



Sjøkrigsskolen

Bacheloroppgave

Studie av LFP batterier og brann

Brannbekjempelse av LFP for undervannsbåt

av

Lasse Ueland Johannessen

Lvert som en del av kravet til graden:

BACHELOR I MILITÆRE STUDIER MED FORDYPNING I MASKINFAG

Innlevert: Mai 2018

Godkjent for offentlig publisering

Publiseringsavtale

En avtale om elektronisk publisering av bachelor/prosjektoppgave

Kadetten har opphavsrett til oppgaven, inkludert rettighetene til å publisere den.

Alle oppgaver som oppfyller kravene til publisering vil bli registrert og publisert i Bibsys Brage når kadetten har godkjent publisering.

Oppgaver som er graderte eller begrenset av en inngått avtale vil ikke bli publisert.

Jeg gir herved Sjøkrigsskolen rett til å gjøre denne oppgaven tilgjengelig elektronisk, gratis og uten kostnader	<input checked="" type="checkbox"/> Ja	<input type="checkbox"/> Nei
Finnes det en avtale om forsinket eller kun intern publisering? (Utfyllende opplysninger må fylles ut)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Hvis ja: kan oppgaven publiseres elektronisk når embargoperioden utløper?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Plagiaterklæring

Jeg erklærer herved at oppgaven er mitt eget arbeid og med bruk av riktig kildehenvisning. Jeg har ikke nyttet annen hjelp enn det som er beskrevet i oppgaven.

Jeg er klar over at brudd på dette vil føre til avvisning av oppgaven.

Dato: 25 – 05- 2018

Lasse Ueland Johannessen

Kadett navn

Kadett, signatur

Forord

Denne oppgaven omhandler brannbekjempelse av branner eller tilløp til brann ved batteriløsninger som benytter seg av jernfosfat-basert kjemi. Da denne type batterikjemi vurderes å anskaffes til Norges nye 212 ubåter. Oppgaven er en del av kravet til graden bachelor i militære studier med fordypning i maskinfag. Arbeidet er utført i perioden fra 08. Januar til 25. Mai 2018.

Det antas at leseren har grunnleggende forståelse for batterikjemi knyttet til litium ion batterier og brannbekjempelse. Jeg vil gjerne takke min kollega og klassekamerat Eirik Kordahl Mikkelsen som til tross for sin egen bacheloroppgave har tatt seg tid til å svare på generelle spørsmål om brannbekjempelse ombord dagens Ula-klasse ubåter. Til slutt vil jeg rette en stor takk til mine to veiledere Sissel Forseth og Mads Jørgen Klausen for grundig og god veiledning gjennom perioden.

Bergen, Sjøkrigsskolen, 25-05-2018

(Signatur)

Oppgaveformulering

I forbindelse med anskaffelsen av nye ubåter har det blitt diskutert om man skal fortsette å ha bly-syre batterier eller litium jernfosfat batterier. I lys av dette har det kommet et behov for å se på forhold knyttet til brann sikkerheten ved batteriløsninger som benytter seg av jernfosfat-basert kjemi. Noen av de områdene som ønskes studert er deteksjon av brann eller termisk hendelse, spredning mellom celler og moduler, avstengnings-/isoleringsmuligheter og slukket metoder og slukkemidler.

Som en del av oppgaven skal det beskrives en restrisiko etter valgte slukkestrategi og teknisk løsning. Oppgaven skal blant annet søke svar på hvilken teknisk løsning og slukkestrategi som vil redusere risikoen på best mulig måte. På bakgrunn av oppgaveformuleringen vil oppgaven forsøke å svare på følgende problemstilling:

Bidrar denne løsningen til å redusere restrisikoen til et akseptabelt nivå?

Sammendrag

I denne oppgaven er det blitt gjennomført en litteraturstudie av 4 punkter tilknyttet litium jernfosfat batterier og brann. Problemstillingen som forsøkes besvart er *bidrar denne løsningen til å redusere restrisikoen til et akseptabelt nivå?*

Oppgaven tar for seg *deteksjon av brann eller termisk hendelse, spredning mellom celler og moduler, avstengning og isoleringsmuligheter, slukkemidler og metoder*. Under hvert av disse punktene sammenligner oppgaven ulike løsninger som reduserer problemene knyttet til de ulike punktene. Videre kommer oppgaven med en anbefaling basert på tilhørende litteratur og diskusjon på hvilken type løsning som best reduserer risikoen.

Løsningen som anbefales består av flere tiltak, herunder gass- og temperatursensorer som er plassert på en slik måte at de klarer å detektere termiske hendelser og branntilløp i batteriene. Det vil være kjøling på hver modul som er kledd i et brannklassifisert materiale som også skal kunne tåle trykket fra en eksplosjon. I cellene vil det finnes en såkalt kjernefilm (beskrevet i 5.1) som ved aktivering hindrer cellene i å oppnå «thermal runaway». Det anbefales videre at batteritanken deles inn i underseksjoner for å ytterligere hindre spredning av en brann. Til slukking av en brann anbefales store mengder vann som først blir initiert av et sprinkelanlegg for den første slukkingen og kjølingen av modulene. Dersom brannen videre utvikler seg anbefales det å dekke modulene med vann. Ved dekking av vann vil underseksjonene bidra til at mindre vann er nødvendig. Risikoer ved valgt løsning er lekkasjer i sprinkelanlegg, utilsiktet utløsning av sprinkleranlegget. Aktiveringen av kjernefilmen innebærer en reduksjon i cellenes ledeevne og dermed levert effekt. Etersom denne aktiveringen skjer i cellene vil det være vanskelig å oppdage.

Det vurderes til at foreslått løsning bidrar til å redusere risikoen til et akseptabelt nivå.

Innholdsfortegnelse

Bilder	8
Tabeller/Diagrammer	8
Nomenklatur/Forkortelser	9
1 Innledning	10
1.1 Bakgrunn for valg av oppgave.....	10
1.2 Begrensninger	11
1.3 Metode	11
1.4 Struktur	12
2. Teori	13
2.1 Oppbygging av LIB	13
2.2 Hvorfor begynner et LFP batteri å brenne og hvordan vil det utvikle seg?	14
2.3 Hva kan gjøres før det begynner å brenne?	16
3 Deteksjon av brann eller termisk hendelse	17
3.1 Gass-sensor	17
3.2 Temperatursensor	18
3.3 Gass- eller temperatursensor	18
3.4 Plassering av sensorene	19
3.5 Anbefaling	21
4 Spredning mellom celler og moduler	22
4.1 Materiale på modulene	22
4.2 Kjøling av modulene	23
4.3 Isolering mot eksplosjon.....	23
4.4 Underseksjoner	24
4.5 Anbefaling	25
5 Avstengning og isoleringsmuligheter	26
5.1 Isolering av celler	26

5.2 Avstengning og isoleringsmuligheter på modulnivå	28
5.4 Anbefaling	28
6 Slukkemidler og metoder	29
6.1 Slukkemidler	29
6.2 Slukkemetoder	32
6.3 Anbefaling	33
7. Sammensatt løsning	34
8. Restrisiko/Konklusjon	36
9. Videre studier	37
10. Kildeliste	38

Bilder

Bilde 1: Skisse av oppbygningen til et batterisystem.....	13
Bilde 2: LFP celle.....	15
Bilde 3: Grunner til brann i LIB.....	15
Bilde 4: Illustrasjon av mulig modulplassering ombord.....	19
Bilde 5: Forslag til plassering av sensorer.....	21
Bilde 6: Skisse av underseksjoner.....	25
Bilde 7: Illustrasjon av kjernefilmens virkemåte.....	27
Bilde 8: Forskjellige slukkemidler på LIB brann.....	30

Tabeller/Diagrammer

Tabell 1	Battericelle reaksjon som funksjon av temperatur	s.18
----------	--	------

Nomenklatur/Forkortelser

BIBS	Built In Breathing System
BMS	Battery Management System
Celle ventilering	Ventilation
FMA	Norwegian defence material agency
LFP	Lithium iron phosphate
LIB	Lithium Ion Batteries
Li-ion	Lithium ion

1 Innledning

Større Litium ion batterier (LIB) blir mer og mer brukt på større plattformer som biler og overflatefartøyer grunnet deres høye energitetthet og lave feilrate. Teknologien er dog lite prøvd ombord på ubåter og fartøyer under vann der det stilles større krav til sikkerhet mot ulykker. En av de viktigste grunnene for dette er at det er svært begrenset med fluktmuligheter på en ubåt som går neddykket dersom en ulykke skulle skje. Oppgaven tar for seg fire punkter knyttet til LIB. Til disse punktene er det knyttet flere faremomenter som skal forsøkes løst. Vedrørende deteksjon av brann eller termisk hendelse vil faremomentene som har størst konsekvenser være uoppdaget ventilering fra cellene, eller temperaturøkning i cellene/modulene som ikke blir oppdaget. En termisk hendelse i denne oppgaven å oppfattes som en markant økning i en celled eller en moduls temperatur. For spredning mellom celler og moduler vil det største faremomentet være at en brann vil spre seg mellom moduler. Som følge av dette blir brannen mer energirik og vil derfor mer utfordrende å slukke. Vedrørende avstengnings og isoleringsmuligheter vil kanskje det største faremomentet være at BMS (battery management system) ikke vil klare å stenge ned batteriene der det har oppstått en hendelse eller at man ikke klarer å isolere dem godt nok slik at brannen sprer seg ytterligere. For slukketmetoder og midler vil den største faren være at man ikke klarer å slukke brannen med den valgte løsning.

1.1 Bakgrunn for valg av oppgave

Bakgrunnen for valg av oppgave er at det er nå opp til vurdering om litium jernfosfat (LFP) batteriene skal brukes til de nye 212 ubåtene til Norge. Ettersom at en brann i slike batterier er nærmest umulig å slukke vil det være viktig for Forsvaret å teste og forske på hvordan man kan redusere risikoen for brann oppstår i slike batterier. Batteriene skal ombord på en ubåt som igjen setter sine begrensninger på mulighetene til vanlig brannbekjempelse.

