

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

Eivind Klokkehaug

Master i energi og miljø

Innlevert: juli 2017

Hovedveileder: Trond Toftevaag, IEL

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

Sammendrag

Revolve NTNU har de siste årene bygget en bil som både går fortere og er lettere. For at dette skal skje blir alle komponenter i racerbilen presset til sitt ytterste. Dette har medført at batteripakken, som er den tyngste og en av de mest sentrale delene i bilen, utvikler mye varme på grunn av mengden battericeller men og strømstyrke. Det er denne utfordringen som har vært inspirasjon til masteroppgaven. Den omhandler testing av battericeller og moduler med fokus på varmeutvikling.

Opgaven er skrevet i samarbeid med NTNU Revolve. Det er batterier som er brukt i racerbilen Revolve- team 2017 som er benyttet i undersøkelsene. Enkeltceller, celler i parallell og en hel modul har blitt testet. I masteroppgaven er det blitt sett på nye type studier av battericeller ved bruk av elektrokjemisk impedans spektroskopi for å kunne få en enda mer detaljert forståelse av hvordan battericellene oppfører seg ved forskjellige temperaturer. En har også sett på nye metoder for kjøling av battericeller ved bruk av *Phase-change material* som er ikke-elektrisk ledene. Dette gjør at du kan ha de i direkte kontakt med battericellene. Eskalering av testingen for å se på en hel modul har og blitt gjort, for å få et mer realistisk bilde av hvordan forholdene er i batteripakken i en racerbil og for å få en bedre forståelse av hvordan cellen blir påvirket av hverandre ved stor påkjenning av strøm og høye omgivelsestemperaturer. Det er og blitt sett på forskjellige kjølemetoder, i situasjoner som simulerer forholdene i racerbilen.

Resultatene av modultesting har vist at differansen på temperaturen på utsiden av modulen sammenlignet med innsiden er på hele 13.7C. Resultatene har og vist at det er rundt senter cellene er varmest mens de blir kaldere jo nærmere ytterkant av modulen de kommer. En ser og at temperaturen er høyere i midten av cellene sammenlignet med lengre nede når strøm er påsatt. Når modultestene har kjørt rene opp og utladningsstrømmer har det vist seg at strømretningen påvirker og varmeutviklingen i modulen. Ved kjøling ved hjelp av vind har det vist seg at parallell kjøling er det som gir best resultater for varmeutvikling. Det har og blitt sett på entropieffekten i en modul. Det har vist seg at ved 2C ladning med 36C omgivelsestemperatur har den kaldeste temperaturen i modulen vært på 34C. Testing av PCM har vist at nok volum av denne væsken vil gi en bra kjøleeffekt. Ved elektromagnetisk

impedans spektroskopi har det vist seg at impedans i battericellene er avhengig av både SOC og temperatur. Det har vist seg at lavere en 30% SOC øker impedansen i batteriet betraktelig, mens for temperaturen ned mot 5C gjelder dette for 60% SOC.

Alle testene som er blitt gjort i denne masteroppgaven har blitt gjennomført ved batterilabben ved institutt for energiteknikk med god hjelp av Preben Vie. Alle testene er testet i temperatur regulerende kammer der mesteparten av testene har blitt kjørt på 36 grader Celsius.

Abstract

The last years Revolve NTNU has developed a race car with increased performance pushing technology, component performance and weight to the limit. The battery module is the heaviest and the most central part of the car and this component produce a lot of heat due to the amount of battery cells and power (strømstyrke).

This challenge has been the inspiration for this thesis. The objectives have been battery cells and module testing with focus on heat generation.

The thesis has been a collaboration with NTNU Revolve project, and the actual battery used in Revolve 2017 has been investigated in several tests. Individual cells, cells in parallel and complete modules has been tested.

In this thesis investigations have been compared with earlier studies of battery cells when using (electrochemical impedans spetroskopi) to get a better understanding of the behavior of the battery cells at various temperatures.

New methods of battery cooling have been looked at with usage of non-electric phase- change material so direct contact with the battery cells are possible.

Testing on complete modules has also been performed to get a more realistic race car scenario and better understanding how battery cells influence each other under high current and high environment (environmental) temperature. Different methods of cooling have been investigated for race scenario.

The results of module testing have showed that the difference between internal external temperature is 13,7 degrees Celsius. The results also indicate that the maximum temperature is in the center of the cells and the minimum temperature is on the edges of the battery cell. When performing module discharge current the current direction influence the heat transfer in the modules.

Air cooling indicate that parallel cooling gives the best effect on the heat development. Entropy effect in a module has also been a topic for investigation. Results indicate that 2degree Celsius charging with 36degree Celsius surrounding temperature gives 34degree Celsius as lowest temperature in the module.

Testing of PCM has shown that enough volume of the fluid gives a good cooling effect.

electromagnetic impedance spectroscopy indicate that battery cells are depending on both SOC and temperature. Results indicates that lower than 30% SOC increase the battery impedance significant, for temperature conditions down to 5 degree Celsius gives 60% SOC.

All tests conducted in this thesis has been performed at IFE under guidance of Preben Vie. All tests have been done in climate chamber, and most of the tests has been run at 36 degree Celsius.

Forord

Jeg vil benytte denne muligheten til å takke Preben Joakim Svela Vie ved institutt for energiteknikk for all hjelpen og tiden han har satt av til å hjelpe meg og mitt prosjekt. Han har stilt med testutstyr oppkoblingsmaterial. All den unike kunnskapen som IFE og Preben sitter på om batteriteknologi har vært til stor hjelp for min forståelse og oppgaven. Dette har vært en unik kilde av kunnskap som jeg har desperat prøvd å ta til med. Det har til og med alltid vært klar en kopp kaffe der når det har vært behov for.

Jeg vil og benytte anledningen til å takke Revolve NTNU for å gitt med den støtten og veiledning jeg har treng gjennom denne oppgaven. Deres resurser, erfaringer og nettvert har vært en fin start for en masteroppgave. Jeg vil i denne sammenheng takke spesielt Lennart Olsen og Ørjan Gjengedal for den oppfølgingen og interessen de har vist i min oppgave. De har veiledet meg på rett spor når det har vært nødvendig.

Jeg vil og vise min oppmerksomhet til mine medstudenter. Uten dem hadde det ikke vært noe stas å sitte alle de timene å jobbe med dette oppgaven. Mine venner i klassen har hjelp meg til å få et overblikk over hva som er målet med min oppgave og de har alltid passet på at det er blitt lange nok pauser mellom all jobbingen. Jeg vil og takke familien for at de alltid er klar til å hjelpe når det trengs.

Til slutt vil jeg takke min veileder Trond Tofevaag for å alltid være behjelpelig og interessert når jeg har tatt kontakt. Han har og hatt god forståelse for mine utfordringer og dessuten hatt tålmodighet til å lese igjennom mine tusener av skrivefeil som dukker opp på bare en side.

01.07.2017



Eivind Klokkehaug

Innholdsfortegnelse

SAMMENDRAG	I
ABSTRACT	III
FORORD	V
LISTE OVER FIGURER	XI
LISTE OVER TABELLER	XV
FORKORTELSER	XVII
1 INTRODUKSJON	1
1.1 BAKGRUNN	1
1.2 PROBLEMBESKRIVELSE	2
1.3 MÅLSETTING	2
1.4 ARBEIDSMETODE	2
1.5 RAPPORTENS OPPBYGGING	3
2 LITIUM-ION BATTERI TEKNOLOGI OG MÅLESTRATEGIER FOR LABORATORIETESTING	5
2.1 ELEKTROKJEMISK OPPBYGGING	5
2.2 KAPASITET OG C-RATE	7
2.3 STATE OF CHARGE OG STATE OF HEALTH	8
2.4 DEGRADASJON OG LEVETID	9
2.5 LADESTRATEGIER	10
2.6 INDRE MOTSTAND	11
2.7 ELEKTROKJEMISK IMPEDANS SPEKTROSKOPI	13
2.8 VARMEUTVIKLING OG VARMEOVERFØRING	15
2.8.1 <i>Varmeutvikling</i>	15
2.9 VARMEOVERFØRING	17
2.9.1 <i>Ledeevne (konduktivitet)</i>	17
2.9.2 <i>Konveksjon</i>	18
2.9.3 <i>Stråling</i>	19
2.10 KJØLEMETODER	19
2.10.1 <i>Luftkjøling</i>	19
2.10.2 <i>Materialer</i>	20
2.10.3 <i>Phase-change material</i>	20
2.10.4 <i>Kjøling ved hjelp av entropi</i>	21

3	TESTOPPSETT, MÅLEINSTRUMENTER OG SIKKERHET	25
3.1	MÅLEINSTRUMENTER	25
3.1.1	<i>PEC model ACT0550</i>	25
3.1.2	<i>Elektrokjemisk impedans spektroskopi måleinstrumentet</i>	26
3.1.3	<i>Modultest måleinstrumentet</i>	26
3.2	TESTOPPSETT	27
3.2.1	<i>Battericellene</i>	27
3.2.2	<i>Batterimodul</i>	28
3.3	SIKKERHET	30
4	CELLETESTING	33
4.1	ENKELTCELLER I PARALLELL MED ALUMINIUMSFOLIE	34
4.1.1	<i>Introduksjon</i>	34
4.1.2	<i>Resultat</i>	35
4.1.3	<i>Analyse</i>	35
4.2	KJØLING AV BATTERICELLER MED 3M NOVEC	36
4.2.1	<i>Introduksjon</i>	36
4.2.2	<i>Resultat</i>	37
4.2.3	<i>Analyse</i>	40
4.3	ELEKTROKJEMISK IMPEDANS SPEKTROSKOPI ANALYSE	41
4.3.1	<i>Introduksjon</i>	41
4.3.2	<i>Resultater</i>	42
4.3.3	<i>Analyse</i>	44
5	MODULTESTING.....	47
5.1	UTEN LUFTKJØLING	50
5.1.1	<i>Introduksjon</i>	50
5.1.2	<i>Resultater</i>	51
5.1.3	<i>Analyse</i>	52
5.2	LUFTKJØLING I SERIERETNING	53
5.2.1	<i>Introduksjon</i>	53
5.2.2	<i>Resultat</i>	54
5.2.3	<i>Analyse</i>	56
5.3	LUFTKJØLING MED ALUMINIUMSFOLIE	56

5.3.1	<i>Introduksjon</i>	56
5.3.2	<i>Resultat</i>	57
5.3.3	<i>Analyse</i>	59
5.4	PARALLELL KJØLING MED ALUMINIUM	59
5.4.1	<i>Introduksjon</i>	59
5.4.2	<i>Resultater</i>	60
5.4.3	<i>Analyse</i>	62
5.4.4	<i>Introduksjon</i>	62
5.4.5	<i>Resultater</i>	62
5.4.6	<i>Analyse</i>	65
6	DISKUSJON	67
6.1	CELLETESTING	67
6.1.1	<i>Aluminiumfolie mellom battericeller</i>	67
6.1.2	<i>Phase-change material</i>	68
6.1.3	<i>Elektrokjemisk impedans spektroskopi</i>	70
6.2	MODULTESTING	71
7	KONKLUSJON	75
8	VIDERE ARBEID	77
	REFERANSER	77
	APPENDIKS	79
	APPENDIKS A – DATABLAD FRA MELASTA	79
	APPENDIKS B – HELE TIDSFORLØPET AV EIS TESTENE	79
	APPENDIKS C – HELE TIDSFORLØPET AV TESTING VED PCM OG ALUMINIUMSFOLIE	79
	APPENDIKS D – SAMMENLIGNING AV ALLE TEMPERATURMÅLINGER FOR MODULTESTING VED MAKSIMAL TEMPERATUR	79
	APPENDIKS E – HELE TIDSFORLØPET AV TESTING AV MODUL	79

Liste over figurer

Figur 2-1 Illustrasjon av den kjemiske oppbyggingen av et litium ion batteri. Fra [7].	6
Figur 2-2 Bilde av hvordan LCO cellen fra Melasta ser ut og en illustrasjon over hvordan cellen er bygd opp innvendig.	7
Figur 2-3 Ladning ved 2C av en Melasta LCO battericelle fra 0-100% SOC målt i spenning [V] fra test gjort i kapittel 4.	8
Figur 2-4 Viser strøm, spenning og kapasitet for en CC-CV lading av Melasta LCO celle ved 2C fra 0-100% SOC med saturation charging på C/20 gjort på en enkeltcelle.	11
Figur 2-5 Eksempel på en current step respons. Fra [15].	12
Figur 2-6 Eksempel på 2C utladning på en Melasta celle der current step respons er blitt brukt for måling av indre motstand. Der kurven til indre motstand, spenning og strøm er vist. De små spenningsprangene ΔU har røde sirkler rundt seg. Fra [4].	13
Figur 2-7 Ideell impedans spektroskopi for en litium-ion celle og en EC med Zarc og Warburg element [17].	14
Figur 2-8 Virkningsgraden for en litium-ion celle i % i forhold til temperatur. Fra [24].	16
Figur 2-9 Figuren som illustrerer utbredelse av en dimensjonal varmelednings evne. Fra [25]	17
Figur 2-10 Konveksjon varmetransport for en overflate. Fra [25]	19
Figur 2-11 Illustrasjon over hvordan luften kan strømme gjennom en samling av celler som skal forestille en batterimodul. a) illustrerer seriekjøling sett ovenfra og b) er parallellkjøling sett fra siden.	20
Figur 2-12 Eksempel på hvordan en PCM-kurve for temperatur og energilagring kan se ut..	21
Figur 2-13 Resultater fra entropianalyse utført av Preben Vie ved IFE, der tre forskjellige celler ble testet. Fra [3]	22
Figur 2-14 Viser resultat av en utladning fra 100-0% SOC med 0.25C samt 50A pulser for hver 8% SOC synker med omgivelse temperatur på 36°C. a) Viser strømpulsene fra 100-0% SOC. b) viser hvordan temperaturen variere gjennom testen. Fra prosjektoppgave 2016 [4].	23
Figur 3-1 Bilde av batteritester PEC modell ATT0550.	25
Figur 3-2 Bilde av hvordan modul tester ved IFE ser ut på innsiden.	27
Figur 3-3 Illustrasjon av en LCO battericelle fra Melasta. a) viser bilde av temperatursensoren som er brukt ved enkelt celle testing og to celler i parallell. b) Viser hvordan konnektorene og spenningsmålingene er koblet på.	28

Figur 3-4 a) Illustrasjon ferdig oppkoblet modul inne i et varmekamera. Grønne kabler er temperatursensorer, stor svart er strømkabel som er vist i b), platen oppå måler spenning i hver celle, grå kabel på hver side er også temperaturmåler. b) viser hvordan en får ut spenning fra hvert cellepar.....	29
Figur 3-5 Illustrasjon over hvordan modulen er koblet opp ved serie/parallellkobling.	29
Figur 4-1 Viser et utsnitt av testloopen som blir gjennomført i alle testene av celler. a) er strømforløpet når celler er koblet i parallell b) gjelder for en enkeltcelle.	34
Figur 4-2 Illustrerer aluminiumsfolien plassert mellom to battericeller med en temperatursensor mellom.....	35
Figur 4-3 Viser temperatur og utladningskapasitet for to celler i parallell der det er en aluminiumsplate i mellom. Grafene viser hva som skjer ved 2C oppladning etterfulgt av testloop som er vist i Figur 4-1 og deretter en ny 2C oppladning.....	35
Figur 4-4 Bilde av test boks med en battericelle inni for å kunne teste PCM. Test utført ved IFE.....	37
Figur 4-5 Resultater fra test av enkeltceller inne i et kammer med PCM væske fra 3M der en ser temperatur, spenning, utladningskapasitet og indre motstand.	38
Figur 4-6 Viser to tilsvarende battericeller som brukes i masteroppgaven, som er testet fra prosjektoppgave 2016 [4]. Det som er vist er spenning, indre motstand, utladningskapasitet og temperatur.	38
Figur 4-7 Temperatur og utladningskapasitet for test som er gjort med to celler i parallell inne i en test bok med og uten PCM tilsatt. Begge tester har kjørt samme strøm pulser.	39
Figur 4-8 Spenningsforløp for to celler i parallell der blå kurve er uten PCM kjøling og rød er med PCM kjøling.....	40
Figur 4-9 Viser SOC i % og strømmen i mA for EIS test for -6°C. Strømpulsene gir utslag i kurven for SOC og er merket med sirkler. Pulsene er små AC strømmer på 300mA som sendes inn i batteriet for å kunne gjennomføre EIS tester.	42
Figur 4-10 EIS av fem forskjellige temperaturer med syv forskjellige SOC der rekkefølge fra størst til lavest impedans er lik for alle temperaturene, der 30Hz er maksimal frekvens i denne testen.....	44
Figur 5-1 Viser alle spenningen til celleparene i modulen ved 100% SOC til 0% SOC ved 2C utladning.	48
Figur 5-2 Oversikt over strømforløp for oppladning, testloop og ladningigjen av en modul. Ladding er positiv strøm mens utladninger motsatt.....	49

Figur 5-3 Viser et utdrag av testloopen og hvordan den ser ut. Positiv strøm er lading av cella mens negativ er utladning. Dette forløpet vil bli repetert helt til modul har nådd en restriksjon eller 0% SOC.	49
Figur 5-4 Oversikt over spenning, temperatur og utladnings kapasitet av modulen uten kjøling når testen kjører testloopen, fra 100% SOC helt til testen stopper pga. restreksjonsbrudd i dette tilfellet.	52
Figur 5-5 Viser målinger av temperaturen mellom cellepar i en modul uten kjøling. Der det er målinger mellom seks cellepar der det ene celleparet også har en sensor helt nederst på cellen.	52
Figur 5-6 Bilde av hvordan en serie kjøling med vifte ser ut. Test utført ved IFE.	54
Figur 5-7 Oversikt over spenning, temperatur og utladnings kapasitet av modulen ved serie luftkjøling når testen kjører testloopen, fra 100% SOC helt til testen stopper pga. restreksjonsbrudd i dette tilfellet.	55
Figur 5-8 Viser målinger av temperaturen mellom celler i en modul med serie luftkjøling. Målinger mellom seks cellepar der det ene celleparet og har en sensor helt nederst på celleparet. Luftkjølingen treffer cellepar 11-12 først og forlater cellepar 1-2.	55
Figur 5-9 Bilde av hvordan kjøleriggen av aluminiumsplater er plassert og satt opp.	57
Figur 5-10 Oversikt over spenning, temperatur og utladning kapasitet av modulen når en kjører den karakteriserte loopen som blir brukt i alle tester, fra 100% SOC helt til testen stopper pga. restreksjonsbrudd.	58
Figur 5-11 Viser målinger av temperaturen mellom celler i en modul med aluminium som kjølerigg i modul og kjøling i serieretning. Der det er målinger mellom seks cellepar der det ene celleparet og har en sensor helt nederst på cellen. Luftstrømmer treffer cellepar 11-12 og forlater cellepar 1-2.	58
Figur 5-12 Viser hvordan vifte og modul er plassert ved parallellkjøring. I dette bilde er riggen ikke inkludert. Test utført ved IFE.	60
Figur 5-13 Oversikt over spenning, temperatur og utladning kapasitet av modulen med parallell kjøling og aluminiumsfolie når en kjører test loop, fra 100% SOC helt til testen stopper.	61
Figur 5-14 Viser målinger av temperaturen mellom celler i en modul med aluminium som kjølerigg. Der det er målinger mellom seks cellepar der det ene celleparet og har en sensor helt nederst på cellen. Vinden treffer normalt (parallell kjøling).	61
Figur 5-15 Utladning og ladning av modul ved 2C og CC-CV metode med en oversikt over SOC, strøm og temperatur på utsiden av batterimodulen.	64

Figur 5-16 Temperaturmålinger på innsiden av batteriet ved 2C utladning og ladning ved å bruke CC-CV strategien. Er i samme tid som Figur 5-15.....	64
Figur 6-1 Illustrasjonen viser bilde som er tatt med et varmekamera mest testing av modul pågår.....	72

Liste over tabeller

Tabell 1 Termisk konduktivitet k for materialer ved 0°C in $\text{W}/(\text{m K})$ [25].	18
Tabell 2 Oversikt over aktuelle materialer med oppgitt varmekapasitet i (J/gK). Fra [28].	20
Tabell 3 Oversikt over forholdet mellom strøm og entropi og når det har en kjøleeffekt.	22
Tabell 4 Spesifikasjoner av PEC model ACT0500 som er brukt ved testing av batteri ved IFE. Fra [4].	26
Tabell 5 Spesifikasjoner om LCO battericelle fra Melasta. Mer detaljert datablad finnes i Appendiks A.	28
Tabell 6 Oversikt over begrensinger som er lagt inn når testing av modul blir gjennomført..	30
Tabell 7 Oversikt over begrensinger som er lagt inn når testing av celler blir gjennomført ...	31
Tabell 8 Viser hvordan testene for enkeltcelle a) og celle i parallell b) blir utført. Testen går steg for steg nedover.	33
Tabell 9 Oversikt over steg i test av modul	50

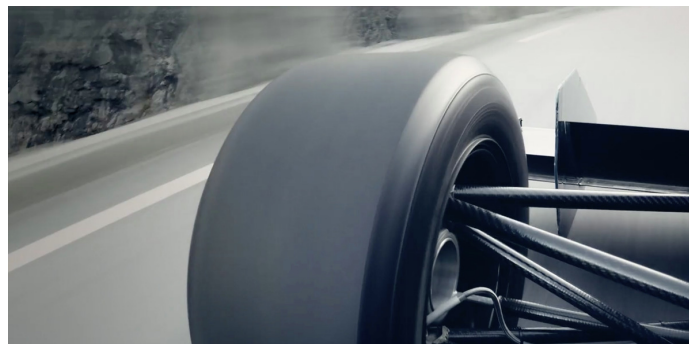
Forkortelser

IFE	Institute of Energy Technology
2WD	Two wells driven
4WD	Four wells driven
LCO	Cobalt dioxide based lithium-ion battery
NMC	Nickel manganese cobalt based lithium-ion battery
NCA	Nickel cobalt aluminium based lithium-ion battery
SOC	State of charge
SOH	State of health
DOD	Depth of discharge
OCV	Open circuit voltage
PCM	Phase-change material
EIS	Electrochemical impedance
EC	Ekvivalent krets
CC.....	Constant current
CV.....	Constant voltage
MCC.....	Multistage constant current
CP	Constant power
KERS	Kinetic energy recovery system
BMS	Battery management system
Testloop.....	Karakteristiske opp/utladningpulsene som skal etterligne strømforløpet i en elektrisk dreven racerbil som bremses og akselereres.

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn

I løpet av dette studieåret er det i forbindelse med mitt prosjekt og masterarbeid (etablert og utviklet) et samarbeid med student- organisasjonen Revolve NTNU, både når det gjelder prosjektarbeidet som ble gjennomført høsten 2016 og i masteroppgaven som er skrevet her. Siden 2010 har denne organisasjonen bygget racerbiler for å konkurrere i verdens største student konkurranse Formula Student. I starten var det forbrenningsmotor som var på denne bilen. I 2014 bygde Revolve sin første elektriske bil som var 2WD, og i løpet av de tre siste åra har bilden utviklet seg til å bli en 4WD bil med en akselerasjon fra 0-100 km/t på ned mot 2 sekunder og en vekt på ca. 180 kg [1].



Batteripakken i denne bilen er den største, mest ustabile og kanskje viktigste delen i bilen. Det er hele energikilden til bilen som bidrar til at den kan greie å bevege seg fremover. En stor utfordring med en slik type racerbil er at en ønskes å ha en lett bil som overhode mulig, men samtidig vil en også ha en viss kraft som gjør at den kan nå den hastigheten som en ønsker. Med disse faktorene som utgangspunkt kan en møte en del utfordringer. Skal en ha en lettest mulig batteripakke, kan det komme på bekostning av antall battericeller. Det medfører at i en sånn type bil vil en oppnå veldig høye temperaturer på grunn av høy elektrisk strøm i battericellene. Kunnskap og erfaringer fra samarbeidet med studentorganisasjonen Revolve NTNU og muligheten til å utnytte seg av laboratoriene og den kunnskapen *Instituttet for energiteknikk* (IFE) sitter på innen batterier har vært en inspirasjon for mitt masterarbeid.

Dette masteroppgaven er en videreføring og utvikling av tidligere arbeid som har blitt gjort på litium-ion batterier i Revolve NTNU. I tillegg til mitt prosjektarbeid høsten 2016 og master våren 2017 er det også skrevet en master i 2015 og en i 2016 på dette fagområdet.[2-4].

1.2 Problembeskrivelse

Batteripakken som er sett på i denne masteroppgaven er for en racerbil som blir brukt i konkurranser. Lite vekt og høy akselerasjon er noen av de viktigste tingene for å prestere bra i konkurranse medfører dette utfordringer for en batteripakke. Dette og at det er få battericeller i parallell gir en høy strøm som videre medfører til høy varmeutvikling. Med utgangspunkt i dette skal denne masteroppgaven analysere hva som er grunnen til at så mye varme blir dannet og hvordan påvirker varmforskjeller batteriets virkningsgrad. Det er og en utfordring å finne ut hvor varmt det kan bli i en batteripakke. Derfor er det interessant å få testen en modul som består av flere battericeller for å se hvordan temperaturen beveger seg. Det vil og være interessant å prøve å finne ut hvor effektiv forskjellige former for kjøling har på en slik modul.

1.3 Målsetting

Med dette som utgangspunkt vil hovedfokuset i denne masteroppgaven være:

- Laboratorier testing av moduler av tolv celler, enkeltceller og celler i parallell.
- Teste de for høye strømmer for oppladning og utladning som skal etterligne en racerbils kjøremønster.
- Hovedfokus i testene skal være temperaturutvikling og hvordan dette påvirker battericellen og der en skal se på:
 - Hvordan påvirker dette virkningsgraden til batteri cellen.
 - Hvordan påvirker omgivelsestemperaturen battericellen.
 - Strategier for å kjøle ned batterier på og hvor effektive de er.

1.4 Arbeidsmetode

Alle testene er gjennomført ved IFE mens restene av arbeidet har blitt gjennomført i Trondheim. Arbeidsmetoden er presentert som stikkord under.

- Innhenting av informasjon fra litteratur og folk med erfaring.
- Skaffe testutstyr som battericeller, PCM og testutstyr.
- Opprigging av labb, programmering av tester og feilsøking i data og måleinstrument.
- Kjøring av de bestemte testene.
- Analyse av testresultater og bygge opp forståelse av resultatene ved bruk av teori.

1.5 Rapportens oppbygging

Denne masteroppgaven er bygd opp slik at leseren skal skjønne først hva det dreier seg om i denne oppgaven og hva målet med oppgaven er. Teorien handler om hvordan batteriets oppbygging er og hvordan det fungerer, målestrategier og varmeutvikling. Det kommer så et kapittel det utstyret som er brukt i testene som er gjennomført er presentert. Det blir nevnt usikkerheter, restriksjoner for sikkerheten på labb i dette kapitlet. Resultatene i denne masteroppgaven er delt i to kapittel som heter celletesting og modultesting. Strukturen på disse kapitlene er at det først kommer introduksjon så resultater og deretter analyse av resultater. Etter testene er presentert kommer diskusjonen rundt testene. Her deles diskusjonen opp i temaene aluminiumsfolie, PCM, EIS og modultesting. Her er målet og se helheten og trekke de store linjene mellom resultat og teori. Etter å ha diskutert de forskjellige deler kommer konklusjonen som er delt i samme inndeling med punkter. Her kommer konklusjonene ut fra kapitlet før om diskusjon. Oppgaven slutter med et kapittel om videre arbeid der det er nevnt ting en ønsket å se på en ikke fikk tid til og ting som dukket opp underveis som kan være verd at noe videre ser på.

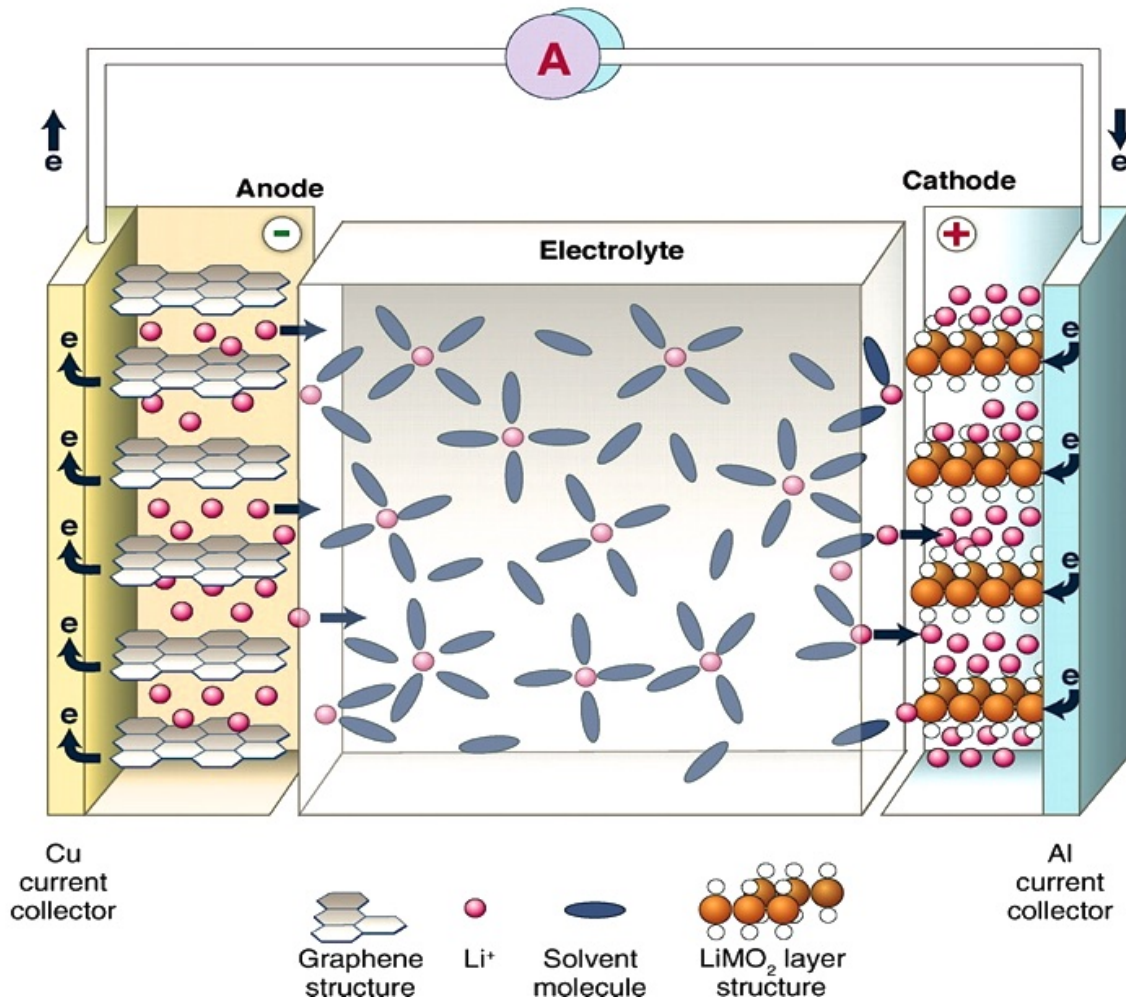
2 Litium-ion batteri teknologi og målestrategier for laboratorietesting

Med et større fokus på CO₂ utslipp på transportmiddel, Smart grid utvikling og mer globale sammenkoblinger av strømmettet har det den siste tiden blitt et større fokus på gode måter å lagre strøm på. Dette har ført til at fokuset på batteriteknologi har økt betraktelig [5]. I dag dominerer batterier transportbransjen når det gjelder lagring av energi.

I dette kapittelet blir det sett på hvordan litium-ion batterier er bygd opp og teknologien rundt det. Det vil bli lagt spesielt vekt på strøm, temperatur, *state of charge* og impedans påvirker battericellen samt strategier for gjennomføring av celletesting.

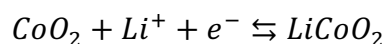
2.1 Elektrokjemisk oppbygging

Et litium-ion batteri er bygd opp av tre deler. Anode, elektrolytt og katode. Som vist på Figur 2-1 under, fra venstre mot høyre. Anoden er i elektrokjemien definert som der det skjer en oksidasjon (oksidasjonstallet øker som kan f.eks. være vist et e⁻ blir frigitt, da øker det med en) [6]. Ved utladning som tilfellet på Figur 2-1 er anoden den negative polen mens snur strømmen retning er den positive pole. Katoden er i elektrokjemien definert som der det skjer en reduksjon (når oksidasjonstallet minker f.eks. når et proton som Li⁺ blir frigitt) [6]. Ved utladning av batteriet er katoden den positive polen og anoden den negative polen, kan og som i anoden variere etter retningen på strømmen. Elektrolytten er stoffet mellom anode og katode som inneholder frie, bevegelige ioner som er elektrisk ledene. I Figur 2-1 viser en NMC (LiNiMnCoO₂) litium-ion celle. Denne har en anode som består av grafitt (LiC₆), en katode som består av LiNiMnCoO₂ og en elektrolytt som består av LiFePO₄. Det finnes flere typer litium-ion batterier på markedet, og der de mest vanligste nå om dagen er LCO (LiCoO₂), NCA (LiNiCoAlO₂) og NMC som nevnt over. Det som variere med disse forskjellige typene er hvilken type katode de har.

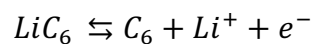


Figur 2-1 Illustrasjon av den kjemiske oppbyggingen av et litium ion batteri. Fra [7].

