

# BACHELOROPPGAVE

En eksperimentell studie om effektiviteten til ulike isolasjonsmaterialer for å forhindre propagering i litium-ion batterisystemer.

An experimental study on the efficiency of different insulation materials for preventing propagation in lithium-ion battery systems.

**115 Anders Haugerud** 

# **116 Brede Alvseike Hallberg**

# 117 Eirik Bakke Høibjerg

Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap Institutt for sikkerhet, kjemi- og bioingeniørfag Intern veileder: Sanjay Kumar Khattri Ekstern veileder: Kurt Tofte Rusås Haugesund, 04.06.2024









# Forord

Dette bachelorprosjektet er utført ved Høgskulen på Vestlandet, campus Haugesund, vårsemesteret 2024. Oppgaven markerer slutten på en treårig branningeniørutdanning, underlagt instituttet for sikkerhet, kjemi- og bioingeniør. Prosjektet er utført i samarbeid med Bergen brannvesen, som har kommet med en spennende og interessant problemstilling. Rapporten vender seg til batteriindustrien for økt batterisikkerhet.

En stor takk for veiledning og bidrag rettes til:

Intern veileder Sanjay Kumar Khattri ved HVL, for hans veiledning rundt bacheloroppgaven.

Ekstern veileder Kurt Tofte Rusås ved Bergen brannvesen, for en spennende problemstilling og hans ekspertise innenfor temaet.

Arjen Kraaijeveld, Anita Meyer og Bjarne Christian Hagen ved HVL, for god hjelp rundt gjennomføring av forsøk og teoretiske innspill.

Corvus Energy for bidrag med battericellene brukt i dette prosjektet.

Torleif Lian ved Forsvarets forskningsinstitutt og Leif Haugerud, for gode innspill rundt gjennomføringen av forsøkene.

Kris Dullaert ved Etex Group, for bidrag med materialer.

Jarle Bertelsen og elevene i klasse 1 TIF E ved Karmsund VGS, for produksjon av stålriggen.

Haugesund, 04.06.2024

Eirik Bakke Hoibjerg

Eirik Bakke Høibjerg

Anders

Anders Haugerud

Brede Alvseike Hallberg









### Sammendrag

Utnyttelsen av litium-ion batterisystemer om bord på maritime fartøy, spesielt i Norge, har fått en kraftig utvikling de siste årene. Batterisystemer er generelt trygge, men konsekvensene blir ofte store ved uønskede hendelser, slik som thermal runaway. Følgelig øker sikkerhetsbehovet.

I batterisystemer ønskes det høy energitetthet, som fører til et kompakt system. Dette gjør det utfordrende å komme til med automatiske slokkeanlegg. Når thermal runaway oppstår i en battericelle vil nabocellen være eksponert for oppvarming, og dette kan føre til en kjedereaksjon. Fokuset beveger seg derfor over til å hindre propagering, i stedet for å slokke brannen. Isolasjonsmaterialer er et effektivt brannsikringstiltak på dette området.

Denne rapporten har til hensikt å teste materialers egnethet for å hindre propagering. Materialene som testes er Dalfratherm-1200 ULS, Aeroguard Ultra og Promaseal-PL. Metodikkene anvendt for å gjennomføre testene er beregninger og eksperimentelle forsøk. Beregningene fungerer veiledende for å gi et bilde på hvor godt materialene leder varme, og danner grunnlaget for hypotesene. Forsøkene består av to battericeller som er plassert på hver sin side av isolasjonsmaterialet, hvor ett av dem blir antent. Gjennom visuelle observasjoner og eksperimentell data er det mulig å finne ut om propagering oppstår.

I de seks gjennomførte forsøkene, med materialer, oppstod propagering. Samtlige materialer hindret propagering i perioden fra initiering til utbrent battericelle. I perioden etter utbrent battericelle fortsatte varmeledningen gjennom materialene på grunn av den indre energien i battericellen. Dette førte til propagering.

Det var stor variasjon i materialenes ytelse. Promaseal og Dalfratherm motstod propagering i ca. 2 minutter, men Promaseal ble påført mindre varme. Aeroguard hindret propagering i ca. 5 minutter og er det tynneste materialet av de tre. Følgelig konkluderes det med at Aeroguard er det best egnede materialet testet i denne rapporten. Det anses som viktig å implementere temperaturreduserende tiltak for å senke varmeledningen gjennom materialene i perioden etter utbrent battericelle. Ved å kombinere bruk av isolasjonsmaterialer mellom battericellene sammen med aktive temperaturreduserende tiltak, vil det på en god måte sikre batterisystemene om bord på fartøy.









# Abstract

The utilization of lithium-ion battery systems onboard maritime vessels, particularly in Norway, has seen significant development in recent years. Battery systems are generally safe, but the consequences can often be severe in the event of unwanted incidents, such as thermal runaway. Consequently, the need for safety increases.

In battery systems, high energy density is desired, which leads to a compact system. This makes it challenging to access with automatic extinguishing systems. When thermal runaway occurs in a battery cell, the neighboring cell will be exposed to heating, and this can lead to a chain reaction. The focus thus shifts to preventing propagation, rather than extinguishing the fire. Insulation materials are an effective fire safety measure in this area.

This report aims to test the suitability of materials to prevent propagation. The materials tested are Dalfratherm-1200 ULS, Aeroguard Ultra, and Promaseal-PL. The methodologies used to conduct the tests are calculations and experimental tests. The calculations serve as a guidance to provide an overview of how well the materials conduct heat and form the basis for the hypotheses. The tests consist of two battery cells placed on either side of the insulation material, with one of them being ignited. Through visual observations and experimental data, it is possible to determine if propagation occurs.

In the six tests conducted with materials, propagation occurred. All materials prevented propagation from the initiation to the burnout of the battery cell. In the period after the battery cell burnout, heat conduction through the materials continued due to the internal energy of the battery cell. This led to propagation.

There was considerable variation in the performance of the materials. Promaseal and Dalfratherm resisted propagation for about 2 minutes, but Promaseal experienced less heat exposure. Aeroguard prevented propagation for approximately 5 minutes and is the thinnest material of the three. Consequently, it is concluded that Aeroguard is the most suitable material tested in this report. It is considered important to implement temperature-reducing measures to lower heat conduction through the materials in the period after battery cell burnout. By combining the use of insulation materials between battery cells with active temperature-reducing measures, battery systems onboard vessels can be effectively secured.









# Innhold

Forord	II
Sammendra	gIV
Abstract	VI
Begrepsavk	aring1
1. Innledn	ing2
1.1 Ba	kgrunn2
1.2 Pro	blemdefinering
1.2.1	Hypotese
1.3 Av	grensning5
2. Metode	
2.1 Lit	teraturstudie6
2.2 Be	regninger6
2.3 Ek	sperimentell metode
3. Teori	
3.1 Lit	ium-ion battericelle
3.2 JP3	9 NMC - Battericelle
3.3 Ba	tterisystem
3.3.1	Barrierer i batterisystemer
3.4 Th	ermal runaway13
3.4.1	Antennelsesmetoder
3.4.2	Testforholds påvirkning på thermal runaway18
3.5 Re	gelverk / DNV
3.5.1	Propageringstest
3.6 Ma	terialer
3.6.1	Dalfratherm-1200 ULS
3.6.2	Aeroguard Ultra
3.6.3	Promaseal-PL
3.6.4	Fjordpanel21





4.	Eks	perin	nentelt oppsett	. 23
4	1.1	Utst	yrsliste	. 23
4	1.2	Desi	ign av stålrigg	. 23
4	1.3	Fors	søk	. 26
4	l.4	Feill	kilder	. 30
5.	Res	ultat		. 31
5	5.1	Bere	egninger	. 31
5	5.2	Fors	øk	. 37
	5.2.	1	Propageringstest	. 38
	5.2.	2	Dalfratherm-1200 ULS	. 38
	5.2.	3	Aeroguard Ultra	. 47
	5.2.	4	Promaseal-PL	. 53
6.	Disl	kusjo	n	. 59
6	5.1	Bere	egninger	. 59
6	5.2	Fors	søk	. 60
	6.2.	1	Feilkilder	. 60
	6.2.	2	Propageringstest	. 61
	6.2.	3	Dalfratherm	. 61
	6.2.	4	Aeroguard	. 63
	6.2.	5	Promaseal-PL	. 65
$\epsilon$	5.3	Sam	menlikning	. 66
7.	Kor	Konklusjon		
8.	8. Referanser			. 69
Liste over Figurer			. 71	
Ve	Vedlegg A: Utstyrsliste			. 75
Vedlegg B: Numeriske beregninger fra Matlab				. 76
Ve	Vedlegg C: Risikoanalyse			
Ve	Vedlegg D: Prosedyre for forsøk			





# Begrepsavklaring

Begrep	Forklaring		
Propagering	Når en brann sprer seg og forplanter seg fra celle til		
	celle.		
TR	Thermal runaway		
SEI	Solid electrolyte interphase		
DNV	Det Norske Veritas		
Termisk konduktivitet	Koeffisient for materialets evne til å lede varme.		
CID	Current Interrupt Device		
	Overbelastningsvern som aktiveres ved høyt trykk,		
	høye temperaturer eller høy spenning, avhengig av		
	design.		
МСВ	Module Control Board		
PDM	Pack Disconnect Module		
SOC	State of charge		
	Batteriets ladetilstand		
SOH	State of health		
	Batteries helsetilstand		
Transient varmeledning	Varmen som overføres gjennom et objekt, er ikke		
	konstant. Varmeoverføringen er tidsavhengig [1].		
Semi-uendelig objekt	Et materiale anses som semi-uendelig dersom		
	varmeoverføringen gjennom det, skjer gradvis over		
	tid. Gjelder for $Bi > 1$ [1].		
Termisk tynt objekt	Et materiale anses som termisk tynt dersom		
	varmeoverføringen gjennom det er stasjonær. Gjelder		
	for <i>Bi</i> < 0,1 [1].		
Brennbarhetsområde	Dersom en blanding av brennbar gass og oksygen		
	skal kunne antenne, må blandingsforholdet være		
	mellom den nedre og øvre brennbarhetsgrensen [2].		







#### 1.1 Bakgrunn

I et samfunn med et rasktvoksende fokus på miljø og bærekraftighet, får energilagring i litiumion batterier stadig sterkere fotfeste. Litium-ion batterier brukes blant annet i biler, båter, fly, mobiler, PCer og boliger. Den kraftige utviklingen innen batteridrevne båter siden 2019 kommer frem av Figur 1 [3]. Denne økningen antas kun å fortsette.



Figur 1: Utvikling av antall batteridrevne båter [3].

Til tross for utviklingen, henger lover, standarder og regelverk etter når det gjelder sikkerhet omhandlende propagering i batterisystemene. Det Norske Veritas har utredet en propageringstest med veiledning som skal gjennomføres [4]. Testen har ulike krav som må tilfredsstilles før batterisystemene kan tas i bruk. Norge er det ledende landet på batteridrevne båter, og må drive med egen innovasjon for å danne et grunnlag for lover, standarder og regelverk [5].

Litium-ion batterier er i utgangspunktet trygge å bruke, så lenge de er designet, produsert og brukt på ordentlig måte [6]. Til tross for dette kan det likevel forekomme uønskede hendelser som kan resultere i branner og eksplosjoner. En brann i et litium-ion batteri er vanskelig å





slokke av ulike årsaker, og har gjerne større konsekvenser. Batterisystemene er kompakte da det ønskes høy energitetthet. Følgelig er det utfordrende å komme til med automatiske slokkeanlegg. I tillegg produserer branner i litium-ion batterier oksygen, som gjør det utfordrende å kvele brannen [7]. Derfor beveger fokuset seg fra å slokke den brennende cellen, til å hindre at nabocellene antenner. Dette danner bakgrunnen og motivasjonen for denne rapporten som ser på isolasjonsmaterialers egnethet til å hindre propagering i batterisystemer.

#### **1.2 Problemdefinering**

Ettersom flere maritime fartøy begynner å benytte seg av litium-ion batterier som sin primære energikilde, vil det føre til endringer i sikkerhetskulturen knyttet til dette området. Det er et stort behov for sikkerhetssystemer som på en løsnings- og kostnadseffektiv måte løser problemer som kan oppstå ved eventuelle ulykker på disse batterisystemene. Disse løsningene skal blant annet fungere på en preventiv måte ved å forhindre at branner i disse systemene oppstår, eller redusere omfanget ved en eventuell brann. Dette sikkerhetsbehovet eksisterer i stor grad i dag, og vil øke i takt med den teknologiske utviklingen av batteridrevne fartøy.

Dagens sikkerhetssystemer benytter seg av forskjellige metoder for å forhindre at det oppstår propagering i batterimodulene. Disse sikkerhetssystemene må tilfredsstille kravene gitt fra DNV angående propagering i litium-ion batterier ombord på fartøy. Hvilken propageringstest som skal utføres, er avhengig av hvilket oppsett på battericellemodulene som blir benyttet. Det er to forskjellige oppsett av batterisystemene, der den ene omhandler systemer der propageringsskillet er mellom hver enkel battericelle, mens det andre oppsettet er hvor propageringsskillet er mellom batterimodulene i systemet [4].

Som tidligere nevnt, er branner i litium-ion batterier svært komplekse og vanskelige å slokke. Det er derfor viktig å undersøke ulike metoder for å forhindre at slike branner kan oppstå eller utvikle seg til å bli problematiske. Grunnet uforutsigbarheten til litium-ion batterier, kan det i teorien oppstå en brann uten ekstern påvirkning. «Generelt er det svært liten risiko for en brannstart som skyldes kortslutning eller en annet feilfunksjon i batteriet. Når et batteri antennes skyldes det som oftest ytre årsaker som feil ved lading, mekanisk skade eller overoppvarming» [8].

En oversikt over de ulike metodene som kan forårsake en brann i et litium-ion batteri, finnes i Figur 2.





### **HVORFOR BRENNER LITIUM-ION BATTERIER?**



Figur 2: Visuell oversikt over måter litium-ion batterier kan begynne å brenne [9].

Dersom det skal fokuseres på å unngå at brannen sprer seg i et batterisystem, kreves det isolasjon mellom hver battericelle, eller mellom hver enkel batterimodul. Det er flere måter disse battericellene kan isoleres på, og i denne rapporten vil det settes fokus på isolasjonsmaterialer. Med tanke på at denne teknologien er relativt ny og under stadig utvikling, er dette temaet veldig relevant for at energi kan utnyttes på en mer effektiv måte. Samtidig er det viktig at sikkerhetsnivået opprettholdes på lik linje med den teknologiske utviklingen.

Denne oppgaven skal se på ulike materialers egnethet til å forhindre propagering mellom litiumion battericeller. Ved å forstå hva som eventuelt fungerer godt med noen materialer, kan denne

# Høgskulen på Vestlandet



informasjonen utnyttes til å finne flere gode alternativer. I undersøkelsene av de ulike materialene, blir det satt tre hovedkriterier for å bedømme materialets egnethet; termiske egenskaper, tykkelse og vekt.

#### 1.2.1 Hypotese

Hypotesene som blir satt i denne oppgaven tar utgangspunkt i de teoretiske beregningene i kapittel 5.1, som ble utført i forkant av eksperimentene. Det ble kun gjennomført beregninger for isolasjonsmaterialet Aeroguard. Beregningene tilsier at temperatur på andre siden av materialet når et kritisk nivå på 230 °C etter kun 19 sekunder ved analytiske beregninger og 20 sekunder ved numeriske beregninger. Det vil ta noe lenger tid enn 19-20 sekunder for å varme opp selve batteriet.

