

Markus Isohanni

Formula Student Electric -kilpa-auton akkujen testaus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

6.11.2014

Tekijä Otsikko	Markus Isohanni Formula Student Electric -kilpa-auton akkujen testaus
Sivumäärä Aika	36 sivua + 1 liite 6.11.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja	Lehtori Vesa Linja-aho
<p>Insinööriyössä testattiin sähkökäyttöiseen Formula Student -kilpa-autoon suunnitteilla olleiden akkukennojen ominaisuuksia sekä tehtiin kilpailujen endurance-osiota simuloiva testi. Testaukseen sopivat laitteistot ja testiaika löytyivät Aalto-yliopiston laboratoriosta, jossa kennot testattiin yhden viikon aikana.</p> <p>Testeissä tutkittiin formulatiimin kilpa-autoon hankittavaksi suunnitellun akkutyypin kapasiteettia, sisäistä resistanssia, virran purkukykyä ja lämpenemistä. Akkujen testauksesta saatiin tietoa akkukennon käyttäytymisestä nimenomaan tiimin kilpa-autoon suunnitellussa tasavirtakäytössä. Ennen akkukennojen lopullista ostopäätöstä haluttiin myös varmistautua valmistajan kennoille luvatuista ominaisuuksista.</p> <p>Endurance oli ajo-osioista akustolle haastavin energian riittävyyden sekä lämpenemisen suhteen, joten erityisesti sitä varten haluttiin saada testauksesta tuloksia. Tätä varten luotiin testiedellytykset vuoden 2009 Hockenheimin kilpailun endurance-osiosta saadun mitausdatan perusteella.</p> <p>Testeissä tallennettiin mitta-arvoja kapasiteetista, energiasisällöstä, jännitteestä, virrasta, sisäisestä resistanssista ja lämpötiloista. Niistä saatujen kuvaajien avulla insinööriyössä on pohdittu kennojen ominaisuuksia ja käyttäytymistä. Ominaisuuksien huomattiin vastaavan odotuksia ja lämpenemisen olevan hyvin maltillista.</p> <p>Testien tuloksiin oltiin tyytyväisiä ja niistä oli hyötyä suunnittelun etenemisen kannalta, minkä vuoksi niistä myös opittiin. Odotukset akkukennojen ominaisuuksista ja käyttäytymisestä täyttyivät, ja joiltain osin jopa ylittyivät. Endurance-testissä havaittiin suunnitellun akkupaketin energiasisällön olevan riittävä ja lämpötilojen nousun olevan maltillista.</p>	
Avainsanat	Formula SAE Electric, kennojen testaus, Endurance-käyttötesti

Author Title	Markus Isohanni Battery Cell Tests for Formula Student Electric Race Car
Number of Pages Date	36 pages + 1 appendix 6 November 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>In this thesis the battery cells planned for the electric Formula student race car were tested to confirm the quality of the cells, and also a more focused test for Endurance was carried out. Equipment and testing time were found at Aalto University, where the cells were tested during one week.</p> <p>The purpose of the battery tests was among others to investigate the warming of the batteries in racing use and to examine the internal resistance when used by DC current. Unknown specific heat capacity also made it difficult to estimate the warming of the batteries. Before the decision of purchasing the cells it was necessary to make sure that the cells will fulfill the specifications guaranteed by the manufacturer.</p> <p>Endurance was the most challenging section of the dynamic events when looking at the energy content and warming of the batteries, so especially for that purpose more specific data was needed. Therefore, a test was created based on the data from an endurance that was driven at Hockenheim in 2009.</p> <p>Data were collected and recorded from capacity, energy content, voltage, current, internal resistance and temperatures. With diagrams created on the basis of this collected data the features and behavior of the cells are analyzed and discussed in this thesis.</p> <p>The tests carried out were successful. The test results were useful in the design phase, and they gave new information to the students working on the project. All expectations about the cells were fulfilled and even exceeded. The energy content was found to be sufficient and warming of the batteries was found to be moderate.</p>	
Keywords	Formula SAE Electric, battery test, Endurance test

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kennot	2
2.1	Sähköautojen yleisimmät akkukennotyypit	2
2.1.1	Lyijyakku	2
2.1.2	Nikkelimetallihydridiakku	3
2.1.3	Litiumakku	3
2.2	Akkukennotyypin valinta	4
2.3	Valitun akkukennotyypin esittely	6
3	Testauksesta yleisesti	7
3.1	Miksi testataan?	7
3.2	Kapasiteetti	8
3.3	Energiasisältö	10
3.4	Sisäinen resistanssi	10
3.5	Kennon lämpeneminen	11
4	Testaus	12
4.1	Laitteiston esittely	12
4.2	Testauksen kulku	14
4.2.1	Maanantai 21.5	14
4.2.2	Tiistai 22.5	14
4.2.3	Keskiviikko 23.5	15
4.2.4	Torstai 24.5	15
4.2.5	Perjantai 25.5	15
4.2.6	Huomioitavaa	16
4.3	Kapasiteetti	17
4.4	Sisäinen resistanssi	19
4.5	Lämpötilat	21
4.5.1	Lämpötila 10 C:n (50 A) DC-resistanssimittauksessa	21
4.5.2	Lämpötilat 15 C:n (75 A) purkutestissä	23
4.5.3	Lämpötilat 15 C:n (75 A) purkutestissä	25
4.6	Endurance-käyttötesti	27
5	Yhteenveto	34

Liitteet

Liite 1. Ote kennon mitoista kennon datalehdeltä

Lyhenteet

SAE	Society of Automotive Engineers. Yhdysvaltalainen autoalan standardoimisjärjestö.
DoD	Depth-of-discharge. Merkintää käytetään ilmoittamaan akun varaustila prosentteina.
LCR	Inductance, Capacitance & Resistance (meter). Tietynlaisesta sähkömittarista käytettävä merkintä.
4P2S	Kennojen kytkennän ilmaisutapa. 4 kennoa kytketty rinnankytkennällä ja 2 sarjaankytkennällä.

1 Johdanto

Tämän työn tarkoituksena on tuoda tietoa ja ymmärrystä akkukennojen ominaisuuksista ja käyttäytymisestä Metropolia Motorsportin käyttöön sekä erityisesti kertoa työssä tarkasteltavan ja edelleen käytössä olevan kennotyyppin ominaisuuksista.

Formula SAE on opiskelijoiden suunnittelukilpailu, jota ylläpitää SAE International. Kilpailu on perustettu vastaamaan ajoneuvoteollisuuden tarpeisiin, jotta saadaan kokeneempia työntekijöitä jo suoraan valmistumisen jälkeen. Opiskelijat saadaan hyödyntämään teoriassa opittuja asioita käytännössä. Kilpailuun tarvitaan tutkimustyötä, suunnittelua, valmistamista, markkinointia, tuotteiden testausta, tuotekehitystä, ryhmätyöskentelytaitoja ja talousasioiden hoitoa. Kilpailun konsepti muodostuu siten, että fiktiivinen valmistaja sopii suunnitteluryhmän kanssa pienen formulatyyppisen kilpa-auton suunnittelemisesta ja rakentamisesta. Kilpa-auto on prototyyppi, joka suunnitellaan ja valmistetaan valmiiksi autoksi. Jokainen eri korkeakoulujen opiskelijoista muodostuva suunnitteluryhmä suunnittelee, rakentaa ja testaa kilpa-auton annettujen sääntöjen mukaisesti. Nykyään kilpailuja järjestetään eri nimillä eri puolilla maailmaa, ja tiimejä on mukana jo yli 500. [1.]

Euroopassa kilpailu tunnetaan nimellä Formula Student ja nykyään kilpailut on jaettu polttomoottorikäyttöisille ja sähkömoottorikäyttöisille erikseen, vaikkakin kilpailut järjestetään samaan aikaan. Ensimmäinen sähköautojen Formula Student Electric -kilpailu käytiin vuonna 2010 ja nykyään tiimejä on mukana jo yli 70.

Metropolia Motorsport on Helsingissä Metropolia Ammattikorkeakoulussa toimiva Formula Student -tiimi, jolla on pitkät perinteet. Tiimi perustettiin vuonna 2000 nimellä Helsinki Polytechnic Formula Engineering Team, jossa oli mukana 10 opiskelijaa. Ensimmäinen auto valmistui 2002, jonka jälkeen polttomoottorikäyttöisiä autoja valmistui joka vuosi. Vuonna 2008 nimeksi vaihtui Metropolia Motorsport, kun oppilaitos vaihtoi nimekseen Metropolia Ammattikorkeakoulu, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. Viimeinen polttomoottorikäyttöinen formula rakennettiin 2011, sillä kilpailtiin menestyksekkäästi Euroopassa 2011 sekä Yhdysvalloissa ja Kanadassa virallisissa kisoissa vielä vuoden 2012 keväällä. Jo 2011 kauden aikana alettiin suunnitella osallistumista Formula Student Electric -sarjaan ja lopullinen päätös sarjan vaihtamisesta tehtiin kisakauden 2011 päätteeksi. Kokonaan sähkökäyttöisen formulan rakentaminen

vaati sekä rahallisesti että suunnittelun puolesta enemmän resursseja verrattuna aikaisempaan, joten jo alusta asti päätettiin rakentaa sähköauto kahden vuoden aikataululla. [2.]

Varsinkin akusto energianlähteenä vaati suurta panostusta kokemuksen puutteen vuoksi, ja moniin avoimiin kysymyksiin pyrittiin vastata intensiivisellä opiskelulla ja tutkimustyöllä. Akkujen ominaisuuksien ymmärtäminen on edellytyksenä koko akkupaketin ja sähköjärjestelmän suunnittelulle. Akkujen testauksen tarkoituksena oli selvittää muun muassa akkujen lämpenemisestä ja sisäisestä resistanssista tasavirtakäytössä. Suurimpina haasteina suunnittelussa koettiin muun muassa se, ettei akkujen lämpenemisestä ollut juurikaan kokemusta tämältyyppisessä kilpakäytössä. Käytettävien akkukennojen valmistaja ilmoitti myös sisäisen resistanssin pelkästään vaihtovirralla mitattuna, ja käytössä olleiden lähteiden mukaan vaihtovirralla mitattu resistanssi saattaa oleellisesti erota todellisesta sisäisestä vastuksesta tasavirtakäytössä, eikä siihen näin ollen voinut varmasti luottaa. Tuntematon ominaislämpökapasiteetti hankaloitti myös kennojen lämpenemisen arvioimista. Ennen akkukennojen lopullista ostopäätöstä haluttiin myös varmistautua kennoille luvatuista ominaisuuksista.

