny teori. Metoden derimot kan gi en forståelse for hvordan lignende prosjekt kan utføres.

2.1 Reguleringer

Ettersom fokuset for oppgaven er å ta i bruk alternativt drivstoff er det viktig å ta hensyn til de reguleringer som eksisterer og er pålagt å følge. IMO er hovedorganet av disse reguleringene og organisasjonen har klare retningslinjer for bruk av drivstoff i marin sammenheng. Det eksisterer også underorgan som skal utføre det regulerende arbeidet. *Safety Of Life At Sea (SOLAS)* er en konvensjon stiftet av IMO, hvor målet til SOLAS er å spesifisere minimumskrav for konstruksjoner, utstyr og operasjon av skip for å oppnå et høyt nivå av sikkerhet. Standardene *International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low Flashpoint Fuels (IGF Code)* [10] og *International Code for the Construction and Equipment of Ships and Carrying Liquefied Gases In Bulk (IGC Code)*[11] er en del av arbeidet utført av SOLAS, og tar for seg bruk og lagring av gasser [12].

IGF Code er en standard tilegnet fartøy som tar i bruk alternative drivstoff, og sørger for at sikkerheten og påliteligheten tilsvarer samme nivå som eksisterende drivstoffmuligheter. IGF Code fokuserer på naturgass og annen alternativ drivstoff vil bli klassifisert innenfor standardens kapittel 2.3 *Alternative Design*[10]. Standarder som tar for seg bruk av hydrogen, ammoniakk og metanol som drivstoffalternativ er under utvikling [10]. Den fungerer likevel som en veiviser for bruk av alternativt drivstoff, men det krever alternativ godkjenning for systemet. IGC Code tar for seg sikkerheten ved lasting av gasser. Kapittel 16 i IGC-standardens beskriver muligheten for å bruke last som drivstoff, med unntak av giftig last. Det betyr at IGC ikke tillater bruk av lastet ammoniakk som drivstoff. Beskrivelser for hvordan ammoniakk skal lagres kan bli tatt i bruk for å designe et ammoniakk system [11, 13].

Bureau Veritas (BV) er et klaseselskap som baserer sine reguleringer på IGF og IGC. BV er et av de ledende klassifikasjons selskapene i Europa. Selskapet tester og klassifiserer produkt og løsninger

på et bredt spekter av fagfelt. Det er produsert dokument fra BV som vil være relevant for oppgaven. NR529 *Gas Fueled Ships* er for skip som bruker gass og baserer seg på det som blir bestemt i IGF Code [14]. Som nevnt tidligere er ikke ammoniakk spesifisert i IGF Code, og BV har produsert regelverket NR671 *Ammonia-fuelled Ships – Tentative Rules* som tar for seg ammoniakk som drivstoff [15]. For bruk av metanol er det regelverket NR670 *Methyl/ethyl alcohol Fuelled Ships* som viser til hvordan systemet skal designes [16]. For bruk av brenselceller er det regelverket NR547 *Ships using Fuel Cells* som følges [17]. NR547 brukes i samsvar med NR529, NR670, og NR671, avhengig av hvilket drivstoffalternativ brenselcellen bruker [17].

Regelverkene til BV har hovedfokus på å opprettholde sikkerheten og integriteten til skipet. Som nevnt omhandler dette plassering av brenselceller, men spesifiserer også krav til gasstette komponenter, ventilasjon, rominndeling og materialbruk. Dette er for å forhindre sprekker i rørsystem og lekkasjer videre i skipet.

Det Norske Veritas er et klaseselskap som fungerer på samme premisser som BV. De har egne retningslinjer som kan sammenlignes med BV sine ettersom begge følger kravene satt av IMO og SOLAS. I tillegg har DNV produsert to håndbøker for bruk av hydrogen og ammoniakk, som har hensikt å vise til kravene som må følges ved klassifisering av nye skip. *Handbook for Hydrogen-Fuelled Vessels* fokuserer på å gjøre design av nye hydrogendrevne skip så sikkert som mulig [18]. *Ammonia as a Marine Fuel Safety Handbook* baserer seg på det samme prinsippet som håndboken for hydrogen der sikkerhet er i hovedfokus [13]. Håndbøkene er et viktig steg for hurtig innføring av hydrogen og ammoniakk som drivstoffalternativer for marin skipsfart.

2.2 Alternative drivstoff

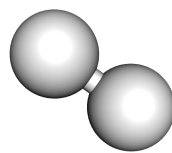
For å utvikle drivstoffsystem er det nødvendig med en teoretisk analyse av hvert drivstoffalternativ. Undersøkelser som blir utført undersøker den kjemiske oppbyggingen til drivstoffene som påvirker utslipp, hvordan de forskjellige drivstoffene blir lagret og hvordan de blir produsert.

Det er gjort undersøkelser av energi innholdet til hvert drivstoff. Da er det viktig å forstå hvilke symbol som blir brukt. For tetthet er det ρ som viser masse tettheten, denne kan variere med trykk og temperatur. Den spesifikke energien, e , viser til energiinnholdet i kWh/kg, denne holder seg konstant. For å finne energitettheten, u , kan spesifikk energi og tetthet brukes. Energitettheten vil være definert som kWh/m³. I Ligning 1 er det mulig å observere hvordan energitetthet blir regnet ut:

$$u = \rho e \quad (1)$$

2.2.1 Hydrogen

Hydrogen er det rikeligste grunnstoffet som eksisterer ettersom hydrogenatomet kun inneholder ett proton og elektron. Dette gjør at hydrogen reagerer veldig lett med andre grunnstoff for å danne bindinger. De vanligste og mest kjente bindingene er vannmolekyl og organiske bindinger [19]. I drivstoff sammenheng derimot er det rene hydrogenmolekyl som blir tatt i bruk i form av gass. Hydrogenmolekyl består av kun to hydrogenatomer som vist i Figur 2.



Figur 2: Illustrasjon av hydrogenmolekyl

Hydrogen har veldig høy spesifikk energi, 33.3 kWh/kg, men veldig lav volumetrisk energitetthet, 2.8 kWh/m³, på grunn av sin lave tetthet. Dette må endres på for at hydrogen skal vurderes som drivstoff. Det blir gjort i lagringsprosessen der hydrogenet enten blir lagret under høy trykk eller lave temperaturer for å øke tettheten. Komprimert hydrogen, C-H₂, blir generelt lagret på 350 bar eller 700 bar.

Energitettheten for 350 bar vil være lavere enn ved 700 bar, og derfor vil ikke hydrogen lagret på 350 bar bli undersøkt videre. For lagring av flytende hydrogen ved nedkjøling, L-H₂, blir det lagret på -253°C [20, 21]. Tabell 1 under viser tetthet, spesifikk energi og energitetthet for hydrogen i forskjellige tilstander.

Tilstand	Atmosfærisk trykk (@ 1 bar) [19, 22]	C-H ₂ (@ 700 bar) [22, 23]	L-H ₂ [22, 23]	Enhet
Tetthet, ρ	0.084	38	70.8	kg/m ³
Spesifikk energi, e	33.3	33.3	33.3	kWh/kg
Energitetthet, u	2.8	1,265.4	2,357	kWh/m ³

Tabell 1: Spesifikk energi og energitetthet for Hydrogen ved ulike tilstander

Lagring av hydrogen

Lagringen av hydrogen kommer med en del utfordringer. Bruken av komprimert og flytende hydrogen vil ha forskjellige utfordringer ettersom det er en stor forskjell på lagringsmulighetene.

Komprimert hydrogen har ingen spesifikk standard når det skal lagres som drivstoff for skip, men det kan baseres på lagring av komprimert naturgass, som beskrevet i *Handbook for Hydrogen-Fuelled Vessels* av DNV [18]. Trykktankene må ikke reagere med hydrogen for å forhindre brudd i tanken. Trykktankene vil ikke ha stor lagringskapasitet grunnet det store trykket, og kombinert med lav energitetthet må det brukes flere enn én tank i et drivstoffsystem [21, 24, 25]. Mengden tanker vil øke antall ventiler som kan være problematisk ved kartlegging av potensielle lekkasjer.

Flytende hydrogen må lagres ved en temperatur på -253°C og et trykk på 1-10 bar. L-H₂ kan lagres på større drivstofftanker enn ved C-H₂, ettersom det ikke vil være behov for høyt trykk i tanken [21]. I store kryo lagrede tanker vil det oppstå Boil-Off gas (BOG) som vil øke trykket i tanken. BOG er fordamping av flytende hydrogen som oppstår på grunn av temperaturforskjellene mellom væske og omgivelser [26]. Boil-Off raten (BOR) kan antas å være 0.1-0.3% av volumet til væsken per dag. BOR vil variere ut ifra flere faktorer som isolering, tankstørrelse og design av tanken [27]. BOG håndtering er nødvendig for å redusere trykket i tanken slik at det ikke skal oppstå problemer med for høyt trykk. Det eksisterer flere metoder for å oppnå dette. BOG kan enten bli nedkjølt og pumpet tilbake til tanken eller bli tatt i bruk som drivstoff for mindre energikrevende prosesser ombord [26, 27].

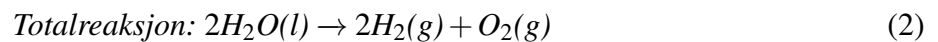
Produksjon av hydrogen

Hydrogen kan bli sett på som en energibærer på samme måte som elektrisitet ettersom de begge blir framstilt av energioverføring. Dette kan gjøres gjennom elektrolyse eller ved bruk av fossile kilder [23, 28]. Fargekoden beskriver hvor miljøvennlig produksjonen og produktet er, og bestemmes ut ifra hvordan produksjonsprosessen utføres. Eksempelvis er fargen grønn der hydrogen er lagd av ren fornybar energi og fargen brun er hydrogen lagd ved bruk av fossile energikilder [29]. Tabell 2 under viser fargekoder for hydrogenproduksjon.

Brun	Grå	Blå	Gul	Grønn
Hydrogen produsert gjennom gassifisering av fossile kilder	Hydrogen produsert av naturgass der karbonet ikke blir lagret	Hydrogen produsert av fossile kilder der karbonet blir lagret	Hydrogen produsert gjennom elektrolyse der opphavet til elektrisiteten er blandet	Hydrogen produsert gjennom elektrolyse der det kun er brukt fornybar energi

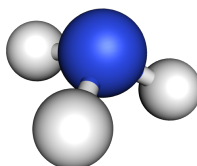
Tabell 2: Fargekode for produksjon av hydrogen

For fremtidsrettede formål er det grønn hydrogen som vil være i fokus. Grønn energi vil være laget av fornybar kilder som vann- og vindkraft. Energien vil bli brukt til å drive elektrolyse av vann for å produsere hydrogen og oksygen. Denne prosessen vil ikke føre til klimagassutslipp og er den reneste måten å produsere hydrogen [30]. Ligning 2 viser den totale reaksjonsligningen for produksjon av hydrogen ved bruk av elektrolyse.



2.2.2 Ammoniakk

Ammoniakk er et uorganisk stoff som er mulig å finne naturlig i både planter og dyr. Når ammoniakk er alene i gassform er den usynlig og ekstremt giftig. Ammoniakk vil i tillegg lett binde seg til vann for å danne en etsende løsning som kan skape ubehag ved hudkontakt. Selv om ammoniakk er farlig å håndtere er det likevell svært viktig for industri og jordbruk, og har derfor blitt produsert i lengre tid. I nyere tider har den blitt sett på som en lovende energibærer som kan redusere klimautslipp [31, 32]. Det kjemiske symbolet for ammoniakk er NH_3 som viser til at oppbyggingen består av et nitrogenatom og tre hydrogenatomer. Innholdet av nitrogen vil ha betydning for produkt som oppstår når det blir brukt i en reaksjon. Molekylet for ammoniakk er presentert i Figur 3.



Figur 3: Illustrasjon av ammoniakkmolekyl

Interessen for bruken av ammoniakk kommer av at den har en høyere energitetthet enn hydrogen samtidig som det er en karbonfri energikilde. På samme måte som hydrogen har ikke ammoniakk høy energitetthet ved atmosfærisk tilstand. Fordelen med ammoniakk over hydrogen er at det ikke er nødvendig med like høyt trykk eller lav temperatur for å oppbevare den. Ammoniakk blir lagret ved 10 bar eller -34°C for å gjøre den flytende og da øke tettheten. Det kan også lagres under kombinerte forhold for trykk og temperatur [33, 34]. Den spesifikke energien er konstant som fører til at en økt tetthet vil gi en økt energitetthet. Tabell 3 under viser energitetthet og spesifikk energi til ammoniakk i atmosfærisk og lagret tilstand.

Tilstand	Atmosfærisk trykk (@ 1 bar) [33]	NH ₃ (cryo eller komprimert) [33, 35]	Enhet
Tetthet, ρ	0.73	682	kg/m ³
Spesifikk energi, e	5.22	5.22	kWh/kg
Energitetthet, u	3.81	3,530	kWh/m ³

Tabell 3: Spesifikk energi og energitetthet for Ammoniakk i ulike tilstander

Problem som kan oppstå ved bruk av ammoniakk er relatert til innholdet av nitrogen i stoffet. Denne vil gi mulighet for økt dannelse av NO_x gasser ved en forbrenningsprosess [34]. Ved bruk av en brenselcelle vil dette problemet forsvinne. Dette vil bli forklart videre i Kapittel 2.3.

Lagring av ammoniakk

Utfordringene som oppstår ved lagring av ammoniakk kommer av dens etsende og giftige egenskaper. IGC nevner at ammoniakk blir lagret under transport i flytende tilstand. Valg av materiale for tanken må ikke kunne reagere med ammoniakk for å unngå brudd [11, 13]. BOG oppstår også i ammoniakk-tanker og det er viktig at det ikke slippes med mindre det er nødvendig. Dette kommer av de giftige egenskapene til stoffet. Prosessen for BOG håndtering blir gjort på samme måte som ved hydrogen håndtering.

Produksjon av ammoniakk

Ammoniakk kategoriseres ut ifra hvordan det blir produsert på samme måte som hydrogen. Brun ammoniakk er produsert ved gassifisering av fossile kilder, grå ammoniakk er produsert fra naturgass, blå ammoniakk fra naturgass med karbondioksid (CO₂) håndtering, og grønn ammoniakk som produseres fra grønn hydrogen [32]. Hovedandelen av produsert ammoniakk er grå, hvor Haber-Bosch metoden er den mest anvendte [36]. Denne metoden produserer hydrogen fra naturgass ved dampreforming. Dette betyr å la naturgassen reagere med vanndamp for å danne karbonmonoksid (CO) og deretter å la CO reagere med vanndampen igjen, som da produserer karbondioksid og hydrogen (H₂) [37]. Hvis CO₂ som blir produsert gjennom dampreforming blir lagret, kan ammoniakken bli betegnet som blå. Grønn ammoniakk kan bli produsert gjennom elektrolyse av vann, så lenge elektrisiteten som tilføres stammer fra fornybare energikilder. Nitrogenet vil bli tilført ved separere det fra luften [38].

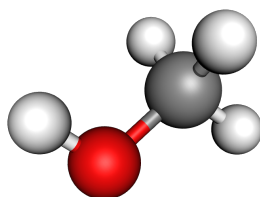
Flere ammoniakkprodusenter prøver å omstille produksjonen fra grå, til grønn ammoniakk for å kutte utslipp. Et eksempel på dette er YARA sitt anlegg i Porsgrunn, hvor det anslås et kutt på 41 000 tonn CO₂ i året ved overgangen til grønn ammoniakk. [32, 39] Tabell 4 viser de forskjellige fargekodene for ammoniakk og deres produksjons metode.

Brun	Grå	Blå	Grønn
Ammoniakk produsert gjennom gassifisering av fossile kilder	Ammoniakk produsert av naturgass der karbonet ikke blir lagret	Ammoniakk produsert av fossile kilder der karbonet blir lagret	Ammoniakk produsert gjennom elektrolyse der det kun er brukt fornybar energi

Tabell 4: Fargekode for produksjon av ammoniakk

2.2.3 Metanol

Metanol er en fargeløs og giftig væske som er det simpleste stoffet av alkoholer. Det er mest brukt i videre produksjon av andre organiske forbindelser, hvor dette står for omtrent 70% av bruken [40]. Metanol har den kjemiske oppbyggingen CH_3OH som viser til at det eksisterer et innhold av karbon[41, 42]. Figur 4 viser et metanolemolekyl.



Figur 4: Illustrasjon av metanolemolekyl

Interessen for bruk av metanol kommer av det lave karboninnholdet sammenlignet med andre drivstoff, der mer tradisjonelle drivstoff er bygd opp av lange karbonrekker [43, 44]. Det gjør at karbonutslipp fra metanol vil være lavere enn andre karbonbaserte drivstoff. Det er viktig å vite at det ikke gjør metanol til et karbonfritt alternativ, men det kan bli tatt i bruk som en løsning for kortsiktige problemstillinger [44]. Metanol har også relativt høy energitetthet sammenlignet med tidligere nevnte ammoniakk og hydrogen. Siden metanol i tillegg er en væske så behøver den ikke ekstra tiltak i lagringen for å oppnå en høyere energitetthet. I Tabell 5 er det mulig å observere spesifikk energi og energitetthet for metanol ved atmosfærisk trykk.

Tilstand	Atmosfærisk trykk (@ 1 bar) [41, 45]	Enhet
Tetthet, ρ	796	kg/m^3
Spesifikk energi, e	6.31	kWh/kg
Energitetthet, u	5023	kWh/m^3

Tabell 5: Spesifikk energi og energitetthet for Metanol

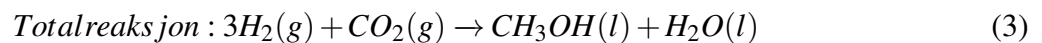
Lagring av metanol

Metanol er en væske som gjør at det ikke er nødvendig å oppbevare det i trykktanker som er nevnt i IGC [11], ettersom IGC baserer seg på lagring av gasser. Lagringsmetoder kan da basere seg på Marine-Gas Oil (MGO), som er et populært drivstoffalternativ. Lagringen av metanol vil da ikke være like komplisert som ved tidligere nevnte hydrogen og ammoniakk. Det som må vurderes er størrelsen på drivstofftanken, der en metanoltank vil være omtrent 2.5 ganger større enn en MGO tank [46]. Materialer må også vurderes for at det ikke skal reagere med metanol og føre til brudd [16].

Produksjon av metanol

Metanol er som tidligere nevnt et karbonbasert stoff, og det betyr at når det skal produseres så er det nødvendig med et karboninnhold i råstoffet. Dette er fra fossile kilder, biomasse og CO₂ gass. Hvilket råstoff som blir tatt i bruk vil ha betydning for hvilken klimapåvirkelse metanol vil ha [43, 47].

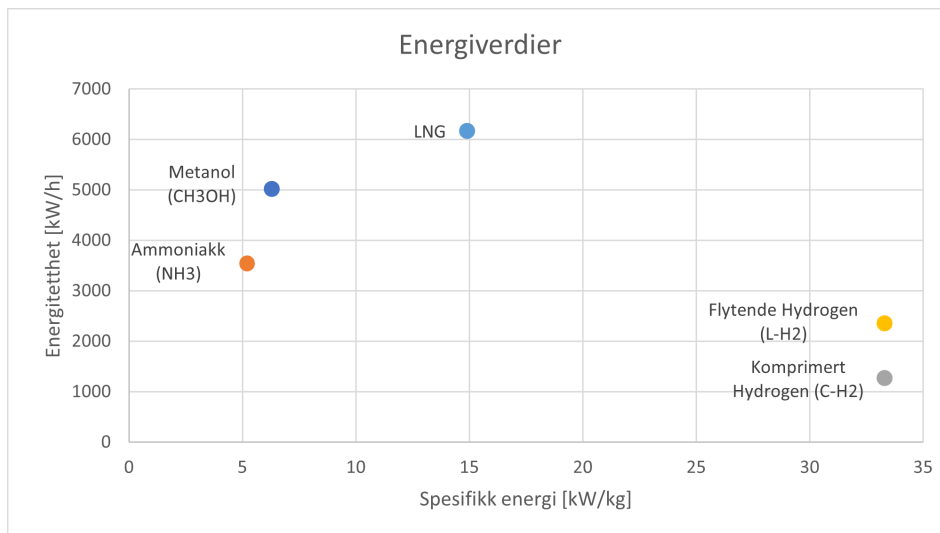
Produksjon av metanol skjer for det meste gjennom bruken av naturgass, der det står for omtrent 90% av verdensproduksjonen. Ved bruk av naturgass blir det produsert syngas for prosessen, der syngas er definert som hydrogen, karbonmonoksid og karbondioksid [37, 47]. Total reaksjonligning for metanolproduksjon er mulig å observere i Ligning 3.