Følgende hypotese legges til grunn:

- Propagering oppstår etter ca. 25 sekunder for Dalfratherm-1200 ULS.
- Propagering oppstår etter ca. 30 sekunder for Aeroguard Ultra.
- Propagering oppstår etter ca. 20 sekunder for Promaseal-PL.

#### 1.3 Avgrensning

Batterier brukes på mange områder, men denne oppgaven begrenser seg til å kun se på propagering i maritime batterisystemer. Grunnet antall anskaffende batterier, tid og omfang av oppgaven vil det også kun testes et utvalg av materialer. Materialene som blir benyttet er Dalfratherm-1200 ULS, Aeroguard Ultra og Promaseal-PL.

Tre metoder kan benyttes til å initiere thermal runaway (TR); overlading, oppvarming og spikerpenetrering. Hvilken metode som benyttes gir utslag på resultatene. Denne rapporten baserer seg på spikerpenetrering som initieringsmetode, grunnet initieringsmetodens forutsigbarhet. Propageringstestene kan utføres og godkjennes på både celle- og modulnivå. Rapporten tar kun for seg propagering på cellenivå.

Enkelte beskrivelser av batterisystemer i kapittel 3.3 omhandler Corvus sitt spesifikke system. Andre systemer vil være annerledes. Dette presiseres på de aktuelle områdene i teksten.





### 2. Metode

Dette kapittelet skal belyse hvilke metoder som er brukt for å studere problemstillingen til denne rapporten. Metodene benyttet er litteraturstudie, beregninger og eksperimentell metode.

#### 2.1 Litteraturstudie

Litteraturstudie er benyttet til å lage et kunnskapsgrunnlag for å bygge opp under problemstillingen. For å få et teoretisk grunnlag i forkant av forsøkene er det benyttet rapporter, artikler, datablad og bøker. I denne oppgaven blir det benyttet litium-ion battericeller som blant annet blir brukt på maritime fartøy. For å finne krav til maritime batterisystemer brukes maritimt regelverk.

#### 2.2 Beregninger

For å svare på oppgavens problemstilling kreves det både målinger og observasjoner fra praktiske forsøk, og teoretiske beregninger som bidrar til å understøtte resultatene og tolkningen av disse. Resultatene fra de teoretiske beregningene vil også ha en veiledende rolle som setter grunnlag for eventuelle antakelser som må gjøres. Samtidig vil denne delen av rapporten knyttes tett opp mot informasjon og kunnskap som gruppen har tilnærmet seg i flere av emnene i løpet av studieperioden.

Beregningene vil benytte seg av målte verdier hentet fra testforsøket som ble gjennomført i forkant av de resterende førsøkene. For å sikre nøyaktighet, ble det benyttet to forskjellige beregningsmetoder; analytisk og numerisk metode. Resultatene fra beregningene ble brukt under fastsettelsen av hypotesene.

#### 2.3 Eksperimentell metode

For å kunne besvare problemet gitt i problemdefineringen om hvorvidt det finnes materialer som godt egner seg som isolasjon mellom litium-ion battericeller for å forhindre propagering, vil det bli gjennomført eksperimentelle forsøk. Ved å sammenlikne resultatene fra forsøkene





med teorien om ved hvilke temperaturer propagering kan inntreffe, vil det kunne bidra til å styrke den definerte hypotesen eller falsifisere den.

Det vil gjennomføres et testforsøk for å teste forsøksoppsettet, samt valgt antennelsesmetode av battericellen. Dette forsøket gjennomføres hos Bergen brannvesen, og forsøksoppsettet kan observeres på Figur 3 nedenfor. En annen hensikt med dette testforsøket er å få data på maksimaltemperatur langs flaten av battericellen.



Figur 3: Oppsett av testforsøk.

De eksperimentelle forsøkene vil ta for seg flere tester av de forskjellige materialene. Det er totalt tre materialer som skal testes; Dalfratherm-1200 ULS, Aeroguard Ultra og Promaseal-PL. Hvert av materialene skal i utgangspunktet testes to ganger hver. Grunnen til dette er antall tilgjengelige battericeller for testing, og behovet for en margin dersom noen av forsøkene ikke går som planlagt. Det tas forbehold for endringer underveis grunnet tidsbegrensninger. Under forsøket skal temperaturen på begge sider av isolasjonsmaterialet loggføres. Det plasseres to battericeller i riggen, en på hver side av isolasjonsmaterialet. Data fra loggføringen vil settes opp mot de teoretiske beregningene og hypotesene.





# 3. Teori

Dette kapittelet skal lage et teoretisk fundament for å kunne besvare problemstillingen. Det vil bli beskrevet hvordan en battericelle er bygd opp og dens kjemi. Kjemien i en batteribrann og brannspredning mellom battericeller skal forklares. Regelverket rundt maritime batterisystemer skal gjennomgås. I tillegg blir materialene benyttet i forsøkene beskrevet.

#### 3.1 Litium-ion battericelle

En litium-ion battericelle består av en anode, katode, separator, elektrolytt og to strømsamlere. Batteriet fungerer som et resultat av at elektroner og litium-ioner beveger seg mellom anoden og katoden. Elektronene beveger seg i en ekstern krets utenfor elektrolytten og separatoren, fra den ene strømsamleren til den andre. Strømsamlerne er lagd av metall grunnet deres egenskap til å lede elektroner. Den ene strømsamleren er koblet til anoden, og den andre til katoden. Når et batteri blir utladet transporteres elektronene fra anoden til strømsamleren tilhørende anoden, så gjennom en krets til strømsamleren tilhørende katoden. Deretter ledes elektronene inn i katoden. Litium-ionene transporteres mellom anoden og katoden i elektrolytten gjennom separatoren.

Elektrolytten er en væske innholdet i battericellen flyter i, og denne væsken gjør det mulig å transportere litium-ioner innad i cellen. Separatoren sitt formål er å skille anoden fra katoden, ettersom kontakt mellom disse vil medføre en intern kortslutning i batteriet [10]. De første gangene en battericelle lades og utlades, blir litt av elektrolytten dekomponert til en tynn film på anoden. Denne filmen kalles solid electrolyte interphase (SEI). SEI gjør at batteriet får en lengre levetid, og forhindrer videre dekomponering av elektrolytten. Filmen lar litium-ionene passere gjennom elektrolytten, i motsetning til elektronene [11]. Prosessen av hvordan en litium-ion battericelle utlades er visualisert i Figur 4, hvor litium-ionene er markert som grønne prikker.







Figur 4: Visualisering av en litium-ion battericelle [10].

#### 3.2 JP3 NMC - Battericelle

Det finnes tre ulike typer litium-ion battericeller; sylindriske celler, prismatiske celler og poseceller. Battericellene som blir benyttet i denne rapporten er av typen LGCHEM JP3 NMC Lithium-lon Polymer Battery, og dette er en posecelle. Posecellen er vist på Figur 5. Hovedårsakene til å velge posecelle er deres størrelse og vekt. Posecellene har en høyere energitetthet enn sylindriske og prismatiske battericeller, både med tanke på forholdet mellom energi og vekt, og energi og volum. Poseceller er konstruert på en måte som gjør dem fleksible, der anoden, katoden og separatoren ligger som tynne plater på hverandre. Fleksibiliteten til posecellene gjør det lettere å designe batterisystemene. I tillegg er poseceller generelt sett billigere å konstruere. Den største ulempen med poseceller er hvor utsatt de er for mekaniske påkjenninger. Grunnen til dette er fordi posecellen ikke har et lag med beskyttelse rundt cellen, sammenlignet med sylindriske og prismatiske celler. Mulige konsekvenser fra en mekanisk påkjenning beskrives i kapittel 3.4.1 [12] [13].







Figur 5: JP3 NMC litium-ion battericelle.

Litium-ion battericeller er alle konseptuelt bygd opp på samme måte. Det kan derimot benyttes forskjellige materialer i oppbygningen. De fleste battericellene får navn etter hvilke materialer katoden er laget av. I dette tilfellet er katoden laget av litiumnikkelmangan-koboltoksid (*LiNiMnCoO*<sub>2</sub>), derav navnet NMC. Hvilke materialer katoden er laget av har mye å si for egenskapene til batteriet. NMC-batterier har jevnt over gode egenskaper, og har særlig høy energitetthet [14]. Anoden er laget av grafitt, som ofte benyttes som materiale for anoden i litium-ion batterier. Grafitt er billig i forhold til andre materialer, har høy energitetthet og en lang levetid [15] [13].

#### 3.3 Batterisystem

Et batterisystem består av ulike komponenter, og oppsett av batterisystemene avhenger av produsent. De spesifikke systemene vil ha varierende størrelser etter kundens behov. Batterisystemet som beskrives er Orca Energy Storage System fra Corvus Energy, vist på Figur 6.







Figur 6: Orca Energy Storage System fra Corvus Energy [16].

De enkelte battericellene er montert i en modul. Modulen består av 24 battericeller i serie, og har en vekt på 58 kg. Hver modul har et kretskort (MCB) som sørger for at temperatur og spenning i cellene ikke overskrider maksverdier. Fremsiden av modulen viser status, mens baksiden har kommunikasjonsforbindelser, likestrømforbindelser for pluss og minus, og en avlastningsflate for håndtering av overtrykk i modulen. Denne avlastningsflaten er taktisk plassert for å lede overtrykket bort fra andre moduler. Under modulen er det kjøleribber for å kontrollere temperaturen i modulen.

Modulene er seriekoblet, og danner en batteripakke. Antall moduler i en pakke avhenger av kunden og dens behov. Det er mulig å koble flere pakker sammen, via en samleskinne i bunn, for å øke den totale energimengden.

I bunnen av hver batteripakke finnes det en frakoblingsmodul (PDM). Denne modulen overvåker spenninger, temperaturer og strøm i cellene. Modulen har også høyspentsikringer og isolerer batterimodulene fra samleskinnen i bunn. PDM viser også status for hele batteripakken.

# Høgskulen påVestlandet



Helt i bunn av systemet finnes stativet og stativbasen. Stativet er en kapsling som holder utstyr slik som modul, vifte og PDM på plass. Stativbasen er tilkoblingen av likestrøm forbindelsene til samleskinnen. Denne basen inneholder også viftene som avkjøler modulene, og et eksossystem som håndterer gasser dersom thermal runaway oppstår [16].

#### 3.3.1 Barrierer i batterisystemer

Det brukes flere barrierer med ulike funksjoner i eksisterende batterisystemer. Den første barrieren er mannskapet. Mannskap læres opp til å vedlikeholde, oppdage feil og alarmer, og hvordan de skal håndtere ulike hendelser [17].

Energiledelsessystem (ELS) er en barriere som ikke er en del av selve batterisystemet. ELS skal drifte systemet, og sørge for kommunikasjon og styring mellom de systemene som finnes om bord. Dette kan eksempelvis være batteripakke, hovedtavle og elmotor. ELS muliggjør overvåkning av batterisystemet. Overvåkningen inkluderer minste og høyeste temperatur i modulene, minste og høyeste spenning i cellene, spenningen i samleskinnen, SOH og SOC [17].

Batteristyringssystem (BSS) er en av de viktigste barrierene. Måten BSS fungerer på avhenger av produsenten, og følgende er en beskrivelse av Corvus sitt BSS. Temperatur- og spenningsovervåkning er de mest sentrale funksjonene til BSS. Disse har tre forskjellige nivåer ved unormale temperatur- eller spenningsverdier, hvor det laveste nivået kun er en advarselsalarm. Nivå to bryter strømmen fra modulen, mens nivå tre kutter strømmen inn og ut i hele batteriskapet. Styringssystemet sørger også for lik lading og utlading av alle battericellene, og overvåker SOH som resulterer i en prosentvis kapasitetsberegning i forhold til original batterikapasitet. I tillegg har BSS en avansert algoritme som kalkulerer hvor mye som kan lades og utlades basert på temperatur, spenning og SOH. Dette resulterer i gunstig utnyttelse av batteriene [17].

Isolasjonsmateriale mellom battericellene er en viktig barriere, og også den barrieren som denne rapporten omhandler. I batterisystemer hvor håndtering av TR skjer på cellenivå blir battericellene innkapslet med isolerende materialer som forhindrer at varmen sprer seg. Dette isolasjonsmaterialet avhenger av produsent [18].





#### 3.4 Thermal runaway

Forsøkene gjennomført i denne oppgaven baserer seg på at TR oppnås i batteriene. TR er en eksoterm selvforsterkende kjemisk reaksjon [19]. Denne kjemiske reaksjonen oppstår når det blir generert mer varme enn det som avgis til omgivelsene [20]. Det finnes tre ulike metoder for å produsere nok varme til å initiere TR, dette blir sett nærmere på i kapittel 3.4.1. Når temperaturen når 90 °C til 120 °C vil SEI på anoden begynne å dekomponeres eksotermt [21]. Ved 130 °C til 140 °C vil separatoren begynne å smelte, som medfører en intern kortslutning [22]. Når temperaturen når rundt 220 °C vil katoden begynne å dekomponere eksotermt og frigi oksygen [20]. Mengden oksygen frigitt ved dekomponering av katoden, vil ikke være tilstrekkelig for en komplett forbrenning av materialene i battericellen [20]. Frigjøringen av oksygen og fordamping av elektrolytten vil skape et høyt trykk, som gjør at cellen vil utvide seg. Når trykket blir høyt nok vil cellen sprekke og gassen i batteriet vil blande seg med luft. Gassen som kommer ut fra batteriet er varmet opp og brannfarlig, og kan selvantenne når den får riktig konsentrasjon med luft. Selv om det ikke blir en komplett forbrenning av materialene i cellen, vil dette gjøre slokkeinnsatsen på cellenivå vanskelig. Det er derfor ønskelig å begrense brannen til bare den ene battericellen, og hindre en spredning til de andre battericellene [23].

#### 3.4.1 Antennelsesmetoder

Det finnes tre ulike måter å initiere TR på. Felles for de tre metodene er brudd på separatoren, slik at anoden og katoden kommer i kontakt. Når anoden og katoden kommer i kontakt skaper dette en intern kortslutning. En intern kortslutning kan avgi opp mot 70 % av all energien i cellen i løpet av 60 sekunder. Varmen vil oppstå lokalt der den interne kortslutningen forekom. Det vil da være en høy temperatur på et lokalt sted, som videre vil varme opp resten av cellen, og skape TR [24].

En av metodene for å oppnå TR er oppvarming. Dersom cellen blir oppvarmet vil dette initiere en eksoterm reaksjon, som videre vil generere enda mer varme. Som nevnt i kapittel 3.4 vil det oppstå eksoterme reaksjoner når SEI dekomponeres og separatoren smeltes [20] [22]. I henhold til tidligere gjennomførte forsøk med NMC-battericeller vil TR inntreffe ved en skalltemperatur på 230 °C [20].

En annen måte for å oppnå TR er ved hjelp av overlading. Dette gjøres ved å lade batteriet mer enn det har kapasitet til. Denne metoden for å oppnå TR baserer seg på Joules lov. Joules lov beskriver sammenhengen av hvor mye varme som blir produsert i forhold til resistansen i kretsen, tiden og strømintensiteten [25]. Når battericellen er fult oppladet vil resistansen i

# Høgskulen påVestlandet



kretsen være høy, som fører til en økt varmeproduksjon etter Joules lov ved videre opplading. Denne varmen vil sette i gang de eksoterme reaksjonene som fører til TR [26].

Den tredje, og siste, metoden for å initiere TR er ved mekanisk påkjenning. Det er denne metoden som blir benyttet for å antenne battericellene i forsøkene til denne rapporten. En spiker blir slått inn i battericellen, og når denne kommer i kontakt med katoden og anoden skapes en elektrisk motstand som produserer varme [27]. Når temperaturen blir høy nok vil SEI begynne å dekomponere, og prosessen beskrevet i kapittel 3.4 vil fortsette. Metoden blir videre omtalt som spikerpenetrering.

