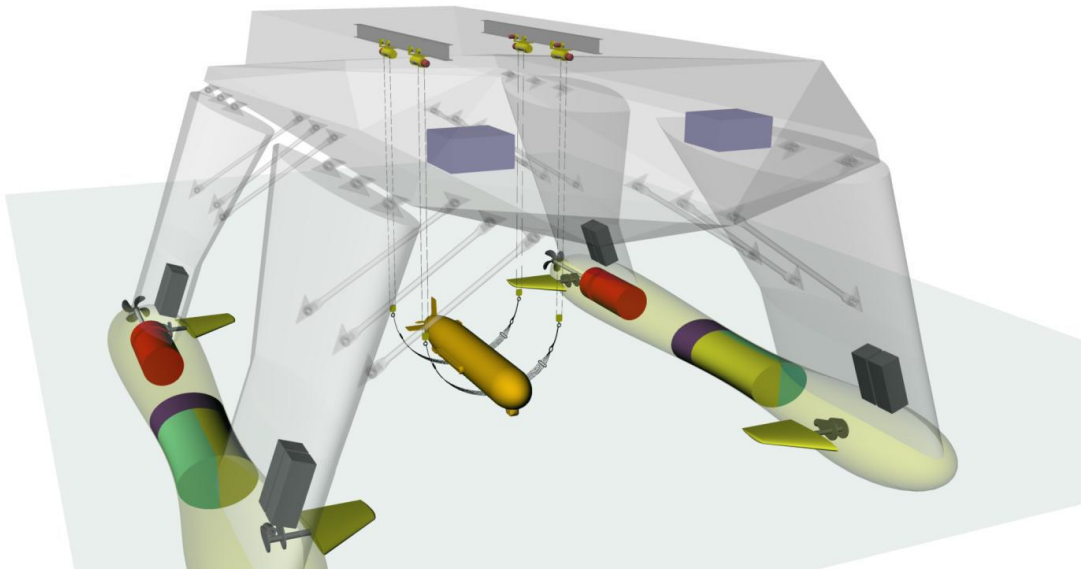




HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Alternative energisystemer for ubemannet overflatefartøy (USV) med tilhørende autonome undervannsfarkoster (AUV)



Bachelorprosjekt utført ved

Høgskolen Stord/Haugesund – Studie for ingeniørfag

Maskin, Prosess- og energiteknikk

Av: Torbjørn Egeland-Eriksen
Stian Melkevik

Kandidatnummer: 23
Kandidatnummer: 36

BACHELORPROSJEKT

Studenten(e)s navn: Torbjørn Egeland-Eriksen
Stian Melkevik

Linje & studieretning Maskin, Prosess- og energiteknikk

Oppgavens tittel: *Alternative energisystemer for ubemannet overflatefartøy (USV) med tilhørende autonome undervannsfarkoster (AUV)*

Oppgavetekst:

Det skal utvikles en teoretisk modell for et energisystem til et ubemannet overflatefartøy (USV). Energisystemet skal gi energi til selve fartøyet, og samtidig gi ny energi til autonome undervannsfarkoster (AUV) som kobles sammen med USV'en ute i vannet for å laste opp lagret data.

Mulige energisystemer skal undersøkes, det skal foretas en trinnvis utvelgelse med sammenligninger og diskusjon, og endelig valg av energisystem må gjøres med god begrunnelse. Videre må valgt energisystem detaljeres nøye, både i forhold til USV og AUV. Dette skal inkludere konseptuelle tegninger, tekniske beregninger og økonomiske betraktninger.

Endelig oppgave gitt: Fredag 6.mars 2015

Innleveringsfrist: Fredag 8.mai 2015 kl. 12.00

Intern veileder: Jens Christian Lindaas – HSH, tlf: 52 70 26 70
mob: 905 06 707

Ekstern veileder: Gunnar Birkeland – Polytec, mob: 909 81 029
Adresse ekstern veileder: Eikjehammervegen 31, 5533 Haugesund

Godkjent av studieansvarlig:
Dato:

Brit Fullø
23/4 - 15

Forord

Denne rapporten er en del av emnet «ING 3039 – Bachelorprosjekt», som er et obligatorisk emne i ingeniørutdanningen ved Høgskolen Stord/Haugesund (HSH). Emnet utgjør 20 studiepoeng, og består av denne rapporten, plakater, et produkt og en muntlig presentasjon. Alle delene utføres i en gruppe i løpet av våren 2015, og denne gruppen består av de to undertegnede studentene.

Emnet baserer seg på at studentene i gruppen kommer i kontakt med en bedrift, hvor gruppen blir tildelt en oppgave og en ekstern veileder i bedriften. Deretter tildeles en intern veileder ved HSH. Hensikten med emnet er at studentene skal vise at de kan bruke kunnskapene de har tilegnet seg gjennom studiet i en reell oppgave.

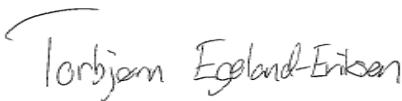
Opgaven som denne rapporten er et resultat av ble tildelt gruppen fra Polytec, en forskningsinstitusjon i Haugesund som ble startet i 1988 med målsettingen om å bli regionens hovedkoordinator for forskning og kompetanse.

Referanser/kilder refereres til på formen [«tall»], hvor det brukte tallet viser til det samme tallet i referanselisten hvor den komplette kilden oppgis. Vedlegg vises til på formen [Vedlegg «bokstav»], hvor den brukte bokstaven viser til samme bokstav i vedleggslisten. Denne vedleggslisten, sammen med selve vedleggene, er lagt ved helt til slutt i rapporten.

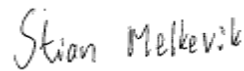
Gruppen vil gjerne rette en stor takk til:

- Jens Christian Lindaas – Intern veileder ved HSH
- Gunnar W. Birkeland – Ekstern veileder hos Polytec
- Stefano Brizzolara, MIT Sea Grant, for raske og nyttige svar på gruppens spørsmål
- Toyota Motor Corporation for raskt og informativt svar på henvendelse

Haugesund, 8.mai 2015



Torbjørn Egeland-Eriksen



Stian Melkevik

Sammendrag

Gruppen har i løpet av denne rapporten undersøkt mulige energisystemer for et ubemannet overflatefartøy (USV) som sammen med tilhørende autonome undervannsfarkoster (AUV) skal utgjøre et «Subsea Survey System». Nærmere utgreiing ble utført på 4 forskjellige systemer: et helelektrisk system og 3 forskjellige hybridssystemer. Hybridssystemene er brenselcelle/batteri, dieselelektrisk og naturgass/batteri. Brenselcelle/batteri hybridssystem ble valgt ut som endelig energisystem. Det ble så laget en mest mulig komplett og detaljert teoretisk modell for det valgte systemet. I alle faser ble det innhentet informasjon fra vitenskapelige artikler og produsenter av forskjellige komponenter. Det ble også gjort egne tekniske beregninger, og konseptuelle tegninger for oppbygning og virkemåte for energisystemet ble laget. I tillegg ble alle alternativene vurdert i forhold til virkningsgrad, effekt på miljøet, levetid, pålitelighet, rekkevidde og økonomi. Det ble også lagt vekt på om teknologien er fremtidsrettet.

Brenselcelle/batteri energisystemet ble valgt pga. de potensielle fordelene i forhold til energimengde, rekkevidde, fleksibilitet, miljøvennlighet, og fremtidsrettet teknologi. Hovedutfordringene med dette systemet pr. i dag er kostnader, pålitelighet og levetid. Disse utfordringene vil imidlertid etter all sannsynlighet reduseres i løpet av de neste årene, og kanskje til slutt bli fordeler i stedet for ulemper. Dette avhenger naturligvis av teknologisk utvikling, og dette er direkte avhengig av økonomisk satsing på forskning og utvikling innen brenselcelleteknologi, batteriteknologi, i tillegg til produksjon, lagring og distribusjon av hydrogen. Det er også store rom for forbedringer av den totale virkningsgraden til systemet. Dette vil også avhenge av de ovennevnte faktorene, samt forskning og utvikling innen elektriske komponenter, styringssystemer og tilleggskomponentene til brenselcellene. Av disse er det luftkompressorene som «stjeler» mest energi.

Resultatene gruppen kom frem til for brenselcelle/batteri energisystemet var positive i forhold til energimengde, rekkevidde, redundans, og fleksibilitet i forhold til effektvariasjoner. I tillegg benytter systemet særdeles fremtidsrettet teknologi, og det viser stort potensial i forhold til miljøvennlighet. Nøyaktige kostnadsoverslag er ikke mulig med den tilgjengelige informasjonen, men det vil trolig være et relativt dyrt system. Gruppen konkluderer med at resultatene viser at brenselcelle/batteri energisystemet har et stort potensial på en rekke områder, og at videre arbeid, forskning og utvikling av dette systemet kan gi veldig positive resultater.

Denne rapporten er rent teoretisk, og tilgjengelig informasjon og tid er begrenset. Det kan derfor med fordel utføres videre arbeid fra grunnlaget som denne rapporten danner, hvor resultatene kan testes og utfylles med ny informasjon, og aller helst praktiske tester. I kapittel 10 gis det et forslag til en trinnvis plan for videre arbeid med brenselcelle/batteri energisystemet. I tillegg diskuteres mulighetene som kan ligge i å designe en større versjon av fartøyet som omhandles i denne rapporten. En større versjon vil kunne tåle tøffere sjø- og vindforhold, i tillegg til å kunne behandle større AUV'er. Dette bekreftes også av fartøyets designer, Stefano Brizzolara ved MIT Sea Grant. Et større fartøy vil naturligvis utvide rekkevidden og bruksområdet til hele «Survey» systemet, og burde følgelig være av stor



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

*Alternative energisystemer for ubemannet overflatefartøy
(USV) med tilhørende autonome undervannsfarkoster (AUV)*



interesse for den norske olje- og gassindustrien, eller andre som driver «Subsea» aktivitet i havområder med store avstander og relativt tøffe sjø- og vindforhold.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	ii
Figurliste	viii
1. Innledning	1
1.1. Bakgrunn for oppgaven	1
1.2. Målsetting for oppgaven	1
1.3. Utføring av oppgaven og anvendelse av metoder/verktøy	2
1.4. Avgrensninger og antagelser	2
1.5. Oversikt over forkortelser og «Subscript» brukt i beregninger	3
2. Presentasjon av fartøyet og tilhørende AUV'er	5
2.1. Design av USV	5
2.2. Bruksområde for USV	6
2.3. Krav og spesifikasjoner for USV	7
2.4. Beskrivelse av tilhørende AUV'er	9
2.4.1. Generelt	9
2.4.2. Folaga	10
2.4.3. Hydroid	10
2.4.4. Bluefin-9	11
2.5. Sammenkobling av AUV og USV	11
2.6. AUV energisystem	12
3. Diskusjon om mulige energisystemer	14
3.1. Generelt	14
3.2. Valg av alternative energisystemer	14
4. Utgreiing av diesel-elektrisk hybridsystem	16
4.1. Komponenter	16
4.2. Virkemåte	17
4.3. Beregninger	18
4.3.1. Generelt	18
4.3.2. Dieselgeneratorer	19
4.3.3. Dieseltanker	19
4.3.4. Batterier	20
4.3.5. Elektriske motorer, drivakslar, girkasser og AC/DC omformere	21
4.3.6. Total energimengde og masse av drivstoff	22



4.3.7. Total masse og volum av dieselelektrisk energisystem	24
4.3.8. Total virkningsgrad for dieselelektrisk fremdriftssystem	24
4.4. Totalvurdering	25
5. Utgreiing av helelektrisk (batteri) energisystem	26
5.1. Virkemåte	26
5.2. Batteriteknologier til kjøretøy/fartøy	26
5.2.1. Generelt	26
5.2.2. Litium-ion batterier (Li-ion)	27
5.2.3. Nikkel-metallhydrid batterier (Ni-MH)	29
5.2.4. Litium-luft batterier (Li-air)	29
5.2.5. Litium-vann batterier (Li-H ₂ O)	30
5.3. Valg av batteritype	31
5.4. Beregninger	32
5.4.1. Tilgjengelig energimengde	32
5.4.2. Total virkningsgrad for helelektrisk fremdriftssystem	33
5.5. Totalvurdering	33
6. Utgreiing av brenselcelle/batteri hybridssystem	35
6.1. Generelt	35
6.2. Virkemåte for brenselceller	35
6.3. Fordeler og utfordringer med brenselceller	36
6.3.1. Generelt	36
6.3.2. Reduserte skadelige utslipp	36
6.3.3. Høy virkningsgrad	37
6.3.4. Modularitet	38
6.3.5. Reagerer raskt på belastninger	38
6.3.6. Statisk natur	38
6.3.7. Høy kostnad	38
6.3.8. Kort levetid	39
6.3.9. Hydrogen infrastruktur	39
6.3.10. Vannbalanse	39
6.3.11. Tilleggsutstyr	40
6.3.12. Koder, standarder, sikkerhet og holdning i befolkningen	40
6.4. Beregninger	40
6.4.1. Nødvendig energimengde i brensel	40
6.4.2. Masse og volum av brensel	41
6.4.3. Kompresjon av hydrogen	41



6.4.4. Masse av hydrogentank og maksimal hydrogenmengde.....	42
6.4.5. Nødvendig batterikapasitet.....	43
6.4.6. Tilgjengelig masse og volum til batterier	44
6.4.7. Tilgjengelig energimengde i batterier	45
6.4.8. Total energimengde	46
6.4.9. Total virkningsgrad for brenselcelle/batteri fremdriftssystem	46
6.5. Virkemåte for det foreslåtte brenselcelle/batteri hybridsystemet.....	47
6.6. Totalvurdering	47
7. Utgreiing av naturgass energisystem	49
7.1. Virkemåte for varmemotor med indre forbrenning.....	49
7.2. Bakgrunn for valget av naturgass som brensel	49
7.3. Naturgassgeneratorer	50
7.4. Naturgass energisystem	51
7.5. CNG/batteri hybridsystem	52
7.5.1. CNG-tank	52
7.5.2. Nødvendig batterikapasitet ved bruk av CNG.....	53
7.5.3. Tilgjengelig masse og volum til batterier ved bruk av CNG.....	53
7.6. LNG/batteri hybridsystem.....	54
7.6.1. LNG-tank.....	54
7.6.2. Nødvendig batterikapasitet ved bruk av LNG	55
7.6.3. Tilgjengelig masse og volum til batterier ved bruk av LNG	55
7.6.4. Total virkningsgrad for naturgass/batteri fremdriftssystem.....	56
7.7. Totalvurdering	56
8. Sammenligning av energisystemer med påfølgende valg av system.....	57
8.1. Generelt.....	57
8.2. Virkningsgrad.....	57
8.3. Fremtidsrettet teknologi	57
8.4. Effekt på miljøet	57
8.5. Pålitelighet og levetid.....	58
8.6. Økonomi.....	58
8.7. Totalvurdering og endelig valg av energisystem.....	58
9. Detaljering av valgt energisystem	60
9.1. Grunnlag for videre detaljering	60
9.2. Toyota Fuel Cell System (TFCS)	61
9.2.1. Generelt.....	61
9.2.2. Brenselcellen (PEMFC).....	61



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

9.2.3. PEMFC «Boost Converter»	65
9.2.4. «Power Control Unit» (PCU).....	66
9.2.5. Hydrogentanker.....	67
9.2.6. Luftkompressor og annet tilleggsutstyr	67
9.3. Li-H ₂ O batterier	69
9.4. Total energimengde, masse og volum	70
9.5. Total virkningsgrad for PEMFC/Li-H ₂ O fremdriftssystem.....	72
9.6. Oppbygning og virkemåte	73
10. Diskusjon og forslag til videre arbeid	76
10.1. Diskusjon	76
10.2. Forslag til videre arbeid	77
11. Konklusjon	79
Referanseliste.....	80
Vedleggsliste.....	83

Figurliste

Tabell 1.1: Oversikt over forkortelser.	4
Tabell 1.2: Oversikt over forkortede «Subscript» brukt i beregninger.	4
Figur 2.1: Første versjon av fartøyet [5].	5
Figur 2.2: Illustrasjon av «Subsea Survey System», hvor USV'en er ment å erstatte skip og overflatestasjoner (krysset ut i rødt), for å skape et billigere og sikrere «Survey System» med høyere virkningsgrad [5].	6
Figur 2.3: USV sett fra utsiden [3].	8
Figur 2.4: Innvendig oppbygning av USV med dielelektrisk energisystem [3].	8
Tabell 2.1: Tekniske spesifikasjoner for USV [3,6].	9
Figur 2.5: Folaga AUV [Vedlegg B].	10
Figur 2.6: Remus 100 AUV [Vedlegg C].	10
Figur 2.7: Bluefin-9 AUV [Vedlegg D].	11
Figur 2.8: USV'en i ferd med å løfte opp en 2 m lang AUV [6].	11
Figur 4.1: Oversiktsbilde av USV med komponentene i det dielelektriske energisystemet [5].	16
Figur 4.2: Flytskjema for energi i det dielelektriske hybridsystemet.	17
Figur 4.3: Kohler 25EFOZD 25 kW dieselgenerator [Vedlegg E].	19
Figur 4.4: Vetus dieseltank (polyetylen) til båt [8].	19
Figur 4.5: Illustrasjonsbilde av Li-ion batteri fra Tesla Motors [7].	20
Figur 4.6: Illustrasjonsbilde av inverter til bruk i kjøretøy [22].	21
Figur 4.7: Illustrasjonsbilde av 20 kW elektrisk motor [9].	21
Figur 5.1: Flytskjema for energi i det helelektriske energisystemet.	26
Figur 5.2: Utladningsprosess i en celle i et Li-ion batteri [12].	27
Figur 5.3: Elektrokjemiske reaksjoner ved lading og utlading av en celle i et Ni-MH batteri [11].	29
Figur 6.1: Enkel prinsippskisse for PEMFC [1].	35
Figur 6.2: Flytskjema for energi i brenselcelle/batteri energisystemet.	47
Figur 7.1: PV-diagram for ottoprosess og otto-diesel prosess [26].	49
Figur 7.2: Kohler 25REZG naturgassgenerator [27].	50
Figur 7.3: Kohler 20C bensingenerator [28].	51
Figur 7.4: Type 4 CNG tank [32].	52
Figur 9.1: Komponentene i MEA [1].	62
Figur 9.2: En enkel celle i en PEMFC [1].	62
Figur 9.3: En stabel med PEMFC-celler ("Fuel Cell Stack") [1].	63
Figur 9.4: Generell oppbygning av et brenselcelle/batteri hybridsystem [1].	63
Figur 9.5: PEMFC med komponenter og PEMFC-stack [23].	64
Figur 9.6: Virkemåten til en PEMFC [23].	64
Figur 9.7: PEMFC-stack fra TFCS [23].	64
Figur 9.8: Modell av typisk DC/DC "Boost Converter" [25].	65
Figur 9.9: Illustrasjon av "FC Boost Converter" i TFCS [23].	65
Figur 9.10: Illustrasjon av PCU i TFCS [23].	66
Figur 9.11: Illustrasjon av hydrogentankene i TFCS [23].	67
Figur 9.12: Oppbygningen til hydrogentankene i TFCS [23].	67
Tabell 9.1: Komponenter i brenselcelle/batteri energisystem med tilhørende masse og volum.	70
Figur 9.13: Fartøyets øvre del sett ovenfra med komponenter i energisystemet. Pilen indikerer baugen. Plassering av komponenter er omtrentlig, og størrelsene er ikke i nøyaktig skala.	73

Figur 9.14: Den ene halvdel av fartøyets nedre del sett fra siden med komponenter i energisystemet. Pilen indikerer baugen og den vannrette linjen indikerer vannlinjen. Plassering av komponenter er omtrentlig, og størrelsene er ikke i nøyaktig skala.	74
Figur 9.15: Flytskjema for energi i endelig brenselcelle/batteri energisystem. Størrelse på komponentene og energistrømmene er ikke i skala.....	74

1. Innledning

1.1. Bakgrunn for oppgaven

Ved kartlegging av havbunn, forurensningskontroll, marinbiologi, sikkerhetsoppdrag i forhold til miner/militærbaser, og andre oppdrag som foregår under vann, brukes det i dag ofte ROV (fjernstyrte undervannsfarkoster) og overflatefartøy i kombinasjon for å løse oppdraget.

Bruken av AUV (autonome undervannsfarkoster) er også begynt å bli mer utbredt, men disse brukes også i kombinasjon med et overflatefartøy som sjøsetter og assisterer AUV'en. Slike operasjoner blir fort veldig kostbare og krever mange arbeidere. Det kreves arbeidere til å manøvrere og vedlikeholde ROV'en, og ikke minst til å sørge for nødvendig bemanning på overflatefartøyet.

Forfatterne av [3,5,6] har designet en USV (ubemannet overflatefartøy) som de mener skal være et bedre alternativ til måten de nevnte operasjoner løses på i dag. Denne USV'en skal være nøkkelementet i et helt autonomt «Subsea Survey System» for kystområder.

Intensjonen er at USV'en skal sjøsettes fra en landbase, og bistå og gi energi til AUV'er som opererer innen rekkevidden til USV'en. I tillegg kan USV'en bære med seg en AUV ut fra, og/eller inn til landbasen. Siden både overflatefartøyet og undervannsfarkostene er helt ubemannede, vil det foreslåtte systemet med USV senke kostnader i de nevnte operasjoner betraktelig. I tillegg vil det være et tryggere alternativ og det kan potensielt øke virkningsgraden [3,5,6]. En grundigere presentasjon av USV, designere og «Survey System» følger i kapittel 2.

1.2. Målsetting for oppgaven

Formålet med denne oppgaven er å utvikle en teoretisk modell for et energisystem til den nevnte USV'en. Rapporten skal søke en løsning som gir et best mest mulig energisystem til fartøyet, etter en totalvurdering i forhold til flere ulike kriterier. De viktigste kriteriene er virkningsgrad, effekt på miljøet, levetid, pålitelighet, rekkevidde og økonomi. I tillegg vil det vurderes om teknologien er framtidsrettet. Et viktig poeng er at gruppen vurderer framtidsrettet og miljøvennlig teknologi som en veldig viktig egenskap i et energisystem, så i tvilstilfeller kommer en mer framtidsrettet og miljøvennlig løsning til å velges framfor en annen løsning som har lavere kostnader. Dette er naturligvis for å bidra i utviklingen av en mer bærekraftig energiframtid.

Resultatet av gruppens studier vil gi en mest mulig komplett teoretisk modell for det nevnte energisystemet, inkludert tekniske beregninger og konseptuelle tegninger. Resultatet vil diskuteres og videre arbeid vil bli foreslått.

1.3. Utføring av oppgaven og anvendelse av metoder/verktøy

Gjennom ulike fagartikler undersøkte gruppen hvilke eksisterende løsninger som kan passe for et slikt fartøy, og eventuelt om det finnes noen nye teknologier, eller kombinasjoner av teknologier, som kunne brukes i utviklingen av energisystemet. Det ble valgt alternative energisystemer, hvert alternativ ble utgreid med innledende beregninger, før de ulike alternativene ble sammenlignet i forhold til de tidligere nevnte kriterier. Deretter ble det gjort endelig valg av energisystem, og en mest mulig nøyaktig og komplett teoretisk modell for det valgte energisystemet ble laget. I denne fasen ble det igjen brukt ulike vitenskapelige artikler, samt egne beregninger og tegninger. Beregningene ble gjort ved hjelp av kalkulator og ført inn i rapporten ved hjelp av MathType. Tegningene ble laget i Microsoft Word. Gruppen kontaktet også noen firmaer og fagpersoner direkte, disse er i så fall nevnt på de aktuelle stedene i teksten.

1.4. Avgrensninger og antagelser

Som et resultat av begrenset tid, samt at det ikke er mulig for gruppen å gjøre egne praktiske tester med de ulike komponentene i energisystemene, er det nødvendig å gjøre enkelte avgrensninger og antagelser. De er som følger:

- Det antas at all informasjon fra kildene som det refereres til i rapporten er pålitelig, nøyaktig og korrekt.
- Det antas at det oppgitte designet av USV'en fra [3,5,6] ikke kan forandres eller fravikes på noen måte, hverken i forhold til energi, masse, volum eller geometri. Gruppen kontaktet fartøyets designer angående muligheten i å designe en større versjon. Dette diskuteres som en fremtidsmulighet noen steder i teksten, men det gjøres ikke beregninger eller analyser innen dette i denne rapporten.
- Siden det ikke oppgis verdier for masse, volum og geometri for komponentene i energisystemet foreslått av designerne [3,5,6], og heller ikke volum og geometri for rommet de nevnte komponentene skal stå, eller for total energimengde, vil det gjøres beregninger der det er mulig for å finne de nevnte verdier. Der beregninger ikke er mulig vil det gås ut i fra et eksempel av den aktuelle komponenten som er kommersielt tilgjengelig. Disse beregnings- og eksempelverdiene vil så antas som reelle, og følgelig brukes i påfølgende utgreinger, diskusjoner, beregninger og konklusjoner.
- Det antas at det er tilgang til beste tilgjengelige teknologi (BAT) for alle komponenter i alle energisystemene.
- Alle forkortelser, enheter, symboler eller kjemiske formler som ikke er nevnt i kapittel 1.5, antas å være allment kjent eller kjent for denne rapportens målgruppe, og vil følgelig ikke forklares nærmere.
- Dette er en rent teoretisk oppgave, og gruppen har ikke mulighet til å teste noen komponenter eller fartøy i praksis. Resultatene vil følgelig ikke kunne verifiseres med virkelige tester i løpet av denne rapporten, og gruppen må bare anta at de teoretiske resultatene stemmer.

- Opplysninger og kilder angående typisk virkningsgrad for de ulike komponentene som benyttes i de 4 energisystemene har i noen tilfeller vært vanskelig å finne. Gruppen har lagt vekt på å benytte så sikre kilder og nøyaktige verdier som mulig, bl.a. ved å kontakte forskjellige firmaer. Det er imidlertid noen tilfeller der gruppen ikke har kunnet finne en helt lik komponent som den som benyttes i rapporten, eller en sikker kilde som oppgir en typisk verdi. I disse tilfellene har gruppen valgt å hente en virkningsgrad fra en komponent som er mest mulig lik den som brukes i rapporten. Dette er gjort for å kunne beregne en omtrentlig total virkningsgrad for alle energisystemene slik at disse kan sammenlignes. Det kan også nevnes at gruppen kontaktet Stefano Brizzolara (fartøyets designer) ved MIT Sea Grant bl.a. angående virkningsgrader for de ulike komponentene, og han rådet gruppen til å finne komponenter tilgjengelig på internett som passet best mulig til de gitte spesifikasjonene.

1.5. Oversikt over forkortelser og «Subscript» brukt i beregninger

Det brukes forkortelser flere steder i denne rapporten. Noen er forklart i selve teksten og flere er sikkert kjent for leseren allerede. Her følger en oversikt over de som ikke kan antas å være allment kjent:

Forkortelse	Betydning
HSH	Høgskolen Stord/Haugesund
USV	Ubemannet overflatefartøy
AUV	Autonom undervannsfarkost
ROV	Fjernstyrt undervannsfarkost
BAT	«Best Available Technology» (beste tilgjengelige teknologi)
Ph.D.	«Philosophiae Doctor» (doktorgrad)
SWATH	«Small Waterplane Area Twin Hull»
CFD	«Computational fluid dynamics»
MIT	Massachusetts Institute of Technology
AC	Vekselstrøm
DC	Likestrøm
Ni-MH	Nikkel-metallhydrid (batteriteknologi)
Li-ion	Litium-ion (batteriteknologi)
Li-air	Litium-luft (batteriteknologi)
Li-H ₂ O	Litium-vann (batteriteknologi)
FFI	Forsvarets forskningsinstitutt
FC	«Fuel Cell»
PEMFC	«Proton Exchange Membrane Fuel Cell/Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell»
MEA	«Membrane Electrode Assembly»
BEV	Batteridrevet kjøretøy
HEV	Hybridelektrisk kjøretøy
USD	US dollars (amerikanske dollar)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
LCA	«Life Cycle Assessment»
PCU	«Power control unit»



ECU	«Energy control unit»
TFCS	«Toyota Fuel Cell System»
LNG	«Liquefied Natural Gas»
CNG	«Compressed Natural Gas»
LHV	Nedre brennverdi

Tabell 1.1: Oversikt over forkortelser.

Det brukes «Subscript» (nedsenket skrift) bak symbolene i de fleste beregningene. Noen er hele ord, og i de tilfellene antas det at meningen er forstått. Her følger imidlertid en oversikt over «Subscript» som er forkortet:

DG	Dieselgenerator
DM	Dieselmotor
DE	Dieselektrisk energisystem
DT	Dieseltank
G	Generator
AC/DC	AC/DC omformer
DC/DC	DC/DC omformer
EM	Elektrisk motor
GK	Girkasse
DA	Drivaksel
P	Propell
PCU	Se tabell 1.1
el	Elektrisk
FC	«Fuel Cell» (brenselcelle)
HT	Hydrogentank
TK	Tilleggskomponenter
PEMFC	Se tabell 1.1
GM	Gassmotor
NGG	Naturgassgenerator
BG	Bensingenerator
CNG	Se tabell 1.1
LNG	Se tabell 1.1
CNGT	«Compressed Natural Gas Tank»
LNGT	«Liquefied Natural Gas Tank»
BE	Batteri energisystem

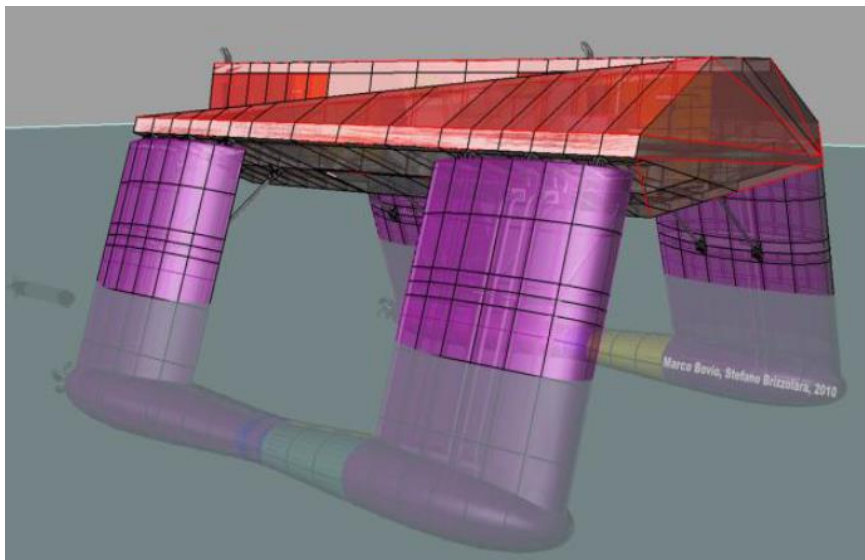
Tabell 1.2: Oversikt over forkortede «Subscript» brukt i beregninger.

2. Presentasjon av fartøyet og tilhørende AUV'er

2.1. Design av USV

Fartøyet som denne rapporten omhandler er et ubemannet overflatefartøy. Hoveddesigner er Stefano Brizzolara, Ph.D., Assistant Director for Research ved Massachusetts Institute of Technology Sea Grant College Program. Han har sammen med sine kolleger publisert 3 artikler [3,5,6] hvor design og konsept for fartøyet blir gjennomgått i detalj. Kollegene han har skrevet artiklene med er Tom Curtin [3], Marco Bovio [3,5], Giuliano Vernengo [3,5], Alessandro Federici [5] og Chryssostomos Chryssostomidis [6]. [3] og [5] er publisert i 2011 og [6] er publisert i 2012. Det vil derfor videre i hele denne rapporten bli antatt at de opplysninger som er gitt i [6] er de mest oppdaterte og reelle opplysningene. I de tilfeller der opplysninger fra [6] kommer i konflikt med opplysninger fra [3] og [5], vil følgelig opplysningene fra [6] bli brukt i denne rapporten. I tillegg vil opplysninger fra [6] som ikke er oppgitt i [3] eller [5] antas å være reelle. Det er for øvrig også publisert en artikkel av Brizzolara og Chryssostomidis i 2013 som omhandler det samme fartøyet i tillegg til ett annet, men informasjonen i denne artikkelen («The Second Generation of Unmanned Surface Vehicles: Design Features and Performance Predictions by Numerical Simulations») er i all hovedsak et sammendrag av [3,5,6] og presenterer ikke noen ny informasjon som er relevant for denne rapporten, og det vil følgelig ikke bli nødvendig å benytte den nevnte artikkelen fra 2013 som kilde i denne rapporten.

Fartøyet er som sagt et ubemannet overflatefartøy, og designet er av typen SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull). SWATH er et design hvor det benyttes to skrog som skal være



Figur 2.1: Første versjon av fartøyet [5].