Det finnes flere utfordringer rundt brannbekjempelse ombord på en ubåt hvorav de mest fremtredende er luftforurensing, vannmengde og fluktmuligheter. Ettersom ubåtene er små lukkede fartøyer vil en brann raskt bidra til luftforurensing som kan være dødelig ved inhalering. Størrelsen spiller også en stor rolle for den totale mengde vann man kan bruke til brannslukking ettersom for store mengder vann vil raskere føre til ustabilitet og tap av

oppdriftskontroll. Fluktmulighetene vil være veldig begrenset når man går neddykket i forhold til hva de er ombord på et overflatefartøy.

Det ble derfor ytret et ønske fra Forsvarsmateriell (FMA) om at dette skulle undersøkes nærmere.

1.2 Begrensninger

Oppgaven begrenser seg til mest mulig effektiv brannbekjempelse og det er ikke tatt hensyn til det operasjonelle aspektet eller stabilitet.

Det vil heller ikke være noe skille mellom ulike typer Li-ion batterier etter branntilløpet er startet, ettersom de ulike batteriene oppfører seg mer eller mindre likt etter dette. Det som vil skille dem her er mindre temperaturforskjeller samt mengde og type avgassinger.

Oppgaven tar heller ikke hensyn til det økonomiske for valg av løsning.

1.3 Metode

Det ble tidlig klart at en litteraturstudie som beskriver ulike løsninger knyttet til de fire punktene vedrørende brannbekjempelse av LIB ville bli den beste metoden å løse oppgaven på. Oppgaven vil sette ulike løsninger opp mot hverandre for å så komme med en anbefaling om hvilken løsning som passer best.

I startfasen var det viktig å få en oversikt på omfanget til oppgaven. For å innhente relevant litteratur ble det kontaktet forskjellige firmaer og kontaktpersoner, både sivile personer og personer internt i Forsvaret. Fra dem ble det levert tilbake en del litteratur og tidligere publikasjoner som omhandlet noenlunde samme tema som oppgaven. Deretter ble det laget en fremdriftsplan som ble inndelt i flytende faser. Siste frist for innhenting av litteratur ble satt til 19. april.

Fase 1- Kartlegging og innhenting av litteratur

Fase 2- Bearbeiding av innhentet litteratur

Fase 3- Møter med veileder og fortsette samtaler med fagpersonell

Fase 4- Skrivning av oppgave

Fase 5- Avsluttende fase med konklusjon og renskriving av oppgaven

1.4 Struktur

Den første del av oppgaven inneholder informasjonen og kunnskap som er nødvendig for å forstå litium ion batterier generelt og brannforløpet. Deretter tar oppgaven for seg kort hva som kan gjøres før det brenner. Videre tar oppgaven for seg 4 viktige elementer innenfor brannbekjempelse.

1. Deteksjon av ustabilitet i cellen, brann eller termisk hendelse
2. Spredning mellom celler og moduler
3. Avstengnings-/isoleringsmuligheter
4. Slukkemetoder og midler

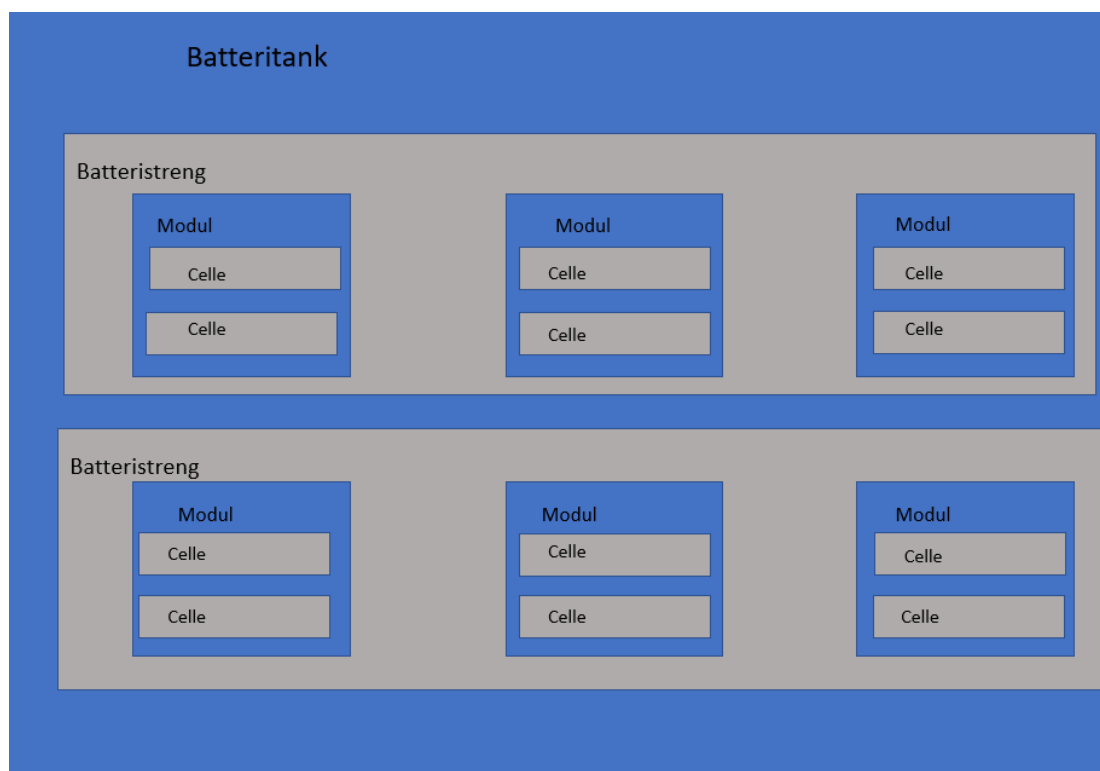
Innenfor hver av disse 4 elementene vil det være beskrevet forskjellige metoder og løsninger. Løsningene vil bli diskutert og drøftet opp mot det faktum at dette skal ombord på en ubåt. Hver del avsluttes med en anbefaling. Til slutt vil oppgaven diskutere den totale løsningen der anbefalingen fra de 4 elementene blir satt sammen til et system for deretter konkludere med om denne løsningen bidrar til å redusere restrisikoen til et akseptabelt nivå.

2. Teori

2.1 Oppbygging av LIB

Når vi snakker om batteriene skiller vi mellom celler, moduler, strenger og batteritank. En modul består av et visst antall celler koplet sammen i en beholder. Flere moduler satt sammen utgjør en streng. I batteritanken er det mange strenger som settes sammen til et batteri.

Batteritanken skaper et skille mellom batteriene og mannskapet ombord (2018, DNV-GL, 15).



Bilde 1: Skisse av oppbyggingen til et batterisystem

Som et minimum i DNV-GL reglene for klassifisering av helelektriske eller hybridelektriske skip skal systemet være designet på en slik måte at en termisk hendelse i en celle kan spre seg videre til celler i samme modul, men ikke propagere videre til de andre modulene (DNV-GL, 2018, 27).

Batteriet skal ha et BMS som kontrollerer og styrer batteriet og har som hovedoppgave å sikre riktig belastning av batteriene. I henhold til krav fra DNV-GL skal BMSen:

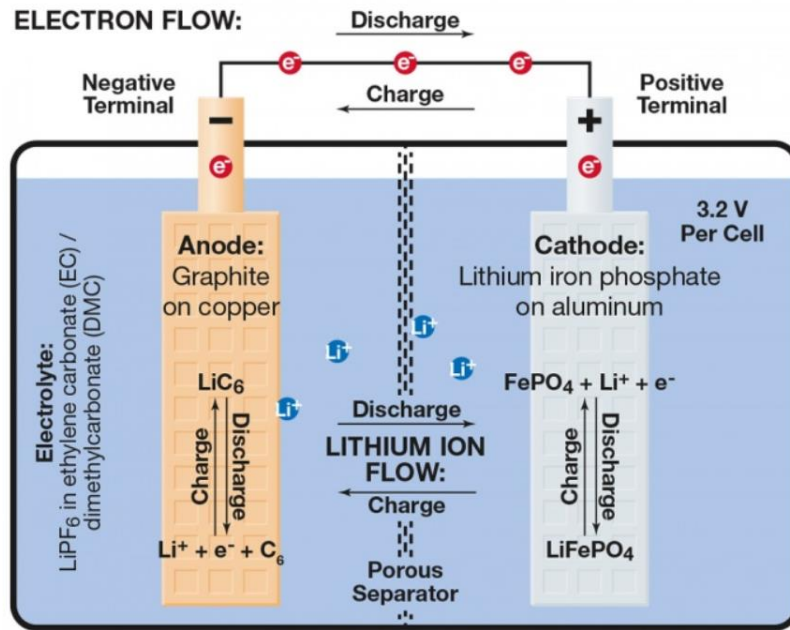
- Gi en grense for hvor mye man lader og utlader batteriet
- Hindre overstrøm, overspenning og underspenning
- Hindre at det blir for høy temperatur
- Balansere batteriet ved behov

BMSen fungerer som en første sikring mot farlige hendelser i modulene. Videre skal BMS måle celle og/eller modulspenning, celle eller modul temperatur og strøm i strengen. Denne informasjonen skal angis på lokale kontrollpaneler eller på en ekstern arbeidsstasjon (2018, DNV-GL, 27):

- System spenning
- Max, minimums og gjennomsnittsspenning i cellene
- Max, minimums og gjennomsnittss temperatur i cellene og modulen
- Strøm i strengen