I en rapport fra Forsvarets forskningsinstitutt (FFI) ble de tre initieringsmetodene testet og sammenliknet [28]. For spikerpenetrering ble det også testet med 100 % SOC, 75 % SOC og 50 % SOC. Det er kun aktuelt å sammenlikne 100 % SOC mot de andre initieringsmetodene.

De ulike metodene for initiering gir ulike resultater. Som vist på Figur 7 observeres det doble jetflammer fra forsøkene initiert med oppvarming og overlading, og disse flammene hadde høyere hastighet og intensitet enn flammene fra forsøket med spikerpenetrering. Spikerpenetrering fører også til jetflammer, men disse er betydelig mindre intensive. Flammene i forsøkene med spikerpenetrering varer lenger enn flammene fra oppvarming og overlading [28].



Figur 7: Sammenlikning av hvordan battericellen brenner ved de ulike initieringsmetodene [28].





Figur 8 viser forskjellene i ekstern energi fra de utførte forsøkene. Den eksterne energien er målt i jetflammen. Forskjellene er minimale, og snittene til de tre metodene er ca. den samme. Derimot er det større variasjoner for oppvarming og overlading [28].



Figur 8: Ekstern energi fra forsøkene med ulik initieringsmetode [28].

Figur 9 viser også ekstern energi i jetflammene, men per kvadratmeter. Dette gir en bedre indikasjon på hvor intensive jetflammene fra oppvarming og overlading er, i forhold til de fra spikerpenetrering. Arealet til flammene fra spikerpenetrering er større, slik at den totale eksterne energien fra Figur 8 blir spredt over et større areal [28].







Figur 9: Ekstern energi per kvadratmeter fra forsøkene med ulik initieringsmetode [28].

Som vist på Figur 10 fører spikerpenetrering til høyere verdier for indre energi, sammenliknet med oppvarming og overlading. Dette antas å ha en sammenheng med massetapet til battericellene i Figur 11 [28].



Figur 10: Indre energi fra forsøkene med ulik initieringsmetode [28].





Ved utbrent battericelle vil en spikerpenetrert celle ha større evne til å holde på varmen fordi det gjenværer mer metall, i motsetning til oppvarming og overlading [28].



Figur 11: Visuell forskjell av massetap ved de ulike initieringsmetodene [28].

Den numeriske forskjellen korresponderer med de visuelle forskjellene. Oppvarming ligger ca. midt mellom spikerpenetrering og overlading på både Figur 11 og Figur 12 [28].

Cell identification	Fire or flame	Average Cell mass loss [%]
Nail 50% SoC	Fire/No fire	13.90 ± 2.23
Nail 75% SoC	Fire	30.86 ± 0.41
Nail 100% SoC	Fire	39.55 ± 0.43
Heat	Fire	55.38 ± 0.92
Overcharge	Fire	72.26 ± 3.08

Figur 12: Numerisk forskjell av massetap ved de ulike initieringsmetodene [28].





#### 3.4.2 Testforholds påvirkning på thermal runaway

Temperatur og vind kan ha påvirkning på brannforløpet fra TR. For spikerpenetrering ved omgivelsestemperatur vil det ikke ha noen innvirkning på selve initieringsprosessen av TR. Når battericellen har 100 % SOC vil TR skje umiddelbart [29].

Temperatur og vind vil ha betydning for hvordan den neste battericellen antenner, eller ungår å antenne gjennom oppvarming. TR skjer ved en skalltemperatur på 230 °C, og vil fortere oppnå denne temperaturen dersom batteriet for eksempel starter på 45 °C, i motsetning 20 °C [20]. Starttemperatur på 45 °C er et av DNV sine testkrav for propageringstest i kapittel 3.5.1. Kaldere omgivelsestemperatur vil forsinke oppvarmingsprosessen via konvektiv avkjøling. Vind vil også blåse varmen og brennbare gasser bort fra systemet.

#### 3.5 Regelverk / DNV

Batteridrevne båter er relativt nytt, og som følge av dette henger lover og standarder etter. Det er kun ett regelverk som foreløpig er gjeldene for maritime batterisystemer. Det Norske Veritras har opprettet «Rules for Ships», og dette regelverket stiller krav til at samtlige batterisystemer skal bestå en propageringstest [4]. Det presiseres at forsøkene utført i denne rapporten ikke følger kravene til propageringstesten.

#### 3.5.1 Propageringstest

Propageringstesten kan gjennomføres på to nivåer. Den første testen omhandler batterisystemer som er designet med propageringsskille mellom hver enkelt battericelle inne i en modul. Den andre testen omhandler batterisystemer som er designet for at propagering ikke skal oppstå mellom hver modul. Grunnet rapportens avgrensning tas det kun hensyn til den første testen.

Følgende krav ved cellenivå er hentet fra «Rules for ships», og skal ivaretas ved testing [4]:

- 1. Testen skal repeteres 3 ganger, og må være suksessfull hver gang.
- 2. Testen skal gjennomføres med en omgivelsestemperatur på 45 °C.
- 3. Initieringsmetoden for thermal runaway skal enten være oppvarming eller overlading.
- 4. Den utløsende cellen skal være plassert i den verst tenkelige posisjonen, og i den verste tenkelige posisjonen i henhold til propagering.
- 5. Alle cellene i modulen må være tilkoblet, bortsett fra hvis overlading brukes som initieringsmetode. Da kan cellen som overlades være elektrisk frakoblet.





- 6. Modulen skal overvåkes i 24 timer etter thermal runaway.
- Hvis et aktivt middel blir brukt til å forhindre propagering må det frigjøres automatisk. Det må bli testet i samme konfigurasjon som når det blir installert.
- 8. Akseptkriteriet er at det kun er den cellen som direkte har feilet, via testing, som kan vise tegn til brann eller avgassing. Ingen andre celler kan vise tegn til thermal runaway, og må ha spenning som ved vanlig drift. Naboceller utstyrt med CID kan ha ikke-målbar spenning dersom cellens CID er aktivert grunnet høye temperaturer. For slike celler er det akseptabelt at spenningen ikke er målbar. For væskekjølte moduler må integriteten til væskekjølingsystemet være intakt.

#### 3.6 Materialer

#### 3.6.1 Dalfratherm-1200 ULS

Dalfratherm-1200 ULS, fra Figur 13, er et produkt fra Promat. Dalfratherm er en serie med tynne, lette og fleksible materialer med gode termiske egenskaper. ULS står for «ultra low shot». Dette betyr at det er lite glass granulat i materialet, som gjør det tryggere å behandle [30]. Dalfratherm har en brukstemperatur på 1050 °C, og tåler opp mot 1200 °C før materialet blir skadet [31]. Dalfratherm blir blant annet benyttet i ovner og skorsteiner, for behandling av metaller og innen olje- og gassindustrien.



Figur 13: Isolasjonsmaterialet Dalfratherm-1200 ULS.





Dalfratherm kommer i ulike tykkelser, og tykkelsen benyttet i dette forsøket er 3 mm. Massetettheten er ca. 200 kg/m<sup>3</sup> og den termiske konduktiviteten ved 600 °C er 0,10 W/mK. Spesifikk varmekapasitet er ikke tilgjengelig for dette materialet.

#### 3.6.2 Aeroguard Ultra

Aeroguard Ultra, som vist i Figur 14, er laget av Promat. Produktet er lett og særdeles tynt med en tykkelse på 1,75 mm. Av de tre materialene som blir brukt i denne rapporten, er dette det tynneste. Aeroguard har en massetetthet på  $380 \text{ kg/m}^3$ .



Figur 14: Isolasjonsmaterialet Aeroguard Ultra.

Materialet består av tre lag. Kjernen til materialet er fibre med gode termiske egenskaper. Disse er beskyttet på hver side med et ubrennbart lag. Aeroguard har en termisk konduktivitet nært det som er lavest teoretisk mulig ved høye temperaturer. Konduktivitetskoeffisienten ved 600 °C er 0,039 W/mK. Spesifikk varmekapasitet ved 600 °C er 1,04 kJ/kgK [32].





#### 3.6.3 Promaseal-PL

Promaseal, fra Figur 15, er et materiale som er ulikt de andre. Materialet er et laminat basert på grafitt, og ved temperaturer på 150 °C eller høyere vil dette ekspandere. Tykkelsen er 2,50 mm og brukes gjerne for branntetting av dører eller skjøter i vegger og gulv. Promaseal har klassifiseringen B-s1, d0.



Figur 15: Isolasjonsmaterialet Promaseal-PL.

Massetettheten er 400 kg/m<sup>3</sup>, noe som gjør materialet til det tyngste i denne rapporten. Den termiske konduktiviteten er 0,193 W/mK ved 10 °C [33]. Spesifikk varmekapasitet er ikke tilgjengelig for dette materialet, da det krever omfattende analyse av materialets komposisjon.

#### 3.6.4 Fjordpanel

Fjordpanel er et ett-lags panel som brukes i tog, skip og bygninger som stiller krav til lav vekt, gode termiske egenskaper og lang livstid. Panelet er bygget opp av naturlige materialer, som gjør produktet miljøvennlig, og kan fås i 4 mm og 6 mm tykkelse [34].

Panelet er forsterket med basaltfiber. Basaltfiber er laget av smeltede basaltbergarter. Disse fibrene har gode termiske egenskaper med et smeltepunkt på inntil 1450 °C, men er også tunge





[35]. Dette bidrar til at Fjordpanel har en massetetthet mellom  $300 \text{ og } 500 \text{ kg/m}^3$ . I denne rapporten blir det brukt en tykkelse på 6 mm og massetetthet på  $315 \text{ kg/m}^3$  [34].





### 4. Eksperimentelt oppsett

#### 4.1 Utstyrsliste

Se Vedlegg A: Utstyrsliste.

#### 4.2 Design av stålrigg

Stålriggen er rammeverket til oppsettet for forsøkene. Den består av en bunnplate, to sidevegger og to støttevinkler. Alle platene har en tykkelse på 6 mm da de skal tåle påført trykk ved spikerpenetrering, og når cellene prøver å blåse seg opp.

Sideplatene er like bortsett fra to sentrerte hull, og har dimensjonene 400 mm  $\cdot$  200 mm slik som vist på Figur 16. Platene har hull med 8 mm diameter i hvert hjørne, disse er plassert 14 mm inn fra kantene. På Figur 16 vises kun dimensjonene til ett av hjørnehullene, men alle er identiske på både Figur 16 og Figur 17. Disse hjørnehullene brukes til å feste platene sammen med M6 gjengestenger. Sentralt er det ett hull med diameter på 8 mm og ett hull med diameter på 2 mm. Hullet på 8 mm benyttes for å penetrere batteriet med spiker. Til siden, og ved samme høyde, er et hull på 2 mm hvor et termoelement føres inn. Plassering av disse hullene kommer frem av Figur 16.



Figur 16: Dimensjoner for sideplate som kun er festet med gjengestenger. Denne platen har også hull for spiker og termoelement.





Sideplaten på Figur 17 er den platen som blir sveiset fast i bunnplaten og støttevinklene. Den blir sveiset fast i bunnplaten med ekstra støttevinkler fordi det er denne platen som vil motta trykket av spikerpenetreringen.



Figur 17: Dimensjoner for sideplate som er sveiset fast i bunnplate og støttevinkler.

Støttevinklene på Figur 18 har kateter på 150 mm. Disse er sveiset fast på enden av langsiden til bunnplaten, med 140 mm mellom vinklene. Fra støttevinkel og ut til kortside på bunnplate er det 130 mm, som vist på Figur 19.



Figur 18: Dimensjoner på støttevinkler.





Dimensjonene på bunnplaten er 400 mm · 300 mm. Figur 19 illustrerer stålriggen sett ovenfra.



Figur 19: Dimensjoner på bunnplaten sett ovenfra. Figuren viser også posisjonen til støttevinklene.

Figur 20 gir en bedre illustrasjon for hvordan riggen ser ut i virkeligheten. Her fremkommer også en god oversikt over komponentenes plassering.



Figur 20: Isometrisk projeksjon av stålriggen.





Grunnet endringer i forsøksoppsett kort tid før gjennomførelser var anskaffede bolter for korte. Følgelig ble det brukt tre tvinger for å holde systemet kompakt og på plass.



Figur 21: Oppsett for forsøk 1 og 2. Tvinger blir benyttet for komprimering.

#### 4.3 Forsøk

I forkant av forsøkene lades battericellene opp. Det tar ca. en til en og en halv dag å lade en enkelt battericelle med anvendt ladeutstyr. Ladeutstyret som er brukt er Velleman DC LAB SWITCHING MODE POWER SUPPLY. Det brukes FLUKE 322 Clamp Meter for å sjekke spenningen, dette for å dobbeltsjekke hva som er pluss og minus på batteriet når det skal lades.




To JP3-battericeller blir plassert mellom veggene på stålriggen. Polene til cellene blir teipet med gaffateip på forhånd for å unngå uønskede kortslutninger. Fjordpanel blir deretter plassert mellom batteriet og stålveggen på begge sider. Fjordpanel sin funksjon er å begrense varmetapet som går til oppvarming av stålkonstruksjonen. Isolasjonsmaterialet som skal testes blir deretter ført inn mellom de to battericellene. Figur 22 viser hvordan forsøket er satt sammen, lag for lag. Hansker blir brukt ved håndtering av materialene grunnet støvpartikler som er irriterende mot hud.



Figur 22: Oversikt over lagvis oppsett av forsøk.

Det monteres tre K-type termoelementer på hver av batteriene. Disse monteres på den siden av batteriet som er vendt mot det andre batteriet. Plasseringen av termoelementene er 75 mm opp fra bunnen, og 75 mm inn fra sidene med et intervall på 75 mm, slik som vist på Figur 23. Termoelementene vil følgelig være på hver sin side av isolasjonsmaterialet, og kunne måle





temperaturforskjellen. I testforsøket var det kun festet termoelementer på ett av batteriene da det ikke var isolasjonsmateriale mellom disse.



Figur 23: Posisjonene til termoelementene på battericellene.

Sammenhengen mellom kanalene på grafene og plasseringen på batteriene kan ses på Figur 24. Det presiseres at denne figuren ikke har som hensikt å illustrere de eksakte posisjonene til kanalene, men heller gi en oversikt over hvor kanalene befinner seg på batteriene.







Figur 24: Plasseringen av termoelementer i forhold til hvilken kanal de har på grafene.

I veggen vil ett termoelement bli ført inn. Elementet sitter på samme vegg som spikeren føres gjennom, slik det kommer frem i kapittel 4.2. Hensikten er å måle hvor mye stålkonstruksjonen varmes opp. Deler av kablene til termoelementene er dekket med plastikk. Disse delene blir varmebeskyttet med aluminiumsfolie. Deretter blir kablene plugget inn i kabelforlengere, som igjen plugges inn i KEYSIGHT 34972A-loggeren. Loggeren blir koblet til PC med LabVIEW-programvaren. Frekvensen til loggeren blir satt til 1 Hz, begrenset av loggerens kapabilitet. Lavest frekvens for høyest nøyaktighet er ønskelig.

Battericellen penetreres med en 4 mm  $\cdot$  40 mm ankerspiker som er festet med gaffateip på en 2 meter lang stang. Teipen gjør at lengden til spikeren som passerer gjennom penetreringshullet





blir halvert til 20 mm. Dette er en sikkerhetsbarriere slik at batteriet kan penetreres på en sikker avstand. Forsøkspersonell vil også være ikledd røykdykkerutstyr ved penetrering og håndtering av utbrent battericelle, frem til denne er lagt i vannbad. Tang blir brukt til å forflytte battericellene, slik at det unngås direkte kontakt.