Produksjon av syngas er også mulig uten naturgass og det vil ha som hensikt å gjøre produksjonen mer klimanøytral. For produksjon av hydrogen kan det bli brukt elektrolyse fra fornybare energikilder. Det fungerer på samme måte som nevnt i Kapittel 2.2.1 og hydrogenet vil da være grønn hydrogen. I tillegg vil syngas for prosessen være oppnådd gjennom karbonfangst. Ved bruk av karbonfangst og grønn hydrogen er det mulig å produsere metanol som vil være klimanøytralt. Det vil si at det blir brukt resirkulert karbon, og det vil ikke bli et økt eller redusert nivå av karbon i omløp [48]. Dette kan bli kalt for resirkulert metanol og vil være den ideelle formen av metanol som skal bli brukt for å nå klimamål. Reaksjonligningen for denne prosessen vil være den samme som Ligning 3.

2.2.4 Oppsummering av drivstoff

I oppgaven vil det bli sammenlignet hvert drivstoffalternativ i ulike sammenhenger. Det som kan gjøres i dette stadiet er å sammenligne energiverdiene. I Figur 5 er det mulig å observere en punktgraf av hvert drivstoffalternativ, der spesifikk energi og energitetthet blir sammenlignet. Det er også tatt med LNG ettersom det er det originale drivstoff alternativet til brønnbåten [49].



Figur 5: Energiverdier for drivstoffalternativer

Ved å observere grafen er det mulig å se en visuell sammenligning av det som tidligere har blitt nevnt. Hydrogen har den høyeste spesifikke energi, men begge lagringsformene til hydrogen har lavere volumetrisk energitetthet enn andre alternativ. Av drivstoff som kan komme fra grønne energikilder er det ammoniakk som viser til høyest energitetthet. Av de karbonbaserte drivstoffene LNG og metanol er det mulig å observere at metanol har lavere energitetthet enn LNG, men metanol viser seg å ha en lavere spesifikk energi [50].

2.3 Energikonvertering

De tre drivstoffalternativene kan alle bli tatt i bruk både i en brenselcelle og en forbrenningsmotor. Det vil da være nødvendig med en gjennomgang av de ulike energikonverteringsmetodene.

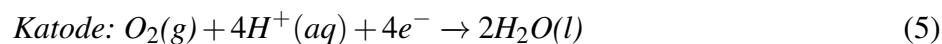
En introduksjon til brenselceller er å sammenligne teknologien med batteri, hvor begge omdanner kjemisk energi til elektrisk energi. I et batteri er den kjemiske energien lagret for omdanning til bruk på et senere tidspunkt, men i en brenselcelle så kommer en stødig strøm av drivstoff som omdannes til elektrisk energi [51]. Det eksisterer flere forskjellige brenselceller, der komposisjonen og operasjonstemperatur bestemmer type brenselcelle. Det er to typer brenselceller som er satt i fokus for maritim bruk. Disse kalles Proton-Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) og Solid-Oxide Fuel Cell (SOFC), og bruker hydrogen og ammoniakk som drivstoff[52].

Brenselceller er fremdeles under utvikling og det vil fremdel bli brukt forbrenningsmotorer i nærmeste fremtid. Forbrenningsmotorer omgjør kjemisk energi til mekanisk energi for å oppnå ønsket effekt. Utvikling av forbrenningsmotorer som tar i bruk alternative drivstoff har vokst de siste årene, og enkelte motorer har allerede vært i bruk i lengre tid [53]. En dual-fuel motor bruker en kombinasjon av fossile drivstoff og potensielt klimanøytrale drivstoff i en forbrenningsmotor, og det er mulig å redusere utslipp av CO₂, SO_x og NO_x gasser avhengig av hvilke drivstoff som blir brukt.

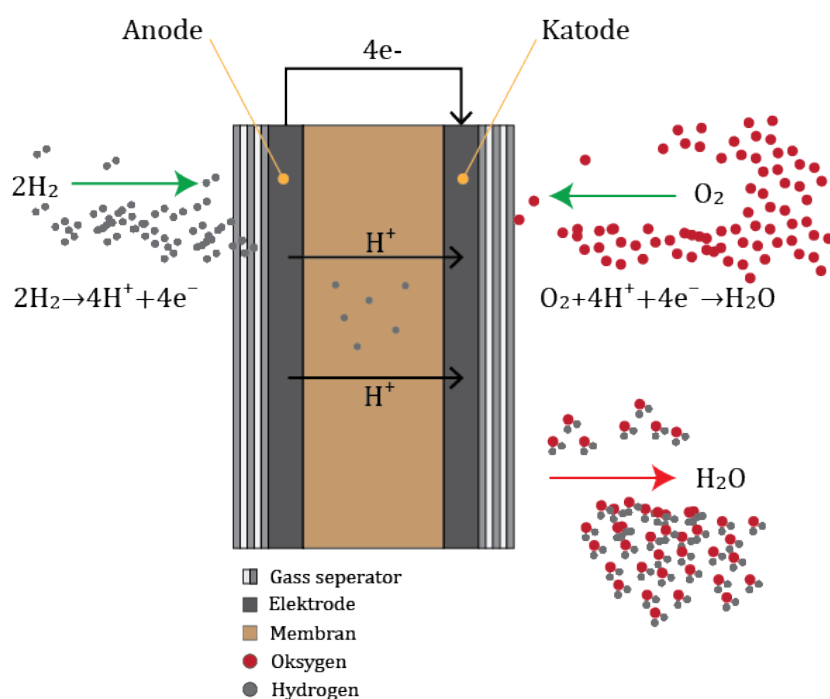
2.3.1 Proton Exchange Membrane Fuel Cell

Proton Exchange Membrane Fuel Cell er den mest anvendte brenselcellen i dag. PEMFC består av elektroder i edle metall som gir den beste reaksjonenevnen i denne typen brenselcelle. En form for membran elektrolytt blir brukt som et tynt lag mellom elektrodene, og består som regel av polymeren Nafion. Membranen har porøse egenskaper som gjør at det har mikroskopiske vannlommer som er viktig for reaksjonen i cellen [52, 54]. Reaksjonsprosessen starter ved at hydrogenmolekyler blir oksidert ved anoden for å skape hydrogenioner og elektroner som presentert i ligning 4. Hydrogenionene passerer gjennom vannlommene i membranen for å nå katoden, mens elektronene beveger seg i en egen krets. Ved katoden blir oksygen molekyler redusert for å binde seg med hydrogenionene og skaper vann som presentert i Ligning 5. Dette produserer den totale reaksjonen som en kan observere i Ligning 6[54].





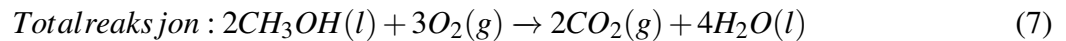
Det vil oppstå vann inne i brenselcellen under drift, som igjen kan føre til oversvømmelse av brenselcellen. Vannet som oppstår kalles Bilge water, og må føres ut av brenselcellen. En eventuell oversvømmelse av brenselcellen vil blokkere oksygenet i å reagere med katoden [55]. Brenselcellen vil ha en virkningsgrad mellom 50-60% som vil være basert på brenselcellens last. Eksisterende teknologi fra selskapet *ABB* har en antatt virkningsgrad på 56%[54]. Vannet som befinner seg i membranen gjør at operasjonstemperaturen er fra 30-100°C, der den lave operasjonstemperaturen gjør at cellen er sensitiv for urenheter i drivstoffet. Det kan kun bli tatt i bruk hydrogen som har et CO nivå mindre enn 20ppm, og enkelte studier mener at det helst ikke burde være høyere enn 10ppm[20, 23, 52]. Det eksisterer muligheter for å øke toleransen for CO konsentrasjonen ved å bruke andre alternativer for membranen. Dette gir cellen muligheten til å nå høyere temperaturer i området 100–200°C. En slik form for brenselcelle blir omtalt som High Temperature PEMFC (HT-PEMFC)[56]. Illustrasjon av en PEMFC er synlig i figur 6.



Figur 6: Skissering av PEMFC basert på skisse fra ABB [54]

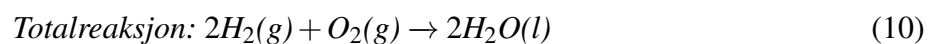
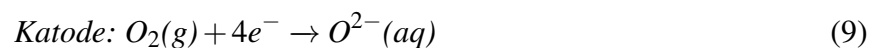
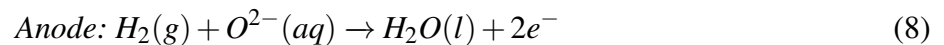
En annen form for brenselcelle som baserer seg på PEMFC er Direct Methanol Fuel Cell (DMFC).

Som navnet tilsier er DMFC en brenselcelle som bruker flytende metanol direkte i prosessen og er den mest utviklede formen av brenselceller som tar i bruk flytende drivstoff. Denne typen brenselcelle vil ha en operasjonstemperatur i området 20-90°C og vil ha en effekt opp til 5kW[52]. Den lave effekten gjør at den hovedsaklig kan bli tatt i bruk til mindre operasjoner, og kan utelukkes for større applikasjoner. Reaksjonligning 7 viser den totale reaksjonligningen der det kan bli observert at CO₂ er et produkt for prosessen. Det kan da antas CO gass har mulighet for å oppstå som vil ha betydning for valg av elektroder[52, 57].



2.3.2 Solide Oxide Fuel Cell

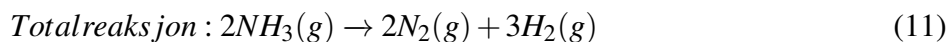
Solide Oxide Fuel Cells er den vanligste brenselcellen etter PEMFC. SOFC operer ved høye temperaturer i området 500-1000°C som gjør at den er fleksibel for valg av elektroder, der det ikke er nødvendig med edle metall som i en PEMFC. Elektrolytten til SOFC er også forskjellig ved at den er keramisk, hvor den transporterer oksygen ioner og ikke hydrogen ioner. Det er viktig å notere at små mengder termiske NO_x gasser dannes på grunn av temperaturen til cellen. Selv om dette er tilfellet er ikke temperaturene høye nok til at det vil være av en betydelig mengde [58]. Reaksjonligningene som oppstår kan observeres i Ligningene 8-10 [52, 59, 60].



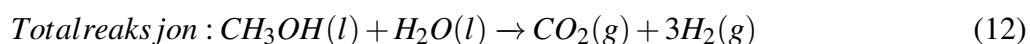
En slik brenselcelle vil ha en virkningsgrad på mellom 40-60% [20]. Det som gjør at SOFC er under videre utvikling er fleksibiliteten for bruk av drivstoff sammenlignet med andre brenselceller. I tillegg til hydrogen kan også hydrogenbærende drivstoff som ammoniakk og LNG drifte en SOFC [52]. Hydrogen trenger heller ikke å være like rent som i PEMFC. Dette kommer av de høye temperaturene og oppbyggingen til cellen som øker reaksjonevnen. Når andre drivstoff blir tatt i bruk vil det komme nye utslipps gasser enn det gjør tidligere i Ligning 10.

Som nevnt tidligere kan ammoniakk bli tatt direkte i bruk i en SOFC for å produsere hydrogen for

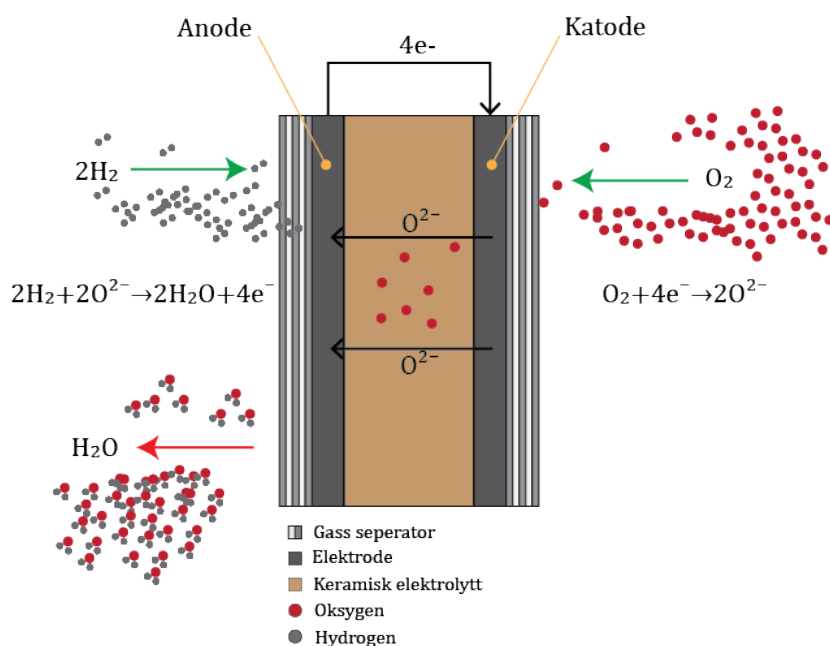
cellen. Dette skjer ved at det oppstår en cracking prosess der hydrogen løsriver seg fra nitrogenet ved høye temperaturer. Denne prosessen er mulig å observere i Ligning 11 og vil være en motsatt Haber-Bosch prosess [36, 37]. Cracking kan også bli gjort før drivstoffet når brenselcellen og valg av forskjellige brenselceller kan da vurderes [61, 62]. Som det er mulig å observere så vil det i tillegg til vann også dannes nitrogengass.



Ved bruk av drivstoff basert på hydrokarboner som LNG og metanol er det en mulighet for koksing ved anoden som vil danne et karbonlag over tid [63, 64]. En mulig løsning for dette er å bruke cracking i en tidligere prosess. For metanol fungerer det på samme måte som for ammoniakk hvor hydrogen blir løsrevet fra karbon og oksygen. Reaksjonligningen er presentert i Ligning 12.



Siden ammoniakk og metanol kan spaltes i en crackingprosess, kan de vurderes å bli brukt i PEMFC. Dette blir gjort ved at drivstoffene blir spaltet i en tidligere prosess. Det som må vurderes er hvor rent hydrogenet blir etter prosessen [65, 66]. Skisse av SOFC der hydrogen reagerer er mulig å observere i Figur 7.

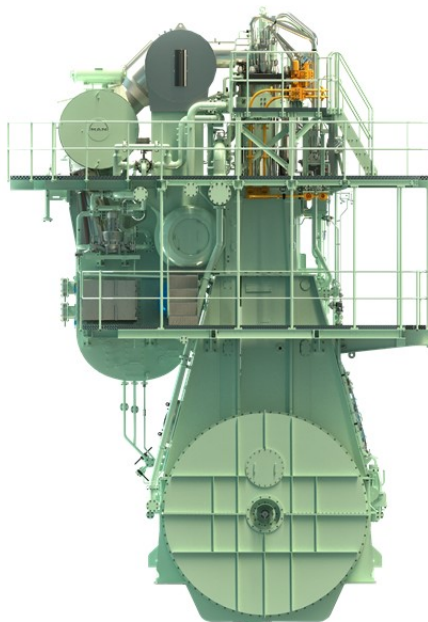


Figur 7: Skisse av SOFC

2.3.3 Dual-Fuel forbrenningsmotor

Blandinger som metanol og diesel har lenge blitt sett på som et alternativ for å redusere utslipp [67]. Ved bruk av en slik blanding er det ikke nødvendig med endring av eksisterende motorer, men det vil føre til en liten reduksjon i motoreffekten. Dual-Fuel (DF) eller drivstoffleksible motorer har derfor nylig blitt sett på som et alternativ for å anvende en motor som tar i bruk alternative drivstoff. Det er vanlig å bruke en drivstoffblanding bestående av gass og en mer konvensjonell drivstofftype, som LNG og diesel [68]. DF motorer har økonomiske og klimavennlige fordeler med måten den opererer på, men vil ikke være et null-utslippsalternativ. En DF motor har muligheten til å bytte drivstoff for drift uten at det skal påvirke driften eller ytelsen til motoren, og en slik motor er et viktig steg for umiddelbar endring i klimautslipp [69, 70].

Skipet *Stena Germanica* har erfaring fra 2015 med bruk av en metanol DF motor. I skipet er det brukt en dieselmotor som er omgjort til å bli en DF motor. Det betyr ikke at alle eksisterende dieselmotorer kan omgjøres, men det vil være en mulighet dersom det er ønsket en hurtig overgang for eksisterende fartøy [53]. Wärtsilä 32 er en produsert metanolmotor som baserer seg på erfaring fra *Stena Germanica* og den lover 92% reduksjon i CO₂ utslipp, 50% reduksjon i NO_x utslipp, og null utslipp av SO_x [71]. I 2020 lanserte også Man Energy en Dual-Fuel motor som er mulig å observere i Figur 8.



Figur 8: Dual-Fuel metanol motor fra Man Energy [72]

Det anslås at virkningsgraden for metanoldrevne motorer er tilnærmet lik diesel motorer på 42% [73]. For hydrogen DF motorer er det ikke gjort like mye testing som for metanol. Hydrogen inneholder en

del energi som gjør at en betydelig reduksjon av NO_x vil være mer krevende enn ved metanol [74]. Hydrogen vil derimot ikke ha et utslipp av SO_x og CO_2 . Det har allikevel blitt utviklet enkelte motorer som er produsert i nyere tider som skal kunne bruke hydrogen. I 2021 lanserte BeHydro en DF motor som har hovedfokus på hydrogen, men den har ikke vært i drift lenge nok til at det eksisterer informasjon som kan sammenligne den med en metanoldrevet motor [75].

Det eksisterer få ammoniakk drevne motorer og det er et drivstoffalternativt som er lite vurdert for DF motorer. Det kommer av at ammoniakk ikke forbrenner like lett som andre drivstoffalternativ [76]. Ammoniakk bruk vil ikke produsere utslipp av SO_x og CO_2 , men det vil oppstå NO_x gasser. Det vil ikke være et høyere nivå av NO_x dannelse, selv om ammoniakk inneholder nitrogen. Det kommer av at produksjon av NO_x gasser er mer avhengig av temperatur [34]. MAN energy utvikler en DF ammoniakk motor som vil være klar til 2024 [77].

2.3.4 Oppsummering av energikonvertering

Ved en gjennomgang av teknologi og drivstoff er det mulig å få et overblikk av kortsiktige og langsiktige løsninger. Tabell 6 er basert på en studie fra DNV [46] som viser modenhet av forskjellig energikonverteringsteknologi til hvert drivstoffsalternativ. I tabellen er modenhet presentert som et tall mellom 1-4, der 1 er anvendt teknologi og 4 er underutviklet teknologi. Studien er fra 2019 og verdiene for flere av alternativene vil ha endret seg fram til 2022. Informasjon fra Kapittel 2.3.1-2.3.3 gjør at verdiene vil bli endret. I Tabellen er det inkludert utslipp av NO_x , SO_x og CO_2 i en skala fra lav-høy. Det eksisterer ikke tilstrekkelig informasjon om nøyaktig utslipp for hvert alternativ, men litteratur viser til omtrentlige størrelser [78].

Drivstoff	Hydrogen		Ammoniakk		Metanol	
	FC	DF	FC	DF	FC	DF
Modenhet	2	3	2-3	3	3	2
NO_x utslipp	-	Høy	-	Høy	-	Medium
SO_x utslipp	-	Lav	-	Lav	-	Lav
CO_2 utslipp	-	Lav	-	Lav	Lav	Medium

Tabell 6: Modenhet av energikonvertering

Fra Tabellen er det mulig å se at teknologi for en metanol forbrenningsmotor er tilgjengelig, men har ikke nådd fullt utviklingspotensial. Det vil si at for kortsiktige løsninger vil en metanolmotor være et naturlig alternativ og det vil bli satt i fokus.

For hydrogen og ammoniakk viser Tabellen at teknologialternativ for brenselcelle og motor ligger bak i begge tilfeller. Det betyr at bruk av de drivstoffene vil være et langsiktig alternativ. Brenselceller lover å ha null utslipp og det vil være alternativet som vil bli satt i fokus i oppgaven.

2.4 Sikkerhet og håndtering

Som nevnt i Kapittel 2.1 vil sikkerhetstiltak som tar for seg nye typer drivstoff følge IGF- og IGC Code som grunnleggende standarder. IGF beskriver retningslinjer som tar for seg bruk av drivstoff med lavt flammepunkt. Sjøfartdirektoratet forklarer drivstoff med lavt flammepunkt som alle drivstoff med tenningspunkt under 60°C [79]. Flammepunkt er temperaturen som er nødvendig for å skape en brennbar atmosfære i nærheten av drivstoffet. Det er nødvendig med sikkerhets tiltak for å håndtere slike gasser, siden det finnes større risiko for antenning.

Metanol kan klassifiseres som et drivstoff med lavt flammepunkt ettersom den har et flammepunkt på 11-12°C. Hydrogen har ikke et definert flammepunkt, men siden lagringstemperaturen er på -253°C blir det antatt at det alltid vil befinne seg en brennbar atmosfære. Det samme tilfellet gjelder også for ammoniakk der flammepunktet ikke er definert, men med lagringstemperatur på -34°C vil det oppstå enn brennbar atmosfære. Det betyr at hydrogen, ammoniakk og metanol kan alle defineres som drivstoff med lavt flammepunkt, og systemdesign må planlegges etter det i høve til IGF. I Tabell 7 er det mulig å observere sikkerhetshensyn for hydrogen, ammoniakk og metanol.