2.2 Hvorfor begynner et LFP batteri å brenne og hvordan vil det utvikle seg?

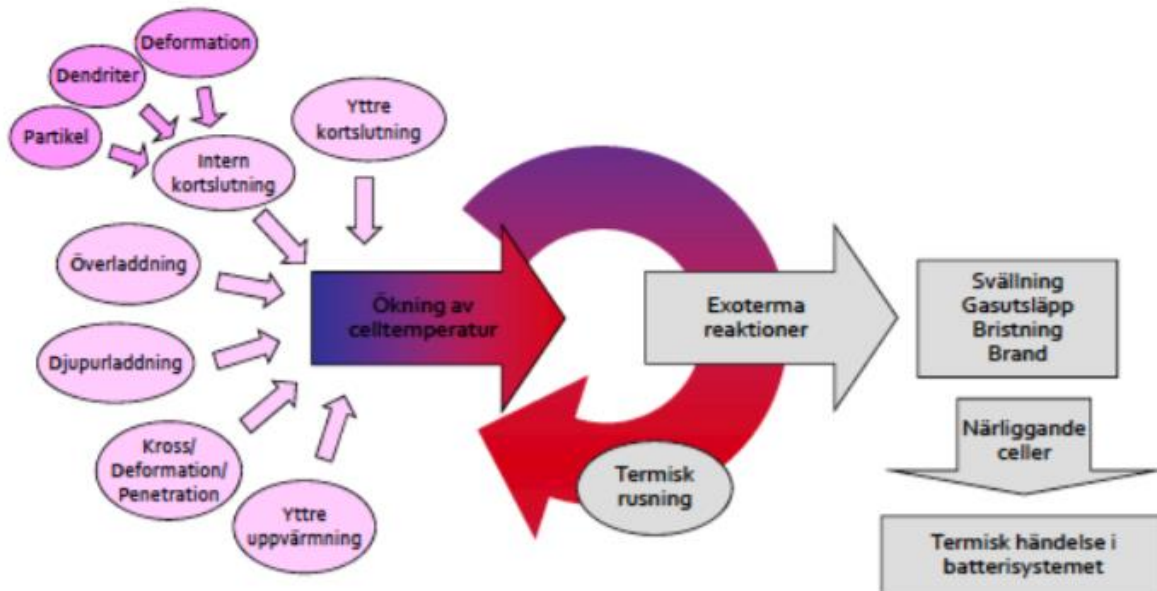
I et LIB batteri fins det alt man trenger for å starte en brann. En celle består av en anode, katode og en elektrolytt. Katoden består av et litium metalloksid eller i LFP-batteriene av litium jernfosfat. Disse stoffene avgir oksygen ved oppvarming. Anoden består av karbon i de fleste tilfeller i form av grafitt. Elektrolytten er en flytende organisk væske tilsatt LiPF_6 for å øke ledningsevnen. Mellom anode og katode er det en separator laget av plast som har en tykkelse på ca. 20 μm for å hindre kortslutning (Bøe, 2017, 38).



Bilde 2: LFP celle, hentet fra <https://www.homepower.com/articles/solar-electricity/equipment-products/battery-chemistry>, 24.04-18

Brannforløpet

Årsakene til at det kan begynne å brenne er illustrert ved bilde 3.



Bilde 3: Grunner til brann i LIB, hentet fra Agerup, Blikeng, 2013, s.14

Som bilde 3 illustrerer ser vi at det er flere grunner til at et LIB kan begynne å brenne.

Deformasjoner og skader vil alltid være en risiko for batteriene. Dette kan føre til at cellene blir ustabile og temperatur og trykket øker. Overlading og underlading vil føre til at katoden eller anoden blir overladd med elektroner som fører til en ustabil celle. Uansett årsak til oppvarming av cellene vil plastfilmen som skiller anoden og katoden bli skadet eller ødelagt. Dette medfører at cellen kortslutter og ytterligere varme genereres. Dette medfører igjen eksoterme reaksjoner som øker trykk og temperatur i cellen. Etter hvert som trykket og temperaturen fortsetter å stige, vil cellene begynne å ventilere ut avgasser som: metan, propan, karbondioksid, karbonmonoksid og hydrogen. Fortsetter temperaturen å stige ytterligere vil man tilslutt nå et punkt der man får en såkalt «thermal runaway». På dette tidspunktet vil det sannsynligvis ha oppstått en brann og brannen vil her være selv. Brannen vil være veldig vanskelig å slukke som følge av at brannen delvis finner sted inne i cellene/modulene. Brannen vil også kunne bidra til oppvarming av omkringliggende celler og moduler. I verste fall vil brannen spres og man vil ende opp med en ukontrollert brann i batteritanken.

2.3 Hva kan gjøres før det begynner å brenne?

Li-ion batterier (LIB) utviklet seg fra tidlig 90-tallet (Pistoia, 2014, 22) og er i kontinuerlig utvikling. I dag brukes de på både små og store plattformer fra mobiltelefoner, PC'er o.l og opp til elektriske biler og sivile overflateskip. Ulykker med Li-ion celler er på PPM nivå sammenlignet med antall produserte celler (Forseth, 2016, 10:40). Selv om oppgaven har til hensikt å si noe om hvordan en brann i et slikt batterisystem ombord en ubåt kan håndteres, kommer man ikke utenom å skrive noe om hvordan en brann i et slikt system kan unngås.

Som nevnt i avsnittet over er det flere grunner til at et LIB begynner å brenne. Det kan for eksempel være produksjonsfeil slik som partikler fra produksjonen, som i løpet av batteriets levetid kan medføre en intern kortslutning. Det vil derfor være viktig å ha tett oppfølging under produksjon, man bør også ha en form for kvalitetssystem under produksjonsprosessen. Det er avgjørende med personell som har nødvendig forståelse og kunnskap for håndteringen av slike batterier. Økt kunnskap hos personalet er trolig den viktigste og enkleste intervensjonen man kan gjøre for å redusere risikoen for slike branner. Videre er det avgjørende at personalet har kunnskaper om drift og vedlikehold av LIB for å øke sikkerheten i behandlingene av disse batteriene. Dette vil medføre en økt levetid for batteriene, men også sikkerheten rundt bruken. Utenom personellens kunnskap og forståelse, er kanskje det viktigste av alt at man forebygger og forhindrer en termisk hendelse, brann og at batteriene varmes opp.

3 Deteksjon av brann eller termisk hendelse

En brann eller termisk hendelse kan bety at det i forkant har skjedd en form for oppvarming av cellene. Dette vil da medføre til gassutvikling fra cellene noe som da igjen videreutvikler seg til en gassutvikling fra modulen. For å få en så tidlig varsling av en brann eller termisk hendelse som mulig, blir det avgjørende å ha en sensor som kan oppdage denne gassutviklingen eller temperaturøkningen. Ikke minst så blir det vitalt å ha riktige sensorer plassert på rett plass. Dette for å gjøre det lettere for sensorene å oppdage noe, men også for å få en presis lokalisering av ventileringen slik at videre bekjempelse ikke blir gjort på feil modul eller streng

3.1 Gass-sensor

Når man skal plassere en gass-sensor vil det være viktig å bestemme hvilken type gass denne skal detektere. I forsøk som er blitt gjort på avgassene fra LIB er det gjennomgående at metan (CH_4), propan (C_3H_6), karbondioksid (CO_2) og karbonmonoksid (CO) er med i denne gassblandingen. Andre ganger har det også blitt registrert forekomster av hydrogengass (DNV-GL, 2017, 48). Det vil derfor være viktig at man tar et bevisst valg på hvilken av disse gassene som det skal fokuseres på.

Ser vi på eksplosjonsfaren vil en sensor tilpasset hydrogendeteksjon være hensiktsmessig, ettersom hydrogen er den mest eksplosive og reaktive av gassene. Riktignok er både metan og propan brennbare og eksplosive gasser, men disse er relativt stabile i forhold til hydrogen. Av de overnevnte gassene er det kun CO_2 som ikke er brennbar og bare CO som er giftig ved inhalering. Riktignok vil CO_2 ha en kvelende effekt da den vil fortrenge oksygen, men det vil kreve en større konsentrasjon i luften for å være dødelig (Store medisinske leksikon, karbondioksid, karbonmonoksid). Ser vi på mengden av den enkelte gass er det gjennomsnittlig mest CO som forekommer i avgassingene fra batteriene, deretter CO_2 og metan (DNV-GL, 2017, 48). Da sett i forhold til mengde og forekomst vil det være hensiktsmessig å ha en gass-sensor som både kan detektere H_2 , CO , og hydrokarboner.

3.2 Temperatursensor

Utenom gassutvikling i cellene vil det også være viktig å ha en temperatursensor for å overvåke temperaturen i cellene og batteriet slik at den ikke nærmer seg et ustabil nivå som ligger på 125-180°C (se tabell 1).

Tabell 1: Battericelle reaksjon som funksjon av temperatur

Temperatur	Batteriets reaksjon
<65°C	Forholdsvis sikker dersom de behandles på rett måte.
65-125°C	Trykkoppbygging i cellen, og lekkasje dersom forsegling ikke er perfekt
>100°C	Forseglingen kan bli ødelagt eller mistet
125-180°C	Ustabil, det er vanskelig å forutsi nøyaktig hva som vil skje. Celler ventilerer.
>180°C	«Thermal runaway» og/eller eksplosjon

Tabellen er hentet fra Aksdal, Askeland, 2003, s.12.

Ellers fra tabellen ser vi at når temperaturen er passert 100°C kan separatoren som skiller katoden og anoden få større skader som kan resultere i at den blir ødelagt. Dette vil også medføre en trykkøkning i cellen. Hvis temperaturen øker ytterligere og overstiger 180°C eller mer vil man tilslutt ende opp med en såkalt «thermal runaway», som igjen vil føre til brann og/eller eksplosjon. Det vil derfor være av avgjørende betydning v å ha en temperatursensor for å kunne gi en tidlig varsling slik at man igangsette de nødvendige tiltak tidlig nok slik at man forhindrer «thermal runaway».