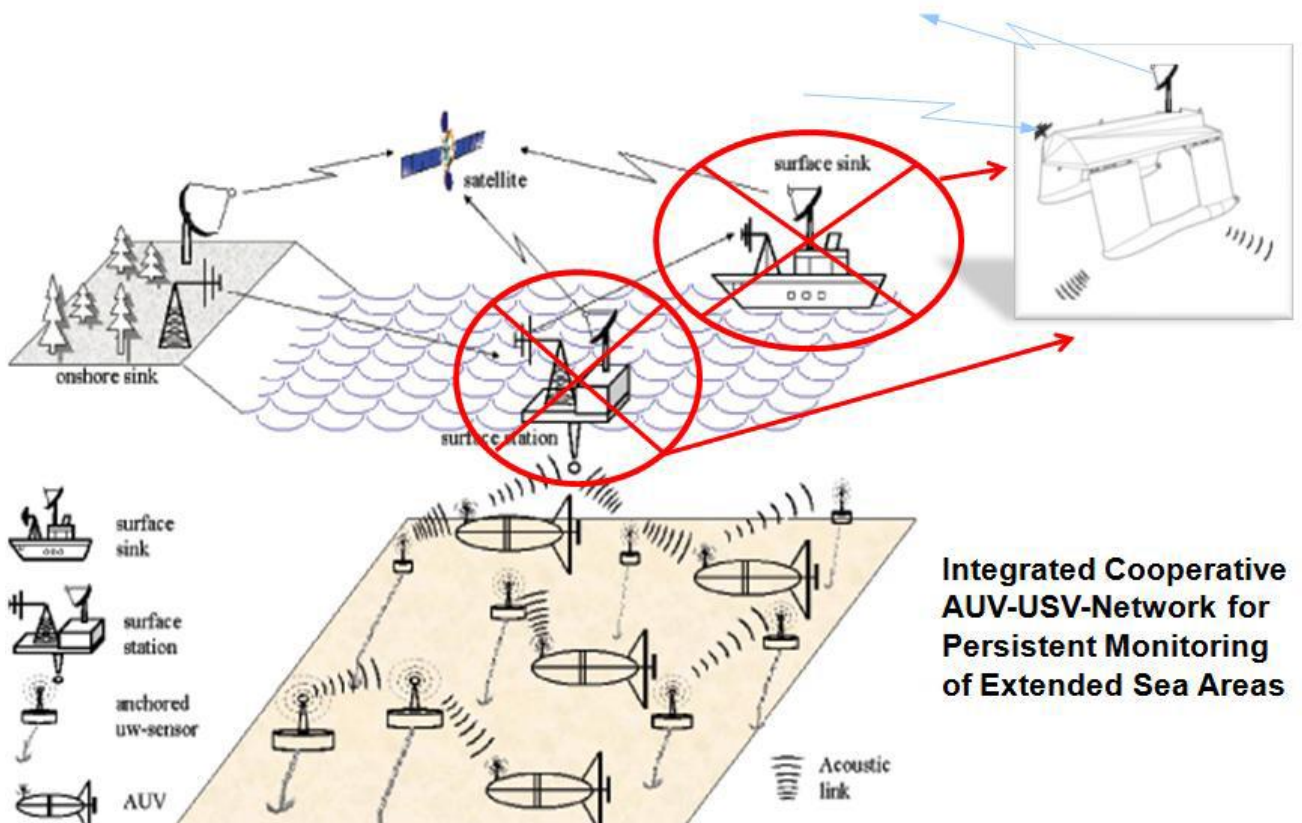
under vannlinjen, og fra disse to skrogene går det støtter opp til hovedskroget som ligger over vannflaten. Arealet og volumet av disse støttene må være minst mulig. Hovedprinsippet er at oppdriften til fartøyet varierer veldig lite når det treffes av bølger pga. at det nedsenkede volumet varierer veldig lite, og dette resulterer i et mer stabilt fartøy. Ethvert

fartøy må ha et visst volum under vannflaten for at det skal skapes nok oppdrift til at fartøyet skal flyte, og ved å plassere mest mulig av dette volumet et godt stykke under vannflaten forbedres stabiliteten i forhold til et konvensjonelt skrog eller katamaranskrog. I tillegg til dette er andre fysiske krefter som virker på et fartøy fra bølger klart størst i området ved og nær vannflaten. Følgelig minskes alle disse kreftene ved å minke arealet som treffes av

bølger ved vannoverflaten. Som en forenkling kan man si at en SWATH blir som et fartøy som «rir» på to undervannsbåter, og undervannsbåter blir mindre påvirket av bølger enn tradisjonelle overflatefartøy [3]. En ulempe med et SWATH-design er imidlertid at fartøyets virkningsgrad blir lavere i veldig rolig vann pga. økt motstand fra vannet som en følge av større nedsenket overflateareal enn ved bruk av et tradisjonelt skrog. Designerne har derfor forsøkt å skape en geometri på fartøyet som resulterer i minst mulig vannmotstand kombinert med høyest mulig stabilitet. De har benyttet en systematisk optimaliseringsprosedyre basert på numeriske, helautomatiske dataverktøy som benytter en parametrisk definisjon av geometrien og en optimaliseringsalgoritme, samt en «State-of-the-art» CFD (Computational Fluid Dynamics) analyseringskode som gjør hydrodynamiske analyser i forhold til fartøyet. I [3,5,6] gis det detaljerte beskrivelser av forskjellige deler av denne designprosessen, men da det faller utenfor området til denne rapporten vil det ikke utdypes videre her. Det kan imidlertid opplyses om at designerne i [3,5,6] mener at de ved bruk av disse metodene og verktøyene har funnet det optimale designet for fartøyet som denne rapporten omhandler, og det er følgelig dette designet, uten noen modifikasjoner, som vil bli brukt i hele denne rapporten.

2.2. Bruksområde for USV

Intensjonen til designerne er at USV'en skal kunne brukes i et autonomt «Survey System» sammen med flere forskjellige AUV'er. USV'en skal sendes ut fra «Onshore» base, lokalisere AUV'er som patruljerer/inspisierer kystområdet, og så koble seg sammen med disse for å tilføre ny energi til AUV'ene samtidig som det lastes opp lagret data fra AUV til USV.



Figur 2.2: Illustrasjon av «Subsea Survey System», hvor USV'en er ment å erstatte skip og overflatestasjoner (krysset ut i rødt), for å skape et billigere og sikrere «Survey System» med høyere virkningsgrad [5].



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

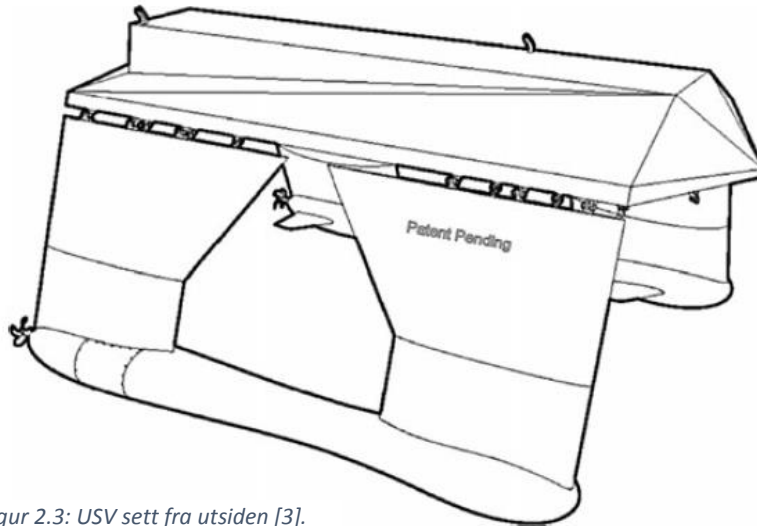
USV'en skal også kunne utstyres til å utføre noen målinger selv og den kan overføre data til «Onshore» base via satellitt. Når USV'en trenger påfyll av energi, eller oppdraget er utført, returnerer den til «Onshore» base. USV'en kan også bære med seg en AUV til/fra «Onshore» base. Designerne ser for seg at dette kan være et veldig nyttig og kostnadsbesparende system for ulike oppdrag innen områder som å forutse oseanografiske fenomener, måle forurensing, kartlegging av havbunn, marinbiologisk forskning, patruljering som sikkerhet mot eksplosiver, militær/terrorist-angrep, etc. De mener at det foreslåtte systemet vil øke sikkerheten og virkningsgraden, og samtidig senke kostnader forbundet med «Subsea Survey». Det kan her nevnes at i forhold til den norske olje- og gassindustrien er det sannsynligvis begrensede muligheter til å benytte dette fartøyet i den versjonen som omhandles i denne rapporten. Størrelsen til AUV'ene som kan behandles (maks 100 kg) [3] gjør at oppdragene innen olje- og gassindustrien som sannsynligvis kunne vært utført er kartlegging av havbunn og rørtrasé, samt inspeksjon av rørledninger og undervanns produksjonssystemer. Men den maksimale signifikante bølgehøyden USV'en kan brukes i er 1,25 m [3], den maksimale vindhastigheten den tåler er 15 m/s [3], den maksimale rekkevidden er ca. 200 km [6], og det er et relativt lite fartøy (6-7 m) [3], så det vil være utfordrende å benytte et slikt fartøy på oppdrag for olje- og gassindustrien i Nordsjøen, Norskehavet og Barentshavet, hvor både sjø- og vindforhold kan være veldig tøffe. I tillegg er den maksimale arbeidsdybden til AUV'er i den nevnte størrelsesklassen vanligvis ikke mer enn 100-200 m [Vedlegg B, Vedlegg C, Vedlegg D]. Hvis man skal inspisere rørtraséer og undervanns produksjonssystemer, eller kartlegge havbunnen på oppdrag for olje- og gassindustrien, er det ofte på dypere vann enn dette. Gruppen kontaktet imidlertid fartøyet designer, Stefano Brizzolara ved MIT Sea Grant, for å undersøke de fremtidige mulighetene innen dette området. Han bekreftet at fartøyet er for lite til å brukes «Offshore» i norske havområder, og at fartøyet i den versjonen som benyttes i denne rapporten ble designet for bruk i beskyttede kystområder i Middelhavet. Han bekreftet imidlertid også at det er fullt mulig å lage fartøyet i en større versjon, slik at det vil kunne takle mye tøffere sjø- og vindforhold, samt behandle større AUV'er. Dette vil sannsynligvis øke rekkevidden til hele «Survey» systemet, samtidig som det vil utvide bruksområdet og gjøre USV'en med tilhørende AUV'er i stand til å takle mer avanserte oppdrag. Dette burde absolutt være en interessant mulighet for den norske olje- og gassindustrien i fremtiden. Det kan bl.a. bidra til å redusere «Offshore» bemanning, i tillegg til å kutte ned på de store utgiftene som er forbundet med å benytte skip som innleies fra eksterne firma. Å designe en større versjon vil imidlertid kreve mange tidkrevende og veldig kompliserte beregninger og analyser, så det er ikke noe gruppen vil forsøke i denne rapporten. Det ville sannsynligvis også kreve en del arbeid innen forskjellige fagområder for å ivareta et akseptabelt sikkerhetsnivå når fartøy av betydelig størrelse skal ferdes ubemannet i relativt trafikkerte havområder.

2.3. Krav og spesifikasjoner for USV

Designerne setter noen innledende krav til fartøyet for å sikre at designet ikke skal komme i konflikt med oppdragene USV'en skal utføre. De ønsker:

- Rekkevidde på omtrent 120 miles (ca. 200 km) [6]
- Rekkevidden skal nås med en designhastighet på 12 knop (ca. 6,17 m/s) [3,5,6]

- Rekkevidden skal dekkes av drivstofflager og energianordninger som er ombord på fartøyet [3]
- Mulighet til å ta opp, motta data fra, transportere, lade opp og sjøsette AUV'er med en lengde opp til 2,2 m og masse opp til 100 kg [3]

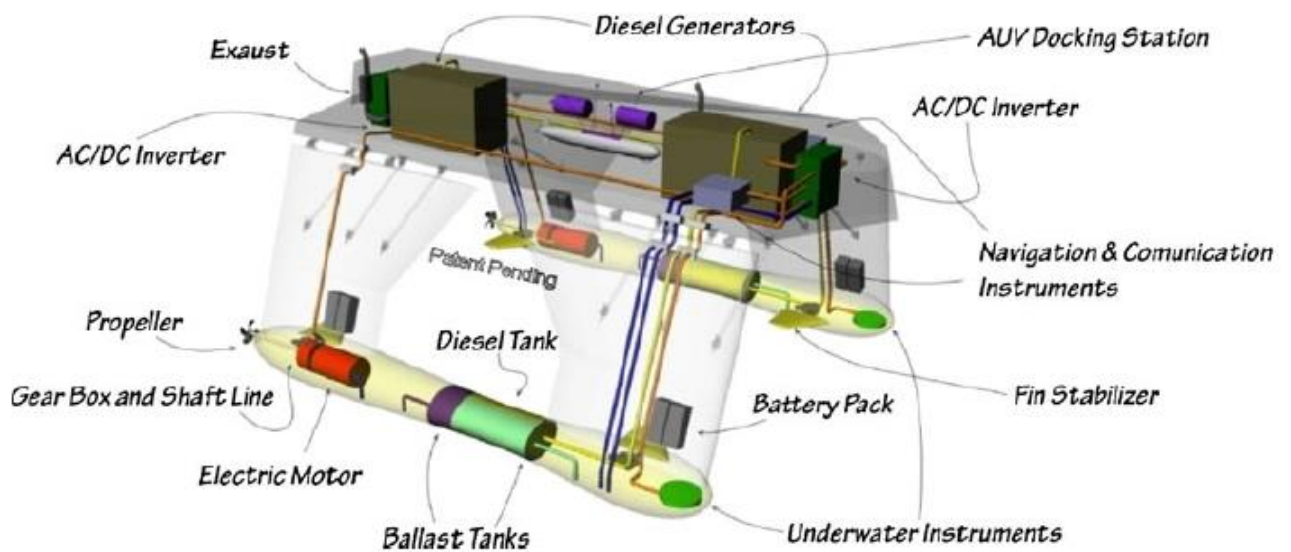


Figur 2.3: USV sett fra utsiden [3].

Med de tidligere nevnte designmetoder og dataverktøy, sammen med ovennevnte innledende krav, kom de fram til et endelig design for fartøyet. De fysiske spesifikasjonene ble slik fastsatt, og videre brukt til å beregne nødvendig effekt og energimengde på energianordninger.

Nødvendige innvendige komponenter ble også tatt

med i designet for å få riktige spesifikasjoner angående masse, volum og geometri. Siden designerne har laget sitt design med alle disse hensyn, vil de komponenter som designerne har plassert i fartøyet bli brukt som en mal, eller maksgrense, for masse, volum, areal, geometri, og andre relevante variabler, når det videre i denne rapporten blir undersøkt alternative energisystemer. Det antas altså at det ikke er mulighet for å gjøre noen valg angående energisystem der designet på fartøyet forandres, eller der komponenter i energisystemet overskrider masse, volum, etc. av tilsvarende komponenter i det diesel-elektriske energisystemet foreslått av designerne. Dette systemet vil bli gitt en nøyere presentasjon og utgreiing i kapittel 4.



Figur 2.4: Innvendig oppbygning av USV med diesel-elektrisk energisystem [3].

Med de gitte opplysninger om rekkevidde [6] og designhastighet [3] kan man enkelt beregne tidsperioden fartøyet kan være operativt i ved designhastighet før det trenger påfyll av energi. Det kan være både interessant og nyttig å ha denne opplysningen. Denne tidsperioden er:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{200000 \text{ m}}{6,17 \text{ m/s}} \approx 32415 \text{ s} \approx \underline{9 \text{ h}} \quad (2.1)$$

USV'en kan altså være operativ i 9 timer ved en konstant hastighet på 12 knop (ca. 6,17 m/s), uten noe påfyll av energi. I realiteten kan den sannsynligvis være ute lenger enn dette siden den trolig bruker mindre energi når den f.eks. ligger i ro ved en AUV enn når den går ved konstant hastighet på 12 knop.

Tekniske spesifikasjoner for USV:

Full lengde	7,02 m [3]
Lengde ved vannlinje	5,90 m [3]
Høyde	3,33 m [3]
Masse av fortrengt vannvolum	4,343 tonn [3]
Effektbehov ved designhastighet	50 kW [6]
Størrelse på drivstofftanker	190 liter [3] (Totalt volum)
Designhastighet	12 knop [3]
Rekkevidde	Ca. 120 miles (ca. 200 km) [6]
Operativ tid ved designhastighet	9 timer (2.1)
Maksimal signifikant bølgehøyde	1,25 m [3]
Maksimal vindhastighet	30 knop [3]
Maksimal AUV-lengde	2,2 m [3]
Maksimal AUV-masse	100 kg [3]

Tabell 2.1: Tekniske spesifikasjoner for USV [3,6].

2.4. Beskrivelse av tilhørende AUV'er

2.4.1. Generelt

Størstedelen av oppdragene til USV'en vil bestå i å bistå AUV'er som beskrevet i kapittel 2.2. Maksimal lengde og masse på disse AUV'ene er oppgitt i tabell 2.1. Designerne nevner i [5] og [6] noen eksempler på AUV'er som USV'en er designet for å bistå. AUV'ene de nevner er Folaga, Hydroid og Bluefin-9 [5,6]. Bortsett fra disse 3 typene må det antas at alle AUV'er som kommer under maksimalgrensene for størrelse og masse, og som har utstyr som er kompatibelt med utstyret til USV'en, også kan bli bistått av USV'en omhandlet i denne rapporten. Når det gjelder energi til AUV'ene, er det oppgitt i [6] at den gitte effekten på 50 kW [6], dieseltankene på 190 liter [3] og litium-ion batteriene [6] skal gi nok energi til at USV'en kan dekke rekkevidden oppgitt i tabell 2.1, i tillegg til å bistå og lade opp «noen få» AUV'er i hvert oppdrag. Det er ikke oppgitt noe nøyaktig tall for hvor mange AUV'er den kan bistå i hvert oppdrag, det vil nok variere etter hvor lang distanse den må tilbakelegge, værforhold, etc. Her følger en kort beskrivelse av de 3 typene AUV'er som nevnes i [5,6]:

2.4.2. Folaga

Folaga er en AUV utviklet av det italienske selskapet Graaltech. Det er en mellomstor AUV, opprinnelig utviklet for å utføre miljømessige målinger, men med modifikasjoner og oppgraderinger i ettertid kan den nå også brukes innen inspeksjons- og sikkerhetsoppdrag [Vedlegg B]. De mest vesentlige spesifikasjonene oppgitt i [Vedlegg B] er:

- Diameter: 155 mm
- Lengde: fra 2 m
- Masse: 31 kg
- Energilagring: Ni-MH batteri, 12 volt, 45 Ah
- Operativtid ved maksfart: 6 timer
- Hastighet: 2-4 knop
- Maksimal arbeidsdybde: 80 m



Figur 2.5: Folaga AUV [Vedlegg B].

2.4.3. Hydroid

Hydroid som det refereres til i [5,6] er Remus 100, en AUV utviklet av selskapet Hydroid gjennom flere års forskning ved Woods Hole Oceanographic Institution. Hydroid selv kaller den verdens kraftigste, kompakte



Figur 2.6: Remus 100 AUV [Vedlegg C].

AUV. Den kan utstyres på en rekke forskjellige måter for å utføre en lang rekke oppdrag innen flere forskjellige områder. Oppdrag som nevnes inkluderer: hydrografisk survey, sikkerhet i forhold til havner, miner, o.l., miljømessige målinger og overvåkning, søk og redningsoppdrag, vitenskapelige undersøkelser, etc. [Vedlegg C]. De mest vesentlige spesifikasjonene oppgitt i [Vedlegg C] er:

- Diameter: 19 cm
- Lengde: fra 160 cm
- Masse: fra 37 kg
- Maksimal arbeidsdybde: 100 m (Kan konfigureres til 120 m)
- Energilagring: Oppladbart Li-ion, 1 kWh
- Maksimal hastighet: 2,6 m/s
- Operativtid: 22 timer ved 1,5 m/s, >8 ved 2,6 m/s

2.4.4. Bluefin-9

Bluefin-9 er en AUV utviklet av Bluefin Robotics. Den er litt tykkere og tyngre enn de to andre nevnte AUV'ene, men den er allikevel godt innenfor maksimumsgrensene til USV'en. Den kan utføre varierte oppdrag innen «Inshore Survey»: beskyttelse og måling av miljø, sikkerhet i forhold til havner og miner, overvåking og etterretning, etc. [Vedlegg D]. De mest vesentlige spesifikasjonene oppgitt i [Vedlegg D] er:



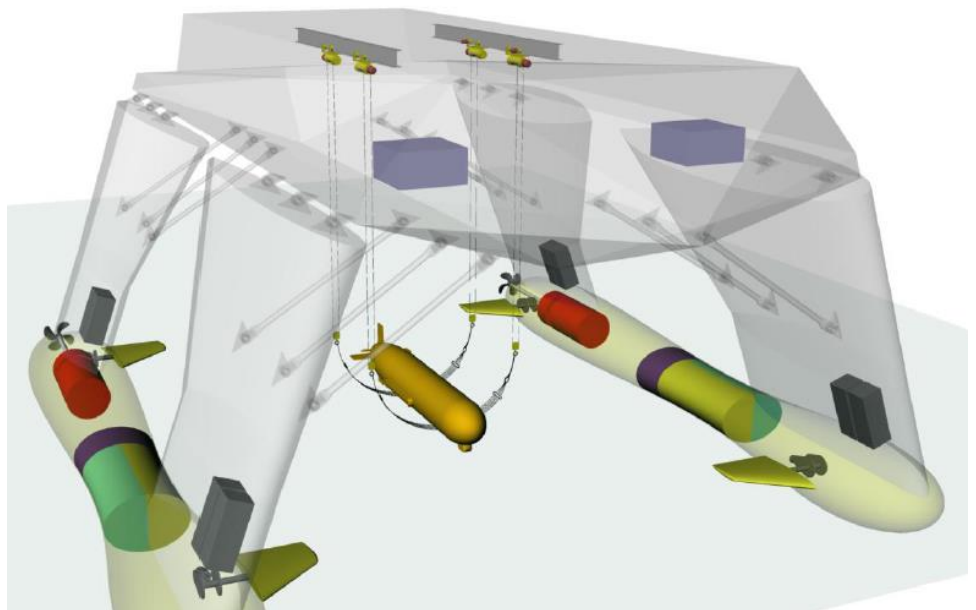
Figur 2.7: Bluefin-9 AUV [Vedlegg D].

- Diameter: 24 cm
- Lengde: 175 cm
- Masse: 60,5 kg
- Maksimal arbeidsdybde: 200 m
- Operativtid: 12 timer ved 3 knop
- Maksimal hastighet: 5 knop
- Energilagring: Litium-polymer batteri, 1,5 kWh

2.5. Sammenkobling av AUV og USV

Hovedhensikten med USV'en er at den skal bistå AUV'er. Den skal oppsøke AUV'er som er på oppdrag ute i sjøen/vannet, og koble seg sammen med disse for å overføre ny energi til dem og for å motta data som AUV'ene har lagret.

Hensikten til designerne er å implementere et system som brukes på skipsverft rundt om i verden til å løfte små og mellomstore båter, etter at dette systemet har blitt adaptert til å passe til USV'en og tilhørende AUV'er. Det består av to vinsjer med belter, en foran og en bak, drevet av elektriske motorer og justerbare i lengderetningen. Løfteoperasjonen begynner



Figur 2.8: USV'en i ferd med å løfte opp en 2 m lang AUV [6].



med at beltene senkes ned i sjøen til en slik dybde at de ikke blir mye påvirket av bølgekrefter. Beltene er relativt stive, de er ballastert for å kunne senkes ned uten at formen forandres, og de er belagt med et tett belegg av silisium gummi for å sikre godt grep på AUV'en. AUV'en holdes også på en dybde slik at den ikke påvirkes så mye av bølgekrefter, og den guides så i rett posisjon ved hjelp av sonar chip installert i både USV og AUV. Løfteoperasjonen starter når signalet fra sonar chipen kommer, og alt går automatisk; både løft, sammenkobling, overføring av energi og data, og til slutt nedsenkning og sjøsetting [6]. Designerne undersøker også andre typer systemer, men det er det ovennevnte systemet som er det mest sannsynlige før videre forskning er utført, ifølge designerne. Et annet system som kan være aktuelt er rutsjebane-prinsippet. Da senker USV'en en rutsjebane ned i vannet og AUV'en heises opp og slippes ned ved hjelp av rutsjebanen og et vinsjssystem. I tillegg tømmes ballastsystemet når AUV'ene løftes. Dette er for å kompensere for den økte massen av AUV'en. Ballastsystemet forklares nærmere i kapittel 4.1.

2.6. AUV energisystem

Alle AUV'ene designerne nevner har ren batteridrift, det samme gjelder alle AUV'ene utviklet ved MIT Sea Grant, samt Hugin AUV'ene til Kongsberg Underwater Technology som veier mindre enn 1 tonn. Det kan dermed se ut som at de aller fleste AUV'ene opp til og med 100 kg har batteridrift, og det vil derfor ikke bli undersøkt noen andre energisystemer enn ren batteridrift for AUV'ene i denne rapporten. Det kunne naturligvis vært installert f.eks. en liten PEMFC (brenselcelle beskrevet i kapittel 6) på en AUV også, men det ville sannsynligvis ikke vært noen gunstig løsning på en så liten AUV. Brenselcellesystemet med hydrogentank og alle tilleggskomponenter tar mer plass enn ett enkelt batteri. Når det er snakk om AUV'er av en såpass liten størrelse er plass og masse essensielle faktorer. De har også relativt kort operativ tid (under 24 timer). Derfor vil det trolig ikke være hensiktsmessig å benytte noe annet enn batterier til å dekke energibehovet. Det kan for øvrig nevnes at det finnes en AUV i størrelsesklassen opp til 100 kg som ikke bruker batterier som den primære energikilden i sitt fremdriftssystem, nemlig Seaglider fra Kongsberg Underwater Technology, som bruker små forandringer i oppdrift og vinger til å skape fremdrift. Men den trenger allikevel et batteri for å ha energi til instrumenter, vingene, etc.

Det mest interessante alternativet til batteriene de nevnte AUV'ene bruker, ser for tiden ut til å være nyere og bedre batteriteknologier, nærmere bestemt sjøvannsbatterier. Det er bl.a. utført mye forskning ved Forsvarets Forskningsinstitutt (FFI) på sjøvannsbatterier til AUV. Her har det vært brukt en anode av magnesium, mens katoden er sjøvannet. Teknologien som er kommet lengst nå ser imidlertid ut til å være sjøvannsbatterier med anode av litium, Li-H₂O batterier, også kalt litium-sjøvann batterier. Batteriteknologier blir beskrevet i kapittel 5, og Li-H₂O batterier blir spesielt beskrevet i kapittel 5.2.5. Ved å bruke det beste tilgjengelige batteriet av denne typen vil energimengden som er tilgjengelig pr. oppdrag i AUV'ene i teorien bli 6-15 ganger så høy. Dette vil naturligvis også gi en dramatisk økning i rekkevidde og operativ tid, og kan potensielt øke virkningsgraden til hele «Survey» systemet som både USV'en og AUV'ene er en del av. Det må imidlertid også nevnes at hvis energimengden som lagres i AUV'ene økes, så må naturligvis USV'en tilføre mer energi til hver AUV, og vil følgelig trenge mer tilgjengelig energi pr. oppdrag for å opprettholde sin egen rekkevidde og operative tid. Dette kan kanskje løses ved å installere tilsvarende batteriteknologi i USV'en.



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

*Alternative energisystemer for ubemannet overflatefartøy
(USV) med tilhørende autonome undervannsfarkoster (AUV)*



Energibehovet til AUV'ene vil nok uansett være en veldig liten del av det totale energibehovet til USV'en. Alle disse mulighetene vil bli vurdert og nærmere beskrevet i følgende kapitler hvor energisystemer presenteres, og videre detaljert i energisystemet som blir det endelige valget i denne rapporten.

3. Diskusjon om mulige energisystemer

3.1. Generelt

Det er mange mulige energisystemer for de fleste sjøfartøy, det gjelder også for fartøyet som denne rapporten omhandler. Det er mange forskjellige typer energianordninger, i tillegg til at det ofte kan være forskjellige typer brensel som kan benyttes i ulike versjoner av samme energianordning. I en forbrenningsmotor kan brenselet være diesel, bensin, biodiesel, gass, etc., i en brenselcelle kan brenselet være hydrogen, metanol, metan, etanol, etc. Man kan ha et energisystem som baserer seg på én type energianordning, f.eks. et system hvor all energien kommer fra en forbrenningsmotor som bruker diesel som brensel. Men man kan også kombinere to eller flere forskjellige energianordninger i et hybridsystem, f.eks. et system med forbrenningsmotor, generator og batterier, eller et system med brenselcelle og batterier, osv. Det er følgelig en mengde forskjellige løsninger som er mulige for fartøyet i denne rapporten. Det er imidlertid ikke tid til å undersøke absolutt alle mulige alternativer. Det vil derfor i denne rapporten bli valgt ut 4 alternative energisystemer. Det første er det dieselelektriske systemet foreslått av designerne av fartøyet i [3,5,6], mens de 3 neste er de systemene som gruppen ser på som de mest interessante i forhold til de viktigste kriteriene nevnt i kapittel 1.2.

I forarbeidet til denne rapporten er det vurdert mange ulike energiteknologier, og en del har blitt eliminert som urealistiske. Eksempler som kan nevnes er solkraft og vindkraft. For at fartøyet skulle fått en betydelig mengde energi fra solkraft måtte det blitt installert store mengder solceller. Solcellene som det er plass til på selve fartøyet ville ikke produsert i nærheten av nok energi, altså måtte det blitt montert store flater dekket med solceller, og siden dette i stor grad ville kommet i konflikt med designet fra [3,5,6] er dette uaktuelt. Når det gjelder vindkraft så måtte det blitt montert anordninger på fartøyet som kunne fanget vindenergi, men dette ville også i stor grad kommet i konflikt med designet fra [3,5,6] og er følgelig også uaktuelt. Andre alternativer har blitt eliminert av andre grunner. Her kan det nevnes et rent diesel/bensinmotorsystem. Et slikt system er veldig nøye utprøvd opp gjennom årene, og må sies å være et skritt tilbake fra det foreslåtte dieselelektriske systemet. Dette gjelder spesielt i forhold til reguleringstekniske forhold som dynamisk posisjonering og bruk av ideelt turtall på dieselmotoren. Etter nøye undersøkelser og innsamling av informasjon fra vitenskapelige artikler og aktuelle teknologier, har gruppen gjort sine valg av alternativer som skal undersøkes nærmere.

3.2. Valg av alternative energisystemer

Det første energisystemet som vil bli gjennomgått er som sagt det dieselelektriske hybridsystemet foreslått av designerne i [3,5,6]. Etter en utgreiing av dette systemet vil det bli gjennomgått 3 alternative energisystemer valgt av gruppen som skal sammenlignes med det dieselelektriske systemet og hverandre. På bakgrunn av det ovennevnte forarbeid og kriteriene nevnt i kapittel 1.2, har gruppen kommet frem til følgende 3 alternativer til det dieselelektriske energisystemet:

- **Helelektrisk (batteri) energisystem:**

Helelektriske kjøretøy/fartøy har tatt over mer og mer av markedet de siste årene. Det vil bli undersøkt muligheten for å bruke et slikt energisystem på fartøyet som omhandles i denne rapporten, og eventuelle fordeler og ulemper med dette. Flere ulike batteriteknologier vil undersøkes for å finne det beste alternativet.

- **Brenselcelle/batteri hybridssystem:**

Brenselceller er en relativt gammel teknologi fra 1800-tallet som har fått mange forbedringer de siste årene, og må nå kunne sies å være et av de mest spennende alternativene når det gjelder å øke virkningsgraden til transportsektoren og gjøre den mer miljøvennlig. Teknologien er ennå ikke kommet langt nok til at et fartøy med et energibehov som fartøyet i denne rapporten har, kan drives av en brenselcelle alene. Dette vises med beregninger i kapittel 6. Det vil derfor undersøkes en hybridløsning hvor en brenselcelle kombineres med den best egnede batteriteknologien.

- **Naturgass energisystem:**

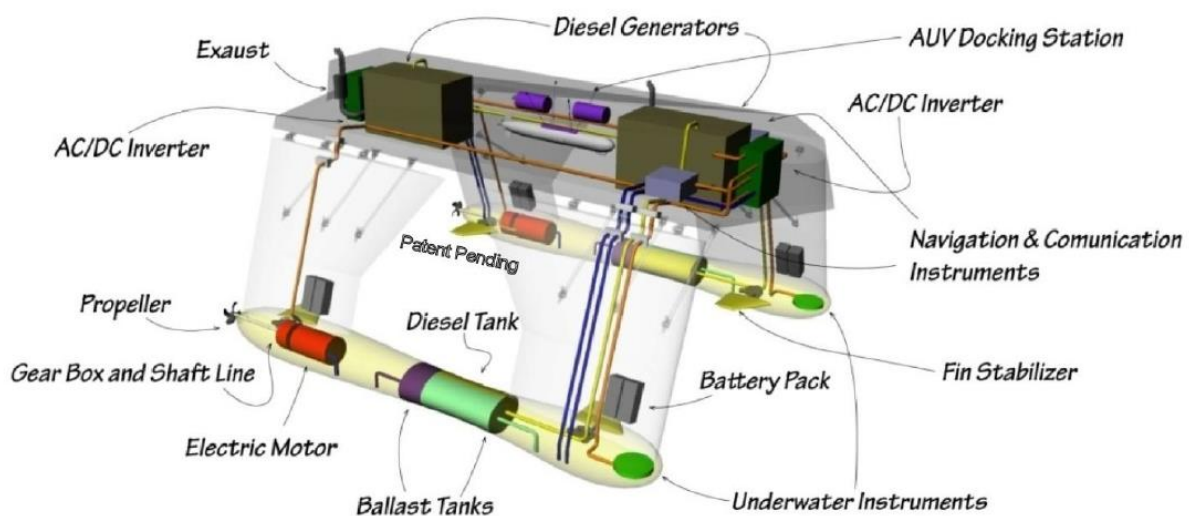
De siste årene har det blitt bygget flere og flere skip med energisystemer som baserer seg på naturgass, spesielt LNG («Liquefied Natural Gas»). Transportsektoren på land benytter også noe naturgass, da hovedsakelig CNG («Compressed Natural Gas»). Det vil undersøkes aktuelle teknologier på dette området, og om noen av dem kan være et realistisk og gunstig alternativ for fartøyet i denne rapporten.

4. Utgreiing av diesel-elektrisk hybridsystem

4.1. Komponenter

USV'en er i [3] blitt gitt et energisystem bestående av 2 dieselgeneratorer, hver med avgitt effekt på 22 kW, 2 dieseltanker med samlet volum på 190 liter, 2 AC/DC omformere, 8 batterier av typen litium-ion 120 Ah, og 2 elektriske motorer, koblet til hver sin drivaksel, girkasse og propell med diameter 700 mm. [3] ble skrevet og publisert i 2011. I 2012 ble så [6] publisert. Her kommer det frem noen tilleggsopplysninger om energisystemet, mens noen opplysninger fra [3] er blitt forandret. Det er naturlig å anta at de nyeste opplysningene er de mest reelle, så opplysningene fra [6] vil bli brukt der de kommer i konflikt med opplysningene fra [3], eller der opplysninger fra [6] gir informasjon som ikke ble gitt i [3]. De nye opplysningene i [6] er at dieselgeneratorene har en avgitt effekt på 25 kW hver, ikke 22 kW som det står i [3], det er 4 litium-ion batterier i stedet for 8, og de elektriske motorene er DC motorer med en avgitt effekt på 20 kW hver. Siden de elektriske motorene er DC motorer, og det er opplyst i [3] at det blir benyttet 2 AC/DC omformere, er det naturlig å anta at dieselgeneratorene er av typen AC (også kalt «Alternator» på engelsk og vekselstrømgenerator på norsk). Det dieselelektriske energisystemet har altså følgende komponenter:

- 2 AC dieselgeneratorer, begge med avgitt effekt 25 kW [6]
- 2 dieseltanker, samlet volum 190 liter [3]
- 2 AC/DC omformere [3]
- 4 batterier, Li-ion 120 Ah [6]
- 2 DC elektriske motorer, hver med avgitt effekt 20 kW, med tilhørende drivaksel [6]
- 2 girkasser [3]
- 2 propeller med diameter 700 mm [3]



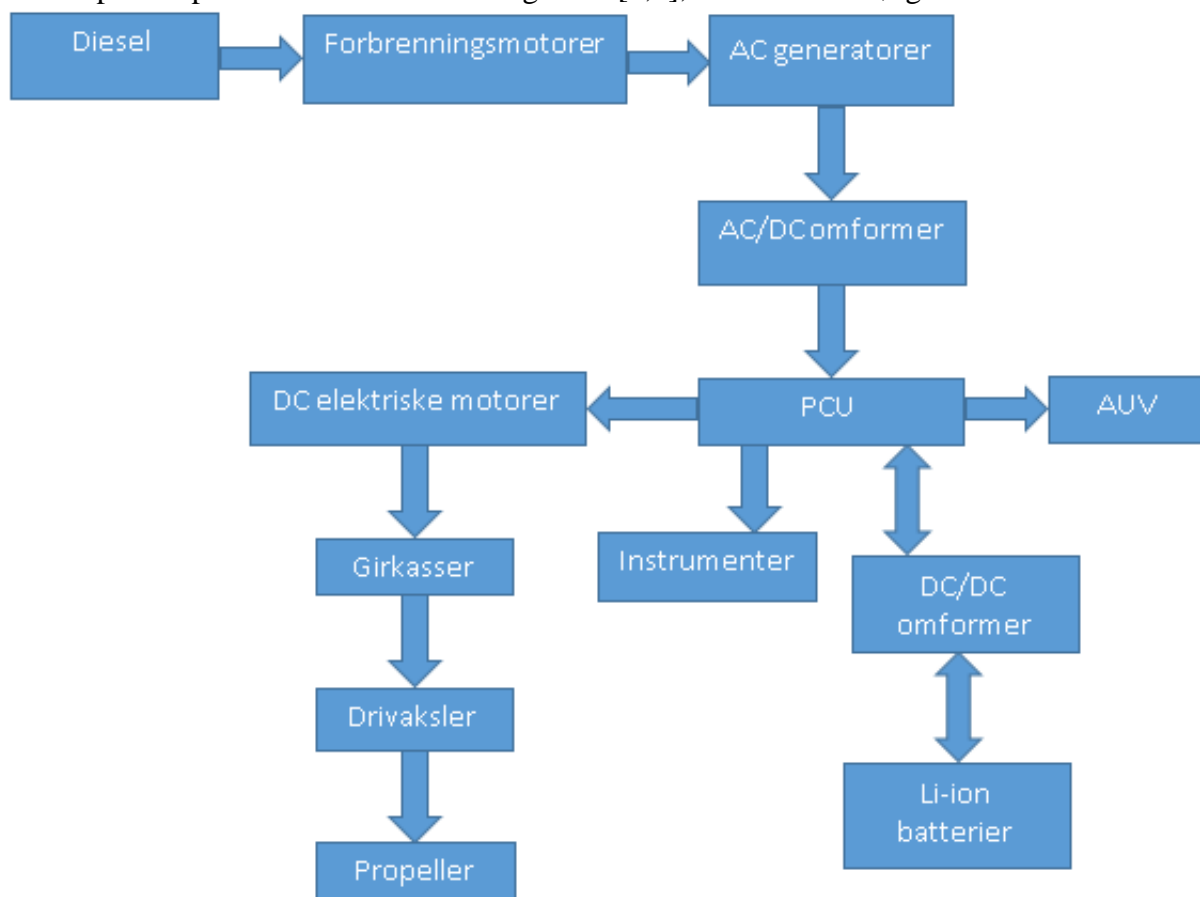
Figur 4.1: Oversiktsbilde av USV med komponentene i det dieselelektriske energisystemet [5].