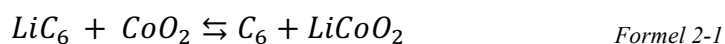
I denne masteroppgaven vil det bli brukt en LCO celle. Den kjemiske reaksjonen for denne er som følgende:



mens for anoden er den:

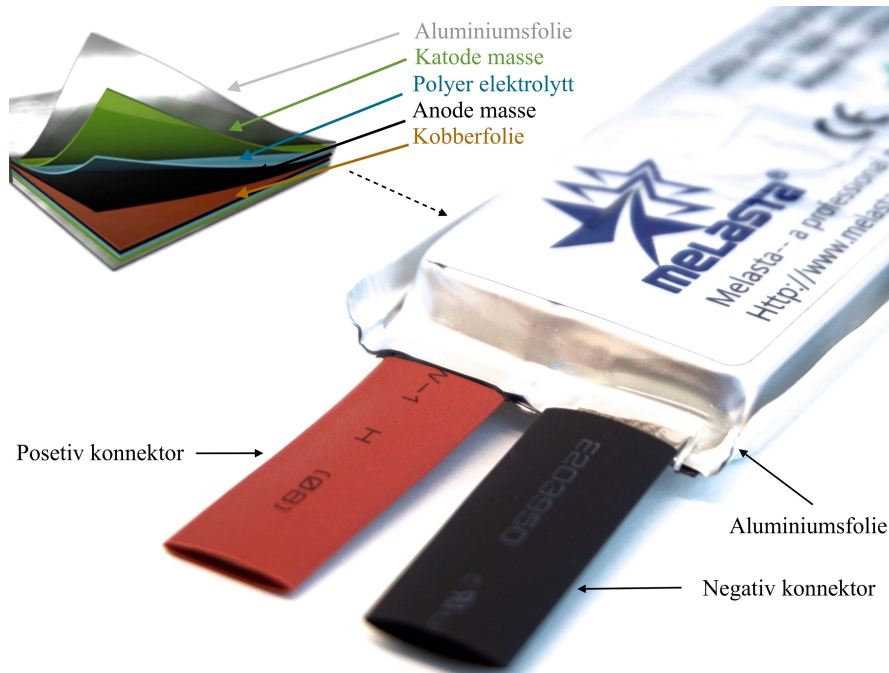


som i en fullstendig reaksjon vil bli:



Battericellen som er brukt i denne masteroppgaven er illustrert i Figur 2-2. Dette er en LCO polymer- battericelle som har en elektrolytt som er en polymer. Måten cellen er bygd opp på vises i figuren der aluminiumsfolie (strømsamler på katode), katode, elektrolytt, anode og kobber folie (strømsamler på anode) ligger lag på lag der de er koblet i en parallell. Det er en positiv og en negativ konnektor som er kontaktpunktene mellom alle de positive og negative

lagene i cellen. Ytterst er cellen dekket med en tynn pose av aluminium for å beskytte den mot støt og slag, derav navnet *pouch cell*.



Figur 2-2 Bilde av hvordan LCO cellen fra Melasta ser ut og en illustrasjon over hvordan cellen er bygd opp innvendig.

2.2 Kapasitet og C-rate

Kapasitet et veldig vesentlig begrep når det er snakk om batterier, og det sier noe om hvor mye energi det er lagret i dette tilfellet en battericelle. Enheter for kapasitans er amperetimer (Ah) som er utladningstid multiplisert med strømmen. Dette kan også oppgis i coulomb, som er SI enheten for elektrisk ladning. Dette kan finnes ved å integrerer strøm over en gitt tid [8], som vist i Formel 2-2.

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I dt \quad \text{Formel 2-2}$$

der I er strømmen i det gitte område, Q er elektrisk ladning på et overflatevolum, t_1 og t_2 er start og sluttid av målingen.

Ved opp og utladning av batterier er C eller C-rate et begrep som er vanlig å bruke. Dette er forholdet mellom den nominelle kapasiteten i batteriet og den gitte strømmen. Dette er definert som:

$$C = \frac{I}{Q_{rate}} [h^{-1}] \quad \text{Formel 2-3}$$

Der I er strøm og Q_{rate} er den målte kapasiteten til batteriet. Enheten for C-rate er som vist h^{-1} . I denne masteroppgaven brukes det et batteri som har en kapasitet på 6.55Ah med en maksimalt anbefalte C-rate på 10C som da vil tilsvare:

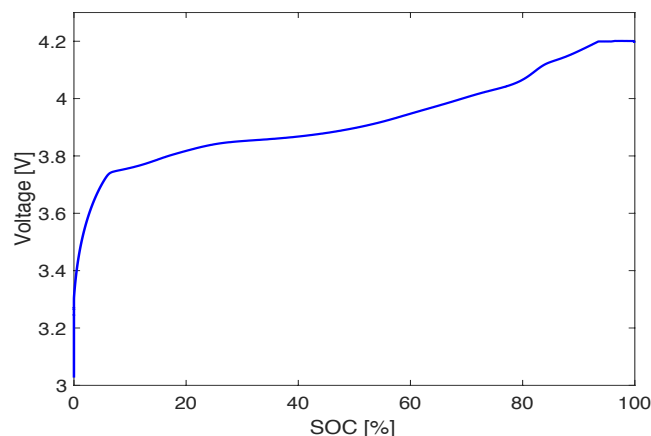
$$I = C \times Q_{rate} = 10h^{-1} \times 6.55Ah = 65.5A$$

2.3 State of charge og State of health

State of charge (SOC) sier noe om forholdet mellom kapasitet i nåtid ($Q(t)$) sammenlignet med den nominelle kapasiteten (Q_n) til battericellen. Dette er da definert som:

$$SOC(t) = \frac{Q(t)}{Q_n} \quad \text{Formel 2-4}$$

En typisk spenningskurve for ladning fra 0-100% SOC er vist i Figur 2-3. Det som er typisk for en slik kurve er den raske økningen i starten og mot slutten. Dette gjør det vanskelig å estimere ved særlig lav SOC hvor mye kapasitet du faktisk har igjen i batteriet ved kun å observere spenningen, særlig ved lav SOC [9].



Figur 2-3 Ladning ved 2C av en Melasta LCO battericelle fra 0-100% SOC målt i spenning [V] fra test gjort i kapittel 4.

Som nevnt over er det området mellom 10% SOC og 90% SOC som er lett å måle siden dette har en tilnærmet lineær økning i spenning sammenlignet med SOC. Dette gjør at rundt 20% SOC og nedover er det ofte usikre data pga. det store fallet det er i spenningen. Ved testing av battericeller blir dette tatt hensyn til ved at man oppretter sikkerhetsmarginer ved minimum spenning i en battericelle som er på 3.0V. Da kan det være vanlig å sette en nedre grense på 3.1V eller lignende alt ettersom hvor nøyaktig måleutstyret er. Forholdet mellom åpen krets spenning (V_{OC}) og SOC kan blir representert som:

$$V_{OC}(t) = a_1 \times SOC(t) + a_0$$

Der $SOC(t)$ er SOC ved tiden t , a_0 er batteriets spenning når $SOC = 0\%$, og a_1 finnes ved å vite verdien av a_0 og $V_{OC}(t)$ ved $SOC = 100\%$. Denne metoden er det vi kalles "Open Circuit Voltage Methode" [10]. Denne formelen er brukt for å regne ut % SOC fra OCV i Figur 2-3. Ut i fra ligningen og figuren ser man at SOC kurven kan oppføre seg som en tilnærmet linjer funksjon i enkelte områder.

State of health (SOH) beskriver batteriets evne til å lagre energi. Denne verdien vil etterhvert som man bruker batteriet synke. Ladding og utladning av batteriet vil slite på batteriets evne til å lagre energi. SOH er en fin å oppgi tilstanden til batteriet er. Det sier noe om hvordan bruken av batteriet påvirker levetiden og det forteller også hvor mye kapasitet det har nå sammenlignet når det var helt nytt. Når SOH skal bli beregnet er det viktig at de samme forutsetningen er der, ettersom hvis f.eks. temperaturen blir forandret vil dette slå ut på målingene. Formelen for SOH er gitt ved:

$$SOH(t) = \frac{Q_{max}(t) - \rho(Q_{rated})}{Q_{rated} - \rho(Q_{rated})}$$

Der $Q_{max}(t) = Q_{rated}$ for $t=0$. Q_{max} vil på grunn av aldring bli mindre og mindre og har ikke mulighet for å øke ettersom tiden øker. ρ representere degraderingsfaktoren. Dette vil si hvor mye batteriet har tapt seg i prosent. Har batteriet tapt seg med 80% er $\rho = 0.8$. Er batteriet helt nytt vil denne da være tilnærmet $\rho \approx 1$ [11].

2.4 Degradasjon og levetid

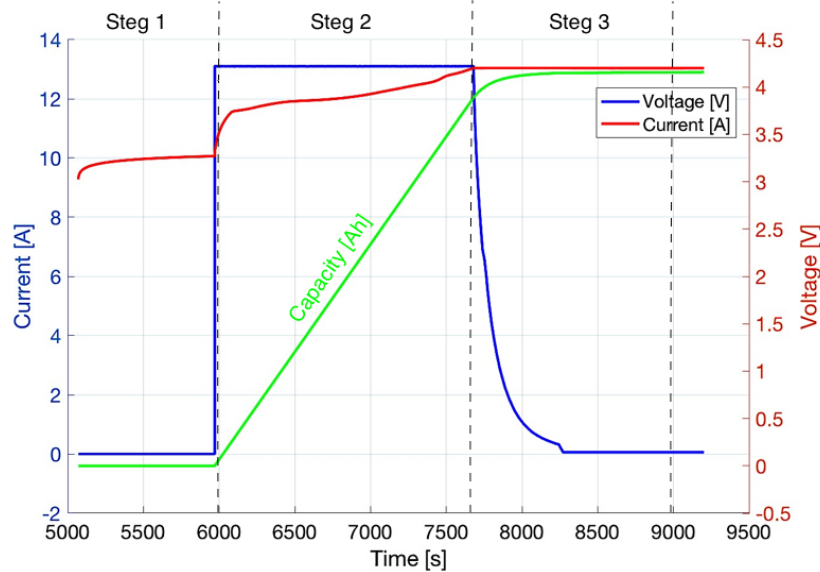
Igjennom en levetid til et batteri vil ytelsen til et batteri stadig redusert og det er dette en kaller degradering av battericeller. Kapasiteten i battericellen blir stadig mindre ettersom batteriet går igjennom nye ladde sykluser. I en høyeffekt battericelle vil degradering skyldes effekttap om blir forårsaket av impedansøking i cella. I en høyenergi battericelle vil degradering føre til reduksjon i kapasiteten [12].

Degradering av batterier kan deles inn i to kategorier, *cycle fading* og *calender fading*. Cycle fading er degraderingsmekanismer som skjer når en celle blir brukt. Calender fading er degraderingen som skjer når en celle blir lagret og ikke brukt [8]. Det er mange faktorer som kan påvirke degradering av en battericelle, men de viktigste er:

- Lade- og utladningsstrøm
- Temperatur
- Depth of discharge (DOD)

2.5 Ladestrategier

Det er forskjellige ladestrategier for å lade litium-ion batterier ved testing. Det kommer an på hva man ønsker å undersøke. De tre mest vanlige er konstant effekt-konstant spenning (CP-CV), multisteg konstant strøm-konstant spenning (MCC-CV) og konstant strøm-konstant spenning (CC-CV) [10]. CC-CV er den mest vanlige metoden å bruke og det er også den som er brukt i denne masteroppgaven. Denne metoden deles ofte inn i tre steg som er vist i Figur 2-4. Steg 1 er brukt hvis battericellen har droppet til under 3.0V, noe som ikke er ønskelig og er en standard for litium-ion batterier [13]. I steg 1 er maks ladning av batteriet på 0.1C. Steg 2 er strømmen konstant hele veien som en ser i Figur 2-4. Her er det vanlig å ha en C-rate mellom 0.2C-0.1C, som varer helt til en nærmer seg maksimal anbefalte spenning på et litium-ion batteri som er på 4.2V. I denne masteroppgaven skjer denne ladningen ved 2C noe som er mye høyere enn normalt. Dette blir gjort for å spare tid når testene blir kjørt. Resultatet av dette er mer degradering av cellen, men siden dette er testceller blir ikke degradering tatt hensyn til. Det vil heller ikke være nok sykluser til at en degradering slår ut i resultatene fra testingen. I steg 3 har spenninga nådd øver grense og den blir da holdt konstant. Fra dette punktet reduseres strømmen sakte noe som kalles *saturation charging*. Hvis strømmen bare hadde blitt stoppet når spenningen kom på 4.2V ville aldri cella få så høy kapasitet som mulig. Derfor fortsettes strømkilden å levere en veldig lav strøm en periode til. I denne masteroppgaven er den på C/20.



Figur 2-4 Viser strøm, spenning og kapasitet for en CC-CV lading av Melasta LCO celle ved 2C fra 0-100% SOC med saturation charging på C/20 gjort på en enkeltcelle.

2.6 Indre motstand

Indre motstand i en litium-ion celle er ohmsk motstand som er avhengig av SOC og temperaturen i battericella. Batterier med lavere indre motstand enn et tilsvarende med høyere indre motstand vil kunne levere mer strøm. Dette enkelt forklartes ut fra Ohms lov $V = RI$. Når en battericelle er under en last vil celle spenningen bli uttrykt som:

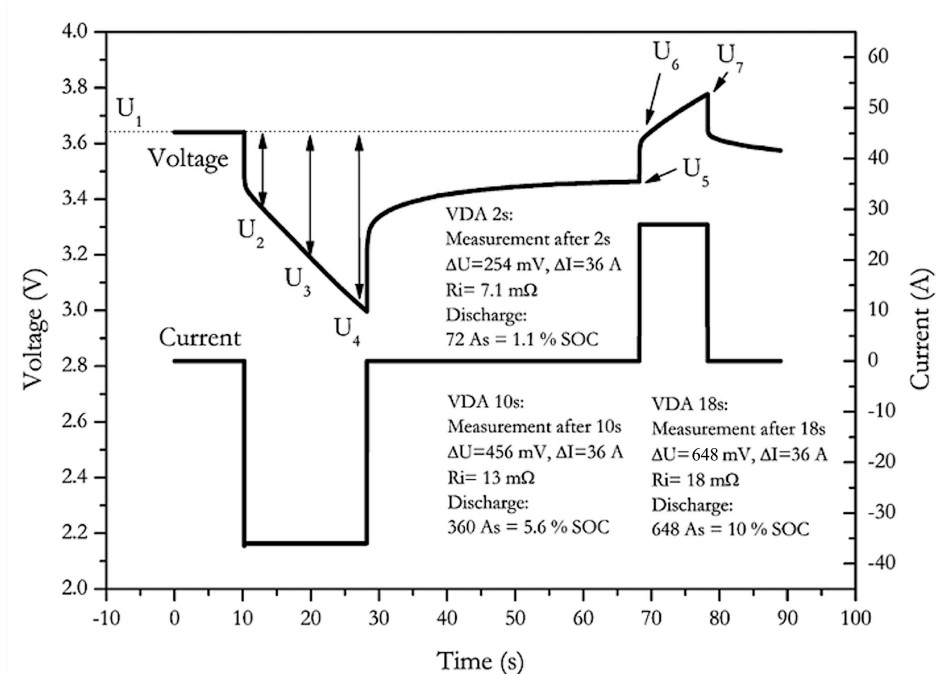
$$V_{cell} = V_{OC} - IR_i - \eta_{diff} - \eta_{ch,tr} \quad \text{Formel 2-7}$$

Der V_{cell} er celle spenningen, V_{OC} er OCV til cellen, I er last strømmen, R_i er indre motstand av cella, η_{diff} er overspenning skyldes polarisering og $\eta_{ch,tr}$ som er overspenning skyldes overførings polarisering [14]. Indre motstand er en sammensetting av motstand i materialene til anode, katode, strømsamlere og elektrolytten [15]. Indre motstand påvirkes ytterligere av materielle kontaktflater og hvordan dimensjonen og tykkelsen på disse er, som f.eks. mellom aktive material av en anode og strømsamlere i battericella. Når en skal finne den indre motstanden kan en bruke forholdet mellom spenning og strøm gitt av to punkt i en utladningskurve. Dette gir:

$$R_i = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} \quad \text{Formel 2-8}$$

Der V_1 og V_2 er spenninger i forskjellige tidspunkt og det samme for I_2 og I_1 . Det er forskjellige metoder for hvordan man kan måle indre motstand. I [15] så blir det konkludert med at en *current step method* er en bra metode vist spenning er målt innen 100ms etter en

strøm puls har oppstått. Hvis dette ikke er tilfelle vil den indre motstanden bli påvirket forandringen i lading eller utlading. Denne metoden er vist i Figur 2-5, der en kan se etter $t = 10s$ at det skjer en utlading. Dette fører umiddelbart til spenningsfall som videre vil føre til lavere SOC.



Figur 2-5 Eksempel på en current step respons. Fra [15].

I Figur 2-5 kommer det en forandring i strøm etter $t = 10s$. Dette gjør at en får en ΔI og en ΔV verdi som en videre kan bruke til å regne ut R_i med. Ut fra Figur 2-5 ser en at motstanden i battericellen ikke er entydig. Den variere her med hvilken SOC cellen befinner seg i. Ved at cellen er ladet ut fra 3.648V til 3.00V gir dette en indre motstand på:

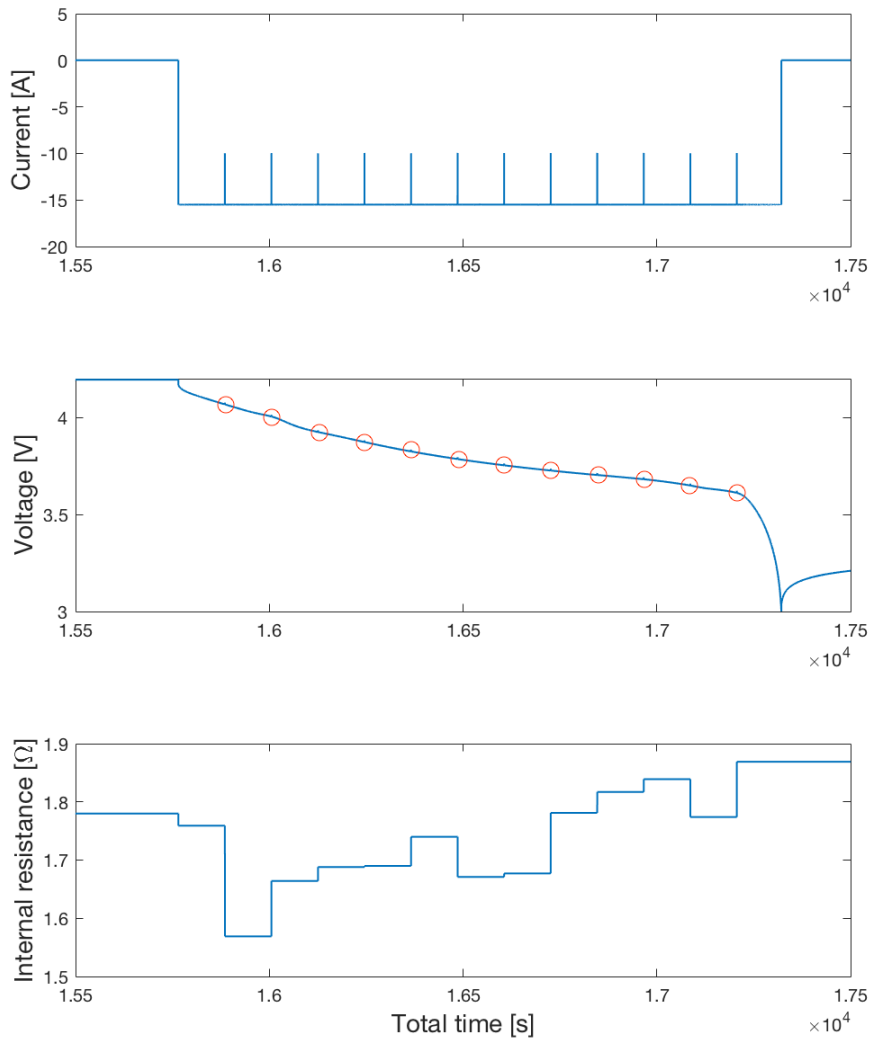
$$VDA\ 18s = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{648mV}{36A} = 18m\Omega$$

sammenlignet med utladningen fra 3.648V til 3.192V gir en indre motstand på:

$$VDA\ 10s = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{456mV}{36A} = 13m\Omega$$

Igjennom denne masteroppgaven blir denne metoden brukt for å måle indre motstand. For å kunne få bra og nøyaktige målinger og i tillegg ta hensyn til variasjon i SOC må en derfor kjøre jevne pulser når en har store utladninger eller lading av litium-ion celle. I Figur 2-6 er det vist en utlading av en Melasta celle fra 100-0% SOC ved 2C. For å kunne måle indre motstand i forskjellige SOC blir det derfor laget små pulser hver 2.5 minutt. Dette gjør at man får en helt lokal ΔV og ΔI verdi. Dette er nødvendig siden en 2C utlading varer over lang tid.

Da ville en ikke fått den indre motstanden som tilsvarte den gitte SOC. I Figur 2-6 er det mulig å se små topper på spenningen der strømmen har sine pulser.

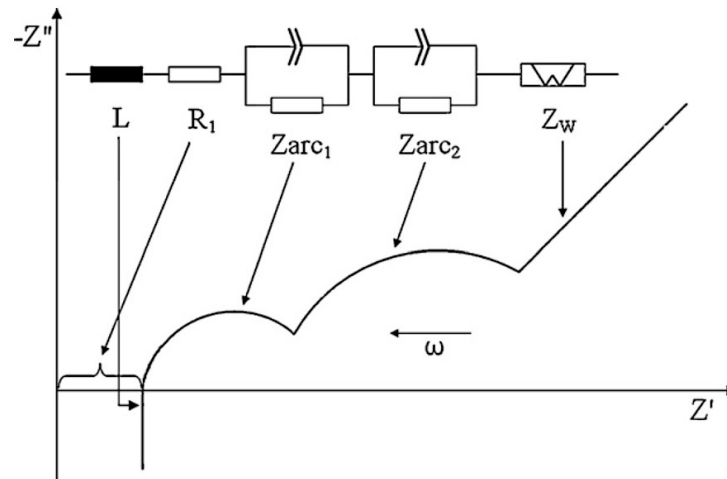


Figur 2-6 Eksempel på 2C utladning på en Melasta celle der current step respons er blitt brukt for måling av indre motstand. Der kurven til indre motstand, spenning og strøm er vist. De små spenningsprangene ΔU har røde sirkler rundt seg. Fra [4].

2.7 Elektrokjemisk impedans spektroskopi

Elektrokjemisk impedansen spektroskopi (EIS) også kalt AC impedans spektroskopi, er en metode som brukes for å måle impedansen til en battericelle. Små amplituder av AC-signal sendes inn i battericellen. Denne forstyrrelsen kan gi detaljert informasjon om cellen, som hvor det har oppstått korrosjon, levetid og indre motstand og andre ting som fører til økt impedans i battericellen [16]. Et batteri kan bli uttrykket ved en ekvivalent krets (EC) der forskjellige komponenter skal representere forskjellige deler av batteriet. Det er mange måter å gjøre dette på men noe er mer nøyaktig for noen type studier enn andre [17]. Et eksempel på

hvordan en battericelle kan bli representert i en EC er vist i Figur 2-7, der det også er vist hvordan de forskjellige komponentene i EC påvirker en EIS kurve for imaginer og reell impedans.



Figur 2-7 Ideell impedans spektroskopi for en litium-ion celle og en EC med Zarc og Warburg element [17].

Den totale impedansen i EC kan bli uttrykket som:

$$Z_{tot} = j\omega L + R_1 + Zarc_1 + Zarc_2 + Z_w \quad \text{Formel 2-9}$$

der

$$Zarc = \frac{1}{1/R + j\omega C}$$

$$Z_w = \frac{\tanh(\sqrt{j\omega C})}{\sqrt{j\omega C}}$$

hvor R_1 er bulkresistansen til battericellen, som skal reflektere motstanden i elektrolytt, separator og elektroder (indre motstand). $Zarc_1$ er motstanden og kapasitansen i overflaten av de to elektrodene som gir utslag som en halvsirkel ved høy frekvenser. $Zarc_2$ er lade overføringsmotstand og dens *double-layer capacitance*, som vil gi utslag med en halvsirkel ved medium frekvenser. Z_w er kalt Warburg impedansen og representere effekten av diffusjon (stoffes egentransport) av litium-ioner på elektrode-elektrolytt grensesjikt som vil vise seg som en *hale* ved lave frekvenser når en plotter imaginer og den reelle impedansen i en graf. Vinkelen på denne halen vil beskrive hvilken type diffusjon en har [18].

Når en skal lese av resultater fra en EIS måling er det vanlig å plote den imaginære delen versus den reelle delen av impedansen [19]. Da får en den karakteristiske kurven som er vist i Figur 2-7, hvor økt reell akse er x-akse og imaginær akse er y-aksen imens verdien av $\omega =$

$2\pi f$ øker fra høyre og mot venstre langs grafen. Utrykket for den reelle og den imaginære delen kan finnes som vist i Formel 2-10.

$$\operatorname{Re}(Z) = Z' = |Z| \cos(\theta) \text{ og } \operatorname{Im}(Z) = Z'' = |Z| \sin(\theta) \quad \text{Formel 2-10}$$

der $\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Z''}{Z'}\right)$ som er fasevinkelen.

2.8 Varmeutvikling og varmeoverføring

2.8.1 Varmeutvikling

Som nevnt tidligere blir det i denne masteroppgaven testet usedvanlige høye strømmer på battericeller. Dette gjør at varmeutvikling er nok er den største utfordring i dette tilfellet. Varmedeutvikling er i hovedsak uønsket på grunn av sikkerhet i forhold til eksplosjonsfare. Blir temperaturen over 80°C i en battericelle sier man at det er en fare for *thermal runaway* som i verste fall kan føre til en eksplosjon [20].

Når en skal se på varmeutviklingen i en battericelle er det naturlig å ta utgangspunkt i den termodynamiske ligningen for et batteri der temperatur og trykk holdes konstant. Denne kan bli beskrevet som:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \text{Formel 2-11}$$

hvor ΔG er elektrisk arbeid (Jmol^{-1}), ΔH er entalpi forandringen (Jmol^{-1}), ΔS er forandring i entropi ($\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$) og T er Temperatur (K). Videre kan en da uttrykke (Q_s), varmen fra entropi forandring som [21]:

$$Q_s = T_{cell} \Delta S \frac{I}{nF} \quad \text{Formel 2-12}$$

Der dette kan viere skrives om til:

$$\Delta S = \frac{\partial \Delta G}{\partial T_{cell}} = nF \frac{\partial E_{emf}}{\partial T_{cell}} \quad \text{Formel 2-13}$$

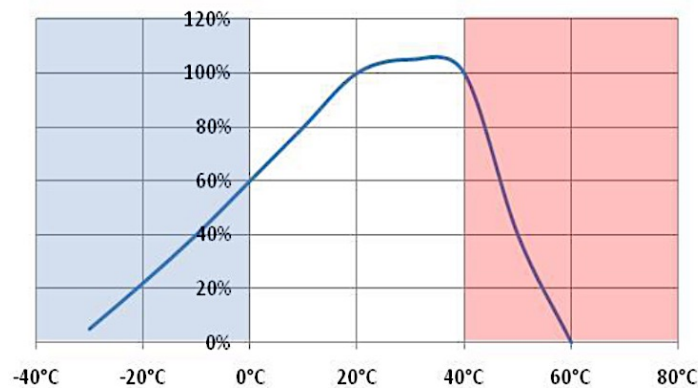
hvor I er strømmen per overflateareal (A cm^{-2}), T_{cell} er temperatur i battericella (K), F er *Faradays konstant* (96485C/mol), n er antallet elektroner per reaksjon ($n=1$ for litium-ion batteri) og E_{emf} er cellepotensial for OCV (V). Reaksjons retning er avhengig av om battericellen laddes opp eller ut. Q_s blir en endoterm (absorberer energi) reaksjon for ladning av battericellen mens den blir en eksoterm (frigir energi) reaksjon for utladning som medfører at Q_s er en såkalt reversibel prosess [22]. Når en strøm strømmer igjennom en battericelle vil det være et tap mellom påsatt spenning (U) og OCV (U_{OCV}). Dette tapet skyldes polarisering

og er en irreversibel prosess på grunn av at denne prosessen er eksoterm uansett retning på strømmen [21]. Utrykket for energitapet ved polarisering Q_P er:

$$Q_P = I(U - U_{OCV}) = I^2 R_i \quad \text{Formel 2-14}$$

hvor R_i er indre motstand (Ω) i battericella. Fra Formel 2-14 ser en at hvis en har en gitt motstand og strømmen øker med en faktor på to vil energitapet i form av varme øke med det firedoblede, noe som er en god forklaring til hvorfor varmeproblematikk ved høy strøm er et faktum.

Det er ikke bare eksplosjonsfare og *thermal runaway* som kan være en konsekvens av varmeutviklingen i en battericelle. Det viser seg også at virkningsgraden variere etter hvilken temperatur en celle har. I Figur 2-8 kommer det tydelig fram at mellom 20°C og 40°C har battericellen den desiderte beste virkningsgraden. Dette grunnet at i dette området så har battericellen en lavere indre motstand en ved lavere temperaturer fra 20°C og nedover [23]. Høye temperaturer fra 40°C og oppover er indre motstand liten i battericella men og varmespredningen vil øke i battericella som videre vil gi enda høyere temperaturer. Med mindre varmen blir spred vekk i et slikt tilfelle vil det til slutt skje en thermal runaway i et [24]. Det viser hvor viktig det er å ha temperaturregulering i en batteripakke for at cellen skal kunne arbeide i det ideelle området. Ytelsen på batteripakken kan og være noe som kan påvirkes om en får pakken til å ha en ideell temperatur hele tiden.



Figur 2-8 Virkningsgraden for en litium-ion celle i % i forhold til temperatur. Fra [24]

2.9 Varmeoverføring

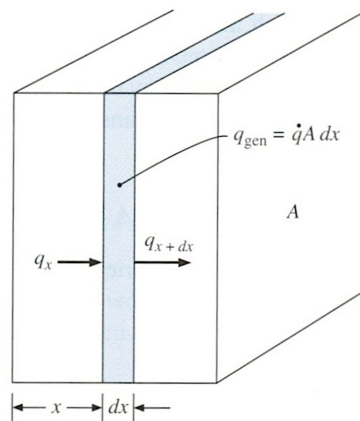
Varmeutvikling er energioverføring som skjer mellom materielle legemer grunnet en temperaturforskjell. Det er forskjellige måter varmeenergi kan overføres, men også hvordan den brer seg. Det er i hovedsak tre forskjellige varmeoverføringer:

- Ledeevne
- Konveksjon
- Stråling

2.9.1 Ledeevne (konduktivitet)

Når en har to områder med forskjellige temperaturer vil energi fra siden med høy temperatur overføres til siden med lav temperatur. En kan si at energi er overført ved hjelp av varmeledningsevne. I en batteripakke er dette et viktig tema med tanke på at batteripakken er en samling av mange celler som står helt inntil hverandre der hver enkelt celle genererer varme. Da vil varmeledningsevnen ha mye å si for hvordan temperaturen inne i en modul vil være. Ligningen for varmeledningsevne kan uttrykkes matematisk ved Fourier's lov:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Formel 2-15}$$



Figur 2-9 Figuren som illustrerer utbredelse av en dimensjonal varmelednings evne. Fra [25]

hvor q_x er varmeoverføringsrate (W/ (m K)), k er varme konduktivitet for materialet, A er arealet og ∂x er elementet's tykkelse som vist i Figur 2-9. Hvis systemet ikke forandre temperatur med tid er det bare å integrere Formel 2-15. Hvis det er en temperaturforandring blir ligningen litt mer komplisert. I x-rettingen vil uttrykket bli [26]:

$$\begin{aligned} & \text{Energi konduktivitet i venster side} + \text{varme generering i elementet} \\ & = \text{franding i gitt energi} + \text{energi ledet over til høyre side} \end{aligned}$$

Mekanisk ligning for dette blir:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}A dx \frac{\partial T}{\partial t} dx - kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big]_{x+dx}$$

For en endimensjonal og en konstant varmeledning (k) kan ligningen bli forenklet til:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Formel 2-16}$$

der ρ er massetettheten og c er spesifikk varme av et materiale.

Tabell 1 Termisk konduktivitet k for materialer ved 0°C in $\text{W}/(\text{m K})$ [25].

Aluminium	202
Kobber	385
Vann	0.556
Luft	0.024

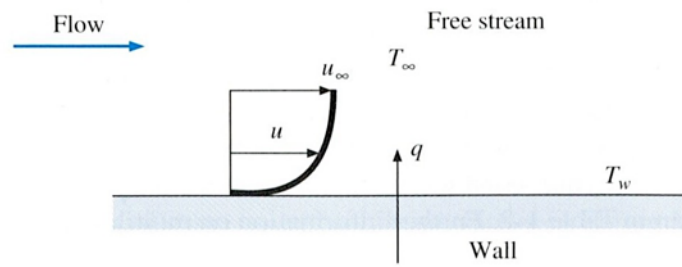
I Tabell 1 finner man en oversikt over termisk konduktivitet k for relevante materialer i denne masteroppgaven.

2.9.2 Konveksjon

Hvis en har en varm overfalte og setter en vifte foran er en kjenner med at varmen vil transporteres vekk. Dette er konveksjonsprosessen for varmeoverføring. Hvis en ser for seg en overfalte som vist i Figur 2-10 er temperaturen på denne gitt ved T_w , mens temperaturen på fluidet som strømmer forbi i en gitt hastighet er T_∞ . På grunn av viskositet på platen vil hastigheten der være lik null ved platen. Hvor godt varmeoverføringen vil skje kommer an på hvor mye bevegelse det er i den frie vinden, noe som vil slå ut på hva temperaturen på T_∞ vil være etter en gitt tid. Står fluidet stille vil temperaturen T_w gå mot T_∞ Ligningen for konveksjon heter Newton's lov for kjøling og er som følger:

$$q = hA(T_w - T_\infty) \quad \text{Formel 2-17}$$

hvor varmeoverføringsraten er q , relatert til varme differensen mellom overflate, fluid og overflateareal A . h er kalles konveksjon konstanten [26].