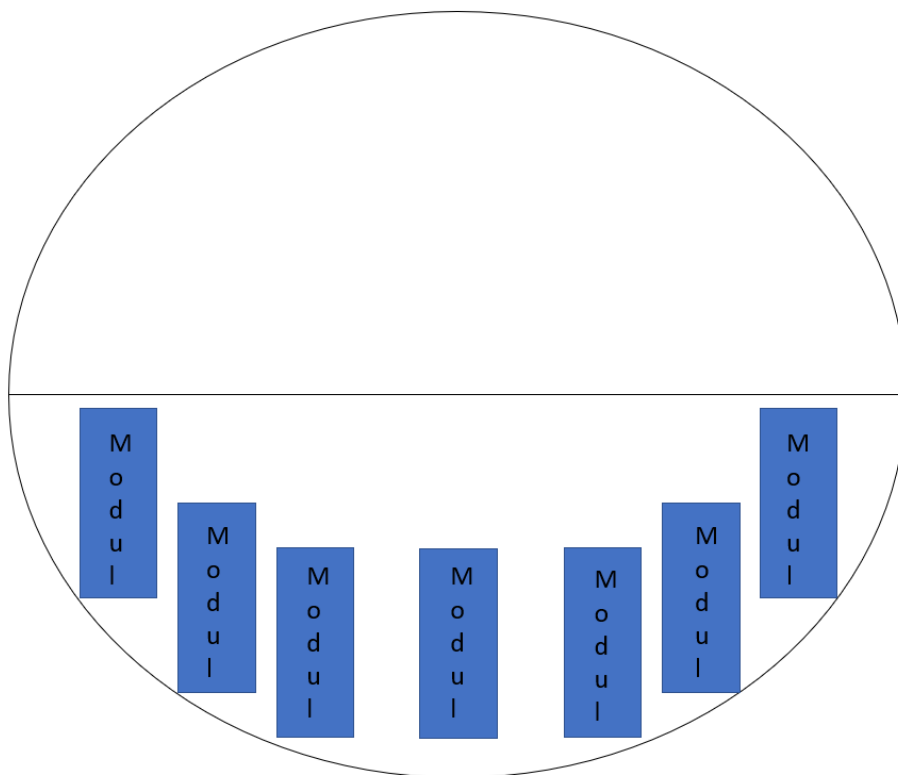
3.3 Gass- eller temperatursensor

Det finnes 2 muligheter når man skal velge mellom gass- eller temperatursensor, man kan ha kun en type eller en kombinasjon. Ved å kun ha en type sensor og vil man få plass til dobbelt så mange sensorer. På den måten får man mer informasjon fra sensorene og kan lettere avgjøre hvor hendelsen har oppstått. Med andre ord så kan man med større nøyaktighet foreta nødvendige tiltak for å hindre en videre utvikling av situasjonen. I tillegg vil man oppnå en redundans hvis noen sensorer skulle bli defekte eller ikke fungere. Alternativet kan være å ha en kombinasjon av gass- og temperatursensor. På denne måten vil man få redundans i både antall og informasjon fra sensorene. For eksempel hvis en celle skulle begynne å ventilere før

den har nådd en temperatur som temperatursensoren rapporterer som farlig, vil man kunne oppdage dette ved å ha gass-sensor. Ved å ha to typer sensorer vil man også kunne avgjøre hvor langt i prosessen en celle har kommet. Man kan da kombinere den informasjonen man får fra de to sensorene og få et relativt nøyaktig svar.

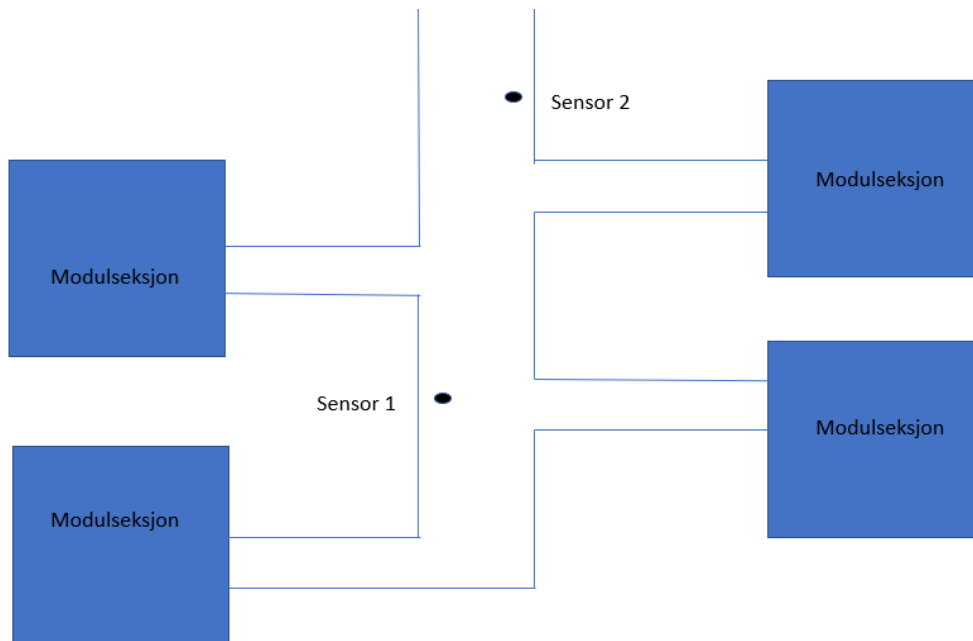
3.4 Plassering av sensorene

Når man skal se på plasseringene av sensorene er det viktig at man plasserer dem slik at de får fanget opp mest mulig informasjon. For å få et så nøyaktig svar som mulig vil det være hensiktsmessig å vite hvilken modul avgassene eller temperaturøkningen kommer fra. Siden designet på batteritankene ikke er allmenn kjent, så innebærer det at vi ikke vet hvordan strengene og modulene vil bli plassert, eller størrelsen på tankene, modulene etc. På grunn av ubåtens sirkulære skrogform kan vi anta at ikke alle modulene vil bli plassert i samme høyde (se bilde 4), altså på tvers av skroget ettersom det vil være veldig lite plassbesparende. Hvis vi følger Ula-klassen sin plassering av batteritankene kan vi også anta at tankene vil være under hoveddekket i de nye 212-klasse ubåtene.



Bilde 4: Illustrasjon av mulig modulplassering ombord

Ser vi på strukturen til batteriene vil det være viktig å ha en form for pipe som man kan sørge for at avgassene blir ført vekk fra modulene. Videre kan disse pipene samles til et større avgassrør som man fører ut av tanken. Dette gjøres for å hindre at avgasser samler seg i batteritanken og potensielt skaper en brann og/eller eksplosjonsfare. Hvis vi tar utgangspunkt i at det blir denne strukturen, så vil det være tre gode alternativer på hvor man da skal plassere sensorene. Det ene kan være i «pipen» fra hver modul eller alternativt på strengen sitt felles avgassrør. Fordelen med å ha sensor på hver modul er at da får man et veldig nøyaktig bilde av hvilken modul som avgir gasser. Ulempen med dette er at det blir et betydelig antall sensorer som skal utplasseres og dertil veldig mye informasjon som skal prosesseres. Den andre løsningen kan være å sette sensoren på avgassrøret til strengen. Dette vil medføre at det blir vanskelig å si noe hvilken modul avgassene kommer fra. Siste løsning er et kompromiss mellom begge løsningene (se bilde 5), hvor man plasserer sensorene på avgassrøret slik at de overvåker et visst antall moduler. Fordelen ved dette er at man da klarer å se hvilken modul-seksjon avgassene kommer fra. Hvis sensor nr.1 ikke gir noe utslag, men nr.2 gir utslag så vet man at avgassene da vil komme fra en moduleksjon mellom sensor 1 og 2. Svakheten med denne løsningen er at hvis flere moduler begynner å avgi gasser samtidig, vil man ikke kunne si med samme nøyaktighet hvilken modul som ventileringen kommer fra. Dette problemet vil være gjeldende hvis man har et rett rør som er felles for alle modulene. Dersom man velger å ha et rør fra hver av modul-seksjonene som møtes på et punkt vil man klare med stor nøyaktighet å si fra hvilken modul-seksjon avgassene kommer fra uansett om en eller flere moduler skulle begynne å ventilere. Sensorene det snakkes om her vil være både av type som detekterer både gass og temperatur.



Bilde 5: Forslag til plassering av sensorer

3.5 Anbefaling

Ser vi på de ulike mulighetene vi har, og ser på for- og mot argumentene, vil den anbefalte løsning her være å ha både gass- og temperatursensor og plassere dem slik at man kan overvåke modul-seksjoner. På denne måten vil man klare å redusere risikoen for at ventilering og temperaturøkningen skjer uoppdaget.

4 Spredning mellom celler og moduler

For å skape et skille mellom kapittel 4 og 5, tar kapittel 4 for seg eksterne tiltak som nødvendigvis ikke er iboende i batterisystemet. Som nevnt tidligere i oppgaven er det et krav fra DNV-GL at det ikke skal forekomme noen spredning mellom modulene hvis det skulle oppstå en brann i en modul. For at modulene skal kunne oppfylle dette kravet vil hvilket materiale modulene er laget av og kjølingen på modulene ha stor betydning.

4.1 Materiale på modulene

På dagens Ula-klasse har skottene i maskinrommet brannklassifisering A-60. Klassifisering A-60 sier at:

...slik bygget at de er i stand til å forhindre framtrengning av røyk og flammer inntil utgangen av en standard brannprøve av en times varighet, og - isolert med sertifiserte ubrennbare materialer, slik at gjennomsnittstemperaturen på den ikke-utsatte side ikke stiger mer enn 140 °C over den opprinnelige temperatur, og heller ikke skal temperaturen på noe enkelt punkt, innbefattet en eventuell skjøt, stige mer enn 180 °C over den opprinnelige temperatur, innenfor de nedenfor oppgitte tider: Klasse A-60 - 60 minutter, Klasse A-30 - 30 minutter, Klasse A-15 - 15 minutter, Klasse A-0 - 0 minutter (Hansen, Mikalsen, Dragensholt, Wighus, Hansen, 2012, 8).

I NORSOK S-001 blir det benyttet en varmeflukstetthet på 100 kW/m² til å klassifisere materialene (Hansen et al., 2014, 2). En brann i et LIB kan komme opp i 1200°C (Agerup, Blikeng, 2013, 50). Denne temperaturen ble målt ved batteripakken i en elektrisk bil. I et annet lignende forsøk kom temperaturen opp i 800°C (Bøe, 2017, 17). Forsøkene sier noe om hvilke temperaturer som modulene må tåle. Grunnen til at temperaturen varierer kan være forskjellig type LIB og ulik mengde avgasser er med i forbrenningen. I et forsøk gjort av DNV-GL så de på påvirkningen en flamme med temperatur 537°C hadde på et batteri bak en stålvegg med tykkelse 1/16 inch. De testet to typer materialer til modulen, polypropylen og aluminium. Resultatet viste at etter 60 minutter hadde aluminiums modulen 84°C og polypropylen modulen 231°C (DNV-GL, 2017, 42). De skriver videre at dersom polypropylen benyttes anbefaler de en A-120 klassifisering på skille mellom modulene. Grunnen til at aluminiums modulen hadde så lav temperatur i forhold til polypropylenet ligger i aluminiumets varmførings evner (DNV-GL, 2017, 42). Siden aluminium leder varme lettere enn polypropylenet vil det også avgi varme lettere til omgivelsene.