Stålriggen blir plassert på blokker av siporex for å få forsøkene opp i høyden. Dette for å gjøre det mer praktisk å arbeide med. For å dokumentere forsøkene brukes ett Sony EXMOR R 4K, to GoPro 11HERO Black og mobiltelefoner.

# 4.4 Feilkilder

Riggen som brukes i forsøket er laget av stål. Stålet vil bli varmet opp av forbrenningen til tross for at den isoleres, og vil følgelig føre til et uønsket varmetap.

Spikerpenetrering er en feilkilde da dette ikke vil være en naturlig initieringsårsak i et batterisystem ved en reell brann. Som belyst i kapittel 3.4.1 vil denne initieringsmetoden resultere i en høyere indre energi enn oppvarming og overlading. Dette kan føre til at materialer som ville kunne motstå en brann fra oppvarming og overlading, ikke klarer å motstå påkjenningen fra forsøkene utført i denne rapporten. Materialer som er egnet til å hindre propagering vil derfor kunne fremstå som uegnet. Dersom materialene fungerer ved spikerpenetrering, vil dette til gjengjeld gi en enda større sikkerhet.

Branner i batterier er uforutsigbare, og brenner ulikt fra gang til gang. Dette vil gjøre sammenlikninger av resultatet mer utfordrende, spesielt når det kun gjøres ett til tre forsøk per isolasjonsmateriale.

Flammene og energien fra en brann i et batterisystem vil i en høyere grad være fanget inne i systemet. Forsøkene utført i denne rapporten er gjort i et åpent system, slik at flammer og energi vil kunne forsvinne til det fri. Dette vil kunne redusere den totale varmepåkjenningen som materialene må kunne motstå.

Isolasjonsmaterialet dekker kun lengden av batteriene og ca. to ganger høyden. Dette tillater at battericellen kan påvirkes av varme på sidene og ovenfra.

I de to første forsøkene falt tvingen på den ene siden av, og dette førte til at sideveggen på stålriggen løsnet. Systemet skal være komprimert, og dette vil fungere som en ekstra variabel i resultatene.





# 5. Resultat

Dette kapittelet vil presentere resultatene for beregningene og de eksperimentelle forsøkene.

## 5.1 Beregninger

Som følge av den øyeblikkelige temperaturøkningen i battericellen etter den kjemiske reaksjonen, vil varme overføres gjennom materialet over tid. Varmen overføres hovedsakelig gjennom varmeoverføringsmekanismen varmeledning. Denne tidsbestemte varmeledningen blir omtalt som transient varmeledning [1].

Når objektet blir plassert i en situasjon der omgivelsestemperaturen er forskjellig fra objektets temperatur, vil temperaturen i objektet variere med hensyn på tid og posisjon. Inntil temperaturgradienten er stabil og lik gjennom hele objektet, anses objektet som et semiuendelig objekt. Ved en eventuell videre temperaturøkning forbi punktet der det ikke er en markant temperaturforskjell gjennom objektet, benyttes teorien om et termisk tynt objekt. Da kan temperaturen bergenes med en uniform temperatur gjennom hele objektets tykkelse [1]. I Figur 25 nedenfor kan det ses en illustrasjon av hvordan temperaturen er forskjellig ved ulike tykkelser i objektet.



Figur 25: Transient varmeledning gjennom et semi-uendelig objekt.

# Høgskulen påVestlandet



Et krav for at et objekt kan ses på som termisk tynt, er dersom Biot-tallet er mindre enn 0,1. Biot-tallet beskriver forholdet mellom den eksterne motstanden mot varmeledning (*h*) og den interne motstanden mot varmeledning (*k*). Formel (1) benyttes for å finne Biot-tallet, der *h* er konveksjonstallet [W/m<sup>2</sup>°C], *k* er varmeledningstallet [W/m°C] og den karakteristiske dimensjonen  $\frac{V}{A}$  er lik tykkelsen på en plate som blir påvirket av temperatur fra én side [1]:

$$Bi = \frac{hV}{kA} < 0,1\tag{1}$$

For utregning av blant annet Biot-tallet, blir data fra produsenten av materialene benyttet [32]. For materialet Promaseal, er det vanskelig å bestemme den termiske konduktiviteten, og derfor vil det ikke være mulig å utføre beregninger for dette materialet. Samtidig vil det ikke bli gjennomført noen videre beregninger for Dalfratherm, ettersom materialets varmekapasitet ikke er tilgjengelig fra produsenten. Biot-tallet kan riktignok beregnes for å se likheten med Aeroguard. Biot-tallene til de forskjellige materialene blir regnet ut i Tabell 1 nedenfor. Det presiseres at kun Biot-tallet til Aeroguard vil bli benyttet i de videre beregningene. Verdien for *h* antas til å være lik 10 W/m<sup>2</sup>°C.

Materiale	Utregning	Biot-tallet
Dalfratherm-1200 ULS	$Bi = \frac{10 \text{ W/m}^2 \text{°C}}{0.1 \text{ W/m}^2 \text{°C}} \cdot 0.003 \text{ m}$	0,3
Aeroguard Ultra	$Bi = \frac{10 \text{ W/m}^2 \text{°C}}{0,039 \text{ W/m}^2 \text{°C}} \cdot 0,00175 \text{ m}$	0,45

Tabell 1: Utregning av Biot-tallet for Dalfratherm og Aeroguard.

For Biot-tall under 0,1 kan forenklinger rundt temperaturgradienten i et objekt benyttes, og det kan antas en uniform temperatur i hele materialets tykkelse. Dersom det ikke kan antas at temperaturen er uniform, benytter man modellen for et semi-uendelig objekt. Denne antakelsen blir ofte benyttet ved Biot-tall over 1 [1].





Som vist i Tabell 1 ovenfor, er Biot-tallene for Dalfratherm og Aeroguard mellom 0,1 og 1. I slike tilfeller må det gjøres antakelser rundt hvilken varmeoverføringsmodell som vil benyttes for beregningene. Ettersom Biot-tallet beskriver forholdet mellom konvektiv varmeoverføring og intern varmeledning i et materiale, vil en trygg antakelse være at den interne varmeledningen vil være den dominerende mekanismen for varmeoverføring. Antakelsen er gjort på bakgrunn av hvordan materialet er satt opp i riggen, med battericellen tett inntil isolasjonsmaterialet.

Som følge av antakelsen om semi-uendelig objekt, vil det bli benyttet en matematisk modell som vist i formel (2) nedenfor. De matematiske beregningene som følger i denne delen av oppgaven, tar inspirasjon fra *«Kapittel 9.3 Transient varmeledning for semi-uendelig objekt»* i «Grunnleggende Brannteknikk» [1].

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right]$$
(2)

*T* er temperaturen som skal undersøkes,  $T_i$  er temperaturen på materialet før varmeeksponering og  $T_{\infty}$  er temperaturen som påvirker objektet. På høyre side av likningen er error-funksjonen, hvor *x* er tykkelsen av materialet, *t* er tid og  $\alpha$  er følgende forenkling (3):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_n} \tag{3}$$

hvor k er varmeledningskoeffisienten,  $\rho$  er massetettheten og  $c_p$  er varmekapasitet.

Formel (3) kan benyttes på flere måter for å undersøke forskjellige problemstillinger. Temperaturen kan enten undersøkes ved en bestemt dybde i materialet etter en bestemt tid, eller hvor lang tid det tar før den når en bestemt verdi ved en bestemt dybde.

Ved ca. 230 °C oppstår TR i litium-ion battericellen (NMC) [20]. Denne temperaturen vil bli benyttet videre i beregningene som følger.





I tillegg til de analytiske beregningene vil det benyttes en numerisk metode for å undersøke ved hvilke tidspunkter temperaturen til de forskjellige materialene er 230 °C. Ved å sette inn ett hensiktsmessig tidsintervall, og en tilstrekkelig mengde iterasjoner, vil det være mulig å finne et godt estimat. Dette gir større trygghet rundt nøyaktigheten av resultatene fra beregningene.

Følgende beregninger gjelder for isolasjonsmaterialet Aeroguard Ultra:

#### Analytisk metode:

Tiden til temperaturen i materialet er 230 °C, kan bestemmes ved å bruke formel (2).

$$\frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = \operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right]$$
(2)

Først må verdien til errorfunksjonen bestemmes.

$$\operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right] = \frac{T - T_{\infty}}{T_{i} - T_{\infty}}$$

$$\operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right] = \frac{230^{\circ}\mathrm{C} - 600^{\circ}\mathrm{C}}{20^{\circ}\mathrm{C} - 600^{\circ}\mathrm{C}}$$

$$\operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right] = 0,63793$$

$$(2)$$

Denne verdien tilsvarer en verdi for  $\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right]$  mellom 0,64 og 0,66 i oversikten over verdiene for error-funksjonen [36]. Det interpoleres mellom disse verdiene for å finne eksakt verdi for  $\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right]$ .

$$\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right] = 0.64 + \frac{0.66 - 0.64}{\operatorname{erf}(0.66) - \operatorname{erf}(0.64)} \cdot \left(\operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right] - \operatorname{erf}(0.64)\right)$$





$$\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right] = 0,64 + \frac{0,66 - 0,64}{0,64938 - 0,63459} \cdot (0,63793 - 0,63459)$$
$$\left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right] = 0,64452$$

Dette uttrykket løses deretter med hensyn på *t*.

$$\sqrt{\alpha t} = \frac{x}{2 \cdot 0,64452}$$
$$\alpha t = \left(\frac{x}{2 \cdot 0,64452}\right)^2$$
$$t = \left(\frac{x}{2 \cdot 0,64452}\right)^2 \cdot \frac{1}{\alpha}$$

Verdiene for tykkelsen x og uttrykket  $\alpha$  fra formel (4) settes inn.

$$t = \left(\frac{0,00175 \text{ m}}{2 \cdot 0,64452}\right)^2 \cdot \frac{\rho c_p}{k}$$
$$t = \left(\frac{0,00175 \text{ m}}{2 \cdot 0,64452}\right)^2 \cdot \frac{380 \text{ kg/m}^3 \cdot 1,04 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}}{0,039 \text{ W/m}^\circ\text{C}}$$
$$t \approx 19 \text{ s}$$

Det vil ta ca. 19 sekunder før temperaturen gjennom isolasjonsmaterialet Aeroguard er 230 °C med en ekstern påvirkning på 600 °C.

# Numerisk metode:

For den numeriske metoden blir følgende formel benyttet [37]:





$$T_{3}(t + \Delta) = T_{3}(t) + \frac{k \cdot \Delta t}{\rho c_{p}(\Delta x)^{2}} \cdot (T_{2} - 2T_{3} + T_{4})$$
(4)

hvor  $T_2$ ,  $T_3$  og  $T_4$  representerer temperaturen i forskjellige lag i materialet. En skisse over de forskjellige lagene kan observeres i Figur 25.

Det antas en rask temperaturutvikling, og derfor blir det benyttet et tidsintervall  $\Delta t$  på 1 sekund. Det gjennomføres 200 iterasjoner av likning (4). Dette er svært tidkrevende å gjøre manuelt, så det vil bli benyttet en «for-løkke» i programmet Matlab. Resultatet av utregningene kan observeres i Figur 26 nedenfor. For detaljert oversikt over funksjonen i scriptet og verdiene fra utregningene, se Vedlegg B: Numeriske beregninger fra Matlab.



Figur 26: Estimat av temperaturøkning etter numerisk metode.

Avlesning i utgangsdata fra scriptet viser at det tar ca. 20 sekunder før temperaturen når 230 °C. Det er altså liten forskjell mellom de to metodene.





## 5.2 Forsøk

I denne rapporten ble det gjennomført åtte forsøk, hvorav ett testforsøk. Testforsøket ble utført for å teste stålriggen i forkant av de aktuelle forsøkene. Resultater fra dette forsøket blir kun brukt til beregninger. Det ble utført en propageringstest, tre forsøk med Dalfratherm, to forsøk med Aeroguard og ett med Promaseal. Battericellene vil bli definert som eksponert og ueksponert battericelle, hvor eksponert er den cellen som blir spikerpenetrert. I figurene som viser temperaturutviklingen gjennom de ulike isolasjonsmaterialene, er det valgt å benytte en startverdi for tid ulik 0. Grunnen til dette er for å kun få med relevant tidsintervall.

Forsøkene ble utført over to dager. De to første forsøkene ble utført på første dagen, mens de resterende fem ble utført på den andre dagen. Tvinger ble brukt i de to første forsøkene for å holde stålriggen på plass, men i begge forsøkene falt den ene tvingen av. Dette førte til at den ene stålplaten løsnet, og systemet mistet sin komprimering slik som vist på Figur 27.



Figur 27: Løs sideplate etter forsøk med bruk av tvinger.





### 5.2.1 Propageringstest

Det ble benyttet to slag for å få en antenning i den første battericellen. Maksimal temperatur blir målt på kanal 4, som er plassert på en av sidene. Høyeste målte temperatur i propageringstesten er 808 °C, som vist i Figur 28. 1 minutt og 51 sekunder etter antenning er det ikke lenger en observerbar brann, og etter forsøket kan det observeres at begge battericellene er oppbrent. Det er derimot vanskelig å fastsette nøyaktig tidspunkt den ueksponerte battericellen antenner.



Figur 28: Temperaturutvikling for propageringstest (Forsøk 1).

#### 5.2.2 Dalfratherm-1200 ULS

I forsøk 2, 3 og 4 ble Dalfratherm testet. I alle tre forsøkene ble det brukt tre slag for å oppnå antenning med spikerpenetrering. Felles for de tre forsøkene er at temperaturen når rundt 500 °C til 600 °C på eksponert side etter at første celle blir antent. Temperaturene på den ueksponerte siden øker rolig til ca. 300 °C før den andre battericellen antenner. Temperaturene øker deretter til rundt 800 °C, før de rolig synker. Brannforløpet i de tre forsøkene er relativt like i henhold til visuelle observasjoner, men har ulikheter ved de analytiske resultatene.





### Forsøk 2

I forsøk 2 ble det brukt tvinger på yttersidene av metallplatene. Utvidelsen av battericellen førte til at tvingen løsnet på den ene siden, som kan ses på Figur 27. Kanal 6 og kanal 9 viser temperaturmålingene på denne siden. Materialet ble bøyd over battericellen, dette kan observeres på Figur 29.



Figur 29: Oppsettet av forsøk 2 før antennelse.

Etter spikerpenetrering tok det ca. 20 sekunder før den innledende fasen med intensiv jetflamme gikk over til en roligere forbrenning som vist på Figur 30. Temperaturen på eksponert side øker til ca. 560 °C på kanal 9 etter den innledende fasen. Dette var den høyeste temperaturen målt før propagering. I mellomfasen stabiliserer temperaturen på eksponert side seg på ca. 500 °C som vist på Figur 31.







Figur 30: Utbrenning etter intensiv jetflamme.

Propagering inntraff 1 minutt og 45 sekunder etter spikerpenetreringen. Ved propagering var temperaturen ca. 260 °C i midten på den ueksponerte siden, og ca. 460 °C på siden der tvingen var intakt. Den høyeste temperaturen etter propagering var ca. 860 °C på ueksponert side der tvingen var intakt.



Figur 31: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Dalfratherm, Forsøk 2).





Tabell 2 viser en oversikt over temperaturene på de ulike termoelementene plassert på battericellene. Det er valgt tre ulike tidspunkter hvor det er av interesse å observere eventuelle forskjeller i temperatur. Første rad i tabellen tar for seg tidspunktet når første battericelle er ferdig utbrent. Deretter blir tidspunkt for propagering og maksimal temperatur observert.