2 Kennot

Sähköauto saa kaiken energiansa akustosta, joka voi muodostua esimerkiksi akkukennoista, akunhallintayksiköstä, jäähdytysjärjestelmästä ja koteloinnista. Akkukennot ovat akuston ydin, jota muut akuston komponentit palvelevat. Kennot ovat siis hyvin tärkeässä osassa akustossa, joten käyttötarkoitukseensa sopivan kennon valinnassa on käytettävä harkintaa. Tässä kappaleessa on esitelty muutamia yleisimpiä sähköautokäytön akkukennotyyppejä sekä kerrottu mitkä asiat vaikuttivat tässä työssä käsiteltävän akkukennon valintaan.

2.1 Sähköautojen yleisimmät akkukennotyypit

2.1.1 Lyijyakku

Jo 1920-luvulta asti sähköautossa on voitu käyttää lyijyakkua energianlähteenä. Lyijyakkua on mahdollista valmistaa hyvin erilaisilla materiaaleilla ja työtavoilla, minkä ansiosta lyijyakkua voidaan valmistaa erilaisiin käyttötarkoituksiin. Oikeastaan kaikki lyijy-

akun sovelluksista onkin täysin muita kuin sähköauton energialähteenä. Lyijyakulla on monia etuja verrattuna muihin akkutekniikoihin: korkein kennojännite vesipitoisia elektrolyyttejä käyttävillä akkutekniikoilla, kyky käyttää suuria ja pieniä virtoja laajalla lämpötila-alueella, varautuneisuus pysyy hyvin pitkienkin varastointien aikana, halpa hinta, sekä valmiit valmistustilat, laitteet ja kierrätysjärjestelmä.

Lyijyakku on jo sinänsä vanhentunutta tekniikkaa eikä enää nykypäivänä kovin hyvä akkutekniikka sähköautossa käytettäväksi. Suurimmat ongelmat nimenomaan sähköautokäytölle lyijyakussa ovat paino, suhteellisen alhainen käyttöikä ja pitkä latausaika. Lisäksi lyijyakun energiatiheys on pieni verrattuna nykyaikaisempiin akkutekniikoihin. [3, s. 100 - 102; 4, s. 125 - 126.]

2.1.2 Nikkelimetallihydridiakku

Nikkelimetallihydridiakut soveltuvat paremmin sähkö- ja hybridiajoneuvojen energialähteeksi kuin lyijyakut. Niillä on lisäksi hyvänä puolena matala hinta. Nikkelimetallihydridiakku omaa myös hyvän pakkaskestävyyden ja kyvyn käsitellä suuria lataus- ja purkuvirtoja, eikä se ole niin herkkä ylilataukselle tai ylipurkamiselle kuin esimerkiksi litiumkennot. Muita hyviä puolia ovat muun muassa toimintakyky matalissakin lämpötiloissa, huoltovapaus, myrkyttömät materiaalit sekä huomattavasti parempi energiatiheys kuin lyijyakulla.

Huonoja puolia nikkelimetallihydridiakulla on muun muassa voimakas muistiominaisuus, jos se on pitkään käyttämättömänä. Tätä ominaisuutta on kuitenkin onnistuttu jonkin verran parantamaan. [3, s. 138 - 141; 4, s. 262 - 268.]

2.1.3 Litiumakku

Litium on kaikista metalleista kevyin, sen atomimassa on vain 6,94 u. Sen ominainen kapasiteetti on suuri, kuten myös etäisyys sähkökemiallisessa jännitesarjassa, joten siis sillä on suurin potentiaaliero eli jännite. Litiumilla on myös korkea sulamispiste, se on helppo valmistaa ohueksi levyksi, eikä se oksidoidu niin helposti, koska sen pinnalle muodostuu suojaava kalvo kun sen pinta on ympäröivän ilman kanssa kosketuksissa.

Nämä ominaisuudet tekevät litiumista hyvän elektrodimateriaalin sähköautoissa käytettävään akkutekniikkaan. Litiumakkuja käytetään nykyään monissa sovelluksissa, kuten matkapuhelimissa, kannettavissa tietokoneissa ja monissa muissa sähkölaitteissa. Myös sähkö- ja hybridiajoneuvoissa ja niiden tutkimus- ja kehitystyö jatkuu koko ajan. Litiumakkutekniikat myös kehittyvät jatkuvasti suurin harppauksin.

Litiumakut tarvitsevat kuitenkin välttämättä aina kehittyneen akunhallintajärjestelmän valvomaan akun varaustilaa, purku- ja latausvirtoja, sekä lämpötilaa. Litiumakut ovat yleisesti herkkiä yllilataukselle ja ylipurkautumiselle sekä liian korkeille lämpötiloille. Litiumakut ovat myös kalliita, vaikkakin niissä on suuria hintaeroja riippuen valmistustekniikasta.

Litiumakkuja valmistetaan monella eri tekniikalla, ja niillä on erilaisia ominaisuuksia energiatehokkuudessa, virranantokyvyssä, eliniässä ja turvallisuudessa. Sähkö- ja hybridiajoneuvoissa valmistajat näyttävät laajalti tavoittelevan litiumtekniikkaan pohjautuvia rautafosfaattiakkuja, jotka tarjoavat hyvän suorituskyvyn yhdistettynä hyvään käyttöturvallisuuteen.

Litiumpolymeerikennoissa elektrolyytti ei ole nestemäisessä muodossa, vaan se on laminoitu kiinteinä levyinä rakenteiden väliin. Näillä kennoilla on muun muassa hyvä energiatiheys, niillä on pieni itsepurkautuvuus, ja ne kestävät paremmin väärinkäyttöä. Niitä voidaan rakentaa hyvin ohuiksi ja joitain polymeerikennoja voidaan jopa taitella. [3, s. 143 - 158; 4, s. 419 - 421.]

2.2 Akkukennotyyppin valinta

Ennen kuin koko akkujärjestelmää voitiin alkaa suunnittelemaan, täytyi suunnitella alustavasti auton konseptia ja painotavoitetta. Tarvittava energiasäilytys oli myös selvitettävä, jotta tiedettiin, kuinka paljon akkuja tarvitaan. Kilpailuissa ajettava endurance-osio oli määräävä energiasäilytyksen kannalta, sillä se on pisin kilpailuissa ajettava ajo-osio. Endurancessa ajetaan rakennettua rataa, joka on noin 22 km pitkä ja jossa keskinopeus on noin 48 km/h ja huippunopeus noin 105 km/h. [5, s. 119 – 120] Tämä antaa jo melko hyvät edellytykset energiasäilytyksen arvioimiselle, ja sen lisäksi tiimillä oli käytössään aikaisempien vuosien kisoista dataa kerättynä auton tiedonkeruujärjestelmän kautta. Tämä oli suurena apuna varsinkin juuri energiasäilytyksen arvioimisessa, kun las-

kureilla ja Matlab-ohjelmistolla käsiteltiin näitä tietoja. Jo ennen varsinaista suunnittelun aloitusta tarkkailtiin kilpailevien tiimien sähköautoja ja niiden akustojen energiasisältöä. Tämä tarkkailu hieman yllätti, sillä autojen energiasisällöt vaihtelivat suuresti eikä osalla tiimeistä tuntunut olevan käsitystä siitä, onko niiden auton energiasisältö liian pieni, riittävä tai liian suuri. Näistä tiedoista ei voitu tehdä edes arvioita siitä, millä alueella suurin piirtein energiasisällön kanssa liikutaan. Laskureiden ja ajosimuloinnin perusteella arvioitiin hieman yläkanttiin että noin 6,4 kWh energiasisältö akustossa olisi varmasti riittävä eri kisoihin ilman, että akustoa tarvitsee ajaa kokonaan tyhjäksi, eikä viimeisten kierrosten tehoja tarvitse liikaa rajoittaa, vaan kilpailukykyisiä kierrosaikoja ajamalla päästään maaliin asti.

Paino merkitsee yleisesti kilpa-autoilussa paljon. Tavoitteena olikin rakentaa autosta niin kevyt kuin mahdollista ja pitää painon kasvu mahdollisimman pienenä, vaikka sähköauto yleensä tulee polttomoottoriautoa raskaammaksi juuri akkujen painon takia. Tämä aiheuttaa myös hyvin yleisen ongelman, sillä mitä vähemmän akkuja ja painoa, sitä vähemmän myös akustossa on energiaa. Vastaavasti kun kasvatetaan energiasisältöä, kasvatetaan taas massaa. Kun energiasisältöä kasvatetaan riittäväksi, niin se aiheuttaa taas sen että massan kasvaessa energiankin tarve lisääntyy. Tässä oli löydettävä kultainen keskitie, ja asia ratkaistiinkin alkuvaiheessa siten, että autolle annettiin painotavoite, johon haluttiin päästä ja sen mukaan laskettiin tarvittava energiasisältö. Auton painoksi arvioitiin ja painotavoitteeksi asetettiin hieman alle 220 kg ilman kuljettajaa. Kennojen osuus akuston painosta on selvästi suurin kaikista muista siihen kuuluvista komponenteista, ja alussa käytettiin vain suurpiirteisiä arvioita kennojen ja muiden komponenttien painosta.

Sopivaa jännitetasoa akustolle mietittiin myös huolellisesti, sillä se vaikuttaa suuresti koko korkeajännitejärjestelmän suunnitteluun. Säännöissä oli annettu sähköautoille suunnittelun alkuvaiheessa tehorojoitukseksi 100 kW, mutta todellisuudessa riittävä teho oli selvästi matalampi. [6, s. 16] Suurin teho kilpailuissa tarvitaan kiihdytysosiossa, jossa kiihdytetään 75 metrin matka ja ajat mitataan. [5, s. 113] Tämän perusteella arvioitiin tarvittavaa tehoa. Tehon muodostuessa jännitteestä ja virrasta kaavalla $P=UI$, nähdään että jännitetaso vaikuttaa suoraan virran suuruuteen, joka taas vaikuttaa suoraan tapahtuviin häviöihin kaavalla $P=RI^2$. Muun suunnittelun edetessä auton konsepti ja rakenne alkoi hahmottua ja haluttu akuston jännitetaso muodostua muiden komponenttien selvityksessä. Kun tiedettiin haluttu energiasisältö, paino ja jännitetaso suurin piirtein, alkoi kennojen valinta helpottua.