Drivstoff	H ₂	NH ₃	CH ₃ OH
Flammepunkt [°C] [46]	-	-	11-12
Tenntemperatur [°C][46]	500	630	470
Brennbarhet i luft [vol %] [46]	4-74.2	15-28	6.7-36
Kokepunkt [°C][19, 33, 42]	-252	-33.3	64.7
Giftighet [46]	Ikke giftig	Ekstremt giftig/farlig ved hudkontakt	Giftig ved innånding

Tabell 7: Oversikt av brennbarhet og giftighet til de ulike stoffene

Hydrogen og ammoniakk vil gå over i gassform dersom de blir sluppet ut i atmosfæren ettersom de er gasser ved standardbetingelser. For L-H₂ vil det føre til frysing av luften rundt, samtidig som det vil danne en eksplosiv konsentrasjon i luften rundt[80]. For utslipp av C-H₂ vil det ikke være fare for frysing, men det vil fremdeles være en eksplosiv fare [18]. Når ammoniakk blir sluppet ut og går over i gassform vil det binde seg med fuktighet i luften. Dette vil danne et gasslag som er tyngre enn luft, som vil være farlig for personell [13]. I tilfeller der det oppstår gass vil det da være nødvendig med tilstrekkelig ventilasjon for at det ikke skal oppstå fare for personell.

Metanol er flytende ved standardbetingelser og vil ikke oppføre seg som hydrogen og metanol. I NR670 blir det beskrevet at det må eksistere kofferdammer i områder det kan oppstå lekkasje for å samle drivstoff i et område som ikke er nødvendig for drift [16]. Denne løsningen blir også referert til som *fuel drip* håndtering [16]. Det er også viktig å ta for seg at metanol er et giftig stoff og innånding av damp vil være farlig.

Det vil være viktig at alle lekkasjer blir oppdaget hurtig slik at personell kan komme seg i sikkerhet om det skulle oppstå. Det må derfor være tilstrekkelig med følsomme instrumenter som kan tidlig varsle en lekkasje. Elektriske apparater som kan føre til en eksplosjonsfare må velges nøye, og det må oppføres soner der det kan befinne seg gass i en eksplosiv konsentrasjon [10, 11, 18]. Klassifisering av fare soner er beskrevet videre i Kapittel 3.

Selv om retningslinjene i IGF blir brukt for hydrogen vil det ikke nødvendigvis være de samme farene som for naturgass. Hydrogen blir som regel antatt å ha en større fare for lekkasje og antenning en det LNG vil ha. Det kan da utføres CFD simuleringer av situasjoner der spredningen av hydrogen blir testet. Dette kan hjelpe på prosessen med å få et skip godkjent som alternativt design [18].

Ammoniakk er giftig og det kan antennes i rette luftkonsentrasjoner. Energinivået for å antenne ammoniakk er rundt 470 ganger større en for hydrogen og det vil ikke være like stor fare for antenning på åpent dekk. For trange områder under dekk vil ammoniakk ha en eksplosjonsfare ved rette konsentrasjoner [13]. I kontakt med personell kan ammoniakk føre til etsende skader og i høye nok konsentrasjoner kan det være dødelig ved innånding. For å håndtere ammoniakk på en trygg måte er det nødvendig med utstyr for å beskytte personell. Utstyret skal være lett tilgjengelig og skal ha fullstendig motstand mot ammoniakk.

Designprosessen for et drivstoffsystem vil basere seg hovedsaklig på sikkerhetshensyn. Det er da viktig å bruke relevant informasjon for å oppnå sikker håndtering og drift av et skip.

2.5 Undersøkelse av system for brønnbåt

Videre vil informasjon funnet i tidligere kapittel bli tatt i bruk for undersøkelse av system for en brønnbåt. Det vil bli gjort en gjennomgang av behov for energi og effekt, samt tiltak som kreves for at det skal bli godkjent etter gjeldende regelverk. Dimensjonene til brønnbåten er gitt i Tabell 8 under.

Lengde (L)	92.66m
Bredde (B)	22.4m
Dypgang (T)	4.73m
Tank	5000m ³
Lettskips	4985 tonn
Deadweight	2103 tonn
Total	7088 tonn

Tabell 8: Dimensjoner til skipet

2.5.1 Driftsprofil og energibehov

Driftsprofil som presentert i Tabell 9 er gitt av Salt og viser energiforbruk basert på brønnbåtens operasjonstid. Ut fra driftsprofilen er det mulig å få maksimal effekt, maksimalt energibehov for en tilstand og det totale energibehovet for en dag.

Tilstand	Reise til destinasjon	Lasting	Reise til land	Avlasting
% av tid	25%	30%	35%	20%
Dypgang [m]	4.7	4.7	7	7
Hastighet [knop]	9	0	9	0
Hotell [kW]	250	250	250	250
Dekksutstyr [kW]	325	1140	325	1650
Propulsjon [kW]	1210	0	1380	0
Total effekt [kW]	1785	1390	1955	1900

Tabell 9: Driftsprofil for brønnbåt

Tabell 9 viser at den maksimale påkrevde effekten er på 1955 kW. Det betyr at den installerte effekten til skipet ikke kan være lavere enn 2MW. I tilfelle det skal oppstå en hendelse som vil ha en negativ påvirkning på effekten til skipet blir det bestemt at det bør være en mulighet for å oppnå en effekt på totalt 3MW. Energiforbruket blir regnet ut ved hjelp av Tabell 9. I Ligning 13 er det mulig å se hvordan totalt energibehov ble regnet ut. I ligningen tilsvarer t antall timer, P_{1-4} er effekt for hver tilstand og E_{skip} er energibehovet for skipet etter en tidperiode.

$$t[0.25(P_1) + 0.3(P_2) + 0.35(P_3) + 0.2(P_4)] = E_{\text{skip}} \quad (13)$$

For en dag blir det beregnet at det er et energibehov på 46 260kWh, og ettersom skipet skal være i drift i 10 dager blir det funnet at totalt energibehov for den perioden er 462 600kWh. Det blir også besluttet at det skal være nok drivstoff til 3 dager ekstra dersom det skal oppstå en uforutsett hendelse. Dermed blir det totale energibehovet 601 380kWh.

2.5.2 Drivstoff behov

Mengde drivstoff er mulig å beregne ved bruk av det totale energibehovet. Det vil være nødvendig å vite virkningsgraden for å oppnå dette, hvor det vil være forskjell fra motor til brenselcelle. Fra Kapittel 2.3 blir det nevnt at eksisterende teknologi for en PEMFC har en virkningsgrad på 56%. Det kan da antas samme virkningsgrad for SOFC. For metanolmotor er det antatt en virkningsgrad på 42% fra eksisterende teknologi. Ligning 14 viser utregning av drivstoffbehov [81]. I ligningen er E_{tot} endelig energibehov, u er volumetrisk energitetthet, η er virkningsgrad til energikonverterer og $V_{\text{Drivstoff}}$ er volum av drivstoff i m^3 .

$$\frac{E_{\text{tot}}}{u \cdot \eta} = V_{\text{Drivstoff}} \quad (14)$$

I Tabell 10 finnes verdiene som blir brukt til utregning av drivstoffbehov og en ferdig utregning av drivstoffbehovet. Det blir også presentert hvilken form for energikonvertering blir tatt i bruk. Drivstoffene som er presentert er komprimert hydrogen (C-H₂) ved 700 bar, kryolagret hydrogen (L-H₂), ammoniakk (NH₃), metanol (CH₃OH) og LNG, der LNG er tatt med for å sammenligne. Energitettheten for hydrogen, ammoniakk og metanol er funnet tidligere i Kapittel 2.2.

Drivstoff	C-H ₂	LH ₂	NH ₃	CH ₃ OH	LNG [49]	Enhet
Energitetthet, u	1,265	2,357	3,530	5,023	6,167	kWh/m ³
Massetthet, ρ	38	71	682	792		kg/m ³
Energikonvertering	PEMFC	PEMFC	SOFC	DF	DF	-
Virkningsgrad, η	56	56	56	42	42	%
Drivstoffbehov, $V_{\text{Drivstoff}}$ [m³]	848.9	455.6	304.2	285.1	232.2	m ³

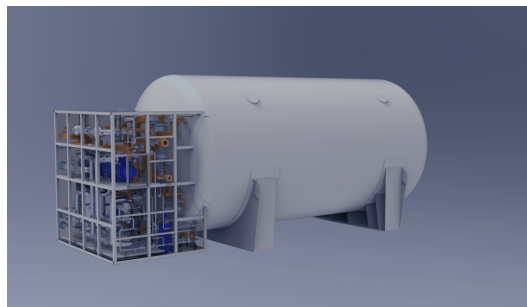
Tabell 10: Totalt drivstoffbehov for en periode på 13 dager

Ut ifra Tabell 10 er det mulig å finne ut modifikasjoner som må utføres for å romme hvert drivstoff dersom drivstoffbehovet overstiger kapasitet til eksisterende tanker. De eksisterende tankene er to Type-C tanker som rommer 160m³ hver, og summeres til 320m³, forklaring av denne typen tank

finnes i Kapittel 2.5.3. Det kan da konkluderes med at det må gjøres endringer for å bruke C-H₂ og L-H₂.

2.5.3 Valg av tank

Tanker til bruk for lagring av gass er beskrevet i IGC-standarden og de er kategorisert som Type-A, Type-B og Type-C tanker [11, 82]. Type-A og Type-B tanker brukes hovedsakelig ved frakting av gasser hvor eksterne drivstofftanker ikke er nødvendig, og vil ikke vurderes når det diskuteres tank til drivstoffsystemet. Type-C tank er sylinderformede tanker som kan holde drivstoff under høyt trykk og lave temperaturer. Figur 9 viser en Type-C tank.



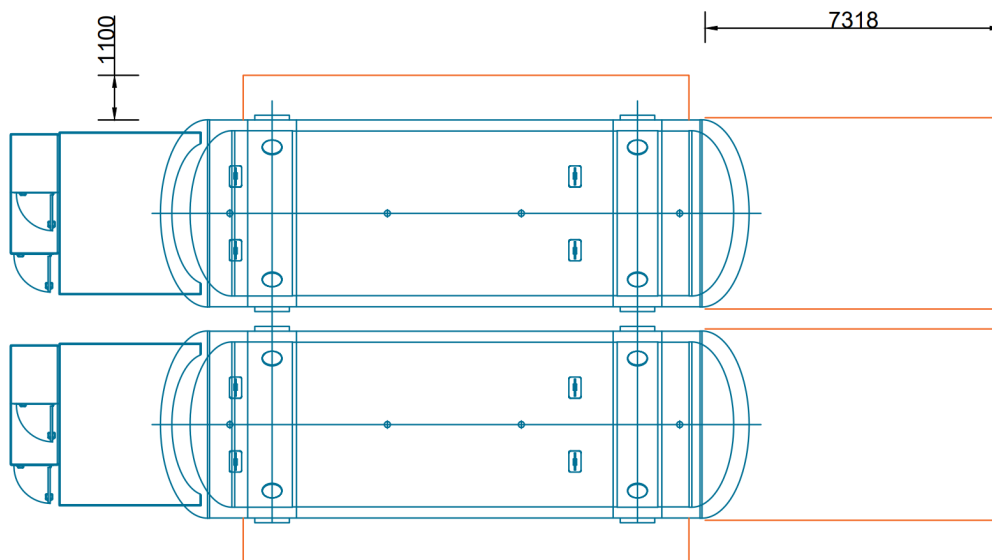
Figur 9: Type-C tank [83]

For hydrogen er det undersøkt totalt drivstoff behov for komprimering ved 700 bar og lagret i flytende tilstand ved -253°C. C-H₂ må lagres i et system som består av flere trykketanker som er lite volumefektivt i forhold til rommet det befinner seg i [18]. Tabell 10 viser at totalt drivstoffbehov for C-H₂ vil være 848.9m³. Dette betyr at lagringsbehovet vil mer enn doble seg, i tillegg til at tanksystemet vil bruke mer plass. Det kan derfor utelukkes at C-H₂ kan brukes i en periode på 13 dager. Figur 10 viser et komprimert tanksystem som blir levert av Hexagon [24].



Figur 10: Komprimert tanksystem fra Hexagon [24]

Lagringskapasiteten for bruk av L-H₂ vil ikke føre til like store endringer som for C-H₂ og det kan bli vurdert som et alternativ. Tankkapasitet må økes med omtrent 43% fra 320m³ til minimum 455.6m³. For å øke volum kan lengden utvides med 43%, eller så kan bredden utvides en faktor på $\sqrt{1.43}$. Dette vil tilsvare en endring i bredden på omtrent 20%. Figur 11 viser utvidelse av eksisterende tank. Figuren viser endring som må utføres i lengden, eller endring som må utføres i bredden.



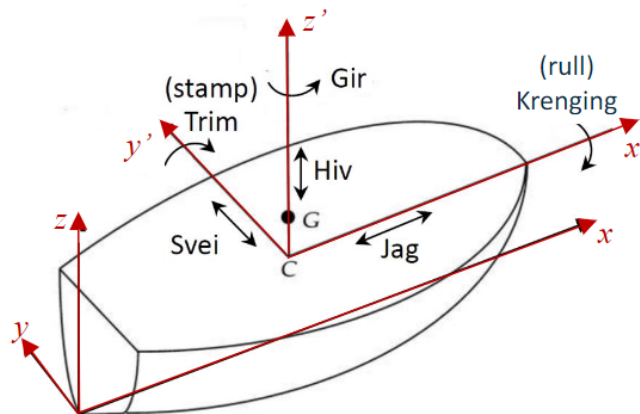
Figur 11: Utvidelse av eksisterende tank gitt i mm

Ammoniakk vil ikke føre til store endringer i tanken ettersom drivstoffsbehovet er på 304.2m³. De eksisterende type-C tankene for brønnbåten kan da brukes til oppbevaring av ammoniakk med små modifikasjoner. Ettersom ammoniakk reagerer lett med andre stoff, må innsiden av tanken dekket av et materiale som ikke reagerer med ammoniakk for å forhindre reaksjoner mellom drivstoff og tank. Et slikt materiale kan være sink [13, 15].

For å kunne lagre nok metanol til hele turen kreves det en drivstofftank større enn 285.1m³. Type-C tanker er for lagring av gass og må endres for et metanolsystem. Den nye tanken kan basere seg på lagring av MGO som ble nevnt tidligere i Kapittel 2.2.3.

2.5.4 Frihetsgrader og Stabilitet

Frihetsgrader er betegnelsen på hvordan et skip beveger seg i forhold til et 3-dimensjonalt xyz-koordinatsystem. Rotasjoner rundt de forskjellige aksene blir gitt egne betegnelser. Disse rotasjonene kalles: krenning (rundt x-akse), trim (rundt y-aksen) og gir (rundt z-aksen). For bevegelser opp og ned på aksene, vil de ha andre benevninger, og kalles: jag (x-aksen), svei (y-aksen) og hiv (z-aksen).



Figur 12: Frihetsgrader for skip[84]

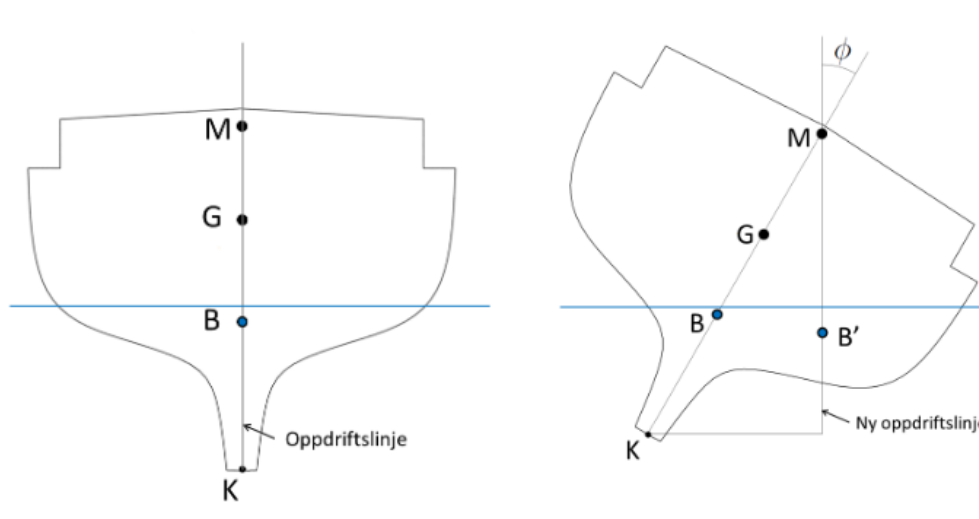
Ved å sjekke stabiliteten av et skip, brukes betegnelsene for rotasjoner om aksene ofte. Disse rotasjonene medfører en endring i koordinatsystemet til skipet, hvor vinkelene på akseendringene kalles trimvinkel (ϕ), krengevinkel (θ) og girvinkel (ψ). Ved installasjon av nytt drivstoffsystem vil det medføre vektendringer som kan påvirke hydrostatikken til skipet. Disse vektendringene kan forekomme i form av type drivstoff, utvidelse av drivstofftanker, bytte av energisystem og eventuell ekstrautstyr. Med for store vektendringer kan skipet bli ustabil, og en stabilitetsjekk burde gjennomføres. Endring i girvinkel vil ikke ha en påvirkning på stabiliteten.

For endring av drivstoffsystem vil det oppstå vektendringer. Dette kommer av forskjellig tetthet på drivstoff og endring av nødvendig utstyr. Endringen i vekt på skipet, Δ , vil gjøre at neddykket volum, ∇ , vil endre seg. Ligning 15 viser utregning av neddykket volum

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho_{\text{sjø}}} \quad (15)$$

For å kunne bestemme om et skip er stabilt, må initialstabiliteten beregnes, som også kalles metasenterhøyde. Metasenterhøyde skrives som \overline{GM} , og er avstanden mellom tyngdepunktet G, og metasenter M. Tyngdepunktet beregnes basert på vektfordeling på skipet, mens metasenteret defineres av skipets

geometriske form. Ved krenging vil metasenteret endres, og vil være det punkt hvor original oppdriftslinje, B, krysser evt nytt oppdriftslinje, B', som vist i Figur 13.



Figur 13: Stabilitets punkt for skip, GM, B, G, M [84]

Avstanden mellom metasenter og tyngdepunkt, \overline{GM} , avgjør hvordan et skip vil rette seg ved krenging. For at skipet skal være stabilt, må metasenter ligge over tyngdepunktet. Dette skyldes det opprettede moment som oppstår under krenging. Befinner metasenteret seg under tyngdepunktet, vil det opprettede momentet fungere i motsatt retning, og skipet vil kunne lett kantre. Ved stor, positiv \overline{GM} , vil skipet oppleves som stivere, og vil gi korte og raske svingninger. Stor \overline{GM} er best egnet skip som opplever store krengebevegelser til sjøs, som for eksempel seilbåter. Ved større skip, som da en brønnbåt, vil det være optimalt med lav \overline{GM} . Med lav \overline{GM} vil skipet oppleve større, langsommere svingninger, som vil også oppleves som mer behagelige enn ved høy \overline{GM} . Lav \overline{GM} vil også bidra til å bevare eventuell last i skipet[84, 85].

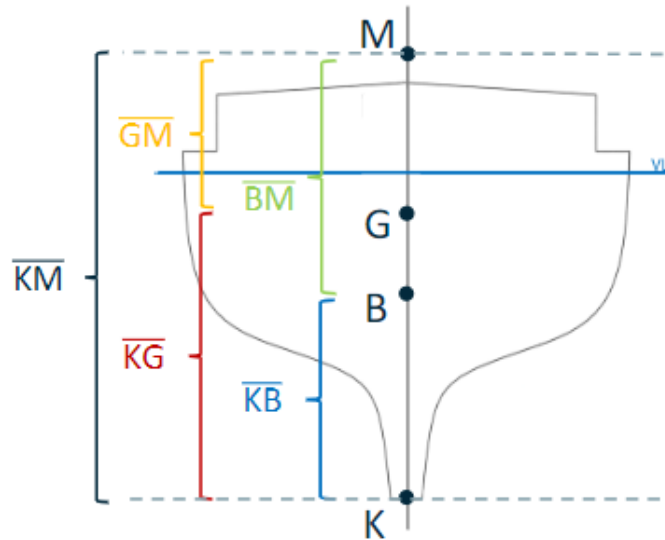
\overline{GM} defineres som:

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (16)$$

Hvor da \overline{KB} er avstand fra kjøll til oppdriftspunkt, \overline{BM} er avstand fra metasenter til oppdriftspunkt og \overline{KG} er avstand fra kjøll til tyngdepunkt, som vist i Figur 14, og finnes ved tyngdepunktsatsen for volumsenter[85].

$$\overline{KB} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i * z_i}{\sum_{i=1}^n V_i} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i * z_i}{\nabla} \quad (17)$$

I likning 17 er V_i neddykket volumandel av skipet, og z_i er avstanden fra sentrum. \overline{KG} finner man ved



Figur 14: Visualisering av GM [84]

å finne tyngdepunktet på z-aksen dividert med total vekt av skipet. Hvor m_i er masseandel av skipet, og z_i er avstand fra sentrum [85].

$$\overline{KG} = z_G = \frac{\sum_{i=1}^n m_i * z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (18)$$

For å finne \overline{BM} , må Steiners sats for 2. ordensarealmoment for x-aksen (I_x) først beregnes, for så å dividere på ∇ , og defineres som vekt (Δ) dividert på tettheten av vann (ρ).

$$\overline{BM} = \frac{I_x}{\nabla} \quad (19)$$

For å kunne beregne initialstabiliteten, \overline{GM} , må vektendringer undersøkes.