Tabell 2: Oversikt over temperaturen til de ulike termoelementene etter tidspunkt av interesse (Dalfratherm, Forsøk 2).

Temperaturfordeling på battericellen.	Tidspunkt på temperaturavlesning.	
$T_9 = 561^{\circ}C$ $T_8 = 373^{\circ}C$ $T_7 = 427^{\circ}C$	60 120	(00:44) etter initiering. Første battericelle er utbrent.
$T_4 = 462^{\circ}C$ $T_5 = 261^{\circ}C$ $T_6 = 314^{\circ}C$	180	(01:45) etter initiering. Øyeblikket propagering oppstår.
$T_4 = 858^{\circ}C$ $T_5 = 738^{\circ}C$ $T_6 = 695^{\circ}C$	180 240	<ul><li>(02:13) etter</li><li>initiering.</li><li>Høyeste temperatur</li><li>på ueksponert</li><li>battericelle etter</li><li>propagering.</li></ul>

#### Forsøk 3

Etter spikerpenetrering tok det ca. 22 sekunder før flammene gikk fra intense jetflammer over til en roligere forbrenning, som videre varte i 47 sekunder. Temperaturen på eksponert side i den innledende fasen jevnet seg ut på rundt 500 °C på eksponert side, som kan observeres på Figur 32. De ytterste termoelementene på ueksponert side målte begge en temperatur på rundt 400 °C, mens i midten økte temperaturen rolig opp mot 300 °C før propagering inntraff. Rett

# Høgskulen på Vestlandet



før den andre battericellen antenner oppstår det et temperaturfall på den ueksponerte siden, som kan sees på Figur 32. På to sekunder gikk temperaturen ned 25 °C på termoelement 4, mens termoelement 5 og 6 går ned rundt 15 °C.



Figur 32: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Dalfratherm, Forsøk 3).

Fra spikerpenetrering til propagering tok det 2 minutter og 28 sekunder. Etter den andre battericellen er utbrent er temperaturen på samtlige termoelementer rundt 710 °C til 770 °C.

I det tredje forsøket var det flammer på over- og venstresiden av battericellen. På den andre siden ble det dannet mye sort røyk uten at dette antente, som kan sees på Figur 33.







Figur 33: Antennelse etter spikerpenetrering i forsøk 3.

Tabell 3 nedenfor viser en oversikt over temperaturene på de forskjellige termoelementene ved ulike tidspunkter i brannforløpet fra forsøk 3.

Temperaturfordeling på battericellen.	Tidspunkt på tem	nperaturavlesning.
$T_9 = 488^{\circ}C$ $T_8 = 522^{\circ}C$ $T_7 = 447^{\circ}C$	120 180	(00:55) etter initiering. Første battericelle er utbrent.
$T_4 = 435^{\circ}C$ $T_5 = 370^{\circ}C$ $T_6 = 495^{\circ}C$	240 300	(02:28) etter initiering. Øyeblikket propagering oppstår.
$T_4 = 747^{\circ}C$ $T_5 = 745^{\circ}C$ $T_6 = 747^{\circ}C$	300	(03:12) etter initiering. Høyeste temperatur på ueksponert battericelle etter propagering.

Tabell 3: Oversikt over temperaturen til de ulike termoelementene etter tidspunkt av interesse (Dalfratherm, Forsøk 3)





### Forsøk 4

De intense jetflammene varte i 30 sekunder før det gikk over til en roligere forbrenning, som varte i ytterligere 47 sekunder. Det brant hovedsakelig på oversiden av battericellen, dette kan observeres på Figur 34. Ved kantene på eksponert side jevnet temperaturene seg ut på ca. 400 °C. I midten på samme side nådde temperaturen 590 °C, med påfølgende reduksjon til 540 °C. Propagering oppstår ved denne temperaturen.



Figur 34: Flammer bare på oversiden av batteriet i forsøk 4.

Det tok 1 minutt og 55 sekunder fra spikerpenetrering til propagering. I det den ueksponerte battericellen antennes kan det observeres et temperaturfall på kanal 8, fra Figur 35. Ved propagering er temperaturen rundt 300 °C på den ueksponerte siden. Høyeste temperatur etter propagering oppstår på kanal 5, og er i overkant av 800 °C.







Figur 35: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Dalfratherm, Forsøk 4).

Tabell 4 nedenfor viser en oversikt over temperaturene på de forskjellige termoelementene ved ulike tidspunkter i brannforløpet fra forsøk 4.





Tabell 4: Oversikt over temperaturen til de ulike termoelementene etter tidspunkt av interesse (Dalfratherm,

Forsøk 4)



På Figur 36 kommer tilstanden til isolasjonsmaterialene etter forsøkene frem. Figur 36a. viser tilstanden til materialet etter forsøk 2, hvor det kan observeres en stor rift langs hele oversiden. Figur 36b. viser materialet etter forsøk 3, og her er en del i midten av materialet borte. Figur 36c. viser materialet etter forsøk 4, hvor det kan observeres flere hull midt i materialet.







Figur 36: Tilstanden til isolasjonsmaterialet Dalfratherm etter gjennomførte forsøk.

#### 5.2.3 Aeroguard Ultra

Forsøk 5 og 6 ble gjennomført med isolasjonsmaterialet Aeroguard. Antennelse initierte etter fire slag med spiker for begge forsøkene. Temperaturen på den eksponerte siden av materialet øker raskt til ca. 600 °C, som vist i Figur 38 og Figur 41. I begge forsøkene synker temperaturen på den eksponerte siden gradvis etter den innledende fasen når første battericelle er utbrent. På den ueksponerte siden stiger temperaturen gradvis. Brannforløpet til de to forsøkene er til dels forskjellige, spesielt med tanke på røykproduksjon og antennelse av de brennbare gassene. En faktor som skiller de to forsøkene, er tiden det tar fra spikerpenetrering til den ueksponerte battericellen antenner. Temperaturen på ueksponert side øker til ca. 800 °C etter propagering oppstår i begge forsøkene.

#### Forsøk 5

Etter initiering av forsøk 5, ble det produsert store mengder svart røyk fra den første battericellen. Røyken kom ut på begge sider og over selve anordningen, uten antennelse av røyken. Dette kan observeres i Figur 37. Røykproduksjonen fortsatte slik i om lag 30 sekunder, før det gikk over til å kun slippe ut mindre mengder hvit røyk.







Figur 37: Røykproduksjon uten flammer (Aeroguard, Forsøk 5).

Etter den innledende fasen er temperaturen på den eksponerte battericellen ca. 600 °C med noe variasjon, som vist på Tabell 5. Observasjoner gjort underveis i mellomfasen viser at battericellen som er ueksponert for den initierende antennelsen, fortsatt er intakt som vist på Figur 39. I ca. 40 sekunder før propagering oppstår, utvider den ueksponerte battericellen seg sakte før den til slutt revner og antenner.







Figur 38: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Aeroguard, Forsøk 5).

Antennelse av ueksponert battericelle skjer ca. 3 minutter og 20 sekunder etter spikerpenetrering av eksponert battericelle. Temperaturen på den ueksponerte battericellen er ca. 265 °C i det øyeblikket propagering oppstår. Etter propagering inntreffer øker temperaturen på siden med ueksponert battericelle til ca. 800 °C, mens temperaturen på eksponert side øker til ca. 700 °C. Etter dette synker temperaturen på samtlige termoelementer gradvis.



Figur 39: Oppbrent battericelle ved siden av ubrent battericelle, før propagering (Aeroguard, Forsøk 5).





Tabell 5 nedenfor viser en oversikt over temperaturene på de forskjellige termoelementene ved ulike tidspunkter i brannforløpet fra forsøk 5.

Tabell 5: Oversikt over temperatur til de ulike termoelementene ved tidspunkt av interesse (Aeroguard, Forsøk

Temperaturfordeling på battericellen. Tidspunkt på temperaturavlesning. (00:45) etter initiering. Første battericelle er  $T_9 = 552^{\circ}C$   $T_8 = 611^{\circ}C$   $T_7 = 520^{\circ}C$ utbrent. 120 180 (03:20) etter initiering. Øyeblikket propagering  $T_4 = 263^{\circ}C$   $T_5 = 274^{\circ}C$   $T_6 = 266^{\circ}C$ oppstår. 300 360 (03:53) etter initiering. Høyeste temperatur på  $T_4 = 713^{\circ}C$   $T_5 = 800^{\circ}C$   $T_6 = 822^{\circ}C$ ueksponert battericelle etter propagering. 300 360

#### 5).

#### Forsøk 6

Forsøk 6 ble også gjennomført med Aeroguard som isolasjonsmateriale, og i Figur 41 kan et relativt likt forløp observeres. I den innledende fasen, etter spikerpenetrering, ble det produsert store mengder røyk uten antennelse. Kort tid etter spikerpenetrering, antente den varme røyken når den ble blandet med oksygenet i luften som vist på Figur 40. Temperaturen på den eksponerte battericellen er ca. 600 °C øyeblikket etter den innledende fasen.







Figur 40: Antennelse av første battericelle med flamme over røyksøylen (Aeroguard, Forsøk 6).

I fasen etter den første battericellen er utbrent, går det ca. 5 minutter og 35 sekunder før den andre battericellen antenner. I ca. 1 minutt og 46 sekunder før propagering inntreffer, utvider den ueksponerte battericellen seg sakte før antennelse.



Figur 41: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Aeroguard, Forsøk 6).





Temperaturen på ueksponert battericelle er ca. 270 °C i øyeblikket propagering inntreffer. Deretter øker temperaturen raskt til ca. 820 °C på den høyeste avlesningen av termoelementene på den ueksponerte battericellen. Temperaturen på eksponert side øker til ca. 610 °C. Etter dette følger en jevn temperaturreduksjon.

Tabell 6 nedenfor viser en oversikt over temperaturene på de forskjellige termoelementene ved ulike tidspunkter i brannforløpet fra forsøk 6.

Tabell 6: Oversikt over temperatur til de ulike termoelementene ved tidspunkt av interesse (Aeroguard, Forsøk

Temperaturfordeling på battericellen.	Tidspunkt på temperaturavlesning.	
$T_9 = 555^{\circ}C$ $T_8 = 654^{\circ}C$ $T_7 = 624^{\circ}C$	(01:02) etter initiering. Første battericelle er utbrent.	
$T_4 = 256^{\circ}C$ $T_5 = 320^{\circ}C$ $T_6 = 272^{\circ}C$	(05:39) etter initiering. Øyeblikket propagering oppstår.	
$T_4 = 737^{\circ}C$ $T_5 = 820^{\circ}C$ $T_6 = 743^{\circ}C$	(06:22) etter initiering. Høyeste temperatur på ueksponert battericelle etter propagering.	

6).





Tilstanden til isolasjonsmaterialet Aeroguard etter forsøkene kan observeres i Figur 42 hvor (a) er etter forsøk 5, mens (b) er etter forsøk 6.



Figur 42: Tilstand til isolasjonsmaterialet Aeroguard etter forsøk 5 og 6.

## 5.2.4 Promaseal-PL

Det ble brukt 4 slag før antennelse i det singulære forsøket med Promaseal. Etter to slag ble det observert gass ut av spikerhullet, slik som vist på Figur 43, men dette førte ikke til videre gassproduksjon og antennelse.



Figur 43: Gass produsert etter to slag.





Det fjerde slaget førte først kun til røykutvikling. Umiddelbart blåste det røyk ut av spikerhullet, og batteriet brukte ca. 3 sekunder på å blåse seg opp og revne. Figur 44 viser den oppblåste cellen rett før den revner.



Figur 44: Røykutvikling gjennom spikerhull etter fire slag. Viser også oppblåst battericelle like før den revner.

Etter battericellen revner utvikles det kun røyk, som vist på Figur 45. Denne røykutviklingen kommer fra fire forskjellige plasser hvor battericellen har revnet. Battericellen revnet på toppen, sidene og fremsiden.



Figur 45: Røykproduksjon før antennelse.





Det går ca. 8 sekunder fra cellen revner til flammer observeres. Når brannen antenner revner battericellen på ytterligere steder. De intense jetflammene, vist på Figur 46, varer kun i 8 sekunder før flammene går over til en rolig utbrenning. Etter de intense jetflammene viser Figur 48 en synkende tendens på kanal 7 og 9 i ca. 15 sekunder, før temperaturene igjen begynner å stige.



Figur 46: Jetflammer på sitt mest intensive.

Fra spikerpenetrering til propagering går det ca. 2 minutter og 21 sekunder. Den ueksponerte battericellen antenner når termoelementene måler ca. 290 °C på ueksponert side, og i overkant av 500 °C på eksponert side. Cellen revner på flere områder, og brenner intensivt i ca. 15 sekunder, slik som vist på Figur 47.







Figur 47: Intensive jetflammer kort tid etter propagering.

Temperaturene stiger raskt, og på ueksponert side måles det en maks temperatur på ca. 880 °C før den begynner å synke igjen. På eksponert side stiger temperaturene gradvis i ca. 1 minutt etter propagering, deretter jevnes kurven ut.



Figur 48: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Promaseal, Forsøk 7)





Tabell 7 nedenfor viser en oversikt over temperaturene på de forskjellige termoelementene ved ulike tidspunkter i brannforløpet fra forsøk 7.

Temperaturfordeling på battericellen.	Tidspunkt på temperaturavlesning.	
$T_9 = 450^{\circ}C$ $T_8 = 400^{\circ}C$ $T_7 = 483^{\circ}C$	(01:00) etter initiering.Første battericelle erutbrent.	
$T_4 = 335^{\circ}C$ $T_5 = 319^{\circ}C$ $T_6 = 293^{\circ}C$	(02:19) etter initiering.Øyeblikket propagering oppstår.	
$T_4 = 843^{\circ}C$ $T_5 = 865^{\circ}C$ $T_6 = 880^{\circ}C$	(02:46) etter initiering. Høyeste temperatur på ueksponert battericelle etter propagering.	

Tabell 7: Oversikt over temperaturen til de ulike termoelementene etter tidspunkt av interesse (Promaseal, Forsøk 7).





Isolasjonsmaterialet, som starter sin ekspansjon ved 150 °C, ekspanderte kun delvis før propagering. I den nedre delen som har fysisk kontakt med battericellene observeres det en betydelig ekspansjon, som vist på Figur 49. Propageringen førte til en fullstendig ekspandering av materialet.



Figur 49: Isolasjonsmaterialets tilstand før spikerpenetrering, etter antennelse og etter propagering.





# 6. Diskusjon

# 6.1 Beregninger

Resultatene fra de teoretiske beregningene av den transiente varmeledningen gjennom isolasjonsmaterialene ga verdier som var lave i forhold til de som ble observert under forsøkene. Under de eksperimentelle forsøkene er det mange eksterne påvirkninger som spiller en rolle i hvordan sluttresultatene blir. Disse eksterne påvirkningsfaktorene blir ikke tatt i betraktning i de teoretiske beregningene som ble benyttet.

For utregning av Biot-tallet gitt i Tabell 1, kan det observeres at både Aeroguard og Dalfratherm har en verdi for Biot-tallet mellom 0,1 og 1. Med tanke på samtlige materialers tykkelse og termiske egenskaper, kan det i tillegg gjøres en rimelig antakelse for Promaseal. På bakgrunn av dette blir samtlige isolasjonsmaterialer i denne rapporten ansett som semi-uendelige objekter. Grunnen til dette ligger i forsøksoppsettets oppbygging og hvordan varmen hovedsakelig overføres fra den ene battericellen til den andre.