Akkukennon valintaa varten kerättiin yhteen Excel-tiedostoon monen valmistajan kennoja, joiden tiedot listattiin sarakkeisiin. Kennoja järjestettiin hakuparametrien mukaan, eli lähinnä haluttujen akuston arvojen mukaan kennot listattiin paremmuusjärjestykseen muun muassa painon ja hankintahinnan perusteella. Kennojen ominaisuuksia vertailtiin Excel-tiedostossa monella tapaa, jotta saatiin selvempi käsitys markkinoilla olevista kennoista ja niiden vahvuuksista.

2.3 Valitun akkukennotyyppin esittely

Akkukennoksi valittiin japanilaisen valmistajan pieni litiumpolymeerikkenno. Kennon kapasiteetti oli vain 5000 mAh, joten kennoja kytkettiin rinnan, jotta akustolle saatiin riittävä energiasisältö. Tämä tietysti myös pienentää yksittäisen kennon lämpenemistä ja häviöitä, kun yksittäisen kennon luovuttama virta jää pienemmäksi. Toisaalta tämä ratkaisu saattaa aiheuttaa ongelmia kennojen käyttöikään, sillä poikkeavuudet kennojen välillä aiheuttavat sen, että teoriassa energiaa liikkuisi kennojen välillä hallitsemattomasti ja litiumkennot ovat herkkiä liian koville latausvirroille. Tämä riski arvioitiin kuitenkin niin pieneksi, ettei sitä pidetty vaarallisena, kunhan huolehdittiin riittävän tarkasta kennojen balansoinnista ennen kuin ne kytkettiin rinnan. Teoriassa kuitenkin voidaan ajatella, että rinnankytkettyjen kennojen jännite pysyy aina samana eikä suurta virran-kulkua pitäisi tapahtua, varsinkaan kun sisäisissä resistansseissa ei arveltu olevan kovin suuria poikkeavuuksia.

Maksimijännite kennolla on 4,2 voltia, nimellijännite 3,7 voltia ja minimijännite 2,75 voltia. Litiumkennot ovat herkkiä ylilataukselle ja ylipurkautumiselle, joten jännite-tasojen kanssa on oltava tarkkana ja akusto vaatii aina akunhallintajärjestelmän katkaisemaan latauksen sekä purkutapahtuman.

Painoa yhdelle kennolle luvattiin vain 115 g, joka pitikin paikkansa yllättävän hyvin. Kennojen painoa mitattaessa eroa ilmoitettuun painoon kennoilla oli vain pari grammaa jompaankumpaan suuntaan, eikä sen suurempia poikkeavuuksia havaittu.

Ilmoitettu toimintalämpötila on riittävän laaja. Ladattaessa toimintalämpötila on 0-45 °C ja kennoja purettaessa -20 °C:n ja +60 °C:n välillä. Akunhallintajärjestelmän on tarkkailtava myös lämpötiloja, jottei annettu lämpötila ylitä varsinkaan purettaessa. Latausvirta

on niin matala, ettei se aiheuta akustoon juurikaan lämpenemistä, vaikkakin akunhallintajärjestelmä tietysti valvoo akuston tilaa myös ladattaessa.

Maksimi latausvirta kennolle on vain 1 C (5 A), vaikkakin valmistaja ilmoittaa, että kilpailukäytössä 1,5 C:n (7,5 A) latausvirta on sallittu. 1,5 C:n (7,5 A) latausta ei kuitenkaan käytetty, sillä se oletettavasti vaikuttaa kennojen elinikään sitä lyhentävästi.

Purkuvirran sallittu suuruus kennoilla on vähintäänkin riittävästi, sillä ilmoitettu jatkuva purkuvirta kennolle on maksimissaan 25 C, eli 125 A. Jopa 50 C eli 250 A purkuvirta kennolle on sallittu enintään 10 sekunnin ajan.

Energiatiheys kennolle saadaan laskettua kertomalla akun nimellisjännite akun kapasiteetilla, jonka tulo jaetaan kennon painolla. Valitun kennon energiatiheys on siis

$$\frac{3,7 \text{ V} \cdot 5 \text{ Ah}}{\frac{115 \text{ g}}{1000}} \approx 161 \text{ Wh/kg}$$

Energiatilavuus saadaan laskettua kennolle kertomalla akun nimellisjännite akun kapasiteetilla, jonka tulo jaetaan kennon tilavuudella. Valitun kennon energiatilavuus on siis

$$\frac{3,7 \text{ V} \cdot 5 \text{ Ah}}{0,054675 \text{ l}} \approx 338 \text{ Wh/l}$$

Valmistajan ilmoittama sisäinen AC-resistanssi kennolle on 2 mΩ tai vähemmän mitattuna 1 kHz:n LCR-mittarilla. [7.]

3 Testauksesta yleisesti

3.1 Miksi testataan?

Akusto on yksi tärkeimmistä sähköauton kokonaisuuksista. Akustosta auto saa kaiken liikkeeseen tarvittavan energian, joka muutetaan mekaaniseksi tehoksi. Hyvä akusto on myös perusta auton turvallisuudelle ja luotettavuudelle. Akusto on useimmissa tapauksissa myös kallein yksittäinen auton osa. Kaikki nämä seikat asettavat paljon vaatimuksia ja odotuksia nimenomaan akkukennoille, joista akuston ydin muodostuu. Kennojen ominaisuuksista on pystyttävä varmistumaan ennen lopullista valintaa ja hankintaa. Akkuvalmistaja kertoo kennon esitteessä kennon ominaisuuksista, jotka sen tulisi täyttää. Esitteessä kerrotaan myös, missä olosuhteissa mittaukset tulisi suorittaa ja

mikä on tulosten tarkkuus. Koska kyseessä oli pieni ja tuntematon yritys, tahdottiin varmistua siitä, että kennot pystyvät täyttämään vaatimukset. Testeissä haluttiin varmistaa yleisimmät kennon ominaisuudet, eli lähinnä kapasiteetti, energiasisältö, virranantokyky ja kennon käyttäytyminen purettaessa.

Akuston jäähtymisen suunnitteleminen oli myös haastavaa, sillä lämpenemisen arviointi oli vaikeaa ilman kunnollisia lähtötietoja. Ennen testejä ei löytynyt minkäänlaisia tarkempia suunnitelmia jäähtymisen toteutukseen, sillä sitä ei haluttu tehdä liian tehokkaaksikaan, jottei se lisäisi turhaa painoa. Kuitenkin jäähtymisen piti olla riittävä kaikkiin kauden kisoihin, sillä kokemus oli osoittanut, että ulkolämpötila saattaa hyvin olla kisapaikalla jopa yli 30 °C. Tämän vuoksi testeissä haluttiin seurata myös lämpötilaa kennojen pinnasta ja rinnankytkettyjen kennojen väliin kytketyillä termopareilla. Lämpötilan mittauksella saatiinkin hyvin tietoa akkujen lämpenemisestä. Tähän liittyen haluttiin selvittää myös sisäinen resistanssi tasavirtakäytöllä, jotta sitä voitaisiin käyttää myös jäähtymislaskelmien apuna.

Endurance oli ajo-osioista haastavin energian riittävyyden sekä lämpenemisen suhteen, joten erityisesti sitä varten haluttiin myös saada testauksesta tuloksia. Tätä varten luotiin testiedellytykset vuoden 2009 Hockenheimin kilpailun endurance-osioista saadun mittausdatan perusteella. Koska akuston konfiguraatio ja jännitetaso olivat testihetkellä jo selvillä, saatiin laskentaohjelmistolla laskettua tarvittava virta yhdelle rinnankytketylle kennokytkennälle kisan aikana.

3.2 Kapasiteetti

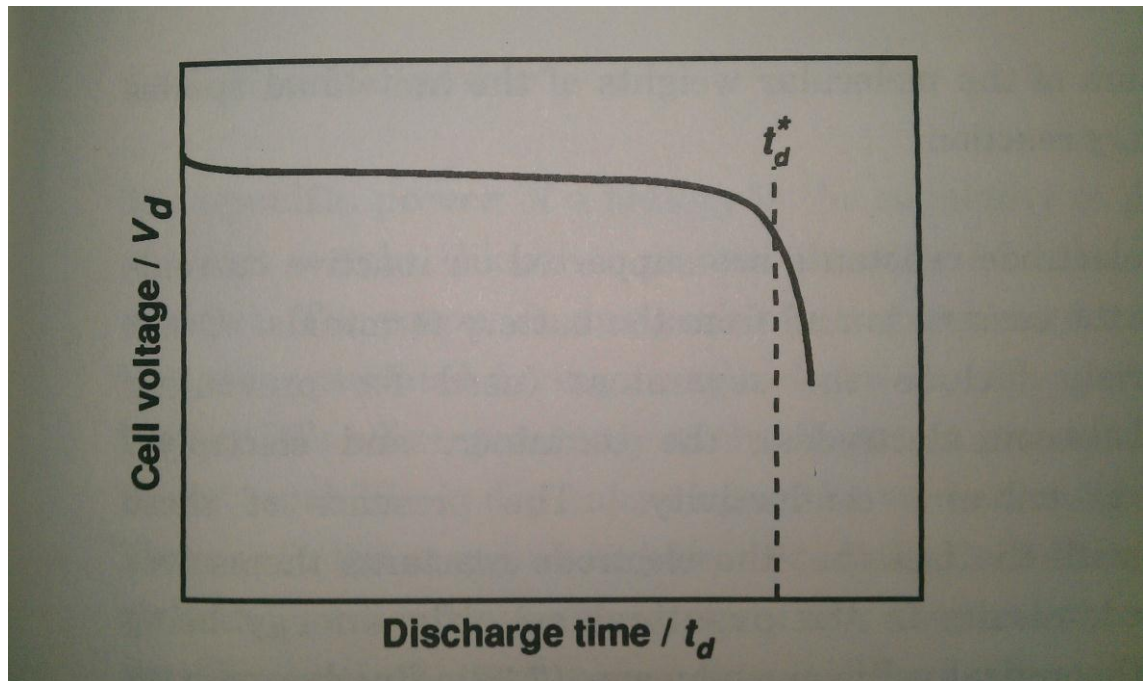
Akun kapasiteetti on se sähkövaraus, joka akkuun on ladattu, ja sen yksikkö on ampeeritunti (Ah). Kapasiteetti ilmaistaan sinä aktiivisen aineen massana, joka akussa on. Se kertoo kuinka kauan akku reagoi eli luovuttaa vaadittua virtaa, ennen kuin sen jännite laskee niin alas, että siihen sidottu varaus on purettu täysin tyhjäksi, toisin sanoen kuinka kauan tietyllä virralla akkua purettaessa kestää, että se on tyhjä.