Bortsett fra opplysningene om ovennevnte komponenter er det ikke gitt noen informasjon om det dieselelektriske energisystemet i [3,5,6]. Fokuset i alle disse artiklene [3,5,6] ligger på design av selve fartøyet, geometri, CFD-analyser, hydrodynamikk, etc. Det vil derfor bli gjort en videre utgreiing av et dieselelektrisk energisystem til fartøyet denne rapporten omhandler, hvor de ovennevnte komponentene designerne nevner i [3,5,6] vil bli brukt som grunnlag. Det antas følgelig at det ikke er noen andre komponenter enn de ovennevnte i det dieselelektriske energisystemet, og at det heller ikke er mulig å legge til flere komponenter. Unntaket er at det må være et styresystem som mottar signaler fra land eller forhåndsprogrammeres, og som gjennom dette kontrollerer effekt, energibruk og manøvrering.

Det kan også nevnes at ballasttankene som vises på figur 4.1 er viktige i forhold til fartøyets stabilitet og virkningsgrad. Fartøy med SWATH-design er veldig følsomme for forandringer i last, det er derfor viktig å holde fartøyets totale masse mest mulig stabil. Dette oppnås ved hjelp av ovennevnte ballasttanker, ved at ballasttankene tar inn sjøvann etter hvert som dieselen i drivstofftankene brukes opp. Massen av sjøvannet som tas inn kompenseres dermed for massen av dieselen som minsker. I situasjoner der fartøyet skal heise opp AUV'er (opp til 100 kg), vil en passende mengde av sjøvannet i ballasttankene bli pumpet ut for å kompensere for den økte massen pga. AUV'en [3]. Dette er et moment som det også blir viktig å ta hensyn til i utgreiingen av de alternative energisystemene i senere kapitler.

4.2. Virkemåte

Basert på komponentene satt inn av designerne [3,6], kan det antas følgende virkemåte for det



Figur 4.2: Flytskjema for energi i det dieselelektriske hybridsystemet.



dieselelektriske systemet: Dieselen fra tankene gir energi til forbrenningsmotorene. Disse motorene driver generatorene, og generatorene omdanner den mekaniske energien fra forbrenningsmotorene til elektrisk energi. Strømmen som kommer ut av generatorene er vekselstrøm (AC). Denne strømmen blir så omdannet til likestrøm (DC) i AC/DC omformerne, før den fordeles ut til instrumenter, batterier (gjennom DC/DC omformere), AUV'er, og de elektriske motorene. Denne fordelingen gjøres av en PCU («Power Control Unit»). I de elektriske motorene blir den elektriske energien omdannet til mekanisk energi som blir overført til propellene via girkassene og drivakslene. Når det trengs vil det overføres energi fra batteriene til PCU'en gjennom DC/DC omformerne, slik at denne energien kan brukes i motorene, instrumentene eller til å lade opp AUV'er. Det er altså den kjemiske energien lagret i dieselen og den elektriske energien lagret i batteriene som gir energi til hele systemet, både propellene på fartøyet, instrumenter, AUV'er, etc. Fordelen med et slikt system kontra et rent dieselsystem med forbrenningsmotor er hovedsakelig knyttet til reguleringstekniske forhold. Dette gjelder dynamisk posisjonering og at forbrenningsmotoren kan gå med ideelt turtall hele oppdragsperioden. Når energibehovet til fartøyet er mindre enn det dieselmotoren leverer lagres overskytende energi i batteriene, og når energibehovet er større enn dieselmotoren leverer kan den lagrede energien i batteriene brukes.

4.3. Beregninger

4.3.1. Generelt

Siden det er dette dieselelektriske systemet med de ovennevnte komponenter designerne har benyttet i sin designprosess [3,5,6], må de fysiske spesifikasjonene som disse komponentene har benyttes som en maksgrense for masse, volum og geometri når det skal undersøkes alternative energisystemer i senere kapitler. Dette er for å minimere risikoen for at fartøyets egenskaper blir forverret av økt masse, feilfordelt masse, komponenter som ikke får plass o.l., når komponentene i det dieselelektriske energisystemet blir erstattet med andre komponenter i et annet energisystem. Det må f.eks. antas at siden dieseltankene har et totalt volum på 190 liter [3], må også andre typer drivstofftanker som disse blir erstattet med ha et maksimalvolum på 190 liter. Det vil derfor bli gjort beregninger eller undersøkelser for å finne verdier for de fysiske spesifikasjonene av de oppgitte komponentene. Siden det er så sparsomt med opplysninger om de ulike komponentene, og om energisystemet generelt, i [3,5,6], er det naturligvis noen begrensninger for hvor mange verdier som kan beregnes og hvor nøyaktige de beregnede verdiene blir. Det blir derfor nødvendig å gjøre noen antagelser. Men det vil uansett være nyttig å ha noen verdier å bruke som en mal, slik at risikoen for å designe et energisystem som ikke passer på fartøyet minimeres. Det vil også bli beregnet energiverdier, slik at det er fastsatt hvilken energimengde og effekt alle de alternative energisystemene må levere.

4.3.2. Diesलगeneratorer

Opplysningene som er gitt om diesलगeneratorene er at det skal være 2 stykker, og begge skal ha en avgitt effekt på 25 kW [6]. Kohler Power Systems har en diesलगenerator for marint bruk med en avgitt effekt på 25 kW. Modellnummeret er 25EFOZD, og de fysiske spesifikasjonene på denne generatoren [Vedlegg E] vil bli brukt som en mal i denne rapporten. Spesifikasjonene er:

- Masse: 628 kg (med støyskjold)
- Lengde: 1295 mm (med støyskjold)
- Bredde: 635 mm (med støyskjold)
- Høyde: 810 mm (med støyskjold)

Volum pr. diesलगenerator:

$$V_{DG} = L \cdot B \cdot H = 1,295 \text{ m} \cdot 0,635 \text{ m} \cdot 0,810 \text{ m} \approx \underline{0,666 \text{ m}^3} \quad (4.1)$$

Volum og masse pr. diesलगenerator er altså henholdsvis 0,666 m³ og 628 kg, og de vil være plassert slik det er vist på figur 4.1.

4.3.3. Dieseltanker

Dieseltankene har et totalt volum på 190 liter [3], og det antas at det er to like store tanker med et volum på 95 liter plassert på hver sin side av fartøyet i samme posisjon som vist på figur 4.1. Et mye brukt materiale til dieseltanker er polyetylen, mye pga. lang levetid og et gunstig styrke/masse forhold. En 100 liters tank uten ekstra utstyr har sjelden større masse enn 10-11 kg, og det vil være rimelig å anta at en 95 liters tank heller ikke vil ha større masse enn dette. Massen pr. 95 liters tank anslås derfor til 11 kg.



Figur 4.3: Kohler 25EFOZD 25 kW diesलगenerator [Vedlegg E].



Figur 4.4: Vetus dieseltank (polyetylen) til båt [8].

4.3.4. Batterier

Informasjonen i [3] om fartøyets batterier er at det skal være 4 Li-ion batterier, hver med elektrisk kapasitet på 120 Ah. Det er ikke oppgitt noen spenning. Selve prinsippet for batterier og ulike typer av disse vil bli nøyere gjennomgått i kapittel 5, hvor det presenteres et helelektrisk energisystem til fartøyet. Det finnes mange ulike Li-ion batterier fra ulike produsenter. I denne rapporten er det antatt at det er tilgang på BAT til alle komponentene i alle energisystemene. I kapittel 5.2.2, som omhandler Li-ion batterier, nevnes det at de beste litium-ion batteriene som finnes nå har en spesifikk energi på 250 Wh/kg, energitetthet på 400 Wh/liter og en virkningsgrad på 95 % [15]. For å finne masse og volum av batteriene må energimengden i batteriene beregnes, og til dette trengs batterienes spenning. En av de markedsledende produsentene av batterier til kjøretøy/fartøy pr. i dag er Tesla Motors. De benytter Li-ion batterier med en spenning på 375 V [7] i sin Tesla Roadster. Gruppen antar derfor at denne batteritypen også kan benyttes i fartøyet i denne rapporten. Energimengde pr. batteri med denne spenningen blir:



Figur 4.5: Illustrasjonsbilde av Li-ion batteri fra Tesla Motors [7].

$$E_{\text{batteri}} = I \cdot V \cdot t = 120 \text{ A} \cdot 375 \text{ V} \cdot 1 \text{ h} = 45000 \text{ Wh} = \underline{45 \text{ kWh}} \quad (4.2)$$

Den totale energimengden som er tilgjengelig ut av 4 fulladede batterier når virkningsgraden tas med i beregningen blir da:

$$E_{\text{batteri, total}} = E_{\text{batteri}} \cdot 4 \cdot \eta_{\text{Li-ion}} = 45 \text{ kWh} \cdot 4 \cdot 0,95 = \underline{171 \text{ kWh}} \quad (4.3)$$

Masse pr. batteri blir:

$$m_{\text{batteri}} = \frac{E_{\text{batteri}}}{E_{\text{spesifikk}}} = \frac{45000 \text{ Wh}}{250 \text{ Wh/kg}} = \underline{180 \text{ kg}} \quad (4.4)$$

Volum pr. batteri blir:

$$V_{\text{batteri}} = \frac{E_{\text{batteri}}}{E_{\text{tetthet}}} = \frac{45000 \text{ Wh}}{400 \text{ Wh/liter}} = \underline{112,5 \text{ liter}} \quad (4.5)$$

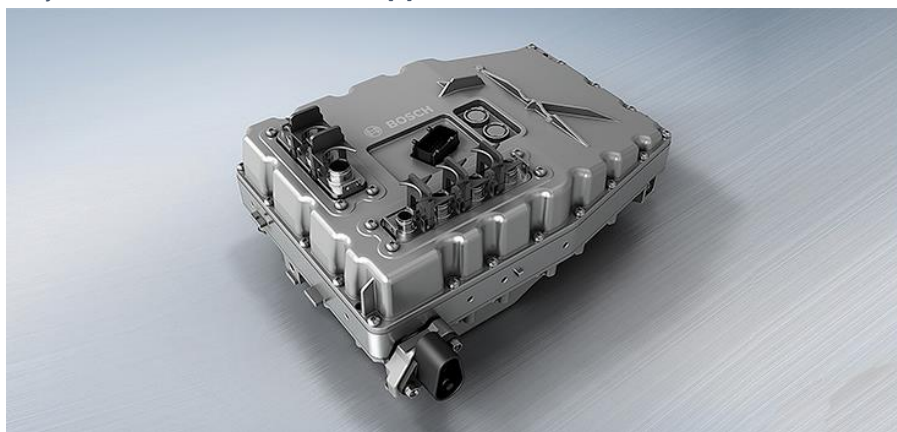
Masse og volum pr. batteri er altså henholdsvis 180 kg (4.4) og 112,5 liter (4.5), og de vil være plassert slik det er vist i figur 4.1.

4.3.5. Elektriske motorer, drivaksler, girkasser og AC/DC omformere

Opplysningene som er gitt i [6] om de elektriske motorene er at det skal være 2 stykker, begge skal være DC motorer med en avgitt effekt på 20 kW, og begge skal, ved hjelp av drivaksel og girkasse, drive hver sin propell med diameter 700 mm som skal skape fremdrift for fartøyet. Det er ikke gitt noen annen informasjon om AC/DC omformerne enn at de må ta imot en effekt på 25 kW. Det kunne vært funnet data angående masse og volum av disse komponentene også, men det vil ikke bli gjort i denne rapporten. Grunnen til det er ganske enkelt at det ikke er relevant for oppgaven i denne rapporten, siden alle disse komponentene blir identiske i alle energisystemene. Unntaket er AC/DC omformerne. Disse vil bli erstattet med DC/DC omformere i to av de andre energisystemene. AC/DC omformere er trolig litt større pga. flere komponenter, men differansen vil etter all sannsynlighet være neglisjerbar i forhold til den totale massen og volumet til energisystemene, og vil følgelig ikke tas med i beregningene som omhandler masse og volum. Propellene er valgt av designerne, og fartøyet er designet for å bli drevet av nettopp disse propellene [3], så det er ikke mulighet til å bytte ut eller fjerne disse propellene. Videre må propellene i alle tilfellene bli drevet av en motor som omdanner den elektriske energien fra de ulike energisystemene til mekanisk energi, som overføres til propellene via drivaksel og girkasse. Dette blir i alle tilfellene en elektrisk motor, siden det ikke vil vurderes et rent forbrenningsmotorsystem. Dermed blir disse komponentene (elektriske motorer, drivaksler, girkasser og AC/DC omformere eller DC/DC omformere) identiske i alle energisystemene og de kan sees på som konstanter. Følgelig er det ikke nødvendig med noen beregninger angående verdier for masse og volum for disse.



Figur 4.7: Illustrasjonsbilde av 20 kW elektrisk motor [9].



Figur 4.6: Illustrasjonsbilde av inverter til bruk i kjøretøy [22].

4.3.6. Total energimengde og masse av drivstoff

I [3,6] opplyser designerne om at størrelsen på dieseltankene (190 liter) skal gi nok energi til å dekke den oppgitte rekkevidden (ca. 200 km) i tillegg til å lade opp batteriet til «noen få» AUV'er. De nevner ikke om de 4 batteriene på USV'en er ladet opp før fartøyet drar ut på oppdrag. Men siden det er en betydelig energimengde tilgjengelige fra batteriene når de er fulladet (171 kWh (4.3)), ser gruppen det som fordelaktig å lade opp alle 4 batteriene før fartøyet drar ut på oppdrag, slik at den totale tilgjengelige energimengden pr. oppdrag blir størst mulig.

I [4] oppgis nedre brennverdi og tetthet for diesel til å være henholdsvis 41,9 MJ/kg og 830 kg/m³. Massen av 190 liter diesel blir da:

$$m_{diesel} = V_{diesel} \cdot \rho_{diesel} = 0,190 m^3 \cdot 830 \frac{kg}{m^3} = \underline{157,7 kg} \quad (4.6)$$

Energimengden i dieselen blir:

$$\begin{aligned} E_{diesel} &= m_{diesel} \cdot LHV_{diesel} \\ E_{diesel} &= 157,7 kg \cdot 41,9 \frac{MJ}{kg} \\ E_{diesel} &\approx 6608 MJ \approx \underline{1836 kWh} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Den totale energimengden som potensielt er tilgjengelig fra dieselen pr. oppdrag er dermed 1836 kWh (4.7). Det er imidlertid umulig å nyttiggjøre all denne energien. I dieselgeneratoren er det en forbrenningsmotor hvor dieselen forbrennes for å omdanne kjemisk energi til mekanisk energi, og som vi vet er virkningsgraden til en dieselmotor langt i fra 100 %. Den valgte dieselgeneratoren har en firetakts dieselmotor med 1500 omdreininger pr. minutt. Dette er en hurtig firetaktsmotor, og ifølge [26] er virkningsgraden med dagens teknologi for en slik motor 38-44 %. Den totale energimengden fra dieselen som er tilgjengelig ut av PCU'en er imidlertid også avhengig av virkningsgraden til alle komponentene i kjeden frem til dette punktet. Det blir altså virkningsgraden til dieselmotor, generator, AC/DC omformer og PCU. I [34] er typisk virkningsgrad for en generator oppgitt å være 95-97 %. Når det gjelder AC/DC omformere er det mange forskjellige produkter tilgjengelig. Gruppen fant imidlertid ingen som passet helt til spesifikasjonene for fartøyet i denne rapporten, men typisk virkningsgrad for AC/DC omformer ser ut til å være rundt 95 %, noe som er oppgitt f.eks. i [35]. Gruppen fant også veldig lite informasjon om virkningsgrad for PCU, bortsett fra at det vanligvis er små tap i denne komponenten. Gruppen har kontaktet flere firmaer (Siemens, ABB, Brunvoll, Toyota) angående virkningsgrader på de fleste komponentene som benyttes i denne rapporten, men har ikke fått noen svar. Det eneste eksempelet gruppen fant på PCU er [Vedlegg I], hvor virkningsgraden er oppgitt å være 95-98 %. Denne PCU'en passer heller ikke helt med spesifikasjonene til fartøyet i denne rapporten. Gruppen velger allikevel å benytte de nevnte virkningsgradverdiene for AC/DC omformer og PCU for å kunne gjøre de nødvendige beregninger angående energi og total virkningsgrad. Avviket fra de reelle verdiene er sannsynligvis ikke veldig store, og eventuelle avvik vil uansett påvirke alle

energisystemene i samme retning, slik at sammenligninger av de forskjellige energisystemene uansett er av stor nytte. Energien ut av dieselmotoren pr. oppdrag ved bruk av BAT blir da:

$$E_{ut,1} = E_{diesel} \cdot \eta_{DM} \cdot \eta_G \cdot \eta_{AC/DC} \cdot \eta_{PCU}$$

$$E_{ut,1} = 1836 \text{ kWh} \cdot 0,44 \cdot 0,97 \cdot 0,95 \cdot 0,98 \approx \underline{730 \text{ kWh}} \quad (4.8)$$

For å finne den totale energimengden som er tilgjengelig ut av PCU'en pr. oppdrag må vi også ta med energien fra batteriene (4.3). Denne energimengden blir imidlertid også påvirket av virkningsgrader. I dette tilfellet blir det virkningsgraden til batteri, DC/DC omformer og PCU. Virkningsgraden til batteriene er allerede tatt med i (4.3) og virkningsgraden til PCU er nevnt i forrige avsnitt. I [36] oppgis virkningsgraden til en 30 kW DC/DC omformer av typen «Boost Converter» å være 83 %. Denne omformeren er ganske nær den typen DC/DC omformere som brukes i denne rapporten. Gruppen antar derfor at denne virkningsgraden kan brukes på alle DC/DC omformerne i denne rapporten. Den totale energimengden fra batteriene som er tilgjengelig ut av PCU'en pr. oppdrag blir da:

$$E_{ut,2} = E_{batteri} \cdot \eta_{Li-ion} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU}$$

$$E_{ut,2} = 180 \text{ kWh} \cdot 0,95 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \approx \underline{139 \text{ kWh}} \quad (4.9)$$

Den totale energimengden fra det dieselelektriske systemet som er tilgjengelig ut av PCU'en pr. oppdrag blir dermed:

$$E_{ut,DE} = E_{ut,1} + E_{ut,2} = 730 \text{ kWh} + 139 \text{ kWh} = \underline{869 \text{ kWh}} \quad (4.10)$$

Den totale energimengden som potensielt kan nyttiggjøres i det dieselelektriske systemet pr. oppdrag er altså 869 kWh (4.10). Denne energimengden er ifølge designerne nok til å dekke rekkevidden på ca. 200 km ved designhastigheten på 12 knop, samt å lade opp batteriene til «noen få» AUV'er [6]. Som man kan se på AUV'ene som beskrives i kapittel 2.4, og andre AUV'er på denne størrelsen, er energimengden som trengs for å fylle opp batteriet på slike AUV'er sjelden mer enn 1-5 kWh. Denne verdien er som man kan se mindre enn 1 % av den totale tilgjengelige energimengden (4.10). Dermed blir energimengden som overføres til AUV'er i løpet av et oppdrag så liten at den er neglisjerbar i beregninger på de ulike energisystemene, og vil følgelig ikke bli tatt med i disse. Det er uansett den totale energimengden som kan nyttiggjøres som er den interessante verdien i beregninger på de ulike energisystemene, ikke hva denne energimengden brukes til, siden den uansett brukes til samme formål uavhengig av hvilket energisystem som leverer energien. Den viktigste verdien her er altså den totale energimengden som kan nyttiggjøres (4.10), siden det blir verdien som de andre alternative energisystemene også må levere for å kunne dekke fartøyets behov [3,5,6]. Denne verdien blir altså et minimumskrav for levert energi pr. oppdrag for alle de forskjellige energisystemene i de påfølgende kapitler.

4.3.7. Total masse og volum av dieselektrisk energisystem

I senere sammenligninger av de andre energisystemene med det dieselektriske hybridsystemet kan det være greit å ha verdier for den totale massen og volumet av alle komponentene i det dieselektriske systemet. Dvs. alle komponentene som ikke inngår i de andre energisystemene. Den totale massen av disse komponentene blir:

$$\begin{aligned}
 m_{DE} &= 2m_{DG} + 2m_{DT} + m_{diesel} + 4m_{batteri} \\
 m_{DE} &= (2 \cdot 628) \text{ kg} + (2 \cdot 11) \text{ kg} + 157,7 \text{ kg} + (4 \cdot 180) \text{ kg} \\
 m_{DE} &\approx 2156 \text{ kg}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Det totale volumet av komponentene blir:

$$\begin{aligned}
 V_{DE} &= 2V_{DG} + V_{diesel} + 4V_{batteri} \\
 V_{DE} &= (2 \cdot 0,666) \text{ m}^3 + 0,190 \text{ m}^3 + (4 \cdot 0,1125) \text{ m}^3 \\
 V_{DE} &\approx 1,97 \text{ m}^3
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

4.3.8. Total virkningsgrad for dieselektrisk fremdriftssystem

For å sammenligne total virkningsgrad for de ulike fremdriftssystemene vil gruppen beregne total virkningsgrad fra begynnelsen av energikjeden og fram t.o.m. propellene. Energien som går ut til instrumenter og AUV'er er ikke relevant i dette tilfellet. De elektriske motorene med girkasser og drivakslar, samt propellene, er identiske i alle energisystemene. Gruppen har som nevnt kontaktet flere firmaer for å få opplysninger om virkningsgraden til ulike komponenter, men har ikke fått noe svar. Intern veileder ved HSH har imidlertid opplyst at typisk virkningsgrad for elektrisk motor er 80-90 % og 95 % for drivaksel og girkasse. Gruppen velger derfor å benytte disse verdiene. I [9] oppgis det at en 20 kW børsteløs DC elektrisk motor produsert av Golden Motor Technology har en virkningsgrad på 90 %, så dette stemmer bra med opplysningen fra intern veileder. Virkningsgrad for propellene er i [3] oppgitt å være 65 %. Total virkningsgrad for det dieselektriske fremdriftssystemet ved bruk av BAT blir dermed:

$$\begin{aligned}
 \eta_{total,DE} &= \eta_{DM} \cdot \eta_G \cdot \eta_{AC/DC} \cdot \eta_{Li-ion} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{GK} \cdot \eta_{DA} \cdot \eta_P \\
 \eta_{total,DE} &= 0,44 \cdot 0,97 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \cdot 0,90 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,65 \\
 \eta_{total,DE} &\approx 0,17
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Den totale virkningsgraden er altså omtrent 17 %. Den kan i utgangspunktet virke noe lav, men det vil bli klarere når den sammenlignes med den totale virkningsgraden til de andre energisystemene i senere kapitler.

4.4. Totalvurdering

Dette kapittelet har vært en utgreiing av et dieselelektrisk energisystem med komponenter fastsatt av designerne [3,5,6] av fartøyet denne rapporten omhandler. Det har blitt gjennomgått først av energisystemene i denne rapporten, siden det er det energisystemet som er foreslått av designerne av fartøyet [3,5,6]. Det vil derfor bli brukt som sammenligningsgrunnlag når de andre alternativene gjennomgås i de påfølgende kapitler, og de ulike verdiene for masse, volum og energimengder fra dette systemet vil fungere som maksimum- og minimumsgrenser når det gjøres beregninger på de påfølgende energisystemene.

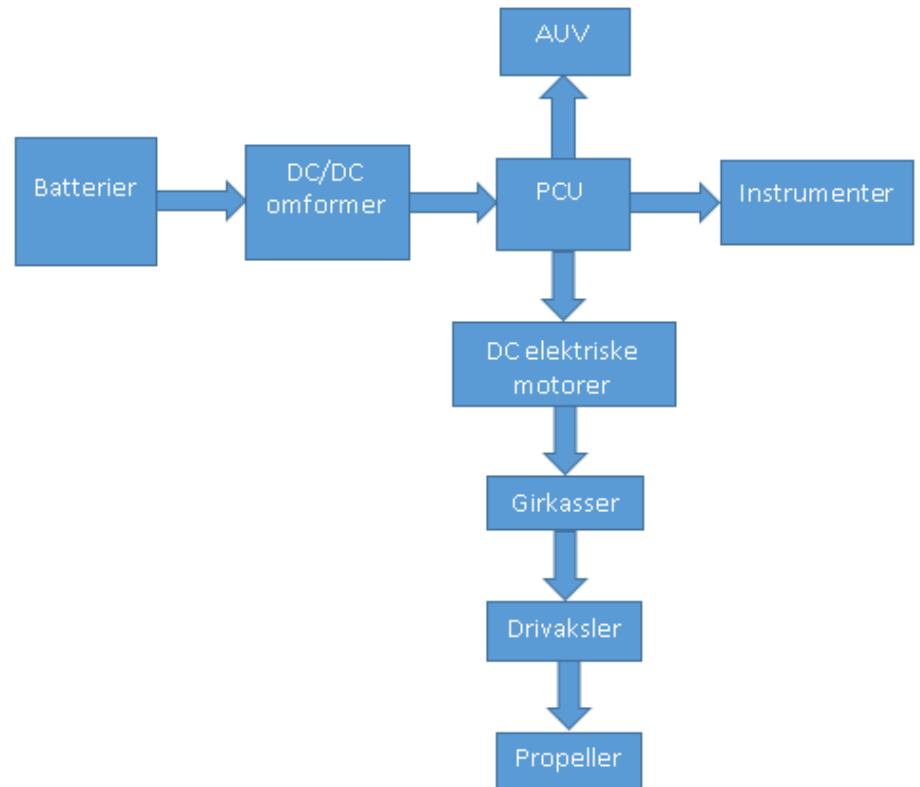
Rene dieselsystemer har vært utbredt veldig lenge, hovedsakelig fordi diesel er lett tilgjengelig og samtidig en av de billigste energikildene som fins. Noen av ulempene med rene dieselsystemer er imidlertid begrenset virkningsgrad og store, skadelige utslipp som bidrar både med klimagasser som CO₂, forsurende stoffer som NO_x og SO_x, samt utslipp av partikler i luften. Etterhvert ble dieselelektriske hybridsystem introdusert, og det er nå et godt utprøvd og vellykket energisystem som har blitt innført på en rekke fartøy i mange forskjellige størrelser. I dette systemet har man fremdeles en dieseldrevet forbrenningsmotor, men denne motoren virker her sammen med batterier, generator, omformer, PCU og elektrisk motor i et hybridsystem som er forklart i kapittel 4.2. Fordelene med et dieselelektrisk system i forhold til et rent dieselsystem er, som beskrevet i kapittel 4.2, hovedsakelig knyttet til reguleringstekniske forhold.

Det vil i de påfølgende kapitler bli gjennomgått og undersøkt flere andre alternativer til det dieselelektriske hybridsystemet, for å finne ut om det finnes alternativ som er mer gunstige på noen områder enn det dieselelektriske systemet foreslått av designerne av fartøyet [3,5,6,]. Det vil bli sammenlignet virkningsgrad, masse, volum, effekt på miljøet, etc., og det vil også bli kommentert økonomiske aspekter, selv om økonomien ikke er hovedfokuset i denne rapporten. Som nevnt er diesel en av de billigste energikildene som er å få tak i, så det dieselelektriske systemet vil sannsynligvis komme godt ut i en økonomisk vurdering. Men diesel er som kjent et fossilt brensel, så det vil sannsynligvis være andre energisystemer som kommer bedre ut fra et miljømessig synspunkt. Det vil også bli forsøkt å vurdere på en framtidsrettet måte for å komme frem til det energisystemet som har den mest lovende framtidsutsikten, ikke bare de neste par årene, men flere år frem i tid.

5. Utgreiing av helelektrisk (batteri) energisystem

5.1. Virkemåte

Helelektrisk energisystem vil si at fartøyet skal være drevet kun av energien i batteriene på fartøyet. Den elektriske energien strømmer fra batteriene i form av likestrøm (DC) gjennom en DC/DC omformer som sørger for at strømmen får rett spenning og polaritet. Strømmen fordeles av en PCU ut til instrumenter, AUV og de elektriske motorene. Disse motorene omdanner så den elektriske energien i strømmen til mekanisk energi, som overføres til propellene via girkasser og drivaksler. For at fartøyet skal ha samme rekkevidde og kapasitet som med det dieselelektriske hybridsystemet, må det være utstyrt med nok batterier til at energimengden man får ut av PCU'en i det helelektriske systemet, er den samme som den totale energimengden man får ut av det dieselelektriske systemet (4.10). Da trengs det naturligvis mange flere batterier enn i det dieselelektriske systemet. Det viktigste i utgreiingen av det helelektriske systemet blir følgelig å finne den batteritypen som er best egnet til fartøyet i denne rapporten, og deretter beregne hvor stor batterikapasitet det er plass til på fartøyet i forhold til masse og volum. Som nevnt tidligere er det ikke mulig å øke hverken masse eller volum på fartøyet, da dette vil virke negativt på stabilitet og virkningsgrad, slik at den totale massen av det helelektriske energisystemet ikke kan overskride den totale massen av det dieselelektriske hybridsystemet.



Figur 5.1: Flytskjema for energi i det helelektriske energisystemet.

5.2. Batteriteknologier til kjøretøy/fartøy

5.2.1. Generelt

Et batteri er en elektrokjemisk celle (galvanisk celle), og i denne cellen er det en positivt ladet elektrode (katode ved utladningsreaksjon), en negativt ladet elektrode (anode ved utladningsreaksjon), og disse skilles fra hverandre av en elektrolytt. Elektrolytten er en løsning

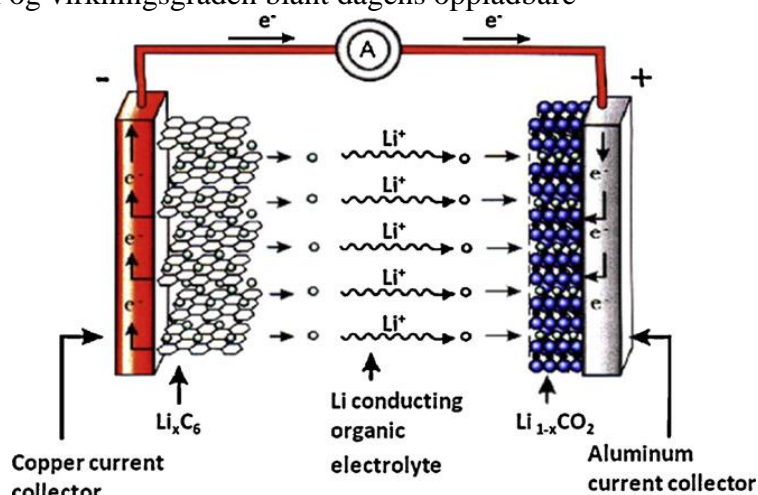
som kun tillater transport av ioner. Batteriet omdanner elektrokjemisk energi til elektrisk energi ved at løse elektroner genereres ved anoden, strømmer gjennom en ekstern krets til katoden og produserer elektrisk energi, mens ionene som ble dannet når elektronene rev seg løs, transporteres gjennom elektrolytten [11]. Hvis batteriet er oppladbart kan denne prosessen reverseres, dvs. at elektrisk energi tilføres for å sende elektronene tilbake samme vei. I denne prosessen blir anoden positiv og katoden negativ, og batteriet fylles opp med energi.

Batteriteknologi er et fagfelt hvor det drives mye forskning over hele verden. Det finnes mange forskjellige typer batteriteknologier, både gamle teknologier som har blitt forkastet, gamle teknologier som fortsatt brukes i forbedrede versjoner, nyere teknologier med stadige forbedringer, samt noen lovende teknologier som er så nye at de foreløpig bare er på laboratorium/prototype-stadiet. Det er fokus på forskjellige egenskaper for batterier avhengig av hvilket område batteriene skal brukes på. Når det gjelder elektriske kjøretøy/fartøy er energitetthet og spesifikk energi de viktigste egenskapene, naturligvis for å få mest mulig energi med lavest mulig masse og volum. Men det er også andre viktige egenskaper, f.eks. pålitelighet, levetid og ladeegenskaper. For tiden er det to forskjellige batteriteknologier som er de klart mest brukte innen elektriske kjøretøy [10,11]: Li-ion (litium-ion) batterier og Ni-MH (nikkel-metallhydrid) batterier. I dag brukes Li-ion mest i helelektriske kjøretøy, mens Ni-MH brukes mest i hybridkjøretøy [11]. Den mest interessante og lovende av teknologiene som fremdeles er på laboratorium/prototype-stadiet er Li-air (litium-luft) ifølge 14 internasjonale eksperter som vurderer forskjellige teknologier i [10]. Et veldig interessant alternativ for sjøfartøy, som USV'en i denne rapporten, er Li-H₂O batterier [18,19,20,21]. Disse 4 batteriteknologiene, Li-ion, Ni-MH, Li-air og Li-H₂O, vil bli gjennomgått i dette kapitlet.

5.2.2. Litium-ion batterier (Li-ion)

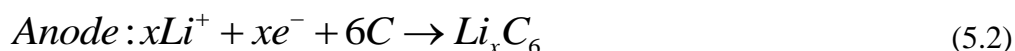
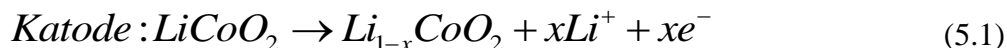
Li-ion batterier er de mest brukte batteriene i kjøretøyer som er helelektriske [11], dvs. at de drives kun av energien som lagres i batteriene i kjøretøyet. De har en cellespenning som ligger rundt 4 V [11], og de er relativt lette og kompakte i forhold til andre typer batterier. Li-ion batterier har en spesifikk energi på 118-250 Wh/kg, energitettheten er 200-400 Wh/liter, spesifikk effekt er 200-430 W/kg, og virkningsgraden er over 95 % [15]. Dette er den høyeste energitettheten, spesifikke energien og virkningsgraden blant dagens oppladbare batteriteknologier.