Faktorer som har bidratt til et større skille mellom de teoretiske beregningene og resultatene fra forsøkene, omhandler hovedsakelig tap av varme til enten omgivelsene eller objekter som ikke er en del av målingsområdet. Ved å sammenlikne resultatene fra beregningene med forsøkene, kan det trekkes frem at samtlige materialer hindrer propagering i den innledende fasen der den første battericellen blir utbrent. Ettersom mye av varmen fra den innledende brannen går til oppvarming av omgivelsene, vil ikke isolasjonsmaterialet og den ueksponerte battericellen være eksponert for den varmen som først antatt. Følgelig blir differansen mellom resultatene fra beregningene og observasjonene fra forsøkene relativt stor.

Det er ikke nødvendigvis negativt at beregningene for tiden det tar før materialene når 230 °C er en del mindre enn det som ble målt. De teoretiske beregningene har som hovedhensikt å fungere veiledende for både fastsettelse av hypotese og konklusjonen av rapporten. Beregningene gir derfor ikke bare innsikt i hvor lang tid det tar, men også generelt om hvordan varme overføres gjennom forskjellige materialer ved å ta i bruk forskjellige analytiske metoder, avhengig av hvilke antakelser som blir gjort.





## 6.2 Forsøk

Dette kapittelet skal gi et dypere innblikk i resultatene fra forsøkene.

## 6.2.1 Feilkilder

Riggen som ble brukt som rammeverk i forsøkene er laget av stål. Stål har en god evne til å ta til seg varme, varme som ellers kan bli tatt opp av materialet og ueksponert battericelle. Riggen ble isolert med Fjordpanel på begge sideveggene. Disse panelene dekket kun 30 cm av de 40 cm brede veggene, som gjør at 5 cm på hver av sidene er direkte eksponert for varmen battericellen produserer. Dette regnes som et neglisjerbart varmetap.

Isolasjonsmaterialene som er plassert mellom battericellene er kun 30 cm brede. Dette fører til at ueksponert battericelle til dels blir eksponert på sidene. Det er også poler av metall på sidene av batteriet som vil kunne lede varme. Dette var en bekymring innledningsvis i forsøkene, og en sammenlikning av kanal 4, 5 og 6 viser at disse termoelementene har varierende målinger i enkelte forsøk.

Det vil også være store varmetap til omgivelsene da disse forsøkene ble utført i et åpent system. I et reelt batterisystem vil flammer, røyk og varme i en høyere grad være fanget inne i en modul. Selv om modulene er mer innelukkede, brukes eksossystemene som en barriere for å unngå propagering. Dette fungerer til dels på samme måte, der varme og varmekilder blir trukket ut av systemet. Antagelser om at det tapes mer energi i det åpne systemet gjøres, men at denne tapsforskjellen ikke er så stor som først antatt.

Forskjellene i indre energi mellom de ulike initieringsmetodene er store, og dette vil ha påvirkning på propagering. Fra Figur 10 er det ca. en tredjedel mer indre energi i en spikerpenetrert battericelle ved 100 % SOC, enn i en overladet eller oppvarmet celle. Når de intense jetflammene slokker vil det være denne gjenværende energien i batteriene som fortsetter å lede varme gjennom isolasjonsmaterialet, og til den ueksponerte battericellen. Dette anses å ha en større påvirkning på temperaturøkningen til ueksponert side.

Batteribranner er kjent for å være uforutsigbare. De kan antenne ved forskjellige temperaturer, battericellene revner på ulike steder og antennelse kan variere. Dette kombinert med få gjennomførte forsøk per isolasjonsmateriale danner grunnlag for usikkerhet i resultatene.

# Høgskulen påVestlandet



Feilkilde med tvinge som falt av, berører kun propageringsforsøk og ett forsøk med Dalfratherm. Dette vil bli diskutert ved de aktuelle forsøkene, og ikke i det generelle delkapittelet om feilkilder.

## 6.2.2 Propageringstest

Propageringstesten ble gjennomført for å danne et sammenlikningsgrunnlag. I henhold til resultatene i kapittel 5.2.1, øker temperaturen etter spikerpenetrering til over 800 °C. I alle de andre forsøkene når temperaturen rundt 600 °C etter spikerpenetrering og før propagering. I den sammenheng kan det antas at propagering skjer raskt etter spikerpenetrering, i løpet av den innledende fasen på Figur 28.

## 6.2.3 Dalfratherm

Forsøk 2 hadde et ulikt oppsett sammenliknet med forsøk 3 og 4. Forsøk 2 hadde materialet bøyd over toppen, og ble holdt på plass ved hjelp av tvinger. Ett sekund etter antennelse løsnet tvingen fra stålriggen, og lagde en åpning på den ene siden. Dette medførte at batteriet kunne blåse seg opp ytterligere, og fikk større tilgang på luft. På dataene kan det observeres at dette har hatt en innvirkning. Sammenliknet med samtlige forsøk er dette det eneste forsøket hvor temperaturen på en av sidene stiger markant. Dette kan være fordi termoelementene ble mer eksponert grunnet tapet av beskyttelsen som er en følge av komprimeringen.

Temperaturen på ueksponert side i midten og der tvingen løsnet, var lavere enn på siden tvingen hang fast. Resultatet av at tvingen løsnet medførte et mellomrom mellom materialet og den brennende battericellen. Dette førte til at det kom kald luft mellom battericellen og materialet.

På forsøk 3 og 4 øker temperaturen på kantene til den ueksponerte battericellen raskere enn termoelementet i midten etter spikerpenetreringen. Årsaken til dette kan begrunnes med at flammene som oppstår på sidene av battericellen varmer opp den ubrente battericellen rundt materialet. Isolasjonsmaterialet hadde ca. lik bredde som battericellene, med unntak av polene. Teipen på polene begynte å brenne, dette er også en faktor som varmet opp battericellen på sidene. Det kan derfor utrykkes at termoelementet på ueksponert side i midten, er den beste representasjonen av de termiske egenskapene til materialet.

På Figur 36 kan det observeres hvordan materialene så ut etter forsøkene. Her kan det observeres en tydelig variasjon i hvordan materialene har brent. I oppsettet til forsøk 2 ble materialet plassert over den ueksponerte battericellen, som vist i Figur 29. Da brannen inntraff på oversiden av battericellen, medførte trykket og varmen fra flammen at det oppsto en rift





langs hele materialet. I forsøk 3 mangler en del i midten på toppen av materialet. På Figur 50 kan det observeres at denne delen av materialet forsvinner, som følge av frigjøring av gass under trykk i battericellen. I forsøk 4 er det flere hull langs der battericellene har vært plassert. Her har materialet blitt utsatt for trykk og varme etter TR.



Figur 50: Del av isolasjonsmaterialet som forsvinner i forsøk 3.

Tiden til propagering i forsøk 2 var 1 minutt og 45 sekunder, 2 minutt og 34 sekunder i forsøk 3 og 1 minutt og 54 sekunder i forsøk 4. Årsaken til hvorfor det tok lenger tid til propagering i forsøk 3 kan ha sammenheng med hvordan materialene så ut etter forsøkene. I forsøk 2 og 4 kan det som nevnt observeres hull langs hele materialet, i motsetning til forsøk 3 der materialet kun hadde mistet et par biter på toppen. Det kan også ses at temperaturen i midten på den ueksponerte siden blir oppvarmet tregere i forsøk 3. Før propagering i dette forsøket økte temperaturen i det midterste termoelementet på ueksponert side jevnt til temperaturen nådde ca. 290 °C. Siden temperaturen øker jevnt er dette et tegn på at det ikke er brudd på materialet. I forsøk 2 og 4 økte temperaturen hurtig før den jevnet seg ut og holdt seg. Dersom disse hullene i forsøk 2 og 4 skjedde før den andre battericellen antente, har det da ikke vært noe som har hindret varmen å gå fra eksponert til ueksponert battericelle.
## Høgskulen påVestlandet



Det er registrert et temperaturfall rett før propageringen i forsøk 3 inntreffer. Det er registrert en lignende hendelse i forsøk 6, men det skjedde på andre siden av isolasjonsmaterialet. Det antas dermed at det ikke er et vanlig fenomen. Årsaken til hvorfor dette skjer er ukjent.

#### 6.2.4 Aeroguard

Det ble gjennomført to forsøk med Aeroguard som isolasjonsmateriale, hvorav begge initierte antenning etter 4 slag med spiker. Etter spikerpenetrering ble det produsert store mengder sort røyk i området der battericellen revnet. Ettersom disse battericellene er svært uforutsigbare, vil det være vanskelig å forutsi hvor de kommer til å revne, og resultatene vil derfor bære preg av dette.

I forsøk 5 produserte battericellen store mengder røyk uten flammer i om lag 30 sekunder. I denne perioden ble også store energimengder frigjort i form av varme. Røyken som ble produsert består av forskjellige brennbare gasser, men ettersom blandingsforholdet av gassen og oksygenet i luften ikke var innenfor brennbarhetsgrensen, kunne ikke røyken antennes. En slik blanding av gasser kalles ofte for en tykk gassblanding. Til tross for at det ikke var flammer til stede, antente den ueksponerte battericellen etter 3 minutter og 20 sekunder. Dette er nesten ett minutt lenger enn det lengste forsøket med isolasjonsmaterialet Dalfratherm. Temperaturavlesning i loggføringen for forsøket viser at temperaturen i øyeblikket propagering oppstår, er ca. 265 °C. Dette tilsvarer en differanse på 35 °C mellom forventet temperatur for propagering på 230 °C, og faktisk temperatur i forsøket. Denne differansen ligger innenfor det forventede variasjonsområdet til temperatur for propagering.

I forkant av propagering, utvider den ueksponerte battericellen seg før den til slutt revner og produserer store menger røyk og varme. Denne utvidelsen starter ca. 40 sekunder før propagering inntreffer, og er en innebygd sikkerhetsfunksjon som er standard i slike litium-ion battericeller. Uten denne utvidelsen ville battericellene ha revnet tidligere.

Temperaturoversikten som kommer frem av Tabell 5, viser at termoelementet midt på battericellen gir et høyere temperaturutslag enn de på siden. Dette er tilfellet i øyeblikket den første battericellen antenner, og i øyeblikket propagering inntreffer. Når den andre battericellen er utbrent har termoelementet på den ene siden en høyere temperatur enn de andre.

Etter propagering inntreffer, øker temperaturen på den ueksponerte siden til ca. 800 °C, som er ca. 100 °C mer enn på den eksponerte siden. Dette skyldes at termoelementene på den ueksponerte siden har både vært utsatt for den gradvise temperaturøkningen i starten av

## Høgskulen påVestlandet



forsøket, samt den umiddelbare varmeproduksjonen fra den andre battericellen. På dette punktet i forsøket er temperaturen på sitt høyeste, og alt brennbart materiale er i dette øyeblikket brent opp. Forsøket går deretter inn i en avkjølingsfase.

Forsøk 6 ble som nevnt også gjennomført med isolasjonsmaterialet Aeroguard. Brannforløpet for denne gjennomføringen skiller seg ut fra det i forsøk 5. Selv om det tidlig i forbrenningen kun observeres røyk uten flammer, tok det ikke lang tid før denne røyken antente. Likt som ved forrige gjennomføring, antas det at gassblandingen var for tykk i starten, før den etter hvert ble tynnet ut, slik at den var innenfor brennbarhetsområdet og kunne antenne.

Gjennomføringen av forsøk 6 hadde den lengste tiden fra penetrering til propagering. Det tok ca. 5 minutter og 35 sekunder før den ueksponerte battericellen antente. På tidspunktet ved propagering viser temperaturavlesninger at det er ca. 270 °C ytterst på battericellen. Dette er konsekvent med de andre gjennomføringene, og litt høyere enn dokumentert skalltemperatur for propagering på (NMC) litium-ion battericeller [20].

Temperaturfordelingen på battericellen, som kommer frem av Tabell 6, viser at det er forventede temperaturer ved de tre tidspunktene, med litt høyere verdier i midten av battericellen.

Materialets tilstand etter forsøket er i liten grad påvirket av brannen fra battericellen. I overkant av der battericellen var plassert, kan det observeres sot langs tre kanaler opp langs materialet. Ved å sammenlikne observasjonene i Figur 42a, og opptaket av forsøk 5, kan det konkluderes at det er jetstrømmen med røyk ved de to sidene og på midten av battericellen som har forårsaket disse merkene med sotpartikler. I området der battericellen var plassert, har deler av cellen smeltet fast i isolasjonsmaterialet som vist på Figur 42a.

Isolasjonsmaterialet etter gjennomføringen i forsøk 6 bærer større preg av sotpartikler i øvre del av materialet. I forsøk 6 ble den brennbare gassen fra battericellene antent, i motsetning til gassen i forsøk 5. Følgelig ble det produsert mer sot som la seg langs isolasjonsmaterialet. Det er også mindre av battericellen som er smeltet fast til siden av isolasjonsmaterialet, som kan observeres på Figur 42b.





#### 6.2.5 Promaseal-PL

Det ble kun utført ett forsøk med Promaseal, og dette fører til store usikkerheter rundt resultatene.

Ved spikerpenetrering produserte batteriet store mengder røyk som ikke antente. Det antas at dette skyldes dårlig spikerpenetrering. Grunnlaget for antagelsen er mengden av røyk som produseres. Denne mengden er liten rett etter penetrering, og begynner å øke etter batteriet revner. Dette er resultater som kan beskrives av en mindre kortslutning, der spikeren ikke har penetrert en tilstrekkelig dybde i battericellen.

Fasen med røykproduksjon varer i 9 sekunder, og termoelementene måler kun 60 °C. De lave temperaturene skyldes mangelen av antennelse. Før antennelse er blandingen av brennbare gasser og luft for tykk til å antenne.

Røykfasen som varer i 9 sekunder, får store konsekvenser for resten av batteriets utbrenningsforløp. Jetflammenene varer kun i 9 sekunder før brannen går over i en kort fase med små flammer. Temperaturene ved dette tidspunktet er ca. 215 °C på eksponert side. Varigheten til den intense brannen med jetflammer er kraftig redusert av mengden brennbare gasser som gikk tapt i røykfasen.

Kort tid etter at jetflammene slokket, viser Figur 48 en markant temperaturnedgang. Dette er trolig en strøm med kald luft som har påvirket sensitive termoelementer. Den indre energien i battericellen fortsetter å avgi varme, og temperaturene stabiliserer seg på om lag 500 °C på eksponert side. Ved denne temperaturen begynner temperaturene på ueksponert side å øke raskere. Dette kan skyldes at isolasjonsmaterialet begynner å miste sin evne til å motstå varmeledning. Figur 49 viser også at materialet ikke har fullstendig ekspandert på dette stadiet. Det kan bety at materialet ikke har oppnådd sin maksimale ytelsesevne.

Når termoelementene måler ca. 300 °C på ueksponert side, initieres propageringen. Propageringen fører til raske temperaturendringer, og en fullstendig ekspansjon av materialet. Termoelementene måler nesten 850 °C når temperaturene jevner seg ut 10 sekunder etter propagering. Maks temperatur målt er 880 °C, som er høyest på tvers av samtlige forsøk. Dette kan skyldes isolasjonsmaterialets ekspandering. Ekspanderingen øker trykket, som etter den ideelle gassloven, gir høyere temperaturer [38].





#### 6.3 Sammenlikning

Den temperaturmålingen som illustrerer forskjellene mellom isolasjonsmaterialene best, er kanal 5. Disse målingene kan ses på Figur 51. Termoelementene i denne kanalen blir minst påvirket av den varmen som ikke ledes gjennom materialene.



Figur 51: De ulike temperaturmålingene på kanal 5.