On kuitenkin huomattava, että kapasiteettiin vaikuttaa myös olosuhteet, kuten lämpötila, sekä varsinkin purun nopeus eli kuinka paljon virtaa kennosta otetaan. Akkuvalmistajat ilmoittavat kennoille yleensä nimellisen kapasiteetin, joka on saatu purkamalla

kenno täysin ladatusta katkaisujännitteeseen eli täysin tyhjäksi tietyllä purkausvirralla sekä määritetyssä lämpötilassa.

Käytännössä kennon kapasiteetti yleensä laskee hiljalleen tiettyyn rajaan asti, kunnes se saavuttaa tietyn pisteen, minkä jälkeen se romahtaa voimakkaasti ja laskee nopeasti katkaisujännitteeseen asti, jolloin kenno on purettu täysin tyhjäksi.

Kapasiteetille on olemassa myös hyvin kuvaava määre DoD, joka tulee englannin sanoista depth-of-discharge. Tämä kertoo prosentuaalisen varaustason sille kapasiteetille, joka akulla on sillä kyseisellä purkuvirralla olemassa, jolla sitä puretaan. Esimerkiksi kuvassa 1, akkua joka on purettu tasolle 80 % DoD, on purettu aika t_d siten, että $t_d = 0.8t_d^*$.



Kuva 1. Kennojännite purkuajan funktiona. [4, s. 75]

Kennoja purettaessa puhutaan yleensä C-arvosta, joka kertoo, kuinka suurella virralla kennoa puretaan. C-arvo liittyy oleellisesti kapasiteettiin, sillä se on kapasiteetin arvoon suoraan sidonnainen siten, että 1 C:n purkuvirralla kennoa puretaan sen kapasiteetin verran tunnissa. Eli toisinsanoin, 5 Ah kennoa purettaessa 1 C:n virralla, sitä puretaan 5 A:n virralla ja sen kapasiteetti kestää tätä yhden tunnin. Vastaavasti 2 C:n virralla purettaessa kennoa puretaan 10 A:n virralla, ja 0,5 C:n virralla purettaessa 2,5 A:n virralla ja niin edelleen. Akkujen valmistajat käyttävät yleisesti C-lukua kennojen tiedoissa,

ja se onkin helppo suure käyttää sen ollessa niin voimakkaasti sidoksissa kennotyyppin omaan kapasiteettiin. Jos suure Ah paloitellaankin osiin, saadaan virran määre A ja ajan määre h eli tunti, joten on helppo ajatella kapasiteetin $x A \cdot 1h$ kestävän x ampeeria 1 tunnin ajan.

Akkujen kapasiteetit saattavat vaihdella alle yhden ampeeritunnin kapasiteetista jopa tuhansiin ampeeritunteihin. Reagoivan aineen massan määrätessä pitkälti sen, kuinka paljon kapasiteettia akussa on, vaihtelevat akkujen koot myös samassa suhteessa, eli suuremmat kennot merkitsevät yleensä myös suurempaa kapasiteettia. [4, s. 74 - 75.]

3.3 Energiasisältö

Energiasisältö saadaan laskettua kertomalla kapasiteetti akun nimellisjännitteellä. Tästä on eniten hyötyä nimenomaan vertaillessa eri jännitteisiä kennoja sekä varsinkin eri jännitteellä olevia kokonaisia akustoja. Energiasisällön yksikkönä käytetään wattituntia (Wh), joka on hyvin kuvaava, sillä ampeeritunnin tapaan se kertoo suoraan sen ajan, kuinka kauan akkua voidaan purkaa tietyllä vakioteholla. Jos vertaillaan samantyyppisiä akkuja samalla jännitteellä, kapasiteetti kertoo selvästi ja helposti akun sisältämän energian ja suoraan kapasiteetin perusteella voidaan tehdä akun valinta, kun käyttökohde on selvillä. Kapasiteetti ei ole sinällään enää suoraan verrattavissa, jos vertailtavien akkujen jännitetasot ovat eroavat, ja siksi on kätevää käyttää energiasisältöä tämän yhteydessä. Energiasisältöön vaikuttaa kuitenkin jonkin verran purkuvirran suuruus ja siihen liittyen akun kemia ja rakenne, aivan kuten myös kapasiteettiin.

Akkuja vertailtaessa voidaan myös vertailla energiatiheyttä painon ja tilavuuden mukaan. Koska suurena haasteena sähköautojen suunnittelussa on akuston koko sekä paino, nämä suureet ovat hyvin käyttökelpoisia akkuja vertailtaessa. Suure kertoo yksinkertaisesti sen, kuinka paljon akussa on energiaa yhtä kilogrammaa, tai litraa kohden. Yksikköinä on siis Wh/kg, tai Wh/l. [3, s. 24 - 27; 4, s. 75 - 76.]

3.4 Sisäinen resistanssi

Resistanssin yksikkö on ohmi, ja sen tunnus on R . Akkukenoissa on aina olemassa sisäistä resistanssia. Sen suuruus riippuu pitkälti käytetyistä materiaaleista ja valmis-

tustekniikoista. Käytännössä siis kennotyypistä riippuen sisäinen resistanssi voi vaihdella suhteellisesti hyvinkin paljon.

Sisäisestä resistanssista voidaan ajatella riippuvan kuinka suuria virtoja kennosta voidaan turvallisesti ottaa, kennon hyötysuhde jne. Käytännössä nämä resistanssit ovat hyvin pieniä, mutta varsinkin suuremmilla virroilla niiden suuruus korostuu. Akusto on aina myös parempi jos siihen saadaan kennoja, joiden kapasiteetti pysyy purkamisen aikana mahdollisimman tasaisena, eli yksittäiset kennot eivät sisäisen resistanssin vuoksi tyhjene muita nopeammin.

Mitä suurempi sisäinen resistanssi on, sen voimakkaammin kennot ja koko akusto myös lämpenee, mikä myös litiumakun tarkan lämpötilan seurannan vuoksi rajoittaa akun käyttöä ja siitä otettavan virran suuruutta, tietysti jäähdytysjärjestelmästä riippuen.

3.5 Kennon lämpeneminen

Akkujen lämpötilan hallinta on tärkeää. Lämpötilan kohoaminen kiihdyttää akun niin hyödyllisiä kuin haitallisiakin kemiallisia reaktioita. Valmistaja ilmoittaa akuillensa sallitun lämpötila-alueen, jolla akkua pystytään käyttämään turvallisesti. Tiedetyt akkutyypit saattavat ylikuumentuessaan muuttua epävakaiksi ja jopa syttyä räjähdysmäisesti palaamaan.

Riippuen kennon sisäisestä kemiasta ja rakenteesta kennossa tapahtuu aina jonkin verran sisäisen resistanssin aiheuttamaa tehohäviötä, joka lämmittää kennoa. Osa akusta otettavasta tehosta muuttuu siis suoraan pelkästään lämpöenergiaksi, joka nostaa akkupaketin sisäistä lämpötilaa.

Lämpö siirtyy kennosta ympäristöön konvektiolla, johtumalla tai säteilemällä. Konvektiolla tarkoitetaan lämmön kuljetusta liikkuvan aineen mukana. Käytännössä konvektiota käytetään hyödyksi akkupaketin lämpötilan säätelyssä, kun lämpöenergiaa pyritään kuljettamaan pois akkupaketista pakottamalla lämpöä sitovaa lämmennyttä ilmaa tai vettä pois akkupaketin sisältä, ja tuomalla samalla viileämpää jäähdyttävää ainetta akkupaketin sisään. Ominaislämpökapasiteetti kertoo kuljettavan aineen kyvystä sitoa itseensä tätä lämpöenergiaa. Ominaislämpökapasiteetti ja massavirta määräävät pit-

kähti sen, kuinka paljon lämpöenergiaa voidaan kuljettaa. Massavirta kertoo sen, kuinka suuri määrä lämpöä kuljettavaa ainetta liikkuu tietyssä ajassa. [8, s. 449 - 466.]

Kun tiedetään, minkä verran kennot lämpenevät ja mikä on niiden ominaislämpökapasiteetti, voidaan laskea, mikä on riittävä massavirta jäähdyttävälle aineelle, jolla kennot saadaan pysymään sopivalla lämpötila-alueella. Tällä voidaan myös arvioida, riittääkö akustoon pelkkä ilmajäähdytys, vai tarvitaanko esimerkiksi ilmajäähdytystä tehokkaampaa vesijäähdytystä akuston pitämiseksi turvallisessa lämpötilassa. Kun riittävä massavirta saadaan laskettua, voidaan suunnitella, kuinka tämä massavirta saadaan aikaiseksi eli käytännössä minkäkokoinen puhallin tai vesipumppu tarvitaan.

4 Testaus

4.1 Laitteiston esittely

Akkujen testaus tehtiin Aalto-yliopiston tiloissa ja laitteilla. Yliopistolla oli kattava laitteisto akkukennojen testauksiin. Yliopiston henkilökunnasta oli paljon apua mittausten ja testien käytännön toteuttamisessa, eikä näin tuloksellisia testejä olisi voitu tehdä ilman heidän apuaan. Heillä oli myös paljon kokemusta kennojen mittauksista, eivätkä he epäröineet auttaa meitä testiviikon aikana. Laitteistoa ohjattiin heidän tällaisia mittauksia varten tekemällään ohjelmistolla, johon saatiin syötettyä Matlab-laskentaohjelmiston tiedostoja, jolla testisyklejä ajettiin. Koneella oli valmis ohjelma sisäisen resistanssin mittaamiseksi. Muut testit saatiin hyvin ajettua syöttämällä halutut parametrit ja komennot tietokoneelle. Endurancen testiä varten tietokoneelle syötettiin endurancea vastaava sykli.

Laitteistoon kuului muun muassa tietokonepääte, jolla laitteistoa ajettiin ja vesijäähdytetty keinokuorma sekä laitteiston hallinta-, ja suojauspaneelit. Testausympäristöä on esitetty kuvissa 2, 3 ja 4.



Kuva 2. Tietokonepöytä. Yliopiston pöytäkoneet ja oma kannettava tietokone.



Kuva 3. Laitteistoa

Lämpötilan mittauksessa termoparien tiedot tallennettiin tietokoneelle, josta ne saatiin ladattua käyttöön. Kaikki muu tieto, kuten kapasiteetti, virta, jännite, teho ja energia kerättiin ja tallennettiin Hioki 3390 laitteelle.