Et Li-ion batteri består av en anode av grafitt, f.eks. MCMB («Mesocarbon Microbeads»), en katode av et litium metalloksid (LiMO₂), f.eks. LiCoO₂, og en elektrolytt som består av en løsning av et litiumsalt, f.eks. LiPF₆, i et blandet organisk løsemiddel, f.eks. EC-DMC («Ethylene Carbonate-Dimethyl Carbonate»). Når energi tappes fra batteriet strømmer elektroner



Figur 5.2: Utladningsprosess i en celle i et Li-ion batteri [12].

gjennom en ekstern krets fra anoden til katoden, og litiumioner migrerer gjennom elektrolytten fra anoden til katoden. Når batteriet skal lades opp må det tilføres elektrisk energi, noe som sender elektronene og litiumionene tilbake til anoden gjennom henholdsvis den eksterne kretsen og elektrolytten. For tilfellet der katoden er LiCoO_2 er reaksjonene ved oppladning av batteriet som følger [11]:



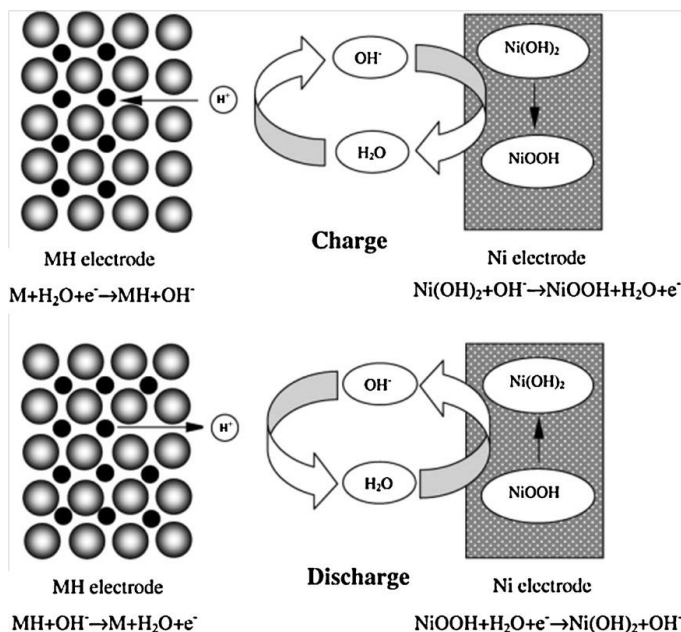
$$\text{hvor: } x \cong 0,5 \quad V_{\text{cell}} = 3,7\text{V}$$

Li-ion batterier revolusjonerte batterikapasiteten på begynnelsen av 1990-tallet, og var en av de største årsakene til eksplosjonen i bruken av personlige teknologiske varer som bærbare PC'er, mobiltelefoner, MP3-spillere, videokameraer, og senere nettbrett og smarttelefoner. Pga. den høye energitettheten til Li-ion batteriet kunne man begynne å ta med seg slike teknologiske anordninger hvor som helst, og lade opp batteriet i en hvilken som helst stikkontakt. Etter hvert har Li-ion batterier også blitt brukt mye mer i batteridrevne elektriske kjøretøy (BEV), mens i hybridkjøretøy (HEV) er det Ni-MH som dominerer og brukes i over 95 % av tilfellene [11]. Det er imidlertid veldig mye forskning over hele verden på Li-ion batterier, spesielt i forhold til kjøretøy, og [13] trekker fram bilindustrien som den største drivkraften i forhold til forbedring av Li-ion batterier. Det er ventet at 70 % av alle HEV'er, og 100 % av alle BEV'er, vil bruke Li-ion batterier om 10 år [13]. Li-ion batterier har som nevnt den høyeste energitettheten av alle oppladbare batterier. Andre fordeler med Li-ion batterier inkluderer lang levetid, høy virkningsgrad og lite vedlikehold. I tillegg vil det ikke lade seg så mye ut når det ikke blir brukt, slik som andre batterityper kan gjøre [14].

Det er imidlertid fremdeles mange utfordringer knyttet til Li-ion batterier. De har en mye høyere kostnad enn konkurrerende batterier, de koster f.eks. gjennomsnittlig 4 ganger mer enn Ni-MH batterier. Den høye kostnaden er imidlertid ventet å synke kraftig de neste årene pga. den enorme satsingen på forskning og utvikling av Li-ion batterier, i tillegg til at bruken av disse batteriene sprer seg utover mange områder [13]. Det spekuleres blant annet i at markedet for Li-ion batterier i kjøretøy vil eksplodere fra 1,5 milliarder USD i 2011 til over 50 milliarder USD i 2020 [11]. Andre utfordringer inkluderer temperaturkontroll og sikkerhet, batteriet eldes selv om det ikke brukes, en beskyttende sikring er nødvendig for å opprettholde konstant spenning, og det er utfordrende restriksjoner på transport av Li-ion batterier [14]. Områdene det fokuseres mest på innen forskning, utvikling og forbedring av Li-ion batterier er kjemien i anoden, katoden og elektrolytten. Nærmere bestemt er målet å skifte ut grafitt og LiCoO_2 i anoden og katoden med materialer som har både høyere kapasitet og lavere kostnad, i tillegg til å finne et tryggere og mer pålitelig elektrolyttsystem [12].

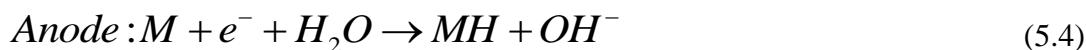
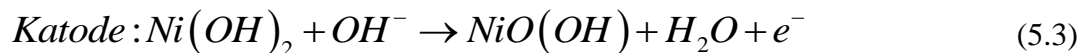
5.2.3. Nikkel-metallhydrid batterier (Ni-MH)

Ni-MH batterier er som nevnt i kapittel 5.2.2 den batteritypen som dominerer i hybridkjøretøy, og det drives fortsatt mye forskning på denne typen batterier, selv om det er ventet at Li-ion batterier vil være det dominerende oppladbare batteriet om 10 år. Den store fordelen med Ni-MH batterier i forhold til Li-ion batterier er sikkerheten. Ni-MH er et veldig sikkert og pålitelig batteri, med null rapporterte uønskede sikkerhetshendelser [11]. Den spesifikke energien er 70-95 Wh/kg, energitettheten er 180-220 Wh/liter, spesifikk effekt er 200-300 W/kg, og virkningsgraden er 70 % [15].



Figur 5.3: Elektrokjemiske reaksjoner ved lading og utlading av en celle i et Ni-MH batteri [11].

Komponentene i et Ni-MH batteri er en anode av en hydrogenabsorberende metallhydridlegering (MH), en katode av nikkelfhydroksid ($Ni(OH)_2$), og en kaliumhydroksid (KOH) elektrolytt. Reaksjonene i en celle i et Ni-MH batteri ved oppladning er [11]:



hvor «M» er en intermetallisk legering som er i stand til å danne en metallhydrid fase [11].

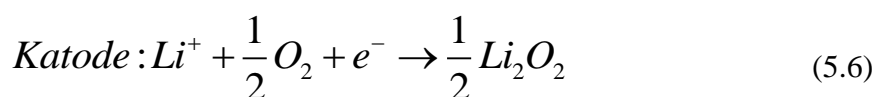
Det kan altså se ut som Ni-MH batteriet er underlegent Li-ion batteriet på de fleste områder, bortsett fra at det foreløpig er et sikrere og mer pålitelig batteri. Det er også en eldre og mer utprøvd teknologi, så det er lavere risiko ved å bruke et Ni-MH batteri.

5.2.4. Litium-luft batterier (Li-air)

Som nevnt i kapittel 5.2.1 utnevner 14 internasjonale eksperter Li-air batterier til den mest lovende batteriteknologien for fremtiden [10]. I [16] sies det at et slikt batteri i teorien kan ha en spesifikk energi på 3000 Wh/kg, altså godt over 10 ganger så høy som den spesifikke energien i de beste av dagens Li-ion batterier (250 Wh/kg [15]). Det er imidlertid mange og store utfordringer, både kjemiske og tekniske, å overkomme før denne verdien blir en realitet. I [17] spås det at Li-air batteriteknologien fortsatt vil være på forskningsstadiet i flere år fremover, men at potensialet for fremtiden er veldig stort.



Teknologien basert på batterier med en anode av metall, en elektrolytt, og en katode av oksygen har vært forsket på i mange år allerede. Potensialet til energitetthet og spesifikk energi er høyere med en slik oppbygning enn i tradisjonelle batterityper, fordi katodematerialet er lett tilgjengelig fra luften [16]. I begynnelsen ble det hovedsakelig benyttet anoder av sink, men det begynte etter hvert å forskes på anoder av litium siden den spesifikke kapasiteten til litium (3842 mAh/g [16]) er klart høyere enn for sink (815 mAh/g [16]). Det er imidlertid ikke gunstig å bruke en vannbasert elektrolytt sammen med en litumanode, siden elektrolytten brytes ned og litumanoden korroderer. Det begynte derfor å forskes på andre elektrolyttmaterialer som ikke er vannbaserte. Det første systemet med en slik elektrolytt ble presentert i 1996 [16]. Reaksjonene i et Li-air batteri ved utladning er [16]:



$Li^{(s)}$ indikerer at litiummetallet i anodereaksjonen er fast stoff («Solid»).

Som sagt er det mange utfordringer som må løses før den teoretiske kapasiteten i disse batteriene nås. [16] oppgir den høyeste spesifikke energien som er oppnådd med et Li-air batteri i laboratorium til å være 362 Wh/kg, altså bare litt over en tidel av den teoretiske kapasiteten. Denne verdien (362 Wh/kg [16]) er allikevel en del mer enn verdien på de beste Li-ion batteriene (250 Wh/kg [15]), men det er viktig å huske på at det er stor forskjell på verdier som oppnås i et laboratorium og praktiske verdier i virkelig bruk. Li-air batteriene er følgelig ikke godt nok utviklet til å utkonkurrere Li-ion batteriene ennå. Derfor vil det ikke gås i detalj på disse batteriene i denne rapporten, men det kan nevnes at områdene det må forskes mer på med Li-air batterier er blant annet [16]:

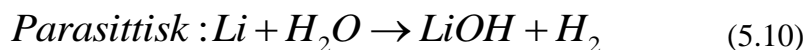
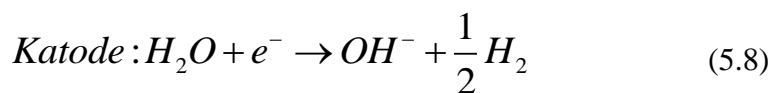
- De elektrokjemiske prosessene i tofaseovergangene ved anoden og katoden
- Forbedring av katodekatalysatoren
- Utvikling av luftkatode med hierarkisk porestruktur med flere nivåer
- Forbedring av elektrolyttssystemet
- Utvikling av en mekanisme som filtrerer ut H_2O og CO_2 fra den innkommende luften
- Utvikling av «Flow»-type Li-air batteri for økt kapasitet i kjøretøy

5.2.5. Litium-vann batterier (Li- H_2O)

Litium-vann batterier, også kalt litium-sjøvann batterier og Li- H_2O batterier, har et enormt potensial, spesielt til bruk på sjøfartøyer der tilgangen på vann er uendelig. Det er også et veldig miljøvennlig batteri [20]. Den teoretiske spesifikke energien til slike batterier er helt opp mot 11 kWh/kg [19,20], altså 44 ganger så høyt som de beste Li-ion batteriene. Utviklingen har imidlertid ikke kommet langt nok til at dette er realistisk ennå. I [18] beskrives konstruksjonen av en prototype til et Li- H_2O batteri hvor det oppnås en spesifikk energi på 2660 Wh/kg, men dette er også langt ifra å være kommersielt tilgjengelig. Det finnes imidlertid 2 amerikanske firmaer som begge vil gjøre Li- H_2O batterier kommersielt tilgjengelige i nærmeste framtid. Teledyne Energy Systems Inc. har 3 forskjellige Li- H_2O

batterier tilgjengelig, der det beste har en spesifikk energi på 1,2 kWh/kg og energitetthet på 1 kWh/liter [21], mens Polyplus Battery Company vil kommersialisere Li-H₂O batterier med spesifikk energi opp til 1,5 kWh/kg og energitetthet opp til 1,5 kWh/liter [20].

Li-H₂O batterier består av en anode av litium som forbrukes, en elektrolytt, og katoden er ganske enkelt vann/sjøvann som strømmer gjennom batteriet når fartøyet/farkosten glir gjennom sjøen/vannet. Elektrolytten kan være mye forskjellig, på dette feltet forskes det fortsatt mye for å finne den beste løsningen. Elektrisk energi produseres altså når litiumanoden forbrukes og sjøvann strømmer inn på katoden. Et Li-H₂O batteri kan derfor karakteriseres som en «semibrenselcelle», siden det ikke trenger å lades opp med elektrisk energi fra en ekstern kilde. Men litiumanoden må naturligvis erstattes etter hvert som den brukes opp. Reaksjonene når det tas elektrisk energi ut av batteriet er [18]:



Den parasittiske reaksjonen er et av problemområdene som det forskes på. Denne reaksjonen er eksoterm, gir ingen elektrisk energi, og den passiverer eller konsumerer litiumanoden, og er følgelig en reaksjon som må kontrolleres eller, ideelt sett, fjernes helt. Den største utfordringen med å konstruere et praktisk Li- H₂O batteri er å utvikle en separator som effektivt isolerer Li-metallet fra vannet, noe som vil kontrollere den parasittiske reaksjonen (5.10), samtidig som den lar Li-ioner passere fra anoden til elektrolytten [18].

5.3. Valg av batteritype

Som nevnt i foregående delkapitler er det Li-ion og Ni-MH batterier som er de mest brukte i henholdsvis helelektriske kjøretøy og hybridkjøretøy i skrivende stund. Li-air batterier er imidlertid en meget lovende teknologi for fremtiden, og for sjøgående fartøy er Li- H₂O enda mer lovende teknologi. Det er allerede 2 amerikanske firmaer som er i prosessen med å kommersialisere de første Li- H₂O batteriene, hvor det beste fra Polyplus Battery Company har en spesifikk energi som er 6 ganger høyere enn det som er tilgjengelig i de beste Li-ion batteriene, og over 15 ganger så høy som i det beste Ni-MH batteriet. Energitettheten i dette Li- H₂O batteriet i forhold til Li-ion batterier og Ni-MH batterier er henholdsvis nesten 4 ganger så høy og nesten 7 ganger så høy. Det antas i denne rapporten at BAT er tilgjengelig til alle de forskjellige energisystemene som vurderes, følgelig antas det at det nevnte Li- H₂O batteriet fra Polyplus Battery Company er tilgjengelig, om ikke i skrivende stund så i alle fall i nærmeste fremtid. Siden denne rapporten tar sikte på å være fremtidsrettet, både med tanke på bruk av ny teknologi og effekt på miljøet, velges Li- H₂O batteriet fra Polyplus Battery

Company, med spesifikk energi på 1,5 kWh/kg og energitetthet på 1,5 kWh/liter, som batteritype i det helelektriske batteridrevne energisystemet som utgreies i dette kapittelet.

5.4. Beregninger

5.4.1. Tilgjengelig energimengde

I kapittel 4.3.7 beregnes den totale massen og volumet til de komponentene i det dielelektriske hybridsystemet som kan fjernes for å gjøre plass til komponentene i de andre energisystemene. Massen ble beregnet til 2156 kg (4.11) og volumet ble beregnet til 1,97 m³ (4.12). Disse verdiene kan nå brukes til å beregne en første indikasjon på hvor stor energimengde som blir tilgjengelig hvis disse komponentene erstattes med de valgte Li-H₂O batteriene i en slik mengde at de ikke overskrider grenser for masse og/eller volum satt av det dielelektriske systemet. Det vil selvfølgelig ikke gi en helt nøyaktig verdi, det er mange faktorer som kan spille inn her, men det gir en god pekepinn på om det vil være mulig å oppnå samme rekkevidden med et helelektrisk energisystem som med det dielelektriske hybridsystemet foreslått av designerne [3,5,6]. Når det gjelder virkningsgraden for Li-H₂O batteriene er det ingen informasjon tilgjengelig fra produsentene av de valgte batteriene, og gruppen har ikke fått svar på henvendelsen til disse selskapene. Som det blir forklart i kapittel 5.2.5 lades ikke disse batteriene opp med elektrisk energi fra en ekstern kilde. Den elektriske energien man får ut av batteriet produseres ved at litiummetall forbrukes og sjøvann strømmer inn på katoden. For å finne virkningsgrad for dette batteriet må man altså vite nøyaktig hvor mye litiummetall som forbrukes for hver enhet med elektrisk energi man får ut av batteriet. I [37] beskrives forskning som er utført på dette området, og her oppgis det en virkningsgrad opp mot 100 % de første 10 timene. Etter dette går virkningsgraden litt nedover, men de estimerer allikevel en total virkningsgrad på 90 %. Dette er den beste kilden gruppen har funnet om den aktuelle teknologien, og det vil følgelig bli benyttet en virkningsgrad på 90 % [37] for Li-H₂O batteriene i denne rapporten. Energimengde i forhold til massebegrensning (4.11) blir dermed:

$$\begin{aligned}
 E_{masse} &= E_{spesifikk} \cdot m_{DE} \cdot \eta_{Li-H_2O} \\
 E_{masse} &= 1,5 \text{ kWh/kg} \cdot 2156 \text{ kg} \cdot 0,90 \\
 \underline{E_{masse}} &\approx 2911 \text{ kWh}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

Energimengde i forhold til volumbegrensning (4.12) blir:

$$\begin{aligned}
 E_{volum} &= E_{tetthet} \cdot V_{DE} \cdot \eta_{Li-H_2O} \\
 E_{volum} &= 1,5 \text{ kWh/liter} \cdot 1970 \text{ liter} \cdot 0,90 \\
 \underline{E_{volum}} &\approx 2660 \text{ kWh}
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

Det er altså volumet som blir den begrensende faktoren for det helelektriske energisystemet. Ved bruk av det nye Li- H₂O batteriet til Polyplus Battery Company er det altså teoretisk mulig å få en tilgjengelig energimengde ut av batteriene pr. oppdrag på 2660 kWh (5.12). Det er imidlertid energimengden man får ut av PCU'en pr. oppdrag som skal sammenlignes med energimengden ut av PCU'en i det dieselelektriske systemet (4.10), og denne energimengden er også avhengig av virkningsgradene til DC/DC omformer og PCU. Disse virkningsgradene er diskutert i kapittel 4.3.6, og verdiene som ble brukt er 83 % for DC/DC omformer og 98 % for PCU. Total tilgjengelig energimengde ut av PCU pr. oppdrag i det helelektriske energisystemet blir da:

$$\begin{aligned}
 E_{ut, BE} &= E_{volum} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU} \\
 E_{ut, BE} &= 2660 \text{ kWh} \cdot 0,83 \cdot 0,98 \\
 \underline{E_{ut, BE}} &\approx \underline{2164 \text{ kWh}}
 \end{aligned}
 \tag{5.13}$$

Den totale energimengden som potensielt kan nyttiggjøres i det helelektriske systemet pr. oppdrag er altså 2164 kWh (5.13).

5.4.2. Total virkningsgrad for helelektrisk fremdriftssystem

Ved å benytte verdiene som er funnet for virkningsgrad til de forskjellige komponentene blir den totale virkningsgraden til det helelektriske fremdriftssystemet:

$$\begin{aligned}
 \eta_{total, BE} &= \eta_{Li-H_2O} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{GK} \cdot \eta_{DA} \cdot \eta_P \\
 \eta_{total, BE} &= 0,90 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \cdot 0,90 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,65 \\
 \underline{\eta_{total, BE}} &\approx \underline{0,39}
 \end{aligned}
 \tag{5.14}$$

Den totale virkningsgraden for det helelektriske fremdriftssystemet er altså omtrent 39 %. Dette systemet har altså i teorien en mye høyere virkningsgrad enn det dieselelektriske systemet med sine 17 % (4.13).

5.5. Totalvurdering

Ved bruk av Li- H₂O batteriteknologi, som ventes å bli kommersialisert i nærmeste framtid [20,21], er det teoretisk mulig å få en tilgjengelig energimengde pr. oppdrag (5.13) i det helelektriske energisystemet som er omtrent 2,5 ganger så høy som den tilgjengelige energimengden i det dieselelektriske energisystemet (4.10). Det må allikevel understrekes at dette er teoretiske verdier, og at det etter all sannsynlighet finnes flere ukjente faktorer som har potensiale til å påvirke disse verdiene. Det er allikevel en sterk indikasjon på at tilgang på den nevnte Li- H₂O batteriteknologien, som er i ferd med å bli kommersialisert, vil øke rekkevidden til fartøyet som denne rapporten omhandler betraktelig. Det vil sannsynligvis også være et mer miljøvennlig alternativ enn det dieselelektriske systemet, selv om det



foreløpig ikke foreligger en livsløpsanalyse for batteriene. Men det er selvfølgelig ikke bare positive sider med det helelektriske alternativet. Siden Li- H₂O batteriteknologien i aller høyeste grad er en ny teknologi i praktisk sammenheng, og følgelig lite utprøvd, vil det være mange usikkerhetsmomenter ved bruk av denne teknologien. De fleste nye teknologier må gjennom en fase med en del barnesykdommer, så det foreslåtte helelektriske systemet vil etter all sannsynlighet være et mindre pålitelig energisystem enn det dieselektriske. Det vil ganske sikkert også være mer kostbart, siden selve batteriene trolig vil være ganske dyre pga. at det er en såpass ny teknologi, i tillegg til at lavere pålitelighet i de fleste tilfeller gir økte vedlikeholdskostnader. Den totale kostnaden vil sannsynligvis være større for det helelektriske alternativet, uten at det er gjort noen grundig økonomisk analyse. Ifølge den første utgreiingen og vurderingen i denne rapporten er altså fordelene med det helelektriske energisystemet nyere, mer framtidsrettet og mer miljøvennlig teknologi, i tillegg til en mye større rekkevidde for fartøyet. Det har også en høyere total virkningsgrad enn det dieselektriske systemet. Ulempene er økte kostnader og lavere pålitelighet.

Det bør for øvrig poengteres, som nevnt i kapittel 2.6, at de valgte Li-H₂O batteriene er en potensiell forbedring for energisystemet på AUV'ene som USV'en skal bistå, ikke bare for selve USV'en. Det vil naturligvis være de samme fordelene med økt rekkevidde, virkningsgrad og operativ tid for en AUV, som for en USV. Hvis man da ser på hele «Survey» systemet som en helhet, og man øker rekkevidde og virkningsgrad for alle komponentene i systemet, både USV og AUV'er, kan man følgelig potensielt øke virkningsgraden og rekkevidden til hele systemet ved å bytte ut tradisjonell batteriteknologi med ny Li-H₂O batteriteknologi. Det kan også da argumenteres for at hvis virkningsgraden til systemet som en helhet økes nok, så kan dette i teorien kompensere for de økte kostnadene som følger med nyere batteriteknologi og lavere pålitelighet.

Når det gjelder ballastsystemet som ble forklart i kapittel 4.1, trengs det ikke ballastvann for å kompensere for drivstoffbruk i det helelektriske energisystemet, siden det ikke benyttes drivstoff i dette systemet. Ballastsystemet må allikevel beholdes, siden det også brukes for å kompensere for massen av AUV'er som løftes opp av USV'en, som nevnt i kapittel 4.1.

6. Utgreiing av brenselcelle/batteri hybridsystem

6.1. Generelt

En av de mest lovende energikildene for fremtiden er brenselceller. Det finnes en mengde forskjellige brenselcelleteknologier, men hovedprinsippet er det samme i alle typene. Brenselcellen er en elektrokjemisk anordning som omdanner den kjemiske energien i et brensel direkte til elektrisk energi. Dette gjøres i en prosess som kan kalles revers elektrolyse. For å forklare denne prosessen, tar vi utgangspunkt i PEMFC-teknologien (Proton Exchange Membrane Fuel Cell/Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell). PEMFC er den brenselcellen som er klart best egnet til transportformål i den skalaen som denne rapporten omhandler. Det er en av de mest utviklede brenselcellene, og det gjøres veldig mye god forskning over hele verden for å forbedre denne teknologien og gjøre den mer konkurransedyktig fra et økonomisk synspunkt. Som brensel tar vi utgangspunkt i hydrogen, som er det mest aktuelle brenselet for PEMFC [1].

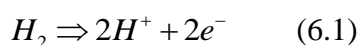
En brenselcelle har 3 aktive komponenter:

- En elektrode hvor brenselet strømmer inn, dette er anoden
- En elektrode hvor oksidanten strømmer inn, dette er katoden
- En elektrolytt som ligger mellom disse to elektrodene

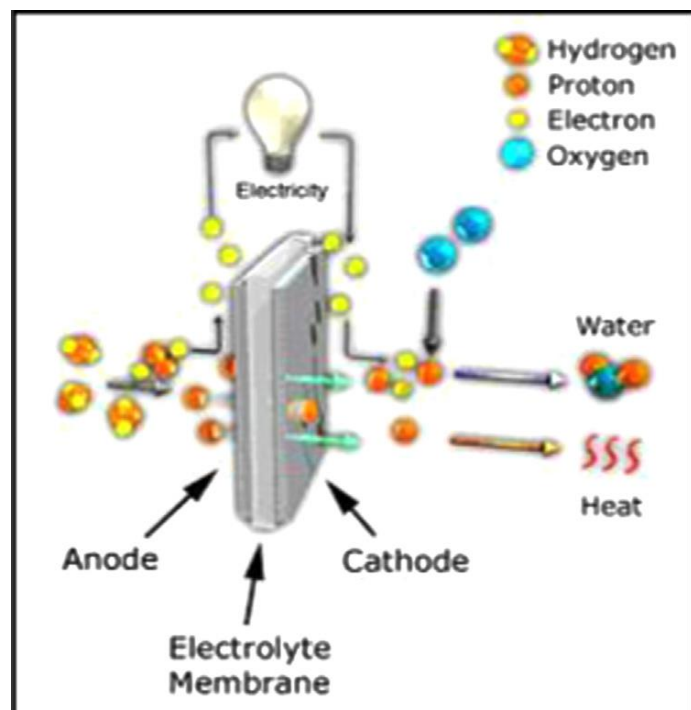
Elektrodene består av et porøst materiale som er dekket med et tynt lag av en katalysator. For en PEMFC er dette som regel grafitt dekket med platina. Elektrolytten i en PEMFC er en polymer elektrolyttmembran av et stoff som kalles nafion [1].

6.2. Virkemåte for brenselceller

Molekylær hydrogen (H₂) fungerer som brensel og strømmer inn på anoden. Her skjer det en elektrokjemisk reaksjon som oksiderer hydrogenet slik at det produseres positivt ladede hydrogenioner i tillegg til «løse» elektroner, ifølge ligningen:

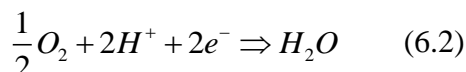


Hydrogenionene migrerer gjennom den sure elektrolytten, samtidig som elektronene tvinges gjennom en ekstern krets hvor de genererer elektrisk strøm. Hydrogenionene og elektronene møtes så igjen ved katoden

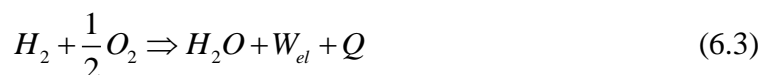


Figur 6.1: Enkel prinsippskisse for PEMFC [1].

hvor det tilføres oksygen (O_2). Disse 3 komponentene reagerer her og danner vann (H_2O), ifølge ligningen:



Den totale reaksjonen i brenselcellen, illustrert i figur 1, produserer vann, elektrisk arbeid og litt overskuddsvarme, ifølge ligningen:



Biproduktene (vann og varme) som produseres må kontinuerlig fjernes for å opprettholde en isothermisk reaksjon for ideell generering av elektrisk energi. Følgelig er håndtering av vann og varme nøkkelaspekter i design og operasjon av en brenselcelle, og det har stor påvirkning på cellens virkningsgrad [1].

6.3. Fordeler og utfordringer med brenselceller

6.3.1. Generelt

Brenselceller er en veldig lovende energikilde for fremtiden, og den har vært brukt i forskjellige former til utvalgte formål i mange år allerede. NASA har brukt alkaliske brenselceller som strømforsyning til romskip, personbiler som drives av brenselceller er produsert mm. Det trengs allikevel mer forskning og utvikling innen PEMFC-teknologien, før disse brenselcellene kan konkurrere økonomisk med f.eks. den tradisjonelle bensin- eller dieseldrevne forbrenningsmotoren. Men økonomi er bare én del av det totale bildet, og det finnes mange fordeler med PEMFC i forhold til forbrenningsmotorer drevet av fossile brensler, eller andre energikilder som kan være aktuelle til det gitte formål. Her følger en beskrivelse av de viktigste fordelene og utfordringene med brenselceller, fordelene først (kap. 6.3.2-6.3.6), deretter utfordringene (kap. 6.3.7-6.3.12), med ekstra fokus på PEMFC:

6.3.2. Reduserte skadelige utslipp

Produktene fra en brenselcelle av typen PEMFC er som nevnt vann, elektrisitet og overskuddsvarme. Det er med andre ord ingen skadelige utslipp fra en slik brenselcelle. Men dette er imidlertid kun hvis man ser utelukkende på prosessen i selve brenselcellen. For å få et realistisk bilde av den totale mengden skadelige utslipp ved bruk av PEMFC, må vi også se på prosessen som brukes til å danne hydrogenet som brukes som brensel i en PEMFC. Man må gjøre en LCA («Life Cycle Assessment»), altså en analyse av hele livsløpet til prosessen som benyttes til å produsere hydrogen. Dette innebærer å se på alle faser; fra bygging av installasjonen som skal produsere hydrogen, til selve produksjonen, transport av ferdig produkt, og selve bruken av produktet [2]. Det er veldig mange forskjellige prosesser som kan benyttes, og de forskjellige prosessene har også veldig forskjellige mengder av skadelige

utslipp. Hvis man benytter hydrogen fra de prosessene med mest skadelige utslipp i brenselcellen, vil dette faktisk resultere i at bruken av brenselcelle gir høyere totale skadelige utslipp enn bruken av en tradisjonell forbrenningsmotor [1]. Følgelig er man nødt til å bruke hydrogen som er produsert i en prosess med minst mulig skadelige utslipp for at fordelene med reduserte skadelige utslipp faktisk skal gjelde for den aktuelle brenselcellen. I tillegg er det betydelige utslipp knyttet til produksjonen av brenselceller, og disse må også tas med i den totale vurderingen.

Når hydrogen produseres ved hjelp av “reforming”, dvs. at damp ved høy temperatur reagerer med et fossilt brensel, som oftest metan (CH_4), vil produktet alltid være forurenset med CO_x , og det vil også gjøre at brenselcellens levetid og pålitelighet går ned hvis dette blir benyttet som brensel [1]. I tillegg kommer som kjent CO_x inn under skadelige utslipp. Dessverre er det denne metoden som brukes til å produsere mesteparten av hydrogenet som brukes i verdens industri [2].

Den mest miljøvennlige måten å produsere hydrogen på er ved elektrolyse av vann. Hydrogen produsert ved elektrolyse er også helt rent, og fungerer derfor bedre som brensel i en PEMFC siden dette øker levetiden og påliteligheten til brenselcellen [1]. Det finnes flere forskjellige måter å utføre elektrolyse av vann, men grunnprinsippet er det samme: Vann (H_2O) splittes til oksygen (O_2) og hydrogen (H_2) ved å tilføre elektrisk energi. Det er hovedsakelig 3 forskjellige typer elektrolyseanordninger: alkaliske, PEM (Polymer Electrolyte Membrane) og høytemperaturs «Solid Oxide» [2]. PEM er naturligvis motstykke til PEMFC, det er den samme reaksjonen i begge anordningene, bare i motsatt rekkefølge. Det viktigste å se på i forhold til elektrolyse er hvor den elektriske energien kommer fra. Hvis den kommer fra forbrenning av fossilt brensel, er det ikke spesielt miljøvennlig. Hvis den derimot kommer fra fornybar energi (vindkraft, solkraft, vannkraft etc.) vil det være en mye mer miljøvennlig prosess og de skadelige utslippene minimeres [2].

En brenselcelle kan altså være mye mer miljøvennlig enn en forbrenningsmotor med fossilt brensel, men den trenger nødvendigvis ikke være det. For å avgjøre om en brenselcelle har mindre skadelige utslipp enn en alternativ energikilde, må en altså se på hele livsløpet til brenselcellen og til brenselet den bruker. I tilfellet som denne rapporten omhandler måtte en da fått brenselet (hydrogen) til brenselcellen fra en produsent som brukte elektrolyse av vann drevet av f.eks. vindkraft til å framstille hydrogen for å være helt sikker på at brenselcellen var mer miljøvennlig enn en dieselgenerator (som brukes i [3]). Dette er foreløpig en lite utbredt metode [1]. I tillegg måtte en regnet med utslippene fra produksjonen av brenselcellene. Det er derfor ikke sikkert at PEMFC ville vært et mer miljøvennlig alternativ enn dieselgenerator, i alle fall ikke med dagens teknologi og slik verdens hydrogenproduksjon er i dag. Det er allikevel en mer miljømessig lovende teknologi, ettersom det kommer til å produseres mer og mer hydrogen med miljøvennlige metoder i årene som kommer.

6.3.3. Høy virkningsgrad

Brenselceller har generelt sett høy virkningsgrad sammenlignet med andre energiomdanningsmetoder. Virkningsgraden til en PEMFC ligger på 40-60% [1], og det forskes kontinuerlig for å forbedre denne. Denne rapporten omhandler et fartøy (USV) med et energibehov på 50 kW [6]. Dette er sammenlignbart med en personbil drevet av PEMFC (f.eks. Honda FCX Clarity), og i [1] opplyses det at virkningsgraden til en personbil drevet av brenselcelle (PEMFC) er nesten dobbelt så høy som virkningsgraden til en personbil drevet av

en forbrenningsmotor. Man kan følgelig anta at virkningsgraden til fartøyet som denne rapporten omhandler også ville økt ved å bruke PEMFC i stedet for dieselgenerator.

6.3.4. Modularitet

Brenselceller har en modulær oppbygning. Det er raskt og enkelt å skifte ut både enkelte celler og hele stabler. Dette gjør brenselceller fleksible, og virkningsgraden påvirkes også lite av påbygging eller fjerning av celler eller stabler av celler [1]. Dette er aller mest fordelaktig når det er snakk om virkelig store brenselceller i kraftverk, store skip, etc., men det er definitivt også en fordel i denne rapportens tilfelle. Den modulære oppbygningen til en PEMFC ville forhåpentligvis kuttet ned på tidsbruk og kompleksitet i reparasjoner/utskiftninger.

6.3.5. Reagerer raskt på belastninger

Brenselceller reagerer som regel veldig raskt på belastninger og forandringer i disse. Det er hovedsakelig pga. den raske naturen til de elektrokjemiske reaksjonene inne i en brenselcelle [1]. Dette er selvfølgelig en fordel i et hvilket som helst drivsystem, og er følgelig også det for drivsystemet i denne rapporten.

6.3.6. Statisk natur

En brenselcelle er som nevnt en elektrokjemisk anordning. Dette gjør at den har veldig få dynamiske deler, og følgelig genererer den veldig lite vibrasjoner og støy. Det gjør også design, produksjon, sammenstilling, operasjon og analyse av brenselceller mye enklere enn de er på en forbrenningsmotor. I tillegg gjør mangelen på dynamiske deler at vedlikeholdskravene er lavere for brenselceller enn de er for forbrenningsmotorer [1]. I denne rapportens tilfelle kan dette kutte ned på tidsbruk og kostnader i forhold til vedlikehold av fartøyets drivsystem, og mindre vibrasjoner og støy er definitivt en fordel i forhold til dyr- og planteliv i sjøen.