4.2 Kjøling av modulene

For å hindre og/eller bremse oppvarming av modulene og cellene er det viktig å ha en form for kjøling. Ettersom at cellene ligger lukket inne i modulen vil beste løsning være å ha direkte kjøling på modulen. Siden kjølingen skal være rett ved en elektrisk kilde er det viktig at kjølevæsken ikke leder strøm. Utenom valg av type kjølevæske vil det også være viktig å si noe om mengde kjølevæske som trengs for å kjøle ned modulene.

På dagens Ula-klasse blir det brukt avionisert sjøvann til å kjøle ned bly-syre batterier. Et annet alternativ som kan benyttes er destillert ferskvann, men siden det er en begrenset mengde med ferskvann ombord vil ikke dette være et reelt alternativ med mindre man får et osmoseanlegg på de nye ubåtene. Sjøvann vil man derimot kunne ta fra sjøen og avionisere det slik at det ikke lenger vil ha samme ledningsevne som det ellers ville hatt. Sjøvann vil derfor være det foretrukne alternativet til kjøling av modulene.

Når cellene i modulen begynner å nærme seg 125°C vil de begynne å bli ustabile (Aksdal, 2003, 12). Det vil derfor være viktig å ha nok kjølevann slik at temperaturen ikke skal komme opp på dette nivået. Det som er viktig å tenke på da er diameteren på rørene og farten kjølevæsken har gjennom dem. Er farten for lav vil temperaturen til kjølevæsken bli for høy til at den klarer å kjøle ned. Er farten for høy vil ikke kjølingen ha noen særlig effekt. Ser vi på mengde med kjølevæske vil det være viktig at det ikke blir for lite, da dette kan føre til at kjølevæsken blir varmet for mye opp og dermed ikke ha noen effekt. Det vil også være formålstjenlig å ha en trykkmåler i rørene. Ved en eventuell lekkasje vil det merkes at trykket synker og man kan dermed konstatere at man har en lekkasje.

4.3 Isolering mot eksplosjon

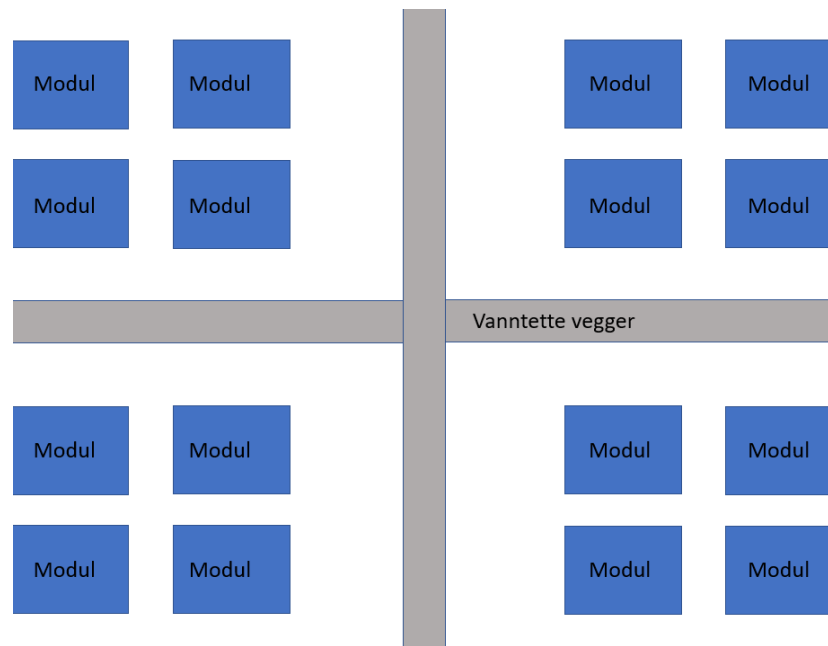
En eksplosjon kan oppstå dersom avgassene får tid til å blande seg med luften og lage en brennbar blanding. Blir denne blandingen antent vil det resultere i at denne gass-skyen utvider seg gjennom forbrenningen og dermed skape et overtrykk i batteritanken. Dette vil kunne resultere i skader på materiellet rundt. På overflatefartøy kan man ha en svak vegg som fungerer som en eksplosjonsventilering, dette vil si at veggen gir etter og slipper trykkbølgen og flammefronten ut i et trygt område. På ubåt derimot vil dette ikke være mulig når man går

neddykket. Det vil derfor være viktig å finne en løsning på hvordan man skal unngå at avgassene får blande seg med luften rundt og bli sluppet ut til andre steder ombord.

I 3.4 «Plassering av sensorene» ble det beskrevet hvordan man kan føre avgassene ut av batteritanken gjennom eksosrør fra modulene. På denne måten vil avgassene ikke få muligheten til å blande seg i luften rundt, noe som igjen vil redusere risikoen for eksplosjon. Selv om risikoen er blitt redusert er fortsatt muligheten for en lekkasje fra eksosrørene til stede, som igjen kan medføre at avgassene blander seg med luften. Det vil derfor være viktig at modulene blir laget i et materiale som vil kunne tåle trykket fra en eksplosjon. Hvor stort dette trykket er, er avhengig av hvor stor mengde avgasser som er med i eksplosjonen og mengden med avgasser er bundet til hvor mange celler som ventilerer. For å vite nøyaktig hvor mye trykk modulene skal tåle må dette testes.

4.4 Underseksjoner

Vi antar at modulene vil være kledd i et A-60 materiale (se 4.1 *Materiale på modulene*). For å videre isolere modulene kan man dele batteritanken i vanntette underseksjoner (se bilde 6). Fordelen med dette er at da vil en eventuell brann bruke enda lengre tid for å spre seg til moduler i andre seksjoner. Den vil riktignok spre seg til modulene innad i underseksjonen, men dette vil da også ta noe tid ettersom modulene er kledd i A-60 materiale. En annen fordel ved å dele inn i flere vanntette underseksjoner vil være at dersom det skulle bli aktuelt å dekke modulene i kjølemiddel (se 6.2 *slukketoder*), vil dette gjøre at man ikke vil trenge like mye kjølemiddel. Ettersom man nå ikke trenger å fylle opp mer enn en underseksjon og ikke hele batteritanken. Underseksjonene vil isolere best dersom det blir benyttet brannhemmende materiale i veggene som skiller moduleksjonene. Videre så vil det være gunstig at underseksjonene er tette for å kunne holde på kjølemiddelet, slik at dette kjølemiddelet ikke når frem til andre underseksjoner. Ulemper ved å ha underseksjoner er at vedlikeholdet vil bli mer krevende. Løsningen vil medføre at det blir mer komplisert å flytte ut modulene dersom en skade skulle oppstå på noen av modulene. Denne løsningen vil også gjøre det vanskelig for manuell slukking av brann i en av underseksjonene, da veggene vil gjøre noen underseksjoner mer utilgjengelige. Løsningen er derfor avhengig av et fjernstyrt slukkesystem.



Bilde 6: Skisse av underseksjoner

4.5 Anbefaling

For å hindre spredning mellom hver enkelt modul best mulig, anbefales det at man har kjøling på hver enkelt modul og hvor det anbefalte alternativet til kjølevæske vil være avionisert sjøvann på grunn av tilgjengeligheten. Dersom det blir bestemt at et osmoseanlegg skal bli installert ombord vil ferskvann være den anbefalte kjølevæsken. Resultatet fra testen til DNV-GL (DNV-GL, 2017, 41) viser at moduler som er laget av aluminium eller et lignende materiale med samme varmførende egenskaper vil være det foretrukne alternativet. Videre viser testen også viktigheten av å ha et A-60 klassifisert materiale som omslutter den enkelte modul. Etersom kjølingen sannsynligvis ikke vil klare å kjøle ned modulen nok etter en brann er startet vil denne omslutningen av et A-60 materiale være den mest signifikante bidragsyteren til at en brann ikke vil kunne spre seg mellom de ulike modulene. Videre isolering av modulene innebærer at A-60 materialet også skal trykkes fra en eksplosjon. Videre vil det være gunstig å dele batteritanken i underseksjoner. Dette vil videre hindre en brann i å spre seg, samt at det vil være en fordel dersom det skulle bli aktuelt å dekke en modul med kjølemiddel. Oppsummert vil den anbefalte løsning være å ha underseksjoner med vegger laget av et A-60 materiale. Modulene vil være laget av aluminium eller materiale med samme varmeoverførings egenskaper. Det vil bli benyttet avionisert sjøvann som kjøler ned modulen og et A-60 klassifisert materiale som omslutter modulen som også skal tåle trykket fra en eksplosjon.

5 Avstengning og isoleringsmuligheter

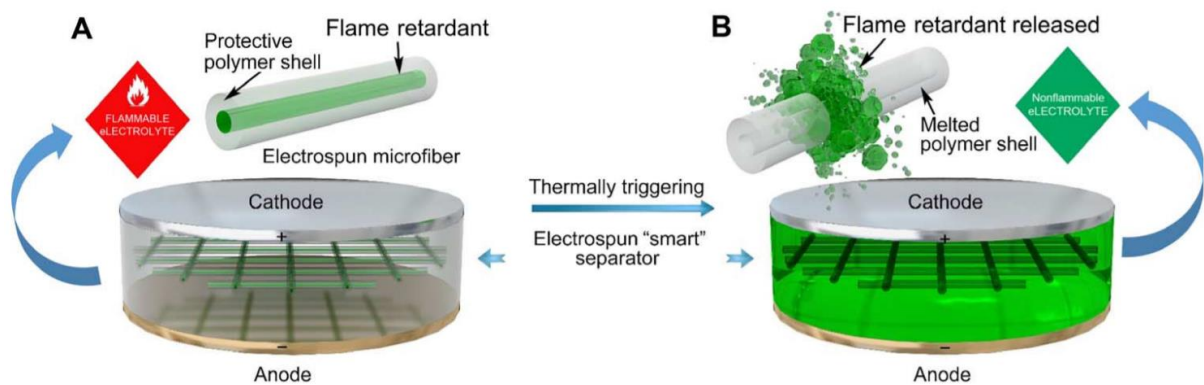
5.1 Isolering av celler

Isoleringsmuligheter på celle nivå vil være mulig, men dette må legges tidlig inn i byggeprosessen ettersom når modulene er ferdig bygget kan man anta at cellene er mer eller mindre utilgjengelige. To av mulighetene som finnes er kjølekappe mellom celler og en elektrospunnet¹ kjernefilm med flamme retarderende egenskaper.