Kuva 4. Kennot ja Hioki 3390.

Testeistä saadut tulokset käsiteltiin Matlab-ohjelmistolla ja edellä esitettävät kuvaajat on myös piirretty samalla ohjelmalla.

4.2 Testauksen kulku

4.2.1 Maanantai 21.5

Aluksi tutustuttiin laitteisiin. Noin yhdeksän aikaan aloitimme syklytyksen kennoilla 9 ja 10. Nämä purettiin noin 3,8 voltin varastojännitteestä tyhjäksi 2,75 volttiin 0,5 C:n purulla ja ladattiin 0,5 C:n virralla 4,2 volttiin. Sama toistettiin kennoille 1–8, jotka syklytettiin kokoonpanolla 4P2S. Päivän päätteeksi kennon 9 kapasiteetti testattiin 1 C:n purulla ja 1 C:n latauksella. Epäselvyyttä aiheutti kennon purku täysin tyhjäksi, sillä jännite oli purun lopussa 3 V. Tiistain havaintojen perusteella voitiin olettaa akun purkautuneen tyhjäksi, sillä akun jännite palaa hyvin nopeasti takaisin 2,75 voltista 3 volttiin.

4.2.2 Tiistai 22.5

Kun koneet saatiin toimimaan, aloitettiin kennon 10 kapasiteetin mittausta 1 C:n purulla. Purun jälkeen kenno kokeiltiin purkaa vielä uudelleen, jotta saatiin varmuus että kenno purkautui 2,75 V:n rajaan asti. Kenno ladattiin 1 C:n latauksella. Kennon 10 jälkeen kapasiteetti testattiin kennoista 3 ja 4, myös 1 C:n purulla ja latauksella. Kennon 4 ka-

pasiteetin mittausta aloitettaessa mittaus alkoi noin puoli minuuttia kennon 3 tiedoston. Kennot 9, 10, 3 ja 4 tasattiin vastuksen kautta. Lopuksi mitattiin kapasiteetti standardi-purkuvirralla 0,5 C neljän kennon rinnankytkennästä, jossa oli kennot 5, 6, 7 ja 8. Mittausdatassa on pieni katkos, sillä turvallisuuden vuoksi mittaus katkaistiin hetkeksi ja tuettiin paremmin mittalaitteen johtoja. Samalla kennon 4 annettiin elpyä latauksesta, jotta se voidaan syklittää kennon 3 kanssa, kennojen 9 ja 10 ollessa yhä tasattavana. Tasauksessa käytetty 15 Ω :n vastus vaihdettiin 10 Ω :n vastukseen, koska mitään ei ollut tapahtunut 2,5 tunnin aikana. Yön ajan kaikki neljä kennoa tasattiin yhteen kolmella 1 Ω :n vastuksella, virran ollessa laskennallisesti maksimissaan noin 0,1A.

4.2.3 Keskiviikko 23.5

Aamulla aloitettiin kapasiteetin mittaus 1 C:n eli 20 A:n virralla rinnankytketyille kennoille 3, 4, 9 ja 10. Mittauksen alkaessa jännite oli noin 4,17 V. Latauksen alussa latausvirta nostettiin 0,5 C:stä 1 C:hen, joka näkyy mittadatassa. Päivällä aloitettiin kapasiteetin mittaus yksittäiselle kennolle 2 tarkoituksena purkaa se 0,5 C:n virralla, joka kuitenkin ajettiin 3 A:n virralla, kun puolikkaita ei saanut syötettyä käyttöliittymään. Kenno ladattiin 1 C:n (5 A) latausvirralla.

4.2.4 Torstai 24.5

Aluksi tehtiin DC-resistanssin mittaus kennolle 2. Mittaukseen käytettiin pulse discharge test -toimintoa, jolla kennoa ensin ladattiin ja sitten purettiin 1 C:n virralla 10 % maksimivaruudesta, minkä jälkeen aina pidettiin 4 minuutin tauko. Tämän jälkeen testattiin samasta kennosta DC-resistanssi 10 C:n purkuvirralla yhden minuutin odotusajalla ja mitattiin samalla lämpötilaa, joka tallennettiin käyttöliittymän kautta tietokoneen kovalevylle. Lataus aloitettiin pulse charge -toiminnolla, mutta sen pysähdyttyä lataus saatiin loppuun automatic chargella.

4.2.5 Perjantai 25.5

Testaus aloitettiin heti, kun endurancen sykli oli saatu ajettua sisään tietokoneeseen. Syklin pituus oli noin minuutti ja se kuvaa yhtä kierrosta 2009 vuoden Hockenheimin enduranssa, hieman dataa pehmentäen. Aluksi testattiin yksi sykli, jotta saatiin selvitettyä, että kaikki toimii, ja selvisikin, ettei automaattinen cut-off eli automaattinen kat-

kaisu jännitteen alarajalla toiminut. Testi päätettiin kuitenkin ajaa seuraten jännitettä ja katkaisemalla testi itse, kun jännitteen alaraja saavutetaan. Tämän testisyklin aikana tallennettiin Hiokin laitteella yhden syklin verran lämpötilaa, neljän syklin ajan kaikki muut mitta-arvot sekä testin lopuksi lataus kokonaisuudessaan. Latauksen jälkeen pidettiin 10 minuutin odotusaika, jonka jälkeen ajettiin 40 sykliä ja seurattiin lämpötilaa. Lämpötila nousi nopeammin 30 asteeseen kennojen keskellä, pysytteli siinä jonkin aikaa, ja lämpötilaerojen tasaannuttua kennojen välillä alkoi taas nousta. 40 syklin jälkeen ajettiin vielä yksi sykli, jolla kenno saataisiin tyhjäksi asti, joka keskeytettiin manuaalisesti kennojen jännitteen laskiessa alle 2,8 voltin. Maksimilämmöt nousivat kennojen keskellä 41 asteeseen.

Lämpötilaa mitattiin myös testissä, jossa purku tapahtui 25 C:n tasavirralla, joka keskeytettiin noin 2 minuutin jälkeen lämpöjen noustessa 50 asteeseen. Toisella kennolla testattiin lämpötilaa 15 C:n purkuvirralla. Tätä kenno kesti pidempään, ennen kuin mitaus keskeytettiin 50 asteen ylityttyä. Tämän jälkeen kennon annettiin hetki jäähtyä, jonka jälkeen purettiin 10 C:n virralla akku loppuun ja seurattiin lämpötilaa. Testien jälkeen kennot ladattiin 1 C:n virralla.

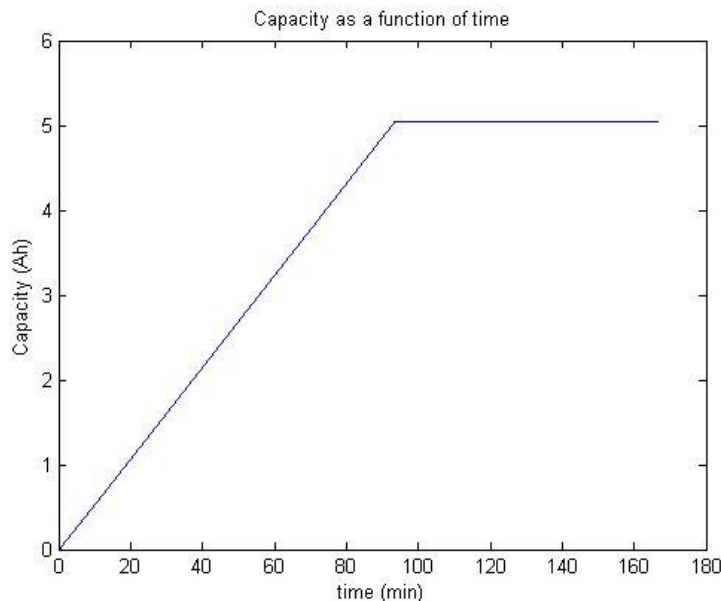
4.2.6 Huomioitavaa

Useimmissa kapasiteetin mittauksissa kennot eivät olleet lähtötilanteessaan ihan täydessä varauksessa, mistä johtuen täyttä 5 Ah varausta ei saavutettu niiden mittauksissa. Kennon 2 kapasiteetin mitaus tehtiin täydellä varauksella, ja se kertoo kennosta eniten, sillä sen mitattu kapasiteetti ylitti 5 Ah. Myös ajosykli ja lämpötilanmittaukset ajettiin täydellä varauksella, ja niissäkin mittauksissa saavutettiin kennolle luvattu 5 Ah kapasiteetti. Koska aika oli hyvin rajallinen, kaikkia mittauksia ei saatu tehtyä jokaiselle kennolle eikä toistoja ehditty tehdä mittausten virheiden minimoimiseksi, mutta siitä huolimatta mittaustarkkuutta ja tuloksia pidettiin käytännössä riittävinä todistamaan kennojen saavuttavan niille annetut ominaisuudet, sekä riittävinä viemään suunnittelutyötä eteenpäin. Mittaustuloksista kerrotaan tämän työn tulevissa kappaleissa lähinnä ne tulokset, joilla oli käyttötarkoitukseen eniten merkitystä ja hyötyä.

4.3 Kapasiteetti

Kapasiteettia mitattiin yksittäisestä kennosta sekä neljän rinnankytketyn kennon pake-
tista. Mittauksessa käytettiin 0,5 C:n (2,5 A), sekä 1 C:n (5 A) virtoja, jotta annetun ajan
puitteissa saatiin mitattua kaikki kennot. Testiympäristön käyttöliittymässä oli latauksen
suhteen hieman epätarkkuutta, jonka vuoksi akkukennoja ei saatu aina täysin varatuik-
si. Tämä näkyi välittömästi saaduissa tuloksissa. Tuloksia tarkastellessa voitiin kuiten-
kin päätellä kaikkien kennojen täyttävän annetut kapasiteetin arvot. Eri virroilla ei huo-
mattu suuria eroja kapasiteetissa.