Figur 2-10 Konveksjon varmetransport for en overflate. Fra [25]

2.9.3 Stråling

I motsetning til konveksjon og konduktivitet der varmeoverføring skjer gjennom stoffer er stråling en varmeoverføring som kan skje i et ideelt vakuum ved hjelp av elektromagnetisk stråling. Termodynamikken viser at ideell termisk stråling vil frigi energi proporsjonalt med temperaturen T i fjerde potens multiplisert med arealet A og $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ er Stefan-Boltzmann konstanten [26]. Ligningen for varmestråling blir kalles Stefan-Boltzmann lov for termisk stråling og kan uttrykkes ved:

$$q_{emitted} = \sigma AT^4 \quad \text{Formel 2-18}$$

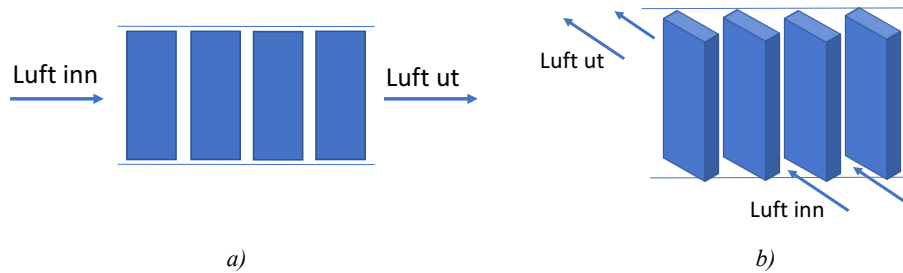
2.10 Kjølemetoder

Siden denne masteroppgave ser på batterier for en racerbil som kjører konkurranser om sommeren og den har veldig høye strømmer i batteripakken, er det høye temperaturer som er den store utfordringen. Som vist i 2.6 er det ønskelig å la battericellene jobbe i området under 40°C , både på grunn av sikkerhet men også på grunn av virkningsgraden til battericellene. For å få til nettopp dette er det da nødvendig med et kjølesystem.

2.10.1 Luftkjøling

Luftkjøling bruker luft som et termisk medium til å transportere vekk varme fra en batteripakke. Fordelen med luftkjøling er at kjølemediet ikke tilfører noe ekstra, ettersom det allerede finnes rundt batteripakken [27]. Dette gjør at det eneste som trengs i et slikt system er noe som får luften til å bevege seg slik det blir en utskifting av luften, som en vifte eller lignende. Ved luftkjøling av batterimodulen i denne masteroppgaven vil det bli sett på to alternativer for kjøling: Serie- og parallellkjøling som er vist i Figur 2-11. Forskjellen på disse to er hvordan luften besverger seg gjennom modulen. Som vist på figuren så er seriekjøling når

Luften treffer første cellene og går langs modulen til andre enden. Parallell kjøling da kommer luften fra siden og beveger seg i mellom hver celle.



Figur 2-11 Illustrasjon over hvordan luften kan strømme gjennom en samling av celler som skal forestille en batterimodul. a) illustrerer seriekjøling sett ovenfra og b) er parallellkjøling sett fra siden

2.10.2 Materialer

Kjøling ved bruk av material har i denne masteroppgaven blitt gjort ved at det har blitt laget en enkel kjølerigg der materialet er i direkte kontakt med battericellene. Materialets konduktivitet og varmekapasitet er to ting som er viktig for valg av det passende materialet. Som vist Tabell 1 så har aluminium lavere konduktivitet en f.eks. kobber. I motsetning så er aluminium mye lettere enn kobber, som er en viktig faktor i en racerbil. Tabell 2 viser et utdrag av material og varmekapasiteten som gitt i (J/gK). Tabellen viser at på grunn av at aluminium er så mye lettere enn kobber vil dette være da et mer naturlig valg som material til bruk i kjølerigger.

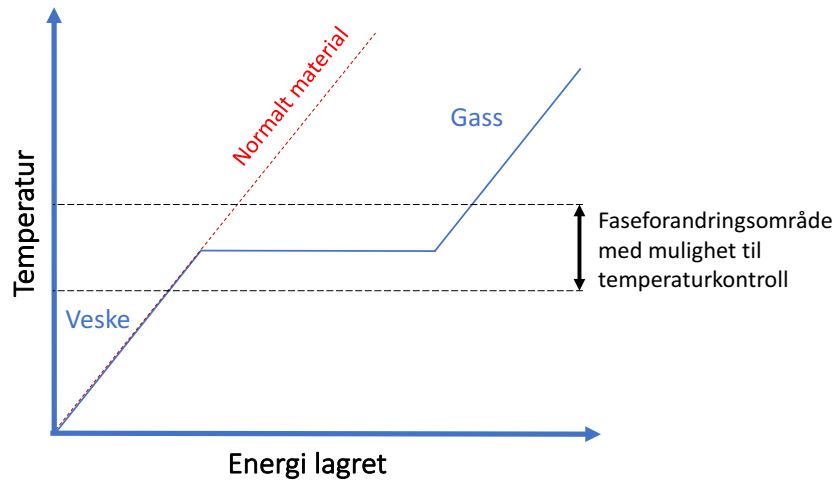
Tabell 2 Oversikt over aktuelle materialer med oppgitt varmekapasitet i (J/gK). Fra [28].

Materialer	Varmekapasitet (Cp)
Vann	4.1813
Luft	1.012
Aluminium	0.897
Kobber	0.385

2.10.3 Phase-change material

Phase-change material (PCM) er materialer som kan både være fast, flytende og i gassform. Vann er en slik type material. Disse materialene er i dag brukt mange plasser i industrien i varme- og kuldeprosesser, særlig som en buffer for å regulere temperaturen i hus ved energilagring [29]. I områdene rundt faseforandringen til et PCM har de en egenskap til å kunne absorbere store mengder energi uten at temperaturen i materialet stiger. Dette på grunn

av at energien blir brukt til å forandre fasen på materialet isteden for å øke temperaturen på det [30].

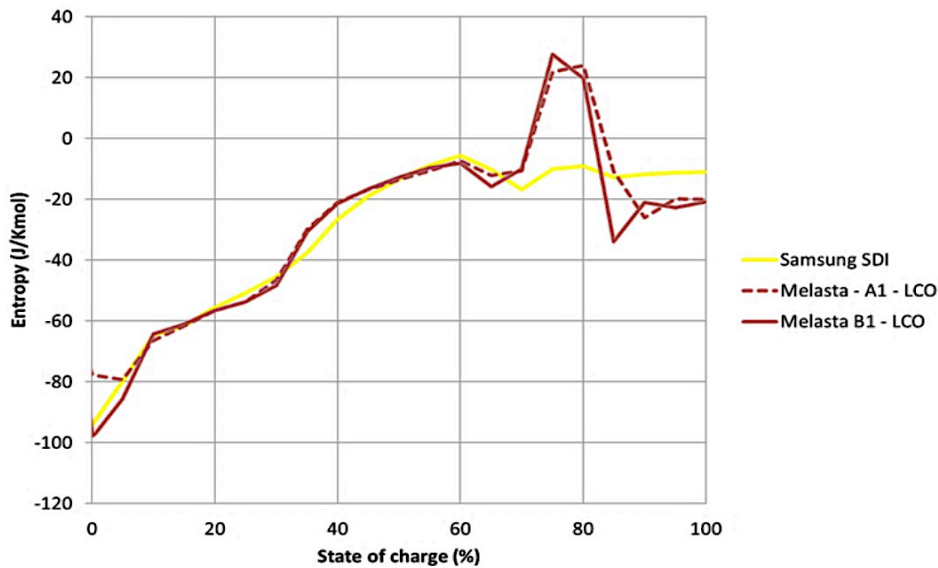


Figur 2-12 Eksempel på hvordan en PCM-kurve for temperatur og energilagring kan se ut.

I denne masteroppgaven blir dette brukt til å kjøle ned et batteri når temperaturen blir for høy. *3M Novec 7100* som væsken heter har et kokepunkt på 60°C . Målet med denne væsken er da at når batteriet nærmer seg kokepunktet til væsken skal all varmeenergi fra batteriet heller gå til å forandre fasen til væsken. Denne væsken er og ikke-ledende, dette vil da si at den kan være i direkte kontakt med en battericelle uten at det vil skje en kortslutning av battericellen. Dette gjør at den får en veldig stor kontaktflate med battericellen noe som vil være en stor fordel når det kommer til å kjøling.

2.10.4 Kjøling ved hjelp av entropi

Det er mulig å utnytte entropieffekten i et batteri for å kunne kjøle en battericelle. LCO er den cellypen som har størst varmeutvikling men også den cellen som har størst potensial for å ha en kjøleende effekt ved hjelp av entropi [22]. I [3] fra 2016 ble entropien til Melasta sine LCO-battericeller testet, de samme cellene som blir brukt i denne masteroppgaven.



Figur 2-13 Resultater fra entropianalyse utført av Preben Vie ved IFE, der tre forskjellige celler ble testet. Fra [3]

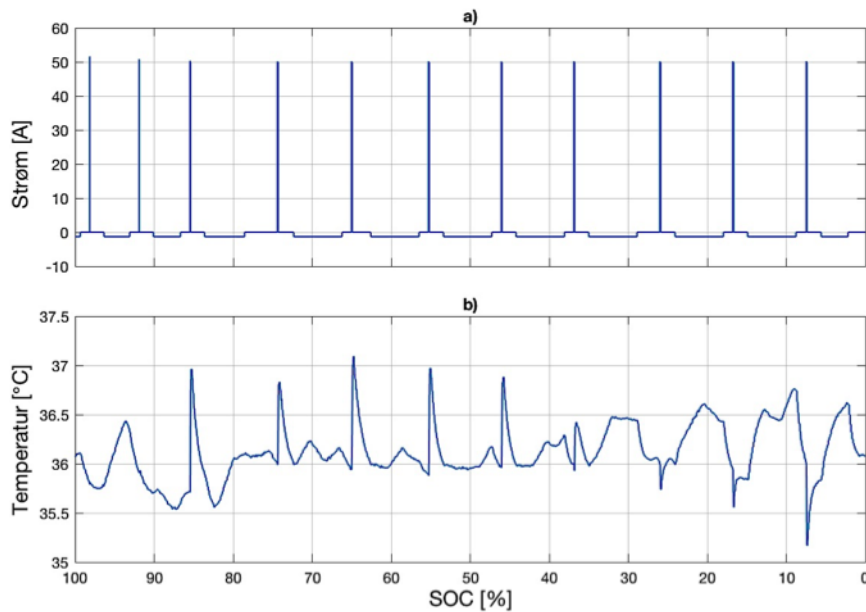
I Figur 2-13 blir entropien målt for de forskjellige verdier av SOC. Melasta-A1-LCO er den samme cella som blir brukt i denne masteroppgaven. Fra grafen ser man at det er mulig å ha et potensial for kjøleende effekt ved hjelp av entropi. Fra Formel 2-12 ser en sammenheng mellom entropiforandring, strøm, temperatur og Faraday's konstant. Denne varmeutviklingen er nevnt tidligere som en reversibel prosess, noe som betyr at den kan gå begge veier. Dette vil da si at det er mulig å kunne ikke bare utvikle varme, men også redusere varmen teoretisk i en battericelle. En må også ta hensyn til at varmeutviklingen fra polariseringen som er en irreversibel prosess også er med i den totale varmeutviklingen i battericella, der den totale varmeutviklingen er:

$$Q_{tot} = Q_p - Q_s = I^2 R_i - T_{cell} \Delta S \frac{I}{nF} \quad \text{Formel 2-19}$$

I denne masteroppgaven er strømmen i dette tilfellet definert som positiv ved utlading samt at Q_s er definert som positiv ved en kjøleende effekt. Det medfører at Q_s får et negativt fortegn i Formel 2-19. En oversikt over når Q_s har en kjøleende effekt på den totale varmen Q_{tot} som blir dannet ved påføring av strøm på en battericelle er presentert i Tabell 3.

Tabell 3 Oversikt over forholdet mellom strøm og entropi og når det har en kjøleeffekt.

	$\Delta S > 0$	$\Delta S < 0$
Positiv strøm (utlading)	Kjøling	Oppvarming
Negativ strøm (lading)	Oppvarming	Kjøling



Figur 2-14 Viser resultat av en utlading fra 100-0% SOC med 0.25C samt 50A pulser for hver 8% SOC synker med omgivelse temperatur på 36°C. a) Viser strømpulsene fra 100-0% SOC. b) viser hvordan temperaturen variere gjennom testen. Fra prosjektoppgave 2016 [4].

Resultatene fra Figur 2-14 kan forklares ved hjelp av å kombinere Tabell 3 og Figur 2-13. Ser en på den aller siste lade puls som kommer rett etter 10% SOC (8%) i Figur 2-14 ser en for temperaturen i b) at den har et dropp ned forbi 35.5°C. I dette området kan det se ut som det er en nedkjølede effekt ved hjelp av entropi. Dette kan da videre bli regnet ut ved hjelp av Formel 2-19. Strømmen er på -50A (ladning av battericellen), indre mostand på 2mΩ, 35.35°C (308.4K) og -80J/kmol (verdien Melasta-A1-LCO har i Figur 2-13 ved 8% SOC). Fra Formel 2-19 gir dette:

$$Q_p = I^2 R_i = 0.002 \times (-50)^2 = 5W$$

$$Q_s = T_{cell} \Delta S \frac{I}{nF} = 308.4 \times -80 \times \frac{-50}{1 \times 96485} = 12.79W$$

$$Q_{tot} = Q_p - Q_s = -7.79W$$

Utrengningen viser at på grunn av en negativ strøm og en høy negativ entropi vil en i et slikt tilfelle få et dominerende Q_s -ledd, som gjør at en får en negativ Q_{tot} noe som betyr at det ved 8% SOC vil det være en kjølede effekt slik som det også ser i Figur 2-14.

3 Testoppsett, måleinstrumenter og sikkerhet

I denne oppgaven har alle testene foregått på Institutt for energiteknikk der de har stilt med testutstyr for å teste battericeller som Revolve NTNU bruke i sin racerbil. Det er en type battericelle, en LCO pose celle som er testet og tre forskjellige typer måleinstrumenter er brukt i denne masteroppgaven. I dette kapittel blir det gått igjennom hvilken instrumenter som er brukt, en forklaring på oppsett av dem og hvor nøyaktig de er.

3.1 Måleinstrumenter

3.1.1 PEC model ACT0550

Batteritester PEC model ACT0550 er brukt til å måle alle tester som er teste med celler i serie og i parallell utenom testene som er gjort med elektrokjemisk impedans spektroskopi. Denne har mulighet til å måle det meste av nyttig informasjon en kunne ønske fra testing av battericeller. Temperatursensorene som er brukt til å måle temperaturen på battericellene både for dette måleinstrumentet men og måleinstrumentet for EIS testing er PT-100 F22020 fra Omega. En oversikt over nøyaktighet og målområdet på PEC model ACT0550 er vist i Tabell 4.



Figur 3-1 Bilde av batteritester PEC modell ATT0550.

Tabell 4 Spesifikasjoner av PEC model ACT0500 som er brukt ved testing av batteri ved IFE. Fra [4]

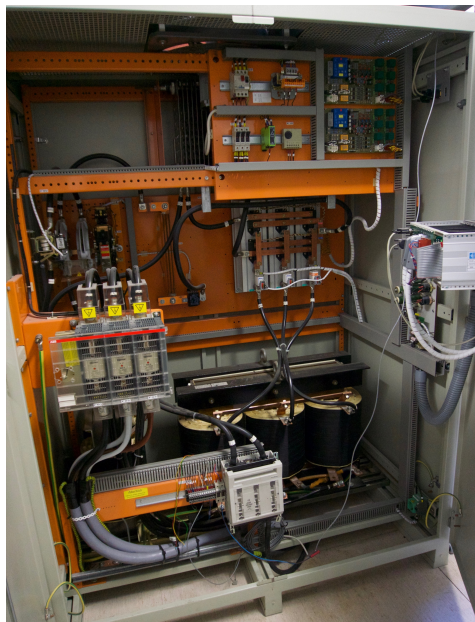
Configuration	1 to 80 channels
Voltage Range	0 to +5 V (dc)
Voltage Control accuracy	± 0.05 % FSD (Full scale deviation)
Voltage Measurement accuracy	± 0.005 % FSD
Input impedance	10 M Ω
Current Range	0 to 50 A
Current Control accuracy	± 0.03 % FSD in each range
Current Resolution	0.001 mA (range 50 mA), 0.01 mA (range 500mA), 0.1 mA (range 5A), 1mA (range 50A)
Capacity calculation	Accurate on-board calculation

3.1.2 Elektrokjemisk impedans spektroskopi måleinstrumentet

Databladet til måleinstrumentet som er brukt ved EIS målinger har det ikke blitt gitt tilgang på. Dette medfører at en ikke vet med % sikkerhet hvor målefeil det er på denne maskinen. Ut fra testene som er gjort er det ved dette måleinstrumentet kjørt strømpulser på ca 300mA. Dette er lave strømmer og en skulle da tenke seg at målefeilene burde være mindre en ved høyere påført strøm. Utstyret som er brukt til denne testingen er og av det nyere slag som nok teller positivt på %-feil som kan oppstå ved målinger. Sammenligner en denne måleinstrumentet med PEC model ACT0500, kan det nok antas at denne er vell så nøyaktig som den.

3.1.3 Modultest måleinstrumentet

Måleinstrumentet som er brukt for modultesting er en mye eldre maskin en de på andre som er brukt og heter Digatronen og er Tysk. Denne her har mekaniske brytere motsetning til de to andre, noe som påvirker nøyaktighet og arbeidshastigheten til dette måleinstrumentet. I Figur 3-2 er en at dette er en maskin som er flere ganger så stor om de to andre maskinene. Ut fra det de ansatte ved IFE har nevnt er at en må anta en måleusikkerhet på $\pm 1^{\circ}\text{C}$ på dette måleinstrumentet.



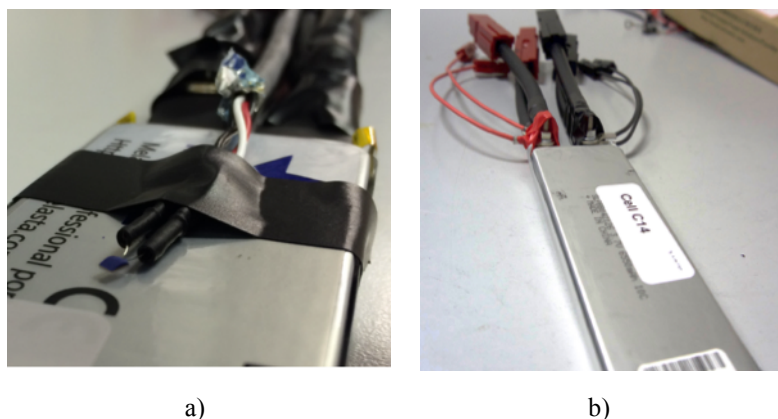
Figur 3-2 Bilde av hvordan modul tester ved IFE ser ut på innsiden.

3.2 Testoppsett

3.2.1 Battericellene

Battericellen som er brukt i denne masteroppgaven er illustrert i Figur 3-3. Dette er en LCO høy effekt pose celle som nevnt tidligere. Dette er en lett men sårbar celle på grunn av oppbyggingen av den, der posen rundt er kun tynn aluminium folie. Strøm konnektoren er på den positive siden aluminium og på den negative kobber. LCO celler er kjent for å ha god ytelse og kunne levere høy strøm, men på bekostningen av dette er varmeutviklingen de skaper [22]. I Tabell 5 presentertes den viktigste informasjon om battericella ut fra databladet til den. Med 10C og 6.55Ah er dette en celle som lett kan levere strømmer på 65A uten problem. Når en celle skal bli kobla opp til målingsinstrumentet blir en kabel festet i de to konnektorene i tillegg til spenningsmålere, som vist i Figur 3-3b, der røde kabler er kobla i pluss konnektoren mens svart er kobla i den negative konnektoren. Tilfellet vist i Figur 3-3b er det dobbelt opp med både strømkabel og spenningsmåler (den tynne kabelen). Dette på grunn av at denne battericellen skal påført mer en 50A, som er maksimal grense på en strømutgang på PEC modell ATT0550 som og er nevnt i Tabell 4.

For å måle temperaturen av battericellen blir en temperatursensor som er vist i Figur 3-3a festet på overflaten av battericellen med elektriker tape og beskyttelse for å ikke påvirke temperaturen. Dette er en Pt-100 temperatursensor som er produsert fra Omega.



Figur 3-3 Illustrasjon av en LCO battericelle fra Melasta. a) viser bilde av temperatursensoren som er brukt ved enkelt celle testing og to celler i parallell. b) Viser hvordan konnektorene og spenningsmålingene er koblet på.

Tabell 5 Spesifikasjoner om LCO battericelle fra Melasta. Mer detaljert datablad finnes i Appendiks A.

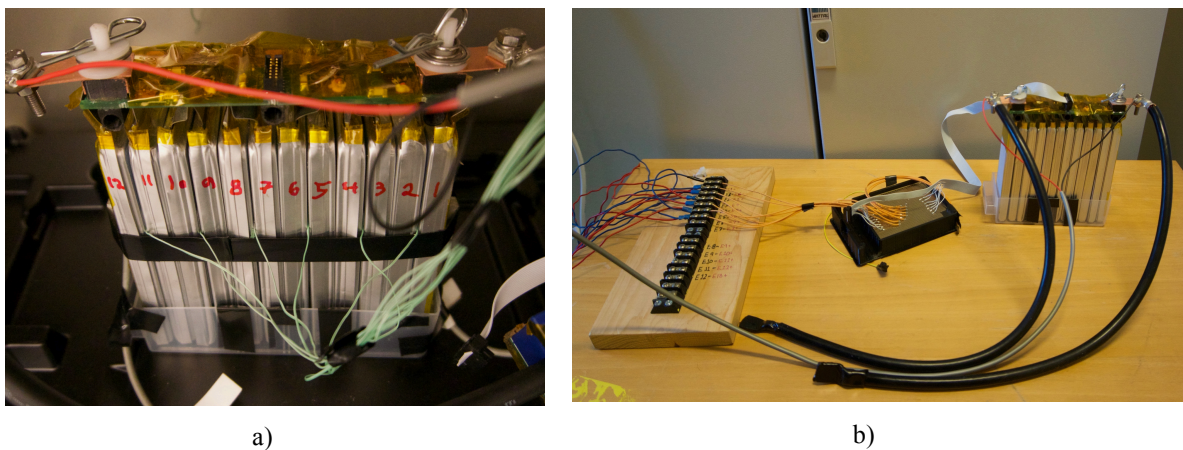
Typical Capacity	6.55 Ah	
Nominal Voltage	3.7V	
C-rate	10	
Internal Impedance	3.0 mΩ	
Pack charge current	26.2 < 1sec	
Peak discharge current	Max continues current	65.5A
	Peak current	98.25A
Cell Dimensions	Thickness	10.7mm
	Width	42mm
	Length	127.5mm
Weight	128.5g	

3.2.2 Batterimodul

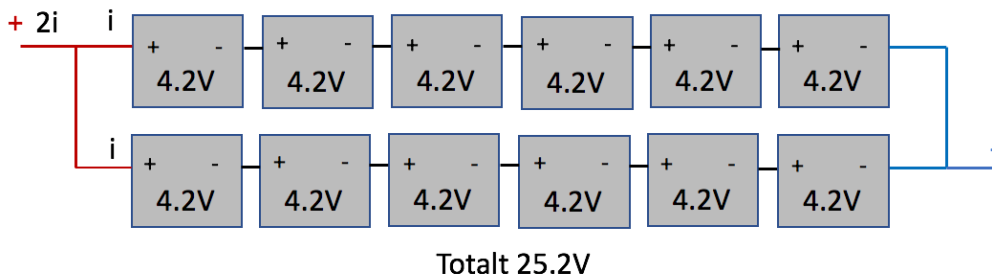
Batterimodulen som er teste i denne masteroppgaven består av tolv celler som er kobla opp i to strenger som er i parallell med seks celler i serie i hver av strengene. Dette gjør at modulen får en total spenning som er 6x spenningen til en enkeltcelle og strøm som er 2x strømmen til en enkeltcelle som illustrert i Figur 3-5. Denne modulen i en batteripakke bruker *slavekort* som er en del av Battery Management System (BMS) for å kunne ha kontroll på spenningen mellom hver cellepar når modulen gjennomfører en test. Et slit type slavekort koblet på ved testing for å kunne ha kontroll på alle spenningen. I Figur 3-4a) er det mulig å se en slik grønn plate (kretskortet), som er slavekortet. Figur 3-4b) viser hvordan spenningen fra slavekortet er tatt ut og splittet opp slik en kan måle hver enkelt cellepars spenning. Dette

gjøres for å ha en ekstra sikkerhet når tetningen pågår tilfellet et cellepar har mye lavere spenning en de andre.

Strømmen har sin positive pole på venstre side av modulen og sin negative siden på høyre side av modulen, med utgangspunkt i Figur 3-4a). Det er mange små grønne kabler som er tredd inn i midten av cella, som er temperatursensorer som måler temperaturen i hvert cellepar. Mellom cellepar 1 og 2 kan en merke seg at de og er en helt nede på cella for å kunne se temperaturdifferansen mellom nederst til midten på battericellen. På modulen er det to temperatursensorer helt ytterst på hver ende av modulen. De to er kobla direkte til måleinstrumentet og gir beskjed om batteriet får en for stor temperatur som gjør at testingen må stoppe pga. sikkerhetsmessige årsaker. Dette gjelder ikke for temperatursensorene som er inni modulen. De er bare koblet til en måler og ikke direkte til måleinstrumentet som gir strøm ved testing.



Figur 3-4 a) Illustrasjon ferdig oppkoblet modul inne i et varmekamera. Grønne kabler er temperatursensorer, stor svart er strømkabel som er vist i b), platen oppå måler spenning i hver celle, grå kabel på hver side er også temperaturmåler. b) viser hvordan en får ut spenning fra hvert cellepar.



Figur 3-5 Illustrasjon over hvordan modulen er koblet opp ved serie/parallellkobling.

3.3 Sikkerhet

Siden denne masteroppgaven handler om battericeller som skal bli brukt i Formula student konkurranse er det viktig at reglene som er i denne konkurransen blir følt opp og at testene er designet med hensyn til dette. Dette kan og være et godt tiltak som et sikkerhetstiltak på labb. For battericeller er det i hovedsak to regaler som er viktig å ta stilling til. Maksimal temperatur på venstre celle tab skal være 60°C og maksimal effekt ut av batteripakken må ikke over 80kW [31]. Reglene er satt for å unngå at batteriene skal kunne få en *thermal runaway* og en begrensende kraft ut av batteripakken. Blir noen av disse reglene overskredet har dette store konsekvenser for resultat i konkurranser og ikke minst sikkerheten for sjåføren som sikker i bilen. Gjennom testing ved IFE har alle tester hatt forskjellige restriksjoner for å sikre mot branner, eksplosjoner eller lignende. For modultestingen har restriksjonene vært spesielt strenge med tanke på at det er mange celle som er kobla sammen og det kan føre til store temperaturforskjeller i testobjektet.

I Tabell 6 er en oversikt over hvilke typer restriksjoner som er satt og for å holde seg innenfor reglementet til Formula Studen. Det er delt opp i restriksjoner som stopper hele testen og andre som går til neste steg. Måleinstrumentet for modultesting går steg for steg nedover i kommandolinjen, der noen av stega har grenser lagt inn. Hele testen har i tillegg overordnede grenser i tilfelle maskinen er litt treig eller måler feil. Dette er de restriksjonene som har konsekvensen at testen stopper. Grunnen til at modul testingen må ha slike er for at nøyaktigheten på denne maskinen er ikke så stor sammenlignet med testing av celler.

Tabell 6 Oversikt over begrensinger som er lagt inn når testing av modul blir gjennomført

KONSEKVENNS	BESKRIVELSE	RESTRIKSJONER
Neste steg i test	Cellespenning	4.2[V] < V eller V < 3.0[V]
	Modul spenning	25.2[V] < V eller V > 18.0[V]
	Temperatur på modul	T > 50.0[°C]
Stopp av test	Modul spenning	25.5[V] < V eller V < 17.5[V]
	Temperatur på modul	T > 60.0[°C]

For celledtestingen er det et litt annet og smartere system. Måleinstrumentet har et testprogram som operere forskjellige blokker der en har mulighet til å gå inn og ut av blokkene der hver blokk har sine lokale restriksjoner. En oversikt over grensene som er satt for celledtesting er vist i Tabell 7. Fra tabellen kan en se at grensen faktisk er forbi anbefalt grense for spenning

Kapittel 3. Testoppsett, måleinstrumenter og sikkerhet

som sier noe om nøyaktigheten på denne maskina side dette er greit, mens for temperatur er det 4°C å gå på i forhold til det som er anbefalte grenser [31]. Temperatur bruker lengre tid å forandre seg på sammenlignet med strøm og spenning.

Tabell 7 Oversikt over begrensinger som er lagt inn når testing av celler blir gjennomført

KONSEKVENS	BESKRIVELSE	RESTRIKSJONER
Neste steg i test	Cellespenning	$4.205[V] > V > 2.995[V]$
	Temperatur på celle	$T > 56[^\circ\text{C}]$

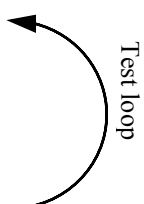
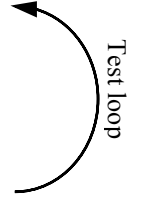
4 Celletesting

I dette kapittelet blir det tatt for seg testing av enkeltceller. Målet med disse testene er å kunne se mer detaljert på hvordan en eller to celler blir påvirket ved forskjellige tester cellene er utsatt for. Ved modultesting får en et mer realistisk bilde av hvordan forholdene faktisk er i et batteri, men er en interessert i å studere varmeutvikling i battericeller mer detaljert, er det lettere å tolke slike data ved å teste en eller to battericeller. Å gjennomføre en test med få celler er også mye lettere i praksis der en har bedre kontroll på temperaturutviklingen som blir dannet ved testing. Testene som blir gjennomført i dette kapitlet er:

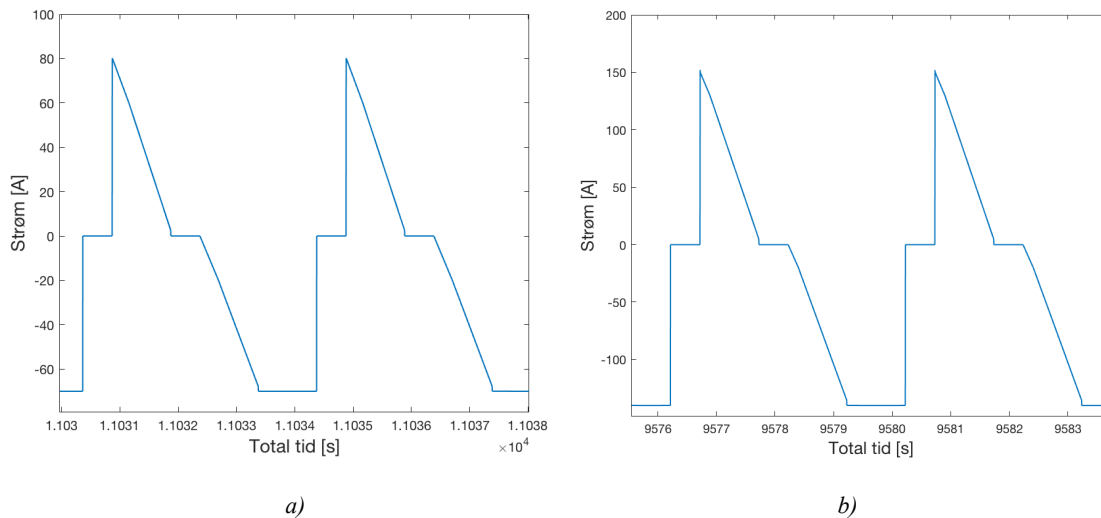
- Test av to celler i parallell med aluminiumsfolie mellom.
- Test av enkeltceller og to celler i parallell med kjølevæske fra 3M Novec 7100.
- Elektrokjemisk impedans spektroskopi av enkeltceller.

Ved testing av aluminiumsfolie mellom cellene og 3M Novec 7100 er det strømpulser som er vist i Tabell 8 som blir utført i disse testene. For en enkeltcelle er det Tabell 8a) som gjelder, og for battericeller i parallell er det Tabell 8b) som gjelder. En kan merke seg at på linje 6 i Tabell 8b) er ikke strømmen på 160A dobbelt så høy som for en enkeltcelle som har 80A. Dette kommer av at kablene som fører strøm har kapasitet til bare 50A, dvs. at en må ha fire kabler for å ha 160A, noe det ikke er plass til i battericella pga. tilkoblingsproblemer. Derfor blir alternativet tre kabler og 150A. Det skal altså ideelt sett være dobbelt så høy strøm, men samme spenning ved testing av to celler i parallell sammenlignet med enkeltceller for å ha lik belastning.

Tabell 8 Viser hvordan testene for enkeltcelle a) og celle i parallell b) blir utført. Testen går steg for steg nedover.

<ol style="list-style-type: none"> 1) Ladding til 100% SOC ved 2C, metningsgrense ved C/20 2) Hvile i 30min 3) Utladning 0-70 for 1sek 4) Utladning 70A for 1sek 5) Pause i 0.5sek 6) Lade 80A i 1sek 7) Pause 0.5sek 8) Hvis spenning > 3V gå til 9) Hvile i 30min 10) Stopp 		<ol style="list-style-type: none"> 1) Ladding til 100% SOC ved 2C, metningsgrense ved C/20 2) Hvile i 30min 3) Utladning 0-140A for 1sek 4) Utladning 140A for 1sek 5) Pause i 0.5sek 6) Lade 150A i 1sek 7) Pause 0.5sek 8) Hvis spenning > 3V gå til 9) Hvile i 30min 10) Stopp 	
a)		b)	

Et eksempel på hvordan den såkalte testloopen fungerer, er vist i Figur 4-1. Kurvene er identiske, med forskjell i strømstyrken der Figur 4-1a) har maks og min verdi på 150A og -140A mens Figur 4-1b) har maksimum strøm på 80A og minimum på -70A. Måleinstrumentet som er brukt til å teste enkeltceller og celler i parallell er en nyere og raskere maskin. Dette gjør at forsøket er mye mer presist, noe som en ser fra Figur 4-1 sammenlignet med Figur 5-3 under, som er den tilsvarende testloopen for modulen.



Figur 4-1 Viser et utsnitt av testloopen som blir gjennomført i alle testene av celler. a) er strømforløpet når celler er koblet i parallell b) gjelder for en enkeltcelle.