Optimalt sett ville direkte kjøling mellom hver celle være den foretrukne løsning, men på grunn av den store mengden rør som man hadde vært nødvendig for å komme mellom hver enkelt celle og økningen i størrelsen på modulen, være noen av grunnene til at dette ikke er gjennomførbart. Derimot er muligheten der for å ha en kjølekappe mellom et visst antall celler. På denne måten vil man begrense varmespredning mellom alle cellene i modulen til kun varmespredning mellom et mindre antall celler. Kjølekappen vil også bidra til å minske varmeutviklingen i cellene som vil resultere i at risikoen for «thermal runaway» og brann reduseres. Kjølekappen vil ikke trenge noen overvåkning da den kun vil fungere som et passivt brannvern og ikke hemme cellene på noen måte. Materialet på kjølekappen vil være avgjørende for dens kjøleegenskaper. Det vil være viktig å se på materialets ledeevne og varmekapasitet. En kjølekappe i aluminium vil ha tilstrekkelig ledeevne, varmekapasiteten til aluminium ligger på 0,897 J/gK. Til sammenligning har kobber en varmekapasitet på 0,385 J/gK (Klokkehaug, 2017, 20). Kjølekappen i aluminium vil kunne holde temperaturen i cellene den omslutter på et jevnt nivå, ettersom ledeevnen til aluminiumet vil spre varmen videre til de nærmeste cellene. En kjølekappe i et plastmateriale vil kunne isolere bedre mot varme fra andre celler, da den har dårligere ledeevne sammenlignet med aluminium og kobber. I reglene for klassifisering av helelektriske eller hybridelektriske skip av DNV-GL står det at designet på modulen skal hindre propagering mellom celler (DNV-GL, 2018, 27). Dermed for å bedre kunne hindre propagering mellom cellene, vil det beste alternativet være en kjølekappe i plast material.

¹ Elektrospinning er en produksjonsmetode som utnytter energien i elektrisk spenning til å trekke ut nanofibre fra et materiale. Den høye spenningen fører til at materiale skyter ut en jet av fibre, som en samle skjerm samler opp.

Den elektrospunne kjernefilmen består av en kjernefilm som er dekket av en polymer. Polymeret vil ved «thermal runaway» smelte og slippe kjernefilmen ned i elektrolytten. Kjernefilmen vil forhindre antenning av elektrolytten og dermed stoppe brannen før den har fått mulighet til å utvikle seg (Liu Kai et al. 2017, 1).



Bilde 7: Illustrasjon av kjernefilmens virkemåte, hentet fra Liu Kai et al. 2017, 2

Måten den gjør dette på er å danne eksempelvis PO eller PO₂ (fosforoksid, fosfordioksid) når den blandes med elektrolytten. Både PO og PO₂ inneholder frie radikaler som kan ta opp hydrogen og oksygen atomer, som er med på å betydelig redusere brennbarheten til elektrolytten (Liu Kai et al. 2017, 2). Elektrolytten som blir beskrevet i artikkelen er av samme type som blir benyttet i LFP batteriene. Kjernefilmen vil fungere som både en isolator og et aktivt brannvern. Den vil kunne isolere etter polymere har smeltet, ved at den da hindrer en brann i å starte og dermed isolerer cellen slik at den ikke bidrar til å øke temperaturen til de nærmeste cellene. Effekten dette produktet har på LFP batteriet er at det senker den ioniske ledningsevnen. Dette vil medføre at cellen ikke vil fungere like bra som den gjorde før (Liu Kai, 2017, 2). Det som vil bli en utfordring ved å bruke denne teknologien blir hvordan man skal oppdage at en av disse kjernefilmene er blitt aktivert i cellen. En måte man kanskje kan oppdage det på, er hvis man ser en nedgang i levert effekt fra modulene, grunnet aktiveringen av kjernefilmen. Effektforskjellen vil muligens være såpass liten at det ikke er mulig å oppdage den, sett at kjernefilmen kun blir aktivert i en celle. For at det skal være mulig å oppdage må sensitiviteten til måleren være høy og man bør ha en form for effekt måling på hver modul. Faren er nødvendigvis ikke så stor dersom en celle har uoppdaget aktivering av kjernefilmen. Ettersom man vil ha flere andre celler som vil fortsette å levere nok effekt til systemet. Dersom en større mengde celler skulle aktivere kjernefilmen vil dette til slutt medføre en merkbar endring i levert effekt og dermed ser man hvilken modul som er blitt påvirket av kjernefilmen. En stor ulempe dersom dette er tilfelle er at man da har behandlet

flere batterier feil. Dette har resultert i at flere celler har en høy temperatur som har ført til aktiveringen av kjernefilmen.

5.2 Avstengning og isoleringsmuligheter på modulnivå

Avstenging av modulene vil BMS ta seg av. Reglene for klassifisering fra DNV-GL tilsier at det skal forekomme en alarm ved enhver unormal situasjon i batteriene (DNV-GL, 2017, 27). Avhengig av farenivået må det tas en beslutning om man skal stenge ned modulen eller strengen som alarmen kommer fra. Dersom situasjonen fortsetter å utvikle seg skal BMS være kapabel til å stenge ned modulen der feilen er registrert. Ved nedstenging menes at man ikke lenger vil belaste modulen eller strengen og kobler den ut slik at den ikke lenger vil levere strøm til systemet. Det vil også være hensiktsmessig å ha en alternativ manuell bryter som kan stenge ned moduler/strenger dersom BMS ikke skulle fungere. Plassering på denne bryteren bør være utenfor selve batterirommet. Grunnen til dette er at det kan komme gnister fra bryteren når den avstenger og dersom det skulle være gass i rommet kan dette resultere i en eksplosjon. Man bør også ha mer enn én manuell bryter. Det vil da være lurt å ha disse bryterne i forskjellige seksjoner i ubåten dersom det skulle oppstå en situasjon som gjør den ene bryteren ikke kan brukes av sikkerhetsmessige årsaker.

5.4 Anbefaling

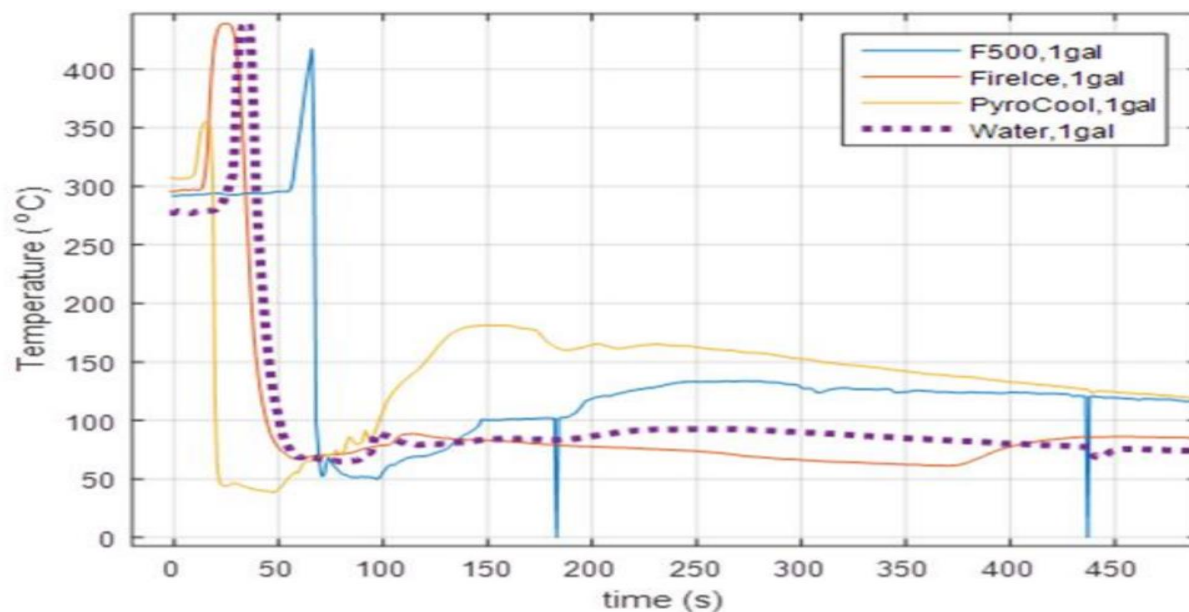
For å isolere cellene best mulig vil kjernefilmen ha best isoleringsevne dersom cellene skulle nå «thermal runaway», men den har ikke noen preventiv effekt, som en kjølekappe vil ha. Derimot vil kjernefilmen fungere som en isolator etter aktivering og også fungere som et aktivt brannvern. Gitt forutsetningen om at det allerede eksisterer en fullgod kjøling på modulene vil kjernefilmen anbefales. Videre så anbefales det at BMSen skal kunne avstenge moduler slik at de ikke lenger leverer strøm til systemet. For å sikre redundans anbefales det også to eller flere manuelle bryter plassert i forskjellige seksjoner i ubåten. Disse manuelle bryterne skal også kunne avstenge eksempelvis en modulseksjon.

6 Slukkemidler og metoder

Det har til nå blitt beskrevet hvordan oppdage en brann eller termisk hendelse og hvordan hindre en brann i å spre seg til andre moduler. Hva nå om en brann oppstår eller man får en eksplosjon som resulterer i en brann? Ombord en ubåt vil røyken fra en brann fort bidra til at luften ikke lenger er pustbar. Det blir derfor viktig å få slukket denne brannen så fort som mulig. Ettersom en brann i et LIB er vanskelig å slukke er det viktig å vite hvilke slukkemidler som er effektive i dette tilfellet. Ombord dagens Ula-klasse finnes det BIBS (Built In Breathing System). Dersom luften i ubåten ikke lenger er pustbar, tar besetningen på seg maskene tilhørende dette systemet og vil da ha luft i noen timer.