Vektendringene som oppstår vil være på samme xyz koordinater som de opprinnelige massene. Ved en økning i vekt vil \overline{GM} senkes, og vil føre til saktere krengebevegelser. Vektendringene vil medfølge endring i \overline{GM}_L , altså langskips \overline{GM} . Med en vektøkning medføres en økt trimvinkel, og vil da skape dragkraft på hekken som kan øke resistansen på skipsskroget. Dette kan ha en påvirkning på effekten til drivstoffsystemet, og skipet vil være mindre effektivt enn ved lettere kondisjoner. Etersom skipet kun vil ha trim ved ulastet tilstand, vil dette ha minimalt å si på drivstoffsystemet. Skipet i lastet tilstand burde oppnå 0° trim for å maksimere effektiviteten, og ved å øke ballastvekt i baugen vil vektendringene kunne balanseres og skipet vil kunne seile i plan.

2.5.5 Vektendringer

For endring av drivstoffsystem vil det oppstå vektendringer som kommer av ulik tetthet på drivstoff og endring av nødvendig utstyr. Vektendringene vil føre til endring i tyngdepunkt, oppdriftspunkt og metasenterhøyde som kan påvirke stabiliteten til skip. Totalvekten av skipet er en summering av lettskips og dødvekt. Lettskips er basevekten til et driftsklart skipet og tilleggsvekter som last, drivstoff, passasjerer og tilleggsutstyr vil ikke være med. Dødvekt er all vekt som blir ekskludert i lettskipsvekten.

Det eksisterende systemet består av 4 Dual-fuel (DF) generatorsett levert av Wärtsilä som driftes av LNG og MGO. DF motorer vil produsere NO_x gasser som må håndteres ved bruk av Selective Catalytic Reduction (SCR). SCR er brukt for å redusere NO_x gasser og er nødvendig for å ikke overstige satte grenser [86]. SCR er en del av vekten til systemet sammen med lydemper, eksosrør, og ekstra tilleggsutstyr. Tabell 11 under viser vekt av generatorsett og tilleggsutstyr.

Utstyr	Vekt	Enhet
Generator sett x4	22,000	kg
SCR x4	1,400	kg
Lyddemper x4	1,100	kg
Eksosrør	4,000	kg
Tilleggsutstyr	10,000	kg
SUM	112,000	kg

Tabell 11: Vekt av utstyr

Det må også vurderes vekten av drivstoff. Vekten av drivstoff vil variere etter volum og tetthet. Drivstoffmengde for hvert alternativ ble funnet i 2.5.2 og det vil bli brukt til å finne ut vekt av drivstoff ombord. Tabell 12 under viser til dette.

Drivstoff	LH ₂	NH ₃	CH ₃ OH	LNG [49]	Enhet
Volum	455.6	304.2	285.1	232.2	m ³
Massetetthet, ρ	71	682	792	450	kg/m ³
Vekt	32,347.6	107,382.6	225,799.2	104,490	kg

Tabell 12: Total vekt av drivstoff for operasjons periode på 13 dager

Et metanolsystem består av DF generator sett som vil være det samme som opprinnelig system. Det kan da antas at det vil bli brukt lignende utstyr som har lik vekt som det eksisterende systemet. Det vil også være nødvendig med SCR for metanol system.

Ved å velge et hydrogen PEMFC energisystem for brønnbåten, må hele dual-fuel systemet byttes ut. Selve PEMFC systemet blir levert i containerform av et samarbeid mellom ABB og Ballard Power Systems [54]. Denne containeren har en ytelse på 3000kW, og en totalvekt på 45 000kg. Dimensjonene vil være på 12m x 3.6m x 2.4m, og vil kunne plasseres inne i eksisterende motorrom. Tilleggsutstyr og eksosrør antas å være det samme som opprinnelig system.

SOFC containeren antas å være lik ABB/Ballard sin PEMFC container. Ved å bruke ammoniakk som drivstoff oppstår det problemstillinger knyttet til ventilasjon og utløp, ettersom ammoniakk er både brannfarlig og helseskadelig. En utslippsmast med radius på 22.4m fra nærmeste innløp må installeres, eventuelt kan den eksisterende masten utvides. Dette kommer fra NR671 Sec. 1 Kapittel 3.9.2 som beskriver at utslippsmasten for ammoniakk må tilsvare bredden på fartøyet, B, eller 25m, og minste verdi skal velges [15]. Vekten av denne utvidelsen er foreløpig ukjent. Tilleggsutstyr og eksosrør antas å være det samme som for opprinnelig system.

Tabell 13 under viser vekt av drivstoff og vekt av utstyr for hvert system. Det er også summert til en totalvekt for å sammenligne med vekt av LNG system.

Drivstoff	L-H ₂	NH ₃	CH ₃ OH	LNG	Enhet
Drivstoffbehov	32,347.6	207,464.4	225,799.2	104,490	kg
Generator sett x4	-	-	22,000	22,000	kg
FC container	45,000	45,000	-	-	kg
SCR x4	-	-	1,400	1,400	kg
Lyddemper x4	-	-	1,100	1,100	kg
Eksosrør	4,000	4,000	4,000	4,000	kg
Tilleggsutstyr	10,000	10,000	10,000	10,000	kg
Totalvekt	91 347.6	266 464.4	337 779.2	216 490	kg

Tabell 13: Vekt av system alternativ

Ved å installere et ammoniakkdrevet SOFC system i båten, vil en vektøkning på 49 975kg forekomme som følge av installasjon av SOFC drivstoffsystem, ekskluderende vekt på mastutvidelsen. En vektreduksjon på 125 142kg vil forekomme som følge av installasjon av PEMFC drivstoffsystem, ekskluderende vekt på tankutvidelsen. Vektdifferanse ved implementering av de forskjellige drivstoffsystemene i forhold til LNG system er presentert i Tabell 14

System	SOFC	PEMFC	Dual-Fuel Metanol
Vektdifferanse [kg]	+49 975	-125 142	+121 309

Tabell 14: Totalvektdifferanse ved implementering av systemalternativ

3 Design

For å vurdere implementering av drivstoffsystem vil det bli designet systemtegninger som viser hvert system. Dette innebærer bruken av PEMFC, SOFC og dual-fuel motorer, hvor tilgjengeligheten bak både systemene og drivstoffet er essensiell i vurderingen av hvilket system er best egnet brønnbåten.

Design prosessen ble gjennomført i AutoCad som er en programvare utviklet av Autodesk [87]. AutoCad blir blant annet brukt til prosjekt tegninger i flere ingeniør disipliner. Programmet gjør det enkelt å skissere systemer og arrangement, det gjør det også enkelt å gjennomføre endringer på tegningene. Programmet var et revolusjonerende alternativ i prosjekt utvikling da det ble lansert. Det opererer i egen fil format merket som DWG, men programmet produserer tegninger i de fleste formater, også PDF. AutoCad blir stadig oppgradert og utviklet til å være et enda bedre hjelpemiddel for ingeniører.

3.1 Faresoner og Systemkomponenter

Nye systemkomponenter vil være nødvendig for installasjon av nytt drivstoffsystem, hvor korresponderende faresoner vil måtte klassifiseres iht standard og regelverk.

3.1.1 Faresoner

Sikkerhets soner er definert som *Hazardous zones* (HZ) i IGF Kap. 12.4-12.5 [10]. Faresoner er beskrevet som områder der eksplosive atmosfærer kan oppstå. Hensikten med å klassifisere slike områder er for å unngå fare for antennelse ved bruk av elektrisk utstyr. Sonene er klassifisert etter tre nivå - *Hazardous zone-0* (HZ0), *Hazardous zone-1* (HZ1) og *Hazardous zone-2* (HZ2).

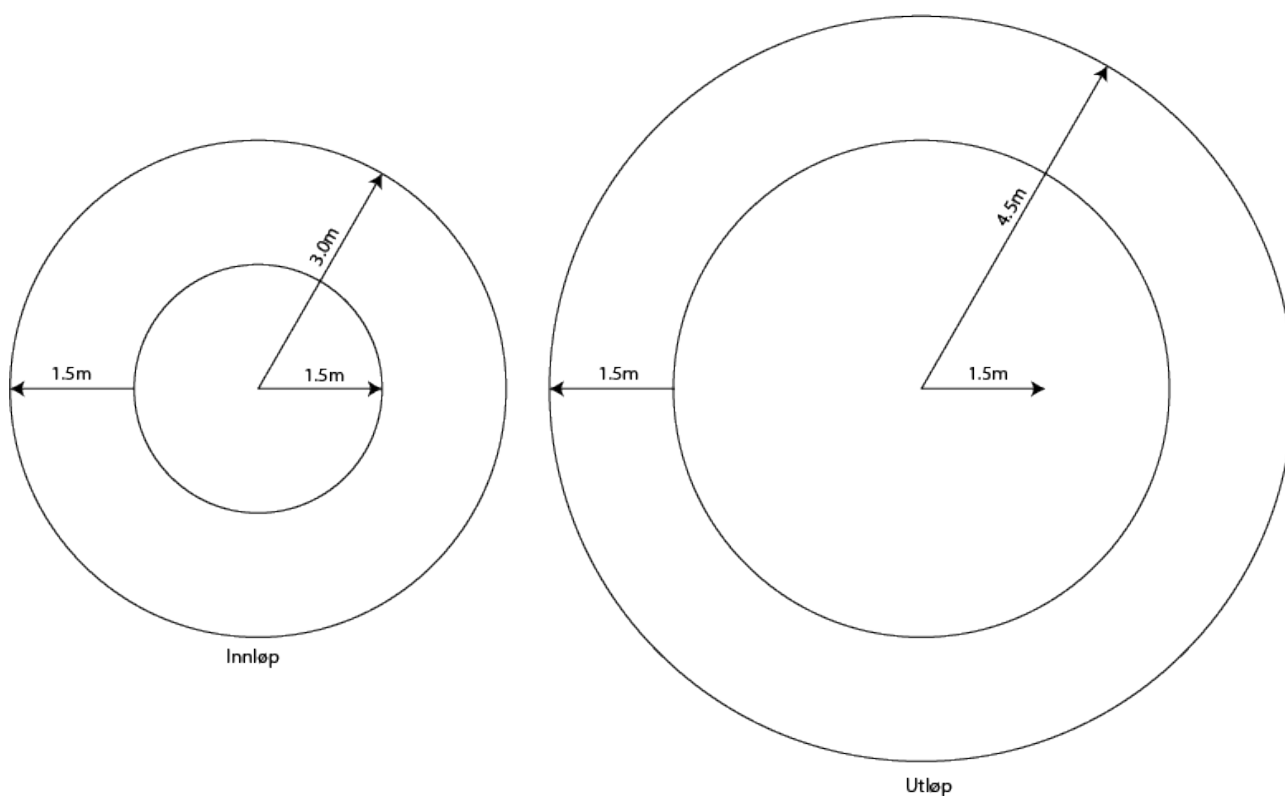
I IGC Kap. 10.1 blir faresoner (HZ) oppsummert. HZ0 vil være områder der det er eksplosiv atmosfære. HZ1 er områder som er koblet til HZ0 og der det kan være en fare for at det oppstår en eksplosiv atmosfære under normal drift. HZ2 er områder koblet til HZ1 hvor det ikke skal oppstå en eksplosiv atmosfære under normal drift. Dersom det oppstår vil det være for korte tidsperioder [11].

Under dekk inndeles rom og systeminstallasjoner i faresoner (HZ). HZ0 inkluderer tanker, systemrør og utstyr som inneholder drivstoff. HZ1 kan inkludere rom som behandler drivstoff, tankrom, og rom som inneholder flere drivstoffventiler. Airlocks og boltede luker til HZ1 kategoriseres som HZ0. Airlock er beskrevet i Kapittel 3.1.3. Figur 15 viser hvordan inndelingen kan se ut på et sonekart.



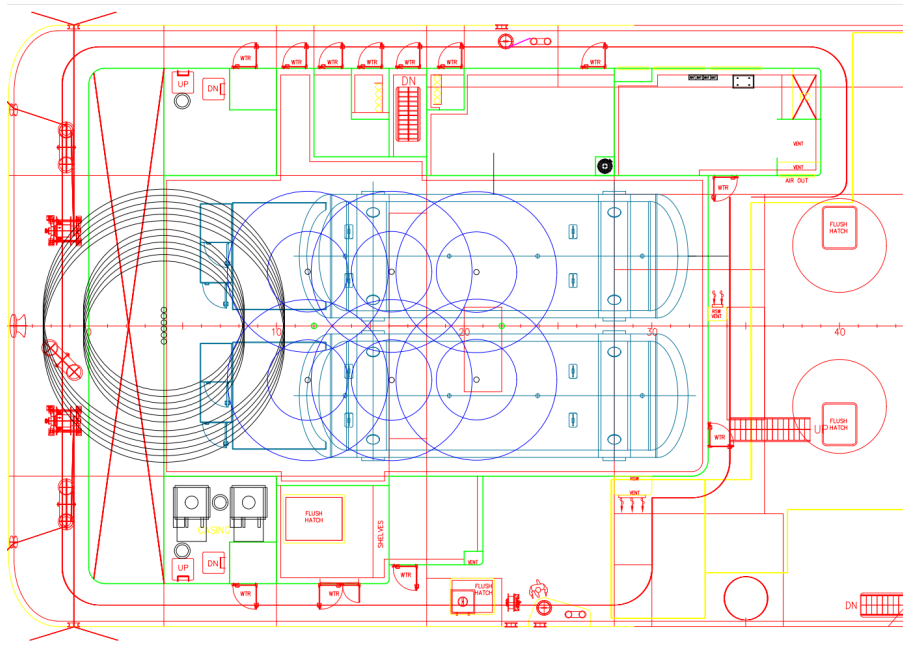
Figur 15: Fare soner - Hazardous-Areas markeringer i sonekart

På åpent dekk befinner soner seg rundt ventilasjon for HZ1 og HZ2. HZ2 har ikke definert soner for ventilasjon. Innløp til ventilering er klassifisert som HZ1 med en radius på 1.5m. Utløp klassifiseres som HZ1, med en radius på 3m. Det kategoriseres som HZ2 1.5m fra HZ1-innløp og -utløp. Summert har innløp en sikkerhetssone på 3m og utløp en sikkerhetssone på 4.5m. Figur 16 viser innløp og utløp på åpent dekk.



Figur 16: Skisse av soner for ventilasjons innløp og utløp

Figur viser praktisk anvendelse av innløp og utløp. Blå soner er innløp og svarte soner er utløp. Det figuren viser er at utløp kan samle seg siden de kan være plassert i faresoner. Innløp kan ikke være plassert i faresoner og blir plassert i et område som ikke vil ha sone.



Figur 17: Praktisk anvendelse av soner

Klassifisering av soner kan være utvidet etter hvilket drivstoff som blir brukt og hvilket regelverk som følges.

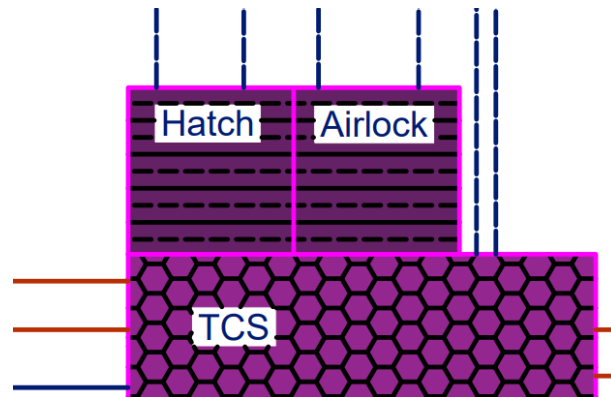
3.1.2 Tank Connection Space

I Kapittel 3.1.1 nevnes det at tankrom defineres som HZ1. Dette unngås ved innstilling av Tank Connection Space (TCS). IGF Code Kapittel 2.2.15 beskriver TCS som et gasstett rom som er koblet til tanken[10]. TCS inneholder alle koblinger til tanken, og inkluderer hovedventil til drivstoff rørene samt sikkerhetsrør for trykklettelse (Pressure relief) som skal redusere på trykket i tanken om det oppstår brann. TCS defineres som HZ1 i følge IGF Kapittel 12.5 og krever egen ventilasjon. For sikker adgang inn til TCS er det nødvendig med en boltet hatch og airlock løsning.

3.1.3 Airlock og Hatch

En airlock er et gasstett rom mellom fare- og ikke farlige soner, og reduserer antall HZ-kategoriserte områder. HZ for airlock kategoriseres iht. IGF Kapittel 12.5 [10]. Airlock markeres som HZ2 og kobles til alle rom med HZ1 markering. Hatch er en sluse som er definert i IGF 5.11.3 som en løsning for TCS dersom tanken ikke plasseres på åpent dekk. Slusen skal være boltet og klassifiseres som HZ2. Airlock og hatch krever egen ventilasjon, der airlock må være i overtrykk ved bruk av mekanisk ventilasjon. Hatch og rom med HZ1 skal være i undertrykk, som bestemmes av IGF koden, avsnitt

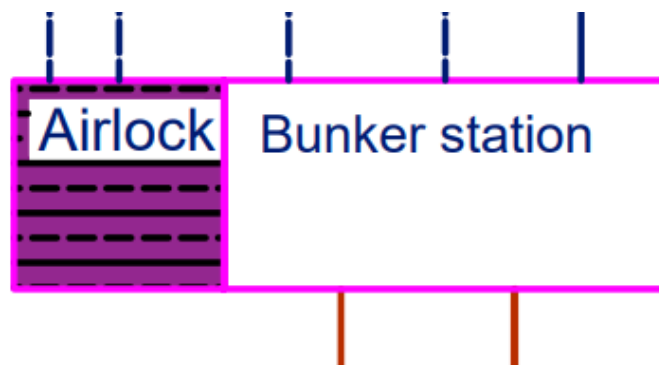
13.3.9 [10]. Dette er for å hindre bevegelse av farlige gasser fra HZ1 inn i airlock. Figur 18 viser airlock og hatch for en tank med TCS.



Figur 18: Eksempel på airlock og hatch

3.1.4 Bunkring

Bunkring er drivstoffpåfylling for skip. Bunkringstasjonen ombord skipet endres ikke med systemene ettersom regelverkene oppgir samme retningslinjer. Regelverket BV, NR547 omtaler skip som bruker brenselceller. I seksjon 8, Kapittel. 11.1.2 bestemmer bruk av sensorer og alarmer som skal varsle om farlig gasskonsentrasjon på stasjonen [17]. Resten av regelverkene refererer til hverandre, der BV NR671 seksjon 1, Kapittel 6.1.1[15] viser til Kapittel 8 i BV, NR529 [14]. Alle regler er basert på IGF koden Kapittel 8.5 [10], og blir direkte sitert i overnevnte NR529 Kapittel 8.



Figur 19: Skisse av bunkringstasjon

Den eksisterende bunkringsstasjonen på skipet settes opp som vist i Figur19. Bunkringsstasjonene vil være lik for alle tre alternativ, og som nevnt over følger regelverkene samme standarder for klassifisering av bunkringsstasjoner.

3.1.5 Dobbelveggede rør

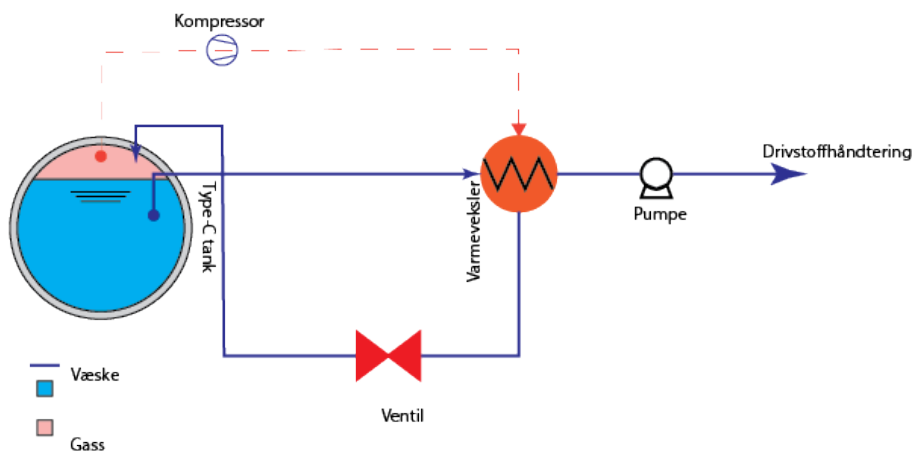
Dobbelveggede rør (DV-rør) er et sikkerhetssystem som forhindrer lekkasjer og er et direkte krav for sikker drivstoffhåndtering gitt av BV NR529 seksjon C5.6.3 og IGF 7.3.1.5 [10, 14]. IGF Kapittel 13.8 gir ytterligere regler for double-piping system [10]. Disse rørene beskrives best som et rør inni et større rør, hvor mellomrommet ventileres med luft eller inertgass. Det ventilerte området inni røret klassifiseres som HZ1. Bruk av DV-rør fjerner behovet for faresoner i hvert rom drivstofflinjen går gjennom.