Til tross for at propagering forekom i alle forsøkene, viser Figur 51 at Aeroguard er det materialet som fungerte best. Dette var forventet da Aeroguard har bedre termiske egenskaper enn de andre materialene. Dalfratherm var antatt å yte bedre enn Promaseal. Promaseal fikk derimot en lavere termisk påkjenning grunnet den store mengden med gass som forsvant til omgivelsene uten antenning. På grunn av dette oppnådde disse to isolasjonsmaterialene ca. like resultater.

Vekten til materialene er av viktighet da det ønskes et lettest mulig batterisystem. Tettheten til Aeroguard og Promasel er ca. 2 ganger så mye som Dalfratherm. Til gjengjeld er Dalfratherm nesten dobbelt så tykt som Aeroguard. Aeroguard er derfor litt lettere enn Dalfratherm. Promaseal med 2,5 mm tykkelse, og høy tetthet er det tyngste materialet.

Den termiske konduktiviteten til Aeroguard er 0,039 W/mK, mens den er 0,10 W/mK for Dalfratherm. Følgelig er de termiske egenskapene til Aeroguard ca. 2,5 ganger så gode.





Aeroguard er det materialet som beskytter det ueksponerte batteriet best grunnet de gode termiske egenskapene, til tross for at det er tynnere enn Dalfratherm. Det at Aeroguard er tynt er positivt i henhold til energitetthet i batterisystemene.





### 7. Konklusjon

I forkant av forsøkene ble det dannet en hypotese for hvert av materialene. Disse hypotesene antar at propagering forekommer etter ca. 30 sekunder for Aeroguard, ca. 25 sekunder for Dalfratherm og etter ca. 20 sekunder for Promaseal. Hypotesene er kun til dels riktige. Det propagerte i samtlige forsøk, men differansen mellom forventet tid til propagering i hypotesene og resultatene fra forsøkene er stor.

Først ble det gjennomført en propageringstest for å sjekke om propagering er et problem i batterisystemer uten barrierer. Dette ble bekreftet da propagering oppstod nesten umiddelbart etter antennelse. Det tok henholdsvis 1 minutt og 45 sekunder, 2 minutter og 28 sekunder, og 1 minutt og 55 sekunder til propagering for forsøkene utført med Dalfratherm. Forsøkene utført med Aeroguard hindret propagering i 3 minutter og 20 sekunder, og 5 minutter og 39 sekunder. Promaseal forhindret propagering i 2 minutter og 19 sekunder.

Tettheten og tykkelsen til Dalfratherm og Aeroguard fører til at disse to har nesten lik vekt. Aeroguard har bedre termiske egenskaper, til tross for at det er tynnere, som gjør at dette materialet egner seg bedre til å hindre propagering. Resultatene fra forsøkene underbygger dette. Det at Aeroguard er et tynt materiale er gunstig for energitettheten i batterisystemene.

Det er usikkerheter rundt feilkildenes påvirkning på resultatene. Få utførte forsøk per isolasjonsmateriale har ført til et dårligere grunnlag for konkludering. Materialene burde dekket hele battericellen på ueksponert side for å hindre uønsket varmepåvirkning rundt eller over materialet.

Samtlige isolasjonsmaterialer forhindrer at den ueksponerte battericellen antennes i det tidsrommet den første battericellen brenner. Etter dette vil temperaturen på den ueksponerte siden gradvis øke. I perioden fra den første battericellen er ferdig utbrent, til propagering forkommer i den ueksponerte battericellen, vil temperaturreduserende tiltak være en god løsning for å forhindre at propagering forekommer. På denne måten vil ikke temperaturen på den ueksponerte siden kunne nå tilstrekkelig temperatur for propagering. Forslag til videre arbeid kan innebære tiltak som reduserer temperaturer ved tilfeller der brann i en battericelle oppstår. Et slikt tiltak kan være å opprette en luftkanal mellom cellen og isolasjonsmaterialet. Med en slik kanal kan energi transporteres bort, slik at materialet blir eksponert for mindre varme.





#### 8. Referanser

- [1] B. C. Hagen, «Kapittel 9 Transient varmeledning,» i *Grunnleggende brannteknikk*, Haugesund, Hagens forlag, 2018, pp. 121-130.
- B. C. Hagen, «11.4 Brennbarhetsgrense,» i Grunnleggende Brannteknikk, Haugesund, Hagens forlag, 2018, p. 168.
- [3] Maritime Battery Forum, «Maritime Battery Forum,» Maritime Battery Forum, u.å.. [Internett]. Available: https://www.maritimebatteryforum.com/general-information. [Funnet 16 02 2024].
- [4] Det Norske Veritas, «Rules for Ships,» Det Norske Veritas, i.t., 2023.
- [5] Offshore Energy, «Offshore Energy,» Offshore Energy, 03 02 2013. [Internett]. Available: https://www.offshore-energy.biz/norway-takes-leading-role-in-developing-batterypowered-ships/. [Funnet 29 05 2024].
- [6] Occupational Safety and Health Administration, «OSHA,» Occupational Safety and Health Administration, u.å.. [Internett]. Available: https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/shib011819.pdf. [Funnet 04 03 2024].
- [7] Fire Protection Association, «TheFPA,» Fire Protection Association, 10 07 2023. [Internett]. Available: https://www.thefpa.co.uk/advice-and-guidance/advice-and-guidancearticles/why-do-lithium-ion-batteries-catch-fire-. [Funnet 05 03 2024].
- [8] B. Risholt, «Er litiumbatterier brannfarlige?,» SINTEF, 25 Juni 2021. [Internett]. Available: https://www.sintef.no/siste-nytt/2021/er-litiumbatterier-brannfarlige/. [Funnet 14 Mars 2024].
- [9] A. Brunning, «Periodic graphics: Why Li-ion batteries catch fire,» Chemical & engineering news, 14 November 2016. [Internett]. Available: https://cen.acs.org/articles/94/i45/Periodic-graphics-Li-ion-batteries.html. [Funnet 2 Juni 2024].
- [10] UngEnergi, «Litium-ionbatteri,» 10 oktober 2023. [Internett]. Available: https://ungenergi.no/energibaerere/elektrisitet/litium-ionbatteri/. [Funnet 30 mars 2024].
- [11] H. Adenusi, G. A. Chass, S. Passerini, K. V. Tian og G. Chen, «Lithium Batteries and the Solid Electrolyte Interphase (SEI)—Progress and Outlook,» Wiley-VCH GmbH, Hong Kong, 2023.
- [12] Scantech, «What Are Pouch Cells?,» 28 Februar 2023. [Internett]. Available: https://scantech.com/information/industry-energy-information/batteries/what-are-pouchcells/. [Funnet 15 Mars 2024].
- [13] OilComp, «Litium-ion batteriet,» OilComp, u.å. [Internett]. Available: https://elearning.easygenerator.com/6eaeeadc-ee3d-4b15-a77e-2278d09d47c2/#/sections/6e0ca81fcc70494c88d5f0c2bd83bf58/questions/1f8de5181a4743 838b9ff03ae2f9c161. [Funnet 31 mai 2024].
- [14] Battery university, «BU-205: Types of Lithium-ion,» 8 Desember 2023. [Internett]. Available: https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion. [Funnet 2 April 2024].





- [15] H. Zhang, Y. Yang, D. Ren, L. Wang og X. He, «Graphite as anode materials: Fundamental mechanism, recent progress and advances,» Research Institute of Chemical Defense; Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 2021.
- [16] OilComp, «Oppbygging,» OilComp, u.å. [Internett]. Available: https://elearning.easygenerator.com/6eaeeadc-ee3d-4b15-a77e-2278d09d47c2/#/sections/ce52bae96aed49b09f31bf41aebfd18b/questions/51c260db6ffe47 f195f2069d0eda6a6a. [Funnet 31 mai 2024].
- [17] OilComp, «Sikkerhetsbarrierer og sikkerhetssystemer,» OilComp, u.å. [Internett]. Available: https://elearning.easygenerator.com/6eaeeadc-ee3d-4b15-a77e-2278d09d47c2/#/sections/ce52bae96aed49b09f31bf41aebfd18b/questions/63c92f539b3c42 3cb34077572ef7d833. [Funnet 31 mai 2024].
- [18] OilComp, «Håndtering av Thermal runaway,» OilComp, u.å. [Internett]. Available: https://elearning.easygenerator.com/6eaeeadc-ee3d-4b15-a77e-2278d09d47c2/#/sections/ce52bae96aed49b09f31bf41aebfd18b/questions/7c7f531c676145 eb8594487b7e4bebce. [Funnet 31 mai 2024].
- [19] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, «Risikovurdering og håndtering av brann i Litium-ion batterier,» Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, Tønsberg, 2021.
- [20] D. P. Finegan, M. Scheel, J. B. Robinson, B. Tjaden, I. Hunt, T. J. Mason, J. Millichamp, M. D. Michiel, G. J. Offer, G. Hinds, D. J. Brett og P. R. Shearing, «In-operando high-speed tomography of lithium-ion batteries during thermal runaway,» Macmillan Publishers Limited, London, 2015.
- [21] R. Spotnitz og J. Franklin, «Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells,» Elsevier Science B.V, Pleasanton; Bruxelles, 2003.
- [22] S. Ma, M. Jiang, P. Tao, C. Song, J. Wu, J. Wang, T. Deng og W. Shang, «Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review,» School of Materials Science and Engineering, and State Key Laboratory of Metal Matrix Composites; A123 Systems Research Center, Shanghai, 2018.
- [23] OilComp, «Thermal runaway,» OilComp, u.å. [Internett]. Available: https://elearning.easygenerator.com/6eaeeadc-ee3d-4b15-a77e-2278d09d47c2/#/sections/8853312ad6514b33a28de10ba4e776e2/questions/33f2bc5543a9 47159f68e4bf94b3a8ba. [Funnet 31 mai 2024].
- [24] H. Maleki og J. N. Howard, «Internal short circuit in Li-ion cells,» Motorola Inc Devices, Lawrenceville, 2009.
- [25] Universitetet i Oslo, «Joules lov,» Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet, 30 oktober 2023. [Internett]. Available: https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/j/joules-lov.html. [Funnet 24 april 2024].
- [26] D. Ren, X. Feng, L. Lu, X. He og M. Ouyang, «Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions,» State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University; Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 2019.
- [27] R. A. Rincón, «What Happens When You Put a Nail Through a Lithium Battery?,» Wiley-VCH GmbH, 5 august 2019. [Internett]. Available: https://www.chemistryviews.org/details/ezine/11174589/What\_Happens\_When\_You\_Put\_ a\_Nail\_Through\_a\_Lithium\_Battery/. [Funnet 30 april 2024].





- [28] T. Lian, V. P. J. S, R. F. Mikalsen, T. Li, C. Meraner, R. Stølen og D. O. Snersrud, «Thermal Stability and Thermal Energy Measurement for a Lithium-Ion Pouch Cell with Different State of Health,» Forsvarets Forsknings Institutt, Institute for Energy Technology, RISE Fire Research AS, i.t., 2023.
- [29] O. Willstrand, M. Pushp, P. Andersson og D. Brandell, «Impact of different Li-ion cell test conditions on thermal runaway characteristics,» ScienceDirect, i.t., 2023.
- [30] ArmorMax Engineered Systems, Inc., «Ultra Low-Shot (ULS) Technology,» ArmorMax Engineered Systems, Inc., [Internett]. Available: https://www.armorwoolusa.com/innovation. [Funnet 2 mai 2024].
- [31] Promat, «DALFRATHERM®-1200 ULS PAPER,» Etex NV, Sint-Niklaas, Belgium, 2022.
- [32] Promat, «Aeroguard® Ultra,» Etex, Sint-Niklaas, Belgium, 2024.
- [33] Promat, «PROMASEAL®-PL,» Etex NV, Sint-Niklaas, Belgium, 2020.
- [34] Fjordpanel, «Fjordpanel,» Fjordpanel, i.t.. [Internett]. Available: https://fjordpanel.com/specifications/. [Funnet 14 03 2024].
- [35] Betongsentrum, «Betongsentrum,» Betongsentrum, i.t.. [Internett]. Available: https://www.betongsentrum.no/produkt/basaltfiber/. [Funnet 16 03 2024].
- [36] B. C. Hagen, «B.2 Error-funksjonen,» i *Grunnleggende Brannteknikk*, Haugesund, Bjarne CHR. Hagen, 2018, p. 284.
- [37] D. Drysdale, «2.2.3 Numerical Methods of Solving Time-dependent Conduction Problems. Equation (2.40),» i An Introduction to Fire Dynamics, Edinburgh, John Wiley & Sons, Ltd, 2011, p. 52.
- [38] E. Gregersen, «Britannica,» 10 05 2024. [Internett]. Available: https://www.britannica.com/science/gas-laws.
- [39] S. Mishra, R. Mitra og M. Vijayakumar, «Structure and properties of short fibre reinforced silica matrix composite foams,» ScienceDirect, Kharagpur, 2009.
- [40] X. Liu, H. Hsu, G.-L. Xu, H. Gao, X. Han, L. Jianqiu, K. Amine, D. Ren, X. Feng, M. Zhuang, L. Lu, Z. Chu, X. He og M. Ouyang, «Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries without Internal Short Circuit,» 2018.
- [41] D. Drysdale, «An Introduction to Fire Dynamics,» i 2.2.3 Numerical Methods of Solving Timedependent Conduction Problems, Edinburgh, John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 48-52.

#### Liste over Figurer

Figur 1: Utvikling av antall batteridrevne båter [3].	. 2
Figur 2: Visuell oversikt over måter litium-ion batterier kan begynne å brenne [9]	.4
Figur 3: Oppsett av testforsøk.	. 7
Figur 4: Visualisering av en litium-ion battericelle [10]	.9

## Høgskulen på Vestlandet



Figur 5: JP3 NMC litium-ion battericelle
Figur 6: Orca Energy Storage System fra Corvus Energy [16]11
Figur 7: Sammenlikning av hvordan battericellen brenner ved de ulike initieringsmetodene [28]
Figur 8: Ekstern energi fra forsøkene med ulik initieringsmetode [28]15
Figur 9: Ekstern energi per kvadratmeter fra forsøkene med ulik initieringsmetode [28] 16
Figur 10: Indre energi fra forsøkene med ulik initieringsmetode [28]16
Figur 11: Visuell forskjell av massetap ved de ulike initieringsmetodene [28]17
Figur 12: Numerisk forskjell av massetap ved de ulike initieringsmetodene [28]17
Figur 13: Isolasjonsmaterialet Dalfratherm-1200 ULS
Figur 14: Isolasjonsmaterialet Aeroguard Ultra
Figur 15: Isolasjonsmaterialet Promaseal-PL
Figur 16: Dimensjoner for sideplate som kun er festet med gjengestenger. Denne platen har også hull for spiker og termoelement
Figur 17: Dimensjoner for sideplate som er sveiset fast i bunnplate og støttevinkler
Figur 18: Dimensjoner på støttevinkler
Figur 19: Dimensjoner på bunnplaten sett ovenfra. Figuren viser også posisjonen til støttevinklene
Figur 20: Isometrisk projeksjon av stålriggen25
Figur 21: Oppsett for forsøk 1 og 2. Tvinger blir benyttet for komprimering
Figur 22: Oversikt over lagvis oppsett av forsøk
Figur 23: Posisjonene til termoelementene på battericellene
Figur 24: Plasseringen av termoelementer i forhold til hvilken kanal de har på grafene 29
Figur 25: Transient varmeledning gjennom et semi-uendelig objekt
Figur 26: Estimat av temperaturøkning etter numerisk metode
Figur 27: Løs sideplate etter forsøk med bruk av tvinger
Figur 28: Temperaturutvikling for propageringstest (Forsøk 1)
Figur 29: Oppsettet av forsøk 2 før antennelse
Figur 30: Utbrenning etter intensiv jetflamme
Figur 31: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Dalfratherm, Forsøk 2). 40