6.3.7. Høy kostnad

Brenselceller er mye dyrere enn mange av energiteknologiene de konkurrerer mot. For at brenselceller skal komme seg inn på energimarkedet for fullt, blir det av eksperter estimert at kostnaden pr. avgitt kW må ned til en tidel av det den er nå. Det er flere grunner til den høye kostnaden, men de 3 viktigste er: avhengigheten av platinabaserte katalysatorer (platina er et dyrt stoff), vanskelige produksjonsteknikker for membranene, og belegg- og platematerialet i de bipolare platene. Det er imidlertid ventet at kostnadene vil synke hvis en starter med masseproduksjon av brenselceller siden produksjonen og sammenstillingen av brenselceller generelt er mindre krevende enn de er for f.eks. forbrenningsmotorer. Den høye kostnaden i dagens situasjon kan allikevel se ut som en utfordring for fartøyet i denne rapporten.

6.3.8. Kort levetid

Levetiden til brenselceller er foreløpig ikke god nok i forhold til konkurrerende teknologier. Den nåværende levetiden bør økes 5 ganger for at brenselceller skal bli konkurransedyktige [1]. Det viktigste her blir videre forskning for å forbedre brenselcellene på flere områder, bl.a. gjøre dem mindre følsomme for urenheter i luft og brensel. I forhold til fartøyet i denne rapporten er den kortere levetiden en ulempe. Hvis komponentene, eller eventuelt hele brenselcellen, må skiftes ut hyppigere enn på alternative energiteknologier, kan dette fort gi økte kostnader, spesielt siden brenselcellen og mange av dens komponenter er dyrere i innkjøp enn komponentene til f.eks. en forbrenningsmotor.

6.3.9. Hydrogen infrastruktur

En stor ulempe i dagens hydrogenproduksjon er at 96% av hydrogenet som produseres i verden kommer fra fossile brenslers [1]. For det første er ikke dette gunstig fra et økonomisk synspunkt, da kostnaden av energi som kommer fra hydrogen produsert fra fossile brenslers er høyere enn kostnaden ville vært hvis de fossile brenslene ble brukt direkte. For det andre er det heller ikke gunstig fra et miljømessig synspunkt, da utslippene ofte vil bli høyere enn ved direkte bruk av fossile brenslers. Det må derfor fokuseres på hydrogen produsert ved bruk av fornybar energi, siden dette er det eneste alternativet som kan gjøre hydrogen til et bedre alternativ enn fossile brenslers både fra et økonomisk og et miljømessig synspunkt. En annen utfordring er lagring av hydrogen. Hydrogen er en veldig lett gass og kan derfor fort sive ut av en vanlig beholder, og siden hydrogen også er en lett antenkelig gass kan dette fort resultere i farlige situasjoner. Det kreves derfor lagringsteknologi som kan lagre hydrogen på en risikofri måte, samtidig som energitettheten må være høy nok. Det sikreste alternativet med høyest virkningsgrad er metall- og kjemiske hydrid teknologier [1], men dette er et område hvor det trengs mer forskning og utvikling for å senke kostnader og forbedre egenskaper. For tilfellet i denne rapporten kan de nevnte utfordringene resultere i at det blir dyrere å skaffe hydrogen som er gunstig fra et miljømessig synspunkt, samt at det kan bli vanskelig å få lagret nok hydrogengass på fartøyet med dagens lagringsteknologi. Det utføres imidlertid mye forskning for å forbedre denne lagringsteknologien.

6.3.10. Vannbalanse

Vannbalansen i en PEMFC er en funksjon av både inn- og utstrøm, vann som dannes i den katodiske reaksjonen, samt vann som migrerer mellom komponentene. Det er en balanse som det er veldig vanskelig å styre, og effekten av enten for mye eller for lite vann kan være veldig ødeleggende for komponentene, levetiden og effekten til en PEMFC. Ideelt sett skal vannbalansen være slik at membranen holdes godt hydrert uten at det samler seg vann som kan blokkere deler av prosessen i cellen. Når vannbalansen er dårlig er de potensielle problemene mange: overhydrering av membranen, vann som samles i porer og kanaler i gassdiffusjonslaget, uttørking av membranen, overflødig vann som fryser inne i cellen, etc. Dette er et område hvor det trengs mye forskning for å optimalisere design av komponenter, metoder for fjerning av overflødig vann, og membran- og elektrodematerialer slik at

virkningsgraden og spesielt levetiden til PEMFC forbedres [1]. Dette er veldig relevant for fartøyet i denne rapporten, siden det er nettopp PEMFC som er best egnet av de ulike brenselcelletypene til bruk i et slikt fartøy. Alle de nevnte problemene med vannbalansen kan følgelig påvirke en eventuell PEMFC i dette fartøyet, og dermed senke virkningsgraden og levetiden, og videre øke kostnader ved bruk av PEMFC. Det ville derfor vært fordelaktig med mer utvikling på dette området før en PEMFC blir installert på fartøyet.

6.3.11. Tilleggsutstyr

Brenselceller trenger generelt mye tilleggsutstyr for å fungere optimalt, og mye av dette tilleggsutstyret trenger energi. Hvis man inkluderer energien som går til å drive luftkompressorer, kjølepumper, hydrogen sirkulasjonspumper, etc. i beregningen av virkningsgraden, vil virkningsgraden til systemet bli lavere enn virkningsgraden til selve brenselcellen [1]. Dette gjelder i større grad systemer med store, tunge brenselceller, og det er følgelig ikke en like stor ulempe for en PEMFC av den størrelsen som trengs i tilfellet som denne rapporten omhandler.

6.3.12. Koder, standarder, sikkerhet og holdning i befolkningen

Det eksisterer ennå ingen internasjonalt aksepterte koder og standarder hverken for hydrogensystemer generelt eller for brenselcellesystemer. Det er heller ikke veldig utbredt kunnskap om hydrogen som brensel eller brenselceller blant politikere, forretningsledere eller i befolkningen generelt. For at man skal lykkes med at hydrogen og brenselceller skal stå for en stor del av verdens energi, må det innføres de nevnte koder og standarder, og kunnskap og opplysning må opp på et høyere nivå, slik at sikkerheten er ivaretatt [1]. Dette er en utfordring for alle typer brenselceller og teknologier der det trengs jevn tilgang på hydrogen, og er det likeså for en eventuell PEMFC på fartøyet i denne rapporten.

6.4. Beregninger

6.4.1. Nødvendig energimengde i brensel

I kapittel 4.3.6 ble energimengden som de forskjellige energisystemene minst må levere for at fartøyet skal ha den samme rekkevidden som det har med det dieselelektriske systemet beregnet til 869 kWh (4.10). Dette er altså minstekravet for total energimengde ut av PCU pr. oppdrag fra brenselcelle/batteri hybridsystemet. Brenselceller av typen PEMFC hvor energien kommer fra hydrogen produsert en annen plass enn på selve fartøyet, har for tiden en virkningsgrad på 40-60 % [1]. Hvis man antar at man har tilgang på BAT, får man dermed en virkningsgrad på 60 %. Virkningsgraden til DC/DC omformer og PCU er funnet i kapittel 4.3.6. For at brenselcellen alene skal levere den totale energimengden (4.10) må energimengden i brenselet (H_2) være:

$$E_{imm,FC} = \frac{E_{ut,DE}}{\eta_{FC} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU}} = \frac{869 \text{ kWh}}{0,60 \cdot 0,83 \cdot 0,98} \approx \underline{1781 \text{ kWh}} \quad (6.4)$$

6.4.2. Masse og volum av brensel

Hvis de beregnede 1781 kWh (6.4) skal komme fra brenselet alene, i dette tilfellet hydrogen, må masse og volum av en slik mengde hydrogen beregnes. I [4] oppgis nedre brennverdi for hydrogengass å være 120,1 MJ/kg og 10,8 MJ/m³ ved atmosfærisk trykk. Masse og volum hydrogen som trengs blir da:

$$m_{H_2} = \frac{1781 \text{ kWh} \cdot 3,6 \text{ MJ/kWh}}{120,1 \text{ MJ/kg}} \approx \underline{53,39 \text{ kg}} \quad (6.5)$$

$$V_{H_2, p=atm} = \frac{1781 \text{ kWh} \cdot 3,6 \text{ MJ/kWh}}{10,8 \text{ MJ/m}^3} \approx \underline{594 \text{ m}^3} \quad (6.6)$$

Massen (6.5) bør ikke være noe problem for fartøyet i denne rapporten. Massen av dieselen i det dielelektriske systemet ble i kapittel 4.3.6 beregnet til å være 157,7 kg (4.6), nesten 3 ganger så mye som massen til hydrogengassen (6.5). Dermed er det en del masse å gå på i forhold til det dielelektriske systemet. Volumet beregnet i (6.6) er imidlertid altfor høyt for dette fartøyet. 594 m³, eller 594 000 liter, er selvfølgelig fysisk umulig å få plass til på dette fartøyet. Det beregnede volumet er ved atmosfærisk trykk, følgelig må hydrogenet komprimeres veldig mye for at det skal få plass på fartøyet.

6.4.3. Kompresjon av hydrogen

Volumet av drivstofftankene i fartøyet design er 190 liter [3]. Dermed må det beregnede hydrogenvolumet (6.6) komprimeres ned til 190 liter hvis all den nødvendige energien skal komme fra hydrogengassen. Hvis man antar at hydrogen er en ideell gass, og man antar standard temperatur (15° C), kan man bruke tilstandsligningen for ideelle gasser [4] til å beregne trykket som hydrogengassen må komprimeres til for å få plass i drivstofftankene til fartøyet [3]. Molmassen til hydrogen er i [4] oppgitt å være 1,008 g/mol, den universelle gasskonstanten er 8,3145 J/mol K, og temperatur i Kelvin ved standardbetingelser er 288,15 K. Trykket blir dermed:

$$pV = nRT$$

$$p = \frac{\frac{m}{M} RT}{V}$$

$$p = \frac{mRT}{MV}$$

$$p = \frac{53,39 \text{ kg} \cdot 8,3145 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 288,15 \text{ K}}{1,008 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \cdot 0,190 \text{ m}^3} \quad (6.7)$$

$$p = 667883246 \text{ Pa} \approx \underline{6679 \text{ bar}}$$

Dette (6.7) er selvfølgelig et altfor høyt trykk. Det er ikke mulig med dagens teknologi for lagring av hydrogen til bruk i PEMFC å komprimere hydrogen til et så høyt trykk. Den eneste realistiske metoden å senke trykket på, med dagens teknologi og infrastruktur for distribusjon av hydrogengass til bruk i PEMFC, er å senke massen med hydrogen. Det er ikke realistisk å senke temperaturen, da den måtte blitt senket veldig mye, og man ville da trenge en helt annen lagringsteknologi for flytende, veldig kaldt hydrogen som det ikke er realistisk å bruke i et tilfelle som i denne rapporten. Man kan heller ikke øke volumet av drivstofftankene uten at det må gjøres nye kompliserte beregninger, og sannsynligvis forandringer på designet av selve fartøyet. Da det ikke er mulig å gjøre det i denne rapporten, må det antas at volumet av drivstofftankene ikke kan bli større enn 190 liter. Følgelig må massen av hydrogen minskes.

6.4.4. Masse av hydrogentank og maksimal hydrogenmengde

Innen PEMFC-systemteknologi må Toyota kunne sies å være blant de ledende i verden i skrivende stund. Hvis man sammenligner med data fra deres produktinformasjon [Vedlegg A] om den nye brenselcelledrevne bilen Toyota Mirai, som skal lanseres i løpet av 2015, kan man gjøre beregninger for å se hvilke muligheter man har med dagens BAT. Ifølge [Vedlegg A] er normalt operativtrykk 70 MPa (700 bar), volum på hydrogentankene er 122,4 liter, massen av hydrogentankene (antas uten drivstoff) er 87,5 kg (192,9 lbs), og massen til hydrogen som får plass i disse tankene er omtrent 5 kg [Vedlegg A]. Dermed blir massen av hydrogentank pr. liter:

$$\frac{m_1}{V_1} = \frac{87,5 \text{ kg}}{122,4 \text{ liter}} = \underline{0,7149 \frac{\text{kg}}{\text{liter}}} \quad (6.8)$$

Forholdet *masseprosent tank/masseprosent hydrogen* er trolig ikke lineært med økende tankstørrelse. Det vil være rimelig å anta at masseprosenten av hydrogen vil øke litt med økende tankstørrelse, siden trykket er konstant og veggtykkelsen dermed kan være den samme på en stor tank som på en mindre. Gruppen antar likevel at det ovennevnte forholdet

er lineært. Dette er for å være på den sikre siden, slik at det ikke regnes med en større masseprosent hydrogen enn tanken kan tåle. Massen til en tank på 190 liter blir da:

$$m_2 = V_2 \cdot \frac{m_1}{V_1} = 190 \text{ liter} \cdot 0,7149 \frac{\text{kg}}{\text{liter}} \approx \underline{136 \text{ kg}} \quad (6.9)$$

Massen til hydrogen pr. liter ved et trykk på 700 bar blir:

$$\frac{m_{H_2,1}}{V_1} = \frac{5 \text{ kg}}{122,4 \text{ liter}} = \underline{0,04085 \frac{\text{kg}}{\text{liter}}} \quad (6.10)$$

Massen til hydrogen som får plass i en tank på 190 liter ved et trykk på 700 bar blir da:

$$m_{H_2,2} = V_2 \cdot \frac{m_{H_2,1}}{V_1} = 190 \text{ liter} \cdot 0,04085 \frac{\text{kg}}{\text{liter}} \approx \underline{7,76 \text{ kg}} \quad (6.11)$$

Massen til en hydrogentank på 190 liter vil altså være omtrent 136 kg (6.9), og vil ha plass til 7,76 kg hydrogen (6.11). Det er omtrent 1/7 av massen hydrogen som ble beregnet i (6.5) til å være den nødvendige massen hydrogen for å tilføre den nødvendige energimengden pr. oppdrag (4.10). Det ser altså ut som det ikke er nok plass til å lagre den nødvendige mengden komprimert hydrogen for å gi fartøyet rekkevidden det er oppgitt å skulle ha i [3]. Siden det ikke er mulig å forandre på designet av selve fartøyet i denne rapporten betyr det at en PEMFC alene ikke er nok til å gi den nødvendige energimengden til fartøyet. Det må derfor, som ventet, sees på et hybridssystem hvis det skal benyttes PEMFC på fartøyet. Det mest aktuelle er å sette opp et system med PEMFC og batterier som samlet kan gi den nødvendige energimengden.

6.4.5. Nødvendig batterikapasitet

I fartøyet som denne rapporten omhandler er det ikke mulig å benytte samme type system som på biler, hvor man bruker den elektriske motoren som en dynamo i lette partier og nedoverbakker, slik at motoren faktisk lader opp batteriet på disse strekningene. På sjøen/vannet er det som kjent ingen nedoverbakker hvor fartøyet kan få fremdrift fra gravitasjonskraften, så den manglende energien må tilføres eventuelle batterier fra ekstern kilde. Først må man beregne hvor mye ekstra energi som må tilføres utenom hydrogengassen. Energien som er lagret i 7,76 kg (6.11) hydrogen er:

$$E_{H_2} = m_{H_2} \cdot LHV_{H_2} = 7,76 \text{ kg} \cdot 120,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \approx 932 \text{ MJ} \approx \underline{259 \text{ kWh}} \quad (6.12)$$

Energien fra hydrogengassen som er tilgjengelig ut fra PCU med BAT blir da:

$$\begin{aligned}
 E_{ut,FC} &= E_{H_2} \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU} \\
 E_{ut,FC} &= 259 \text{ kWh} \cdot 0,60 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \\
 E_{ut,FC} &\approx \underline{126 \text{ kWh}}
 \end{aligned}
 \tag{6.13}$$

Energien som må tilføres fra ekstern kilde via batterier blir da:

$$E_{batteri} = E_{ut,DE} - E_{ut,FC} = (869 - 126) \text{ kWh} = \underline{743 \text{ kWh}}
 \tag{6.14}$$

Hydrogenmengden som kan lagres om bord på fartøyet, i kombinasjon med en PEMFC, kan altså ikke levere mer enn litt under 1/7 av energien som det dieselelektriske systemet leverer. Det virker i utgangspunktet ganske lavt, og det blir da en stor energimengde (6.14) som må leveres fra batteriene. Men med tilgang på de nye Li-H₂O batteriene beskrevet i kapittel 5.2.5, som er i ferd med å bli kommersialisert av Teledyne Energy Systems Inc. [21] og Polyplus Battery Company [20], bør det være fullt mulig å tilføre den nødvendige energimengden (6.14) uten at masse- og/eller volumgrenser overskrides.

6.4.6. Tilgjengelig masse og volum til batterier

For å finne verdier for tilgjengelig masse og volum som kan benyttes til batterier, må det først beregnes masse og volum av en passende PEMFC med tilleggsutstyr. Det tas utgangspunkt i brenselcelleteknologien til Toyota Mirai [Vedlegg A], som er BAT i skrivende stund. Spesifikk effekt og effekt-tetthet for deres PEMFC oppgis i [Vedlegg A] å være henholdsvis 2,0 kW/kg og 3,1 kW/liter. Masse og volum av en PEMFC som skal yte den oppgitte effekten på 50 kW [6] blir dermed:

$$m_{PEMFC} = \frac{P_{DG}}{P_{spesifikk}} = \frac{50 \text{ kW}}{2,0 \text{ kW/kg}} = \underline{25 \text{ kg}}
 \tag{6.15}$$

$$V_{PEMFC} = \frac{P_{DG}}{P_{tetthet}} = \frac{50 \text{ kW}}{3,1 \text{ kW/liter}} \approx \underline{16,1 \text{ liter}}
 \tag{6.16}$$

I tillegg til dette kommer masse og volum av alt tilleggsutstyret. Massen av hydrogentankene (6.9) og hydrogengassen (6.11) er beregnet allerede, og volumet av disse er det samme som er oppgitt i [3] for dieseltankene. Dermed gjenstår tilleggskomponentene til selve brenselcellen: luftkompressor, DC/DC «Boost Converter» og «Power Control Unit» (PCU). Når det gjelder data for disse komponentene er det ikke oppgitt noe i skrivende stund, bortsett fra at volumet til «Boost Converter» på Toyota Mirai er 13 liter [Vedlegg A]. Det blir derfor veldig vanskelig å beregne noen verdier for masse og volum av disse komponentene. Det antas derfor i denne omgang at den samlede massen og volumet av disse tilleggskomponentene er 4 ganger så stor som massen og volumet til selve brenselcellen. Det bør være nok til å bruke

som en omtrentlig verdi, inkludert sikkerhetsfaktor, i videre beregninger. Den samlede massen og volumet av de nevnte tilleggskomponentene blir da henholdsvis 100 kg og 64,4 liter. Den totale massen og volumet av en 50 kW PEMFC med tilleggskomponenter og fulle 190 liters hydrogentanker blir da:

$$\begin{aligned}
 m_{FC} &= m_{PEMFC} + m_{HT} + m_{H_2} + m_{TK} \\
 m_{FC} &= 25 \text{ kg} + 135,8 \text{ kg} + 7,76 \text{ kg} + 100 \text{ kg} \\
 m_{FC} &\approx 269 \text{ kg}
 \end{aligned}
 \tag{6.17}$$

$$\begin{aligned}
 V_{FC} &= V_{PEMFC} + V_{HT} + V_{TK} \\
 V_{FC} &= 16,1 \text{ liter} + 190 \text{ liter} + 64,4 \text{ liter} \\
 V_{FC} &\approx 271 \text{ liter}
 \end{aligned}
 \tag{6.18}$$

Masse og volum som er tilgjengelig til batterier blir da massen (4.11) og volumet (4.12) av det dielelektriske systemet, minus massen (6.17) og volumet (6.18) av PEMFC-systemet. Massen og volum tilgjengelig til batterier blir følgelig:

$$\begin{aligned}
 m_{batterier} &= m_{DE} - m_{FC} \\
 m_{batterier} &= 2156 \text{ kg} - 269 \text{ kg} \\
 m_{batterier} &= 1887 \text{ kg}
 \end{aligned}
 \tag{6.19}$$

$$\begin{aligned}
 V_{batterier} &= V_{DE} - V_{FC} \\
 V_{batterier} &= 1970 \text{ liter} - 271 \text{ liter} \\
 V_{batterier} &= 1699 \text{ liter}
 \end{aligned}
 \tag{6.20}$$

6.4.7. Tilgjengelig energimengde i batterier

Ved å bruke maksgrensene for masse (6.19) og volum (6.20), de oppgitte verdiene for spesifikk energi og energitetthet for Li-H₂O batteriene til Polyplus Battery Company [20], samt virkningsgraden til Li-H₂O batteriene [37], blir den tilgjengelige energimengden ut av batteriene:

$$\begin{aligned}
 E_{masse} &= E_{spesifikk} \cdot m_{batterier} \cdot \eta_{Li-H_2O} \\
 E_{masse} &= 1,5 \text{ kWh/kg} \cdot 1887 \text{ kg} \cdot 0,90 \\
 E_{masse} &\approx 2547 \text{ kWh}
 \end{aligned}
 \tag{6.21}$$

$$\begin{aligned}
 E_{\text{volum}} &= E_{\text{tetthet}} \cdot V_{\text{batterier}} \cdot \eta_{\text{Li-H}_2\text{O}} \\
 E_{\text{volum}} &= 1,5 \text{ kWh/liter} \cdot 1699 \text{ liter} \cdot 0,90 \\
 E_{\text{volum}} &\approx 2294 \text{ kWh}
 \end{aligned}
 \tag{6.22}$$

Det er altså volumet som blir den begrensende faktoren i dette energisystemet. Ved bruk av den nevnte batteritypen er det altså teoretisk mulig å få 2294 kWh (6.22) ut av batteriene pr. oppdrag. For å finne ut hvor mye av denne energien som er tilgjengelig ut av PCU'en må også virkningsgradene til DC/DC omformer og PCU tas med. Tilgjengelig energi ut av PCU fra batteriene pr. oppdrag blir da:

$$\begin{aligned}
 E_{\text{ut,batteri}} &= E_{\text{volum}} \cdot \eta_{\text{DC/DC}} \cdot \eta_{\text{PCU}} \\
 E_{\text{ut,batteri}} &= 2294 \text{ kWh} \cdot 0,83 \cdot 0,98 \\
 E_{\text{ut,batteri}} &\approx 1866 \text{ kWh}
 \end{aligned}
 \tag{6.23}$$

6.4.8. Total energimengde

Den totale energimengden som i teorien er tilgjengelig ut av PCU pr. oppdrag fra brenselcelle/batteri hybridssystemet, som er gjennomgått og utgreid i dette kapitlet, blir summen av energien fra brenselcellene (6.13) og energien fra batteriene (6.23):

$$\begin{aligned}
 E_{\text{ut,FC/batteri}} &= E_{\text{ut,FC}} + E_{\text{ut,batteri}} \\
 E_{\text{ut,FC/batteri}} &= 126 \text{ kWh} + 1866 \text{ kWh} \\
 E_{\text{ut,FC/batteri}} &\approx 1992 \text{ kWh}
 \end{aligned}
 \tag{6.24}$$

6.4.9. Total virkningsgrad for brenselcelle/batteri fremdriftssystem

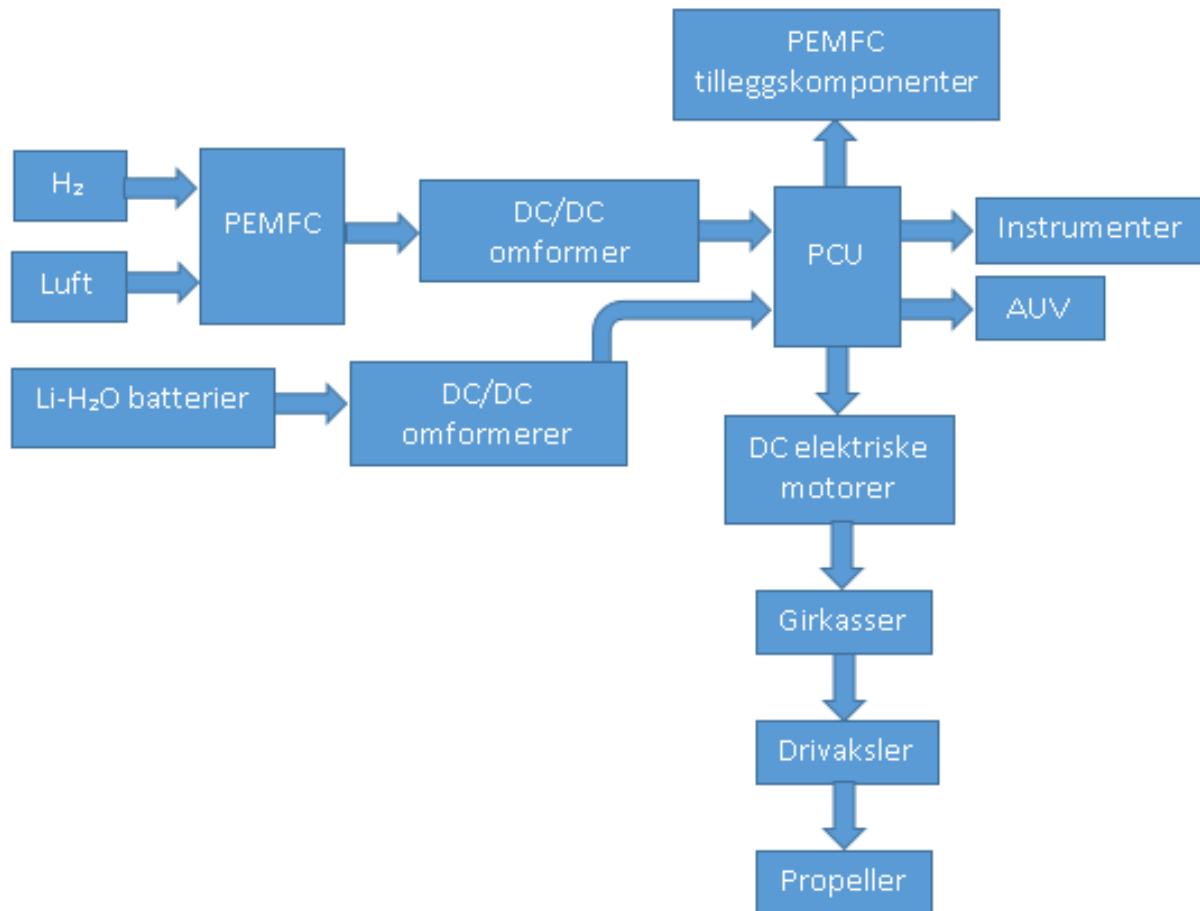
Ved å benytte verdiene som er funnet for virkningsgrad til de forskjellige komponentene blir den totale virkningsgraden til brenselcelle/batteri fremdriftssystemet:

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{total,FC/batteri}} &= \eta_{\text{FC}} \cdot \eta_{\text{DC/DC,1}} \cdot \eta_{\text{Li-H}_2\text{O}} \cdot \eta_{\text{DC/DC,2}} \cdot \eta_{\text{PCU}} \cdot \eta_{\text{EM}} \cdot \eta_{\text{GK}} \cdot \eta_{\text{DA}} \cdot \eta_{\text{P}} \\
 \eta_{\text{total,FC/batteri}} &= 0,60 \cdot 0,83 \cdot 0,90 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \cdot 0,90 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,65 \\
 \eta_{\text{total,FC/batteri}} &\approx 0,19
 \end{aligned}
 \tag{6.25}$$

Det er tatt med 2 DC/DC omformere, siden det må benyttes 2 ulike omformere i dette systemet. Den totale virkningsgraden for brenselcelle/batteri fremdriftssystemet blir dermed omtrent 19 %.

6.5. Virkemåte for det foreslåtte brenselcelle/batteri hybridssystemet

Brenselcelle/batteri hybridssystemet som er blitt foreslått, beregnet og presentert i dette kapitlet vil fungere i grove trekk på følgende måte: Hydrogen fra drivstofftankene strømmer



Figur 6.2: Flytskjema for energi i brenselcelle/batteri energisystemet.

inn på anoden i brenselcellen, mens luft strømmer inn på katoden. Brenselcellen produserer elektrisk energi ved en elektrokjemisk reaksjon, og denne elektriske energien strømmer som likestrøm gjennom en DC/DC omformer for å få rett spenning og polaritet, og videre inn i en PCU. Parallelt med dette produserer Li-H₂O batteriene elektrisk energi ved at litiumanoden forbrukes og sjøvann strømmer inn på katoden, og denne elektriske energien strømmer i form av likestrøm ut fra batteriene, gjennom en annen DC/DC omformer og videre inn i den samme PCU'en. Den elektriske energien i likestrømmen fra begge kildene blir fordelt av PCU'en, og strømmer ut til instrumenter, AUV, tilleggskomponenter til brenselcellen, og de elektriske motorene. De elektriske motorene omdanner den elektriske energien til mekanisk energi, som overføres til fartøyets propeller via girkasser og drivaksler.

6.6. Totalvurdering

Kombinasjonen med en Toyota PEMFC og Li-H₂O batterier, begge deler BAT, gir et meget spennende energisystem. Det er et brenselcelle/batteri hybridssystem med utrolig spennende



teknologi og en veldig høy teoretisk tilgjengelig energimengde (6.24), faktisk nesten 2,5 ganger så høy som for det dieselelektriske hybridsystemet (4.10), noe som gir fartøyet en mye lenger teoretisk rekkevidde. Energimengden er ikke fullt så høy som den som ble beregnet for det helelektriske energisystemet (5.13), men brenselcelle/batteri hybridsystemet har til gjengjeld to forskjellige energikilder og vil kunne yte mye høyere effekt i situasjoner der det er nødvendig, i tillegg til at det gir en ekstra sikkerhet med at fartøyet fremdeles har en energikilde igjen, selv om den andre kilden skulle få problemer. Samtidig må det nevnes, som for det helelektriske energisystemet, at dette kun er teoretiske verdier som ikke på noen måte kan garanteres i en praktisk situasjon. Både brenselcellen og batteriene som benyttes her er nye teknologier som sannsynligvis vil ha flere driftsproblemer enn et mer tradisjonelt energisystem. Dette vil trolig gi økte kostnader til vedlikehold og lavere pålitelighet i forhold til det dieselelektriske systemet. I tillegg er brenselcellen, og sannsynligvis også batteriene, dyrere i innkjøp enn dieselgenerator og tradisjonelle Li-ion batterier. Teknologien i det foreslåtte brenselcelle/batteri hybridsystemet er definitivt veldig fremtidsrettet, både i forhold til teknologisk utvikling, virkningsgrad og miljøvennlighet. Ifølge utgreiingen av PEMFC/ Li-H₂O batteri hybridsystemet i dette kapitlet er altså fordelene med systemet veldig spennende, fremtidsrettet og miljøvennlig teknologi, både for brenselceller og batterier, fleksibel effekt, i tillegg til veldig god teoretisk rekkevidde. Utfordringene er høye kostnader og antatt lavere pålitelighet.

Når det gjelder ballastsystemet forklart i kapittel 4.1, trenger ikke systemet ta inn så mye ballastvann i tilfellet med brenselcelle/batteri energisystemet som med dieselelektrisk energisystem. Det er naturligvis fordi massen av 190 liter hydrogen ved et trykk på 700 bar (6.11) er mye lavere enn massen av 190 liter diesel (4.6). Ballastsystemet beholdes likevel identisk for å kunne kompensere for massen av AUV'ene som løftes opp av USV'en, som forklart i kapittel 4.1.

7. Utgreiing av naturgass energisystem

7.1. Virkemåte for varmemotor med indre forbrenning

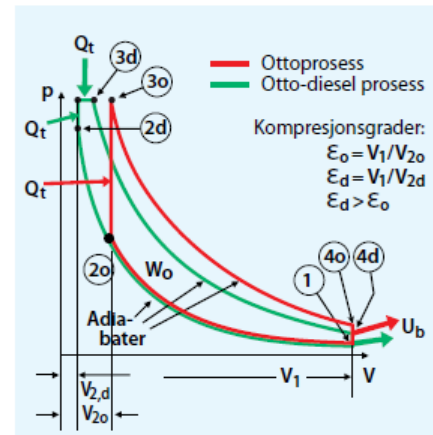
Det er to hovedtyper varmemotorer med stempel prinsipp. Disse hovedtypene er ottomotor og dieselmotor.

Ottomotor (ottoprosess):

I denne typen motor får lufta tilført brenselet så tidlig at det vil være luft til stede i sylindren under hele kompresjonen. Brenselet vil antennes av en gnist, som gjør at forbrenningen skjer meget rask siden alt brenselet er til stedet før gnisten antennes. Dette vil videre bevege et stempel som gjør at man får et arbeid. Brenselet som brukes i denne type motor er hovedsakelig bensin og gass [26].

Dieselmotor (otto-diesel prosess):

Denne type prosess utføres med høy kompresjon med dieselolje som brensel. Den komprimerte lufta får en veldig høy temperatur som gjør at første del av brenselet selv antennes mot slutten av kompresjonen, og forbrennes raskt. Resten av brenselet sprøytes inn i løpet av en kort periode og forbrennes etter hvert som det tilføres [26].



Ottoprosess

1-2o: Adiabatisk kompresjon
2o-3o: Varmetilførsel, konst. volum
3o-4o: Adiabatisk ekspansjon
4o-1: Varmebortførsel U_b (gassutveksling)

Otto-dieselprosess

1-2d: Adiabatisk kompresjon
2d-3d: Varmetilførsel, under konst. volum og konst. trykk
3d-4d: Adiabatisk ekspansjon
4d-1: Varmebortførsel U_b

Figur 7.1: PV-diagram for ottoprosess og otto-diesel prosess [26].

7.2. Bakgrunn for valget av naturgass som brensel

Dieselmotoren har en bedre virkningsgrad enn ottomotoren, noe som vil gi et lavere brenselforbruk. Dette er en av hovedårsakene til at denne motoren har fått en enorm betydning for transportsektoren både til havs og til lands. Det som er interessant med ottomotoren er at den kan nytte gass som brensel. Dette gir fordeler for miljø. Utslippene av skadelige gasser reduseres markant. Det er null utslipp av svoveldioksid (SO_2), partikkelutslipp er nesten lik null, utslipp av CO_2 er redusert med 26% og NO_x -utslippet er redusert med 80-90% [26]. Som nevnt er det den høye virkningsgraden som er grunnen til at dieselmotoren har fått den posisjonen den har innenfor transportsektoren. Ved å benytte gass som brensel i en ottomotor vil en få en virkningsgrad som kan konkurrere med dieselmotoren. Grunnen til at gassmotoren får sin høye virkningsgrad er at man benytter metan, som har et høyere oktantal. Bensinens oktantal er i dag 92 eller 95 [26]. Ved å benytte naturgass som hovedsakelig består av metan

får man et oktantal på 120 [26]. Det viser seg også at oktantallet til en brensel/luft blanding øker med en luftfaktor opp mot 1,8 [26]. Ved en så høy luftfaktor blir dette en konkurransedyktig motor. Det høye oktantallet gjør også at det kan brukes høyere kompresjon i motoren.

7.3. Naturgassgeneratorer

Opplysninger som tidligere er gitt er at det skal være 2 generatorer, begge med en effekt på 25 kW. Naturgassgeneratorer med denne effekten har vist seg å være vanskelige å finne. En leverandør som oppgir nok informasjon til å jobbe videre med er Kohler Power Systems. Kohler Power Systems har to alternativer gruppen finner interessante, men ingen som passer perfekt.