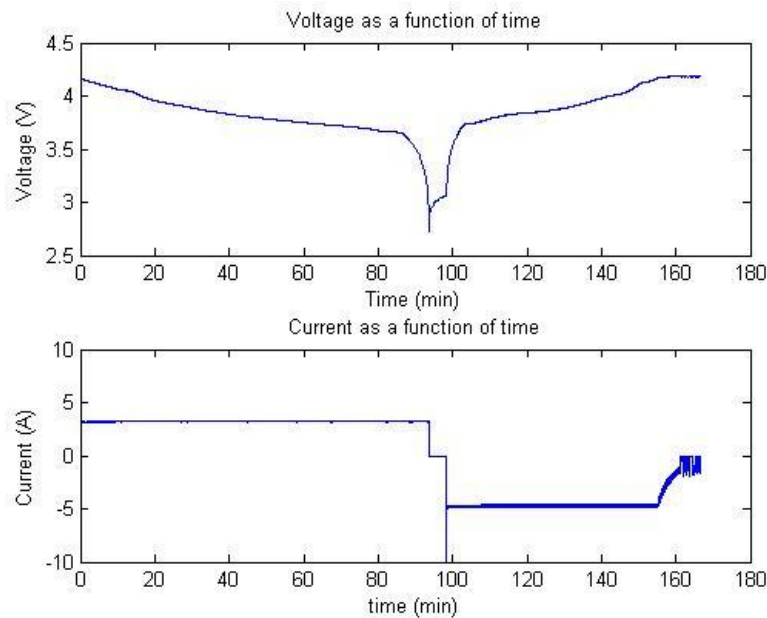
Alla oleva kuva 5 on kennon 2 kapasiteetin mittauksesta. Kenno purettiin 4,189 V:n
jännitteestä 2,726 V:n jännitteeseen 3,21 A:n virralla. Käyttöliittymään ei saanut asetet-
tua tarkkaan 0,5 C:n purkuvirtaa (2,5 A), joten purkuvirraksi asetettiin 3 A ja 0,21 A:n
virhe johtui käyttöliittymän ja keinokuorman välisestä virheestä. Kapasiteetin tulokseksi
saatiin kuitenkin tästä mittauksesta 5,052 Ah ja latauksesta mitattuna saatiin 17,7 Wh
kennon energiasisällöksi. Mittalaite ei jostain syystä tallentanut tämän testin aikana
energiasisältöä.



Kuva 5. Kennon 2 kapasiteetti ajan funktiona.

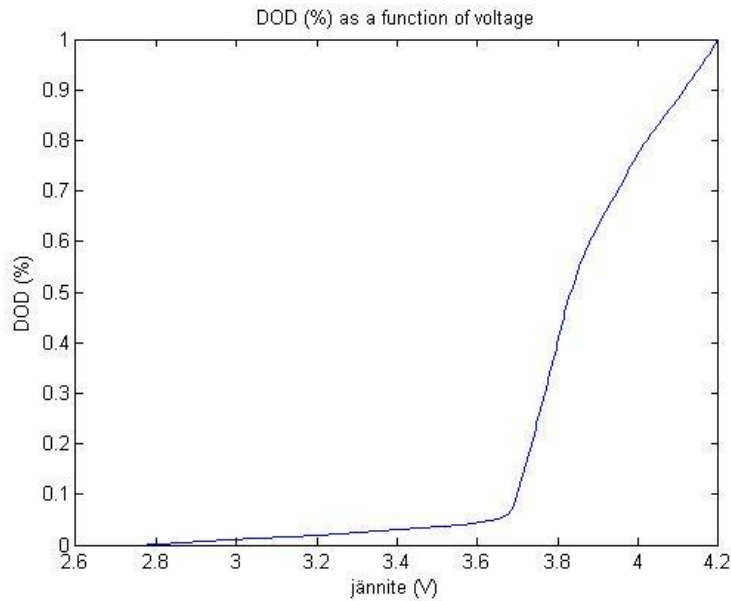
Alla kuvassa 6 on kennon 2 kapasiteetin mittausdatan kuvaajat jännitteestä ja virrasta.
Kuvaajissa on sekä purku että lataus mitattu samaan dataan. Virtakuvaajassa näkyy

lataus negatiivisena arvona. Lataus tehtiin 1 C:n (5 A) virralla. Latauksen lopussa näkyy selkeästi kuinka virtaa rajoitetaan kun lähestytään laitteelle asetettua 4,2 V:n maksimijännitettä. Kun kenno tuli täyteen, katkaisi laite virran ja toisti latauksen vielä 10 kertaa, jotta kenno tulisi kokonaan täyteen. Jännitteen kuvaajasta nähdään, kuinka jyrkästi jännite alkaa laskea pian 3,7 V:n nimellijännitteen alla.



Kuva 6. Kennon 2 virta- ja jännitekuvaajat kapasiteettimittauksesta.

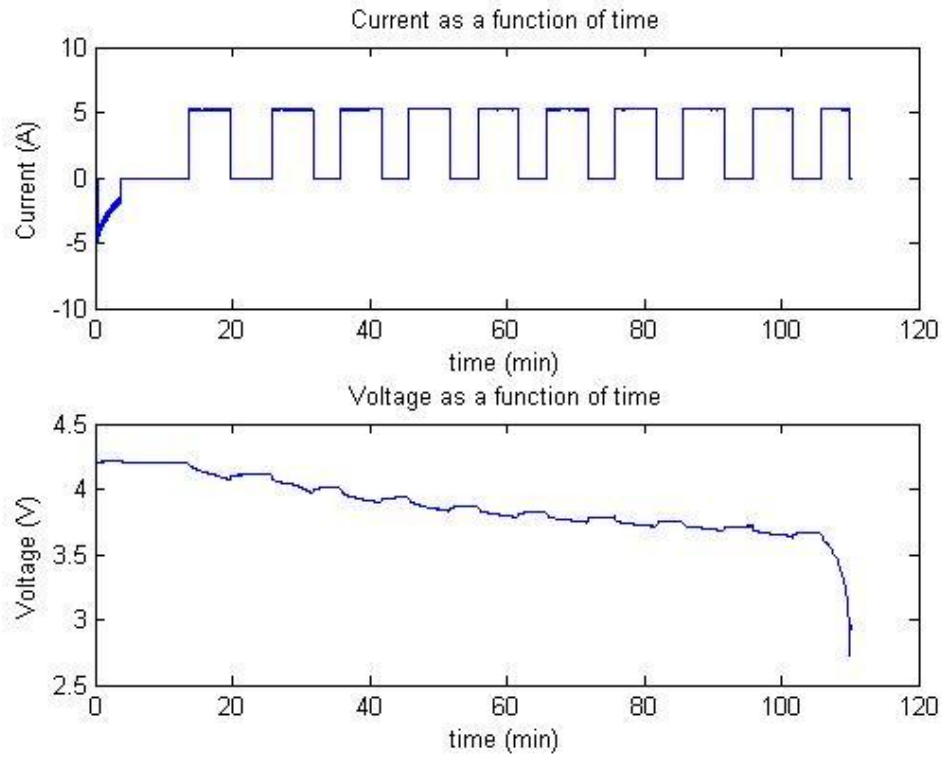
Sisäisen resistanssin mittausdatasta otetusta kuvasta 7 nähdään, että jännitteen ollessa laskenut nimellijännitteeseen on kennon kapasiteetista käytetty jo 90 %. Tästä tiedosta on hyötyä korkeajännitekomponenttien mitoituksessa ja maksimivirran arvioinnissa. Käytännössä kilpailussa käytettävä minimijännite tulee todennäköisesti olemaan nimenomaan nimellijännite, joten kennojen käyttöalue tulee olemaan 4,2 V-3,7 V.



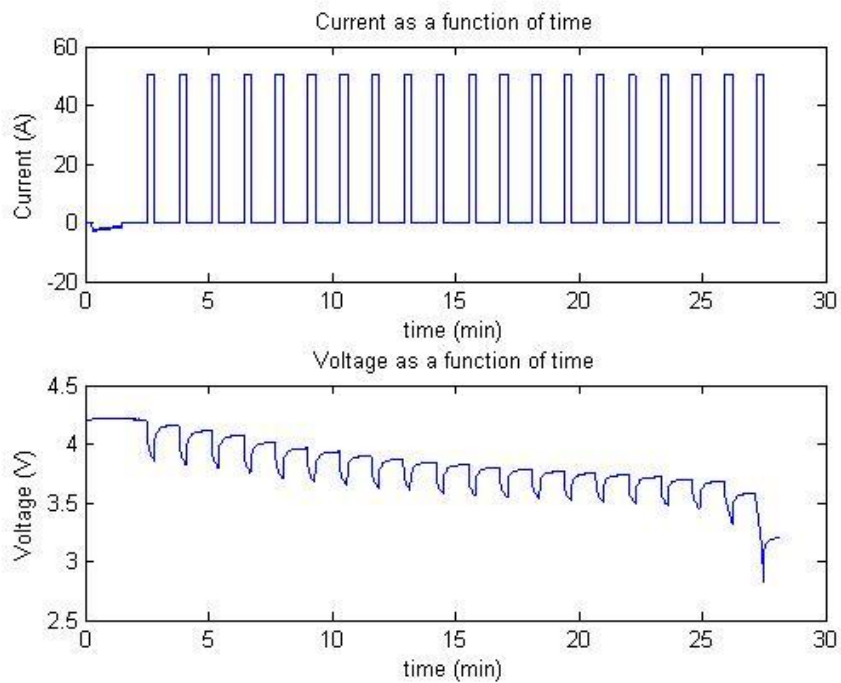
Kuva 7. Kennon varaustaso jännitteen funktiona.

4.4 Sisäinen resistanssi

Sisäisen resistanssin mittauksessa keskityttiin mittaamaan nimenomaan puhdasta ohmista resistanssia tasavirralla, koska se tieto merkitsee käytännössä enemmän kuin vaihtovirralla mitattava vastus, jonka valmistajat yleensä ilmoittavat. Sisäinen resistanssi mitattiin menetelmällä, jossa kennoa purettiin kerrallaan 10 % sen varaustilasta ja purkujen välissä pidettiin minuutin odotusaika jolla kenno annettiin elpyä. Kennoa 2 mitattaessa 1 C:n kuormalla purkutilanteessa käytettiin 5 minuutin odotusaikaa, jonka jälkeen odotusaikaa lyhennettiin, jotta saataisiin testidataa joka vastaisi paremmin todellisuutta. Tulosten perusteella kuitenkin odotusajalla ei ole suurta vaikutusta sisäiseen resistanssiin. Mittaukset tehtiin 1 C:n (5 A) purulla, jonka virta- ja jännitekuvaajat näkyvät kuvassa 8, sekä 10 C:n (50 A) purulla, jonka virta- ja jännitekuvaajat näkyvät kuvassa 9.