3.1.6 Ventiler

For å sikre rørsystemene må korrekte ventiler installeres. Bruk av ventiler i forskjellige komponenter er beskrevet gjennom NR529 [14] under avsnitt som tilsvarer undersøkt komponent. Det alterneres mellom tre forskjellige ventiler i systemene. Disse er Trykkventil - P/V Valve, Tilbakeslags ventil - No return valve og av/på-ventiler. Trykkventiler er designet slik at de åpnes automatisk når trykket i røret når et gitt nivå. I tilbakeslagsventiler skjer strømmingen kun i en retning, og bidrar blant annet til å forhindre undertrykk i diverse rør. Av/på-ventiler er manuellopererte ventiler som tillater strømming i begge retninger. Denne typen ventil brukes på inertgass rør, der trykket er høyere på den ene siden av ventilen, og strømmen vil kunne gå ønsket vei.

3.1.7 Boil-Off Gas Håndtering

Boil Off Gas håndtering beskrives i NR529 Kapittel 6.9 [14], og er et håndteringssystem med formål om å kondensere dampen som oppstår i drivstofftankene for å redusere trykket. Systemet består av kompressorer, ventiler og varmevekslere, og kan også brukes som energikilde til mindre energikrevende system ombord. Figur 20 viser skissering av BOG håndtering.



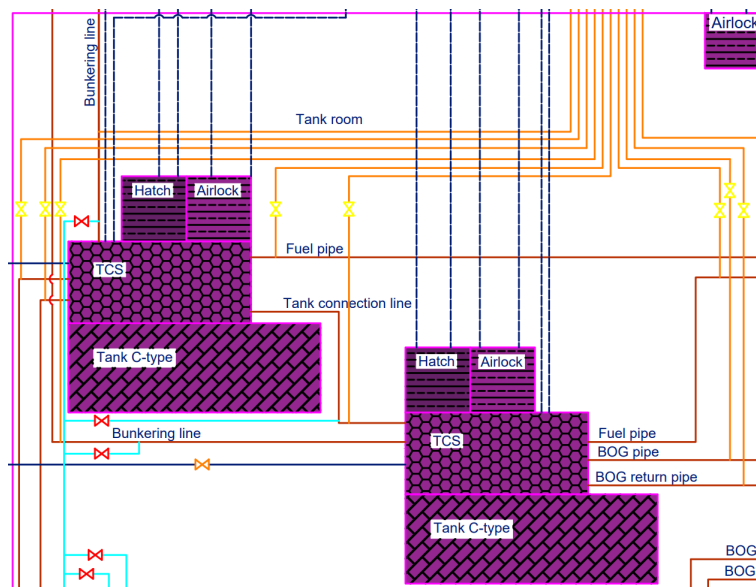
Figur 20: Skisse av BOG behandling

3.2 Hydrogen PEMFC System

Oppsettet til hydrogen PEMFC system blir påvirket av gjeldende lover og regler. Dette fører til lovpålagte komponenter som må innføres i systemet.

3.2.1 Tankrom

Tankrommet består av to type-C tanker som er koblet sammen via et rør for å balansere drivstoff mengden i hver tank. Det er behov for to tanker for å møte drivstoffbehovet til skipet. Hver tank må være koblet med egen bunkringslinje fra bunkringsstasjonen. Bunkringsstasjon blir bestemt av IGF Kapittel 8 [10].

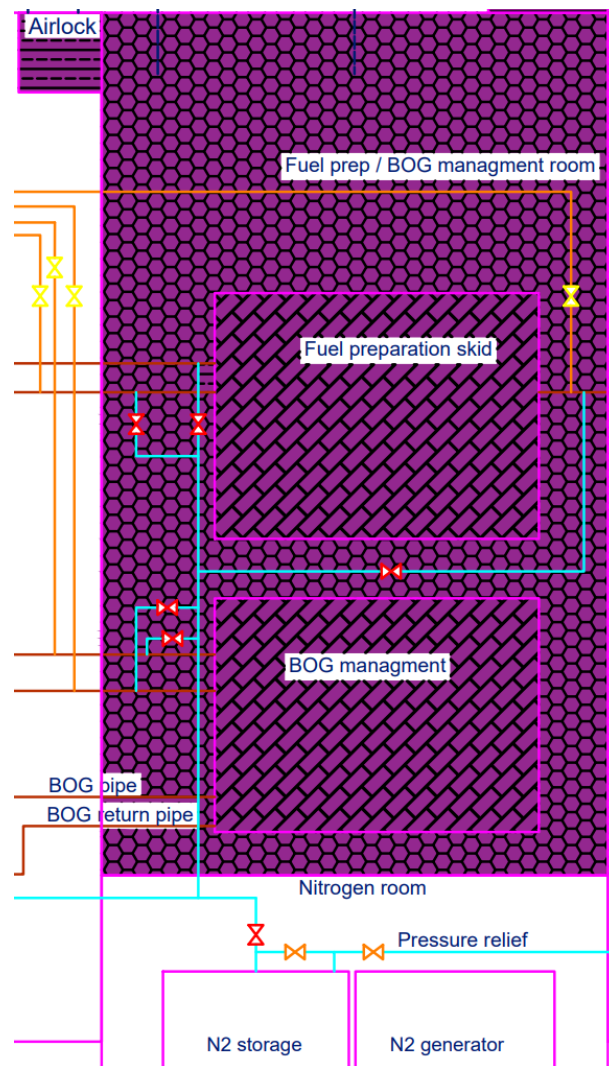


Figur 21: Hydrogen tankrom

3.2.2 Drivstoffhåndtering

Hydrogen må omgjøres fra flytende form til gass for å kunne brukes som drivstoff. Dette blir gjort i et eget rom for drivstoffhåndtering. Rommet markeres som HZ1 og er pålagt en airlock løsning som bestemmes av IGF Kapittel 12.5.2 [10].

Rommet for drivstoffhåndtering inkluderer Boil Off Gas (BOG) håndtering 20. Den håndterte BOG-en pumpes tilbake til tankene gjennom TCS 3.1.2. IGF Kapittel 12.5.1 klassifiserer drivstoffhåndteringskomponenter og BOG-håndteringen som HZ0 ettersom de er i direkte kontakt med drivstoffet [10].

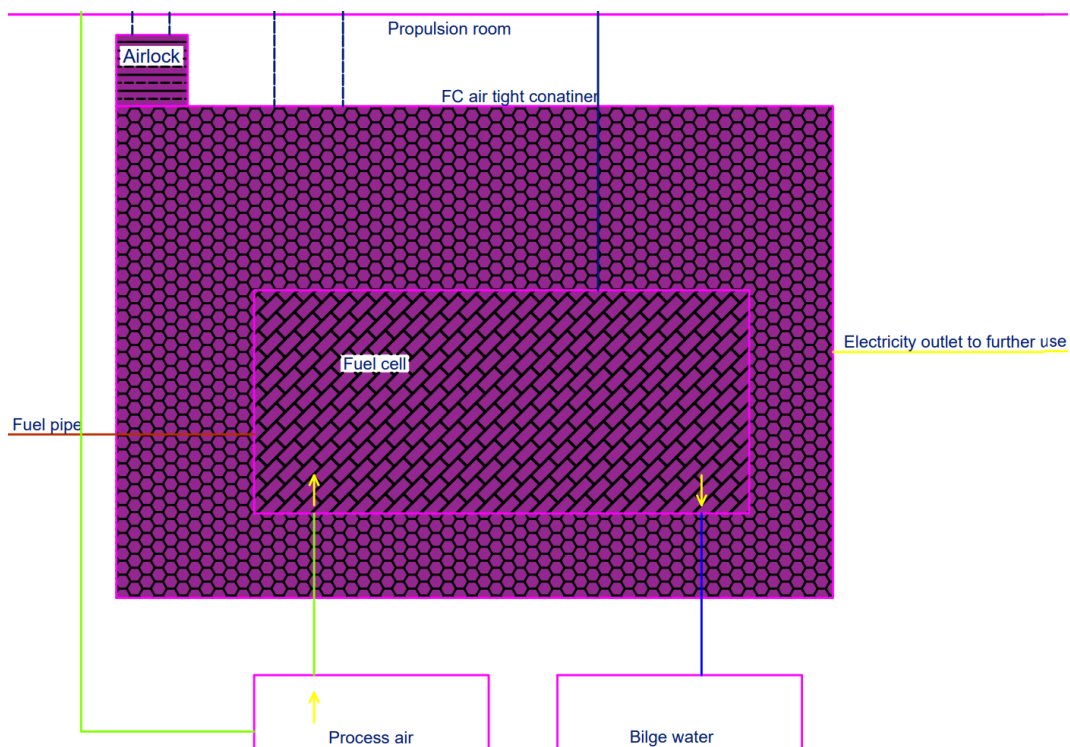


Figur 22: Hydrogen drivstoffhåndtering

3.2.3 Propulsjonsrom

NR547 Seksjon 7, Kapittel 1.3.2 beskriver brenselcellerom som HZ1 [17]. For plassering av brenselceller i propulsjonsrommet vil en containerløsning være et alternativ for å kunne ferdes i propulsjonsrommet under operasjon. Adgang inn til containeren er gjort via en påkrevd airlock markert HZ2. Det er også krav om overvåkning av gasskonsentrasjon i containeren for å fremme sikker drift bestemt av NR547 Seksjon 8 Kapittel 5.1 [17].

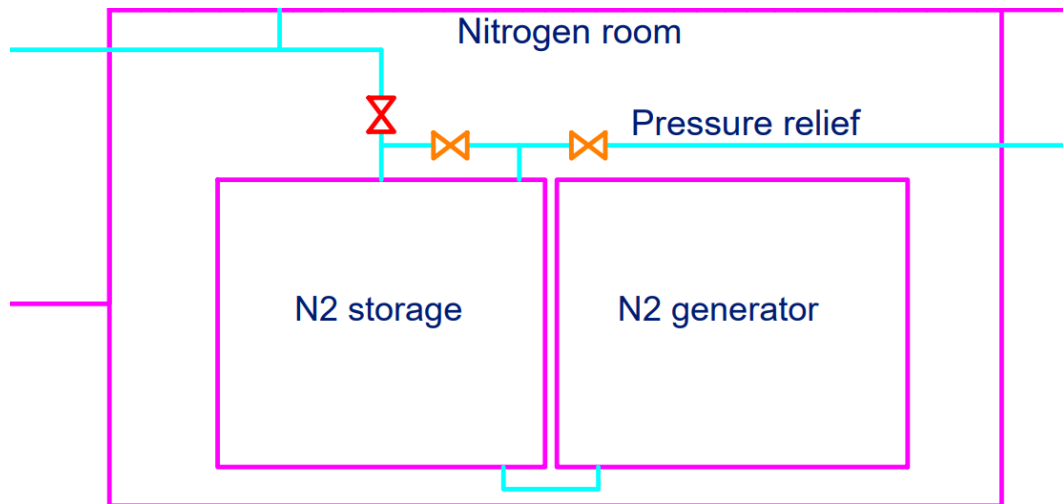
Brenselcellene krever egen luftinntak og luftprosessanlegg. Dette installeres utenfor containeren i propulsjonsrommet. Brenselcellene produserer elektrisitet med vann som produkt, som vist i Kapittel 2.3.1. Flytende vann (bilge water) føres ut av cellen til en egen tank utenfor containeren, og kan brukes videre til andre formål. Vanndamp og eventuell hydrogen som ikke brukes i strømgenereringsprosessen, blir ført ut ventilasjonsmasten. Brenselcellecontaineren kobles direkte til det elektriske systemet.



Figur 23: Hydrogen propulsjonsrom

3.2.4 Inertering

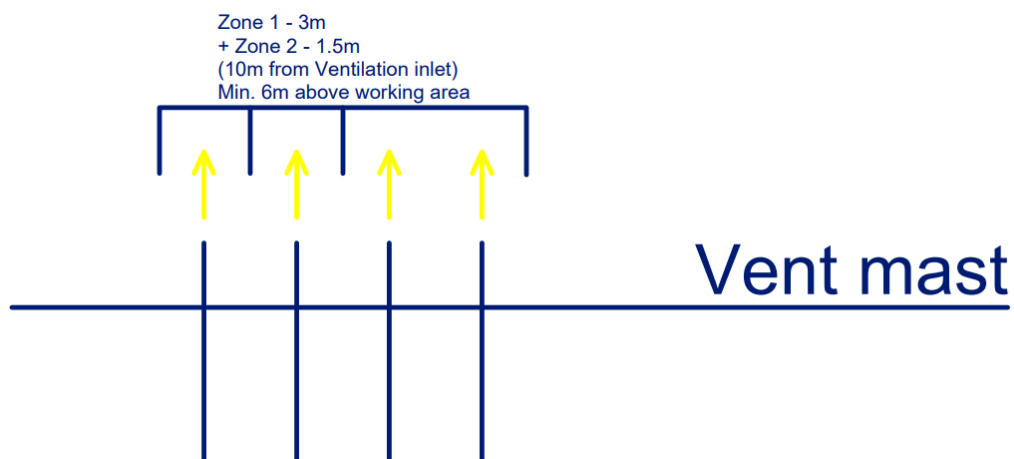
IGF Kapittel 6.14 bestemmer at det alltid må være mulig å produsere og lagre inertgass ombord. Inertgass for systemet vil være nitrogen. Nitrogen brukes i DV-rørene for systemet og rensing av bunkringsliner. DV-rørsystemet for drivstoffrørene kobles opp til atmosfærisk utløp som må følge HZ reguleringer. Oppstår det lekkasje i innerrøret i DV-rør systemet fylles de med nitrogen og ventileret til atmosfæren, som forklart i IGF Kapittel 13.8.1 [10].



Figur 24: Inertgassystem for PEMFC

3.2.5 Ventilasjonsmast

IGF Kapittel 6.7 bestemmer at det er nødvendig med en ventilasjonsmast for P/V ventil fra begge tanker. Masten må befinne seg 6m over arbeidsdekk, og 10m fra nærmeste innløp. Mast utløp klassifiseres med HZ markering for utløp som nevnt i Kapittel 3.1.1. Gassfjerning fra bunkringsstasjon og ureagert hydrogen fra brenselcelle blir også ført i ventilasjonsmast. Gassutpumpingsrøret fra bunkringsstasjonen er et sikkerhetssystem som skal fjerne rester av hydrogen ved mulig lekkasje under bunkring iht IGF Kapittel 8.5 [10].



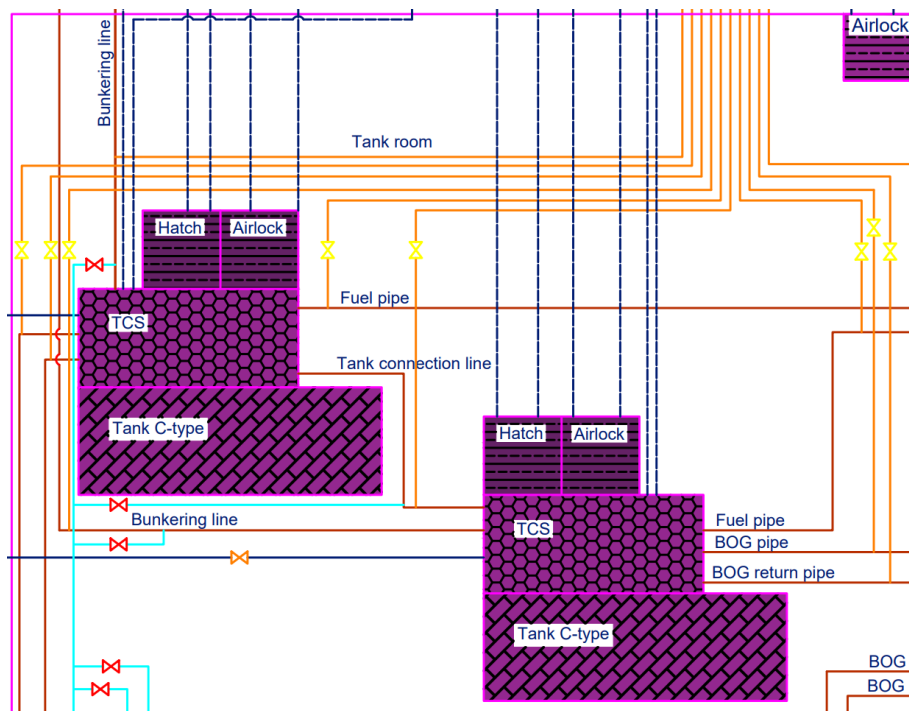
Figur 25: Ventilasjonsmast for PEMFC system

3.3 Ammoniakk SOFC System

Oppsettet til ammoniakk SOFC system vil være det samme som hydrogen PEMFC system med få endringer. Det er fremdeles gjeldende lover og regler som må følges.

3.3.1 Tankrom

Tankrommet består av to Type-C tanker som er koblet sammen med et rør for å balansere drivstoff mengden i hver tank. To tanker kreves for å lagre nok drivstoff for operasjonstiden. Hver tank kobles med egen bunkringslinje fra bunkringsstasjonen. Bunkringsstasjon blir bestemt iht. IGF Kapittel 8 [10].



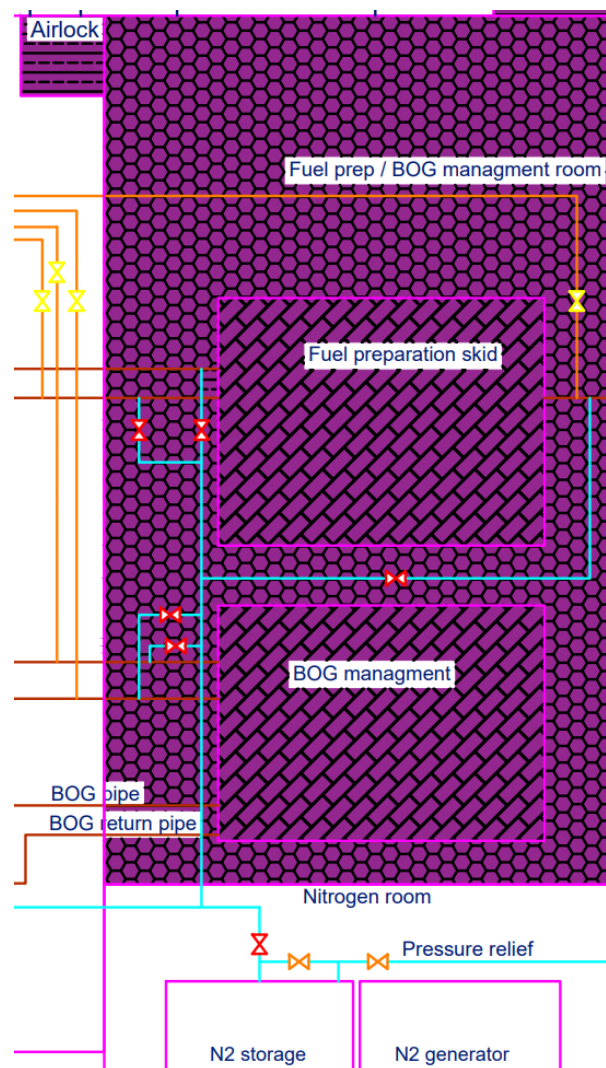
Figur 26: Tankrom for ammoniakk system

3.3.2 Drivstoffhåndtering

Ammoniakk må omgjøres fra flytende form til gass for å kunne brukes som drivstoff. Dette gjøres i et eget rom for drivstoffhåndtering. Rommet markeres som HZ1 og krever en airlock løsning, som er pålagt av IGF Kapittel 12.5.2 [10].

Rommet for drivstoffhåndtering inkluderer Boil Off Gas (BOG) håndtering 20. Den kondenserte BOG-en pumpes tilbake til tankene gjennom TCS 3.1.2. IGF Kapittel 12.5.1 klassifiserer drivstoffhåndteringsrommet og BOG-håndteringen som HZ0 ettersom de er i direkte kontakt med drivstoffet [10].