4.1 Enkeltceller i parallell med aluminiumsfolie

4.1.1 Introduksjon

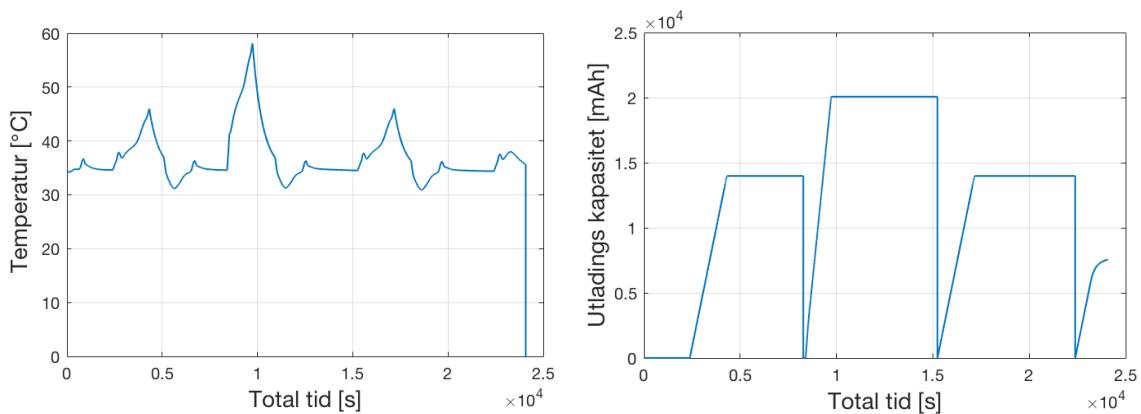
Målet med denne testen er å se om en aluminiumsfolie i seg selv kan ha en kjølede effekt på to battericeller som er koblet i parallell og er plassert tettest mulig sammen. Som vist i Figur 4-2 er det en tynn aluminiumsfolie på 0.25mm i tillegg til temperatursensor mellom de to cellene, noe som gjør at det er veldig lite avstand mellom dem. Strømkonnektorene er koblet sammen med skruer mellom de to cellene. For å holde cellene tett sammen er elektrisk tape brukt slik at battericellen ikke skal falle fra hverandre. Battericellene er plassert i et temperaturkammer på 36°C der en 2C ladning etterfulgt av testloop, og deretter blir en ny 2C ladning gjennomført.



Figur 4-2 Illustrerer aluminiumsfolien plassert mellom to battericeller med en temperatursensor mellom.

4.1.2 Resultat

I Figur 4-3 er målinger for utladningskapasitet og temperatur fra testen ved aluminium mellom to celler i parallell presentert. Det er tydelig både ut fra temperatur og kapasitet at det er tre topper i grafene. Disse kommer i denne rekkefølgen: 2C oppladning, testloopen og ny 2C oppladning. En ser tydelig at det er ved testloopen det blir størst utslag både for temperatur og kapasitet. Temperaturen på de to andre toppene ligger på 45.96°C og 45.98°C mens toppen som er forårsaka av testloopen har en temperatur på 58.1°C. På utladningskapasiteten er verdiene på toppene i rekkefølge fra vestre mot høyre: 13980mAh, 20072mAh og 13980mAh. Siden temperaturen ikke er helt oppe i grensen på 60°C betyr dette at hele testen har blitt gjennomført.



Figur 4-3 Viser temperatur og utladningskapasitet for to celler i parallell der det er en aluminiumsplate i mellom. Grafene viser hva som skjer ved 2C oppladning etterfulgt av testloop som er vist i Figur 4-1 og deretter en ny 2C oppladning.

4.1.3 Analyse

Som er ser fra resultatene er hele testen gjennomført uten stopp. Det er ingen overskriding av temperatur, men det er bare snakk om 1.9°C før dette ville skje. Testen alene gir ikke tilstrekkelig informasjon til å konkludere. En ser er at det er veldig høy temperatur som blir dannet ved testloopen. For å finne ut om en tynn aluminiumsplate har effekt på temperaturen

mellom to celler, må en ha en test å sammenligne med, f.eks. samme test med to celler uten aluminiumfolie mellom. Dette er blitt gjennomgått senere i masteroppgaven og vil bli diskutert der. Ut fra det en vet om aluminium, er det en veldig god varmeleder som vist i 2.9.1. Det vil mest sannsynlig føre til at aluminiumen bare overfører varme fra den ene cellen til den andre ute mye forskjell på om det hadde vært battericeller i parallell uten aluminium. Et materiale med god ledeevne fungerer best når det har en omgivelse den kan overføre varmen til og som har en lavere temperatur enn seg selv.

4.2 Kjøling av battericeller med 3M Novec

4.2.1 Introduksjon

I denne testen er det sett på hvordan effekten er av PCM kjøling i direkte kontakt med batteriet fungerer. Vesken som blir brukt er et ikke-elektrisk ledende materiale, noe som gjør at direkte kontakt med vesken ikke fører til kortslutning. Dette gjør at en får et veldig stort overflateareal mellom væsken og battericellen der de alltid er i kontakt.

Varmeoverføringseffekten blir veldig god så lenge væsken har en bra nok kapasitet til å absorbere varmen som blir overført. Dette kan en se fra Formel 2-17, som sier at økt overflateareal vil gi økt varmeoverføring. Forsøket blir gjennomført i en testboks som er helt tett i tillegg tåler den trykk på opp til 1.5bar. Et bilde av hvordan testboksen ser ut med en testcelle er illustrert i Figur 4-4. Alle testene er gjort i et temperaturkammer med omgivelses temperatur på 36°C. Det blir gjort flere tester for å kartlegge om denne kjølemetoden har noe for seg. Disse er:

- Test av to celler i parallell i test bok uten PCM
- Test av to celler i parallell i test bok med PCM
- Test av enkeltcelle i test bok med PCM

Ut fra testene som blir gjennomført i dette kapitlet og tester fra tidligere arbeid [4], kan det være mulig å konkludere med om dette tiltaket har kjøleende effekt.

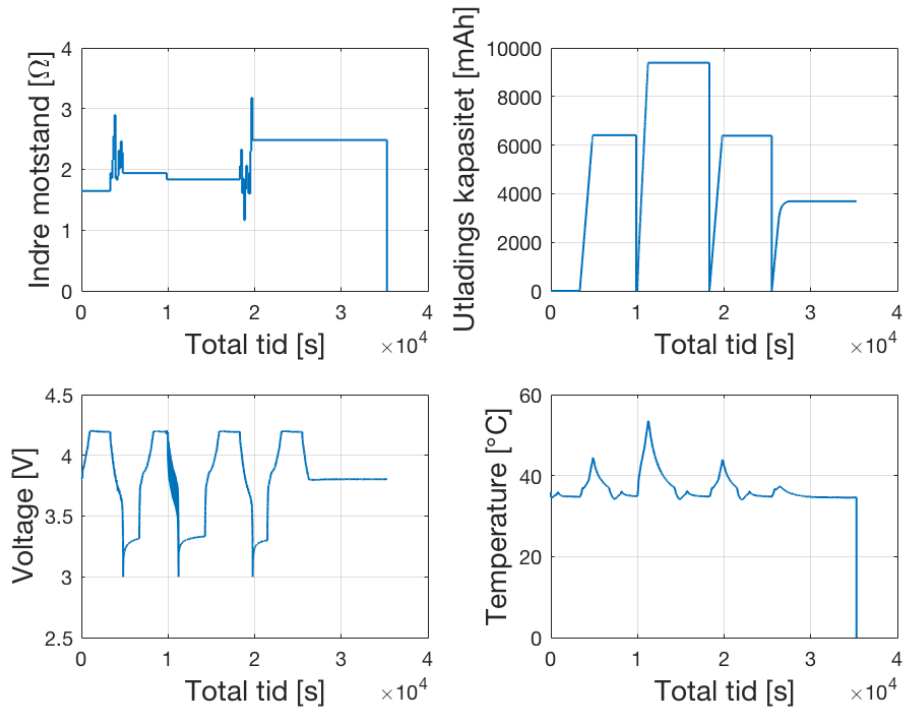


Figur 4-4 Bilde at test boks med en battericelle inni for å kunne teste PCM. Test utført ved IFE.

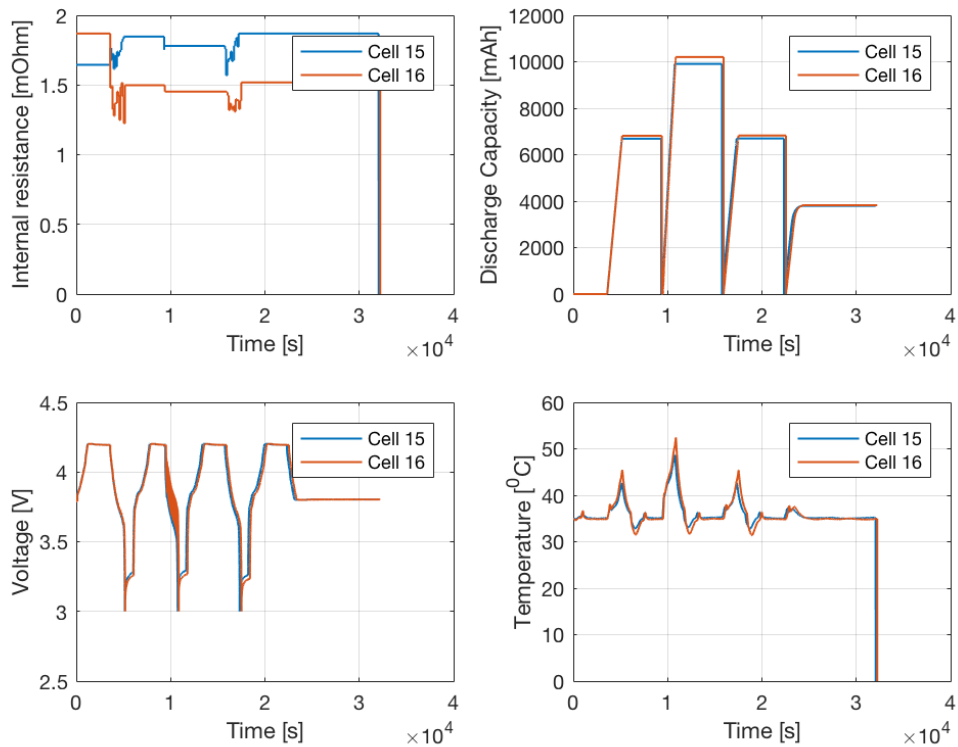
4.2.2 Resultat

Enkeltcelle:

I Figur 5-7 er det vist en oversikt over indre motstand, utladningskapasitet, spenning og temperatur i battericellen for denne testen. I figuren ser en fire topper på spenningskurven. Den første er en 2C ladning før en 2C utladning til 3.0V etterfulgt av en ny 2C ladning før testloopen settes i gang. Etter testen blir cellen ladet opp til 100% SOC før den laddes ut til 3.86V som er spenningen battericellen blir lagret ved. Siden det er testet en battericelle her, er strømmen ved ladning 80A mens ved utladning på -70A som vist i Figur 4-1b) over. Ut fra spenning, temperatur og utladningskapasitet ser en at denne testen blir fullført uten at noen restriksjoner har blitt brutt. Maksimal temperatur er på 53.25°C og maksimal utladningskapasitet er 9390mAh. For å finne ut om denne kjølingen har noe for seg, er den sammenlignet med tester som har blitt gjort i tidligere prosjektoppgave fra 2016 der en har sett på samme battericelle og samme test uten kjøling [4]. Sammendrag fra denne testen er vist i Figur 4-6 der to celler er testet i et temperaturkammer ved 36°C. Fra Figur 4-6 ser en ut fra spenningen at en i dette tilfellet har fått gjennomført hele testen siden spenningen når maksimal grense på 4.2V og minimal grense på 3.0V. Maksimal temperatur i disse testene er på 52.44°C og på 48.67°C mens utladningskapasitet er på 10204mAh og 9906mAh. Begge disse verdiene er høyere enn de målingene var for PCM kjøling. Indre motstand i Figur 5-7 måler 1.835Ω ved testloopen mens i Figur 4-6 er de på 1.752Ω og 1.452Ω.



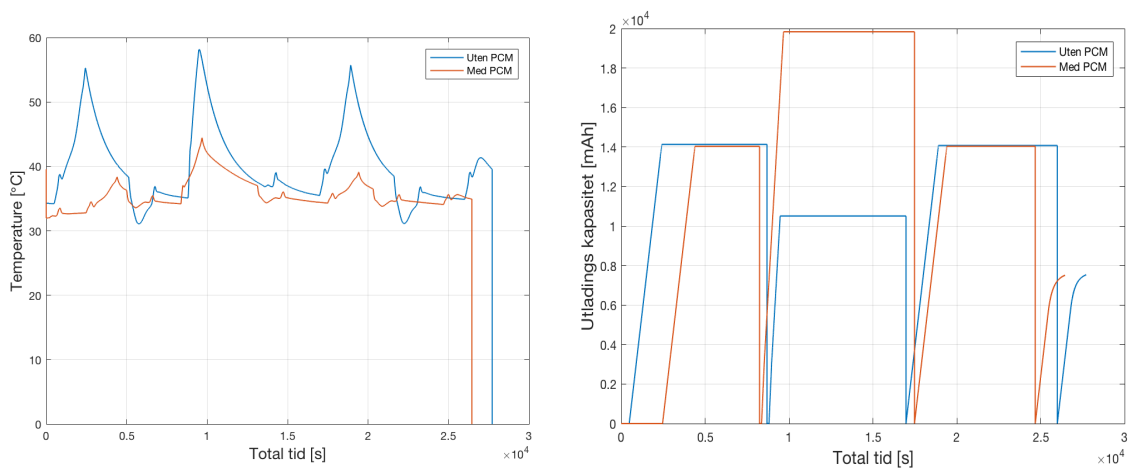
Figur 4-5 Resultater fra test av enkeltceller inne i et kammer med PCM væske fra 3M der en ser temperatur, spenning, utladningskapasitet og indre motstand.



Figur 4-6 Viser to tilsvarende battericeller som brukes i masteroppgaven, som er testet fra prosjektoppgave 2016 [4]. Det som er vist er spenning, indre motstand, utladningskapasitet og temperatur.

Celler i parallell:

Som nevnt tidligere er testforløpet ved to battericeller i parallell det samme som for en enkelt battericelle. Siden det er testet en parallellkobling av to battericeller, vil det også være nøyaktig samme strømforløp som det vil være for modulen, mens spenningen vil være den samme som for testing av enkeltceller. I Figur 4-7 er det gjort en sammenligning av utladningskapasitet og temperaturforskjell mellom celleparet med og uten PCM. Både på grafen for temperatur og grafen for kapasitet, ser en at det er tre topper. Den første og den siste er en 2C ladning av battericelle, mens toppen på grafen i midten er testloopen. Det er denne som gir størst påkjenning på battericellen på grunn av at det her er høyest strøm. Et utdrag fra hvordan strømmen oppfører seg finnes i Figur 4-1. Den høyeste temperaturen som er blitt målt uten PCM er 58.16°C sammenlignet med 44.44°C med PCM. Dette vil si en differanse på 13.72°C. En ser også stor forskjell på utladningskapasiteten på den andre toppen i Figur 4-7. Uten PCM er utladningskapasiteten på 14133mAh sammenlignet med 19843mAh med PCM. Verdien på 14133mAh tyder på at testen uten PCM ikke har blitt fullført. Dette vet en fordi begge testene har samme strømpulser. Det betyr at hvis det er en forskjell i kapasiteten ville utladningstiden ha vært kortere på den ene testen, noe som nok tyder på at den ikke har blitt fullført.

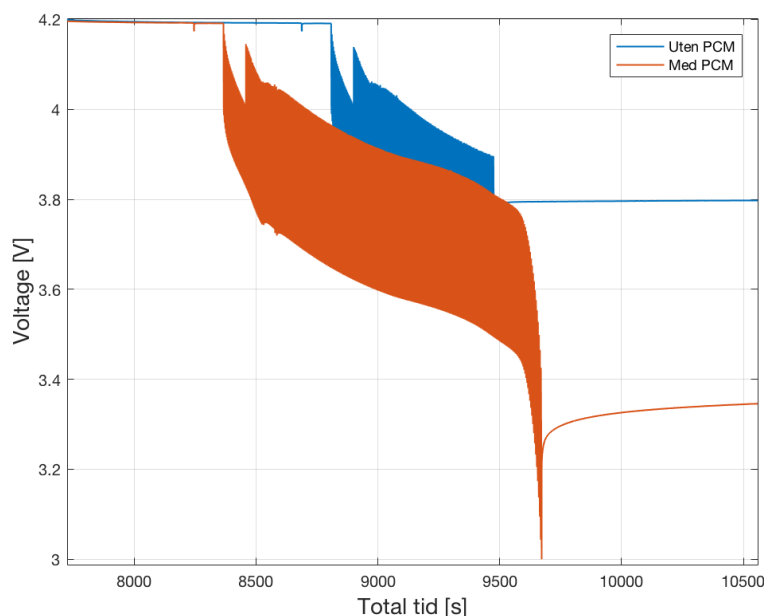


Figur 4-7 Temperatur og utladningskapasitet for test som er gjort med to celler i parallell inne i en test bok med og uten PCM tilsatt. Begge tester har kjørt samme strøm pulser.

Studerer en resultatene fra spenningen for begge testene som vist i Figur 4-8, ser en fort at testen uten PCM ikke har greid å nå 3.0V = 0% SOC, som er det nivået den skal oppnå. Den laveste spenningen som testen uten PCM oppnår, er en spenning på 3.629V som vist i Figur 4-8, noe som tilsvarer ved brukt av Formel 2-5:

$$SOC(t) = \frac{V_{oc}(t) - a_0}{a_1} = \frac{3.629 - 3.0}{1.2} = 0.524 = 52.4\%$$

det vil si at 47.6% av batteriet ble ikke brukt.



Figur 4-8 Spenningsforløp for to celler i parallell der blå kurve er uten PCM kjøling og rød er med PCM kjøling.

4.2.3 Analyse

Enkeltcelle:

Ut fra resultatene ser en at testen gjort med PCM væske har en høyere temperatur en test uten noe kjøling. Det er ikke snakk om en stor differanse, så det kan være at forskjellen i indre motstand gjør det lille utsalget. En ser at at battericellen med PCM har en litt høyere indre motstand enn testene i Figur 5-7. Ut i fra Formel 2-14 fører dette til temperaturøkning i battericellen, noe som kan være årsaken til differansen. På utladningskapasitet er det små forskjeller, men de kan også komme av forskjell i indre motstand. Når det gjelder PCM væsken så betyr dette at den ikke har hatt påvirkning på battericella. Testen er utført i en beholder som er helt lukket og det blir brukt minimal væskemengde. Dette kan være en årsak til at denne væsken ikke fungerer slik det er ønsket. Et annet moment er at denne væsken har et kokepunkt på 60°C. Dette betyr som forklart i 2.10.3 at der er rundt faseforandringen en PCM virkelig gir en forskjell. Med dette virker det som at skal denne væsken gjør en forskjell, må det enten finnes en tilsvarende væske med lavere kokepunkt som kan brukes, eller gjennomføre en test der ikke cellen og vesken er plassert i en beholder.

Celler i parallell:

En ser tydelig ut fra resultatene at det er en stor forskjell på temperaturen mellom en test med og uten PCM. Det eneste problemet her er at begge testene er gjort i testboksen med eller uten kjølevæske. Forholdet mellom volumet til battericellen og kjølevæske er i dette tilfellet forskjellig sammenlignet med testen for enkeltcellen over, noe som kan ha ført til i overkant mye veske pr. cellepar sammenlignet med enkeltcellen. Dette vil påvirke kjøleeffekten av væsken, noe som vil gjøre at den egentlig kan prestere i overkant bra med tanke på volumforskjellen. Et annet forhold som bør bli tatt opp til vurdering, er at sammenligningstesten uten PCM har blitt gjort i akkurat samme beholder. Dette vil da si at luften står helt stille, noe som kan føre til at det blir mye varmere enn det som skjer i en realistisk situasjon for en batteripakke i en bil. Disse faktorene er noe en bør ta i betraktning når en leser av resultatene.

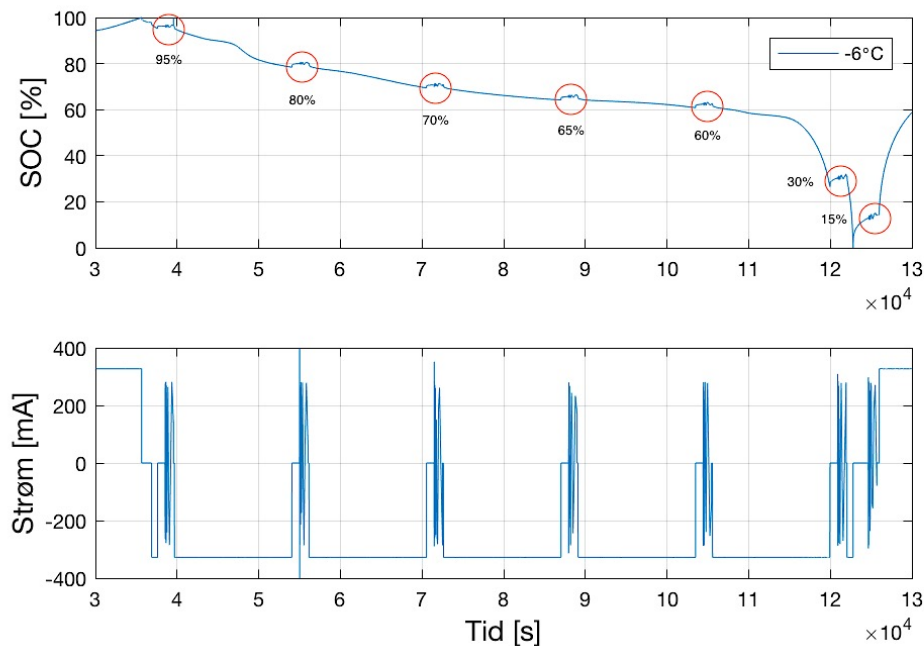
Som nevnt tidligere i 2.10.3 er det når en PCM har faseforandring den har størst evne til å ta opp energi i form av varme. Det en kan da spørre seg om, er hva som i dette tilfellet har vært grunnen til kjøling. Siden ingen gassutvikling ble observert, kan det tenkes at væsken ikke nådde faseforandringsspunktet. En ser også på temperaturmålingene fra Figur 4-7 at temperaturen på sitt høyeste punkt på 44.44°C, noe som skal være en for lav temperatur, til at en slik forandring skal skje. Dette vil si at det fulle potensialet av denne væsken er ikke blitt testet ut fordi det er i området væsken begynner å koke/forandre fase (for denne væsken 60°C) en virkelig får hentet ut potensialet av en PCM. Testen viser at PCM væsken i seg selv uten forandring av fase har en varmekapasitet som er mye høyere en luft.

4.3 Elektrokjemisk impedans spektroskopi analyse

4.3.1 Introduksjon

Elektrokjemisk impedans spektroskopi er en metode for å kunne se på impedans i en battericelle. Dette kan være interessant å studere med tanke på hvordan temperatur og SOC kan påvirke et batteri. EIS testing har foregått med temperaturene på -6,5,15,25 og 45°C samt de forskjellige SOC som er vist Figur 4-9 nedenfor. I alle testene er den laveste frekvensen på 30mAh. Alle testene er gjennomført med en LCO celle fra Melasta slik som i tidligere tester. Det er brukt temperaturreguleringskammer for å kunne bestemme temperaturen på battericellene. Fra Figur 4-9 ser en tydelig når pulsene av AC strøm blir satt på. Det er disse som gjør det mulig å få ut den data som er ønsket. En ser at disse pulsene ligger på ca. 300mA. Det er merket i figuren ved kurven for SOC hvor disse har utsalg med røde sirkler

der det også er notert hvilken % av SOC batteriet befinner seg i. Eksemplet i Figur 4-9 er hentet fra målingen når battericellen er på -6°C . Tilsvarende vil det se ut for de resterende temperaturene.



Figur 4-9 Viser SOC i % og strømmen i mA for EIS test for -6°C . Strømpulsene gir utslag i kurven for SOC og er merket med sirkler. Pulsene er små AC strømmer på 300mA som sendes inn i batteriet for å kunne gjennomføre EIS tester.

4.3.2 Resultater

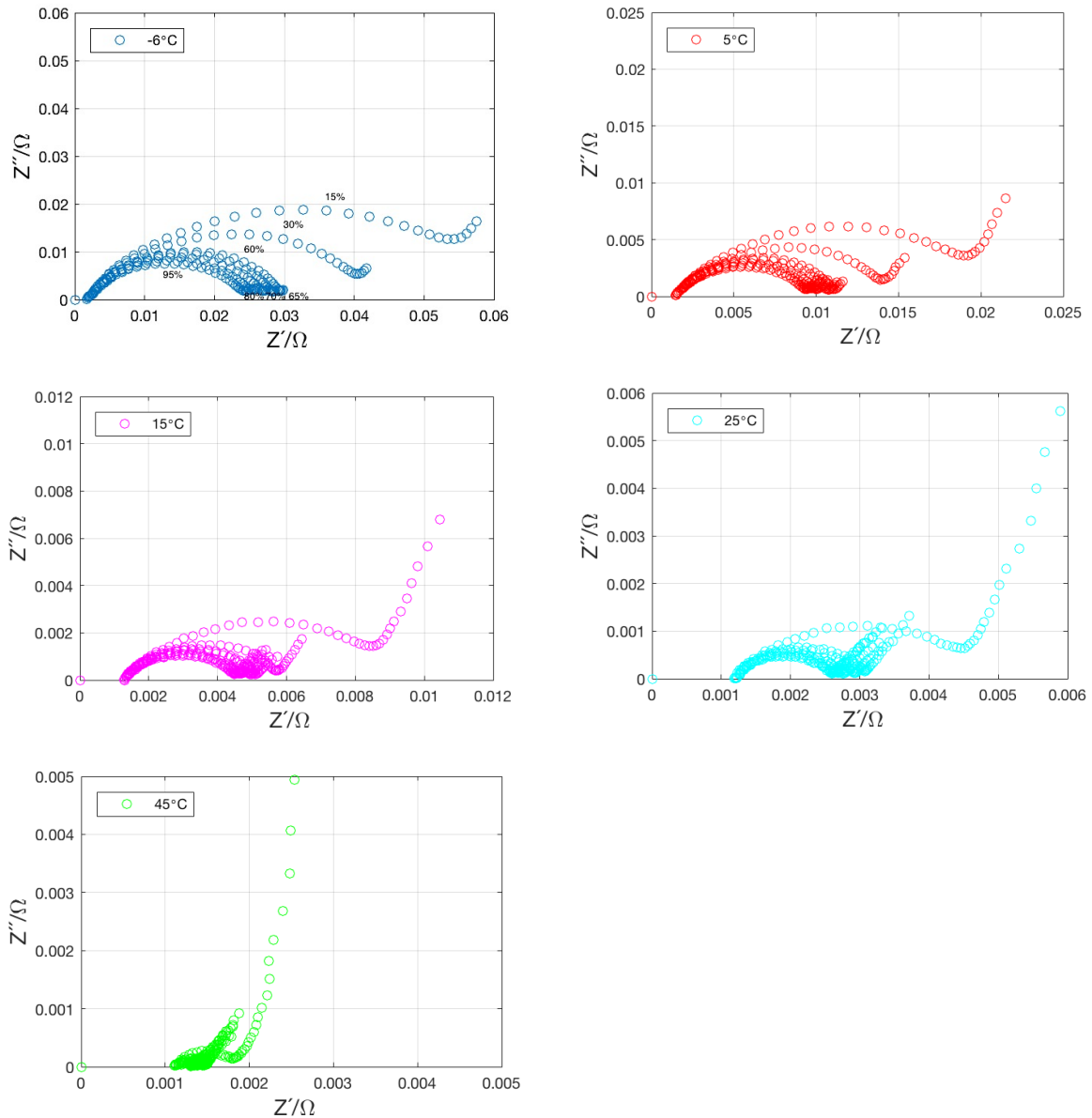
I Figur 4-10 er en oversikt over syv forskjellige tester der hver representerer sine temperaturer der det har blitt utført en EIS. Hver test har blitt utsatt for syv forskjellige SOC. Rekkefølge på kurvene i forhold til SOC viser seg å være lik for alle temperaturene der lavest SOC gir høyest impedansutslag mens høyest SOC gir lavest impedans. Som forklart i 2.7 er det forskjellige deler av kurven som representere forskjellige komponenter av batteriet.

Sammenligner en grafene, er det tydelig at jo lavere temperatur, jo høyere impedans. Det som virkelig dominerer i lave temperaturer og da tenkes det særlig på testen for -6°C og 5°C , er den såkalte halvsirkelen som en snakker om i EIS. I en ideell situasjon skal en ha to tydelige halvsirkler etter hverandre, men det er ikke tilfellet i resultatene i Figur 4-10. En årsak til dette kan være fordi de to halvsirklene overlapper hverandre og da vil de bli mer som en oval form som i Figur 4-10. Siden en ikke greier helt å skille mellom de to halvsirklene er det vanskelig å vite om det er motstanden og kapasitansen i overflaten av de to elektrodene som gir utslag ved høy frekvens (Z_{arc1}), eller om det er ladeoverføringsmotstand og *double-layer capacitance* ved medium frekvens (Z_{arc2}) som er skyld i halvsirkelen som kommer frem i

resultatene. Siden halvsirkelene er veldig jevne, kan det tenkes at begge har en rolle i halvsirkelene som blir presentert i Figur 4-10.

En ser videre fra -6°C og 5°C at de har en liten *hale*. Det kommer fra Warburg impedansen og skyldes diffusjon av litium-ion på elektrode-elektrolytt. Særlig ved høy SOC blir det mindre diffusjon, noe som er en trend for alle temperaturene. Diffusjonen ved høy SOC og -6°C ser ut til å være ikke eksisterende. Vinkelen på denne såkalte halen kan beskrive hvilken type diffusjon som skjer. Ved høye temperaturer er det svært lite påvirkning av Z_{arc1} og Z_{arc2} . Ved 15% SOC ser en at det er en liten halvsirkel, men for høyere SOC er den svært liten.

Punktet der alle grafene i Figur 4-10 skjærer x-aksen for første gang, vil tilsvare verdien på indre motstand eller bulkresistansen til battericella. Denne ser ikke ut til å være så mye påvirket av SOC sammenlignet med hva den er for temperatur. For -6°C er den 0.001684Ω , for 5°C er den 0.001443Ω , for 15°C er den 0.001307Ω , for 25°C er den 0.001185Ω og for 45°C 0.001107Ω . En ser at spranget på indre motstand ved de laveste temperautene er mye større en ved høyere temperatur. Fra 25°C til 45°C er det største spranget i temperatur, men det minste i indre motstand.



Figur 4-10 EIS av fem forskjellige temperaturer med syv forskjellige SOC der rekkefølge fra størst til lavest impedans er lik for alle temperaturne, der 30Hz er maksimal frekvens i denne testen.

4.3.3 Analyse

Som resultatene tydelig viser har temperatur en viktig rolle når det gjelder impedansen i en battericelle. Som diskutert tidligere i 2.8.1 har battericellen best virkningsgrad mellom 20-40°C. Ut ifra resultatene ser en at bulkmotstanden har en del differanse i starten, men når den går fra 25-45°C, er det minimale forskjeller. Dette kan ha sammenheng med det som er diskutert i 2.8.1. Tilbake til resultatene så er det svært vanskelig å tolke testen når temperaturen er veldig høy. Da blir målingene veldig små og veldig smale. Det en ser er at ved høy temperatur er det mindre indre motstand, dette kommer tydelig fram fra grafene. Når det gjelder resten av kurven, ser en også som nevnt over at halen blir lengre når temperaturen

øker og halvsirkelene blir mindre. Noe en bør merke seg er at den laveste frekvensen som ble kjørt i denne testen var 30mHz for alle temperaturene. Dette kan ha bidratt til at enden av halen spesielt ved -6°C , ikke har blitt så lang som den skulle, men ut ifra grafen ser det ikke slik ut. Ut fra resultatene ser det ut til at de har tilsvarende vinkel utenom målingene gjort ved 45°C , der den er litt brattere enn alle de andre. En ser også at halene dominerer mest ved lavest SOC. Ut fra grafene kan det virke som at høye temperaturer slår testen ut på komponenter som påvirkes lav frekvens (Warburg impedansen) sammenlignet med de med høyere frekvens. Det samme gjelder også motsatt ved at de lavere temperaturene dominerer komponentene som slår ut ved høyere frekvenser. Det er motstanden og kapasitansen i overflaten av de to elektrodene som gir utslag som en halvsirkel ved høy frekvens og lade overføringsmotstand og dens *double-layer capacitance*, som vil gi utslag med en halvsirkel ved medium frekvenser. Som nevnt tidligere er det ikke lett å vite sikkert hvem av disse som gir utslag, men skal en se på tendensene, så virker det slik at jo lavere temperaturen er, jo mer vil komponenter som reagerer ved høyere frekvens dominere. Spørsmålet da er bare hvordan fordelingen av dette vil være.

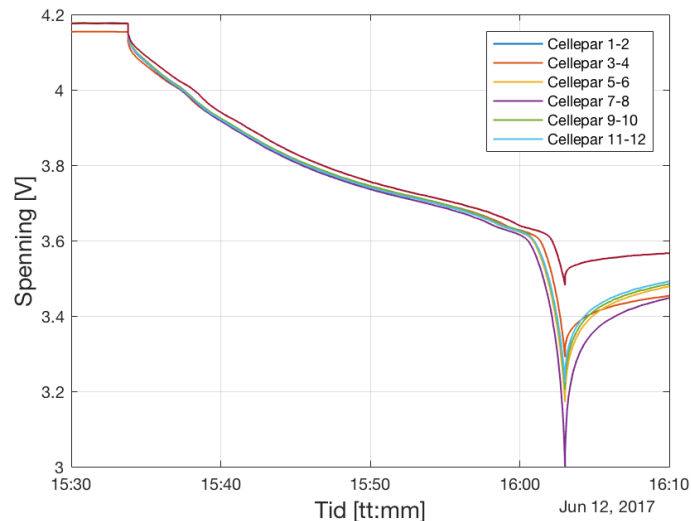
Gjennom alle testene ser en at SOC påvirker den reelle og imaginære impedansen mye, men ikke i samme grad som bulkmotstanden. For hver enkelt temperatur viser det seg og at jo lavere SOC en får, jo høyere vil impedans være. Fra 95-60% SOC er det ikke så store forskjeller sammenlignet med fra 60-15% SOC. Dette kan tenkes å være forklaringen på det ofte kjente spranget en SOC-kurve har ved en konstant opp- og utladning som vist Figur 2-3.