De to alternativene er:

- Bensingenerator med modellnummer 20C [Vedlegg H]. Denne er egnet til marint bruk og har en effekt på 20 kW.
- Naturgassgenerator med modellnummer 25REZG [Vedlegg G]. Denne generatoren har en effekt på 25 kW, men er ikke tiltenkt marint bruk.

Som nevnt er ingen av disse generatorene akkurat hva USV'en trenger, så modifikasjoner må gjøres. Bensingeneratoren kan benytte seg av naturgass som brensel med noen modifikasjoner, men genererer for lite effekt. Naturgassgeneratoren leverer nok effekt, men denne må modifiseres til marint bruk. Å utvikle naturgassgenerator med en effekt på 25 kW tiltenkt marint bruk hadde vært det mest ideelle. For å se om dette er en reell mulighet, må spesifikasjonene vurderes videre.

Spesifikasjoner for naturgassgenerator
25REZG [Vedlegg G]:

- Lengde: 2200 mm
- Bredde: 1040 mm
- Høyde: 1172 mm
- Masse: 639 kg



Volumet til denne generatoren blir:

Figur 7.2: Kohler 25REZG naturgassgenerator [27].

$$V_{NGG} = 2,200\text{ m} \cdot 1,040\text{ m} \cdot 1,172\text{ m} \approx \underline{2,682\text{ m}^3} \quad (7.1)$$

Massen til naturgassgeneratoren er omtrent lik som massen til dieselgeneratoren i kapittel 4.3.2, men volumet er mer enn 4 ganger så stort. Dette er følgelig en urealistisk mulighet med tanke på plassen som er til rådighet.

Bensingenerator 20C ble også nevnt som et alternativ, men den har en effekt på kun 20 kW. Noen modifikasjoner må nok gjøres før den kan benyttes som naturgassgenerator, men fordelene er som nevnt at den er tiltenkt marint bruk.

Spesifikasjoner for bensingenerator 20C
[Vedlegg H]:

- Lengde: 1305 mm
- Bredde: 572 mm
- Høyde: 726 mm
- Masse: 340 kg



Figur 7.3: Kohler 20C bensingenerator [28].

Volumet til denne generatoren blir:

$$V_{BG} = 1,305\text{ m} \cdot 0,572\text{ m} \cdot 0,726\text{ m} \approx \underline{0,542\text{ m}^3} \quad (7.2)$$

Volumet er mindre enn volumet til dieselgeneratoren (4.1), men kan øke etter modifikasjoner er gjort. USV'en har kapasitet til å bære med seg generatorer med en total masse på ca. 1300 kg. Massen til denne generatoren er kun 340 kg, og selv etter modifikasjoner og ny veiing bør massen til 2 slike generatorer være godt under 1300 kg. Dette er følgelig det mest aktuelle alternativet av de 2 nevnte generatorene.

7.4. Naturgass energisystem

Dagens naturgass energisystemer er hovedsakelig designet til bruk i store motorenheter som skip og busser [26]. Designet på USV'en tillater maks volum på drivstofftankene på 190 liter, noe som er en utfordring. Det som gjør det utfordrende er at naturgass systemer har stort volumbehov for å gjøre plass til tankanlegg med nedkjølt og/eller komprimert gass. Fordelen med naturgass er at den kan komprimeres (CNG) eller nedkjøles (LNG) til henholdsvis omtrent 1/200 og 1/600 av volumet den har i naturlig tilstand [29]. Den minste LNG-tanken gruppen har funnet med tilhørende tegninger og spesifikasjoner er på hele 450 liter [30]. CNG-tanker finnes i langt mer passende størrelser for designet til USV'en [31]. Ulempen med disse tankene er imidlertid at de er tykkere enn dieseltanker. Det medfører at tanker med et volum på 190 liter ikke vil kunne inneholde 190 liter drivstoff slik som dieseltankene kan. Det er heller ikke plass til ekstra drivstofftanker i fartøyets øvre del, siden naturgassgeneratorene tar omtrent like stor plass som dieselgeneratorene. Dette virker å bekrefte opplysningen i [26] om at et rent naturgass energisystem hovedsakelig er egnet for store kjøretøy/fartøy. Det vil derfor trolig være umulig å installere et rent naturgass energisystem på et så lite fartøy som

USV'en i denne rapporten, hvis det skal ha den samme energimengden (4.10) tilgjengelig og den samme rekkevidden som det dieselelektriske systemet. Gruppen velger derfor å se videre på om det er mulig å oppnå denne energimengden (4.10) og rekkevidden ved å kombinere naturgassgeneratorer med sjøvannsbatteriene som ble valgt for det helelektriske systemet i kapittel 5 og brenselcelle/batteri hybridssystemet i kapittel 6. Dette vil da bli et naturgass/batteri hybridssystem. Virkemåten og flytskjema for energi i dette energisystemet vil for øvrig bli lik som for det dieselelektriske systemet i kapittel 4.2 og figur 4.2, bortsett fra at de 2 dieselgeneratorene byttes ut med 2 naturgassgeneratorer, og Li-ion batteriene byttes ut med Li-H₂O batterier. Det må nå beregnes tilgjengelig energi fra den mengden CNG og LNG som får plass på fartøyet, og deretter hvor mye energi som er tilgjengelig fra batteriene som får plass i tillegg til naturgass systemet.

7.5. CNG/batteri hybridssystem

7.5.1. CNG-tank

De best egnede CNG-tankene til transportformål er de såkalte «Type 4 CNG Tanks», fordi dette er de tynneste og letteste CNG-tankene [31]. Av tankene som er tilgjengelig hos [31] er det [32] som ser ut til å passe best. Dette er en type 4 tank hvor de ytre dimensjonene [32] gir et ytre volum på litt under 100 liter. Dette er ganske nær



Figur 7.4: Type 4 CNG tank [32]

det ytre volumet til de 2 dieseltankene i kapittel 4, og det bør følgelig være mulig å få plass til 2 slike [32] CNG-tanker i samme posisjon som dieseltankene i det dieselelektriske systemet (se figur 4.1). Drivstoffvolumet på disse tankene er oppgitt å være 60 liter, massen er omtrent 25,5 kg, og operativtrykket er omtrent 248 bar (3600 psi) [32]. Det totale CNG-volumet med 2 slike tanker blir dermed 120 liter. I [33] er energiinnholdet i CNG oppgitt å være 2,7 kWh/liter. Virkningsgraden til en naturgassmotor er 40-50 % [26]. Ved å anta tilgang på BAT blir tilgjengelig energi ut av PCU fra naturgassgeneratorene pr. oppdrag ved bruk av CNG:

$$\begin{aligned}
 E_{ut,CNG} &= V_{CNG} \cdot E_{tetthet,CNG} \cdot \eta_{GM} \cdot \eta_G \cdot \eta_{AC/DC} \cdot \eta_{PCU} \\
 E_{ut,CNG} &= 120 \text{ liter} \cdot 2,7 \text{ kWh/liter} \cdot 0,5 \cdot 0,97 \cdot 0,95 \cdot 0,98 \\
 \underline{E_{ut,CNG}} &\approx 146 \text{ kWh}
 \end{aligned} \tag{7.3}$$

Energien ut av naturgassgeneratorene er som ventet mye mindre enn den nødvendige energimengden (4.10). Resten av energien må da komme fra Li-H₂O batteriene.

7.5.2. Nødvendig batterikapasitet ved bruk av CNG

Energien som må komme fra Li-H₂O batteriene blir:

$$E_{ut,batteri} = E_{ut,DE} - E_{ut,CNG} = 869 \text{ kWh} - 146 \text{ kWh} = \underline{723 \text{ kWh}} \quad (7.4)$$

7.5.3. Tilgjengelig masse og volum til batterier ved bruk av CNG

For å finne tilgjengelig masse og volum til batterier trenger vi masse og volum av komponentene i CNG/batteri energisystemet. Som nevnt i kapittel 7.3 er det bensingeneratoren som var den mest aktuelle av alternativene gruppen fant. Denne trenger som nevnt noen modifikasjoner for å kunne bruke naturgass i stedet for bensin, og for å øke effekten fra 20 kW til 25 kW. Både masse [Vedlegg H] og volum (7.2) for denne generatoren var et stykke under masse [Vedlegg E] og volum [4.1] for dieselgeneratorene i kapittel 4, men gruppen finner det rimelig å anta at både masse og volum vil øke til omtrent samme verdi som for dieselgeneratorene etter de nevnte modifikasjonene. De vil kanskje være litt lettere, men for å være på den sikre siden velger gruppen å anta samme masse og volum. Dermed er det kun nødvendig å beregne differansen i masse og volum som følge av skifte av brensel, drivstofftanker og batterier.

I [33] er energiinnholdet i CNG oppgitt å være 2,7 kWh/liter og 13,8 kWh/kg. Massen av 120 liter CNG blir da:

$$m_{CNG} = \frac{E_{tetthet}}{E_{spesifikk}} \cdot V_{CNG} = \frac{2,7 \text{ kWh/liter}}{13,8 \text{ kWh/kg}} \cdot 120 \text{ liter} \approx \underline{23,5 \text{ kg}} \quad (7.5)$$

Massedifferansen som er tilgjengelig til Li-H₂O batterier blir da:

$$\begin{aligned} m_{batterier} &= m_{DE} - 2m_{DG} - 2m_{CNGT} - m_{CNG} \\ m_{batterier} &= 1482 \text{ kg} - (2 \cdot 628) \text{ kg} - (2 \cdot 25,5) \text{ kg} - 23,5 \text{ kg} \\ \underline{m_{batterier}} &= \underline{151,5 \text{ kg}} \end{aligned} \quad (7.6)$$

Energimengden tilgjengelig ut av PCU fra den beregnede massen (7.6) med Li-H₂O batterier blir:

$$\begin{aligned} E_{ut,batterier} &= E_{spesifikk,Li-H_2O} \cdot m_{batterier} \cdot \eta_{Li-H_2O} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU} \\ E_{ut,batterier} &= 1,5 \text{ kWh/kg} \cdot 151,5 \text{ kg} \cdot 0,90 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \\ \underline{E_{ut,batterier}} &\approx \underline{166 \text{ kWh}} \end{aligned} \quad (7.7)$$

Energimengden i batteriene (7.7) er altså mindre enn 1/5 av den nødvendige energimengden fra batteriene (7.4). Det vil resultere i at rekkevidden vil bli mer enn halvert i forhold til det dieselelektriske systemet. Det er absolutt ikke et gunstig alternativ, hverken for USV'en eller «Survey» systemet som helhet. Følgelig er det ikke nødvendig å gjøre flere beregninger eller undersøkelser angående CNG/batteri energisystemet. Gruppen vil heller undersøke om LNG/batteri energisystem kan være et bedre alternativ.

7.6. LNG/batteri hybridssystem

7.6.1. LNG-tank

Som nevnt i kapittel 7.4 er den minste LNG-tanken gruppen fant på 450 liter [30]. For å kunne gjøre videre beregninger antar gruppen at det er mulig å bygge mindre LNG-tanker med samme masse/volum forhold. Ved å ta utgangspunkt i tegningene og spesifikasjonene til tanken designet av Taylor-Wharton [30] kan det beregnes masse av en tank på 190 liter og hvor mye LNG denne kan romme. Ifølge de ytre målene til tanken er det ytre volumet omtrent 674 liter, netto LNG-volum er 405 liter, og masse av tom tank er 254 kg [30].

LNG-volumet i en tank med ytre volum på 190 liter blir da:

$$V_{LNG} = \frac{V_{netto}}{V_{ytte}} \cdot 190 \text{ liter} = \frac{405 \text{ liter}}{674 \text{ liter}} \cdot 190 \text{ liter} \approx \underline{114 \text{ liter}} \quad (7.8)$$

Massen av en tank med ytre volum på 190 liter blir:

$$m_{LNGT} = \frac{m_{tom}}{V_{ytte}} \cdot 190 \text{ liter} = \frac{254 \text{ kg}}{674 \text{ liter}} \cdot 190 \text{ liter} \approx \underline{71,6 \text{ kg}} \quad (7.9)$$

I [33] er energiinnholdet i LNG oppgitt til å være 6,2 kWh/liter. Energi ut av PCU fra 114 liter (7.8) LNG ved bruk av en naturgassgenerator og tilgang på BAT blir:

$$E_{ut,LNG} = V_{LNG} \cdot E_{tetthet,LNG} \cdot \eta_{GM} \cdot \eta_G \cdot \eta_{AC/DC} \cdot \eta_{PCU}$$

$$E_{ut,LNG} = 114 \text{ liter} \cdot 6,2 \frac{\text{kWh}}{\text{liter}} \cdot 0,5 \cdot 0,97 \cdot 0,95 \cdot 0,98 \quad (7.10)$$

$$\underline{E_{ut,LNG} \approx 319 \text{ kWh}}$$

Energien ut av PCU fra naturgassgeneratorene ved bruk av LNG (7.10) er høyere enn ved bruk av CNG (7.3), med det er fremdeles mindre enn den nødvendige energimengden (4.10). Resten av energien må også her komme fra batteriene.

7.6.2. Nødvendig batterikapasitet ved bruk av LNG

Energien som må komme fra Li-H₂O batteriene er:

$$E_{ut,batterier} = E_{ut,DE} - E_{ut,LNG} = 869 \text{ kWh} - 319 \text{ kWh} = \underline{550 \text{ kWh}} \quad (7.11)$$

7.6.3. Tilgjengelig masse og volum til batterier ved bruk av LNG

Som nevnt i kapittel 7.5.3 er det kun nødvendig å beregne differansen i masse og volum som følge av skifte av brensel, drivstofftanker og batterier i forhold til det dieselektriske systemet.

I [33] er energiinnholdet i LNG oppgitt å være 6,2 kWh/liter og 14,0 kWh/kg. Massen av 114 liter (7.8) LNG blir da:

$$m_{LNG} = \frac{E_{tetthet,LNG}}{E_{spesifikk,LNG}} \cdot V_{LNG} = \frac{6,2 \text{ kWh/liter}}{14,0 \text{ kWh/kg}} \cdot 114 \text{ liter} \approx \underline{50,5 \text{ kg}} \quad (7.12)$$

Massedifferansen som er tilgjengelig til Li-H₂O batterier blir da:

$$\begin{aligned} m_{batterier} &= m_{DE} - 2m_{DG} - m_{LNGT} - m_{LNG} \\ m_{batterier} &= 1482 \text{ kg} - (2 \cdot 628) \text{ kg} - 71,6 \text{ kg} - 50,5 \text{ kg} \\ \underline{m_{batterier}} &= \underline{103,9 \text{ kg}} \end{aligned} \quad (7.13)$$

Energimengden tilgjengelig ut av PCU fra den beregnede massen (7.13) med Li-H₂O batterier blir:

$$\begin{aligned} E_{ut,batterier} &= E_{spesifikk,Li-H_2O} \cdot m_{batterier} \cdot \eta_{Li-H_2O} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU} \\ E_{ut,batterier} &= 1,5 \text{ kWh/kg} \cdot 103,9 \text{ kg} \cdot 0,90 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \\ \underline{E_{ut,batterier}} &\approx \underline{114 \text{ kWh}} \end{aligned} \quad (7.14)$$

Energimengden som er tilgjengelig ut av PCU fra batteriene (7.14) er kun omtrent 1/5 av den nødvendige energimengden (7.11). Selv om det er mer energi i 114 liter LNG enn 120 liter CNG, blir den totale energimengden fra LNG/batteri energisystemet betraktelig lavere enn energimengden i det dieselektriske systemet (4.10). Det vil også her resultere i at rekkevidden vil bli betraktelig redusert i forhold til det dieselektriske systemet. Det er, som tidligere nevnt, absolutt ikke et gunstig alternativ, hverken for USV'en eller «Survey»

systemet som helhet. Følgelig er det heller ikke nødvendig å gjøre flere beregninger eller undersøkelser angående LNG/batteri energisystemet.

7.6.4. Total virkningsgrad for naturgass/batteri fremdriftssystem

Selv om gruppen som sagt ikke velger naturgass/batteri energisystemet, kan det allikevel være interessant å beregne den totale virkningsgraden for dette fremdriftssystemet for å kunne sammenligne med de andre fremdriftssystemene. Ved å benytte verdiene som er funnet for virkningsgrad til de forskjellige komponentene blir den totale virkningsgraden til naturgass/batteri fremdriftssystemet:

$$\begin{aligned}\eta_{total,NG/batteri} &= \eta_{GM} \cdot \eta_G \cdot \eta_{AC/DC} \cdot \eta_{Li-H_2O} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{GK} \cdot \eta_{DA} \cdot \eta_P \\ \eta_{total,NG/batteri} &= 0,50 \cdot 0,97 \cdot 0,95 \cdot 0,90 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \cdot 0,90 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,65 \\ \eta_{total,NG/batteri} &\approx 0,18\end{aligned}\quad (7.15)$$

Den totale virkningsgraden for naturgass/batteri fremdriftssystemet blir omtrent 18 %.

7.7. Totalvurdering

Bruk av naturgass energisystem, enten CNG eller LNG, er ofte en god løsning på store fartøy. Hovedfordelen med denne typen system er at det medfører en betraktelig reduksjon i skadelige utslipp sammenlignet med energisystem som benytter diesel, som beskrevet i kapittel 7.2. Ifølge beregningene i dette kapitlet er imidlertid et energisystem med naturgassmotor ikke gunstig på et relativt lite fartøy med en størrelse som USV'en i denne rapporten. Komponentene i naturgass systemet er rett og slett for store og tunge til at det kan produseres nok energi med den tilgjengelige drivstoffmengden. Dette bekrefter opplysningen i [26] om at dagens naturgassmotorer hovedsakelig er egnet til bruk i store fartøy. Det vil følgelig ikke være gunstig for gruppen å gå videre med et energisystem med naturgass i denne rapporten.

8. Sammenligning av energisystemer med påfølgende valg av system

8.1. Generelt

I de foregående kapitlene er det gjennomgått 4 ulike energisystemer som kan være aktuelle til bruk på fartøyet i denne rapporten. Alle systemene har fordeler og ulemper, og i dette kapitlet vil disse fordelene og ulempene oppsummeres, slik at de ulike energisystemene kan settes opp mot hverandre. Dette vil gjøre gruppen i stand til å gjøre en totalvurdering, og deretter et godt begrunnet valg av energisystem som skal detaljeres videre i kapittel 9. For mer detaljert informasjon angående de ulike fordelene og ulempene, se kapitlene 4, 5, 6 og 7.

8.2. Virkningsgrad

Som tidligere nevnt antas det at det er tilgang til BAT i alle energisystemene. Dermed er det det helelektriske systemet som kommer best ut i forhold til virkningsgrad med 39 %. De 3 hybridsystemene kommer ganske likt ut med 17 % for det dieselelektriske, 18 % for naturgass/batteri, og 19 % for brenselcelle/batteri systemet. Hvis man kun ser på virkningsgrad er det følgelig det helelektriske systemet med Li-H₂O batterier som utmerker seg som det beste alternativet. De samme batteriene kan også være en veldig gunstig oppgradering for AUV'ene som inngår i «Survey» systemet.

8.3. Fremtidsrettet teknologi

Teknologien i det dieselelektriske systemet må sies å være den mest tradisjonelle av de 4 alternativene. Energisystem med naturgass er også godt utprøvd til havs, men det må nevnes at det for det meste gjelder på større skip. Både brenselcellene av typen PEMFC og batteriene av typen Li-H₂O er i aller høyeste grad fremtidsrettet teknologi, og følgelig kan det ikke være tvil om at brenselcelle/batteri hybridsystemet og det helelektriske systemet er de to energisystemene som benytter mest fremtidsrettet teknologi.

8.4. Effekt på miljøet

Hvilken effekt de ulike energisystemene har på miljøet er et veldig komplisert spørsmål å svare nøyaktig på, og det avhenger i stor grad av en komplett livsløpsanalyse for alle de ulike komponentene, samt for drivstoff og produksjon av drivstoff. Det som allikevel er lettere å svare på er hvor miljøvennlig et energisystem har potensial til å bli. Her kommer det dieselelektriske systemet dårligst ut. Det har reduserte utslipp i forhold til et rent dieselsystem, men det forurenses allikevel mer enn de 3 andre alternativene. Et energisystem med naturgass har sterkt reduserte utslipp i forhold til det dieselelektriske, men naturgass er også et fossilt brensel, og utslippene er langt fra helt fjernet. Det er brenselcelle/batteri hybridsystemet og det helelektriske systemet som har klart størst potensial innen

miljøvennlighet. Det er imidlertid viktig å nevne at dette i stor grad avhenger av hvordan hydrogengassen til brenselcellene er produsert, og hvordan batteriene og brenselcellene er produsert, om de kan gjenvinnes, etc. På disse områdene er det fortsatt en lang vei å gå for å bli helt miljøvennlige, men det gjøres framskritt hvert år og potensialet for fremtiden er stort.

8.5. Pålitelighet og levetid

Det dieselelektriske systemet er et godt utprøvd system, og er trolig det mest pålitelige av de 4 alternativene. Naturgass systemer har også blitt mer og mer utbredt, og har også høy pålitelighet. Begge disse systemene har også god levetid. Når det gjelder brenselcelle/batteri systemet og det helelektriske systemet er det stor usikkerhet rundt pålitelighet og levetid. Både PEMFC-teknologien og Li-H₂O-teknologien som benyttes i disse to systemene er veldig forskj, og det er foreløpig usikkert hvor lang levetiden er og hvor pålitelige systemene er i lengden, selv om Toyota har testet ut sine brenselceller i flere år allerede. Det er imidlertid mye god og viktig forskning på disse områdene, og det regnes som sannsynlig at både påliteligheten og levetiden til brenselceller og batterier vil øke betraktelig i de nærmeste årene.

8.6. Økonomi

Det er ikke blitt gjort noen økonomiske overslag med konkrete summer i denne rapporten. Litt av grunnen til det er at det ikke er noen tvil om rangeringen av energisystemene i forhold til kostnader. Det dieselelektriske systemet er billigst i innkjøp pga. relativt billige komponenter i alle ledd, og naturgass/batteri hybridsystemet er noe dyrere pga. dyrere drivstofftanker, dyrere batterier, etc. Det helelektriske systemet er sannsynligvis litt dyrere enn dette igjen pga. en veldig stor mengde Li-H₂O batterier, som sannsynligvis er dyre i innkjøp siden det er en veldig forskj batteritype. Det dyreste systemet i innkjøp blir nok likevel brenselcelle/batteri systemet. Dette systemet benytter BAT både i PEMFC og Li-H₂O batterier, og selv om det ikke er oppgitt noen priser for disse komponentene er det stor sannsynlighet for at de er betraktelig dyrere enn komponentene i det dieselelektriske systemet, siden både sjøvannsbatterier og brenselceller foreløpig har en del utfordringer med kostnader. Større usikkerhet rundt pålitelighet og levetid vil sannsynligvis også gi større kostnader til vedlikehold, utskiftinger, etc., slik at den samme rangeringen vil gjelde for disse kostnadene også.

8.7. Totalvurdering og endelig valg av energisystem

Som tidligere nevnt legger gruppen stor vekt på om det valgte energisystemet benytter fremtidsrettet og miljøvennlig teknologi. Verdens energibruk er nødt til å dreie mer mot fornybare og miljøvennlige kilder, og vekk fra fossile kilder. Det har foreløpig vist seg vanskelig å få dette til i stor skala, men nettopp derfor er det desto viktigere at det brukes tid og penger på forskning og utvikling av de fornybare og miljøvennlige teknologiene, og at det våges å satse på energisystemer som benytter slike teknologier. I lys av dette er det



brenselcelle/batteri hybridsystemet og det helelektriske systemet som skiller seg ut som de klart mest positive alternativene. Disse to systemene har i tillegg store fordeler i forhold til de to andre når det gjelder energimengde og rekkevidde. De har i tillegg størst forbedringspotensial i forhold til fremtiden. Det helelektriske systemet skiller seg klart ut med en mye høyere virkningsgrad enn alle de andre systemene. utfordringene med begge disse systemene er høyere kostnader, samt usikkerhet rundt pålitelighet og levetid. Men som tidligere nevnt er dette områder hvor det gjøres mye god forskning for å takle disse utfordringene, og kanskje til og med gjøre dem om til fordeler en gang i fremtiden. Gruppen vil av alle disse grunnene gå videre med ett av disse energisystemene.

For å gjøre det endelige valget trengs det litt nøyere vurdering. Brenselcelle/batteri systemet har lavere virkningsgrad, men vil til gjengjeld sannsynligvis være et mer fleksibelt energisystem i forhold til effektvariasjoner siden det kan benytte både brenselceller og batterier samtidig. Det har også en bedre redundans, siden det er et todelt system med dobbelt sett av nesten alle komponentene. Det gir en økt sikkerhet hvis det skulle bli problemer med noen av komponentene. I tillegg er det usikkert om det helelektriske systemet kan benytte sjøvannsbatterier i den delen av fartøyet som ligger over vann, siden disse batteriene trenger jevn tilgang på vann. Det må i så fall sannsynligvis installeres et pumpeanlegg, noe som vil minske plassen tilgjengelig til batterier, i tillegg til å «stjele» energi fra fartøyet, noe som vil senke virkningsgraden til hele energisystemet. Av disse grunnene mener gruppen at det beste alternativet for fartøyet i denne rapporten er brenselcelle/batteri energisystemet, og det er følgelig dette systemet som vil bli detaljert videre i kapittel 9.

9. Detaljering av valgt energisystem

9.1. Grunnlag for videre detaljering

Gruppen har altså valgt brenselcelle/batteri hybridsystemet som energisystem til USV'en i denne rapporten. Kapittel 6 ga en innledende presentasjon og utgreiing av dette energisystemet, og begrunnelsen for valget av dette systemet ble gitt i kapittel 8. I dette kapitlet vil det nevnte energisystemet bli detaljert så nøyaktig som mulig, og det vil lages og presenteres en teoretisk modell for hele energisystemet, med alle nødvendige komponenter. Deretter vil hele «Survey» systemet vurderes som en helhet, inkludert AUV'er. Siden dette er en teoretisk rapport uten mulighet til praktiske forsøk, blir det trolig visse begrensinger og antagelser. Disse vil i så fall bli tatt opp og avklart etter hvert som systemet konstrueres. I kapittel 10 vil så det ferdige resultatet diskuteres, og forslag til videre arbeid vil fremlegges.

I kapittel 6 ble brenselcelle/batteri energisystemet presentert, og det ble gjort noen innledende valg og beregninger. Som brenselcelle ble PEMFC valgt, nærmere bestemt samme typen som brukes i Toyota Mirai, og energimengde ut av brenselcellen (6.13), samt masse (6.15) og volum (6.16) for brenselcellen ble beregnet. Det ble også beregnet energimengde i brensel (6.12), og masse av hydrogentank (6.9) og brensel (6.11). Videre ble det valgt Li-H₂O batterier, nærmere bestemt fra Polyplus Battery Company, og energimengden fra disse ble beregnet (6.23) ut i fra masse- og volumbegrensninger (6.19 og 6.20) i fartøyet. Den totale vurderingen ble at dette systemet med BAT i teorien kunne gi nesten 2,5 ganger så mye energi som det dieselelektriske systemet foreslått av designerne i [3,5,6], og følgelig lenger rekkevidde. Det ble også foreslått, i delkapitlene 2.6 og 5.5, å bytte ut de originale batteriene i AUV'ene som inngår i «Survey» systemet med de ovennevnte Li- H₂O batteriene for å øke rekkevidden og virkningsgraden til hele «Survey» systemet. Alt det nevnte er en del av grunnlaget som vil detaljeres videre i dette kapitlet. For en mer detaljert gjennomgang av det nevnte grunnlaget, se kapitlene 2, 5 og 6.

Siden dieselgeneratorene i det dieselelektriske systemet er veldig mye tyngre og har et veldig mye større volum (4.1) enn brenselcellenes masse (6.15) og volum (6.16), frigjøres det mye plass i fartøyets øvre del. I tillegg trenger Li- H₂O batteriene som er valgt jevn tilførsel av vann for å fungere. Det naturlige blir derfor å fylle opp mest mulig av det nedsenkede volumet med Li- H₂O batterier, og plassere flest mulig av de andre komponentene i fartøyets øvre del. Det er naturligvis noen komponenter som må være i den nedre delen, f.eks. de elektriske motorene, men noen komponenter kan flyttes opp i den øvre delen, f.eks. drivstofftankene. Gruppen vil derfor plassere flest mulig av de «tørre» komponentene i fartøyets øvre del, og fylle opp mest mulig av det nedsenkede volumet med Li- H₂O batterier.

9.2. Toyota Fuel Cell System (TFCS)

9.2.1. Generelt

Bakgrunnen for valget av brenselcellesystemet til Toyota Motor Corporation er todelt. For det første er TFCS verdensledende innen PEMFC-teknologi for transportformål, både når det gjelder energitetthet og hydrogentanker, i tillegg til mange andre viktige faktorer for brenselcellen og tilleggskomponentene. Dette er pr. november 2014 ifølge Toyotas egen forskning og testing [23]. Den andre hovedgrunnen er at Toyota gjorde omtrent 5680 patenter innen brenselcelleteknologi tilgjengelige til gratis bruk for produsenter av kjøretøy/fartøy f.o.m. 2015 t.o.m. 2020 [24]. Disse inkluderer patenter for brenselceller, hydrogentanker, brenselcelle «Software Control», samt hydrogenproduksjon og levering. Dermed er den verdensledende teknologien for PEMFC-system til transportformål tilgjengelig til å brukes gratis, det eneste som må gjøres er å lage en avtale med betingelser i samarbeid med Toyota.

TFCS er imidlertid utviklet for bruk i kjøretøy, hovedsakelig personbiler. Følgelig må det naturligvis gjøres noen modifikasjoner for å optimalisere systemet for bruk i fartøyet i denne rapporten. Dette gjør at noen komponenter modifiseres, mens andre fjernes helt og erstattes med andre komponenter som gruppen mener vil fungere bedre på et sjøfartøy. Dette vil bli gjennomgått og begrunnet for hver komponent i hele energisystemet.

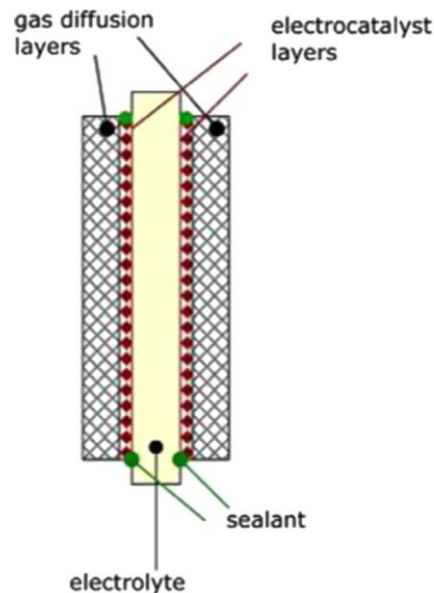
Når det gjelder informasjon om TFCS, kontaktet gruppen Toyota og ba om informasjon. Gruppen mottok da [Vedlegg F], og supplerte i tillegg med informasjon fra [Vedlegg A] samt diverse informasjon og videoer fra Toyotas egen nettside [23]. All annen informasjon er beskyttet, som opplyst fra Toyota. Som nevnt ovenfor kan imidlertid alle patenter brukes gratis av produsenter av kjøretøy/fartøy, det må bare lages en avtale med Toyota. Det vil naturligvis ikke bli gjort i denne rapporten, siden dette er en teoretisk rapport og gruppen ikke skal produsere fartøyet rapporten omhandler. Informasjon om TFCS i denne rapporten begrenser seg følgelig til [Vedlegg A], [Vedlegg F] og [23].

Gruppen kontaktet også Polyplus Battery Company og Teledyne Energy Systems Inc. for å få mer detaljert informasjon om Li-H₂O batteriene enn det som er å finne i [20,21], men i skrivende stund er det ikke mottatt noe svar fra noen av selskapene. Informasjonen om disse batteriene begrenser seg dermed til [20,21], samt noe generell informasjon fra [18,19].

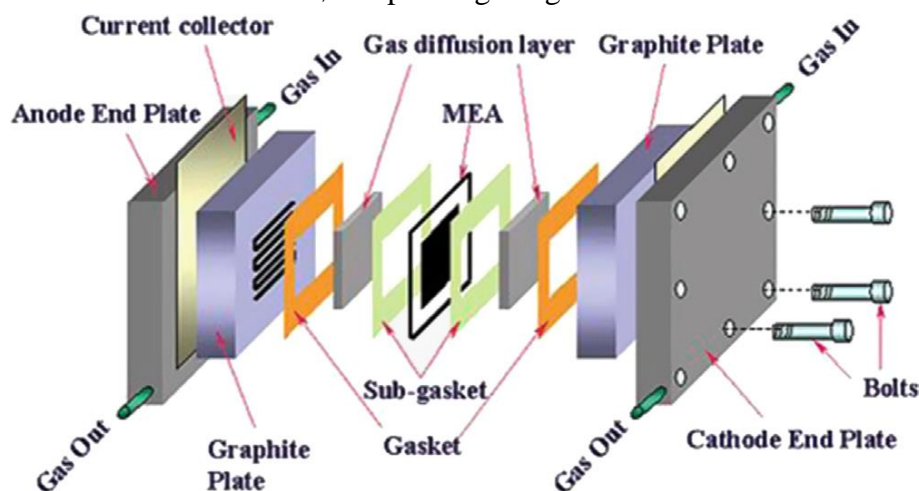
9.2.2. Brenselcellen (PEMFC)

Brenselcellen som er valgt i denne rapporten er som tidligere nevnt av typen PEMFC, og den er utviklet av Toyota Motor Corporation. I kapittel 6 ble virkemåten og komponentene i en PEMFC gitt en innledende beskrivelse, det vil nå bli gått mer i detalj på alle komponentene i en slik brenselcelle, en stabel med slike celler («Fuel Cell Stack»), samt brenselcellesystemet hvor en PEMFC er en av komponentene.