Fuel-preparation rommet inneholder drivstoffsklargjøringsstasjoner og BOG-håndtering. De vil ha samme oppsett som hydrogen systemet 3.2.2, med samme inndeling av soner, airlocks og ventilasjon. BOG-håndtering kondenserer ammoniakken og fører den tilbake inn i drivstofftankene.

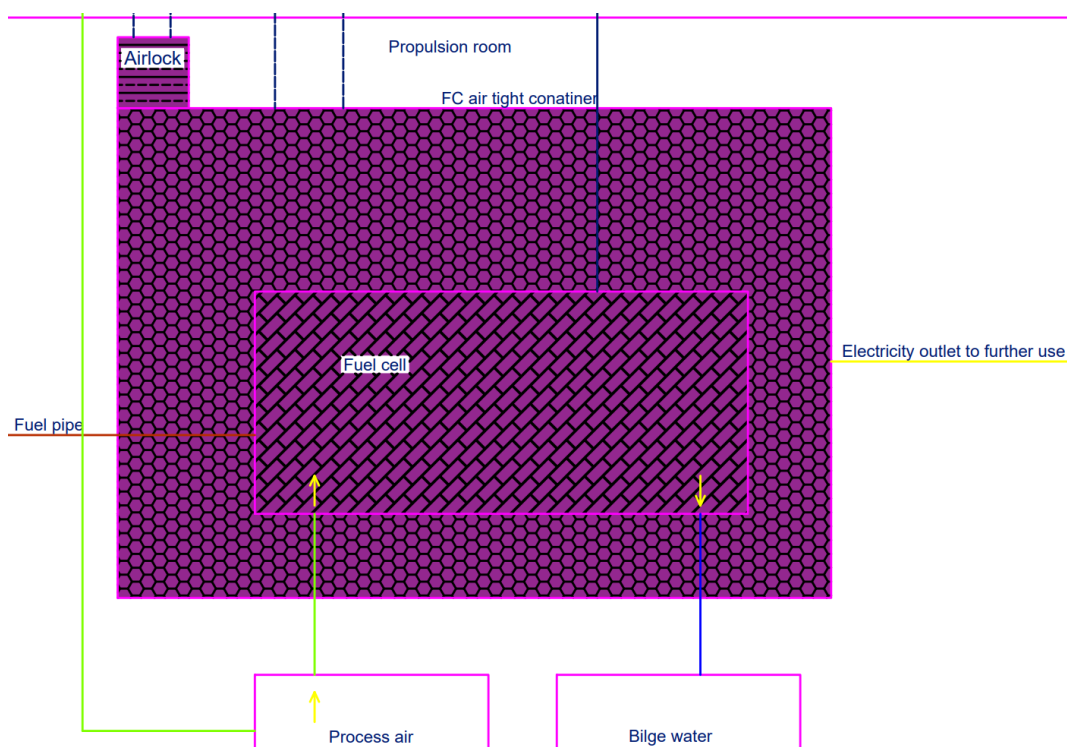


Figur 27: Drivstoffhåndtering for ammoniakk system

3.3.3 Propulsjonsrom

NR547 Seksjon 7, Kapittel 1.3.2 klassifiserer brenselcellerom som HZ1 [17]. For plassering av brenselceller i propulsjonsrommet vil en containerløsning være et alternativ for å kunne ferdes i propulsjonsrommet under operasjon. Adgang inn til containeren er gjort via en påkrevd airlock klassifisert som HZ2. Det er også krav om overvåking av gasskonsentrasjon i containeren for å fremme sikker drift bestemt av NR547 Seksjon 8 Kapittel 5.1 [17].

Brenselcellene trenger egen luftinntak og luft prosessanlegg. Dette installeres utenfor containeren i propulsjonsrommet. Brenselcellene produserer elektrisitet med vann som biprodukt, som vist i Kapittel 2.3.1. Flytende vann (bilge water) blir ført ut fra cellen til egen tank utenfor containeren, og kan brukes videre til andre formål. Vanndamp og eventuell hydrogen som ikke brukes i strømgenereringsprosessen blir ført ut ventilasjonsmasten. Brenselcellecontaineren kobles direkte til det elektriske systemet.



Figur 28: Propulsjonsrom for ammoniakk system

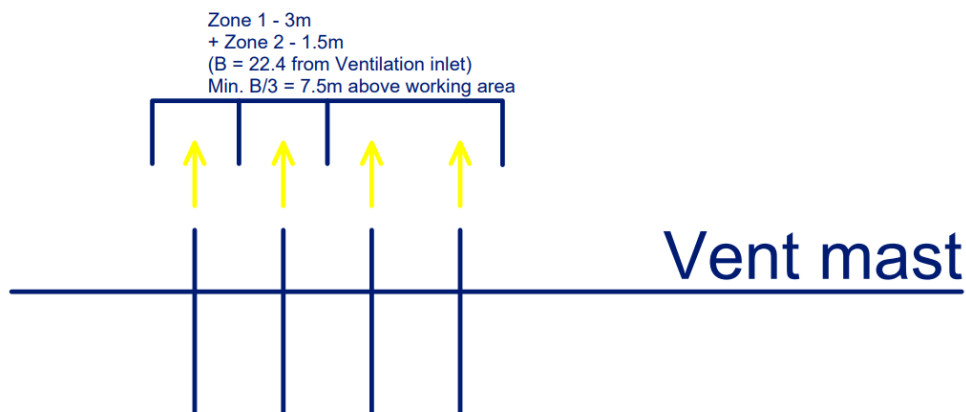
3.3.4 Inertering

IGF Kapittel 6.14 bestemmer at det alltid må være mulighet for produksjon og lagring av inertgass ombord. Inertgass for systemet vil være nitrogen. Nitrogen brukes i DV-rørene for systemet og rensing av bunkringslinjer. DV-rørsystemet for drivstoffrørene kobles opp til atmosfærisk utløp som må følge HZ reguleringer. Oppstår det lekkasje i innerrøret i DV-rør systemet fylles de med nitrogen og deretter ventilert til atmosfæren, som forklart i IGF Kapittel 13.8.1 [10].

3.3.5 Ventilasjonsmast

IGC Kapittel 8.2 viser til P/V som gjelder for ammoniakk. Utløp må plasseres med avstand som tilsvare bredden (B) av skipet eller 25m fra nærmeste innløp. For brønnbåten tilsvare bredden 22.4m som vil være mindre enn 25m, og det vil bli valgt som radius for mast. NR671 Sec. 1 Kapittel 3.9 viser til dette. I tillegg må masten være B/3 eller 6m over arbeidsdekk, hvor den lengste verdien vil gjelde. Det vil være B/3 for brønnbåten, som tilsvare en høyde på 7.5m.

Fra brenselcelle kan det oppstå ureagert ammoniakk som må ventileres ut av masten iht NR671 seksjon 1, Kapittel 3.5.1 [15]. Det er valgt å føre gassrester fra bunkring til ventilasjonsmast dersom det oppstår.



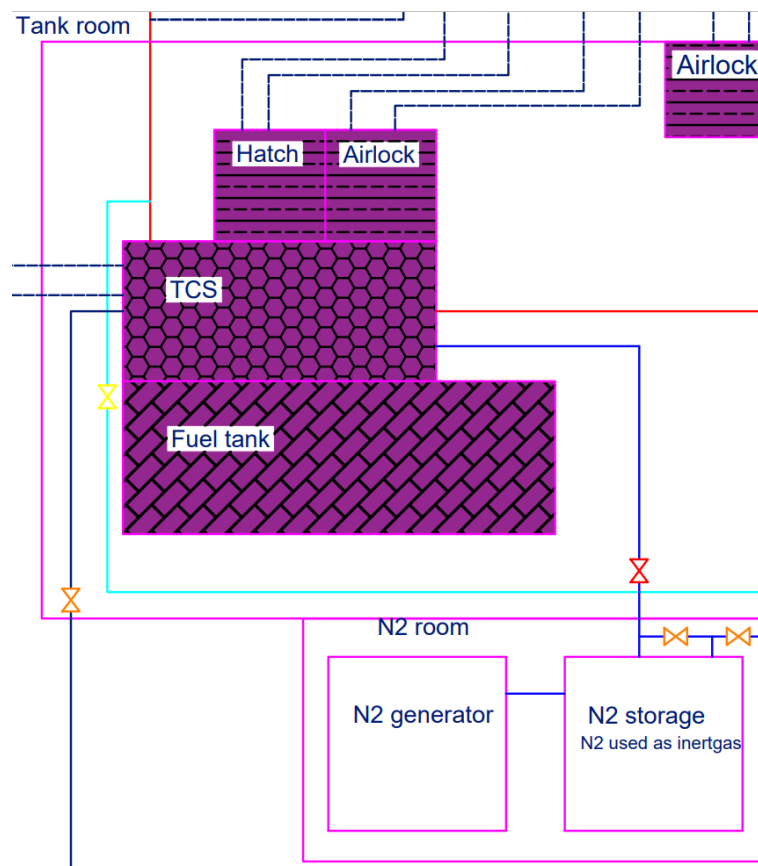
Figur 29: Ventilasjonsmast for SOFC system

3.4 Metanol Dual Fuel System

Metanol Dual-Fuel system vil ligne det originale systemet for brønnbåten. Endringer som oppstår er drivstoffet brukt er væske og ikke gass. Dette gjør at håndtering av lekkasje endres.

3.4.1 Tankrom

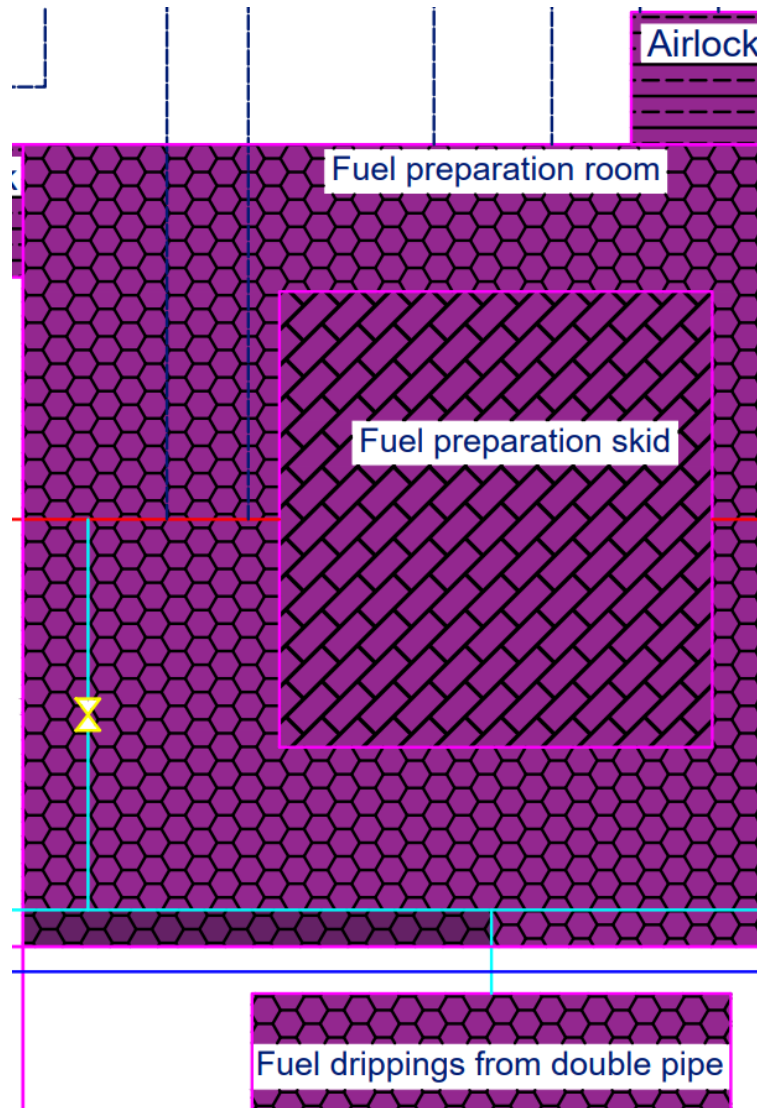
Type-C tanken som oppbevarer drivstoffet må byttes ut med en tradisjonell drivstofftank. Tanken må følge regler gitt av NR670, seksjon 3, kapittel 1.2 [16]. Disse bestemmer oppbyggingen av tanken basert på plassering ombord. Det plasseres TCS på metanoltanken med airlock og hatch. Det er påkrevd kofferdammer rundt tanken for å samle opp lekkasjer av drivstoff [16].



Figur 30: Tankrom for metanol system

3.4.2 Drivstoffbehandling

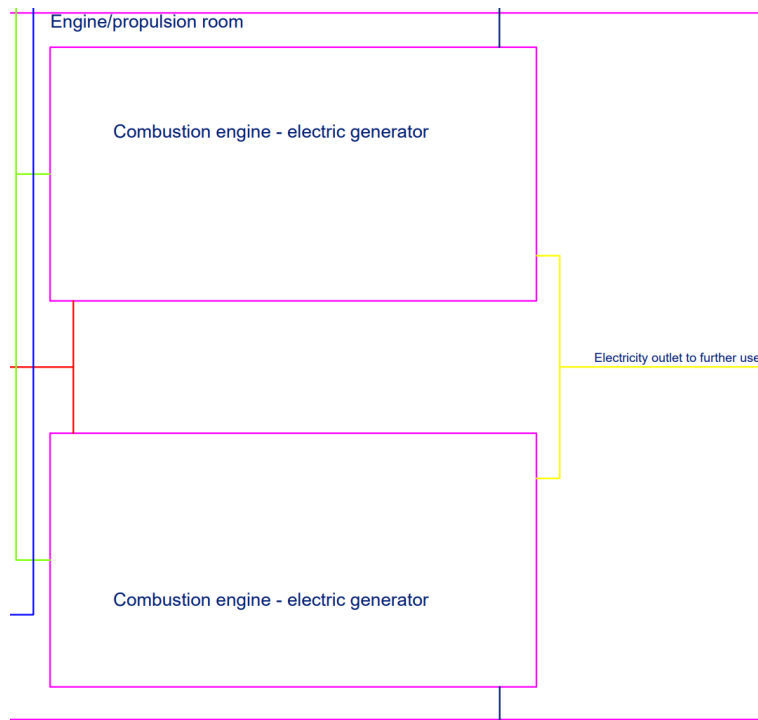
NR670 Seksjon 10 Kapittel 1.4.2 klassifiserer rommet for drivstoffhåndtering som HZ1. Det er da nødvendig med en airlock for å passere inn i rommet. Utstyr som gjør drivstoffet klar for bruk i motor er klassifisert som HZ0 [16].



Figur 31: Drivstoffbehandlingsrom for metanol system

3.4.3 Propulsjonsrom

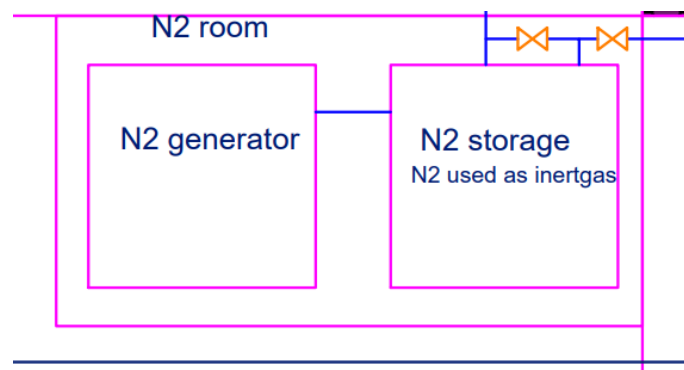
Propulsjonsrommet vil ikke klassifiseres med en faresone. Rør fra drivstoffbehandling vil gå direkte inn i DF motorene.



Figur 32: Propulsjonsrom for metanol system

3.4.4 Inertering

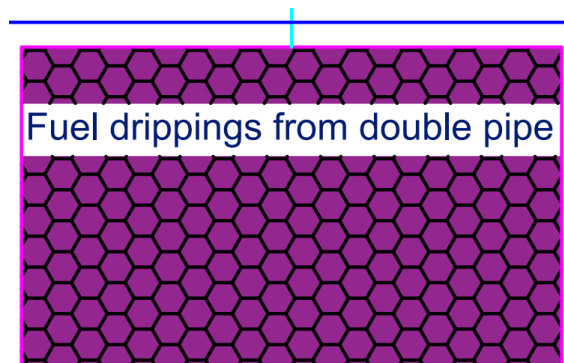
IGF Kapittel 6.14 bestemmer at det alltid må være mulighet for produksjon og lagring av inertgass ombord [10]. Inertgass for systemet vil være nitrogen (N_2). Inert gass brukes til rensing av bunkringslinjer etter bruk. NR670 Seksjon 4, Kapittel 3 bestemmer at tanker må inerteres for å hindre at det oppstår eksplosiv konsentrasjon av metanoldamp i tanken under drift.



Figur 33: Produksjonsrom for inertgass

3.4.5 Tilleggsutstyr

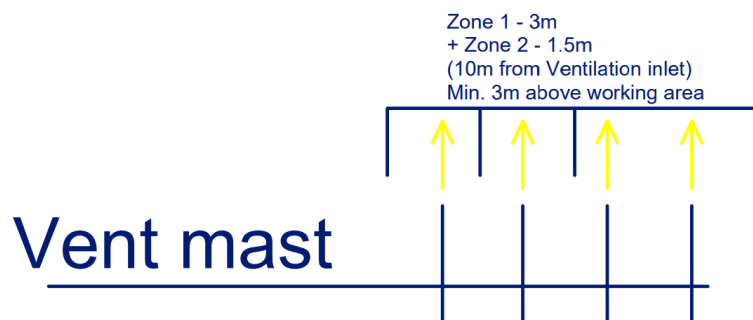
Ved installasjon av et metanolbasert drivstoffsystem er det påkrevd et drivstoffoppsamlingsystem i tilfelle lekkasjer oppstår, og kalles Fuel-Drip. Fuel-drip samler eventuelle drivstofflekasjer i D/V-rør i en sikker tank som NR670, Seksjon 3, Kapittel 2.2 bestemmer [16]. NR670 Seksjon 10, Kapittel 1.4.2 klassifiserer kofferdammer som HZ1, og gjelder gfor drivstoffoppsamlingsystemet. [16].



Figur 34: Fuel-Drip for metanol system

3.4.6 Eksosmast

NR670 Seksjon 4, Kapittel 2.1.12 bestemmer at utløp fra tank må befinne seg minst 3m over arbeidsdekk og 10m avstand fra næremeste innløp. Forbrenning av metanol produserer eksos som førest ut i samme mast. Damp som oppstår ved bunkring slipes ut gjennom masten.



Figur 35: Eksosmast for metanol system

4 Resultat

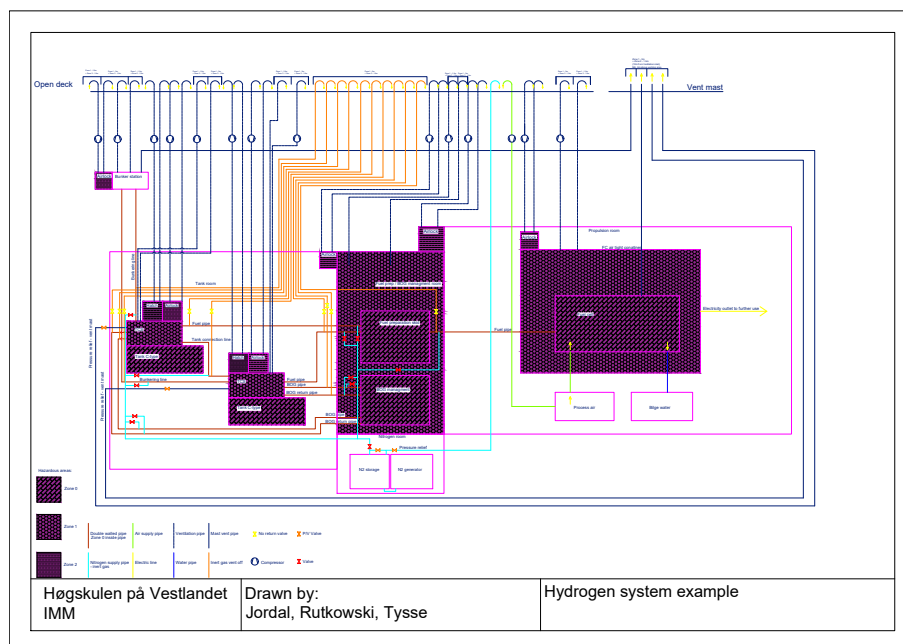
Kapittel 3 er grunnlaget for forslag til drivstoffsystem. Det vil også bli gjort en vurdering av stabilitet.

4.1 Forslag til Lavutslipps Drivstoffsystem

Forslag til drivstoffsystem vil bli presentert som figurer og henvist til vedlegg. Det vil også bli vurdert de største endringene som vil oppstå.

4.1.1 Hydrogen

Vedlegg 1 viser forslag til systemtegning for hydrogen PEMFC system i A3 format. Figur 36 viser systemtegning for hydrogen.