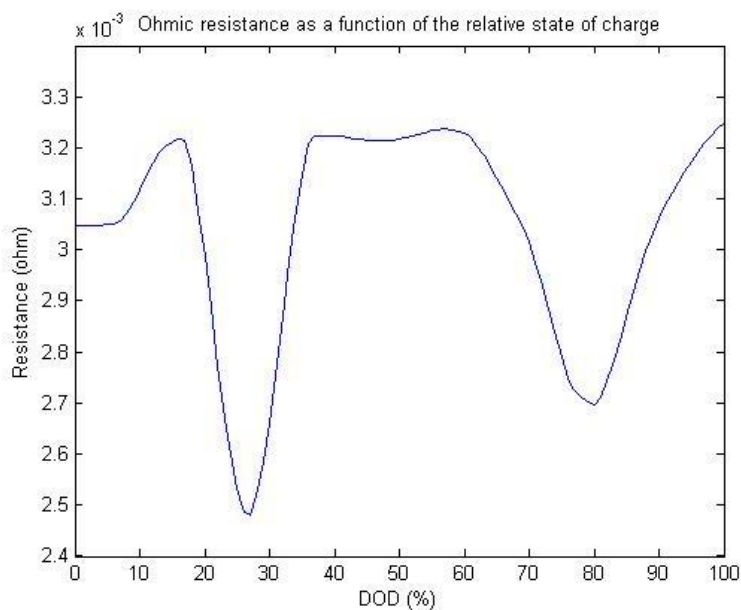


Kuva 8. Virta- ja jännitekuvaajat ajan funktiona 1 C:n (5 A) purkuvirralla.



Kuva 9. Virta- ja jännitekuvaajat ajan funktiona 10 C:n (50 A) purkuvirralla.

Kuvassa 10 on purkusyklistä saatu R0 DC-resistanssikäyrä. Resistanssikäyrän muotoon vaikuttaa jonkin verran se, kuinka kauan virran askelmaiseen muutokseen oletetaan kuluvan aikaa. Kuitenkin nähdään resistanssin pysyvän melko tasaisesti 3 mΩ:n tuntumassa, eikä kuvaajassa ole näkyvissä suurta resistanssin muutosta varaustilan suhteen lukuun ottamatta näkyviä hyppyjä. Käyrän keskiarvoinen resistanssi onkin tasan 3,0 mΩ.



Kuva 10. DC-resistanssikäyrä, jossa resistanssi varaustilan funktiona.

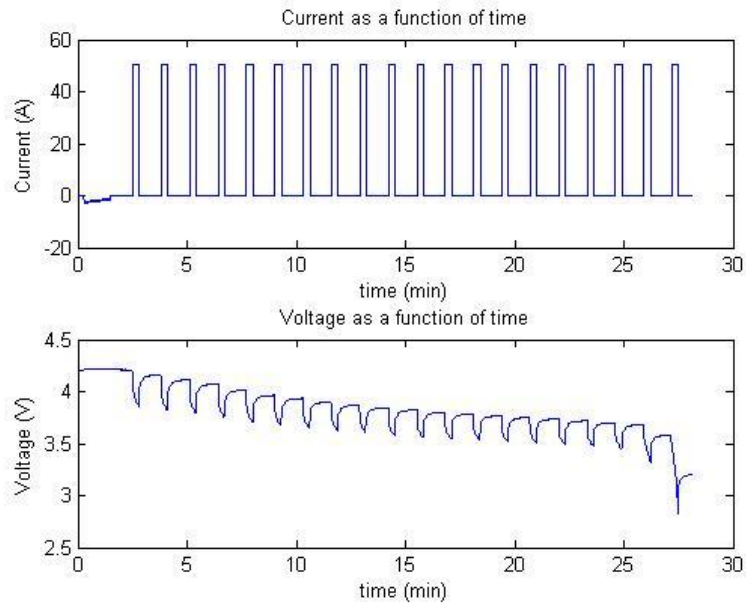
4.5 Lämpötilat

Lämpötilaa seurattiin neljässä mittauksessa: 10 C:n (50 A) DC-resistanssimittauksessa, 25 C:n (125 A) purkutestissä, 15 C:n (75 A) purkutestissä ja endurancen ajosyklistestissä. Endurancen lämpötilamittauksen tulokset käsitellään omassa osiossaan muiden endurancen tulosten kanssa luvussa 4.6.

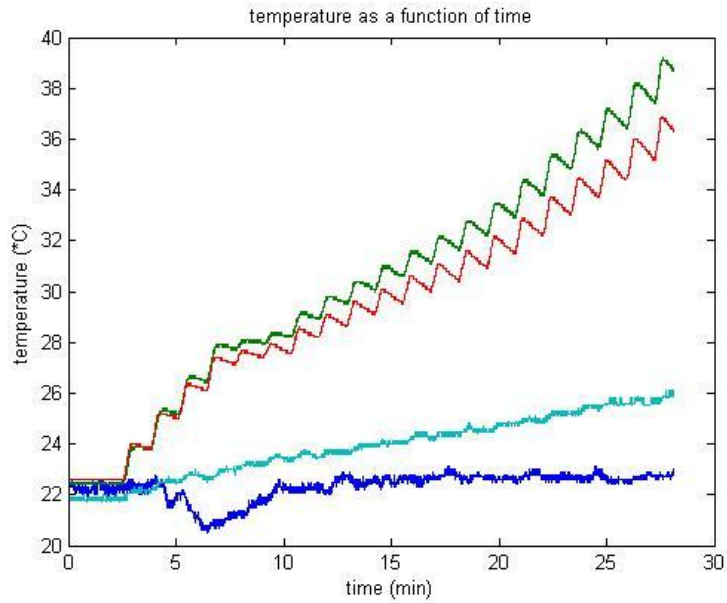
4.5.1 Lämpötila 10 C:n (50 A) DC-resistanssimittauksessa

10 C:n (50 A) DC-resistanssimittauksesta saadut kuvaajat on esitetty kuvissa 11 ja 12. Kuvassa 11 on esitetty virta- ja jännitekuvaajat mittauksessa, joiden vaihtelua voi verrata lämpötilan käyttäytymiseen kuvassa 12. Lämpötilakuvaajassa vihreällä värillä näkyy termopari, jolla mitattiin kennon yläosaa, punaisella termopari, jolla mitattiin keskiosaa,

turkoosilla termopari jolla mitattiin plusliitääntää ja sininen on referenssilämpötila, joka on huoneenlämpötilassa. Lämpötilakuvaajasta näkee kuinka lämpötila seuraa virtakuvaajaa. Liitäntä on selvästi lämmennyt kennosta johtumalla, koska se ei seuraa niin selvästi virtakuvaajaa, joten siinä on ollut pieni häviö. Liitäntä toteutettiin alumiinisella muutoskappaleella, joka toisesta päästä liitettiin M5-pultilla kennoon ja toisesta päästä M8-pultilla kuormalaitteen liitääntään.



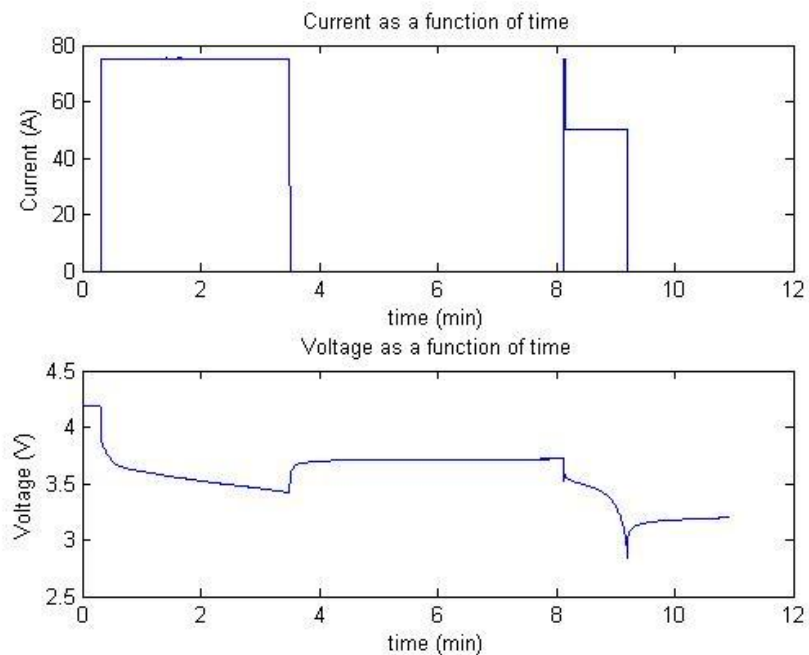
Kuva 11. Virta- ja jännitekuvaajat ajan funktiona.



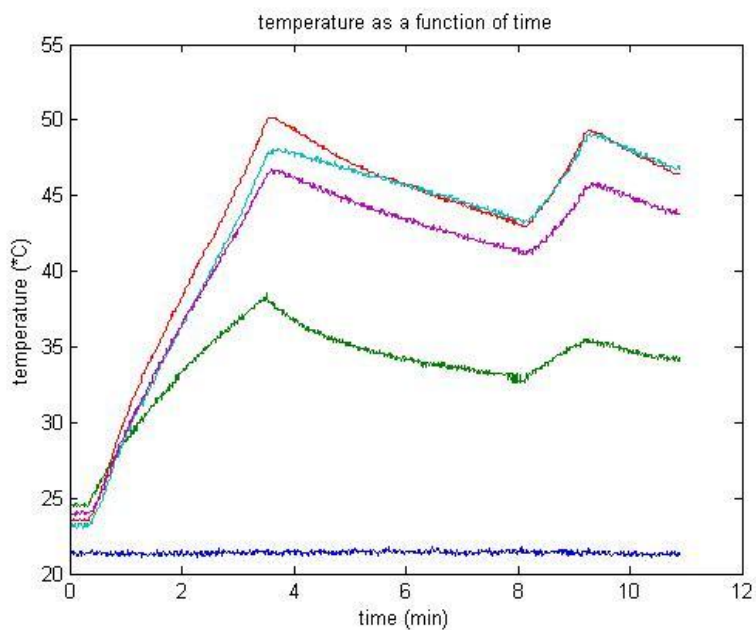
Kuva 12. Termoparien osoittama lämpötilan nousu ajan funktiona.

4.5.2 Lämpötilat 15 C:n (75 A) purkutestissä

Kuvissa 13 ja 14 näkyy yhdessä 15 C:n (75 A) ja 10 C:n (50 A) tasavirralla toteutettu lämpötilatesti. Kun lämpötila alkoi 15 C:n purulla ylittää 50 °C, testi päätettiin hetkeksi keskeyttää. Kennon jäähtyttyä päätettiin ajaa kenno tyhjäksi 10 C:n purulla.