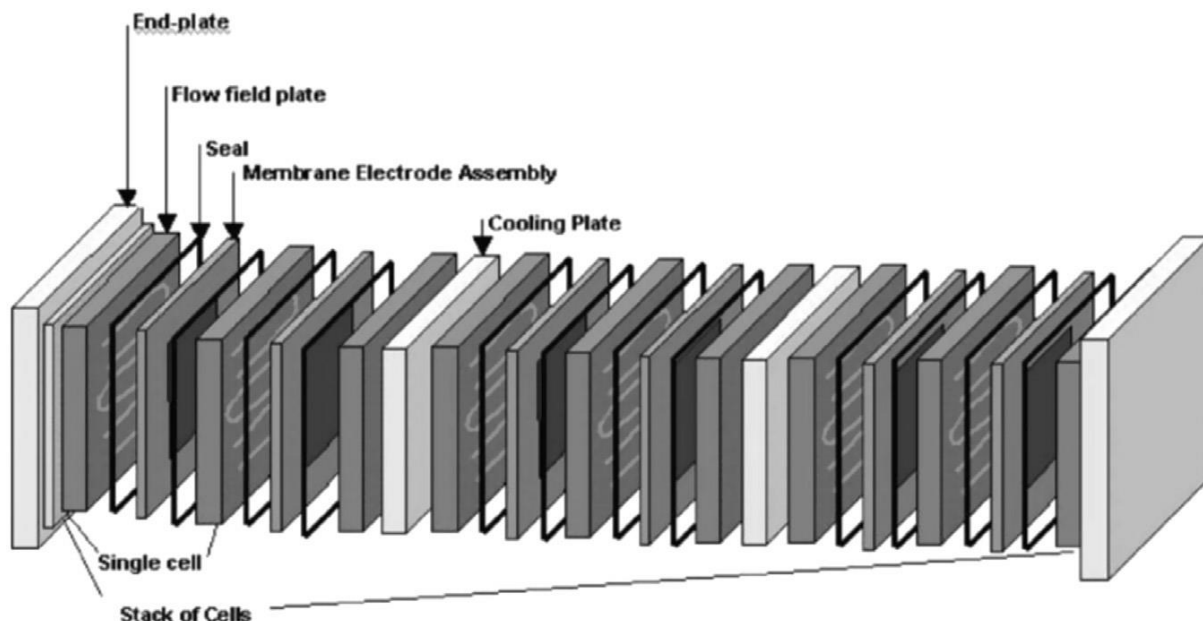
Kjernen i en PEMFC er MEA («Membrane Electrode Assembly»). Denne består, som vist i figur 9.1, av en elektrolytt i midten, og på hver side ligger tetning, elektrokatalysatorlag og gassdiffusjonslag, med tetning innerst. I midten av elektrolytten ligger dessuten membranen («Proton Exchange Membrane»), som danner en tynn barriere mellom oksidasjons- og reduksjonsreaksjonene i cellen og lar protonene migrere fra anoden til katoden. Elektrokatalysatorlaget stimulerer de nevnte oksidasjons- og reduksjonsreaksjonene, mens gassdiffusjonslaget har en rekke funksjoner. Disse inkluderer å sørge for direkte og homogen diffusjon av hydrogen og oksygen til katalysatorlagene, sørge for ledning av elektroner til og fra katalysatorlagene, la vann ved katoden transporteres vekk, la varme fra de elektrokjemiske reaksjonene transporteres vekk, og tilføre strukturell styrke [1]. Hvis man så ser på en hel celle i en PEMFC, får man, som vist i figur 9.2, i tillegg 2 lag med pakninger, grafittplater, strømpopsamlere, og endeplater for anoden og katoden. Pakningene sørger for tetning, mens grafittplatene fungerer som elektroder. Strømpopsamleren sender strømmen til en ekstern krets. Endeplatene («Flow Field Plate») kanalisere hydrogen og oksygen til elektrodene via kanaler, kanalisere vann og varme vekk fra cellen, og tilfører mer strukturell styrke. Dette gjøres ved å sørge for et kontaktrykk stort nok til at reaktantene ikke lekker, og samtidig lavt nok til at kontaktmotstanden mellom forskjellige lag minimeres [1]. En slik celle kan så stables sammen med flere identiske celler for å øke spenningen og danne en «Fuel Cell Stack». I en slik stabel settes det også inn kjøleplater med 2-4 celler mellom hver plate, for å holde temperaturen i brenselcellen på et optimalt nivå [1]. Figur 9.3 viser en «Fuel Cell Stack».



Figur 9.1: Komponentene i MEA [1]

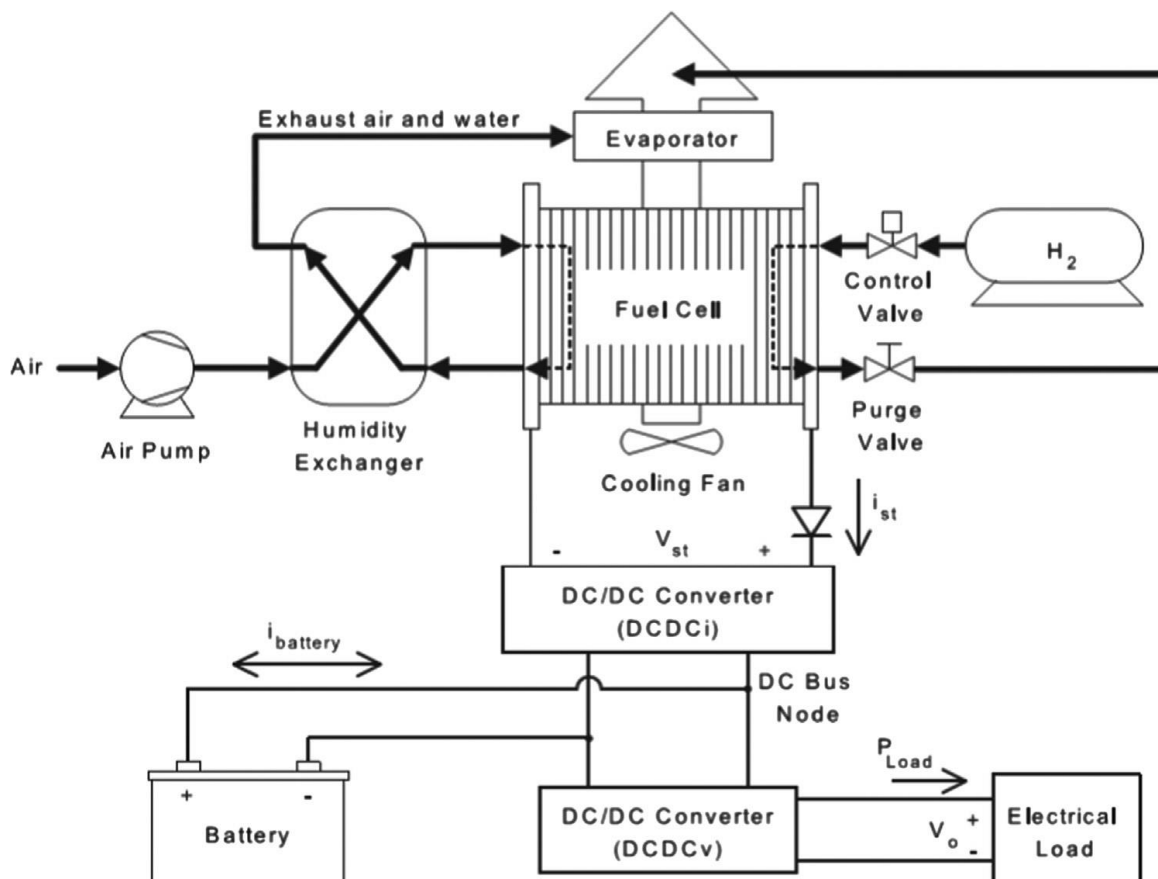


Figur 9.2: En enkel celle i en PEMFC [1]



Figur 9.3: En stabel med PEMFC-celler ("Fuel Cell Stack") [1]

En slik «Fuel Cell Stack» er en viktig komponent i et energisystem som kan kalles brenselcelle/batteri hybridssystem, den samme typen energisystem som er valgt til fartøyet i denne rapporten. Figur 9.4 viser en generell oppbygning for et slikt system, med mulige komponenter. Det er ikke et nøyaktig bilde av hvordan det endelige energisystemet i denne rapporten vil se ut, men det er en god illustrasjon av det generelle prinsippet for et slikt system.

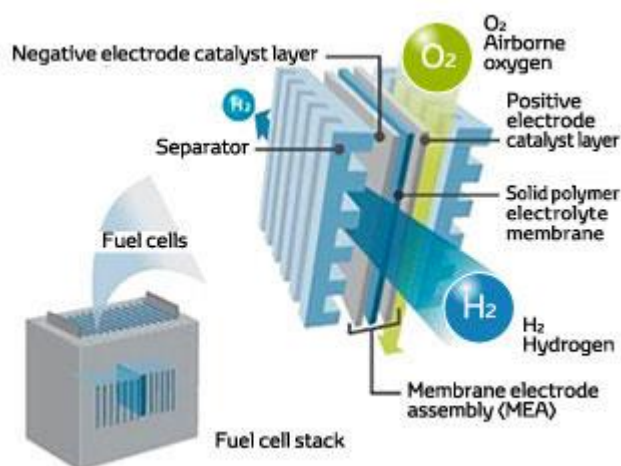


Figur 9.4: Generell oppbygning av et brenselcelle/batteri hybridssystem [1]

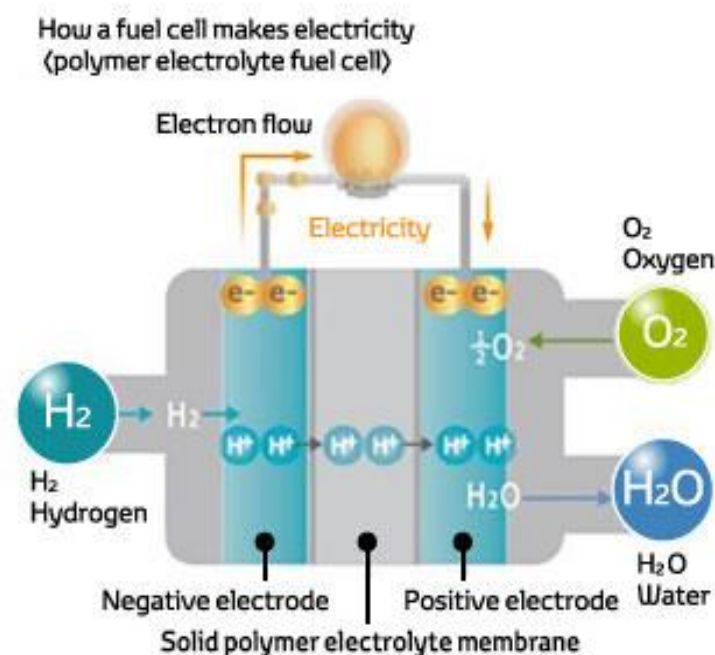
Toyota er med sitt TFCS verdensledende på PEMFC-teknologi pr. november 2014 [23, Vedlegg F], og det er dette systemet gruppen har valgt å basere energisystemet til USV'en i denne rapporten på, med visse modifikasjoner og utskiftninger. Teknologien og prinsippene i TFCS er de samme som er beskrevet ovenfor, men i forhold til standard PEMFC-teknologi har de gjort flere forbedringer som har økt både virkningsgrad, spesifikk energi, energitetthet, etc. En del av detaljene rundt dette er beskyttet informasjon.

Denne informasjonen er tilgjengelig gjennom patenter som beskrevet i kapittel 9.2.1.

Forbedringene inkluderer en katalysator med høyere reaktivitet, samt tynnere elektrolytt



Figur 9.5: PEMFC med komponenter og PEMFC-stack [23]



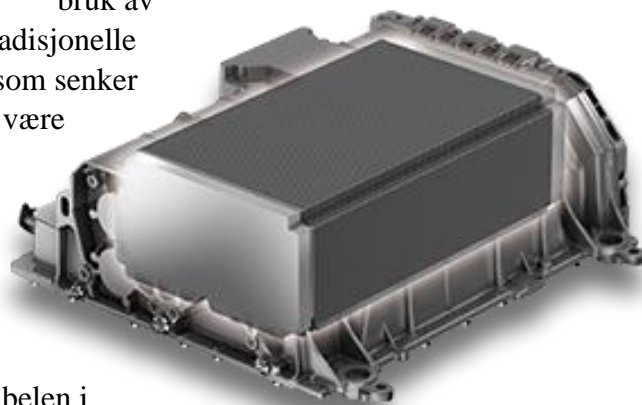
Figur 9.6: Virkemåten til en PEMFC [23]

endeplater akkumuleres en del vann inne i cellen, noe som senker den elektriske effekten, men dette problemet skal altså være fjernet, eller i alle fall kraftig redusert, i TFCS [23].

Dette gjør også at det ikke er behov for en befukter i TFCS [Vedlegg F]. Figur 9.5 viser en PEMFC og PEMFC-stack, figur 9.6 viser hvordan en PEMFC genererer elektrisitet, og figur 9.7 er en illustrasjon av en PEMFC-stack som benyttes i TFCS [23]. Alle 3 figurene er Toyotas egne illustrasjoner. Brenselcellestabelen i figur 9.7 er den samme som benyttes i Toyota Mirai, og har en effekt på 114 kW [Vedlegg A]. Dette er altså en mye

membran, noe som gir økt proton konduktivitet. Gassdiffusjonslaget er tynnere og har lavere tetthet, noe som resulterer i bedre diffusjon. Alle disse faktorene er med på å gi bedre elektrodereaksjoner. Når det gjelder endeplatene/«Flow Field Plate», har Toyota konstruert en ny type som de kaller «3D Fine-mesh Flow Field». Denne utformingen av platene skal sørge for en jevn tilførsel av luft til katoden, samtidig som den sørger for at det genererte vannet transporteres ut av cellen, noe som øker elektrisitetsgenereringen. Ved bruk av

tradisjonelle



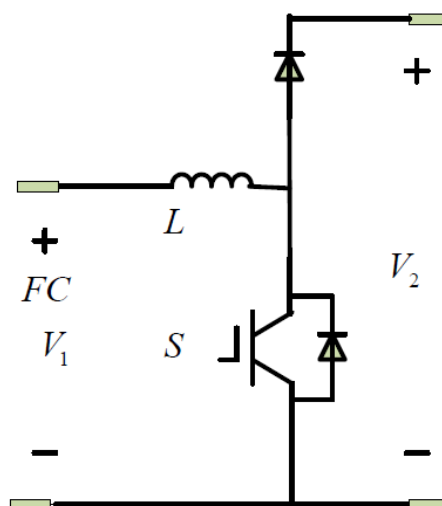
Figur 9.7: PEMFC-stack fra TFCS [23]

høyere effekt enn det som er nødvendig i fartøyet som omhandles i denne rapporten, og brenselcellestablene som benyttes i dette fartøyet vil følgelig være mindre enn den som vises i figur 9.7. I kapittel 6.4.6 ble masse (6.15) og volum (6.16) for en PEMFC som kan levere den nødvendige effekten på 50 kW [6] beregnet. Gruppen velger imidlertid å bruke 2 stykk PEMFC på 25 kW hver, i stedet for én på 50 kW. Dette er for å imitere det dieselelektriske systemet foreslått av designerne av fartøyet [3,5,6] mest mulig. Slik som gruppen vurderer det er det 2 fordeler med dette. For det første gir det en jevnere massefordeling i fartøyet, noe som er positivt for fartøyets bevegelser i sjø. Den andre fordelen er at det sørger for redundans i form av et todelt energisystem. Dette gjør at fartøyet fremdeles har energi til å ta seg tilbake til basen, selv om den ene halvdel av energisystemet skulle falle ut. Gruppen velger derfor å plassere 2 stykk 25 kW PEMFC med den beregnede massen (6.15) og volumet (6.16) i samme posisjon som de 2 dieselgeneratorene er plassert i det dieselelektriske systemet (se figur 4.1).

9.2.3. PEMFC «Boost Converter»

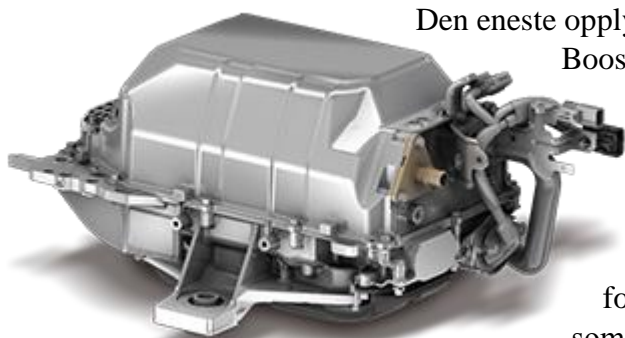
Det som kalles «FC Boost Converter» i TFCS er en DC/DC omformer som tar likestrømmen fra brenselcellen og omformer den til likestrøm med høyere spenning. Den maksimale spenningen ut av omformeren er 650 V. En modell av en typisk «Boost Converter» er vist i figur 9.8, hvor FC er «Fuel Cell», V_1 spenning inn i omformeren, V_2 er spenning ut av omformeren, S er en «Switch», og L er en spole («Inductor») [25]. Ved å gjøre spenningen så høy har det vært mulig å redusere antallet individuelle brenselceller i stabelen, og redusere massen og volumet til de andre komponentene i brenselcellesystemet [23, Vedlegg F]. Siden gruppen valgte å benytte 2 stykk 25 kW PEMFC for å få et todelt energisystem, er det naturlig å benytte 2 stykk «FC Boost Converter» også, en til hver PEMFC.

Plasseringen av disse blir inntil hver sin PEMFC, i omtrent den samme posisjonen som AC/DC omformerne i det dieselelektriske systemet (se figur 4.1).



Figur 9.8: Modell av typisk DC/DC "Boost Converter" [25]

Den eneste opplysningen Toyota gir om størrelse og masse for sin «FC Boost Converter» er at volumet er 13 liter [Vedlegg A]. Som beskrevet i kapittel 4.3.5 vurderer gruppen det som rimelig å anta at masse og volum for en AC/DC omformer («Inverter») og en DC/DC omformer («Converter») er omtrent lik. Det vil trolig være litt forskjell pga. forskjellige komponenter i de forskjellige omformerne, men på omformere av størrelsen som må benyttes i et fartøy som USV'en i denne rapporten vil sannsynligvis ikke forskjellen være stor nok



Figur 9.9: Illustrasjon av "FC Boost Converter" i TFCS [23]

til å ha en merkbar effekt på det endelige resultatet. Det blir følgelig ikke nødvendig å gjøre noen beregninger angående forandringer i masse og volum når 2 AC/DC omformere byttes ut med 2 DC/DC omformere («FC Boost Converter»).

9.2.4. «Power Control Unit» (PCU)

En viktig komponent i TFCS er en «Power Control Unit» (PCU). I TFCS er dette en enhet som inkluderer en DC/AC omformer som tar likestrømmen fra brenselcellen og omformer den til vekselstrøm til de elektriske motorene, en DC/DC omformer som kontrollerer og omformer strømmen til og fra batteriene, i tillegg til elektroniske komponenter som automatisk regulerer effekt og energi fra brenselceller, samt bruk og opplading av batterier [23].

Denne enheten må modifiseres en del for å passe optimalt inn i energisystemet til fartøyet i denne rapporten. For det første trengs det ikke noen DC/AC omformere, siden de elektriske motorene i USV'en er av typen DC [6], ikke AC som i TFCS [Vedlegg A]. DC/DC omformeren som behandler strømmen fra batteriene kan beholdes, men det elektroniske styringssystemet som regulerer effekt og energi må modifiseres en del for å sikre optimal funksjon for et ubemannet sjøfartøy. Dette systemet vil nødvendigvis bli litt forskjellig fra en personbil, hvor f.eks. batteriene kan lades i nedoverbakker.

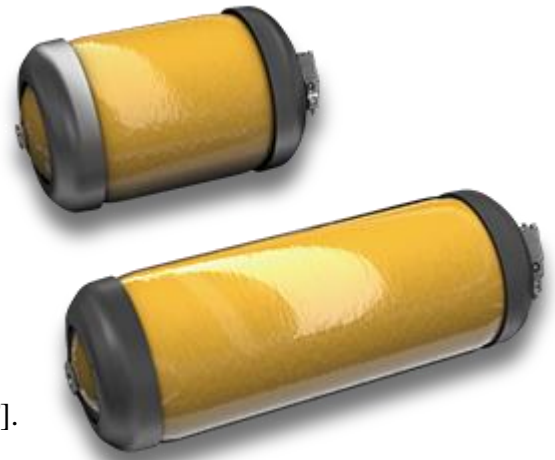


Figur 9.10: Illustrasjon av PCU i TFCS [23]

Når det gjelder masse og volum for denne enheten er det ingen informasjon tilgjengelig i skrivende stund, og enheten vil uansett bli modifisert som nevnt ovenfor, så det er ikke mulig å beregne noen nøyaktige verdier. Det er allikevel rimelig å anta, basert på hva enheten skal inneholde, at størrelsen ikke er større enn at denne enheten uten problem vil få plass i fartøyetets øvre del. Den nøyaktige plasseringen er ikke så viktig, det viktigste er at den blir plassert slik at all strøm, både fra brenselceller og batterier, går gjennom denne enheten før den fordeles videre ut til elektriske motorer, AUV, instrumenter, tilleggskomponenter, etc. Når det gjelder masse er det vanskelig å anslå en nøyaktig verdi. Gruppen mener derfor det er mest fornuftig å vente med dette til alle komponentene i energisystemet er gjennomgått.

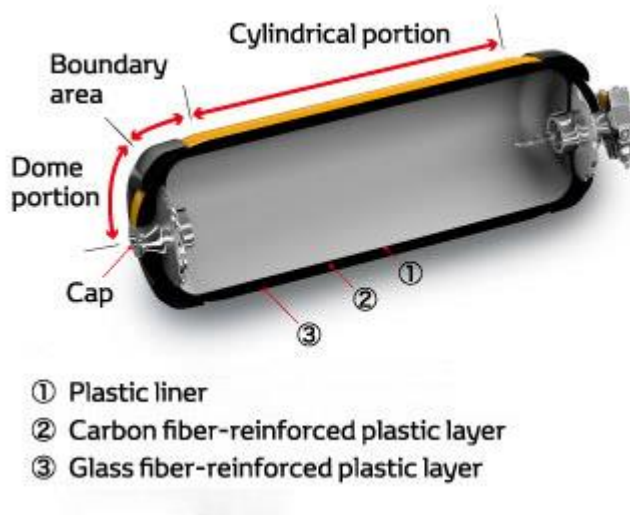
9.2.5. Hydrogentanker

Toyota bruker egenutviklede høytrykkstanker for lagring av hydrogen i TFCS. Dette er et av områdene teknologien i TFCS er verdensledende pr. november 2014 [23, Vedlegg F]. Tankene består av 3 lag, og har et normalt lagringstrykk på 70 MPa (700 bar) [Vedlegg A]. Det innerste laget er en plastfôring som forhindrer lekkasje av hydrogengass, det midterste laget er plast forsterket med karbonfiber som sørger for strukturell styrke, og det ytterste laget er plast forsterket med glassfiber som beskytter tankene mot skader fra eksterne krefter [Vedlegg A]. Denne teknologien har oppnådd en verdensledende andel av hydrogen på 5,7 wt% [23, Vedlegg F]. Resten av massen er da selve tanken.



Figur 9.11: Illustrasjon av hydrogentankene i TFCS [23]

Gruppen har valgt å benytte denne teknologien, som er tilgjengelig gjennom patenter som beskrevet i kapittel 9.2.1, til hydrogentankene som skal benyttes på USV'en. I kapittel 6 ble det besluttet å ha en kapasitet på 190 liter på hydrogentankene. Massen til en tank på 190 liter (6.9) og massen til 190 liter hydrogen ved



Figur 9.12: Oppbygningen til hydrogentankene i TFCS [23]

hydrogentank ved siden av hver sin PEMFC, i rommet hvor dieselgeneratorene er plassert i det dielelektriske energisystemet (se figur 4.1).

det gitte trykk (6.11) ble beregnet i kapittel 6.4.4. For å få et todelt energisystem, samt en jevn massefordeling, vil det bli benyttet 2 stykk hydrogenstanker på 95 liter hver. Sannsynligvis vil massen til disse 2 tankene være litt høyere enn massen til én tank på 190 liter, men forskjellen vil trolig ikke være stor nok til å få en merkbar effekt på det endelige resultatet. Gruppen antar derfor at massen av de 2 nevnte tankene er omtrent lik som massen til én tank på 190 liter. Disse tankene vil enkelt få plass i det ledige rommet man får ved å fjerne dieselgeneratorene i fartøyets øvre del. Gruppen plasserer derfor én 95 liters

9.2.6. Luftkompressor og annet tilleggsutstyr

Opplysningene om luftkompressor og annet tilleggsutstyr i TFCS er beskyttet, men de er tilgjengelige gjennom patenter som beskrevet i kapittel 9.2.1. Gruppen har imidlertid ikke tilgang til disse, så det må derfor bli antatt verdier for masse og volum av luftkompressorene

og annet tilleggsutstyr i denne rapporten. Det andre tilleggsutstyret kan inkludere ventiler, vifter, pumper, små ECU'er («Energy Control Unit») for alle komponentene, og diverse kabler/rør, men ikke nødvendigvis alle disse. Befukter er ikke nødvendig i TFCS siden systemet benytter et lukket sirkulasjonssystem for vannet [Vedlegg F].

Det er naturligvis et usikkerhetsmoment å anta verdier for masse og volum for alle disse komponentene, i tillegg til verdier for masse og volum av PCU'en fra kapittel 9.2.4, men gruppen mener det er det beste alternativet i dette tilfellet. Når det gjelder volum og geometri mener gruppen det er rimelig å anta at PCU, luftkompressor og annet tilleggsutstyr får plass i fartøyets øvre del, siden brenselcellene tar så mye mindre plass enn dieselgeneratorene. Den viktigste faktoren i den nøyaktige plasseringen av de nevnte komponentene er massefordeling. De bør plasseres slik at massen av komponentene i det fremre rommet er mest mulig lik som massen av komponentene i det bakre rommet. Det bør ikke være noe problem, siden det er én PEMFC i hvert av disse rommene, og hver PEMFC trenger et identisk sett med tilleggsutstyr. Den eneste komponenten som det bare er én av er PCU'en, men det er rimelig å anta at massen av denne enheten er lav nok til at massefordelingen holder seg på et akseptabelt nivå. PCU'en plasseres i det bakre rommet, dermed er det kortest mulig vei fra PCU'en til de elektriske motorene som ligger bakerst i fartøyets nedre del (se figur 4.1). Noe av tilleggsutstyret, f.eks. ventiler og kabler/rør, må naturligvis fordeles ut over store deler av fartøyet, men dette er relativt små og lette komponenter som det er beregnet plass til i fartøyets design, og massefordelingen som følge av disse komponentene antas å være rimelig jevn. Når det gjelder en verdi for massen av alle komponentene, vil dette bli vurdert etter at modellen av energisystemet er gjennomgått.

Energi- og effektbehovet til tilleggsutstyret, inkludert luftkompressor, er anslått til å være opp mot 30 % av den produserte energien og effekten fra en PEMFC [25]. Av dette tar luftkompressoren mesteparten, opp mot 93,5 % [25]. Dermed må det gjøres noen nye beregninger angående effekt og energi fra brenselcellene, og nødvendig størrelse på disse. Hvis det antas at hver PEMFC må kunne levere en maksimal effekt på 25 kW, og at effekten som går vekk til tilleggsutstyret kommer i tillegg til denne, må den totale maksimale effekten ut av hver PEMFC være mer enn 25 kW for å dekke effekten som forsvinner til tilleggsutstyret. Hvis det antas «Worst Case», altså at tilleggsutstyret krever 30 % av effekten som kommer ut av hver PEMFC, må den totale maksimale effekten ut av hver PEMFC være:

$$25 \text{ kW} + P_{PEMFC} \cdot 0,3 = P_{PEMFC}$$
$$P_{PEMFC} = \frac{25 \text{ kW}}{0,7} \approx \underline{35,7 \text{ kW}} \quad (9.1)$$

Den totale maksimale effekten ut av hver PEMFC må altså være 35,7 kW, ikke 25 kW som tidligere antatt. Dette medfører også at massen og volumet på hver PEMFC blir større enn tidligere beregnet. Ved å bruke verdiene for spesifikk effekt og effekt-tetthet fra TFCS [Vedlegg A] kan massen og volumet beregnes. Massen av en 35,7 kW PEMFC blir:

$$m_{PEMFC} = \frac{P_{PEMFC}}{P_{spesifikk}} = \frac{35,7 \text{ kW}}{2,0 \text{ kW/kg}} \approx \underline{17,9 \text{ kg}} \quad (9.2)$$

Volumet av en 35,7 kW PEMFC blir:

$$V_{PEMFC} = \frac{P_{PEMFC}}{P_{tetthet}} = \frac{35,7 \text{ kW}}{3,1 \text{ kW/liter}} \approx \underline{11,5 \text{ liter}} \quad (9.3)$$

Den totale energimengden tilgjengelig ut av PCU fra brenselcellene med BAT fra 190 liter hydrogen ved 700 bar ble i kapittel 6.4.5 beregnet til å være 126 kWh (6.13). Hvis man også her antar «Worst Case», altså at tilleggsutstyret forbruker 30 % av denne energien, er den tilgjengelige energien etter at tilleggsutstyret har fått sin energi lavere enn 126 kWh. Energi tilgjengelig pr. oppdrag etter at energien til tilleggsutstyret er trukket fra blir da:

$$E_{ut,PEMFC} = 126 \text{ kWh} \cdot 0,7 \approx \underline{88,2 \text{ kWh}} \quad (9.4)$$

Den totale energimengden som er tilgjengelig pr. oppdrag fra brenselcellene er altså bare 88,2 kWh (9.4), ikke 126 kWh (6.13) som tidligere beregnet. Det gjør at en større del av energien i energisystemet må tilføres fra Li-H₂O batteriene i forhold til det som ble beregnet i kapittel 6. Når det gjelder den økte massen (9.2) og volumet (9.3) for hver PEMFC bør det ikke være noe problem, siden massen og volumet (4.1) av dieselgeneratorene som fartøyet er designet med [3,5,6] uansett er veldig mye høyere.

9.3. Li-H₂O batterier

De valgte Li-H₂O batteriene fra Polyplus Battery Company trenger som tidligere beskrevet jevn tilgang på vann. Det enkleste og mest fornuftige blir da å plassere batteriene i den delen av fartøyet som er nedsenket i vann. Det må derfor beregnes omtrent hvor mange batterier det er plass til i det nedsenkede volumet, og hvor mye energi man kan få ut av disse batteriene. Til dette brukes de veiledende verdiene for spesifikk energi og energitetthet oppgitt av Polyplus Battery Company [20].

I [3] er det nedsenkede volumet til fartøyet oppgitt å være 4,148 m³, altså 4148 liter. En del av dette volumet blir tatt opp av komponenter som må være i denne delen av fartøyet. Dette inkluderer 2 stykk 20 kW elektriske motorer med tilhørende girkasse og drivaksel koblet til hver sin propell, ballasttanker til vann med samlet volum 95 liter, undervannsinstrumenter, samt kabler, rør og slanger for elektrisitet, vann og drivstoff [3,5,6]. Det er naturligvis heller ikke mulig å fylle opp hele det ledige volumet i den nedsenkede delen av fartøyet med batterier. Kombinasjonen av skrogets geometri, de ovennevnte komponentenes geometri, og batterienes geometri, vil gjøre det umulig å fylle opp hele det ledige tomrommet med batterier. Gruppen vurderer det derfor som fornuftig å anta at 2/3 av fartøyets nedsenkede volum okkuperes av de ovennevnte komponentene, samt nødvendig tomrom til å gjøre nødvendig vedlikehold. Følgelig antas det at 1/3 av fartøyets nedsenkede volum kan benyttes til Li-H₂O batterier. Volumet som er tilgjengelig til batterier blir dermed:

$$V_{Li-H_2O,1} = V_{nedsenket} \cdot \frac{1}{3} = 4148 \text{ liter} \cdot \frac{1}{3} \approx \underline{1383 \text{ liter}} \quad (9.5)$$

For å legge inne en ekstra sikkerhet, både i forhold til masse og volum, velger gruppen imidlertid å runde ned batterivolumet til 1000 liter. Siden spesifikk energi og energitetthet er lik for disse batteriene [20] blir massen av batteriene 1000 kg. Med den gitte energitettheten til de valgte batteriene [20], og virkningsgraden [37], blir dermed den tilgjengelige energien ut av PCU fra batteriene:

$$E_{ut,Li-H_2O} = E_{tetthet} \cdot V_{Li-H_2O,2} \cdot \eta_{Li-H_2O} \cdot \eta_{DC/DC} \cdot \eta_{PCU}$$

$$E_{ut,Li-H_2O} = 1,5 \text{ kWh/liter} \cdot 1000 \text{ liter} \cdot 0,90 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \quad (9.6)$$

$$\underline{E_{ut,Li-H_2O} \approx 1098 \text{ kWh}}$$

9.4. Total energimengde, masse og volum

Beregningene som er gjort i dette og foregående kapitler kan nå brukes til å beregne verdier for total energimengde tilgjengelig fra energisystemet, samt til å kontrollere at total masse og volum ikke overskrider grensene satt av det dieselelektriske systemet i kapittel 4. I kapittel 4.3.5 forklares det at noen av komponentene i de forskjellige energisystemene blir identiske eller nær identiske, i alle fall i forhold til masse og volum, og at disse komponentene derfor ikke trenger å regnes med i beregningene angående total masse og volum for de forskjellige energisystemene. I kapittel 4.3.7 blir så total masse (4.11) og volum (4.12) beregnet for komponentene i det dieselelektriske energisystemet som erstattes av andre komponenter i de andre energisystemene. Det er altså disse verdiene for masse og volum som må brukes som maksgrenser for brenselcelle/batteri energisystemet som det lages en teoretisk modell for i dette kapitlet.

Masse og volum for de forskjellige komponentene i brenselcelle/batteri energisystemet har blitt forandret i noen tilfeller. I andre tilfeller er masse og/eller volum ukjent og må følges anslås. Her følger en oversikt over komponentene i det endelige energisystemet, og eventuelle verdier for masse og volum («ukjent» indikerer verdier som må anslås, «ikke nødvendig» indikerer verdier som ikke trengs å ta med i beregninger):

Komponent	Masse	Volum
2 x 35,7 kW PEMFC	17,9 kg (pr. stykk)	11,5 liter (pr. stykk)
2 x DC/DC «Boost Converter»	Ikke nødvendig	Ikke nødvendig
PCU med DC/DC omformer	Ukjent	Ukjent
2 x 20 kW DC elektrisk motor	Ikke nødvendig	Ikke nødvendig
Li-H ₂ O batterier	1000 kg (total)	1000 liter (total)
2 x 95 liter H ₂ -tank	135,8 kg (total)	190 liter (total)
Luftkompressor og annet tilleggsutstyr	Ukjent	Ukjent
Komprimert hydrogengass (drivstoff)	7,76 kg	190 liter

Tabell 9.1: Komponenter i brenselcelle/batteri energisystem med tilhørende masse og volum

Som det kan leses i tabell 9.1 må det anslås en verdi for masse av PCU, luftkompressor og annet tilleggsutstyr, samt en verdi for volum av de samme komponentene. Den mest fornuftige måten å løse dette på i dette tilfellet er å først beregne masse og volum av energisystemet uten de nevnte komponentene, deretter sammenligne disse verdiene med verdiene for masse (4.11) og volum (4.12) av det dieselelektriske systemet, for så å vurdere om differansen mellom disse verdiene er stor nok til at de ovennevnte komponentene får plass på fartøyet uten at de nevnte maks grensene for masse (4.11) og volum (4.12) overskrides.