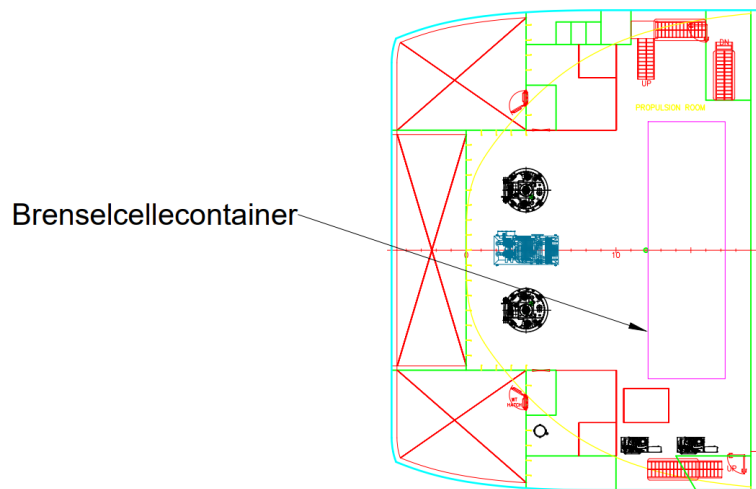


Figur 36: Hydrogen system forslag

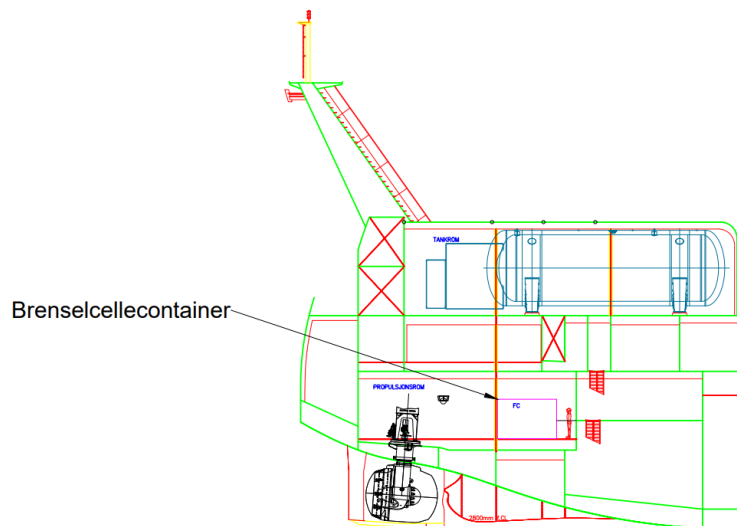
Endringer

Ved installasjon av PEMFC i brønnbåten må den eksisterende tanken utvides, som nevnt i Kapittel 2.5.3. Type-C tanken må utvides med enten 7.3m i lengden, eller 1.1m i diameter, som vist i Figur 11 under. Dette vil føre til endringer i tank.

Brenselcellecontaineren fra ABB med dimensjonene 12mx3.6mx2.4m vil kunne installeres i eksisterende propulsjonsrom etter fjerning av gammelt system, som vist i Figur 6 [54].



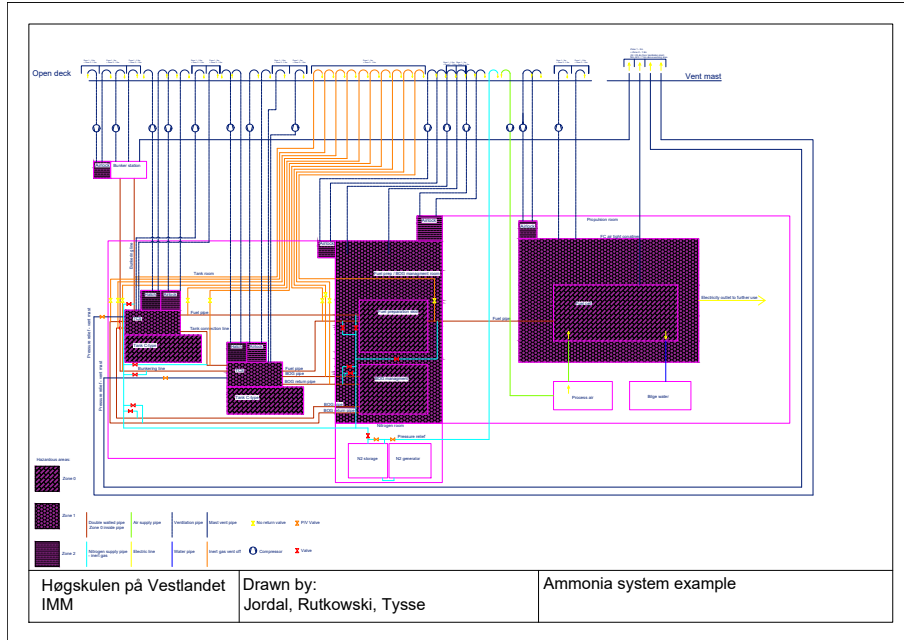
Figur 37: Brenselcellecontainer i propulsjonsrom fra top



Figur 38: Brenselcellecontainer i propulsjonsrom fra siden

4.1.2 Ammoniakk

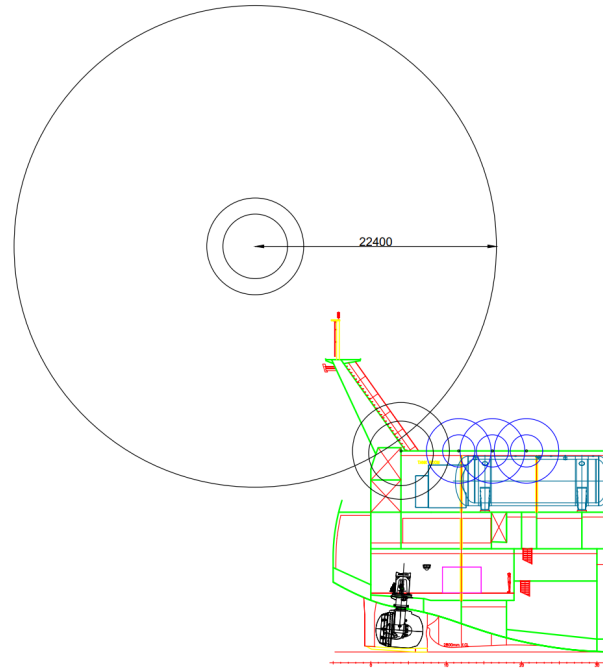
Vedlegg 2 viser systemtegning for ammoniakk SOFC system i A3 format. Figur 39 viser systemtegning for ammoniakk system.



Figur 39: Amoniakk system forslag

Endringer

Ved installasjon av et ammoniakkbasert SOFC-system, må eksosmasten utvides. Dette er beskrevet i Kapittel 3.3 . Figur 40 viser minste utslippsradius på masten, samt innløp (blå) og utløp (svart) forklart tidligere i Kapittel 3.1.1.

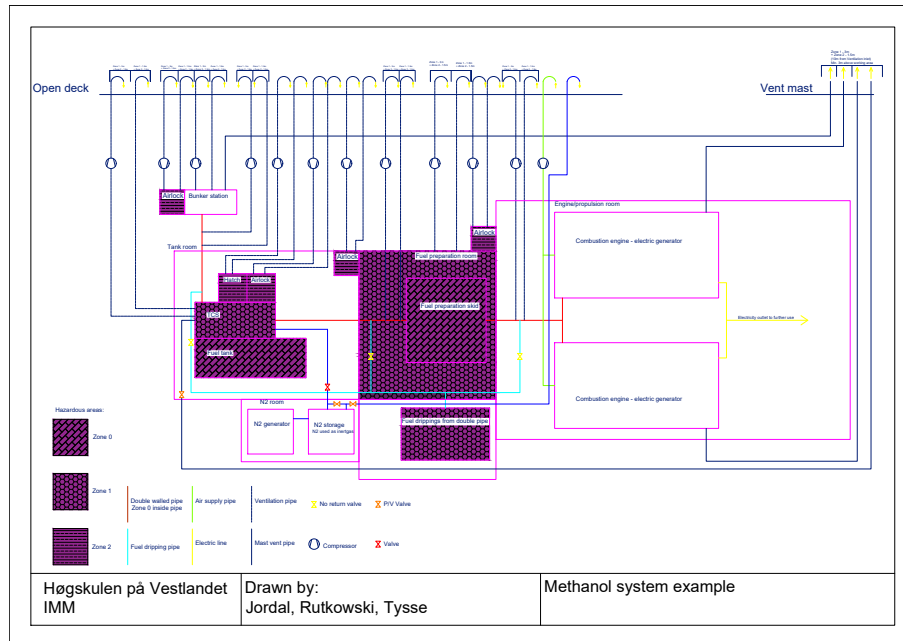


Figur 40: Radius for utslipp av ammoniakk gjennom mast gitt i cm

Brenselcellecontaineren vil ha samme dimensjoner som for PEMFC. Den vil da bli plassert likt som i Figur 6.

4.1.3 Metanol

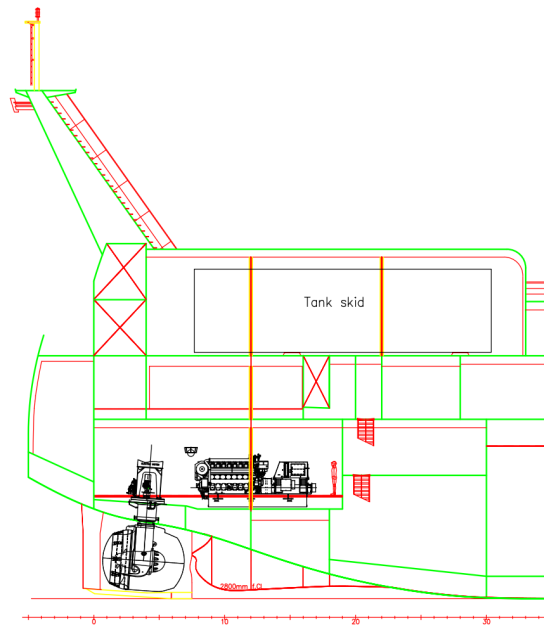
Vedlegg 3 viser systemtegnning for metanol DF system i A3 format. Figur 41 viser systemtegnning for metanol.



Figur 41: Metanol system forslag

Endringer

Type-C tanken man finner i brønnbåten må erstattes med en tradisjonell MGO drivstofftank, som nevnt i Kapittel 2.5.3.



Figur 42: Tankendring i DF system

4.2 Stabilitetskontroll på Vektendringer

Den største vektøkningen vil skje ved installasjon av dual-fuel systemet, ettersom metanol har en høyere massetetthet enn det opprinnelige drivstoffet LNG. Dette vil medføre en vektøkning på 121 000kg, som nevnt i Kapittel 2.5.5. Dette tilsvarer en økning på 1.7% av skipets totalvekt. Ettersom denne vektøkningen er lav sammenlignet med skipets totalvekt, vil det ikke ha en innvirkning på skipets stabilitet. Dette er fordi endringen i tyngdepunkt og metasenter som medfølger vil være neglisjerbar.

Ved en vektreduksjon på drivstoffsystemet vil oppdriftssenteret senkes, og \overline{GM} vil øke. Dette fører til skarpere trimbevegelser, noe som kan ha en påvirkning på lasten. Båtens trim vil senkes, hvor dragkrefter på hekken vil ha en samsvarende nedgang. Med lettere vekt vil skipet bli mer effektivt ettersom det er mindre motstandskrefter fungerende på skroget. Det vil oppstå en vektreduksjon på 125 000kg ved installering av et PEMFC basert drivstoffsystem. Dette tilsvarer en reduksjon i vekt på 1.8%. Ettersom vektreduksjonen vil være lavt, hvor potensiell trim- og krengeendringer kan korrigeres med balansering av ballastvekt, vil dette kunne neglisjeres og skipet vil fortsette å være stabilt.

5 Diskusjon

Ved å undersøke anvendelsen bak installeringen av et lavutslippsdrivstoffsystem i et eksisterende skip vil usikkerheter medfølge som kan ha en påvirkning på konklusjonen i senere tid.

5.1 Fremtidige Endringer i Krav fra Klaseselskap

Systemtegningene viser komponentene og tilhørende soner som er påbudt ved installasjon av de sammenlignede drivstoffsystemene. Gjeldende lover og regler vil endre seg mye i kommende år og fører til at tegningene må endres i nær fremtid, og skyldes manglende erfaring. Det kan antas at det vil oppstå hendelser i kommende år som vil påvirke hva klaseselskap krever av et design.

For ammoniakksystem undersøkes muligheter for å forhindre utvidelse av utslippsmasten som beskrives i Kapitlene 4.1.2 og 3.3.5. I NR671 Seksjon, Kapittel 3.7.5 er det beskrevet at lave konsentrasjoner av ammoniakk kan slippes ut under vannlinje, og det vil være en mulighet for at all ventilering av ammoniakkdamp kan gjøres under vannlinjen dersom fremtidige regler tillater det. Det vil da ikke være nødvendig å forlenge utslippsmasten.

Det eksisterer ikke mye erfaring og hendelser for hydrogen. Dette vil øke i tiden fremover som også vil føre til strengere krav.

5.2 Unøyaktigheter i Stabilitetsjekk

Som nevnt i Kapittel 4.2, vil skipet være stabilt uavhengig av drivstoffsystem som installeres, ettersom vektendringene vil være under 2% av skipets totalvekt for alle tre alternativ.

Totalvekten på brønnbåten er en summering av dødvekt og lettskipsvekt. Ved utregning av vektdifferansen ved de forskjellige drivstoffsystemene er det uvisst hvor mye LNG som ligger i dødvekten av skipet, og det estimeres å være tanker på 80% kapasitet. Vektdifferansen mellom nødvendig LNG for 13 dager og for eksisterende tanker på 80% kapasitet er omtrent 10 tonn. Dette kan føre til en feilestimering på vektendring som må vurderes videre. Å beregne ny GM på skipet kommer med flere utfordringer, og grunnet skipets avanserte geometri i z-planet, ble det raskt konkludert at dette ble for krevende å beregne for hånd. Alternativt kan en modell av skipet konstrueres digitalt, hvor det er mulig å beregne hydrostatiske endringer i tilegnet program.

5.3 Avgjørende Faktorer for Implementering

Flere faktorer ved en eventuell ominstalleringsprosess er ikke tatt i betraktning i oppgaven, og vil være avgjørende i anvendelse og utbredelse av maritim latutslippsteknologisk.

Økonomiske aspekt ved en omstillingsprosess avgjør om en bedrift velger å implementere ny teknologi i prosjektene sine. Tapte driftsinntekter, verftkostnader, drivstoffkostnader og pris på et nytt drivstoffsystem er faktorer som er avgjørende for hvor fort ny teknologi utbredes.

I Kapittel 4.2 har det blitt antatt at PEMFC containeren fra ABB/Ballard på 3000kW, vil være omtrent lik en for SOFC. Dette stemmer nødvendigvis ikke, ettersom SOFC har lavere energitetthet enn PEMFC. Dette kan bety at en SOFC basert brenselcellecontainer vil være både tyngre og større enn det for PEMFC [88]. En leverandør av SOFC er Bloom Energy, som da produserer 300kW SOFC på 16 000kg hver. Båten trenger en ytelse på 3MW, og det kan antas at den totale vekten vil da være 160 000kg for energisystemet, altså 10x300kW moduler, men ettersom det ikke er kommersiell informasjon på dimensjoner av en slik SOFC-container, vil dette måtte undersøkes videre [89]. SOFC er en teknologi som fremdeles er under utvikling og endringer kan oppstå hurtig i kommende år. Leverandører vil prøve å levere et produkt som kan ha en vekt tilnærmet PEMFC for å gjøre det mer attraktivt for kunder.

Tilgjengeligheten bak nullutslippsskipsteknologi er en prominent faktor for å kunne nå de fremtidige utslippsmålne. Kommersialisering av brenselceller er nødvendig for å få utbredt nullutslippsteknologi til mer enn bare pilotprosjekt. En stor aktør innenfor energisektoren, ABB, har utviklet et samarbeid med selskapet Ballard Power Systems i håp om å produsere kommersielle brenselcellemuligheter for større maritime operasjoner[90]. Dette gjelder for både PEMFC og SOFC, hvor utviklingen av PEMFC ligger foran SOFC. Et annet brenselcellebasert prosjekt er H2NOR. Dette samarbeidet er mellom Corvus Energy, Toyota, Equinor, Norled, Wilhelmsen, USN, LMG Marin, NCE Maritime CleanTech, og har som mål å levere ferdigstilte brenselceller til maritim bruk i starten av 2024 [91]. Dette samarbeidet vil ha en stor innvirkning på det fremtidige markedet for nullutslippssystem, og vil være avgjørende for å kunne akselerere kommersialisering av maritim brenselcelleteknologi.

Som nevnt tidligere i Kapitlene 2.2.1 og 2.2.2, kategoriseres hydrogen og ammoniakk basert på hvor fornybar produksjonen er. For å kunne klassifisere et skip som utslippsfritt burde også drivstoffet som blir brukt være produsert utslippsfritt. Per dags dato er ikke infrastrukturen bak miljøvennlig

produksjon av ammoniakk, hydrogen og metanol tilstrekkelig for å kunne møte økende drivstoffbehov. Hovedproduksjonen av hydrogen, ammoniakk og metanol er avhengig av fossile energikilder. Samtidig må produksjonen av disse drivstoffene økes betraktelig for å kunne møte den kommende etterspørselen fra sjøfartssektoren. Det anslås at produksjonen må øke 171% for hydrogen, 391% for ammoniakk, og 859% for metanol [20]. Samtidig står ammoniakkproduksjon for 2% av globale CO₂ utslipp for [38]. Det er nødvendig å øke for å redusere utslipp både i sjøfarten og produksjonen. Dette gjelder også for metanolproduksjonen. I likhet med ammoniakkproduksjon, har metanolproduksjon flere energikrevende steg enn hydrogenproduksjon, som igjen gir flere økonomiske aspekter å ta hensyn til.

6 Konklusjon

Denne bacheloroppgaven sammenligner anvendelsen av tre lavutslippsdrivstoffsystem i en brønnbåt gitt av Salt Ship Design. Ved å analysere endringer som vil medfølge i en eventuell omstillingsprosess, kan det konkluderes at ammoniakk vil være best løsning med tanke på eliminering av klimagassutslipp og medfølgende endringer.

Det eksisterer en del muligheter for ombygging av en brønnbåt for alternative drivstoff. Drivstoffsystem for hydrogen og ammoniakk vil i utgangspunktet se veldig like ut, mens metanol vil ha forskjeller fra begge. Det kommer hovedsaklig av at ved standardbetingelser er hydrogen og ammoniakk gasser, mens metanol er flytende. Metanol har mulighet for å være en kortsiktig løsning for umiddelbar utslippsreduksjon. Metanol derimot kan ikke defineres som et null utslippsalternativ, og dermed vil ammoniakk eller hydrogen være ideelt som et fremtidig drivstoffalternativ.

Installering av PEMFC og SOFC kommer med vesentlige endringer for skipet. Hydrogen har lavere energitetthet enn ammoniakk, og krever mye større tanker for å kunne oppbevare nok drivstoff. Som nevnt i Kapittel 2.5.3, må tanken utvides med over 7m i lengden eller 1.1m i diameter. Ettersom tankrommet ikke er stort nok for en slik utvidelse, må denne også altres for å kunne romme de utvidede drivstofftankene.

Ammoniakk har vesentlig høyere energitetthet enn hydrogen og nok ammoniakk for hele operasjonstiden kan lagres i de eksisterende tankene. Ved å installere et ammoniakkbasert drivstoffsystem, er det kun masten som må utvides med, som nevnt i Kapittel 4.1.2. Brenselcellecontainerene antas å være likt for både PEMFC og SOFC. Dermed vil installering av SOFC kreve færre endringer av brønnbåten sammenliknet med PEMFC. Ammoniakk vil derfor bli vurdert som det ideelle alternativet for et fremtidsrettet fartøy.

7 Videre arbeid

For at teknologien sammenlignet i denne oppgaven skal kunne implementeres i fartøy, må aspekter ikke diskutert i denne oppgaven undersøkes. Disse inkluderer:

Infrastrukturen til hvert drivstoff burde også undersøkes. Dette er noe som kan føre til at et slikt fartøy vil ha et redusert område det kan brukes. Det vil og være nødvendig med en undersøkelse av forsyningskjeden fra produksjon av grønn energi.

Om fremtidig driftsinntekter overstiger tapt inntekt som følge av omstillingsprosess og potensielle økte drivstoffkostnader.

Kommersialisering og tilgjengelighet av brenselcelleteknologi

Det må undersøkes nøyaktige utslipp. Det kan bli produsert litteratur i senere tid som viser til termiske NO_x gasser for SOFC som må undersøkes.