Figur 32: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Dalfratherm, Forsøk 3). 42
Figur 33: Antennelse etter spikerpenetrering i forsøk 3
Figur 34: Flammer bare på oversiden av batteriet i forsøk 4
Figur 35: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Dalfratherm, Forsøk 4). 
Figur 36: Tilstanden til isolasjonsmaterialet Dalfratherm etter gjennomførte forsøk47
Figur 37: Røykproduksjon uten flammer (Aeroguard, Forsøk 5)
Figur 38: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Aeroguard, Forsøk 5).
Figur 39: Oppbrent battericelle ved siden av ubrent battericelle, før propagering (Aeroguard, Forsøk 5)
Figur 40: Antennelse av første battericelle med flamme over røyksøylen (Aeroguard, Forsøk 6)
Figur 41: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Aeroguard, Forsøk 6).
Figur 42: Tilstand til isolasjonsmaterialet Aeroguard etter forsøk 5 og 6
Figur 43: Gass produsert etter to slag
Figur 44: Røykutvikling gjennom spikerhull etter fire slag. Viser også oppblåst battericelle like før den revner
Figur 45: Røykproduksjon før antennelse54
Figur 46: Jetflammer på sitt mest intensive
Figur 47: Intensive jetflammer kort tid etter propagering
Figur 48: Temperaturutvikling på begge sider av isolasjonsmaterialet (Promaseal, Forsøk 7)56
Figur 49: Isolasjonsmaterialets tilstand før spikerpenetrering, etter antennelse og etter propagering
Figur 50: Del av isolasjonsmaterialet som forsvinner i forsøk 3
Figur 51: De ulike temperaturmålingene på kanal 5

# Høgskulen på Vestlandet



# Liste over tabeller

Tabell 1: Utregning av Biot-tallet for Dalfratherm og Aeroguard.    32
Tabell 2: Oversikt over temperaturen til de ulike termoelementene etter tidspunkt av interesse (Dalfratherm, Forsøk 2).       41
Tabell 3: Oversikt over temperaturen til de ulike termoelementene etter tidspunkt av interesse         (Dalfratherm, Forsøk 3)         43
Tabell 4: Oversikt over temperaturen til de ulike termoelementene etter tidspunkt av interesse         (Dalfratherm, Forsøk 4)         46
Tabell 5: Oversikt over temperatur til de ulike termoelementene ved tidspunkt av interesse (Aeroguard, Forsøk 5)
Tabell 6: Oversikt over temperatur til de ulike termoelementene ved tidspunkt av interesse (Aeroguard, Forsøk 6)
Tabell 7: Oversikt over temperaturen til de ulike termoelementene etter tidspunkt av interesse (Promaseal, Forsøk 7).         57





# Vedlegg A: Utstyrsliste

Listede utstyr er brukt i forsøkene:

Rigg av stål
M6 gjengestenger med muttere og skiver
3 stk. tvinger av metall
15 JP3 litium-ion battericeller
8 stk. K-type termoelementer, 1.5 mm
8 stk. kabelforlengere til termoelementer
KEYSIGHT 34972A
PC med LabVIEW-program
Røykdykkerutstyr
Hansker
Sony EXMOR R 4k
2 stk. GoPro HERO11 Black
Mobiltelefoner
2 meter lang teleskopstang
Ankerspiker, 4 mm · 40 mm
Isolasjonsmaterialer
- Dalfratherm-1200 ULS
- Aeroguard Ultra
- Promaseal-PL
- Fjordpanel
Velleman DC LAB SWITCHING MODE POWER SUPPLY (0-30 VDC, 0-10 A MAX)
FLUKE 322 Clamp Meter (600V MAX, CAT III)
Tang
Aluminimsfolie





#### Vedlegg B: Numeriske beregninger fra Matlab

```
clear, clc
h=0.01;
dT=1;
k=0.039;
p=380;
cP=1.04*1000;
dx=0.00175;
Th=600;
т0=20;
Ta=[20,0];
for n = 2:200
   Ta(n) = Ta(n-1) + (k*dT/(p*cP*(dX)^2))*(Th-2*Ta(n-1)+T0);
end
t = (1:200);
plot(t,Ta, "LineWidth",2)
legend("Temperaturøkning");
xlabel("Tid [s]");
ylabel("Temperatur [°C]");
xticks([0 30 60 90 120 150 180]);
yticks([0 50 100 150 200 250 300]);
yline(230, "-.b", "Color", [1 0 0], "LineWidth", 1)
disp(Ta)
 Columns 1 through 7
```

```
20.0000 38.6896 56.1747 72.5329 87.8369 102.1546 115.5496
Columns 8 through 14
128.0813 139.8054 150.7739 161.0355 170.6358 179.6174 188.0201
Columns 15 through 21
195.8813 203.2359 210.1165 216.5537 222.5760 228.2102 233.4813
Columns 22 through 28
238.4127 243.0263 247.3425 251.3806 255.1584 258.6928 261.9994
Columns 29 through 35
265.0929 267.9870 270.6946 273.2277 275.5976 277.8147 279.8889
Columns 36 through 42
281.8295 283.6450 285.3435 286.9325 288.4192 289.8100 291.1112
```





```
Columns 43 through 49
292.3285 293.4674 294.5328 295.5296 296.4622 297.3347 298.1509
Columns 50 through 56
298.9146 299.6290 300.2974 300.9227 301.5077 302.0550 302.5670
Columns 57 through 63
303.0460 303.4942 303.9135 304.3057 304.6727 305.0160 305.3372
Columns 64 through 70
305.6377 305.9189 306.1819 306.4280 306.6582 306.8735 307.0750
Columns 71 through 77
307.2635 307.4399 307.6049 307.7592 307.9036 308.0387 308.1651
Columns 78 through 84
308.2834 308.3940 308.4975 308.5944 308.6849 308.7697 308.8490
Columns 85 through 91
308.9232 308.9926 309.0575 309.1182 309.1751 309.2282 309.2780
Columns 92 through 98
309.3245 309.3680 309.4088 309.4469 309.4825 309.5159 309.5471
Columns 99 through 105
309.5763 309.6036 309.6291 309.6530 309.6754 309.6963 309.7159
Columns 106 through 112
309.7342 309.7513 309.7673 309.7823 309.7964 309.8095 309.8218
Columns 113 through 119
309.8332 309.8440 309.8541 309.8635 309.8723 309.8805 309.8882
Columns 120 through 126
309.8954 309.9021 309.9084 309.9143 309.9199 309.9250 309.9299
Columns 127 through 133
309.9344 309.9386 309.9426 309.9463 309.9497 309.9530 309.9560
Columns 134 through 140
309.9588 309.9615 309.9640 309.9663 309.9685 309.9705 309.9724
Columns 141 through 147
309.9742 309.9758 309.9774 309.9789 309.9802 309.9815 309.9827
```





```
Columns 148 through 154
309.9838 309.9848 309.9858 309.9867 309.9876 309.9884 309.9891
Columns 155 through 161
309.9898 309.9905 309.9911 309.9917 309.9922 309.9927 309.9932
Columns 162 through 168
309.9936 309.9940 309.9944 309.9948 309.9951 309.9954 309.9957
Columns 169 through 175
309.9960 309.9963 309.9965 309.9967 309.9969 309.9971 309.9973
Columns 176 through 182
309.9975 309.9977 309.9978 309.9979 309.9981 309.9982 309.9983
Columns 183 through 189
309.9984 309.9985 309.9986 309.9987 309.9988 309.9989 309.9989
Columns 190 through 196
309.9990 309.9991 309.9991 309.9992 309.9992 309.9993 309.9993
Columns 197 through 200
309.9994 309.9994 309.9995 309.9995
```







# Vedlegg C: Risikoanalyse

ID	Risiko	Beskrivelse	Sanns.	Kons.	Tiltak	Status
1	Utslipp av gasser mot personell	Gasser produseres av forbrenningen av batteriet. Denne gassen vil spre seg i umiddelbar nærhet rundt battericellen. Hydrogenfluorid har veldig liten produksjonrate, og fortynnes veldig fort da den reagerer med luftfuktigheten.	Нøу	Нøу	Antennelse vil skje ved å slå en stang inn i spikeren som igjen penetrerer batteriet. Denne stangen vil være 3 meter slik at dette foregår på en avstand. Personen som skal slå inn spikeren vil være ikledd røykdykkerutstyr. Etter spikeren er slått inn går vedkommende bort mens batteriet blåser seg opp(før antennelse). Avstand ved utbrenning og ventilering vil skje ved minst 20 meters avstand.	ОК
		Vindretning vil føre til horisontal gasspredning. Denne konsentrasjonen vil være redusert.	Middels	Middels	Vindhastighet og retning vil monitoreres. Oppholdssted under forsøk vil være på den siden av forsøket hvor vinden kommer inn fra, slik at gass ledes bort fra oppholdssted.	ОК
2	Utslipp av gasser til omgivelsene	Gasser som produseres kan skade natur og miljø i nærhet av forsøket.	Middels	Lav	Plassere forsøket på en åpen plass med god avstand til natur og annet som kan ta skade av gassene.	ОК





3	Gassforgiftning ved tilrigging av nytt forsøk	Ventilering av toksiske gasser er ikke fullført	Lav	Нøу	Forsøket gjøres i åpne omgivelser uten tak der gass ikke kan fanges. Etter utbrenning vil rester av battericellen kjøles ned ved hjelp av vannspyling slik at det ikke produseres gasser. Vifte vil blåse gass bort fra forsøksområdet. I tillegg benyttes røykdykkerutstyr for å forhindre gassforgiftning.	ОК
4	Eksplosjon med splinter	Dersom det oppstår for mye trykk, og det ikke er tilstrekkelig med avlastningsflater vil det oppstå en eksplosjon. Ved en slik eksplosjon vil systemet kunne ødelegges og løsne slik at splinter og gjenstander vil fly bort ved høye hastigheter.	Lav	Нøу	Sørge for tilstrekkelig avlastningsområder slik at trykket kan utlignes på en kontrollert måte. Fremside, bakside og topp vil være åpne sider. Alt som inngår i forsøksmodellen må være solid. Det vil også være en fysisk barriere som fungerer som et skjold.	ОК
5	Jetflamme m/ kjemikalier ødelegger utstyr	Rigg, isolasjonsmateriale, termoelementer og kamera er utstyr som kan bli ødelagt av jetflamme m/ kjemikalier. Jetflammen har en brennende effekt, men også kjemikalier som tærer seg gjennom materialer.	Lav	Lav	Jetflammen ledes ut av åpningene på riggen. Rigg lages av stål som har smeltepunkt på 1538 °C. Dette vil kunne motstå varmen som skapes av battericellen. Termoelementer vil kunne ødelegges av varmen, og er et akseptabelt tap det ikke vil gjøres tiltak mot. Kamera vil stå på avstand.	ОК





6	Jetflamme m/ kjemikalier mot personell	Jetflammen vil kunne stå ca. 3 meter ut fra sidene med åpning til branncellen.	Lav	Høy	Person som slår spiker inn i cellen vil være ikledd røykdykkerdrakt. Oppholdssted vil være minst 20 meter unna.	ОК
7	Jetflamme m/ kjemikalier mot omgivelser	Jetflammen vil kunne sette fyr på og ødelegge omgivelsene	Lav	Middels	Plassere forsøket med minst 15 meter avstand fra omgivelser som kan ta skade.	ОК
8	Battericellen beveger seg under forbrenning	Battericellen kan røre på seg dersom det kun forekommer en jetflamme på en av sidene.	Lav	Lav	Risiko vurderes som ok. Ingen ytterligere tiltak beh <mark>øves</mark> .	ОК
9	Brann under ladning	Batteri vil kunne begynne å brenne ved ladning og videre antenne andre batterier/omgivelse r	Lav	Lav	Lade batteriene på et isolert sted. Isolere batteriene som lader slik at de ikke kan antenne andre batterier.	ОК
10	Batteri antenner ikke etter suksessfull penetrering	Batteri antenner ikke og det er null reaksjon.	Lav	Høy	Etter 1 minutt vil person ikledd røykdykkerdrakt gå bort og forsøke å lage ny penetrering ved bruk av stang på 3 meter. Dette gir en tilstrekkelig avstand. Dette gjøres også fra side i rig som ikke er åpen.	ОК
		Batteri antenner ikke og lekker gass/røyk.	Lav	Lav	Forsøk gjøres ute.	ОК





11	Andre tilstedeværende kommer for nærme under forsøk og ventileringsperiode	Det kan befinne seg folk på området som ikke vet at det gjøres forsøk, og hva forsøket innebærer.	Lav	Høy	En perimetermed bånd blir opprettet på ca. 20 meter. Det vil også holdes vakt for å forsikre at andre ikke kommer i nærheten. Personer som befinner seg på området vil bli varslet om i god tid om forsøket.	ОК
12	Håndtering av utbrente celler	Batteriene kan fortsatt ha små konsentrasjoner med gass som ikke er frigjort etter utbrenning og nedkjøling.	Lav	Middels	Cellene kjøles ned av omgivelsene i 5 min, før personell ikledd røykdykkerdrakt griper batteriene med tang og plasserer dem i vannbad. Deretter tansporteres batteriene til miljøsenter.	ОК
13	Spillvann kan forrurense omgivelsene	Batteriene vil kjøles ned med vann slik at de slutter å produsere gasser, slik at de til slutt kan behandles. Dette vannet vil forsvinne til omgivelsene dersom det ikke gjøres tiltak.	Нøу	Lav	Batteriene vil i starten kjøles ned av omgivelsestemperaturen. Ved tilstrekkelig nedkjøling vil personell ikledd røykdykkerdrakt gripe batteriet med tang, og plassere den i et kar med vann for videre nedkjøling. Væsken i dette karet vil bli flyttet over i en dunk som blir transportert til avfallsanlegg.	ОК
p.	Revisjon 1	Punkt: 1, 6 5 12	Revidering Krav til fysi Krav til ple Kjøles ikke	: isk barriere xiglass me ned direkt	e og vifte fjernet. llom kamera og rigg fjernet. te med vann.	

Revisjon 2Punkt:Revidering:10Krav til pilotflamme for å antenne gass/røyk fjernet.12Krav til forvarsling til miljøsenter fjernet.





### Vedlegg D: Prosedyre for forsøk

- Rigg settes opp ved bruk av siporex-blokker, termoelementer monteres og kobles til logger. Logger kobles til PC. Plassere rigg slik at langside vender mot bygg og derfor blir skjermet av stålet.
- Isolasjonsmateriale og batteri settes inn (rekkefølge; Dalfratherm (hvit), AeroGuard (rutete hvit), Promaseal (svart). Fjordpanel setter inn for å isolere innsiden av begge sideveggene.
- 3. Skru på kamera og datalogging
- 4. Vise ark med forsøksnummer til kamera samtidig som det brukes en lighter på et termoelement for å synkronisere datalogging og video.
- 5. Alt personell som ikke skal kortslutte batteri står med en sikkerhetsavstand på 20 meter, ikke i retning av vind.
- 6. Batteri kortsluttes, og person som kortslutter beveger seg 20 meter bort fra batteriet.
- 7. Personell ikledd røykdykkerdrakt kan nærme seg batteriet 5 min etter utbrenning.
- 8. Tang brukes for å kontaktløst frakte batteriet til et vannbad.
- 9. Resterende isolasjonsmaterialer fjernes med tang.
- 10. Når rigg er på 20-30 °C kan forsøk gjentas.
- 11. Vann fra batterivannbad blir tømt i et renseanlegg i etterkant av forsøkene.