6.1 Slukkemidler

Når man skal bestemme hvilket slukkemiddel som skal brukes ombord vil man se på hvor fort dette klarer å slukke en brann, hvilke skader det påfører modulene, miljøet i etterkant og mengde slukkemiddel man har tilgjengelig. I et forsøk gjort av DNV-GL testet de følgende slukkemiddel: F500, FireIce, PyroCool og vann (DNV-GL, 2017, 46). F500 består av en blanding skum og fuktemiddel. Dette fungerer bra på klasse A, B og D branner (Hazard Control technologies). FireIce er en gel type brannslukkingsmiddel. Måten det slukker brannen på er ved å kjøle ned varmekilden (Geltech solutions). PyroCool er et aerosol type slukkemiddel. Det vil si at det består av finforstøvede partikler. Det skal fungere på klasse A, B og D branner (PyroCool technologies).



Bilde 8: Forskjellige slukkemidler på LIB brann, hentet fra DNV-GL, 2017, 46

Fra bilde 8 ser vi de forskjellige slukkemidlene sin påvirkning på brannen. Det vi kan trekke ut fra disse grafene er hvor fort de ulike slukkemidlene klarer å kjøle ned brannen og hvor lenge disse klarer å holde temperaturen lav etterpå. På bildet ser vi at PyroCool var slukkemiddelet som kjølte ned mest effektivt, men det holdt den høyeste etter temperaturen. Mellom vann og FireIce skilte det lite på hvor fort de klarte å kjøle ned og hvor lenge de klarte å holde en lav temperatur over lengre tid.

Hvis vi ser på etter skader som det vil påføre batteriet og miljøet reklamerer F500, FireIce og PyroCool med at de ikke skal påvirke miljøet på noen slags måte og at de heller ikke er giftige. Hvor pålitelig den informasjonen er kan diskuteres ettersom informasjonen er hentet fra firmaets egen hjemmeside. Det står heller ikke noe om hvordan disse vil påvirke et elektrisk system. Tar vi for oss vann vil det muligens kunne medføre interne kortslutninger i flere moduler dersom de ikke er bygget slik at vannet ikke klarer å trenge inn i modulen. Andre uønskede skader som kan oppstå ved bruk av vann vil være korrosjon på andre systemer og moduler i nærheten. Selv om modulene blir bygget tette, vil korrosjon fortsatt kunne oppstå på utsiden. Bruker man store mengder vann vil dette også påvirke stabiliteten til ubåten noe som kan føre til andre farlige situasjoner. Store mengder vann vil også føre til tap av oppdriftskontroll da den ekstra vekten av vannet vil føre til negativ oppdrift². I en brannsituasjon så må man derfor veie opp om hva som er viktigst å foreta seg, om man skal

² Negativ oppdrift er når båtens vekt er større enn det fortrengte volumet.

slukke brannen og dermed risikere at man ødelegger noe utstyr eller om man skal risikere livet til de ombord ved å ikke slukke den. Når man snakker om livet til mannskapet så vil en eller flere ødelagte moduler komme i andrerække.

Tilgjengeligheten på vann er tilnærmet uendelig dersom man tar vann direkte fra sjøen. Ved å bruke sjøvann direkte på modulene vil det være fare for dannelse av klorgass. Dette kommer av at saltet i sjøvannet vil bli spaltet og klorgass vil bli være et av produktene i denne prosessen. Dette vil utgjøre en fare for besetningen med mindre man ventilerer ut klorgassen eller bruker ferskvann som slukkemiddel. Siden det kun er en begrenset mengde med ferskvann ombord på ubåten vil man ikke kunne bruke bare ferskvann til å slukke. Dette vil selvfølgelig være avhengig av størrelsen og omfanget på brannen. En kombinasjon der man først bruker ferskvann til å kjøle ned og slukke brannen, for deretter å benytte sjøvann til å holde modulen nedkjølt for å hindre re-antennning. Denne metoden vil være med på å minimere produksjonen av klorgass. For de andre brannslukkingsmidlene vil mengden slukkemiddel begrenses til hva man tar med seg når man forlater kai. I forsøket til DNV-GL brukte de 1 gallon. Forsøket de gjorde ble gjort på en modul. Ombord på en ubåt må man ha med seg nok slukkemiddel til å kunne slukke iallfall en batteritank.

Ser vi på de tre faktorene vil det beste alternativet være vann, ettersom det er det som er lettest tilgjengelig og har vel så gode kjølegenskaper som de tre andre som ble testet. Skadeomfanget til vann vil reduseres dersom modulene blir bygget på en slik måte at de er tette mot vann.

Ved bruk av vann som slukkemiddel må man, som nevnt, også vurdere den risiko dette vil ha på ubåtens stabilitet. Dersom dette «vannet» hentes fra ubåtens trimtanker vil dette ikke ha så stor innvirkning på ubåtens tyngde i vannet, men kan ha en viss innvirkning på fartøyets stabilitet.

6.2 Slukkemetoder

Når man skal bestemme slukkemetode vil det i likhet med slukkemiddel være viktig å se på hvor effektivt det slukker en brann og da hvordan man skal slukke den. Skal man kvele flammen, kjøle den, fjerne brennbart materiale eller en antikatalyse metode? Muligheten for å kvele brann i et LIB batteri er i utgangspunktet ganske redusert, på grunn av at cellene vil produsere sitt eget brennstoff og nære sin egen flamme (Forseth, 2016, 15:50). For å kvele brannen må man kunne stoppe reaksjonene inne i cellene, noe som vil være vanskelig ettersom cellene er plassert inne i en modul. Hadde det vært mulig å nå cellene ville det vært gunstig å benytte seg av en antikatalyse metode. Denne metoden stopper de kjemiske kjedereaksjonene inne i celle ved at middelet blander seg inn i den kjemiske reaksjonen og stopper videre reaksjoner. På denne måten mister brannen sin energitilførsel og brannen vil til slutt dø ut. Å fjerne det brennbare materiale vil også være vanskelig fordi cellene vil være utilgjengelige. Et alternativ kan være å dumpe modulen som brenner i havet. Ombord en ubåt vil dette neppe være et alternativ til løsning. Kjøling fremstår da som det beste alternativet til slukkemetode. Det vil hindre spredning til nærliggende moduler og hindre re-antennning. Selv om brannen er blitt slukket vil det være fare for etter antennning fordi de eksoterme reaksjonene ikke vil stoppe med engang, men avta med tiden. Det vil derfor være viktig at kjølemiddelet klarer å holde temperaturen lav lenge nok til at de eksoterme reaksjonene vil avta og til slutt stoppe (DNV-GL, 2017, 47).

Tradisjonelt vil slukking ved hjelp av kjøling innebære at man sprøyter et kjølemiddel direkte på flammen eller nær brannkilden. Siden brannkilden i dette tilfellet vil være gjemt inne i modulen vil ikke dette være mulig ved disse metodene. Vi må se på alternative løsninger der vi kjøler ned hele modulen. Antar vi at modulene er bygget tette og da ikke vil slippe inn kjølemiddelet, så vil den beste metoden for å oppnå maksimal kjøling være å dekke de tilgjengelige flatene på modulen med kjølemiddel. Hvorvidt dette er klokt å gjøre på en ubåt kan diskuteres. Man vil da ha et rom fullt med kjølemiddel med mindre man deler tanken inn i tette underseksjoner. Dette kan være en løsning dersom ikke annet skulle fungere og brannen er kommet ut av kontroll. Ved å ha tette moduler vil dette kunne utgjøre en fare ved at man får trykkoppbygging i modulen ved en brann. Dette kan føre til at modulene vil få en form for utblåsing eller sprekkdannelse. Dette er avhengig av materialet som tetter enten er sprøtt eller seigt. Et seigt materiale vil med større sannsynlighet få en sprekkdannelse som slipper ut trykket, mens et sprøtt materiale vil sannsynligvis få en utblåsing som slipper ut trykket. Det vil være viktig å merke seg at denne trykkoppbyggingen vil foregå i en modul som brenner.

Om det skulle komme inn kjølemiddel her vil det ikke ha noen store konsekvenser da denne modulen vil bli kassert. Blir modulene bygget tette vil det også være et krav (DNV-GL, 2018, 27) at man plasserer en sikkerhets trykkventil, som vil åpne seg dersom trykket blir for høyt.

Som en førsteinnsats kan man bruke sprinkelanlegg som er plassert i taket på batteritanken. Disse sprinklene vil fungere som initial kjøling og slukking. De vil også bidra til å dekke modulen med kjøling hvis dette skulle bli nødvendig. Ved å ha sprinkelanlegg vil man tidlig kunne få direkte kjøling på modulen som både vil bidra til å hindre at brannen sprer seg videre til andre moduler og mulig slukke brannen tidlig. Et sprinkelanlegg vil kunne medføre risiko for lekkasjer og utilsiktet utløsning. Dersom det skulle være tilfelle at man får en lekkasje eller utilsiktet utløsning vil det være fordelaktig at man benytter ferskvann i sprinkelanlegget. Ved å benytte ferskvann i sprinkelanlegget vil man minimere sjansen for klogass og ferskvann vil ikke lede strøm på samme måte som sjøvann ville gjort.

6.3 Anbefaling

Ettersom det kun vil være mulig å benytte seg av en kjølende slukkemetode vil den anbefalte løsningen bli at man har et sprinkelanlegg med ferskvann som ivaretar den initiale slukkingen og kjølingen. Dersom dette ikke skulle være tilstrekkelig vil neste steg være å dekke modulen med kjølemiddel for å få slukket brannen så raskt som mulig. Sett ut ifra testen gjort av DNV-GL vil vann være det foretrukne kjølemiddelet. På grunn av klogass produksjon ved bruk av saltvann, vil det være lurt å bruke en kombinasjon av ferskvann og sjøvann. Det anbefales også at BIBS systemet videreføres.

7. Sammensatt løsning

Det har til nå blitt sett på ulike løsninger på de 4 elementene for brannbekjempelse av LIB, disse elementene er knyttet opp til forskjellige utfordringer på ubåt. Deretter har oppgaven kommet med en anbefaling for hvordan man best mulig kan håndtere disse utfordringene. Satt sammen vil denne løsningen ha gass- og temperatursensorer som overvåker et sett av moduler, modulene vil være laget av aluminium kledd i et A-60 materiale med kjøling på hver modul. Batteritanken vil være delt inn i underseksjoner som med fysiske skiller for å isolere modul gruppene fra hverandre. I cellene vil det være plassert en elektrospunnet kjernefilm som ved «thermal runaway» vil bli sluppet ned i elektrolytten og hindre cellen i å antenne. Slukkesystemet vil bestå av et sprinkelanlegg som fungerer som førsteinnsats ved deteksjon av brann. Dersom brannen ikke skulle bli slukket vil man dekke tilgjengelige flater på modulen med vann for å kjøle ned og slukke brannen, samt holde modulen kjølt ned over lengre tid. BMS vil ha mulighet til å stenge av moduler og/eller strenger og det vil også finnes to eller flere manuelle brytere som et alternativ til BMS for å skape redundans på dette punktet.