5 Modultesting

Ved testing av en modul har målet vært å se hvordan temperaturen utvikler seg i modulen når den blir påført strøm. Gjennom tidligere arbeid fra [2-4] er det kun blitt sett på test av enkeltceller og hvordan temperaturen utvikler seg der. Målet med testene her er å kunne se hvordan cellene påvirkes av hverandre når høy strøm blir påført over tid, teste enkle inngrep for å kunne se om dette kan ha en potensiell kjølingseffekt og se på hvordan luftkjøling påvirker temperaturen på alle cellene.

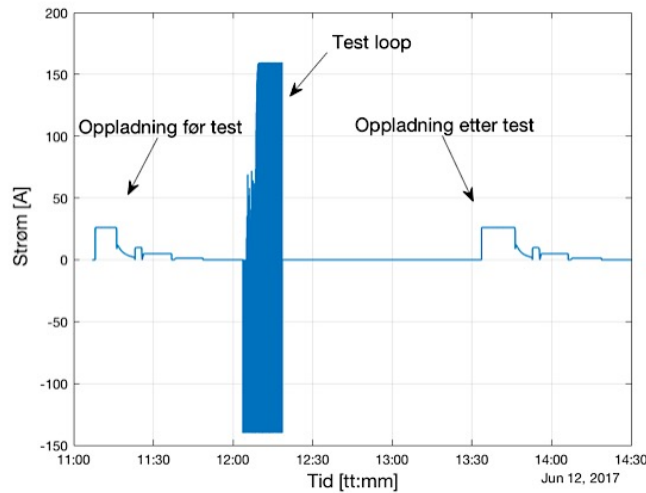
Modulen består av 12 battericeller som er kobla i 2 paralleller. Dette vil si at når batterimodulen er full-ladet vil spenningen være på 6x 4.2V der 4.2V er maksimalt anbefalt spenning på et litium-ion batteri. Da vil spenningen ligge på 25.2V som vist i Figur 3-5, mens den minimale spenningen vil være på 6x3.0V som blir 18.0V. Siden en har restriksjoner på alle cellene, og det kan være en skeiv fordeling i spenningen på enkeltceller på grunn av at en ikke har balansering av spenning på battericellene, noe en tydelig ser i Figur 5-1, vil testen kunne stoppe når et cellepar når nedre grense på 3.0V som potensielt kan føre til at testen stopper før 18.0V totalt spenning. Det er restriksjoner på maksimal temperatur på modulen så hvis temperatursensorene som er plassert på enden av modulen måler over 50°C stopper testen. Modulen er kobla opp med to strenger som består av seks battericeller som er i serie i en streng. Forholdet vil da være:

$$2C \times 2 \text{ paralleller (2p)} \times 6.55\text{Ah nominell kapasitet} = 26.2\text{A i modul}$$
$$\text{Maksimal cellesepning } 4.2\text{V} \times 6 \text{ battericeller i sere} = 25.2\text{ V i modul}$$



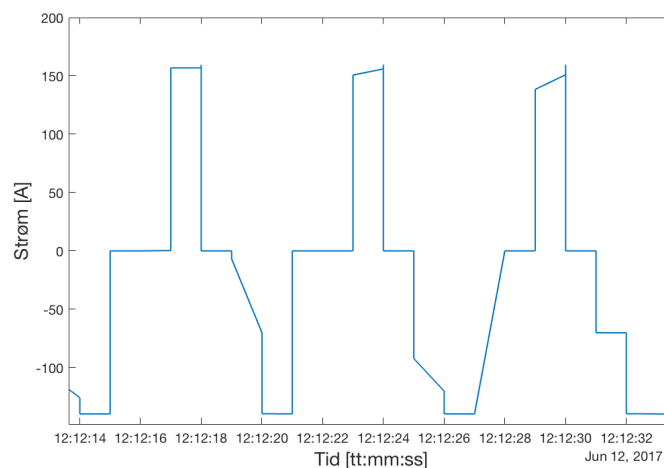
Figur 5-1 Viser alle spenningen til celleparene i modulen ved 100% SOC til 0% SOC ved 2C utladning.

I gjennomføringen av modul testingen er det interessant å se på hvordan modulen takler høy påkjenning som f.eks. når en påfører høye strømpulser for lading og utladning. Testens forløp foregår ved først å lade opp batteriet til 100% SOC ved 2C skriv grader som vist over tilsvarende 26.2A. I Figur 5-2 er det markert når oppladningen starter. En kan legge merke til både på ladning før og etter testloopen strømmen synker stegvis før den går mot null. Dette på grunn av CC-CV strategien som er forklart i 2.5 om ladestrategi, for å få kapasiteten på battericellene så høy som mulig. Når modulen er nådd ca. 100% SOC er det 30 min. hvile før testloopen starter, noe som skyldes at temperaturen skal stabilisere seg til gitt romtemperatur før testloopen settes i gang. I starten av testloopen vil modulen kun ladde seg ut med 140A på grunn av den øvre restriksjonen av spenning i celler og modul som vil forhindre at modulen kan lade seg opp. Når spenningen ikke lenger er i grenseland, vil modulen begynne også med oppladning på 160A som kommer frem i Figur 5-2. Mellom ladning og utladning er det lagt inn 0.5s pause for at det skal være litt mer realistisk i forhold til en ekte situasjon for bilkjøring. Målet med testen er å prøve å simulere en bil som bremses og generer strøm ved hjelp av *Kinetic energy recovery system* (KERS) og akselerer igjen.



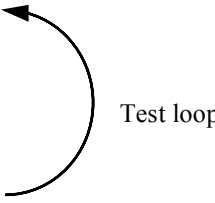
Figur 5-2 Oversikt over strømforløp for oppladning, testloop og ladningigjen av en modul. Ladding er positiv strøm mens utladninger motsatt

Et utsnitt av testloopen er å finne i Figur 5-3. Dette vil bli gjennomført helt til modulen eller en celle har nådd 0% SOC eller en restriksjon har blitt brutt. I figuren kan en se at det er en del forskjeller på formen på de forskjellige pulsene, dette på grunn av at gjennomføringen av denne testen har blitt gjort på en relativt gammel maskin som har mekaniske brytere. Dette medfører at denne maskinen kan slite litt med å henge helt med når opp/ut-ladnings pulsene blir gjennomført i den hastigheten som det blir gjort i testloopen. Oversikt over hvordan hvert steg blir gjennomført i testingen av modulen er framstilt i Tabell 9 der testmaskinen går steg for steg nedover.



Figur 5-3 Viser et utdrag av testloopen og hvordan den ser ut. Positiv strøm er ladding av cella mens negativ er utladning. Dette forløpet vil bli repeterts helt til modul har nådd en restriksjon eller 0% SOC.

Tabell 9 Oversikt over steg i test av modul

- 1) Ladding til 100% SOC ved 2C, metningsgrense ved C/20
 - 2) Hvile i 30min
 - 3) Utladning 0-140A for 1sek
 - 4) Utladning 140A for 1sek
 - 5) Pause i 0.5sek
 - 6) Lade 160A i 1sek
 - 7) Pause 0.5sek
 - 8) Hvis spenning > 3V gå til
 - 9) Hvile i 30min
 - 10) Stopp
- 

Det er tilsammen gjort fire forskjellige tester på modulen der alle testene foregår i et temperaturkammer med omgivelsestemperatur på 36°C. Testene er som følger:

- Testing av modul uten kjøling.
- Luftkjøling av modul i serieretning.
- Luftkjøling av modul med aluminiumsplater og serie kjøling.
- Luftkjøling av modul med aluminiumsplater og parallellkjøring.

Det som ønskes å oppnå med testene her er å kunne se hvor effektivt de forskjellige kjøle metodene er og hvordan temperaturen brer seg inne i cellene. Fra Revolve NTNU er det data på temperaturen på toppen av cellene, men temperatur inne mellom cellene har ikke blitt målt før.

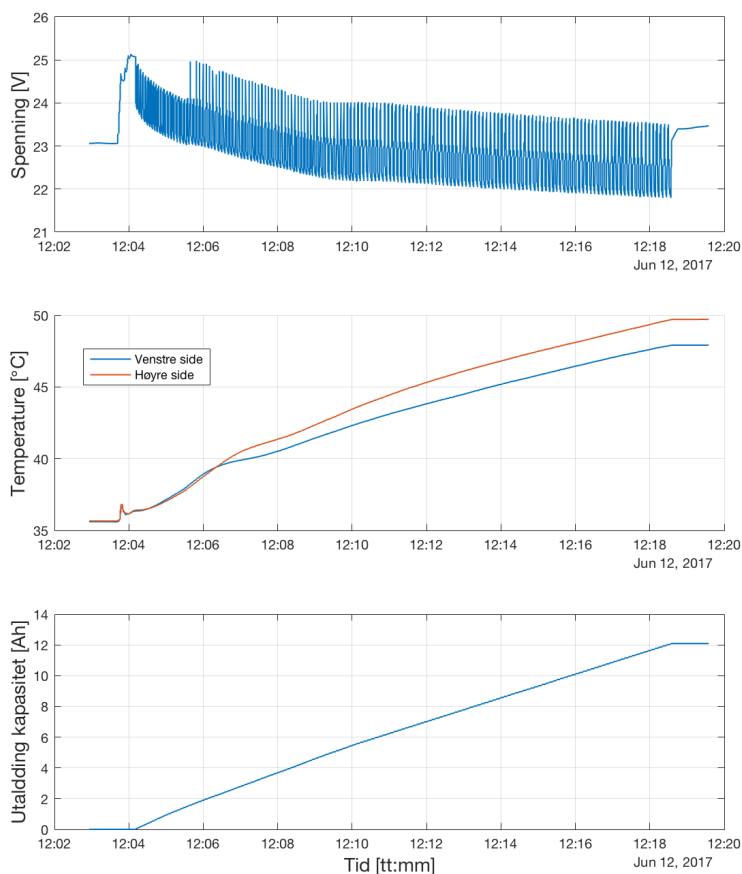
5.1 Uten luftkjøling

5.1.1 Introduksjon

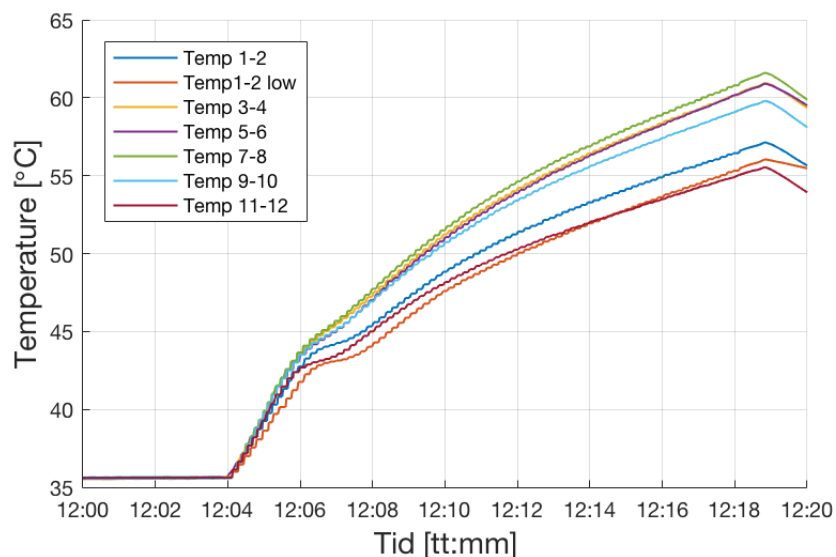
I denne testen blir modulen testet med temperatursensorer mellom hvert cellepar og en temperaturmåler på hver utside av cellene. I tillegg er det et cellepar som har sensor helt nederst for å kunne se hvordan temperaturforskjellen mellom cellene er fra midten til bunn på celleparet. Med dette oppsettet kan en kartlegge tydelig temperaturens utbredelse i modulen, noe som kan være nyttig å vite for å få en forståelse av kjøleeffekten til de forskjellige metodene. Denne testen skal se på hvor mye varme som faktisk blir generert og hvor varme battericellene inne i modulen blir. Testloopen starter 30min etter modulen har oppnådd 100% SOC. Strømførøpet da vil være slik som vist i Figur 5-3 der dette blir gjentatt helt til modulen når sin nedre grense som vil være i området > 18V, eller en av restriksjonene blir brutt. I modulen er battericellene plassert slik at det er $\cong 0\text{mm}$

5.1.2 Resultater

Resultatene fra denne testen viste at testen ikke fikk ladet seg helt ut før den ble avsluttet. Dette på grunn av at temperatursensorene som satt på utsiden på hver ende av modulen nådde maks temperatur som da er på 50°C . I Figur 5-4 er temperatursensorene plassert på begge sider av modulen. En ser ut fra grafen at temperaturen stiger raskt når testen er satt i gang. Høyre side av modulen som er den røde linjen i Figur 5-4 har en litt høyere verdi enn venstre siden som er blå. Maksimal temperatur som er målt på utsiden av denne modulen er på 49.715°C på høyre side som nok har gjort at denne testen har stoppet opp før modulen var heilt utladet. Ved samme tid målte temperaturen på venstre side 47.91°C . Totale spenningen i modulen i dette punktet er 21.79V , noe som er ganske langt fra minimum spenning på 18.0V . Utladningskapasiteten som vises i Figur 5-4 sier noe om hvor mye kapasitet som har blitt ladet ut før testen har stoppet. I dette tilfelle nådde kapasiteten en verdi på 12.09Ah . Når en studerer temperaturmålingene inne i battericella i Figur 5-5, ser en tydelig en trend. De laveste temperaturene ligger ytterst i modulen, altså på høyre og venstre side. En ser også av figuren at det er litt varmere på høyre halvdel av modulen enn på den venstre. ~~halvdel~~. I Figur 5-5 er de merket med nummer fra 1-2 osv. Dette betyr at temperatursensor er festet mellom f.eks. celle 1 og 2. Nummereringen begynner fra høyre siden av modulen mot venstre side. I Figur 5-5 ser en et klart skille mellom de tre nederste og de fire resterende målingene. Skillet kommer klart frem når det har gått 5min av testen. En ser at temperatursensorene som ligger mellom cellene som er lengst ute i modulen (temp 1-2, temp 1-2 low og temp 11-12) har mye lavere temperaturer med maks temperaturer på 57.14 , 56.05 og 55.55°C i forhold til de varmeste som har temperaturer på mellom 59.80 - 61.6°C .



Figur 5-4 Oversikt over spenning, temperatur og utladnings kapasitet av modulen uten kjøling når testen kjører testloopen, fra 100% SOC helt til testen stopper pga. restriksjonsbrudd i dette tilfellet.



Figur 5-5 Viser målinger av temperaturen mellom cellepar i en modul uten kjøling. Der det er målinger mellom seks cellepar der det ene celleparet også har en sensor helt nederst på cellen.

5.1.3 Analyse

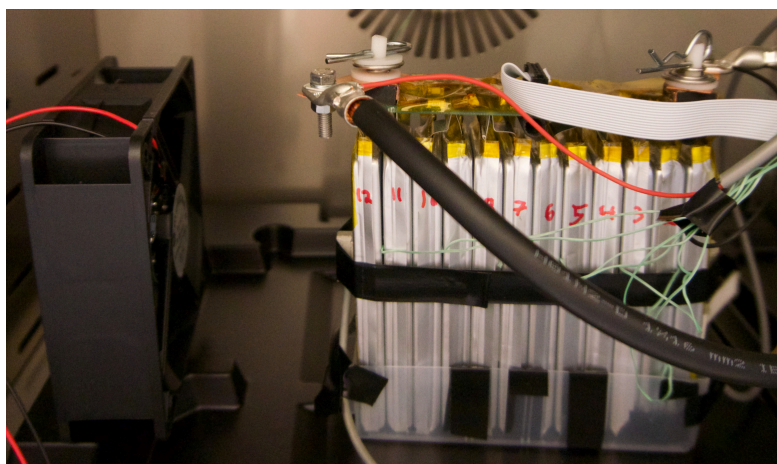
Det kommer tydelig frem fra testene at hvor battericellene er plassert har mye å si på for hvor varme de blir. Temperaturdifferansen fra kaldeste måling ved maks temperatur er den ytre

målingen på venstre side på utsiden av modulen som er på 47.91°C i forhold til den varmeste 13.7°C . Grunnen til at det akkurat er dette paret som har den høyeste temperaturen er nok at det er plassert nesten i midten av modulen. Et annet moment er hvis en ser på cellene rundt så er dette den cellen som har nabopar med høyest temperatur. Dette betyr at varmeoverføringen spiller en stor rolle når cellene står så tett. En kan også tenke seg at forskjellen i indre motstand i de forskjellige cellene også kan gi utslag på temperaturen som blir dannet mellom de forskjellige parene, se Formel 2-14 som viser forholdet mellom varmeutvikling, strøm og indre motstand. Det at en battericelle kan bli påvirket av cellene som er rundt, **seg** kan vi også se ut fra Formel 2-17 som forklarer varmeledningsevne og hvordan det er en sammenheng mellom temperatur, areal og materiale som er i kontakt med hverandre. Siden denne testen er gjort i et temperaturkammer der kabler er trukket inn via ett hull, kan det være tenkbart at det er muligheter for noe lekkasje av varme som kan føre til temperaturforskjeller.

5.2 Luftkjøling i serieretning

5.2.1 Introduksjon

Denne testen har akkurat samme målingsoppsett som testen over. Det er temperatursensorer mellom hvert cellepar og mellom 1-2 er det også en plassert langt nede på cella. Det er også en temperatursensor på hver side av modulen. Målet med denne testen er å se hvor stor effekt det vil ha å påføre en luftstrøm i serieretning på cella. Dette vil si at vindene går langs modulen fra cellepar 11-12 i retning mot cellepar 1-2. Dette skal prøve å simulere noe av hvordan kjølesystemet er i bilen som Revolve NTNU bygger. Der kommer luftstrømmen inn i samme retning. gjennom sluser. I tillegg er det en vifte som blåser inn luft som treffer modulene. Battericellene? har en avstand mellom seg som er $\cong 0\text{mm}$. Det eneste som er i mellom cellene er de små temperatursensorene som er plassert mellom hvert par.

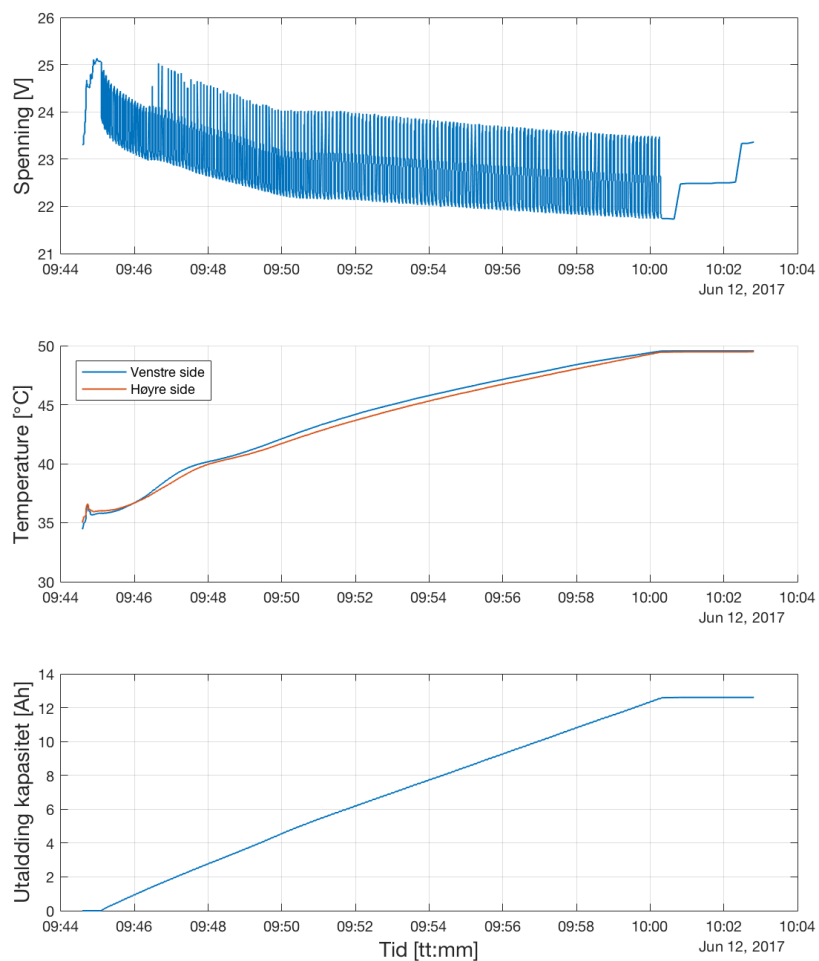


Figur 5-6 Bilde av hvordan en serie kjøling med vifte ser ut. Test utført ved IFE.

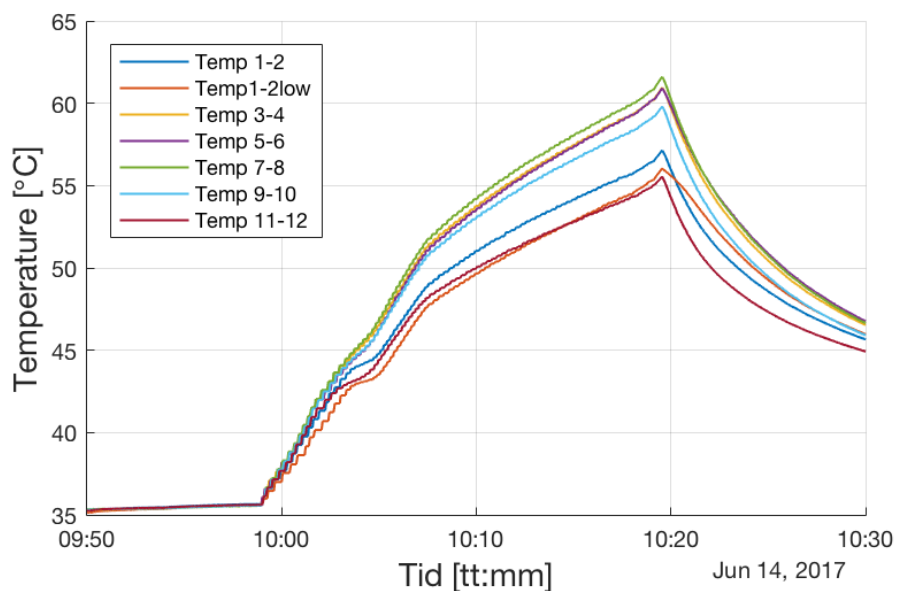
Denne testen har heller ikke greid å gjennomføre 100% *Depth of discharge* (DOD) som er det samme som 100 til 0% SOC, av samme grunn som test uten noe kjøling. Temperaturen i dette tilfelle ble og alt for, noe som førte til at testen måtte avbrytes.

5.2.2 Resultat

I Figur 5-7 er det en oversikt over de viktigste dataene for denne testen. Den laveste spenningen i modulen en kom ned på i denne testen var 21.73V, noe som er et godt stykke unna minimum spenning på 18.0V. Som nevnt over er det temperaturen som har blitt for høy og som har gjort at testen har stanset før den var ferdig. Temperaturen på venstre side av modulen nådde en temperatur på 49.55°C mens høyre side kom til 49.49°C, noe som har ført til at testen nok har stoppet. Maksimal utladningskapasitet nådde 12.61Ah, noe som er litt høyere sammenlignet med testen uten kjøling. I Figur 5-8 er målingene fra temperatursensorene inne i batterimodulen, der det er en måling for hvert cellepar i tillegg til at det er et cellepar som har en temperatursensor nede på cella for å se på forskjeller i utbredelsen av temperatur i en celle gjennom testing. Som i testing uten kjøling er det tre målinger som ligger litt lengre nede i temperatur enn de fire resterende målingene. Dette er målingen mellom 11-12, 1-2 low og 1-2 med temperaturer på 54.32, 54.47 og 55.78°C. De fire resterende målingene har temperaturer på 58.33, 59.25, 59.29 og 60.02°C der temperaturen mellom 7 og 8 er også i denne testen den varmeste målingen som har blitt gjort. Temperaturdifferanse mellom den største og minste verdien som er målt er i dette tilfellet 10.53°C og er litt mindre enn det som ble målt i testen uten noe form for kjøling.



Figur 5-7 Oversikt over spenning, temperatur og utladnings kapasitet av modulen ved serie luftkjøling når testen kjører testloopen, fra 100% SOC helt til testen stopper pga. restriksjonsbrudd i dette tilfellet.



Figur 5-8 Viser målinger av temperaturen mellom celler i en modul med serie luftkjøling. Målinger mellom seks cellepar der det ene celleparet og har en sensor helt nederst på celleparet. Luftkjølingen treffer cellepar 11-12 først og forlater cellepar 1-2.

5.2.3 Analyse

Ut fra målingene så ser det ut som at effekten av kjøling med vifte har hatt en liten effekt på kjølingen av batteriet. Utladningskapasiteten i denne testen gikk til 12.61Ah sammenlignet med 12.09Ah. Dette er ikke en så veldig stor forskjell, men det sier noe om at det tok litt lengre tid før testen ble stoppet siden testloopen og strømmen er lik på begge testene. En ser som i testen over uten kjøling at det fortsatt er cellepar 7-8 som har høyest temperatur. Dette kan nok tyde på at de cellene kan ha en litt høyere indre motstand, men har også en plassering som er ugunstig med tanke på at de står så nærme senter av modulen. Siden denne testen kjører litt lengre, vil temperaturen til slutt mest sannsynlig bli like høy som testen uten kjøling. Det som kan være mest interessant å se på er temperaturdifferansen mellom cellene. Den er en del lavere enn ~~ved~~ uten kjøling der differansen var 13.7°C i forhold til 10.53°C i dette tilfellet. Dette vil da kunne si at det er en mer jevn fordeling av varme, mest sannsynlig på grunn av viften som transporterer vekk varme. Temperatursensoren som ligger på utsiden av modulen til høyre oppfører seg litt rart sammenlignet med venstre side. Men ser en på tilfellet uten kjøling, hadde venstre side en mye lavere temperatur enn høyre, og en skulle da tro at når venstre side får viftestrømmen først burde den med denne type kjøling bli enda lavere i dette tilfellet her. Litt ute i denne testen blir plutselig venstre side den som har høyest temperatur. Dette kan være målefeil, eller andre grunner som ikke kan forklares her. I Figur 5-7 ser en i starten at venstre siden har en litt lavere temperatur enn høyre side. Dette er ikke tilfellet i testen over i Figur 5-4, der temperaturene holder seg helt like i starten før de plutselig deler seg. Dette kan tyde på at oppstarten forløper normalt, men at det underveis oppstår en forstyrrelse i testforløpet Serie luftkjøling med aluminiumsfolie

5.3 Luftkjøling med aluminiumsfolie

5.3.1 Introduksjon

I denne testen blir det ~~teste~~ undersøkt hvordan varmeutviklingen i modulen blir påvirket når en har seriekjøling i tillegg til tynn aluminiumsfolie som har en tykkelse på 0.25mm mellom annethvert cellepar, og motsatt i forhold til hvor temperatursensorene er plassert (2-3,4-5,6-7,8-9 og 10-11). Målet med disse platene er å se om de kan fungere som kjølerigger til batterimodulen ved å bedre transporteringen av varme i modulen slik at luftkjølingen blir mer effektiv. Aluminiumsplatene utgjør en vekt på til sammen på 20.82g på modulen. Samme

strømpuls og restriksjoner som er foretatt på testene som er gjennomført i **Feil! Fant ikke eferansekilden.** og 5.1 blir også gjort på denne testen. Mellom platene er det fortsatt en minimal avstand. Der aluminiumsplatene er plassert, er det 25mm mellom hver celle, på grunn av platen, og mellom de cellene der det ikke er aluminium, er det kun temperatursensorer imellom, så en kan anta en avstand på $\cong 0$ mm.

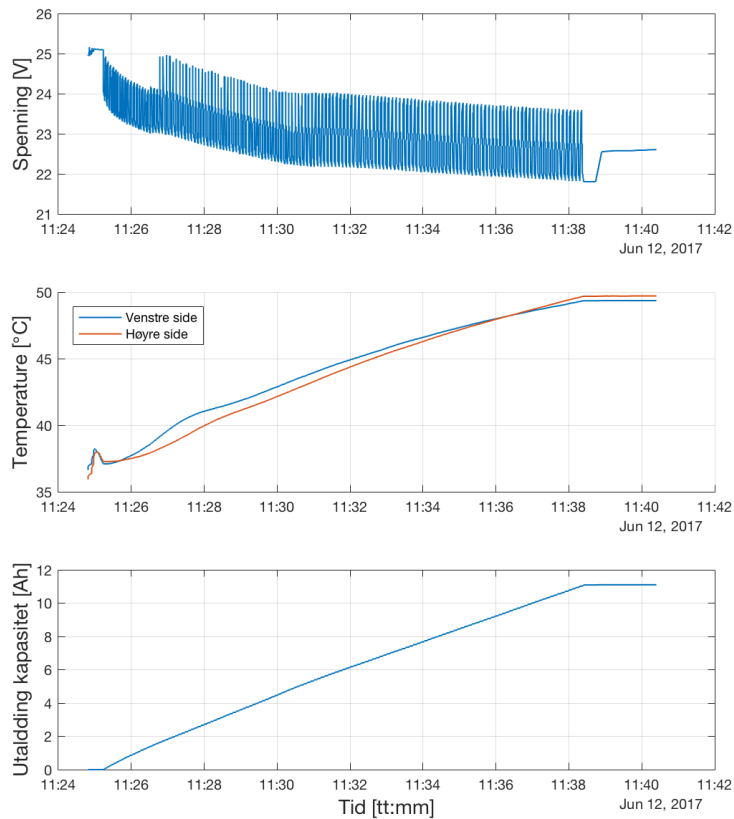


Figur 5-9 Bilde av hvordan kjøleriggen av aluminiumsplater er plassert og satt opp.

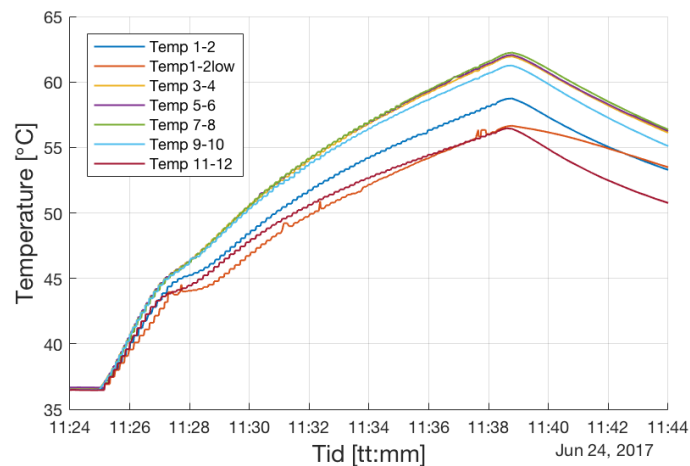
5.3.2 Resultat

En oversikt over de viktigste dataene er presentert i Figur 5-10. Der ser en hvordan spenning, temperatur og utladningskapasitet utvikler seg gjennom testen. Ut fra spenningskurven kan en se at spenningen er på 25.16V før testloopen blir satt i gang som er 0.04V fra det maksimale som er satt i restriksjonen. Videre ser en fra den samme kurven at det tar litt tid før spenningen beveger seg både i positiv og negativ retning. Dette er fordi spenningen må synke litt i modulen før testen får lov å lade modulen. Når testen har stoppet, ser en at spenningen har endt opp på 21.81V som er et godt stykke unna den nedre grensen på spenning for modulen. Temperaturen på venstre og høyre side av modulen når sitt maksimumsnivå på henholdsvis 49.35°C og 49.70°C som nok er grunnen til at også denne testen har stanset før den var helt ferdig. Den maksimale utladningskapasiteten som blir nådd før testen stopper er på 11.10Ah som er det laveste som er målt sammenlignet med resultatene fra **Feil! Fant ikke eferansekilden.** og 5.1. Temperaturene inne i modulen er illustrert i Figur 5-11 fra testloopen starter til testen har stanset. Temperaturene har samme trend som i **Feil! Fant ikke referansekilden.** og 5.1 med at det er tre målinger som øg-skiller seg ut. Dette er temperatursensorene som ligger mellom celle 11-12, 1-2 og 1-2 *low*. Disse har temperaturer i denne rekkefølge på 56.46, 56.65 og 58.74°C. De resterende fire målingene er mellom cellene 9-10, 3-4, 5-6 og 7-8 i stigende rekkefølge med temperaturene 61.25, 61.95, 62.07 og

62.24°C. Det er nok en gang celle 7-8 som er det celleparet som har den høyeste temperaturen. En kan og merke seg at det er den høyeste temperaturen som er mål på cellepar 3-4, 5-6, 7-8 og 9-10 sammenlignet med resultatene fra **Feil! Fant ikke referanseilden.** og REF_Ref485722612 \r \h 5.1. Temperaturdifferansen mellom høyest og lavest måling er i dette tilfellet på 12.89°C som er litt lavere enn uten kjøling.



Figur 5-10 Oversikt over spenning, temperatur og utladning kapasitet av modulen når en kjører den karakteriserte loopen som blir brukt i alle tester, fra 100% SOC helt til testen stopper pga. restriksjonsbrudd.



Figur 5-11 Viser målinger av temperaturen mellom celler i en modul med aluminium som kjølerigg i modul og kjøling i serieretning. Der det er målinger mellom seks cellepar der det ene celleparet og har en sensor helt nederst på cellen. Luftstrømmer treffer cellepar 11-12 og forlater cellepar 1-2.