Referanser

- [1] Miljødirektoratet, “Miljøstatus: Norge har lovfestet et mål om å bli et lavutslippssamfunn i 2050,” MILJODIREKTORATET.NO. Hentet fra:
<https://miljostatus.miljodirektoratet.no/miljomal/klima/miljomal-5.4/> Lastet ned: 08.03.2022.
- [2] European Commission, “Climate actopm,” European Union, 2022. [Online]. Hentet fra: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector_en
- [3] M. Eide, H. Hustad, and T. Sverud, “Reduksjon av klimagassutslipp fra innenriks skipstrafikk,” DNV GL, Høvik, Norway, 2019. [Online]. Hentet fra:
<https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1626/m1626.pdf>
- [4] Nærings- og fiskeridepartementet, “Maritime muligheter - blå vekst for grønn fremtid,” 2015, norge. [Online]. Hentet fra: https://www.regjeringen.no/contentassets/05c0e04689cf4fc895398bf8814ab04c/maritim-strategi_web290515.pdf
- [5] Norges rederiforbund, “Norge – verdens fjerde største skipsfartsnasjon - målt i verdi,” REDERI.NO. Hentet fra:
<https://rederi.no/aktuelt/2021/norge--verdens-fjerde-storste-skipsfartsnasjon---malt-i-verdi/>
Lastet ned: 09.03.2022.
- [6] International Maritime Organization, “Imo2020 - cutting sulphur oxide emissions,” IMO.ORG Hentet fra: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx> Lastet ned: 19.05.2022.
- [7] Sjøfartsdirektoratet, “Nox - nitrogenholdige oksider,” [Online] Hentet fra: <https://www.sdir.no/sjofart/fartoy/miljo/utslipp-fra-skip/utslipp-til-luft2/nox---nitrogenholdige-oksider/> Lastet ned 07.04.2022.
- [8] Salt ship design, [Online] Hentet fra: <https://saltship.com/about> Lastet ned: 18.03.2022.
- [9] L. S. Hammer et al., “Maritime forecast to 2050 - energy transition outlook 2021,” DNV GL, 2021.
- [10] *International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels*, International Maritime Organization, 2015. [Online]. Hentet fra:
https://www.register-iri.com/wp-content/uploads/MSC_Resolution_39195.pdf

- [11] *International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk*, International Maritime Organization, 2014. [Online]. Hentet fra: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.370\(93\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.370(93).pdf)
- [12] International Maritime Organization, “International convention for the safety of life at sea (solas), 1974,” IMO.ORG. Hentet fra: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx) Lastet ned: 29.04.2022.
- [13] L. S. Hammer, M. Leisner, M. S. Eide, T. Sverud, and N. Mjøsand, *Ammonia as a marine fuel safety handbook*, DNV GL, Bergen, Norway.
- [14] *Gas Fuelled Ships*, Bureau Veritas, 2020. [Online]. Hentet fra: https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/529-NR_2020-01.pdf
- [15] *Ammonia-fuelled Ships – Tentative Rules*, Bureau Veritas, 2021. [Online]. Hentet fra: https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/671-NR_2021-07.pdf
- [16] *Methyl/ethyl alcohol Fuelled Ships*, Bureau Veritas, 2021. [Online]. Hentet fra: https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/670-NR_2021-07.pdf
- [17] *Ships using Fuel Cells*, Bureau Veritas, 2022. [Online]. Hentet fra: https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/547-NR_2022-01.pdf
- [18] *Handbook for Hydrogen-Fuelled Vessels*, DNV GL, Bergen, Norway, marHySafe JDP Phase 1, 1st Edition (2021-06).
- [19] W. Jolly, “hydrogen chemical element,” i *Britannica Encyclopædia*, 1999, [online]. Hentet fra: <https://www.britannica.com/science/hydrogen/Reactivity-of-hydrogen> Lastet ned: 24.02.2022.
- [20] D. A. H. Charles J. McKinlay, Stephen R. Turnock, “Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol?” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 1, pp. 28 282–28 297, 2021. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.066.
- [21] A. Züttel, “Hydrogen storage methods,” *Naturwissenschaften*, vol. 91, pp. 157–172, 2004. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1007/s00114-004-0516-x.
- [22] P. P. Edwards, V. L. Kuznetsov, and W. I. F. David, “Hydrogen energy,” *Phil. Trans. R. Soc. A.*, vol. 365, p. 1043–1056, feb. 2007. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1098/rsta.2006.1965.

- [23] A. Léon et. al, *Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications*. Springer, 2008.
- [24] V. Fredheim, “Hexagon hydrogen type 4 cylinder information for maritime application,” in *International Conference on Marine Renewable Energy and Maritime Hydrogen Technology*, 2018.
- [25] Hyfindr, “Hydrogen tank – faq guide,” [Online] Hentet fra: <https://hyfindr.com/hydrogen-tank/> Lastet ned: 09.05.2022.
- [26] Y. Noh, J. Kim, J. Kim, and D. Chang, “Economic evaluation of bog management systems with lng cold energy recovery in lng import terminals considering quantitative assessment of equipment failures,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 143, pp. 1034–1045, okt. 2018. [Online] Hentet fra: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.029.
- [27] J. Groznic, “Boil-off gas handling from liquefied hydrogen storage,” Master’s thesis, Norwegian University of Science and Technology, Juni 2020.
- [28] U.S. Energy Information Administration, “Hydrogen explained,” 2017, [Online] Hentet fra: [https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/#:~: text=Hydrogen%20is%20an%20energy%20carrier&text=Hydrogen%2C%20like%20electricity%2C%20is%20an,source%20of%20energy%20or%20fuel](https://www.eia.gov/energyexplained/hydrogen/#:~:text=Hydrogen%20is%20an%20energy%20carrier&text=Hydrogen%2C%20like%20electricity%2C%20is%20an,source%20of%20energy%20or%20fuel) Lastet ned: 14.04.2022.
- [29] S. Giovannini, “50 shades of (grey and blue and green) hydrogen,” [Online] Hentet fra: <https://energy-cities.eu/50-shades-of-grey-and-blue-and-green-hydrogen/> Lastet ned: 22.02.2022.
- [30] I. Dincer, “Green methods for hydrogen production,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 2, pp. 1954–1971, jan. 2012. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.03.173.
- [31] S. S. Zumdahl, “Ammonia,” i *Encyclopædia Britannica*, 1998, [Online] Hentet fra: <https://www.britannica.com/science/ammonia> Lastet ned: 03.03.2022.
- [32] K. Hofstad, “Ammoniakk,” i *Store norske leksikon*, 2020, [Online] Hentet fra: https://snl.no/ammoniakk_-_energib%C3%A6rer Lastet ned: 03.05.2022.
- [33] A. Valera-Medina, H. X. adn M. Owen-Jones, W. I. F. David, and P. J. Bowen, “Ammonia for power,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 69, pp. 63–102, nov. 2018. [Online] Hentet fra: doi: 10.1016/j.pecs.2018.07.001.

- [34] M. Cames, N. Wissner, and J. Sutter, "Ammonia as a marine fuel," Öko-Institut e.V., Berlin, 2021. [Online]. Hentet fra: <https://en.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/210622-nabu-study-ammonia-marine-fuel.pdf>
- [35] J. N. Klüssmann, L. R. Ekknud, A. Ivarsson, and J. Schramm, "Ammonia application in ic engines," Advanced Motor Fuels Technology Collaboration Programme, IEA-AMF, 2020. [Online]. Hentet fra: <https://iea-amf.org/app/webroot/files/file/other%20publications/Ammonia%20Application%20in%20IC%20Engines.pdf>
- [36] A. Darmawan, M. Aziz, M. W. Ajiwibowo, M. K. Biddinika, K. Tokimatsu, and B. Lokahita, *Chapter 5 - Integrated ammonia production from the empty fruit bunch*. Elsevier, 2022, pp. 149–185.
- [37] K. Hofstad, "dampreforming," i *Store norske leksikon* 2017, [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/dampreforming> Lastet ned: 14.04.2022.
- [38] The Royal Society, "Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store," [Online] Hentet fra: <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/green-ammonia/> Lastet ned 25.05.2022.
- [39] R. H. Strand, "Én milliard til grønn ammoniakk: – dette setter norge på kartet," E24.NO. Hentet fra: <https://e24.no/naeringsliv/i/pW41rV/en-milliard-til-groenn-ammoniakk-dette-setter-norge-paa-kartet>. (Lastet ned: 20.03.2022).
- [40] J. Ott et al., "Methanol," i *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 2012. [Online]. Hentet fra: https://www.ugr.es/~tep028/pqi/descargas/Industria%20quimica%20organica/tema.1/documentos_adicionales/a16_465_metanol.pdf
- [41] E. R. Bernatek, "Metanol," i *Store norske leksikon*, 2009, [Online] Hentet fra: <https://snl.no/metanol> Lastet ned: 03.05.2021.
- [42] The Editors of Encyclopaedia Britannica, "methanol - chemical compound," i *Encyclopaedia Britannica* 1998, [Online]. Hentet fra: <https://www.britannica.com/science/methanol> Lastet ned: 03.05.2021.
- [43] M. Liu, C. Li, E. K. Koh, Z. Ang, and J. S. L. Lam, "Is methanol a future marine fuel for shipping?" *Journal of Physics: Conference Series*, 2019. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1088/1742-6596/1357/1/012014.

- [44] DNV, “Methanol as a potential alternative fuel for shipping: A brief talk with chris chatterton of the methanol institute,” DNV.COM Hentet fra: <https://www.dnv.com/maritime/advisory/afi-update/Methanol-as-a-potential-alternative-fuel-for-shipping-A-brief-talk-with-Chris-Chatterton.html> (Lastet ned: 10.05.2022).
- [45] World nuclear, “Heat values of various fuels,” WORLD-NUCLEAR.ORG Hentet fra: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx> (astet ned: 03.05.21).
- [46] J. A. Ryste, “Comparison of alternative marine fuels,” DNV GL AS Maritime, Høvik, Norway, Juli 2019.
- [47] F. Dalena, A. Senatore, A. Marinoa, A. Gordano, M. Basile, and A. Basile, *Chapter 1 - Methanol Production and Applications: An Overview*. Elsevier, 2018, pp. 3–28.
- [48] C. Hobson, “Renewable methanol report,” Methanol Institute, Madrid, Spain, 2018. [Online]. Hentet fra: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2019/01/MethanolReport.pdf>
- [49] Wayback Machine, “About natural gas — reference guides,” 2008, aRCHIVE.ORG. Hentet fra: <https://web.archive.org/web/20081010202138/http://www.natural-gas.com.au/about/references.html> Lastet ned: 04.05.2022.
- [50] U. S. Department of Energy, “Liquefied natural gas: Understanding the basic facts,” 2013. [Online]. Hentet fra: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/LNG_primerupd.pdf
- [51] R. O’Hayre, S.-W. Cha, W. Colella, and F. B. Prinz, *Fuel Cell Fundamentals*. Hoboken, NJ, USA and Chichester, UK: John Wiley Sons, 2016.
- [52] A. Dicks and D. Rand, *Fuel Cell Systems Explained*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA and Chichester, UK: Wiley, 2018.
- [53] K. Andersson and C. M. Salazar, “Methanol as a marine fuel report,” Methanol Institute, 2015. [Online]. Hentet fra: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf>
- [54] ABB, “ABB scales up fuel cells for shipping’s greener future,” ABB.no. [online]. Hentet fra: <https://new.abb.com/news/detail/60295/abb-scales-up-fuel-cells-for-shippings-greener-future> (Lastet ned: 16. 03.2022).

- [55] P. Bhattacharya, “Water flooding in the proton exchange membrane fuel cell,” *Directions*, vol. 15, no. 1, pp. 24–33, 2015. [Online]. Hentet fra: https://www.sciencetheearth.com/uploads/2/4/6/5/24658156/waterflooding_protonexchangemembrane.pdf
- [56] A. Chandan et al., *Journal of Power Sources*, vol. 231, pp. 264–278, jun. 2013. [Online] Hentet fra: doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.126.
- [57] Y. Zuo, W. Sheng, W. Tao, and Z. Li, “Direct methanol fuel cells system – a review of dual-role electrocatalysts for oxygen reduction and methanol oxidation,” *Journal of Materials Science Technology*, vol. 114, pp. 29–41, 2021. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.jmst.2021.10.031.
- [58] G. Richards, “GT Handbook,” 2007. [Online]. Hentet fra: <https://netl.doe.gov/sites/default/files/gas-turbine-handbook/3-2.pdf>
- [59] S. S. Rathore, S. Biswas, D. Fini, A. P. Kulkarni, and S. Giddey, “Direct ammonia solid-oxide fuel cells: A review of progress and prospects,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 46, pp. 35 365–35 384, okt. 2021. [Online] Hentet fra: doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.08.092.
- [60] A. Fuerte, R. X. Valenzuela, M. J. Escudero, and L. Daza, “Ammonia as efficient fuel for sofc,” *Journal of Power Sources*, vol. 192, p. 170–174, jul. 2009. [Online] Hentet fra: doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.11.037.
- [61] T. Brown, 2017, AMMONIAENERGY.ORG. Hentet fra: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/ammonia-cracking-to-high-purity-hydrogen-for-pem-fuel-cells-in-denmark/> (Lastet ned: 14.03.2022).
- [62] A. Afif, N. Radenahmad, Q. Cheok, S. Shams, J. H. Kim, and A. K. Azad, “Ammonia-fed fuel cells: a comprehensive review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 822–835, 2016. [Online]. doi: 10.1016/j.rser.2016.01.120.
- [63] M. Liu, R. P. adn Dehua Dong, J. Gao, X. Liu, and G. Meng, “Direct liquid methanol-fueled solid oxide fuel cell,” *Journal of Power Sources*, vol. 185, pp. 188–192, 2008. [Online] Hentet fra: doi: 10.1016/j.jpowsour.2008.06.076.
- [64] H. A. Shabri, M. H. D. Othman, M. A. Mohamed, T. A. Kurniawan, and S. M. Jamil, “Recent progress in metal-ceramic anode of solid oxide fuel cell for direct hydrocarbon fuel utilization: A review,” *Fuel Processing Technology*, vol. 212, feb. 2021. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.fuproc.2020.106626.

- [65] Crystec, “Methanol reformer for the production of hydrogen (h₂),” CRYSTEC.COM. [Online] Hentet fra: <https://www.crystec.com/kllmethe.htm> Lastet ned: 22.04.2022.
- [66] ABB, “ABB to become technology partner for world’s first methanol-hydrogen fuel cell towboat,” ABB.com. [Online] Hentet fra: <https://new.abb.com/news/detail/85340/abb-to-become-technology-partner-for-worlds-first-methanol-hydrogen-fuel-cell-towboat> (Lastet ned: 19.05.2022).
- [67] L. Shenghua, E. R. C. Clemente, H. Tiegang, and W. Yanjv, “Study of spark ignition engine fueled with methanol/gasoline fuel blends,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 1904–1910, aug. 2007. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.12.024.
- [68] C. Zhang, A. Zhou, Y. S. adn Yangyang Li, and Q. Shi, “Effects of combustion duration characteristic on the brake thermal efficiency and nox emission of a turbocharged diesel engine fueled with diesel-Ing dual-fuel,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 127, pp. 312–318, dec. 2017. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.08.034.
- [69] Z. Chen et al., “The impact of methanol injecting position on cylinder-to-cylinder variation in a diesel methanol dual fuel engine,” *Fuel*, vol. 191, pp. 150–163, mar. 2017. [Online] Hentet fra: doi: 10.1016/j.fuel.2016.11.072.
- [70] WÄRTSILÄ, “Dual-fuel engines from wärtsilä,” WARTSILA.COM. Hentet fra: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/dual-fuel-engines-from-wartsila> Lastet ned: 13.05.2022.
- [71] ———, “Wärtsilä 32 methanol engine,” WARTSILA.COM. Hentet fra: <https://www.wartsila.com/marine/products/engines-and-generating-sets/wartsila-32-methanol-engine> Lastet ned: 13.05.2022.
- [72] MAN Energy Solutions, “Milestone order for world’s largest methanol dual-fuel engine,” 2021, [Online]. Hentet fra: https://www.man-es.com/images/default-source/press-pictures/me-lgim-enginecb9c979cc12646f9bc5007bb9cda3275.jpg?sfvrsn=dbad110_2 Lastet ned: 23.05.2022.
- [73] S. Verhelst and J.W.G.Turner and L. Sileghem and Vancoillie , “Methanol as a fuel for internal combustion engines,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 70, pp. 43–88, jan. 2018. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.pecs.2018.10.001.

- [74] P. Dimitriou, M. Kumar, T. Tsujimura, and Y. Suzuki, "Combustion and emission characteristics of a hydrogen-diesel dual-fuel engine," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 29, pp. 13 605–13 617, jul. 2018. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.062.
- [75] BeHydro, "Behydro from ABC Belgium," BEHYDRO.BE. Hentet fra: <https://www.behydro.be/en/home.html> (Lastet ned: 01.05.2022).
- [76] DNV GL, "Ammonia as a marine fuel," Høvik, Norway, 2020.
- [77] H. Brinks, "Ammonia-fuelled engines for carbon free shipping," 2021, dNV.com Hentet fra: <https://www.dnv.com/research/review-2021/featured-projects/ammonia-fuelled-engines.html> Lastet ned. 29.05.2022.
- [78] J. D. Ampah, A. A. Yusuf, S. Afrane, C. Jin, and H. Liu, "Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards imo's decarbonization of the maritime transport sector," *Journal of Cleaner Production*, vol. 320, 2021. [Online] Hentet fra: doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128871.
- [79] L. Alvestad and B. E. Pedersen, "Regulations on ships using fuel with a flashpoint of less than 60°C and amendments to regulations on the construction of ships and amendments to other regulations (on construction, on qualifications, on fire protection and on safety management systems) – implementation of the igf code," Sjøfartsdirektoratet, Tech. Rep., 2016.
- [80] O. R. Hansen, "Liquid hydrogen releases show dense gas behavior," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 2, pp. 1343–1358, jan. 2020. [Online]. Hentet fra: doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.09.060.
- [81] K. Harrison, R. Remick, G. Martin, and A. Hoskin, "Hydrogen production: Fundamentals and case study summaries." Golden, CO: NREL, 2010.
- [82] S. Chakraborty, "Understanding the design of liquefied gas carriers," MARINEINSIGHT.COM. [Online] Hentet fra: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/> Lastet ned: 10.05.2022.
- [83] Torgy LNG, "Imo c – tank," [online] Hentet fra: <https://www.t-lng.com/products-and-services/imo-c-tank/> Lastet ned: 10.05.2022.

- [84] J. Bartl, “Introduksjon til marinteknikk - Stabilitet,” 11. januar 2022.
- [85] G. Stenfelt, “Introduksjon til marinteknikk - forelesningsnotater,” mai. 2018.
- [86] Diesel, “About clean diesel - what is scr?” DIESELFORUM.ORG [Online]. Hentet fra: <https://www.dieselforum.org/about-clean-diesel/what-is-scr> Lastet ned: 23.05.2022.
- [87] Autodesk, “Hva er AutoCad,” AUTODESK.no. Hentet fra: <https://www.autodesk.no/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> Lastet ned: 20.05.2022.
- [88] Nautilus Project, “The comparison of different technologies for on-board power supply of cruise ships,” nAUTILUS-PROJECT.eu. hentet fra: <https://nautilus-project.eu/news/the-comparison-of-different-technologies-for-on-board-power-supply-of-cruise-ships> Lastet ned: 30.05.2022.
- [89] Bloomenergy, “Bloom energy server es5-300kw,” 2022. [Online]. Hentet fra: <https://www.bloomenergy.com/wp-content/uploads/es5-300kw-datasheet-2022.pdf>
- [90] ABB, “Abb and ballard reach milestone toward fuel cell-powered marine transport,” aBB.com. Hentet fra: <https://new.abb.com/news/detail/88060/abb-and-ballard-reach-milestone-toward-fuel-cell-powered-marine-transport> Lastet ned 30.05.2022.
- [91] H2NOR, “Corvus,” 2021, CORVUSENERGY.COM. [Online]. Hentet fra: <https://corvusenergy.com/products/fuel-cell-systems/h2nor-fuel-cell/> Lastet ned: 18.03.2022.

Vedlegg

Vedlegg 1	Hydrogen PEMFC system
Lvert som PDF fil:	PEMFC_hydrogen_PDF.pdf
Vedlegg 2	Ammoniakk SOFC system
Lvert som PDF fil:	SOFC_ammoniakk_PDF.pdf
Vedlegg 3	Metanol DF system
Lvert som PDF fil:	DF_metano_PDF.pdf
Vedlegg 4	Hydrogen PEMFC system AutoCAD
Lvert som DWG fil:	PEMFC_hydrogen_DWG.dwg
Vedlegg 5	Ammoniakk SOFC system AutoCAD
Lvert som DWG fil:	SOFC_ammoniakk_DWG.dwg
Vedlegg 6	Metanol DF system AutoCAD
Lvert som DWG fil:	DF_metanol_DWG.dwg