Fordelene med foreslått løsning vil være at man får en tidlig varsling på ventilering eller temperaturøkning i modulene. Dette oppnås ved å gass- og temperatursensorer plassert på en slik måte at de detekterer avvik fra normalen. Denne type plassering vil bidra til at man kan gjøre grep tidlig i situasjonen som minsker risikoen for at en brann eller eksplosjon skal kunne oppstå. Det negative med denne type sensorplassering er at man ikke får noen varsling på feil i cellene før kjernefilmen utløses. Det positive med kjernefilmen vil være dens egenskap til å minimere risikoen for branntilløp i cellene. Kjernefilmen er dog relativt ny teknologi som kan bety at den er lite testet over lengre tid i et driftsperspektiv.

Modulene vil være laget i aluminium kledd i et A-60 klassifisert materiale. Aluminiumen vil føre til at varmen i modulen blir spredd utover modulen slik at ikke temperaturen kun øker i et punkt. Kledningen utenfor vil hindre annen oppvarming fra omgivelsen. Underseksjonene beskrevet i oppgaven vil bidra til å hindre en brann i å spre seg blant modulene. Inndeling i underseksjonene innebærer også at vedlikehold som krever at batteriene tas ut av ubåten blir vanskeligere.

Videre så vil man ved denne løsningen ha egne avgassrør som hindrer avgassene i å blande seg med luften og dermed reduserer eksplosjonsfaren betydelig. Plasseringen av sensorene er anbefalt å være i disse avgassrørene.

Ved slukking av brann anbefales vann som slukkemiddel, der den første innsatsen er et sprinkelanlegg. Dersom brannen videre skulle utvikle seg vil man dekke modulene i underseksjonen med vann. Store mengder vann vil føre til ustabilitet, som igjen kan resultere i andre farlige situasjoner. Mengden vann er blitt betydelig redusert på grunn av underseksjonene, da man slipper å fylle en batteritank. Et sprinkelanlegg i et slikt system vil ha noen ulemper, da det øker risikoen for lekkasjer og utilsiktet utløsning.

8. Restrisiko/Konklusjon

Det er knyttet noe usikkerhet vedrørende kjernefilmen, de aktive slukkemidlene, slukkemetodene og LFP cellene, grunnet modenhetsnivået til disse komponentene og systemene. Dette gjør det vanskelig å si med sikkerhet hvilke utfordringer som kan komme. På en annen side er det flere kjente utfordringer og faremomenter som er blitt beskrevet i denne oppgaven som løsningen vil klare å håndtere. Det er ikke blitt foretatt noen tester av de foreslåtte løsningene, noe som gjør det vanskelig å kvantifisere effekten av disse. Ved den foreslåtte løsningen så vil man klare å redusere risikoen for brann og tilløp til brann som er et hovedmål i seg selv. Løsningen minimerer også muligheten for spredning av brann ved hjelp av kjøling på hver modul og brannklassifisert materiale rundt hver modul. Løsningen reduserer videre risikoen for «thermal runaway» da den har kjøling på hver modul og kjernefilm i cellen. Kjernefilmen vil hindre «thermal runaway» fra å videreutvikle seg til brann eller eksplosjon. Eksplosjonsfaren blir redusert ved å ha et eget eksosrør i tilfelle ventilering for å hindre at avgassene blander seg med luften. Videre blir risikoen for uoppdagede celle ventilering redusert ved å ha forskjellige sensorer smart plassert i eksosrøret til modulene. Videre risiko med denne løsningen er lekkasjer og utilsiktet utløsning av sprinkelanlegget. Ved å ha kjernefilmen i cellene vil dette medføre en risiko for uoppdaget aktivering av kjernefilmen, aktiveringen innebærer en reduksjon i cellenes ledeevne og dermed levert effekt.

Konklusjonen er derfor at denne løsningen bidrar til å redusere restrisikoen til et akseptabelt nivå.

9. Videre studier

I denne oppgaven har det blitt beskrevet ulike løsninger knyttet til fire elementer innenfor brannbekjempelse av LIB. Det har ikke blitt beskrevet noe i dybden vedrørende disse fire elementene eller løsningene. Det vil derfor være gode muligheter for videre studie. Noen av studiene som kan gjennomføres er listet opp under.

Gjennomføre en test og studie av de ulike slukkemidlene som er aktuelle til slukking av brann i LIB. Det anbefales da at denne studien blir testet etter design på modul er kjent slik at nøyaktigheten på resultatet blir best mulig.

Når designet på modul og batteritankene er kjent anbefales det å teste og analysere de ulike slukkemetodene for mest mulig effektiv slukking av brann i LIB ombord en ubåt.

Foreta en test og studie av materiale som omslutter modulene. I denne oppgaven ble det anbefalt å ha et A-60 materiale som omslutter modulene og at dette skulle tåle trykket fra en eksplosjon. Det vil derfor være mulighet for å teste hvor stort dette trykket kan bli. Studere hvilke typer materiale som tilfredsstillt anbefalingen om A-60 klassifisering og trykket fra en eksplosjon.

I oppgaven er det ikke nevnt noe om gass slukking som et alternativ. Halon som slukkemiddel brukes i dag ombord Ula-klassen. Det er kommet flere gode alternativer til Halon deriblant karbondioksid, nitrogen eller blandingsgasser. Gass slukking vil være en alternativ metode for brannslukking ombord og det vil derfor være interessant å teste og studere muligheten for dette.

10. Kildeliste

Foredrag:

Forseth, Sissel

2016. *Li-ionbatterier til militært bruk – muligheter og utfordringer*. Foredrag i FFI-forum, 15. April.

Bøker:

Pistoia, Gianfranco

2014. *Lithium-Ion Batteries advances and applications*. Amsterdam: Elsevier

Rapporter:

Agerup Siril Hegèn. Lisa Schei Blikeng

2013, *Brann i elektrisk bil*

<https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/152073/BlikengAgerup.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Aksdal Guro Grønflaten, Thomas Wenneck Askeland

2003, *Risikokartlegging for store litiumbatterier*

<https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/151692/AskelandAksdal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bøe, Andreas Sæter

2017, *Fullskala branntest av elbil* risefr.no Versjon 1

<http://www.risefr.no/media/publikasjoner/upload/2017/a17-20096-03-01-fullskala-brannforsok-av-elbil.pdf>

DNV-GL

2017 *Consideration for ESS fire safety*, New York: Consolidated Edison

<file:///C:/Users/Lasse/Downloads/20170118-ConEd-NYSERDA-Battery-Testing-Report.pdf>

Hansen Per Arne, Ragni Fjellgaard Mikalsen, Geir Dragensholt, Ragnar Wighus, Anne Steen-Hansen

2012, *Tåleevne til brannvegger*

<http://www.risefr.no/media/publikasjoner/upload/2014/spfr-a20046-taleevne-til-brannvegger.pdf>

Klokkehaug Eivind

2017, *Test av litium-ion batterier for transportmidler med høy belastning- og fokus på varmeutvikling*

file:///C:/Users/Lasse/Downloads/17443_FULLTEXT.pdf

Liu Kai, Wei Liu, Yongcai Qiu, Biao Kong, Yongming Sun, Zheng Chen, Denys Zhou, Dingchang Lin, Yi Cui

2017, *Electrospun core-shell microfiber separator with thermal-triggered flame-retardant properties for lithium-ion batteries*

<http://advances.sciencemag.org/content/advances/3/1/e1601978.full.pdf>

Nettsider:

Control Engineering, hentet: 14.04-2018

2013. Temperature sensors: Make the right choice, RTD vs. TC

<https://www.controleng.com/single-article/temperature-sensors-make-the-right-choice-rtd-vs-tc>

Geltech solutions, hentet: 19.04-2018

<http://www.geltechsolutions.com/fireice/emfids-2.aspx>

Hazard Control Technologies, hentet: 19.04-2018

<http://www.hct-world.com/products/chemical-agents/f-500-encapsulator-agent/>

IDT (integrated device technology), hentet: 14.04-2018

2017. *Flammable gas sensor*

<https://www.idt.com/document/dst/sgas711-datasheet>

IDT (integrated device technology), hentet: 14.04-2018

2017. *Trace hydrogen sensor*

<https://www.idt.com/document/dst/sgas701-datasheet>

Pyrocool Technologies, hentet: 19.04-2018

<http://www.pyrocooltech.com/pyrocool-aerosol/>

Store medisinske leksikon, hentet 25.04-2018

<https://sml.snl.no/karbondioksid>

Store medisinske leksikon, hentet 25.04-2018

<https://sml.snl.no/karbonmonoksidforgiftning>

Regelverk:

DNV-GL

2018, *Rules for classification, Part 6 Additional class notations Chapter 2, Propulsion, power generation and auxiliary systems*

<https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2018-01/DNVGL-RU-SHIP-Pt6Ch2.pdf>

Sjøfartsdirektoratet

2016, *Veiledning om kjemisk lager for energi maritime batterisystemer*

<https://www.sdir.no/contentassets/87f39103a890462a81b43a3dd6544023/maritime-batterisystemer-18-07-2016-005.pdf?t=1523636210186>

Bilder:

Bilde 2 hentet den 24.04-18

<https://www.homepower.com/articles/solar-electricity/equipment-products/battery-chemistry>

Bilde 3 hentet den 24.04-18, bilde 8 av 13

<https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/152073/BlikengAgerup.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Bilde 7 hentet 23.05-2018

<http://advances.sciencemag.org/content/advances/3/1/e1601978.full.pdf>

Bilde 8 hentet den 24.04-18

<file:///C:/Users/Lasse/Downloads/20170118-ConEd-NYSERDA-Battery-Testing-Report.pdf>