5.3.3 Analyse

Testen målte en uventet lav verdi på utladningskapasitet (i ett ord) på beskjedene 11.10Ah, noe som er en del lavere enn 12.61Ah som ble målt med seriekjøling uten aluminium og 12.09Ah som ble målt uten noen form for kjøling. Det kan virke som at noe av grunnen til dette er fordi luften kommer rett på riggene som står ut på hver side av cellen. Dette medfører mest sannsynlig at cellene som ligger bak den første cella får luftstrømmen på seg vil da ligge i ly for den resterende vinden. Dette kan en egentlig se fra temperaturmålingene også. Målingene ytterst på modulen til venstre og målingen mellom celle 11-12 som er den første cella som får vind på seg, har den laveste målingen som er gjort på testene så langt med 49.7 og 56.46°C. Dersom en ser tilbake, har resten av celleparene den høyeste målingen som er blitt gjort, bortsett fra målingen på utsiden av modul til høyre. En kan da tenke seg ~~da~~ at denne temperatursensoren ikke lengre ligger i ly av cellene. Det er fortsatt cellepar 7-8 som er den målingen som kjøle ned battericellen selv om de lå i ly for vinden. Men det virker her som at aluminium bare fungerer så lenge det er en varmetransport som kan ta bort varmen. Det kan virke som at det eneste aluminiumen får til er å øke overflatearealet (i ett ord) der varmen fordeler seg. Dette vil være positivt for det blir da lettere å kjøle ned, men da kreves det at en har noe som kan transportere bort varmen.

5.4 Parallell kjøling med aluminium

5.4.1 Introduksjon

I denne testen ser en på hvor stor forskjell det er på effekten av kjøleriggen i forhold til hvilken retning vinden kommer inn. fra. Testen fra 5.3 har akkurat det samme oppsettet men der kommer vinden i serieretning mens her er vinden nå satt i parallell retning.

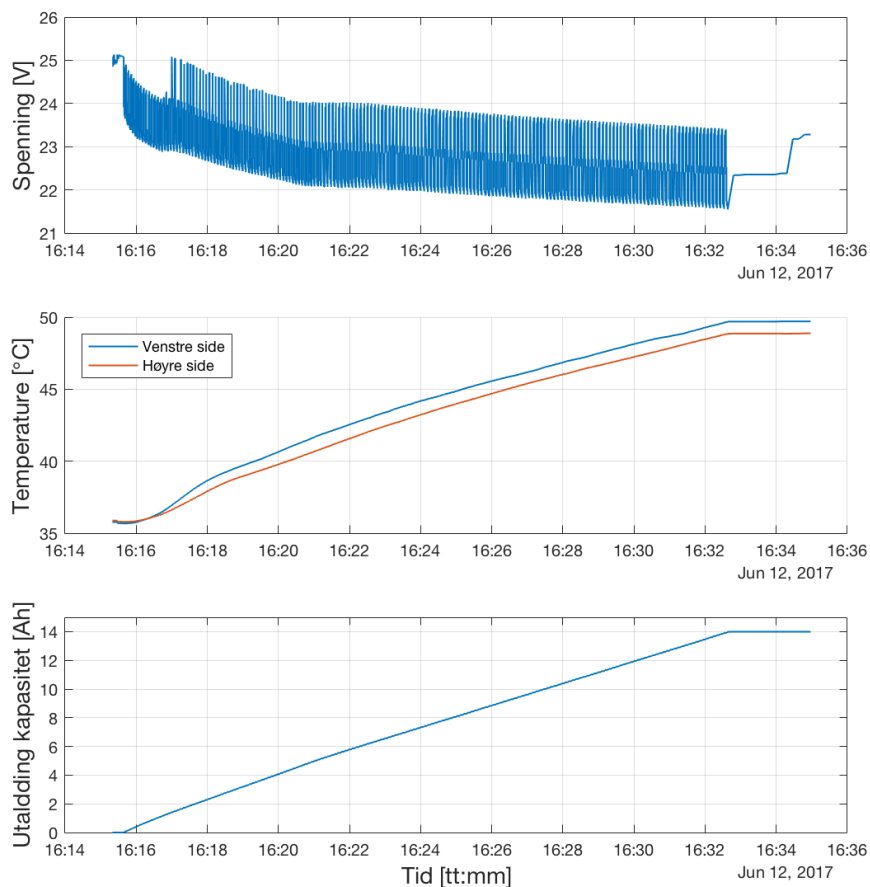
Aluminiumsplatene og temperatursensorene er plassert helt likt som i 5.3 der de tilsammen veier 20.82g og er 25mm tykke.



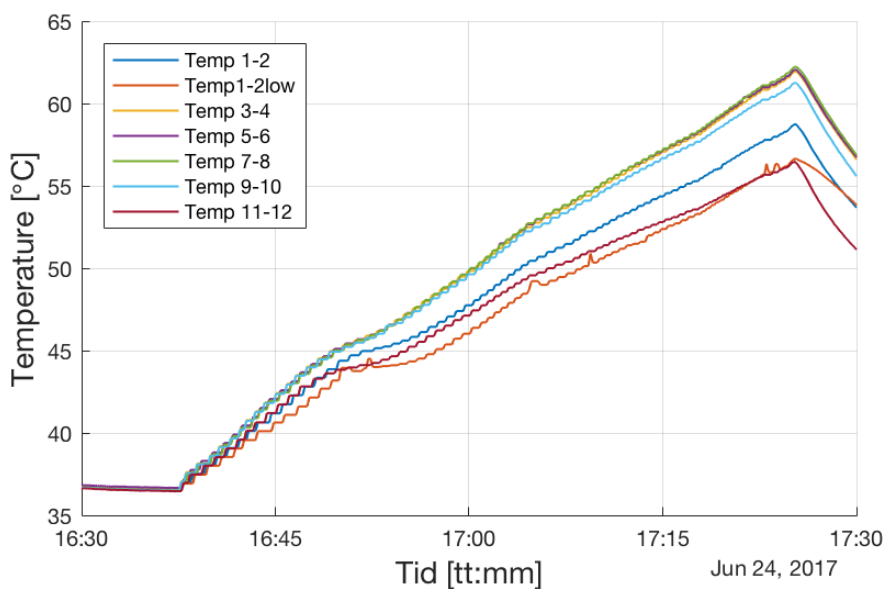
Figur 5-12 Viser hvordan vifte og modul er plassert ved parallellkjøring. I dette bilde er riggen ikke inkludert. Test utført ved IFE.

5.4.2 Resultater

Spenningsmåling, temperatur og utladningskapasitet er presentert i Figur 5-13. Spenningen i dette tilfellet kom til 25.13V før testloopen ble satt i gang, som er 0.7V fra maks grense. Den laveste spenning var på 21.55V som er det laveste som har blitt målt sammenlignet med 5.1, 0 og **Feil! Fant ikke referanseskilden.** Dette er også noe en kan se på utladnings kapasitet som sier noe om hvor lenge testen greide å levere ut strøm. Siden alle testene har samme strømforløp, vil dette tallet fortelle hvor lenge testen greide å kjøre, der utladnings kapasitet i denne testen er på 13.99Ah som er det høyeste som er målt. Som en ser fra spenningen på modulen, har denne testen også stoppet før den nådde 0% SOC. Temperaturen er årsaken til dette. Temperaturen på utsiden av både venstre og høyre side er nærme 50°C med temperaturer på 49.70 og 48.87°C. Når modulen er vridd på skrå, noe som er tilfelle her så vil venstre side være det som er vendt ut mot leseren som vist i Figur 5-12. Som i de foregående er det fortsatt de ytterste cellene som har den laveste temperaturen. Der cellepar 11-12, 1-2 og 1-2 low har følgende verdier på 56.46, 56.56 og 58.74°C. De fire resterende målingene har verdiene er 9-10 med 61.25°C, 3-4 med 61.95°C, 5-6 med 62.06 og 7-8 som igjen er den varmeste temperaturen med 62.24°C. Det at alle temperaturene er så høye har noe med at denne testen har kjørt lengre som vist over i verdien på utladningskapasitet og spenning. Differanse mellom den høyeste og laveste målingen på temperatur i denne testen er da høyre ytterste side med 48.87°C og cellepar 7-8 med temperatur på 62.24°C noe som gir en differanse på 13.37 der bare testen ute noe kjøling hadde en høyere verdi enn dette.



Figur 5-13 Oversikt over spenning, temperatur og utlading kapasitet av modulen med parallell kjøling og aluminiumsfolie når en kjører test loop, fra 100% SOC helt til testen stopper.



Figur 5-14 Viser målinger av temperaturen mellom celler i en modul med aluminium som kjølerigg. Der det er målinger mellom seks cellepar der det ene celleparet og har en sensor helt nederst på cellen. Vinden treffer normalt (parallell kjøling).

5.4.3 Analyse

Ut fra å sammenligne testene i 5.1, 0 og **Feil! Fant ikke referanseskilden.** med denne testen, er det tydelig at parallell kjøling med aluminium er det beste måten å kjøle modulen på ut fra disse resultatene. Med en utladningskapasitet på 13.99Ah er den en del høyere enn de andre testene. Det kan tenke seg at når vinden får treffe fra siden, treffer den mer direkte på alle cellene samtidig, noe som medfører at det blir en mer jevn fordeling av varmeutskifting. Denne testen har mange høye temperaturer på cellene som er målt. Dette er ikke nødvendigvis så negativt som det høres ut til. Denne testen kjørte en del lengre enn de andre testene, noe som også har ført til at cellene har fått mer tid til å skape varme på grunn av varmeutvikling som kommer med påsatt strøm som er nevnt i 2.8.1. At det er mange celler som har en så høy temperatur, betyr at det i denne testen har vært mer jevn fordeling av temperaturen, noe som betyr at parallellkjøring med aluminiumsplater som kjølerigg har gjort at temperaturen har greid å fordele seg. Det kan tenke seg at ved parallell kjøling så forstyrrer ikke cellene luftstrømmen til hverandre så mye, noe som gjør at vinden treffer aluminiumsplatene mer direkte og i større fart. Dette vil medføre bedre utskifting av luft.

Entropieffekten

5.4.4 Introduksjon

Som nevnt i 2.10.4 kan entropi ha en kjølede effekt avhengig av strømstyrken, strømretningen og hvilken SOC batteriet er i. I [3, 4, 22] er det bare vært testet for enkeltceller, og derfor kan det være interessant å se på hvordan celler i en modul vil påvirke dette. Det er særlig ved opplading dette er interessant å se på. Kjøretøy som har en motor som også kan jobbe som en generator i tillegg til en inverter som kan takle strøm i begge retninger, har da mulighet til å lade batteripakken ved å bruke KERS. Dette kan være en måte å lade batteripakken på, men også til nedkjøling. Det er vist fra tidligere testing at det er en kjølede effekt ved bruk av entropi [3, 4, 22]. Det er for modulen som for battericeller brukt en CC-CV strategi for ladning av modulen. Det eneste en kan legge merke til som vist i Figur 5-15 er at strømmen går i flere trinn som er synkende. Dette er gjort på grunn av sikkerhet og at dette er en gammel maskin så gjør at en må ha visse forhåndsreglers.

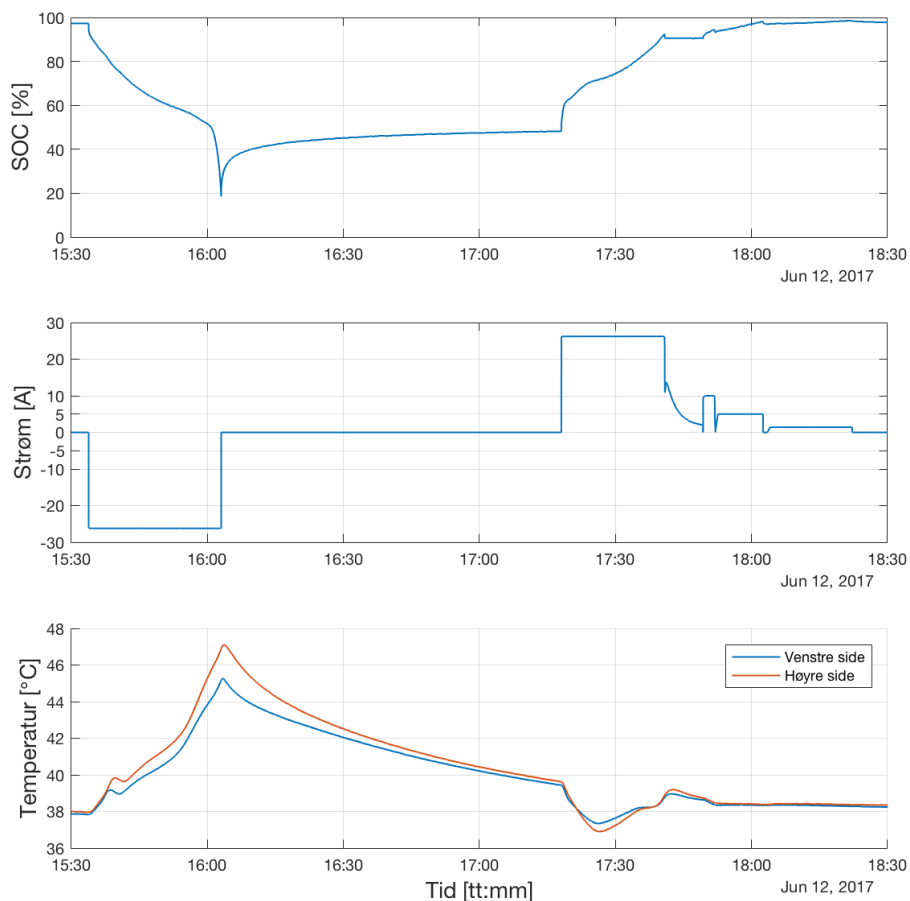
5.4.5 Resultater

I Figur 5-15 er det en oversikt over SOC, strøm og temperaturen som er målt. Det som er vist er en 2C utlading og ladning der CC-CV strategien er benyttet. Denne testen har blitt kjørt

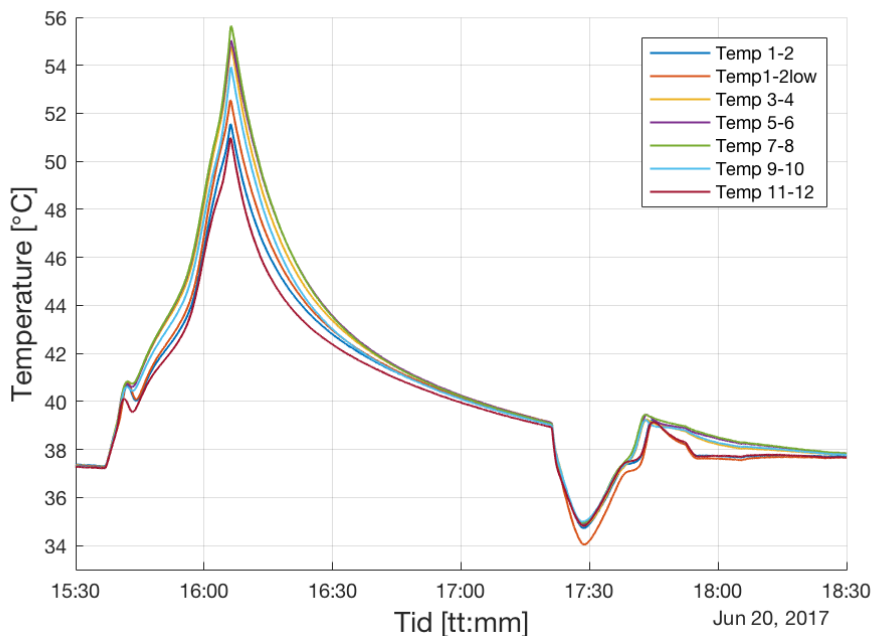
etter testloopen i 5.1 som er uten noe kjøling. Det er samme oppsett med to temperatursensorer på utsiden av modulen som vist i Figur 5-15 og syv temperatursensorer på innsiden av modulen som vist i Figur 5-16 der tallene i figuren representere hvilken celle de har plassert temperatursensoren sin imellom, der det er en celle med to sensorer på. Den ene av dem er plassert litt lengre ned på denne cellen. Det som er interessant i dette resultatet er å kunne se sammenhengen mellom SOC, strøm og temperatur. Fra 2.10.4 vet en at disse tre er det som bestemmer om det er et potensiale for kjøleende effekt ved entropi. I tillegg må en vite hva ΔS er. Dette har blitt diskutert i 2.10.4 og testet i tidligere masteroppgave fra 2016 [3].

Ut fra Figur 2-13 og Tabell 3 er det oversikt som gir et grunnlag for å kunne vurdere om det kan være potensiale for en kjøleende effekt på grunnlag av entropi, SOC og retning på strømmen. For utladning vil det da være slik at en kjøleende effekt vil være fra 70%-85% SOC mens for lading vil dette være fra motsatt fra 0-70% og fra 85-100% av SOC. Sammenligner en dette med resultatene i Figur 5-15 og Figur 5-16 ser en helt i starten ca. 15:45 (vist i grafen) at temperaturen har en liten dupp på veien oppover. Da er det utladning av celle som foregår, og batteriet befinner seg innenfor 70-85% av SOC. Fra figuren ser en at det er bare i dette området temperaturen går mot trenden. Går en lengre bort i figuren og ser når cellen har en 2C ladning ser en at temperaturen faktisk synker mye med en gang cellen begynner å bli ladet opp. For lading av cellen som nevnt over er det en potensiell kjøleende effekt mellom 70 og 85-100% SOC.

En ser fra figurene at det har en lengre periode der det synker her sammenlignet med for utladning. En ser også at temperaturen stiger en liten periode der før den synker igjen, for så å stige. Dette ca. mellom 70-85% SOC. Dette tyder på at dette og stemmer overens med teorien i 2.10.4. Noe som er verd å legge merke til er hvor mye temperaturen dropper når cellen blir ladet opp igjen, særlig fra målingene som er blitt gjort inne i modulen som en kan se i Figur 5-16. Temperaturdifferanser fra rett før ladning til når cellen begynner å lade seg, er fra 39 til 34.04°C som er målt på 1-2 low, som er en differanse på 4.94. Sammenlignet med målingene ytterst på modulen på høyre side som gikk fra 39.9°C til 36.91°C med differanse på 2, er dette en merkbar forskjell.



Figur 5-15 Utladning og ladning av modul ved 2C og CC-CV metode med en oversikt over SOC, strøm og temperatur på utsiden av batterimodulen



Figur 5-16 Temperaturmålinger på innsiden av batteriet ved 2C utlading og ladning ved å bruke CC-CV strategien. Er i samme tid som Figur 5-15.

5.4.6 Analyse

Som en ser fra Figur 5-15 og Figur 5-16 er det ved ladning av batteriet en har den største effekten av entropi som har med verdien på ΔS fra 0-100% SOC. Siden LCO batteriet som er brukt i denne oppgaven har en $\Delta S < 0$ helt fra 0-70% SOC og 85-100% SOC gjør dette at kjøleeffekten er desidert størst for lading, se Tabell 3. Dette har vært oppdaget før, men det som er bemerkningsverdig er den store temperaturforskjellen som skjer inne i modulen. Det kan virke som om målingen som er blitt gjort på utsiden av modulen blir noe påvirket av omgivelsestemperaturen som skal være på 36°C, mens de cellene som er inne i modulen ligger litt i skjerming for påvirkning. Det kan se ut som at modulen er den kjølede delen mens omgivelsetemperaturen er den som varmer opp i tilfellet med opplading etter en lang hvileperiode når alt har tilnærmet temperatur på 36°C.

Ser en på teorien fra avsnitt 2.9 om konveksjon, så har temperauten en tendens til å gi fra seg varme til et kaldere område. Dette kan være forklaringen på at temperaturen ytterst er varmere enn inne i modulen. Noe annet som er litt spesielt er HVIS en sammenligner høyre og venstre side av modulen ved opplading og utlading. Ved utlading er høyre siden av modulen varmere enn venstre siden, og det motsatte skjer ved opplading. På høyre siden sitter den negative pole på modulen, mens den positive sitter på venstre. Det kan virke som det kommer an på hvilken retning strømmen går i, og hvilken side som blir mest oppvarmet. Når cellen lades opp, ser en at venstre side i Figur 5-15 plutselig er den siden som er varmest. Den er ikke så dominerende som temperaturen på høyre side ved utlading, men en ser en forskjell. En ser også på temperatursensorene i modulen at det er forskjell på om det er opplading eller utlading i forhold til hvilket cellepar som har lavest temperatur. Duppen som er pga. kjøling ved opplading, er den kaldeste målingen gjort på temperatursensor 11-12 som er plassert nesten helt mot høyre, mens ved ladning er den kaldeste cellen 1-2 *low* som er plassert helt mot høyre. Det stemmer bra med det som ble nevnt ovenfor.

6 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres resultatet av testene som har blitt gjennomført. Det er i dette kapitlet prøvd å se viktige sammenhenger mellom teori og hva testene har resultert i. Gjennom arbeidet med modul- og celledtesting ser en i ettertid at det er noen tester som kunne ha vært gjort annerledes, og andre som kanskje like gjerne kunne ha vært utelatt. Uansett har testarbeidet gitt viktige erfaringer og hatt en betydelig læringsverdi. Målet med alle testene har vært å sørge for å få en oversikt over varmeutvikling i battericeller og se hvordan disse cellene takler forskjellige temperaturer men og hvordan de oppfører seg i en modul. Videre vil en se på enkle grep som kan redusere varmeutviklingen og vurdere effekten av disse tiltakene.

6.1 Celledtesting

6.1.1 Aluminiumfolie mellom battericeller

Studier som er blitt gjort på enkeltceller og parallellkoblede celler er blitt gjort for å kunne studere mer nøyaktig enkelthendelser og enkelt elementer som blir lagt til i en test for å så se hvordan dette slår ut på testene.

Siden det i denne oppgave var planlagt å teste aluminiumfolie mellom celler i en modul var det derfor interessant å se om bare aluminiumsfolie kunne ha en påvirkning på temperatur mellom to celler uten noe form for luftkjøling eller vannkjøling rundt cellene. Da aluminium har god ledeevne og er lett og billig er det vanlig å bruke dette materialet for å kjøle ned batterier på ved kombinasjon med for eksempel vann eller luft [32]. Det er i denne oppgave tre tester med to celler i parallell. For å finne ut hvor effektivt aluminiumsfolien er uten noe ekstra form for kjøling er det derfor naturlig å sammenligne resultatene av testen med aluminiumsfolie med den første testen fra testen som ble gjort uten noe form for kjøling. Et lite problem her er at testen uten noe form for kjøling ble gjennomført inne i en testboks (vanntett boks som er lagd for testing av PCM), så det er derfor usikkert å vite om dette har påvirket resultatene.

Om en antar at battericellen ikke blir påvirket av å være inne i en boks, ser en av testene at maksimal temperatur med aluminiumsfolie er på 58.1°C. og temperatur uten aluminium er på 58.16°C. Det kan ut fra dette se ut som aluminiumsfolie har liten kjølingseffekt.

En utfordring her er at testen uten kjøling ble stoppet på grunn av for høy temperatur. Dette kan en se på utladningskapasiteten. Testen uten noen for kjøling oppnådde bare 14133mAh sammenlignet med testen der det ble brukt med aluminium som nådde 20072mAh. Når en studerer nøye hele temperaturkurven for de to testene det er snakk om her, Figur 4-3 og Figur 4-7 ser en at testen uten aluminiumsfolie får en veldig høy temperaturøkning tidlig. Det kan virke som om boksen påvirker omgivelsestemperaturen. Men stemmer dette kan det bety at det har en kjølede effekt at tynn aluminium ligger mellom to battericeller. For å undersøke dette nærmere og kunne konkludert med noe, kunne det med fordel ha blitt gjennomført enda en test med celle i parallell i varmeskapet uten cellen i testboks.

6.1.2 Phase-change material

Enkeltcelle:

Testing av PCM er i denne oppgaven utført for (en) enkeltcelle i en testboks, men også for to celler i parallell i en større testboks. Testen som er blitt gjort med en enkeltcelle, er blitt sammenlignet med resultater fra prosjektoppgave fra høsten 2016 [4]. I dette prosjektarbeidet ble tilsvarende test gjennomført med uten PCM. Resultat fra denne testen kan være en interessant referanse for masterarbeidet. I Figur 4-5 og Figur 4-6 er resultatene fra test med enkeltcelle med PCM væske og enkelt celle uten noe form for kjøling. Figur 4-6 viser resultat fra to forskjellige celler. Når en sammenligner resultatene, er det liten forskjell mellom disse. En ser at testen fra Figur 4-5 med PCM at den har en høyere indre motstand og lavere utladningskapasitet, noe som har en sammenheng. Grunne til dette kan en forklare ut fra $V = RI$, øker R vil da I bli mindre for den samme spenningen. Dette vil da si at utladningskapasiteten som er mAh blir og mindre for den samme tiden.

Temperaturforskjellen som nevnt i 4.2.2 på 53.25°C for PCM væsken sammenlignet med 52.44°C og 48.67°C. En ser på de to testene uten PCM at der er en del individuelle forskjeller på cellen med hvor høy maks temperatur de når. Dette vil da si, selv om testen med PCM væsken har den høyeste maks temperatur trenger det ikke nødvendigvis bety at den er noe spesielt høyre forhold til referanse, når det er snak om så små differanser i dette tilfellet. Det kan være små forskjeller på måleutstyr eller battericeller som gjør dette.

Ut fra resultatene er det nok mulig å si at PCM kjølingen ikke har hatt den effekten som er ønsket i dette tilfellet. Det er to alternativer her på hvorfor det ikke har virker som det skal. Den første er at kokepunktet på PCM væsken er på 60°C. Dette kan medføre at PCM væsken ikke har noe mer spesiell effekt en det å utnytte varmekapasiteten den har. Når den er nådd vil PCM væsken bare følge temperaturen til battericellen lineært før den når sitt faseforandringsområde som vist i 2.10.3. For å kunne vite om dette er realiteten burde det blitt gjort en test der en kjørte temperaturen opp i 60°C, men på grunn av sikkerhetsaspekter er dette ikke blitt gjort. Alternativ to er at det har vært for lite PCM kjølevæske rundt battericellen. Test boksen som er brukt er bygd veldig lite så det er snak om veldig små mengder væske som er rundt cellen.

Celler i parallell:

PCM væsken er i denne masteroppgaven og testet for to celler i parallell i en større test boks sammenlignet med boksen for enkeltcellen. I dette tilfelle er testen gjort med og uten PCM væske i boksen for å ha en bedre referanse. Ulempen blir her at testen ute PCM inne i en boks uten noe bevegelse av luften kan bli i overkant utfordrende for batteriene med tanke på muligheten til å gi fra seg varme. Fra 2.9.2 har en sett at farten på bevegelsen luften har vil ha noe å si på effekten den har av kjøling. Når cellene er plassert slik vil da luften fort nå sin varmekapasitet som er på 1.012 J/gK som ikke er så mye sammenlignet med f.eks. Vann på 4.1813 J/gK. Dette vil kunne føre til at denne referanse blir unaturlig dårlig sammenlignet med testen med PCM væsken i den samme boksen. I Figur 4-7 og Figur 4-8 er resultat fra sammenligning mellom to celler i parallell med og uten PCM væske framstilt. Det er store differanser i målingen i denne testen. Testen uten PCM har i dette tilfellet stoppet på grunn av for høyre temperaturer i battericellen som betyr at den har nadd 60°C før testen er over, noe som har medført at den har stoppet. Dette er tydelig å se ut fra Figur 4-8. Utdanningskapasiteten i testen viser og hvor stor forskjell det er på dem.

En ser og fra Figur 4-7 at temperaturen stiger veldig raskt oppover ved test uten PCM. Sammenligner en resultatene med testen som er gjort med aluminiumsfolie mellom cellene, ser en at det i tilfellet uten PCM, så går det mye fortere med øking av temperatur sammenlignet med test med aluminiumsfolie. Om en antar at kjøleeffekten av aluminiumsfolie mellom to battericeller ikke hadde den store effekten vi dette da gi en indikator på at forholdene inne i test boksen er litt mer krevende for battericellen en det hadde

vært om den hadde blitt testet kun i et temperaturkammer uten test boks. Dette er noe en bør ha i bakhodet en vurdere resultatene som blir fremstilt i denne masteroppgaven.

Når en ser på resultatene fra testen med PCM i Figur 4-7 viser resultatene at PCM væsken har en tydelig effekt sammenlignet med uten. Med en maks temperaut på 44.44°C er dette mye lavere en test uten PCM væske men og testen med aluminium mellom cellen. Fra testen med en enkeltcelle viste resultatene at PCM væsken ikke kunne utnytte kjøleeffekten av faseforandring på så lav temperatur som den testen opplevde. Stemmer dette vil det samme gjelde for testen med to celler i parallell med PCM væske, der temperaturen er mye lavere en for testen ved enkeltcelle. Det kan virke som at grunne til at cellene i parallell har hatt en så bra kjøleende effekt kommen av mengden PCM væske som er tilsatt i tekstboksen. Testen for to celler i parallell har en større test boks noe som gjør at mer væske blitt tilført. Dette kan ha medført at det har tatt lengre tid før PCM væsken har nådd sin varmekapasitet. Dette kan forklares matematisk med Formel 2-15 der areal og tykkelse på et material har noe å si for ledeevnen til et material. Med et større volum skal det mer til for at varmen brer seg lettere ut og da vil det og ta lengre tid før temperatur i PCM væsken og batteriet blir den samme. Ved bruk av Formel 2-17 vil temperaturen på batteriet være T_{ω} mens temperaturen i PCM væsken vil da bli T_{∞} . Så lenge T_{∞} er større en T_{ω} vil PCM væsken kjøle cellene.

Selv om ikke væsken har fått vist sitt fulle potensial med å jobbe i faseforandlingsområdet, ser en gevinst av å ha et flytende material i direkte kontakt med battericeller. Det at battericellene i tilfellet med to celler i parallell holder en så lav temperatur har nok mye å si med at all væsken kan hele tinde være i direkte kontakt med hele overflaten til battericellene. Dette er mye lettere å oppnå for flytende stoffer sammenlignet med gasser eller faste stoffer.

6.1.3 Elektrokjemisk impedans spektroskopi

Formålet med testene som vart gjort med EIS var å få en bedre forståelse om hvordan temperaut påvirket motstanden i battericeller ved å se på impedansen til en battericelle. Testene ble analysert i et Nyquist diagram der en sammenlignet resistans og reaktans. Dette er en kjent metode som blir brukt av folk som skal studere EIS av et batteri [16]. Som forklart i 2.7 så kan deler av en slik kurve representere komponenter av batteriet som er forklart i Figur 2-7. Med en slik test kan en ut fra grafen finne ut hvordan de forskjellige temperaturene som er testet har påvirket battericellen. Som diskutert i 4.3 og som en kan observere i Figur 4-10 så er det bare mulig å se en halvsirkel fra figuren. Dette gjør at man ikke kan vite om det er

$Zarc_1$ eller $Zarc_2$ som dominere i halvsirkelen, der $Zarc_1$ slår ut for høye mens $Zarc_2$ slår ut for medium frekvenser. Det en kan anta er at det nok her er en flytende overgang. Halen i Figur 4-10 gjelder for lave frekvenser og blir kallet Warburg impedansen. Denne er da litt letter å se med sin karakteristiske hale form.

Gjennom å sammenligne de forskjellige grafene i Figur 4-10 ser en tydelig at SOC og temperatur har mye å si på impedansen i cellen. Det ser ut til at alltid den lavest SOC som gir den høyeste halvsirkelen og halen. For indre motstand virker det som den ikke har like stor innflytelse på temperatur sammenlignet med de andre impedansene. Indre motstand kan tolkes ut fra grafene ved å se når kurven skjærer x-aksen. Når SOC blir mindre så er det en trend ved alle kurvene at den strekker seg lengre ut og impedansen øker både i imaginær og reell retning. Det ser ut til at dette også skjer etter en liten stund altså når frekvensen har blitt litt lavere. Som vist i Figur 2-7 så blir frekvensen større jo nærmere null en kommer i figuren, altså motsatt vei av verdiene til reelle og imaginære impedansen. For målingen gjort på -6°C og 5°C er det et stort skille fra 30% SOC til de som er høyere. Dette gjelder ikke når omgivelsestemperaturen er på 15°C og 25°C . Da er det kun SOC ved 15%. For 45°C er det minimale forskjeller på dette.

Når det gjelder halen, viser den noe av den samme tendensen som for halvsirkelen. Den minste % av SOC gir størst hale. En ser og at halen blir større jo høyere temperatur er. Ved 25°C og 45°C skiller halen seg ut med å være mye større en de andre test-temperaturene i relativt til resten av kurven. Halen eller Warburg impedansen som vent i 4.3.3 er diffusjonen i cellen.

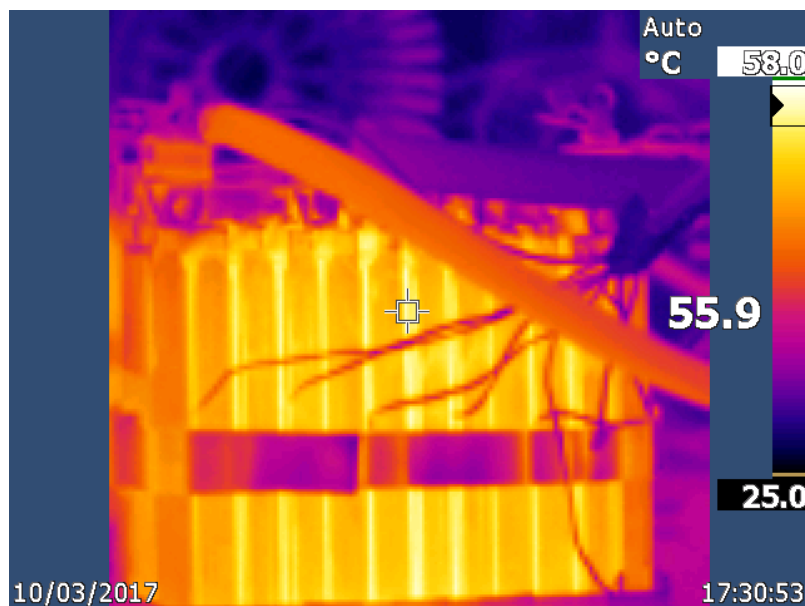
6.2 Modultesting

Målet med å teste en hel modul var for å kunne se hvordan temperaturen fordelte seg når flere celler som er koblet sammen tett. Ved en slik test blir det mer reelle i forhold til hvordan en battericelle i et batteri har det rundt omgivelsene. Et batteri kan bestå av flere moduler som er koblet sammen. Å teste en hel batteripakke vil kreve mye strøm og tid til å koble opp testen og sikkerheten er da enda viktigere. Derfor er det å teste en enkeltmodul en fin forenklet tilnærming til en hel batteripakke. Fire tester er gjennomført i denne masteroppgaven:

- Uten noe kjøling med bare omgivelsestemperatur på 36°C fra varmeskapet.
- Kjøling av modul i vifte i seiere retning.