Massen av energisystemet uten komponentene med ukjent masse blir:

$$\begin{aligned}
 m_{PEMFC/Li-H_2O,1} &= 2 \cdot m_{PEMFC} + m_{Li-H_2O} + m_{HT} + m_{H_2} \\
 m_{PEMFC/Li-H_2O,1} &= (2 \cdot 17,9) \text{ kg} + 1000 \text{ kg} + 135,8 \text{ kg} + 7,76 \text{ kg} \\
 m_{PEMFC/Li-H_2O,1} &\approx 1179 \text{ kg}
 \end{aligned}
 \tag{9.7}$$

Volumet til energisystemet uten komponentene med ukjent volum blir:

$$\begin{aligned}
 V_{PEMFC/Li-H_2O,1} &= 2 \cdot V_{PEMFC} + V_{Li-H_2O} + V_{HT} \\
 V_{PEMFC/Li-H_2O,1} &= (2 \cdot 11,5) \text{ liter} + 1000 \text{ liter} + 190 \text{ liter} \\
 V_{PEMFC/Li-H_2O,1} &= 1213 \text{ liter}
 \end{aligned}
 \tag{9.8}$$

Massen tilgjengelig til PCU, luftkompressor og annet tilleggsutstyr blir:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{differanse}} &= m_{DE} - m_{PEMFC/Li-H_2O,1} \\
 m_{\text{differanse}} &= 1482 \text{ kg} - 1179 \text{ kg} \\
 m_{\text{differanse}} &= 303 \text{ kg}
 \end{aligned}
 \tag{9.9}$$

Volumet tilgjengelig til PCU, luftkompressor og annet tilleggsutstyr blir:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{differanse}} &= V_{DE} - V_{PEMFC/Li-H_2O,1} \\
 V_{\text{differanse}} &= 1550 \text{ liter} - 1213 \text{ liter} \\
 V_{\text{differanse}} &= 337 \text{ liter}
 \end{aligned}
 \tag{9.10}$$

Masse og volum som er tilgjengelig til PCU, luftkompressor og annet tilleggsutstyr er altså henholdsvis 303 kg (9.9) og 337 liter (9.10). Det bør ikke være noe problem å installere de



nevnte komponentene uten å overskride disse verdiene, siden både fartøyet og energisystemet er relativt lite. Det er dessuten en del tilleggsutstyr til det dieselektriske energisystemet, f.eks. slanger, rør og kabler, som ikke er tatt med i beregningene for å finne total masse (4.11) og volum (4.12) for det systemet. Følgelig vil det i realiteten være enda mer masse og volum tilgjengelig enn det som er beregnet i (9.9) og (9.10). Det er imidlertid som regel fornuftig å beregne for et «Worst Case» scenario, så gruppen vil ikke installere flere komponenter enn det som er beskrevet i tabell 9.1. Det kan imidlertid nevnes at hvis det skulle vise seg å være ledig masse og volum hvis systemet bygges, kan denne ledige plassen brukes til å øke batterimengden, øke størrelsen på hydrogentankene, eller installere andre nyttige komponenter. Alle disse tingene vil øke rekkevidden og virkningsgraden til fartøyet.

Siden det nå er beregnet at masse og volum av brenselcelle/batteri energisystemet er innenfor maksimalgrensene, kan den totale energimengden ut av dette energisystemet beregnes. Energien som er tilgjengelig i systemet kommer fra 2 stykk PEMFC og 1000 kg Li-H₂O batterier.

Den totale energimengden tilgjengelig ut av brenselcelle/batteri energisystemet pr. oppdrag blir:

$$\begin{aligned} E_{ut,PEMFC/Li-H_2O} &= E_{ut,PEMFC} + E_{ut,Li-H_2O} \\ E_{ut,PEMFC/Li-H_2O} &= 88,2 \text{ kWh} + 1098 \text{ kWh} \\ E_{ut,PEMFC/Li-H_2O} &\approx 1186 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (9.11)$$

Den tilgjengelige energimengden pr. oppdrag (9.11) er altså en del lavere enn verdien (6.24) beregnet i den innledende gjennomgangen i kapittel 6, men den er allikevel betraktelig høyere enn den tilgjengelige energimengden pr. oppdrag (4.10) i det dieselektriske systemet foreslått av designerne av fartøyet.

9.5. Total virkningsgrad for PEMFC/Li-H₂O fremdriftssystem

Ved å benytte verdiene som er funnet for virkningsgrad til de forskjellige komponentene blir den totale virkningsgraden til PEMFC/Li-H₂O fremdriftssystemet:

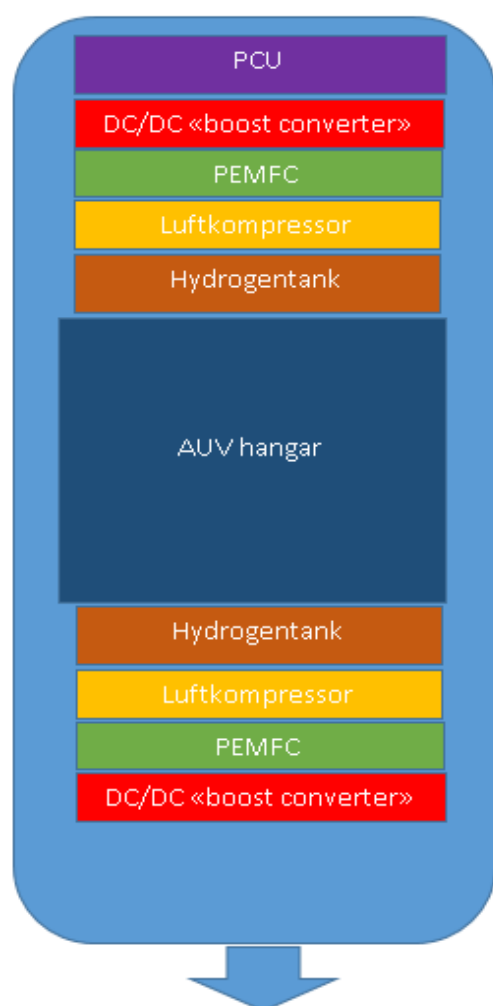
$$\begin{aligned} \eta_{total,PEMFC/Li-H_2O} &= \eta_{FC} \cdot \eta_{DC/DC,1} \cdot \eta_{Li-H_2O} \cdot \eta_{DC/DC,2} \cdot \eta_{PCU} \cdot \eta_{TK} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{GK} \cdot \eta_{DA} \cdot \eta_P \\ \eta_{total,PEMFC/Li-H_2O} &= 0,60 \cdot 0,83 \cdot 0,90 \cdot 0,83 \cdot 0,98 \cdot 0,70 \cdot 0,90 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,65 \\ \eta_{total,PEMFC/Li-H_2O} &\approx 0,13 \end{aligned} \quad (9.12)$$

Den totale virkningsgraden for PEMFC/Li-H₂O fremdriftssystemet er altså omtrent 13 %. Grunnen til at virkningsgraden blir lavere her enn i kapittel 6 er at denne beregningen (9.12) inkluderer energitapet til brenselcellenes tilleggskomponenter. Det er litt uklart i de forskjellige kildene om den oppgitte virkningsgraden for PEMFC (60 %) inkluderer dette energitapet, men gruppen valgte å ta det med i den endelige beregningen (9.12) for ikke å få en urealistisk høy virkningsgrad. 13 % er en litt lavere virkningsgrad enn gruppen håpet på,

men det er en del rom for forbedringer. Med videre forskning, utvikling og optimalisering av alle de forskjellige komponentene i energisystemet bør det være gode utsikter til å heve denne virkningsgraden en god del i framtiden. Gruppen mener det også er viktig å huske på at dette energisystemet har potensialet til å være et veldig rent energisystem fra et miljømessig synspunkt, noe det blir lagt mer og mer vekt på både blant fagfolk, politikere og i befolkningen generelt.

9.6. Oppbygning og virkemåte

I dette delkapittelet vil det bli gitt en forklaring på hvordan den grunnleggende oppbygningen og virkemåten til det valgte brenselcelle/batteri energisystemet er tenkt av gruppen. Komponentene som benyttes er listet opp i tabell 9.1. Plasseringen av disse komponentene er vist i figurene 9.13 og 9.14, og er som følger:



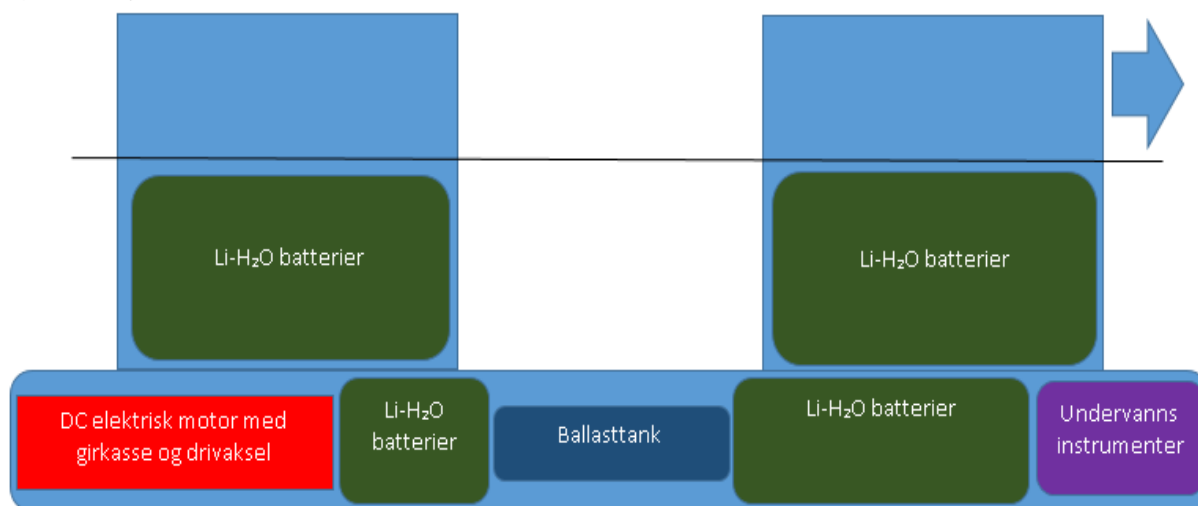
Figur 9.13: Fartøyets øvre del sett ovenfra med komponenter i energisystemet. Pilen indikerer baugen. Plassering av komponenter er omtrentlig, og størrelsene er ikke i nøyaktig skala.

- **Fartøyets øvre del:** PEMFC (2 stykk), DC/DC «Boost Converter» (2 stykk), PCU, hydrogentanker med komprimert hydrogengass (2 stykk), luftkompressor og annet tilleggsutstyr (dobbel sett av alt).
- **Fartøyets nedre del:** Li-H₂O batterier, elektriske motorer med tilhørende girksaker, drivaksler og propeller.

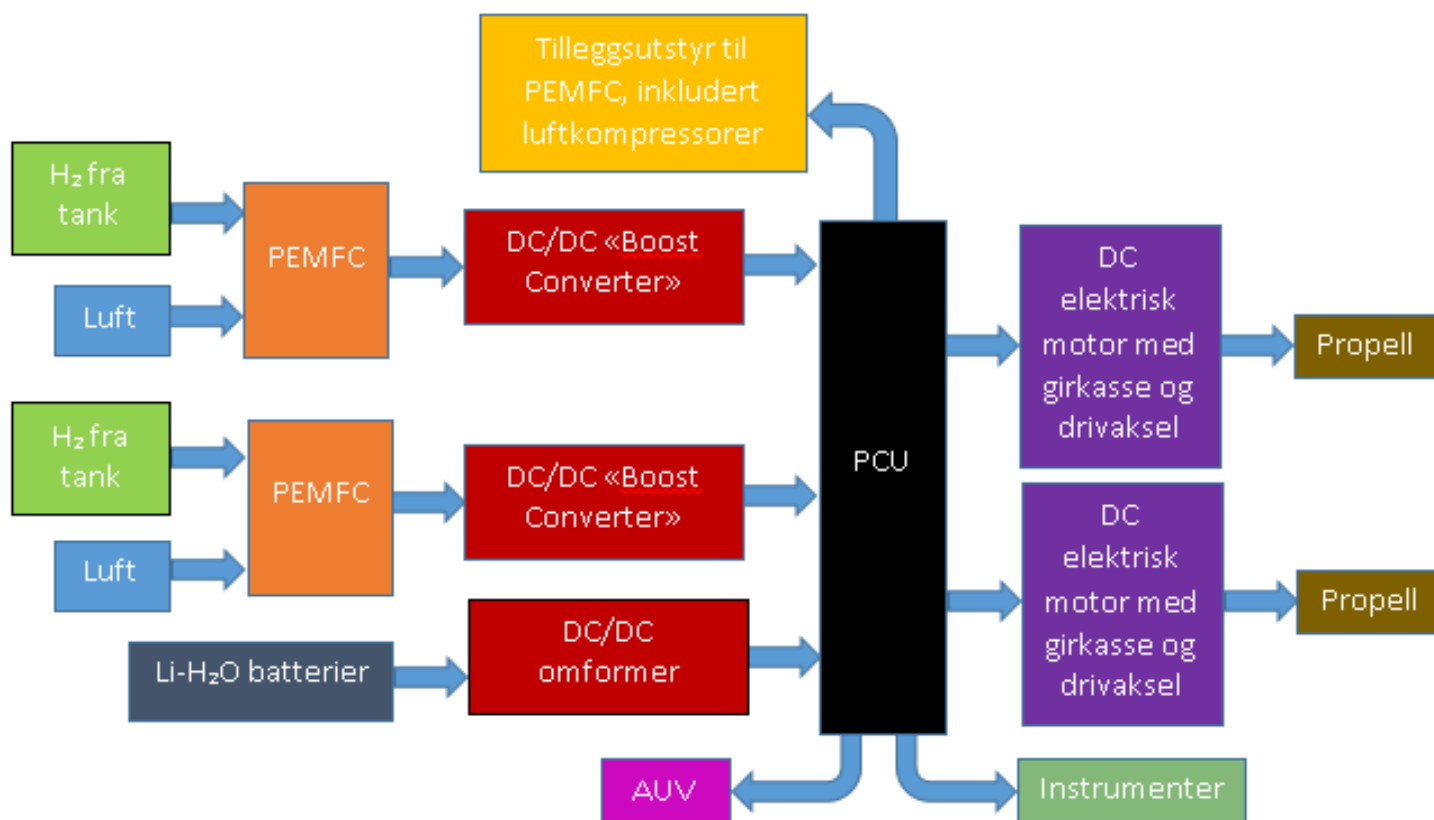
Av tilleggsutstyret er det bare luftkompressorer som er tegnet inn i figurene, siden mye av det andre tilleggsutstyret har relativt liten størrelse (f.eks. ECU) og/eller er fordelt utover store deler av fartøyet (f.eks. kabler). Det vil derfor bli veldig uoversiktlig å presse inn alle disse komponentene i tegningene på dette stadiet. Men det skal ikke være noe problem å få plass til dem på fartøyet, og de ville naturligvis blitt tatt med i en videre fase hvis systemet faktisk skulle blitt bygget.

Det er naturligvis andre komponenter både i fartøyets øvre og nedre del, men dette er komponenter som ikke inngår i energisystemet, f.eks. ballasttankene.

Den andre halvdel av fartøyets nedre del er identisk med halvdel i figur 9.14.



Figur 9.14: Den ene halvdel av fartøyets nedre del sett fra siden med komponenter i energisystemet. Pilen indikerer baugen og den vannrette linjen indikerer vannlinjen. Plassering av komponenter er omtrentlig, og størrelsene er ikke i nøyaktig skala.



Figur 9.15: Flytskjema for energi i endelig brenselcelle/batteri energisystem. Størrelse på komponentene og energistrømmene er ikke i skala.

Måten komponentene er tenkt å virke sammen, illustrert i flytskjema i figur 9.15, er som følger:

- Brenselcellene produserer elektrisk energi ved hjelp av hydrogengass fra hydrogentankene og oksygen fra luften.
- Den elektriske energien fra brenselcellene sendes gjennom hver sin DC/DC «Boost Converter» som øker spenningen på strømmen helt opp til 650 V.
- Denne strømmen sendes så videre til PCU'en.

- Parallelt med dette produserer Li-H₂O batteriene elektrisk energi ved hjelp av litium fra anoden og sjøvann.
- Strømmen fra batteriene sendes direkte til PCU'en som bl.a. inneholder en DC/DC omformer som er tegnet inn separat i figur 9.15.
- PCU'en mottar altså all den elektriske energien og fordeler denne videre til instrumenter, elektriske motorer, AUV og tilleggsutstyr til Brenselcellene. Den regulerer hele tiden hvor mye energi som leveres til de forskjellige komponentene, og den «forteller» Brenselcellene hvor stor effekt de skal levere til enhver tid. Dette gjør den ved hjelp av signaler fra land og/eller forhåndsprogrammering.
- I tillegg anbefaler gruppen, som nevnt i kapittel 2.6, å installere Li-H₂O batterier på AUV'ene som benyttes, slik at rekkevidden og virkningsgraden til hele «Survey» systemet økes.

10. Diskusjon og forslag til videre arbeid

10.1. Diskusjon

Gruppen valgte brenselcelle/batteri hybridssystemet som energisystem for USV'en omhandlet i denne rapporten. Begrunnelsen for dette ble presentert i kapittel 8. I kapittel 9 ble det laget en teoretisk modell av det valgte energisystemet. Det ble utført tekniske beregninger, og det ble laget konseptuelle tegninger for å illustrere oppbygning og virkemåte for energisystemet. Alt dette ble gjort for å gjøre den teoretiske modellen så nøyaktig, detaljert og realistisk som mulig. Det må imidlertid nevnes at dette er en rent teoretisk oppgave, og at det automatisk setter noen begrensninger for denne rapporten. Det betyr bl.a. at gruppen ikke har hatt mulighet til å teste ut noen komponenter eller fartøy i praksis. Dermed er de teoretiske resultatene i denne rapporten ikke testet ut, og det er naturligvis ikke mulig å verifisere disse med full sikkerhet før de kan testes i en virkelig situasjon med et virkelig fartøy. Siden det ikke er mulig i denne omgang, har gruppen gjort sitt ytterste for å være så nøkterne, detaljerte og realistiske som mulig i utførelsen av denne rapporten. Det bør allikevel nevnes at gruppen også har lagt vekt på å benytte nyskapende, fremtidsrettet og miljøvennlig teknologi der det har vært mulig. Dette kan igjen medføre at noen resultater i denne rapporten ikke vil være reelle i en virkelig situasjon, da ny teknologi ofte har mer varierende resultater og høyere feilprosent enn mer tradisjonelle og utprøvde teknologier. Gruppen mener allikevel det er viktig å satse på nye teknologier for å stimulere teknologisk fremgang. Dette gjelder ikke bare i denne rapporten, men innen alle fagområder.

Når det gjelder selve resultatet som er presentert i kapittel 9 mener gruppen at dette er et positivt resultat. Alle de nødvendige komponentene i energisystemet fikk plass på fartøyet uten at maks grensene for masse og volum ble overskredet. Det ble gjort beregninger, og der det var nødvendig ble det benyttet sikkerhetsfaktorer for å lage rom for feilmargin. Virkemåte og oppbygning av systemet ble laget ved hjelp av informasjon fra vitenskapelige artikler, og modifisert av gruppen for å sikre best mulig funksjon for fartøyet i denne rapporten. Gruppen har naturligvis ikke like høy faglig kompetanse på alle områdene som rapporten berører, men de nevnte vitenskapelige artiklene og andre kildene har blitt brukt for å skape et mest mulig helhetlig bilde.

Den totale energimengden i systemet (9.11) er beregnet til å være betraktelig høyere enn energimengden (4.10) i det dielelektriske systemet foreslått av designerne av USV'en. Dette bør gi en kraftig økning i rekkevidde for USV'en, og hvis batteriene til AUV'ene også skiftes ut slik det er foreslått av gruppen, vil også rekkevidden til hele «Survey» systemet forbedres. Det bør også være en stor fordel at energisystemet er todelt, siden dette gir en redundans der fartøyet kan komme seg tilbake til basen selv om den ene halvdel av energisystemet faller ut. Kombinasjonen av brenselceller og batterier med BAT gir også en veldig gunstig kombinasjon av høy tilgjengelig energimengde og en effekt som er regulerbar etter behov. Gruppen vurderer følgelig energimengde, effekt og rekkevidde som store fordeler med brenselcelle/batteri energisystemet. Den beregnede virkningsgraden på 13 % (9.12) virker ganske lav, men som beskrevet i kapittel 9.5 er det noen usikkerhetsmomenter og store forbedringsmuligheter i denne. Med god teknologisk utvikling, og optimalisering av de



forskjellige komponentenes samhandling, er det gode sjanser til å heve denne virkningsgraden betraktelig både på kort og lang sikt.

Brenselcelle/batteri energisystemet har potensial til å være et mye mer miljøvennlig system enn et tradisjonelt dielelektrisk system. Det er imidlertid en del forutsetninger for dette, bl.a. at hydrogengassen som brukes som drivstoff i brenselcellene helst bør være produsert ved elektrolyse av vann der elektrisiteten er produsert av fornybar energi. Dette er gjennomgått mer detaljert i kapittel 6. Selv om noen forutsetninger kan være vanskelige å oppnå i skrivende stund kan dette fort forandre seg. Det investeres mye tid og penger i forskning både på brenselceller og batteriteknologi, samt produksjon, lagring og distribusjon av hydrogen, så dette er teknologier som etter all sannsynlighet bare vil bli mer og mer miljøvennlige for hvert år som går. Gruppen vurderer det derfor som utelukkende positivt for miljøet å satse på slike teknologier, og det vil trolig gi en stor miljøgevinst i framtiden.

Når det gjelder økonomi og kostnader for brenselcelle/batteri energisystemet presentert i kapittel 9 er det umulig å gjøre et fornuftig overslag med konkrete summer. Det er fordi mye av teknologien er såpass ny at det ikke engang foreligger innkjøpspriser på de forskjellige komponentene. Det kan allikevel sies med stor sikkerhet at innkjøpsprisen til dette energisystemet vil være betraktelig høyere enn innkjøpsprisen til et dielelektrisk system. Dette er logisk i og med at teknologiene som benyttes er så nye, og ny teknologi er generelt dyrere enn gammel teknologi. I tillegg er litium og hydrogengass relativt dyre brensel i forhold til standard dieselolje. Levetiden og påliteligheten til et energisystem er også viktige faktorer i forhold til totale kostnader, og levetiden og påliteligheten til brenselcelle/batterisystemet i denne rapporten må sies å være høyst usikker pga. den nye og uprøvde teknologien. Toyota har imidlertid testet sitt TFCS grundig, så den største usikkerheten ligger hos Li-H₂O batteriene til Polyplus Battery Company. Brenselcelle/batteri energisystemet er imidlertid et mye mer statisk system enn det dielelektriske, og dette vil sannsynligvis resultere i mindre slitasjeskader og lavere vedlikeholds krav, noe som kan kutte ned kostnadene. Siden rekkevidden til hele «Survey» systemet trolig vil forbedres ved å implementere alle gruppens forslag, vil dette på sikt være en gunstig økonomisk faktor i forhold til det dielelektriske systemet, siden flere, lengre og lønnsomme oppdrag kan utføres. Gruppen vurderer allikevel kostnader, levetid og pålitelighet som de største utfordringene til brenselcelle/batteri energisystemet. Alle disse 3 faktorene vil sannsynligvis komme dårligere ut i dette energisystemet enn i det dielelektriske systemet i skrivende stund. Det er imidlertid vanskelig å si om utfordringene er foreløpig uoverkommelige, eller om systemet er levedyktig allerede i dag på tross av disse utfordringene. Dette vil sannsynligvis bli klarere med praktiske tester. Gruppen vurderer det allikevel som positivt å satse på dette energisystemet, bl.a. fordi videre satsing på de involverte teknologiene vil bidra til å minske, og potensielt fjerne helt, de ovennevnte utfordringene. Med rett framgang gjennom forskning, utvikling og testing kan disse 3 utfordringene være snudd til fordeler innen 10-20 år, kanskje enda tidligere.

10.2. Forslag til videre arbeid

Det er mye videre arbeid som kan og bør gjøres før det foreslåtte energisystemet bygges. Det bør aller helst skaffes prototyper av alle komponentene slik at ulike tester kan gjøres for å verifisere de teoretiske resultatene i denne rapporten. Her kan det med fordel involveres

faglige eksperter på de forskjellige områdene som de ulike komponentene berører. Det er også et veldig fremtidsrettet energisystem, og det kan med fordel utføres videre forskning og utvikling av de forskjellige komponentene. Dette vil sannsynligvis gjøre fordelene til energisystemet enda større samtidig som utfordringene vil reduseres. Et forslag til trinnvis videre arbeid kan se ut som følger:

- Innhente enda mer informasjon, få med faglige eksperter på de forskjellige komponentene hvis mulig.
- Lage avtale med Toyota om full tilgang til all informasjon om teknologien i TFCS.
- Innhente detaljert og nøyaktig informasjon om Li-H₂O batteriene.
- Innhente detaljert og nøyaktig informasjon om fartøyet (USV), få med designerne av fartøyet hvis mulig.
- Gjøre nye, flere, og mer nøyaktige tekniske beregninger ved hjelp av den nye informasjonen.
- Lage en mer nøyaktig og detaljert teoretisk modell med oppbygning og virkemåte ved hjelp av den nye informasjonen.
- Lage et teoretisk simulatorprogram som samkjører alle komponenter.
- Skaffe økonomisk støtte til å gjøre innkjøp av prototyper av de forskjellige komponentene.
- Utføre grundig testing av de forskjellige komponentene. Utføre forbedringer på komponentene der det er mulig.
- Sette alle komponentene sammen til en fullstendig modell av energisystemet og teste grundig.
- Skaffe økonomisk støtte til å installere det komplette energisystemet på en fullskala prototype av fartøyet.
- Involvere faglige eksperter på de andre delene av fartøyet og lage en komplett prototype.
- Utføre grundig testing og eventuelle forbedringer på fullskala prototype av fartøyet.
- Teste sammen med AUV'er med de foreslåtte batteriene.
- Starte produksjon av fartøyet (USV) når grundig testing av hele «Survey» systemet er gjennomført.

Det kan også nevnes at i forhold til norske farvann hadde det vært veldig interessant å lagd en større versjon av fartøyet som kunne tålt tøffere sjø- og vindforhold, samt behandlet større AUV'er. Som beskrevet i kapittel 2.2 kontaktet gruppen Stefano Brizzolara (fartøyets designer) om mulighetene innen dette, og han mente at det absolutt er en realistisk mulighet å lage en større versjon. Som fremtidig arbeid kunne det derfor vært interessant å få med seg fartøyets designer på laget for å designe en større versjon av fartøyet, deretter designet en større versjon av det valgte energisystemet, for så å bruke den samme arbeidslisten som ovenfor til å lage en virkelig versjon av fartøyet, med energisystem, til praktisk testing.

11. Konklusjon

Ifølge gruppens beregninger vil det valgte brenselcelle/batteri energisystemet få plass på fartøyet uten at masse- og volumgrenser overskrides, det vil gi mye mer energi enn et tradisjonelt dieselelektrisk system, og det vil være veldig fleksibelt i forhold til effektvariasjoner og redundans. I tillegg kan batteriene som AUV'ene bruker, etter gruppens mening, med fordel byttes ut med de foreslåtte sjøvannsbatteriene. Alle disse faktorene vil gi hele «Survey» systemet bedre rekkevidde. I tillegg har det potensial til å være et veldig miljøvennlig energisystem. Den totale virkningsgraden for hele energisystemet er foreløpig ganske lav, men her er det både usikkerhetsmomenter og store rom for forbedringer. Dette krever imidlertid satsing på forskning og utvikling av denne typen systemer og komponentene de består av. Heldigvis er både brenselceller, batterier, elektriske komponenter og styringssystemer områder som det drives mye og god forskning i. Dermed ser framtidsutsiktene til det valgte energisystemet ganske lyse ut både når det gjelder miljøvennlighet og virkningsgrad.

Kostnadsoverslag med konkrete pengesummer er ikke mulig med de tilgjengelige opplysningene, men det vil trolig være et relativt dyrt system sammenlignet med mer tradisjonelle alternativer. Påliteligheten og levetiden til brenselceller og sjøvannsbatterier er fremdeles en utfordring, men dette er et område der videre forskning og utvikling kan sørge for store forbedringer.

Siden dette er en rent teoretisk rapport, og mye detaljert informasjon har vært utilgjengelig for gruppen både i forhold til fartøyet og komponentene i energisystemet, er det en del usikkerhet rundt noen av resultatene. Den beste måten å verifisere de teoretiske resultatene, samt å gjøre disse mer nøyaktige og detaljerte, er å få tilgang til enda mer informasjon, og aller helst utføre praktiske tester med virkelige komponenter. Et forslag til en mer detaljert plan for videre arbeid er gitt i kapittel 10.2. Her nevnes også mulighetene som ligger i å lage en større versjon av fartøyet, slik at det kan tåle tøffere sjø- og vindforhold, samt behandle større AUV'er. Dette kan muligens være av interesse for den norske olje- og gassindustrien.

Gruppens konklusjon er at brenselcelle/batteri energisystemet gjennom beregninger har positive teoretiske resultater når det gjelder energimengde og rekkevidde. Systemet har dessuten et stort potensial innen miljøvennlighet og virkningsgrad, og det er absolutt et energisystem som fortjener videre satsing innen forskning og utvikling.

Referanseliste

Forsidebildet er tatt fra [6].

- [1]: Sharaf Omar Z., Orhan Mehmet F., An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014), 810-853
- [2]: Bhandari Ramchandra, Trudewind Clemens A., Zapp Petra, Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. *Journal of Cleaner Production* 85 (2014), 151-163
- [3]: Brizzolara Stefano, Curtin Tom, Bovio Marco, Vernengo Giuliano, Concept design and hydrodynamic optimization of an innovative SWATH USV by CFD methods. *Ocean Dynamics* (2012) 62:227-237
- [4]: Pedersen Svein Erik, Gustavsen Jan, Kaasa Svein, Olsen Oddmund, Teknisk formelsamling med tabeller. 7. utgave (2013) Gyldendal Undervisning
- [5]: Brizzolara Stefano, Bovio Marco, Federici Alessandro, Vernengo Giuliano, Hydrodynamic Design of a Family of Hybrid SWATH Unmanned Surface Vehicles. Massachusetts Institute of Technology, Sea Grant College Program, Project No. 2008-ESRDC-01-LEV
- [6]: Brizzolara Stefano, Chryssostomidis Chryssostomos, Design of an Unconventional ASV for Underwater Vehicles Recovery: Simulation of the motions for operations in rough seas. ASNE International Conference on Launch & Recovery, November 14-15, 2012, Linthicum (MD)
- [7]: Nettadresse (hentet april 2015): http://my.teslamotors.com/no_NO/roadster/technology
- [8]: Nettadresse (hentet mars 2015): <http://www.marineonline.no/vetus-drivstofftank.aspx>
- [9]: Nettadresse (hentet mars 2015): <http://www.goldenmotor.com>
- [10]: Catenacci Michela, Verdolini Elena, Bosetti Valentina, Fiorese Giulia, Going electric: Expert survey on the future of battery technologies for electric vehicles. *Energy Policy* 61 (2013), 403-413
- [11]: Pollet Bruno G., Staffell Iain, Shang Jin Lei, Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. *Electrochimica Acta* 84 (2012), 235-249
- [12]: Scrosati Bruno, Garche Jürgen, Lithium batteries: Status, prospects and future. *Journal of Power Sources* 195 (2010), 2419-2430
- [13]: Diouf Boucar, Pote Ramchandra, Potential of lithium-ion batteries in renewable energy. *Renewable Energy* 76 (2015), 375-380



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

- [14]: Miranda D., Costa C.M., Lanceros-Mendez S., Lithium ion rechargeable batteries: State of the art and future needs of microscopic theoretical models and simulations. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 739 (2015), 97–110
- [15]: Siang Fui Tie, Chee Wei Tan, A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013), 82-102
- [16]: Kraysberg Alexander, Ein-Eli Yair, Review on Li–air batteries—Opportunities, limitations and perspective. *Journal of Power Sources* 196 (2011), 886–893
- [17]: Christensen Jake, Albertus Paul, Sanchez-Carrera Roel S., Lohmann Timm, Kozinsky Boris, Liedtke Ralf, Ahmed Jasim, Kojic Aleksandar, A Critical Review of Li/Air Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 159 (2) R1-R30 (2012)
- [18]: Cook C.C., Wagner M.J., Ceramic/polymer solid electrolyte based lithium water primary battery. *Electrochimica Acta* 89 (2013), 778– 783
- [19]: Katoh Takashi, Ina Yasushi, Nakajima Kousuke, Ye Rongbin, Baba Mamoru, Lithium/water battery with lithium ion conducting glass–ceramics electrolyte. *Journal of Power Sources* 196 (2011), 6877– 6880
- [20]: Nettadresse (hentet mars 2015): <http://www.polyplus.com/technology.html>
- [21]: Nettadresse (hentet mars 2015): <http://www.teledyne.com/products/detail/lithium-sea-water-batteries.htm>
- [22]: Nettadresse (hentet mars 2015): http://aa-boschap-no.resource.bosch.com/media/parts/engine_systems_auto_parts_1/hybrid_systems_motorsystems_parts/hybrid_komponenten_inverter_exp_734x350.jpg
- [23]: Nettadresse (hentet mars 2015): http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/fuelcell_vehicle/
- [24]: Toyota opens up its patents to boost FCEV industry collaboration. *Fuel Cells Bulletin*, Volume 2015, Issue 1, January 2015, pages 9-10
- [25]: Han Jingang, Charpentier Jean-Frederic, Tang Tianhao, An Energy Management System of a Fuel Cell/Battery Hybrid Boat. *Energies* 7 (2014), ISSN 1996-1073, pages 2799-2820
- [26]: Lundby Leif, Æsøy Vilmar, Havromsteknologi, kapittel 7: Produksjon av mekanisk og elektrisk energi til havs. NTNU, Institutt for marin teknikk. Nettadresse (hentet mars 2015): <http://www.marin.ntnu.no/havromsteknologi/Bok/Kapittel%207.pdf>
- [27]: Nettadresse (hentet mars 2015): <http://www.kohlerpower.com/industrial/detail.htm?sectionNumber=13261&categoryNumber=12061&prodnum=305661>
- [28]: Nettadresse (hentet mars 2015): https://www.maesco.com/products/kohler/kohler_gas/kohler_gas.html

- [29]: Nettadresse (hentet mars 2015): http://www.gassforum.no/global/91/Dual_Fuelteknologien_Tomas_Fiksdal.pdf
- [30]: Nettadresse (hentet mars 2015): http://www.taylorwharton.com/assets/base/doc/products/cylinders/tw-359_lng_vehicle_fuel_tanks.pdf
- [31]: Nettadresse (hentet mars 2015): <http://www.cngunited.com/cng-tanks-2/>
- [32]: Nettadresse (hentet mars 2015): <http://store.cngunited.com/type-4-cng-tank-15-x-33-9-5-6-gge/>
- [33]: Nettadresse (hentet mars 2015): <http://energilink.tu.no/no/energikalkulator.aspx>
- [34]: Nettadresse (hentet april 2015): https://snl.no/elektrisk_maskin
- [35]: Nettadresse (hentet april 2015): <http://www.sunvertsystems.com/downloads/25kW-grid-tie-Inverter.pdf>
- [36]: Monzer Al Sakka, Joeri Van Mierlo and Hamid Gualous (2011). DC/DC Converters for Electric Vehicles, Electric Vehicles - Modelling and Simulations, Dr. Seref Soylu (Ed.), ISBN: 978-953-307-477-1, InTech
- [37]: Zhang Yancheng, Urquidi-Macdonald Mirna, Highly efficient lithium composite anode with hydrophobic molten salt in seawater. Journal of Power Sources 129 (2004), 312–318

Vedleggsliste

- Vedlegg A: Toyota Mirai FCV: Produktinformasjon
- Vedlegg B: Graaltech Folaga AUV: Produktinformasjon
- Vedlegg C: Hydroid Remus 100 AUV: Produktinformasjon
- Vedlegg D: Bluefin Robotics Bluefin-9 AUV: Produktinformasjon
- Vedlegg E: Kohler Power Systems dieselgenerator: Produktinformasjon
- Vedlegg F: Informasjon mottatt fra Toyota Motor Corporation om Mirai brenselcellebil og «Toyota Fuel Cell System».
- Vedlegg G: Kohler Power Systems naturgassgenerator: Produktinformasjon
- Vedlegg H: Kohler Power Systems bensingenerator: Produktinformasjon
- Vedlegg I: Hidria «Power Control Unit»: Produktinformasjon