- Kjøling av modul med vifte i serie retting med aluminiumsplater i mellom
- Kjøling med vifte i parallell retning med aluminiumsplater i mellom.
- Hvordan entropieffekten påvirker temperatur i modul.

Ved å teste modulen i et temperaturkammer uten noe form for kjøling har en, en god sammenligning med de andre testene der det er brukt forskjellige tiltak for kjøling modulen. Det er og en fin måte å se hvordan varmfordelingen i batteriet brer seg. Gjennom alle testene hadde modulen ni temperatursensorer. Mellom hvert cellepar i tillegg til at et cellepar hadde en til feste helt nedres på cellen og en på utsiden av hver ende. Fra alle testene som er gjort på modulen ser en at det alltid er de to ytterste sensorene som har lavest temperatur utenom ved ladning av modulen ved 2C. Videre ser en at temperaturen er alltid varmest på di tre para som er plassert nærmest senter på modulen. I alle testene er det en differanse fra ytterste måling på modulen til måling på det varmeste celleparet i modulen på over 10°C. Den største differanse som er målt er på 13.702°C som kommer fra resultatene ved ingen kjøling av modul. I Figur 6-1 ser en tydelig temperaturforskjell på modulen i midten og på sidene noe som bekrefter det resultatene viser.



Figur 6-1 Illustrasjonen viser bilde som er tatt med et varmekamera mest testing av modul pågår.

Når de forskjellige testene har blitt gjennomført har det vært restriksjoner på de ytterste temperatursensorene på 50°C. Dette har medført at ingen av testene har greid å gjennomføre en hel testloop, altså fra 100-0% SOC. På grunn av dette kan en på en lett måte å se hvilken av testene som har ført til best kjøling ved å studere utladningskapasiteten. Siden alle har ca. samme strømforløp vil utladningskapasiteten si hvor lenge modulen da greier å kjøre en

testloopen. Resultatene viser at uten kjøling er den 12.09 Ah, med seriekjøling med vifte er den 12.61 Ah, seriekjøling med vifte og aluminium er den 11.10 Ah og ved parallell kjøling med vifte og aluminium er den på 13.99 Ah. Dette viser nok at luftkjøling hjelper en del i forhold til å ikke ha noe kjøling. Spørsmålet er om det hjelper nok. Parallellkjøring med aluminium er det som er det beste. Med parallellkjøring kjølede brer vinden seg mer jevnt ut over modulen i tillegg til aluminiumsplatene som hjelper til bedre varmetransport som videre føre til bedre kjøling, som vist fra resultatene.

Grunnen til at testen med seriekjøling med aluminiumsfolie leverte så dårlige resultater kan nok tenke seg å være på grunn av at vinden blåser rett på cellene i serie retting, da vil aluminiumen føre til at resten av platene ligger i ly fordi aluminiumen stikker ut på hver side. Det at denne testen prestere dårligere enn når det ikke er noe kjøling er merkelig men igjen så kan dette være på grunn av unøyaktige temperaturmålinger. Det er brukt forskjellige typer temperatursensorer i testingen av modulen. De som er plassert ytterst på modulen er forskjellig fra de som er inne mellom cellene. De som er plassert ytterst er nok litt mer unøyaktige og kan derfor være vanskeligere å tolke. En må regne med en usikkerhet på $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Dette gjør det vanskelig å tolke små differanser mellom høyre å venstre side på denne modulen. En ser det at det variere hvem av de to som er de varmeste ut fra hver test, men det er ikke noe logisk system på dette som har blitt oppdaget.

Når en ser på temperatursensorene som er inne i modulen og trendene der, ser en at det alltid er sensor mellom 1-2, 1-2 low og 11-12 som har de laveste temperaturene ved alle testene. Dette bekrefter og det som vart nevnt over om at temperaturen er varmes i midten. Sensoren som er plassert mellom 7 og 8 er den som alltid er høyest. Det er cellepar 7-8 og 5-6 som ligger nærmest midten, så dette stemmer bra med at temperaturen er høyst i midten. Det at det er alltid 7-8 som er varmest og ikke 5-6 kan være nøyaktighet i sensorer men også forskjell på indre motstand i cellene som gjør at dette celleparet alltid får en litt høyere temperatur. En annen ting som er litt interessant er hva som skjer med temperatursensoren som er plassert nederst på cellepar 1-2 som blir kalt 1-2 low. Denne ligger alltid litt lavere en måling 1-2 i alle testene, så lenge testen går. Med en gang testen er over ser en at 1-2 low utlignes med 1-2. Det kan da virke som at når modulen har påsatt strøm så er det høyest temperaut i øver del av battericellen, men så snart det er pause og ingen strøm går igjennom battericellen blir dette utlignet.

Ved å se på en ren 2C oppladning og utladning og ikke bare selve testloopen finner en mye interessant informasjon. Som det er nevnt i 5.4.6 ser en at det er en effekt av entropi både ved ladning og utladning av modulen. Størst effekt er det ved ladning av modulen. Dette forklares ved at entropiforandringen i LCO cellen i denne masteroppgaven har en ΔS som store deler av tiden fra 0-100% SOC er mindre enn null, se Figur 2-13. Dette gjør da at det er en potensiell større effekt for kjøling ved oppladning. En ser faktisk fra temperaturdataen i Figur 5-16 at denne kjøleeffekten er så stor at temperaturen inne i bakteriecellen blir kaldere enn omgivelse temperaturene som er på 36°C. Den kaldeste målingen er på ca. 34°C. på 1-2 low. En annen ting som er verd å legge merke til med 2C opp/utladning, er hvordan temperaturen som er målt ytterst på modulen variere etter om det er oppladning eller utladning. Ved 2C utladninger det kart at høyre side av modulen er varmest mens når det er 2C oppladninger det venstre side som er varmest. Siden dette forandre seg etter retning på strømmen så er det lite sannsynlig at denne variasjonen skyldes målefeil. Hvordan denne modulen er koblet opp så er det slik at venstre side er positivt kontaktpunkt mens høyre side er negativt kontaktpunkt. Det kan virke da som at der den negative polen sitter vil det være størst varmeutvikling ved utladning sammenlignet med den positive polen og motsatt ved oppladning.

7 Konklusjon

I denne masteroppgaven har analyse av litium-ion battericeller og moduler med fokus på varmeutvikling blitt gjort. Cellene som er brukt kommer fra Melasta Inc., og blir brukt i batteripakken til racerbilen til Revolve NTNU i 2017. Det er åtte forskjellige tester som har blitt gjennomført for å kunne få en bedre forståelse av temperaturutvikling i battericeller og moduler.

- Gjennom å studere enkeltceller for mange forskjellige temperaturer og se på EIS analyse av dem, blir konklusjonen at impedansen i battericellen øker ved lavere temperatur. Det viser seg også at ved lavere SOC vil impedansen øke i cella. En ser også at ved lave temperaturer fra 5°C og nedover får en stor økning i impedansen i battericellen fra 30% SOC og nedover. For høyere temperaturer kommer ikke denne økningen før ved 15% SOC. Resultatene viser også at ved høye temperaturer skyldes økt impedans diffusjon i battericellen, mens for lavere temperaturer skyldes det motstand og kapasitans i elektrodeoverflaten, ladeoverføringsmotstand og *double-layer capacitance*. Testen viser også at indre motstand synker med økt temperatur.
- Bruk av PCM for å kjøle battericeller har vist seg å være effektivt så lenge en har nok volum av PCM'en. Ved å teste to celler i parallell med og uten PCM viser resultatene en differanse på 13.72°C ved høyeste temperaturmåling ved gjennomført test. PCM som er brukt i denne oppgaven har et kokepunkt på 60°C. Det er i dette området PCM virkelig skal kunne fungere best. Ingen av testene med PCM har kommet så høyt så den fulle effekten har ikke blitt utforsket. Kjøleeffekten som her er opplevd kommer av varmekapasiteten til PCM og dens evne til å være flytende og ikke ledende som medfører at den har stor kontaktflate med battericellen som videre fører til god kjøling.
- Ved modultesting kom det tydelig fram at det var en stor temperaturforskjell fra ytterst på sidene av modulen til de innerste målingene av modulen, der den høyeste differansen var på 13.7°C uten kjøling. Det viste seg at den mest effektive måten å

kjøre modulen på var ved bruk av aluminiumsfolie som kjøleribbe og ha en vifte som blåste normalt på modulen. Ved denne teknikken fikk testen en utladningskapasitet på 13.99Ah sammenlignet med 11.10Ah, 12.61Ah og 12.09 fra de andre testene. Utfra resultatene viste det seg også at temperaturen nede på battericellene ved opp/utladninger lavere sammenlignet med lengre oppe på battericellene. Dette jevner seg så ut når det ikke går strøm gjennom modulen. Ved 2C opp- og utladning har det vist seg at temperaturen er høyest på høyre side av modulen (negativ pole) ved utladning, mens ved oppladninger den høyest på venstre side (positiv pole). Entropieffekten er tydelig og kommer til syne både ved opp og utladning. Spesielt ved oppladning på 2C ser en tydelig en effekt når omgivelsestemperaturene er på 36°C, mens laves målt temperatur mellom celler er 34°C.

Konklusjonen er at en slik modul bør ha en form for kjøling som får temperaturen, særlig i senter av modulen ned. Siden virkningsgraden av cellen går nedover etter 40°C vil det i dette tilfelle være en fordel å ha et kjølesystem som kan håndtere dette. Lufting bare ved hjelp av vind har vist seg å ikke være godt nok for å holde en tilstrekkelig lav temperatur på cellene i midten av modulen dersom ønsket er å la battericellen jobbe i ideell omgivelsestemperatur.

8 Videre arbeid

Ved gjennomføring av denne masteroppgaven har mange nye veier åpnet seg på vegen som en dessverre ikke har fått tid til å undersøke mer. I et eventuelt videre arbeid vil jeg trekke frem det å modulere batterimodulen i f.eks. COMSOL eller MATLAB som en ting så kan være veldig nyttig. Det kan være interessant å se på flere typer kjølemetoder for kjøling av modul, som vannkjøling ved kombinasjon av kjøle-ribber av aluminium. PCM er bare testet på enkeltceller, dette er noe som burde være prøvd på en hel modul. Finne en PCM som har et lavere kokepunkt for å lettere oppnå faseforandring. Designe egne kjølerigg som er mer profesjonell og gjennomtenkt en det som er brukt i denne masteroppgaven er og spennen å kunne testen på labb. Kunne og være interessant å se mer på EIS for høyere temperatur. Det blir nevnt i denne masteroppgaven at battericeller taper seg når de kommer høyere en 40°C i temperatur. Så det å gjøre en EIS studiet på så høye temperaturer kunne være interessant for å se hva som skjer med cellene da.

Teste NMC eller NCA celler for å se om det finnes andre typer litium-ion celler som kan være bedre til det formål som LCO cellen er testet for i denne masteroppgaven.

Å se på alternative måter å sette sammen cellen i en modul kan være inntrengt å se på. Plassering av battericellen i en gitterstruktur for å holde en viss avstand mellom de for å kunne få en lettere kjøling av spesielt battericellen som er i senter av modulen som vist i testene har en veldig høy temperatur.

Det kunne og være interessant å se hvordan PCM væsken taklet en thermal runaway. Det skal være brannhemmende men er det nok til å unngå noe slikt.

Entropi har vis seg å ha en kjølede effekt med testene som er gjennomført ved omgivelsestemperatur på 36° . Det kunne være interessant å se hvor lang ned i omgivelsestemperatur kan e gå før denne effekten slutter. Er det en sammenheng mellom omgivelsestemperatur og kjølede effekt av entropi kan et spørsmål være.

Referanser

- [1] (2017). *Revolve NTNU*. Available: <http://www.revolve.no/>
- [2] M. S. Skåravik and E. Børsheim, "Energy storage, and design of tractive system for EV application," NTNU, 2014.
- [3] S. Nordang, "Electric race car: Investigation of Characteristics, Cycle life, and Safety Aspects Regarding Lithium-ion Battery Cells," Electric race car: Investigation of Characteristics,, 2016.
- [4] E. Klokkehaug, "Test of Lithium-ion battery cells for electric car Application-Continuation of Master's thesis project spring 2016," 2016.
- [5] A. C. Bøeng, "Konsekvenser for Norge av EUs fornybardirektiv," 2010.
- [6] B. Scrosati and J. Garche, "Lithium batteries: Status, prospects and future," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 9, pp. 2419-2430, 2010.
- [7] K. Xu, "Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries," *Chemical reviews*, vol. 104, no. 10, pp. 4303-4418, 2004.
- [8] M. Yoshio, R. J. Brodd, and A. Kozawa, *Lithium-ion batteries*. Springer, 2009.
- [9] S. Lee, J. Kim, J. Lee, and B. Cho, "State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge," *Journal of power sources*, vol. 185, no. 2, pp. 1367-1373, 2008.
- [10] W.-Y. Chang, "The state of charge estimating methods for battery: A review," *ISRN Applied Mathematics*, vol. 2013, 2013.
- [11] N. D. Williard, "Degradation analysis and health monitoring of lithium ion batteries," 2011.
- [12] K. Amine *et al.*, "Factors responsible for impedance rise in high power lithium ion batteries," *Journal of power sources*, vol. 97, pp. 684-687, 2001.
- [13] R. Mahamud and C. Park, "Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 13, pp. 5685-5696, 2011.
- [14] H.-G. Schweiger *et al.*, "Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells," *Sensors*, vol. 10, no. 6, pp. 5604-5625, 2010.
- [15] W. Weydanz and A. Jossen, "Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen," *Re-ichardt Verlag*, 2006.
- [16] N. Zhai, M. Li, W. Wang, D. Zhang, and D. Xu, "The application of the EIS in Li-ion batteries measurement," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, vol. 48, no. 1, p. 1157: IOP Publishing.
- [17] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, H. Walz, T. Soczka-Guth, and D. Sauer, "Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II: Modelling," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 12, pp. 5349-5356, 2011.
- [18] S. Zhang, K. Xu, and T. Jow, "EIS study on the formation of solid electrolyte interface in Li-ion battery," *Electrochimica acta*, vol. 51, no. 8, pp. 1636-1640, 2006.
- [19] E. Barsoukov and J. R. Macdonald, *Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications*. John Wiley & Sons, 2005.
- [20] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, and C. Chen, "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery," *Journal of power sources*, vol. 208, pp. 210-224, 2012.

-
- [21] K. Onda, T. Ohshima, M. Nakayama, K. Fukuda, and T. Araki, "Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles," *Journal of Power sources*, vol. 158, no. 1, pp. 535-542, 2006.
- [22] V. V. Viswanathan *et al.*, "Effect of entropy change of lithium intercalation in cathodes and anodes on Li-ion battery thermal management," *Journal of Power Sources*, vol. 195, no. 11, pp. 3720-3729, 2010.
- [23] R. Matthe, L. Turner, and H. Mettlach, "VOLTEC battery system for electric vehicle with extended range," *SAE International Journal of Engines*, vol. 4, no. 2011-01-1373, pp. 1944-1962, 2011.
- [24] J. L. Z. Zhu, "Battery Thermal Management Systems of Electric Vehicles," 2014.
- [25] C. M. Franck, "Technology of Electric Power System Components," 2016.
- [26] J. P. Holman, *Heat transfer*. McGraw-hill, 2010.
- [27] R. Kizilel, R. Sabbah, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 2, pp. 1105-1112, 2009.
- [28] P. Faber and L. Garby, "Fat content affects heat capacity: a study in mice," *Acta Physiologica*, vol. 153, no. 2, pp. 185-187, 1995.
- [29] D. Zhou, C.-Y. Zhao, and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications," *Applied energy*, vol. 92, pp. 593-605, 2012.
- [30] D. Heim and J. A. Clarke, "Numerical modelling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r," *Energy and Buildings*, vol. 36, no. 8, pp. 795-805, 8// 2004.
- [31] S. International. (2017). *2017-18 Formula SAE® Rules Table of Contents*. Available: [http://www.fsaeonline.com/content/2017-18 FSAE Rules 9.2.16a.pdf](http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20FSAE%20Rules%209.2.16a.pdf)
- [32] S. A. Khateeb, M. M. Farid, J. R. Selman, and S. Al-Hallaj, "Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter," *Journal of Power Sources*, vol. 128, no. 2, pp. 292-307, 2004.

Appendiks

Appendiks A – Datablad fra Melasta

Appendiks B – Hele tidsforløpet av EIS testene

Appendiks C – Hele tidsforløpet av testing ved PCM og aluminiumsfolie

Appendiks D – Sammenligning av alle temperaturmålinger for modultesting ved maksimal temperatur

Appendiks E – Hele tidsforløpet av testing av modul

A.

深圳市风云电池有限公司
产品规格书 (Product Specification)

SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD
型号 (Model No.) SLPBB042126H 6550mAh 10C 3.7V

1. 序言 PREFACE

此规格书适用于深圳市风云电池有限公司的锂聚合物可充电电池产品

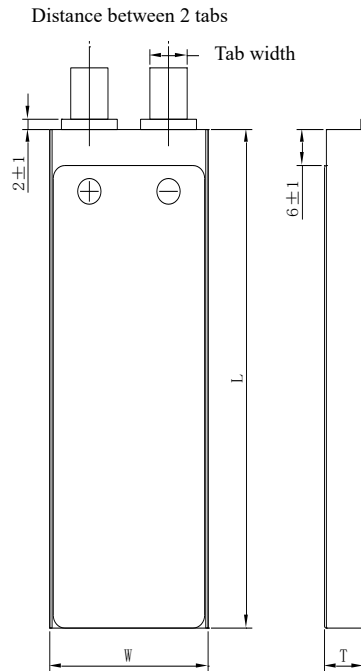
The specification is suitable for the performance of Lithium-Polymer (LIP) rechargeable battery Cells produced by the SHENZHEN MELASTA BATTERY CO., LTD.

2. 型号 MODEL

SLPBB042126H 6550mAh 10C 3.7V

3. 产品规格 SPECIFICATION

单颗电池规格 Specifications of single cell



◆ 标称容量 Typical Capacity①		6.55Ah
◆ 标称电压 Nominal Voltage		3.7V
◆ 充电条件 Charge Condition	最大电流 Max. Continuous charge Current	13.1A
	峰值充电 Peak charge current	64A(≤0.5sec)
	电压 Voltage	4.2V±0.03V
◆ 放电条件 Discharge Condition	Max Continuous Discharge Current	65.5A
	Peak Discharge Current	98.25A(≤3sec)
	Cut-off Voltage	3.0V
◆ 交流内阻 AC Impedance(m ohm)		<3.0
◆ 循环寿命【充电:1.0C,放电:10C】 Cycle Life【CHA:1.0C,DCH:10C】		>100cycles
◆ 使用温度 Operating Temp.	充电 Charge	0℃~60℃
	放电 Discharge	-20℃~70℃
◆ 电芯尺寸 Cell Dimensions	厚度 Thickness(T)	10.7±0.3mm
	宽度 Width(W)	42±0.5mm
	长度 Length(L)	127.5±0.5mm
	极耳间距 Distance between 2 tabs	21±1mm
◆ 极耳尺寸 Dimensions of Cell tabs	极耳宽度 Tab Width	12mm
	极耳厚度 Tab Thickness	0.2mm
	极耳长度 Tab Length	30mm
◆ 重量 Weight(g)		128.5±3.0
①标称容量: 0.5CmA,4.2V~3.0V@23℃±2℃ Typical Capacity:0.5CmA,4.2V~3.0V@23℃±2℃		

制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力
Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

4.电芯性能检查及测试 BATTERY CELL PERFORMANCE CRITERIA

在进行下列各项测试前每颗电池应用 0.5C 放至 3.0V。如果没有特别规定，测试应在电池交付 1 个月内按以下各项条件进行：

Before proceed the following tests, the cells should be discharged at 0.2C to 3.0V cut off. Unless otherwise stated, tests should be done within one month of delivery under the following conditions:

环境温度 Ambient temperature: 20℃±5℃

相对湿度 Relative Humidity: 65±20%RH

注意标准充放电为 Note Standard Charge/Discharge Conditions:

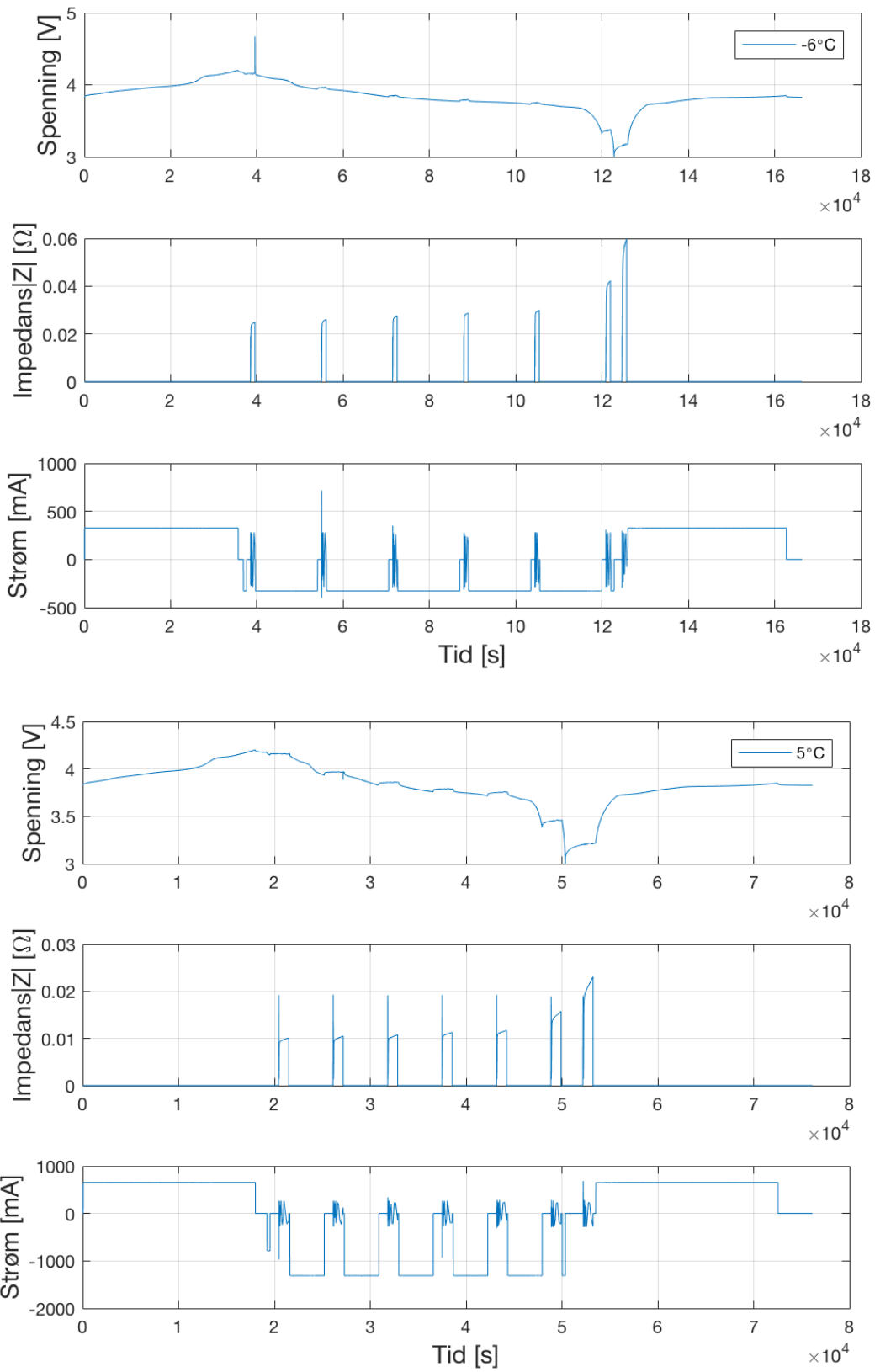
充电 Charge: 以 0.5C 电流恒流充电至限制电压 4.2V 时,改为恒压充电,直到截止电流为 0.05C 时停止充电;The battery will be charged to 4.2V with 0.5C from constant current to constant voltage, when the current is 0.05C, stop to charge.;

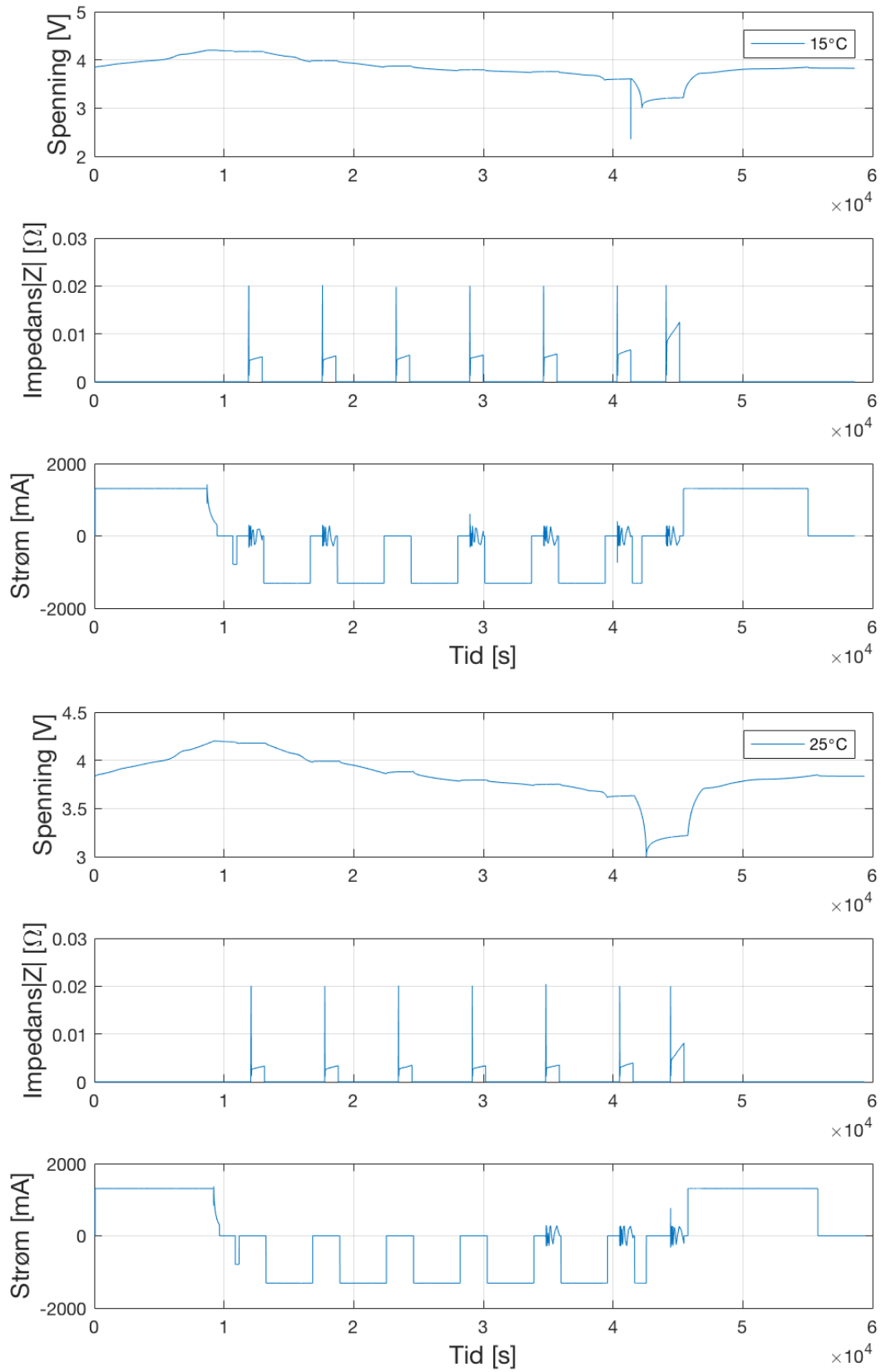
放电 Discharge: 0.5C to 3.0V/cell

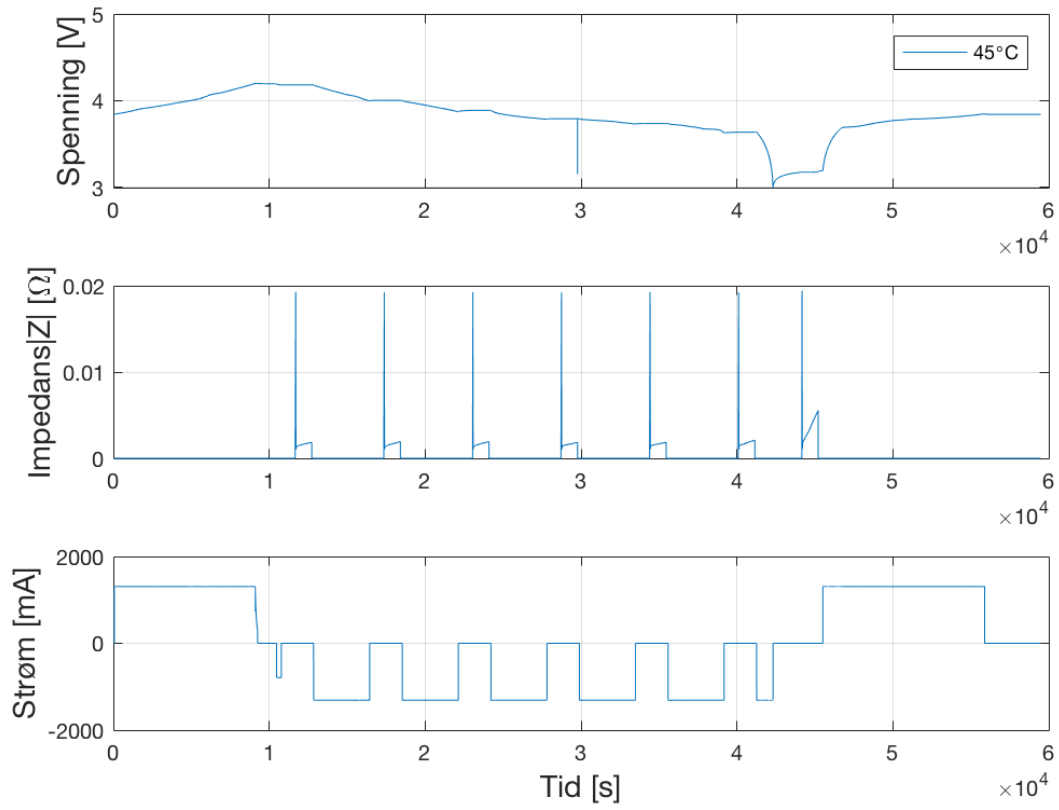
测试项目 Test	单位 Unit	规格 Specification	条件 Condition	备注 Remarks
容量 Capacity	mAh	≥6550	标准充放电 Standard Charge / Discharge	允许循环 3 次 Up to 3 cycles are allowed
开路电压 Open Circuit Voltage (OCV)	V	≥4.15	标准充电后 1 个小时内 Within 1 hr after standard charge	单位颗 Unit cell
内阻 Internal Impedance (IR)	mΩ	≤3.0	充满电后用 1kHz 测试 Upon fully charge at 1kHz	*
高倍率放电 High Rate Discharge (10C)	min	≥5.4	标准充电/休息 5 分钟 用 10C 放电至 3.0V Standard Charge/rest 5min discharge at10C to 3.0V	允许循环 3 次 Up to 3 cycles are allowed
低温放电 Low Temperature Discharge	min	≥210	标准充电后存储在-20±2℃环境中 2 小时 然后用 0.2C 放电 Standard Charge, Storage:2hrs at-2 0±2℃ 0.2C discharge at 0±2℃	3.0V/cell Cut-off
自放电 Charge Reserve	min	≥90% (初始容量 First Capacity)	标准充满电后 20 度贮藏 30 天, 标准 0.5C 放电 Standard charge Storage at 20 degree: 30days Standard discharge (0.5C)	3.0V/cell Cut-off
寿命测试 Cycle Life Test	Cycle times	≥100	充电: 1C 充电至 4.2V, 放电, 10C 放电至 3.0V, 当放电容量降至初始容量的 80%时, 所完成的 循环次数定义为该电芯的循环寿命 Charge:1C to 4.2V ,Discharge: 10C to 3.0V, 80% or more of 1 st cycle capacity at 15C discharge of Operation	Retention capacity 容量保持 ≥ 80% of initial capacity
短路测试 External Short Circuit	N/A	不着火不爆炸 No Fire and No Explosion	标准充电后, 在 20℃±5 环境中用超过 0.75mm ² 金属丝将单颗电池短路至电池恢复到常温。 After standard charge, short-circuit the cell at 20℃±5℃ until the cell temperature returns to ambient temperature.(cross section of the wire or connector should be more than 0.75mm ²)	*

4
制造商保留在没有预先通知的情况下改变和修正设计及规格说明书的权力
Melasta reserves the right to alter or amend the design, model and specification without prior notice

B.

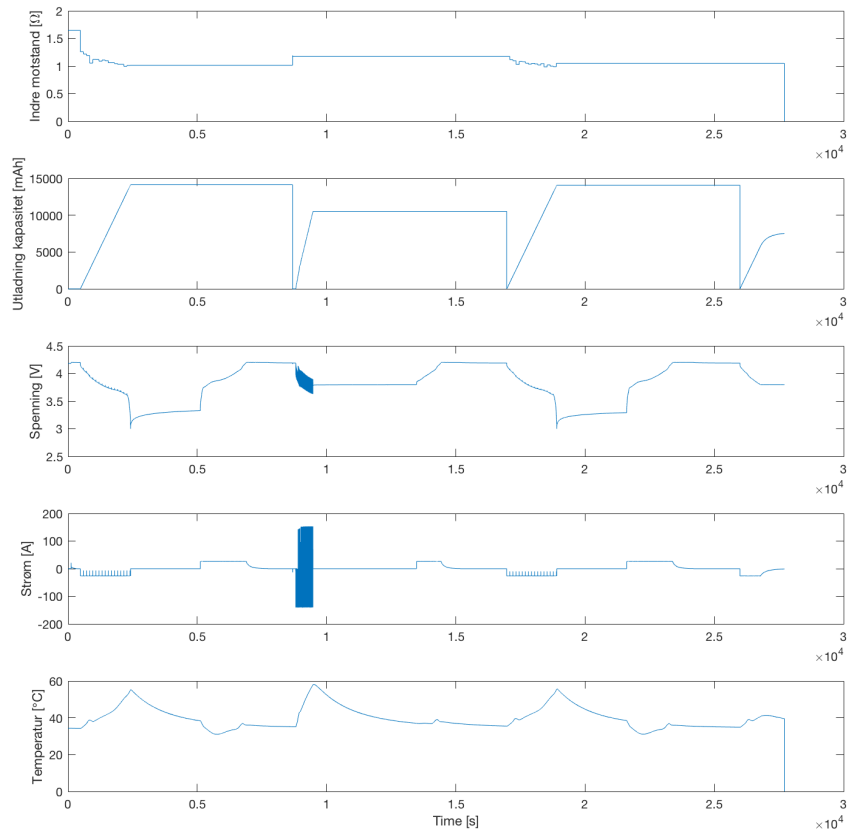




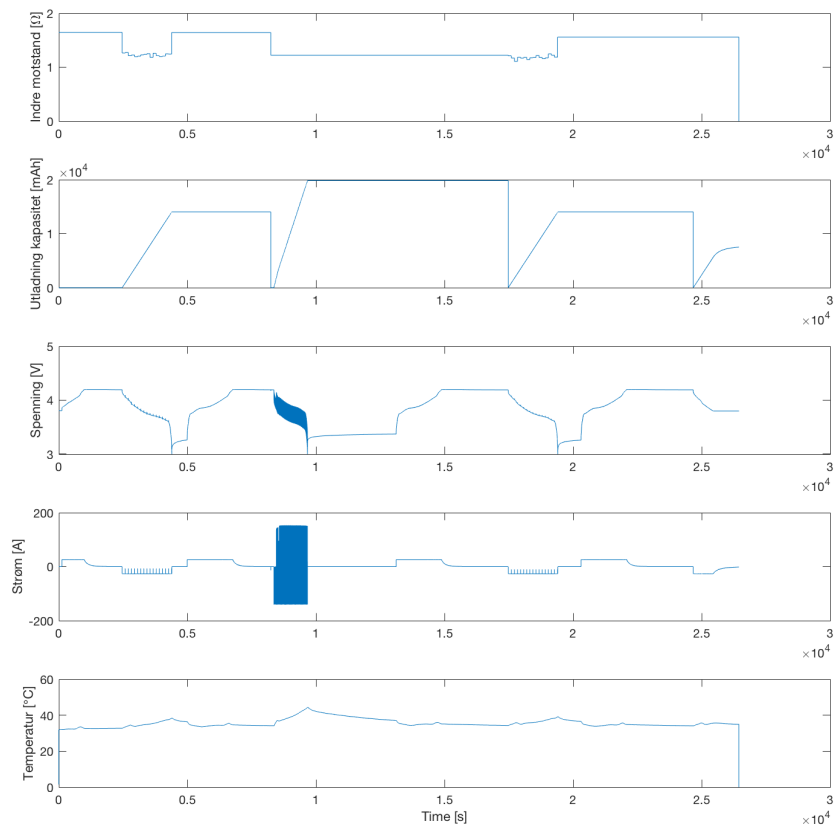


C.

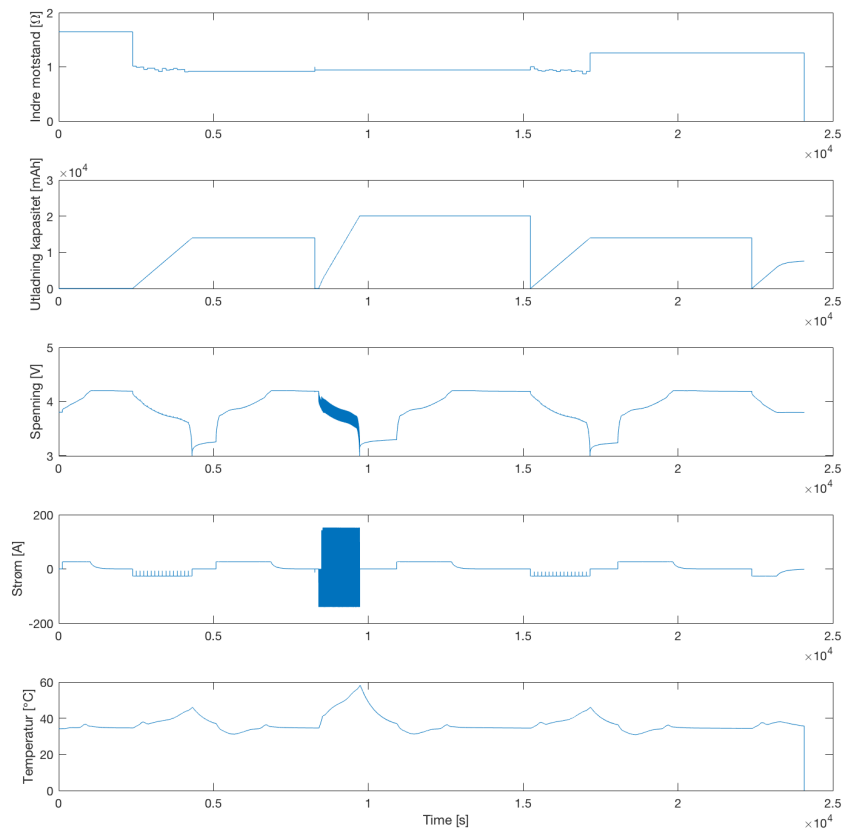
Battericeller i parallell uten PCM



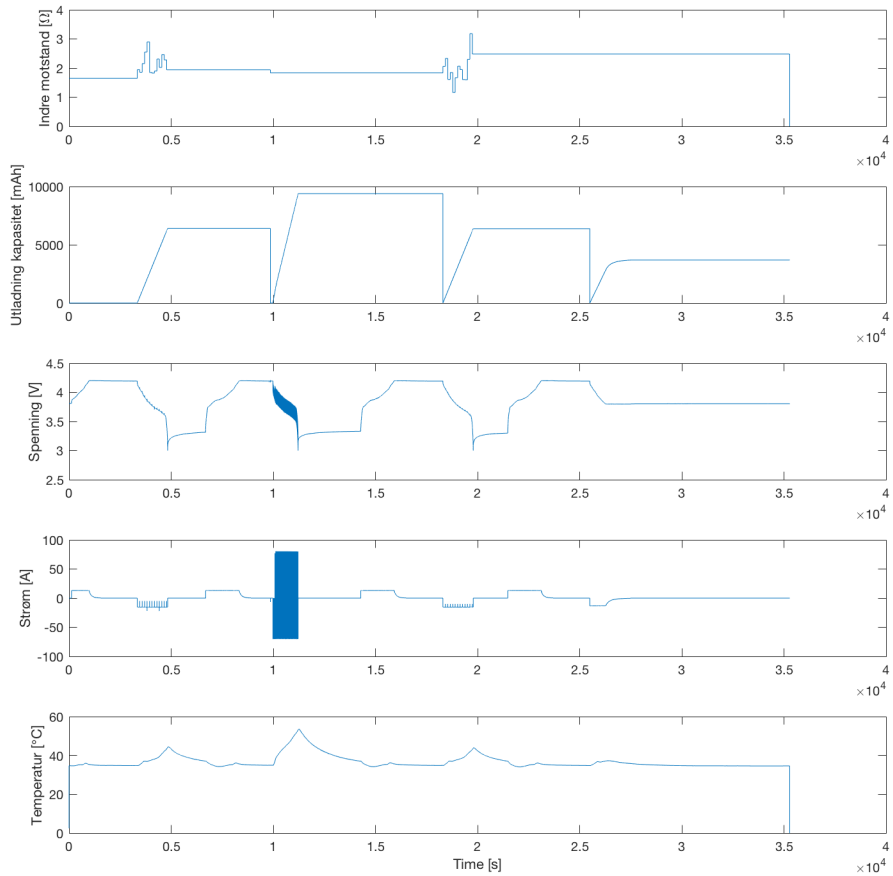
Battericeller i parallell med PCM



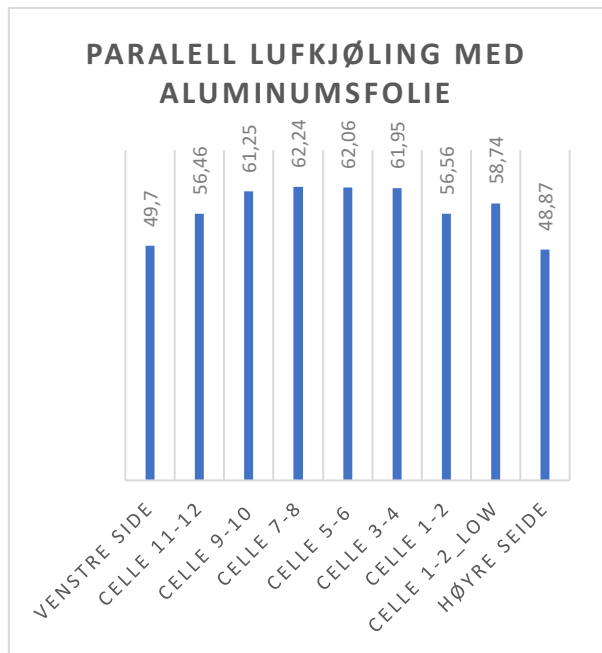
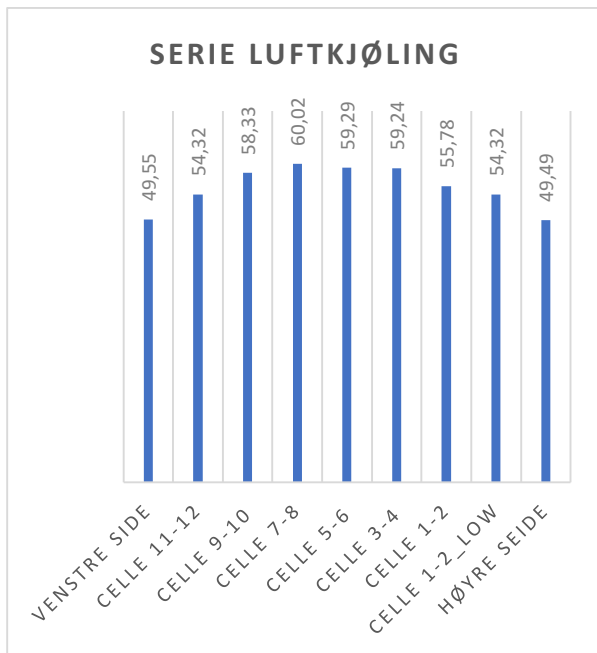
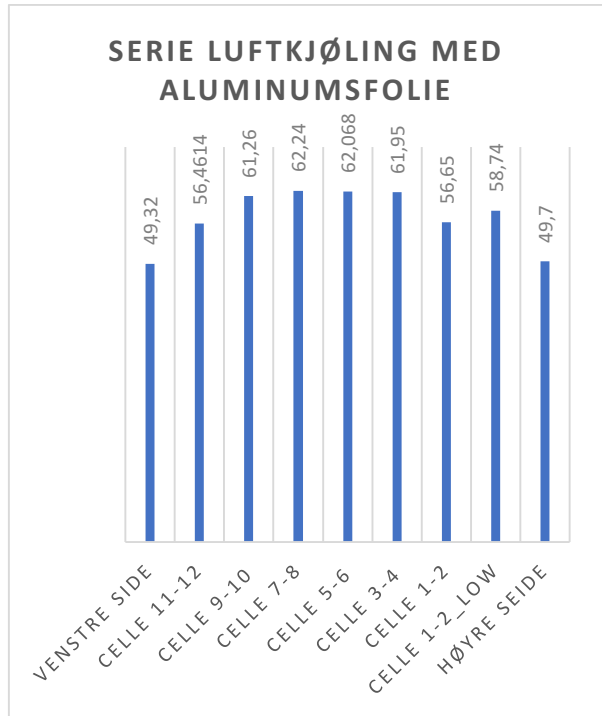
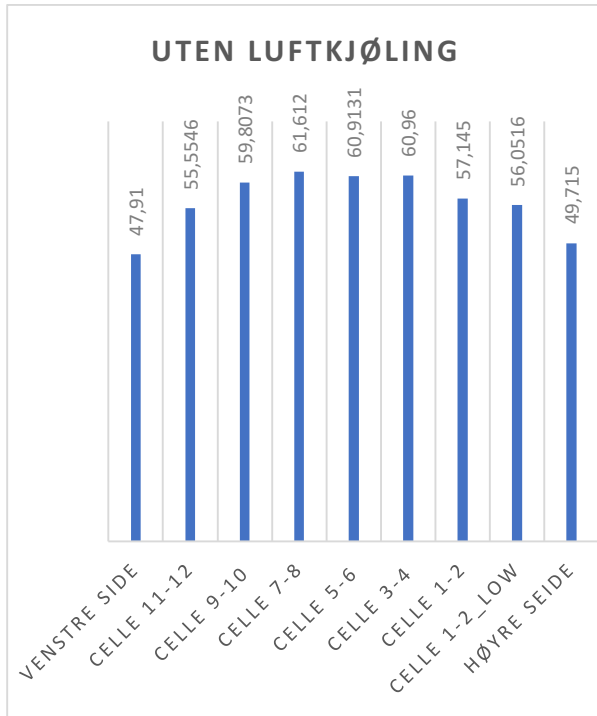
Battericeller i parallell med aluminiumsfolie



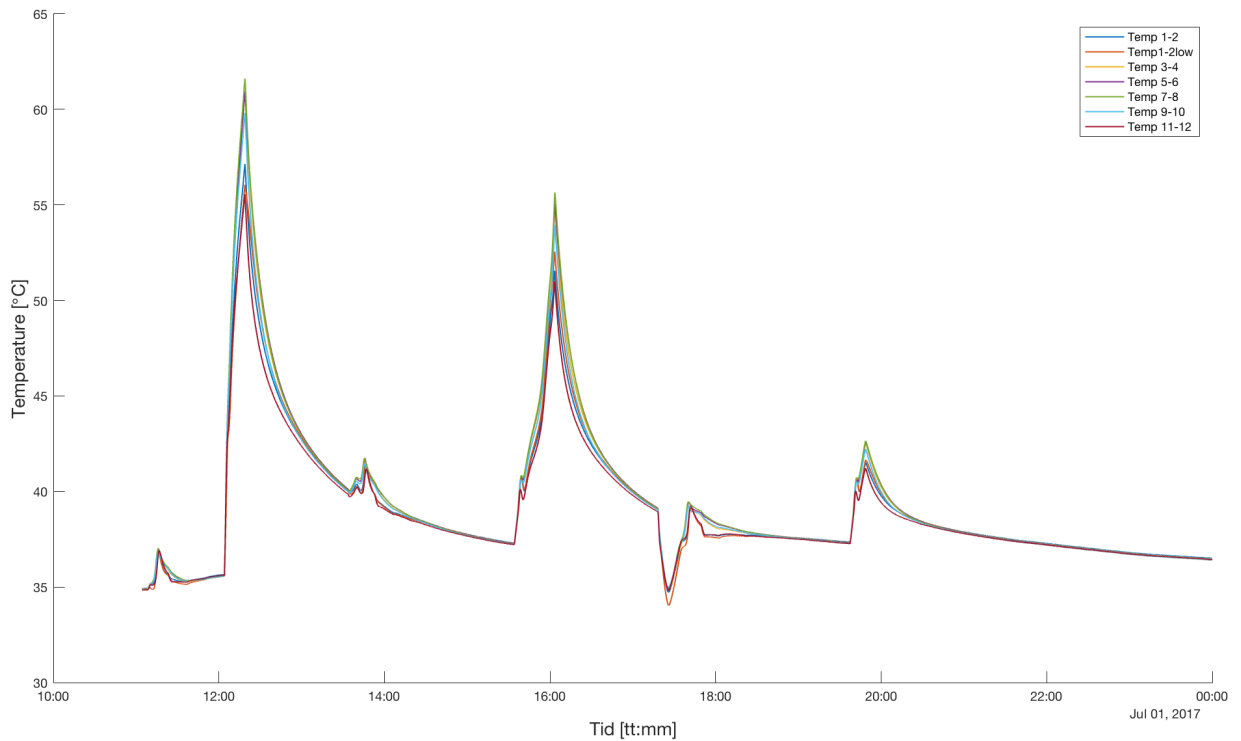
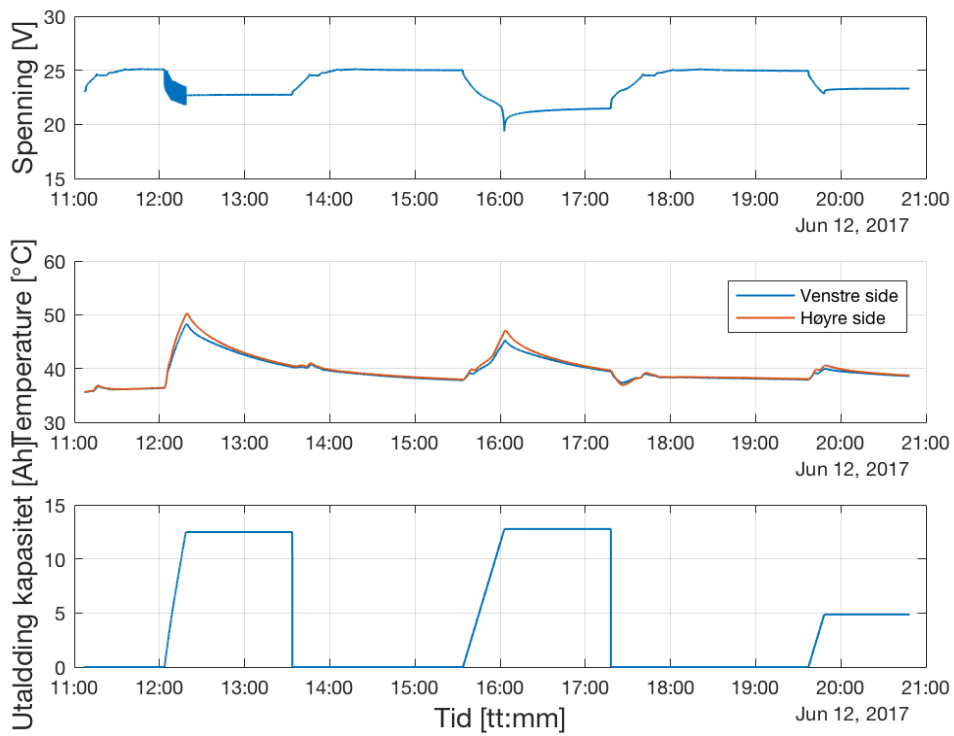
Enkeltcelle med PCM



D.

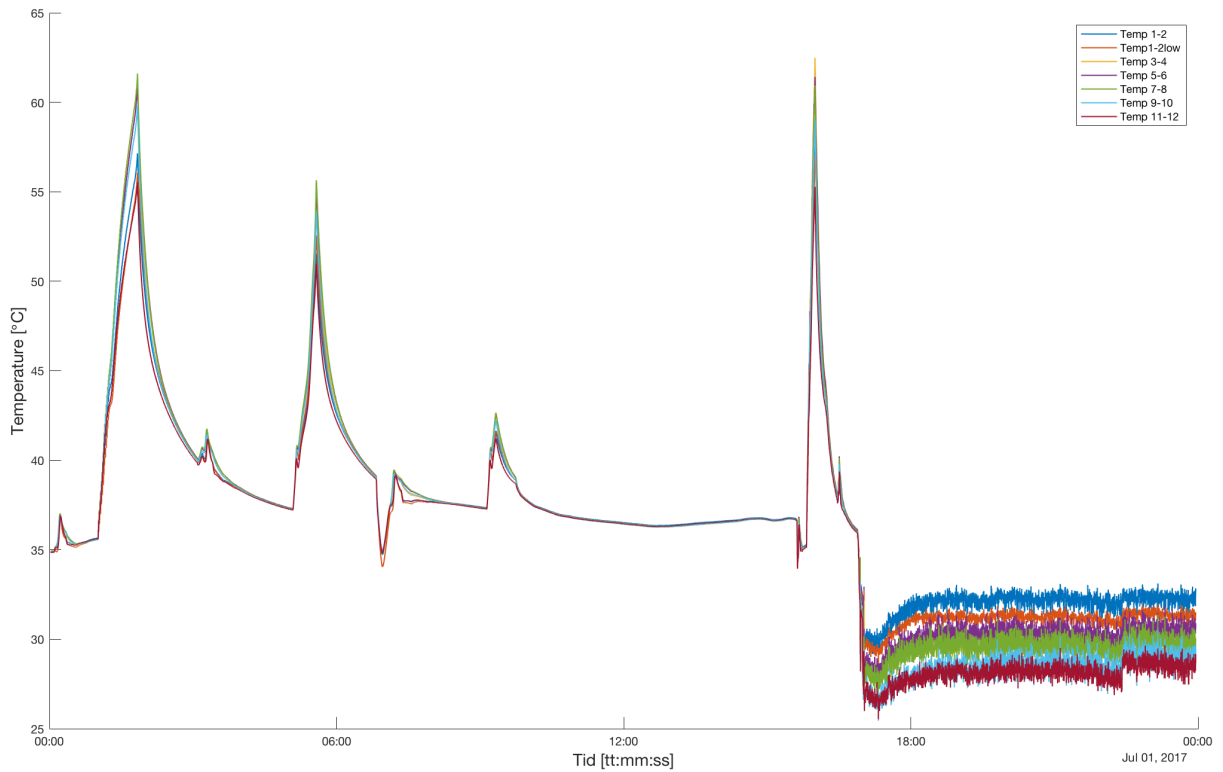
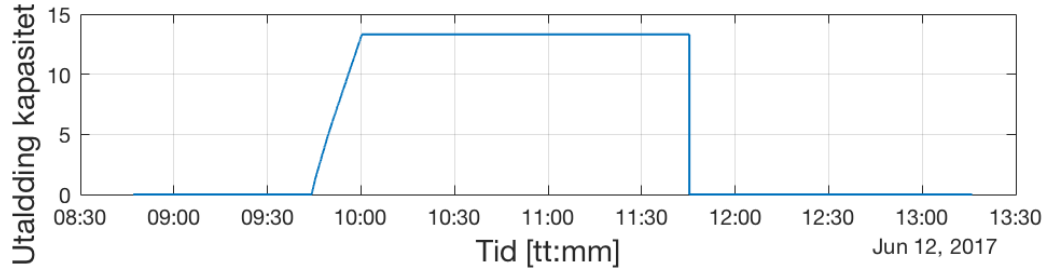
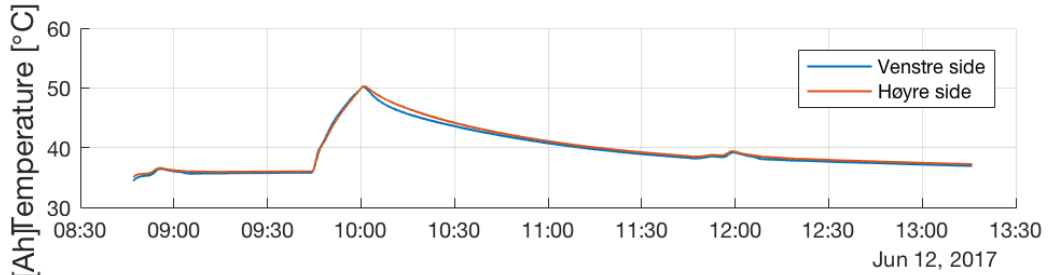
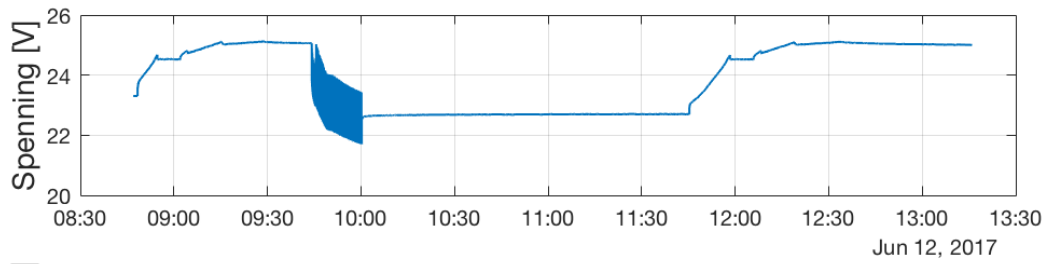


E. Hele testforløpet til modul uten kjøling



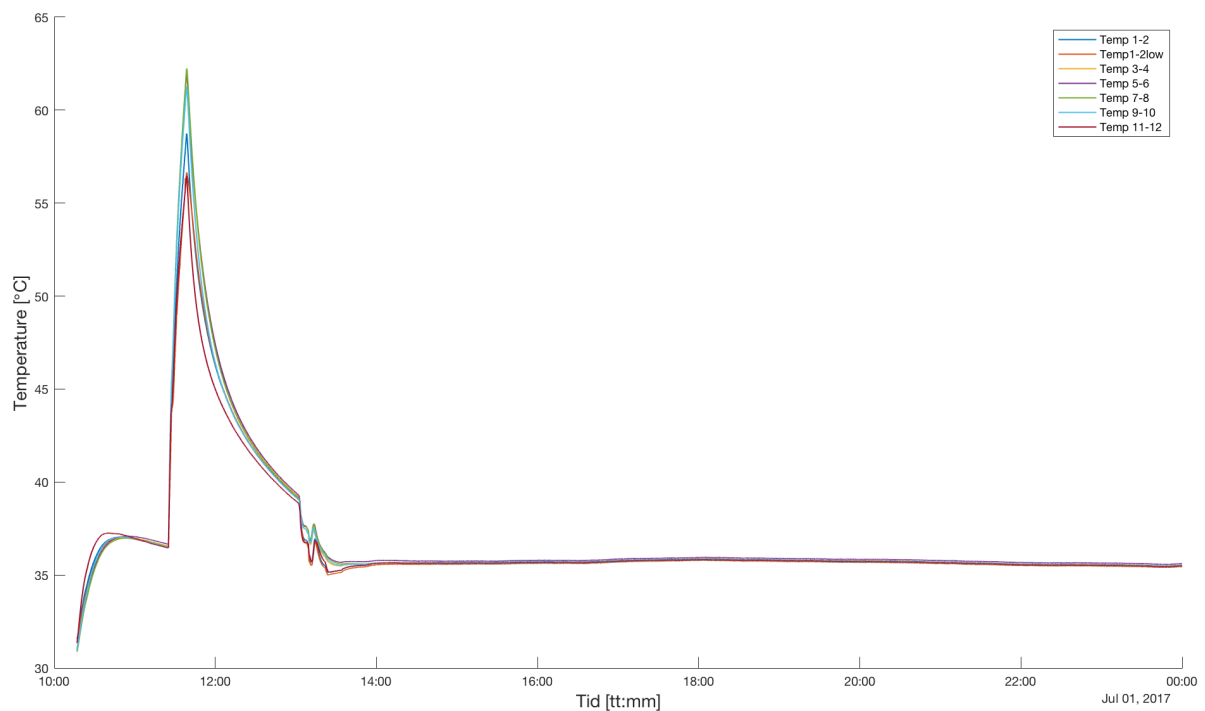
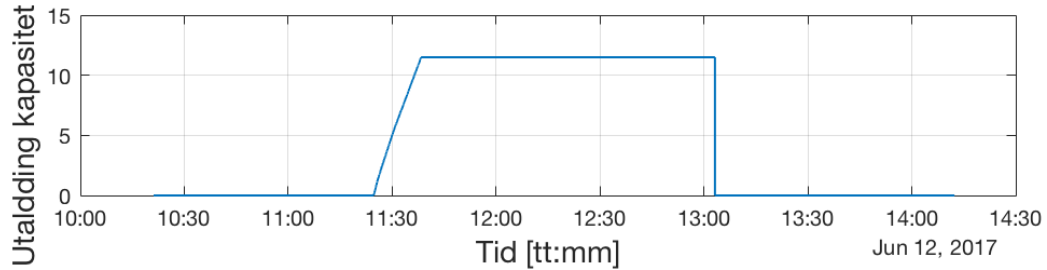
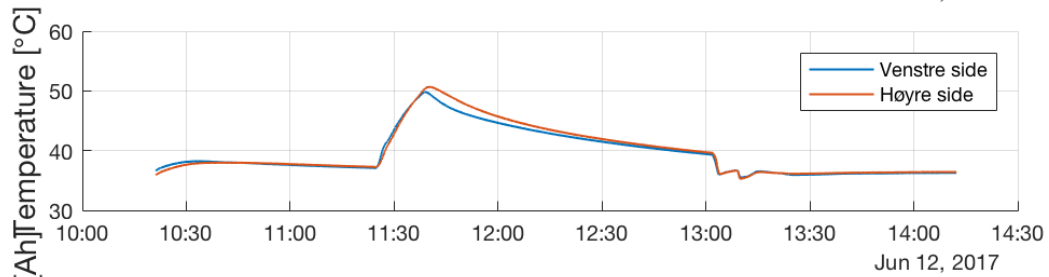
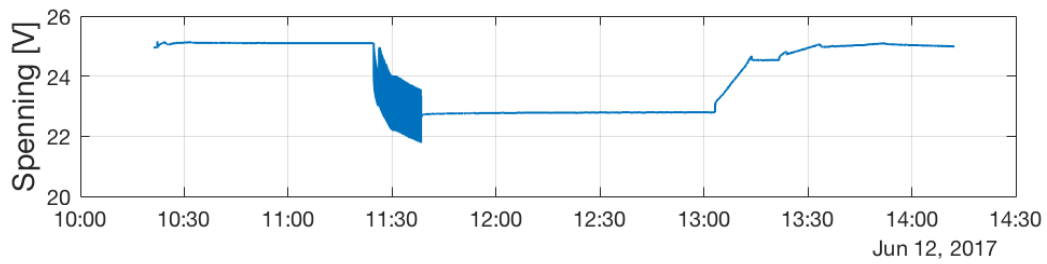
Kommentar: Her stemmer alle topper overens i begge grafer. Tiden skal og stemme bra.

Hele testforløpet til modul med kjøling med vifte i serieretning



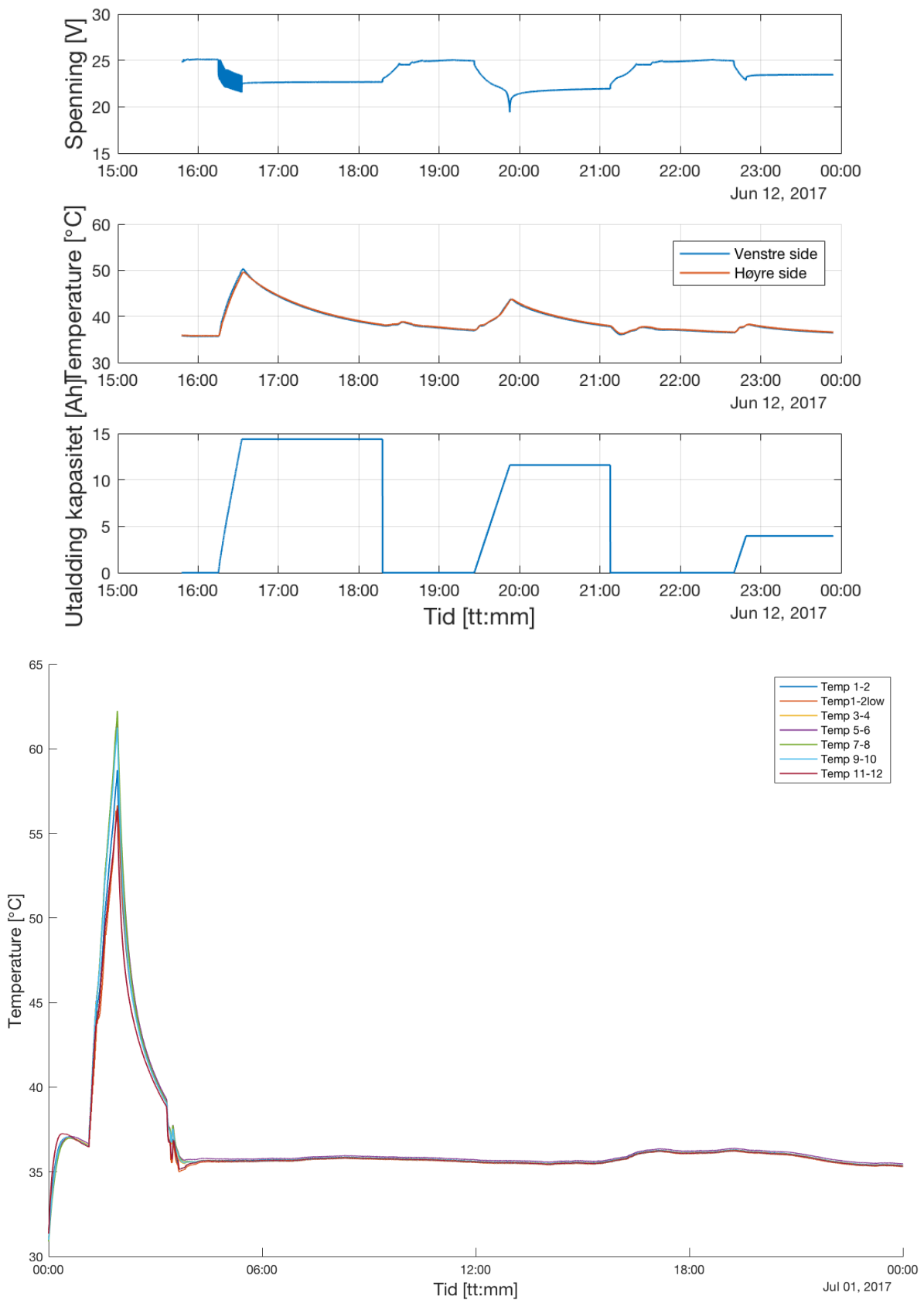
Kommentar: Første topp på nederste graf stemmer overens med grafen over. Tidene stemmer ikke.

Hele testforløpet til modultets kjøling med vifte i serieretning og aluminiumsfolie



Kommentar: Toppene i de to grafene stemmer overens med hverandre men ikke tidene.

Hele testforløpet til modultets kjøling med vifte i parallellretning og aluminiumsfolie



Kommentar: Første topp i begge grafer hører sammen. Tid stemmer ikke overens