Kuva 13. Virta- ja jännitekuvaajat ajan funktiona.



Kuva 14. Termoparien osoittama lämpötilan nousu ajan funktiona

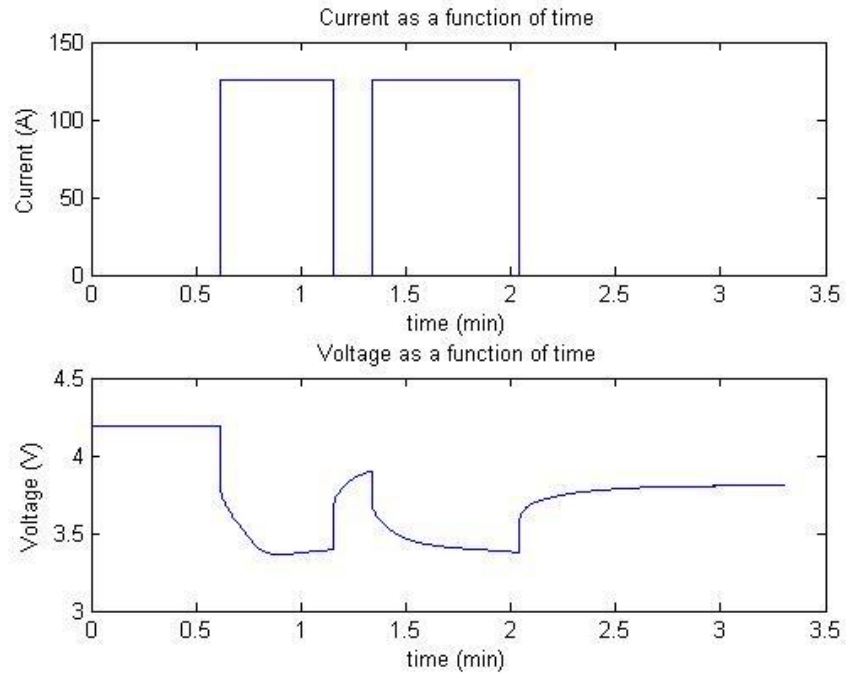
Sinisellä värillä kuvassa 14 näkyy referenssilämpötila $21,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, vihreällä termopari miinusnavan liitoksessa, violetilla termopari kennon yläosassa, turkoosilla termopari kennon alaosassa ja punaisella termopari kennon keskiosassa. Suoraan nähdään, että kenno on lämmennyt selkeästi eniten keskiosastaan, mikä kuulostaakin järkevältä. Toi-

saalta yleisesti ottaen kennot lämpenevät enemmän yläosastaan läheltä liitosta, sillä kennon sisällä siinä pitäisi vallita suurin jännite-ero ja sisäinen häviö. Testikennomme eivät kuitenkaan käyttäytyneet tämän teorian mukaisesti, mikä saattaakin päteä lähinnä suurempiin akkuihin. Kun virta on katkaistu, kennon keski- ja alaosan lämpötilat tasaantuvat. Yläosan lämpötila ei tasaannu yhtä voimakkaasti samaan lämpötilaan. Tällä kertaa liitoksessa on jo selvästi nähtävillä häviötä jonkin verran, sillä sen lämpötilakuvaaja seuraa tarkasti virtakuvaajaa kuvassa 13.

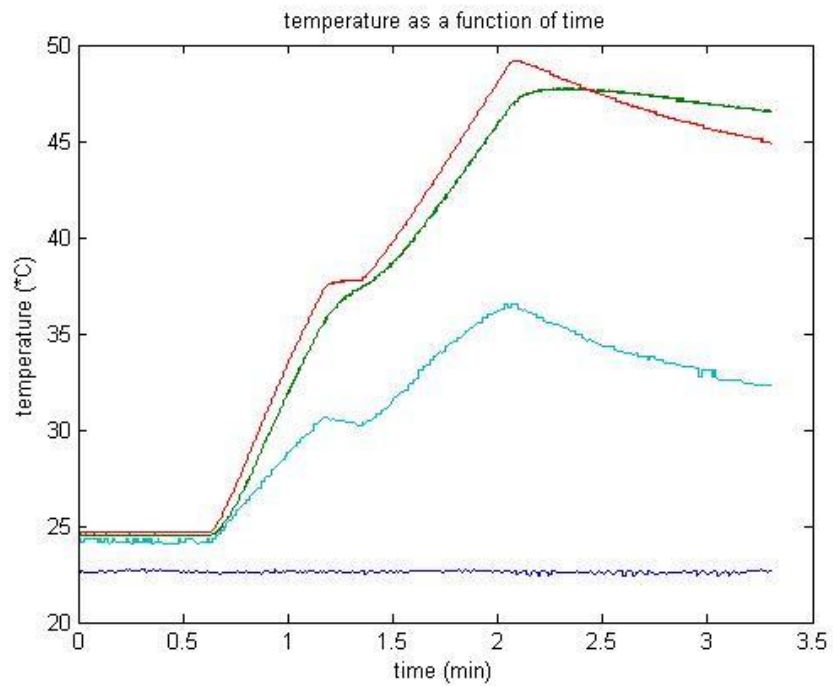
4.5.3 Lämpötilat 15 C:n (75 A) purkutestissä

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty virta-, jännite- ja lämpötilakuvaajat 25 C:n (125 A) tasavirralla toteutetussa lämpötilatestissä. Lämpötilan nousu on näillä virroilla nopeaa, mutta toisaalta yleisesti suurempiin kennoihin verrattuna lämmön nousu on vielä suhteellisen rauhallista. Huoneenlämpötila näkyy kuvassa 16 termoparin mittaamana jälleen sinisellä, turkoosilla näkyvä termopari on asetettuna plusnavan liitoksessa, vihreä termopari asetettuna kennon etupuolella ylhäällä ja punainen termopari kennon etupuolella keskellä. Kennon alaosaan sijoitetun termoparin lämpökuvaaja on jätetty pois, sillä sen data ei ollut käyttökelpoista. Virtakuvaajasta nähdään, että testin aikana on ollut pieni katkos, joten purku ei ole ollut yhtäjaksoista. Jälleen kennon liitännässä voidaan todeta tapahtuneen tehohäviötä lämpökuvaajan perusteella. Häviö on kuitenkin kennojen lämpöhäviöön verrattuna selvästi pienempi, eikä se käytännössä koidu ongelmaksi. Kenno on tässäkin testissä lämmennyt eniten keskeltä, ja yläosan termoparin käyrästä voidaan nähdä lämmön siirtyneen keskiosasta kennoa pitkin johtumalla, sillä yläosan lämpökuvaaja on huomattavasti keskiosaa tasaisempi. Näin suurta kuormitusta ei tule yksittäisellä kennolla missään tapauksessa kisa-olosuhteissa olemaan, sillä suurin kuorma yksittäisellä kennolla tulee olemaan noin 50 ampeerin luokkaa hetkellisesti.

Testin tarkoituksena oli varmistaa kennon kyky antaa valmistajan ilmoittava virta, sekä tarkistaa että se saadaan turvallisesti ilman kennon ajautumista epävakaiseen tilaan. Kennojen antaessa 125 A:n virta voidaan uskoa kennojen toimivan turvallisesti myös 50 A:n virralla. Tätä testiä varten valmistauduttiin tuomalla paikalle sammutusvälineistö ja käymällä läpi toimenpiteet, mikäli kennot olisivat syttyneet palamaan. Testissä huomattiin silmämääräisesti kennon turpoaminen termoparin johtojen jäädessä pussin ”sisään”, kun se paisui voimakkaammin pleksin pintaa vasten.

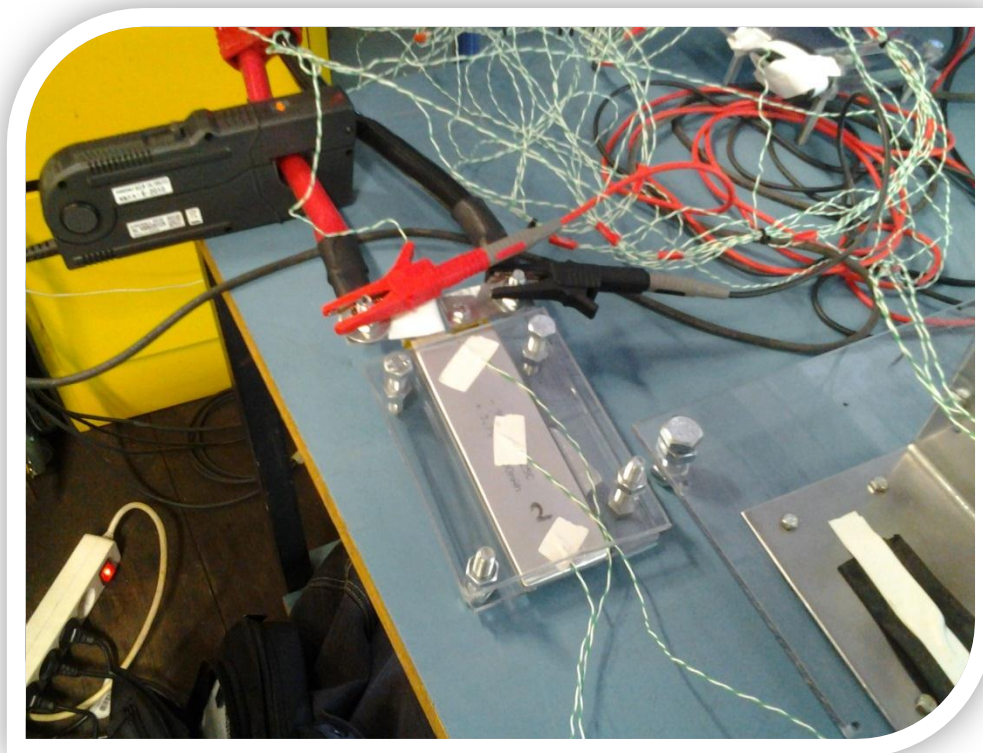


Kuva 15. Virta- ja jännitekuvaajat ajan funktiona



Kuva 16. Termoparien osoittama lämpötilan nousu ajan funktiona

Kuvassa 17 on vielä esitettyä yksittäinen kenno yksinkertaisessa testipenkissä. Siihen on asennettu termoparit yläosaan, keskelle ja alaosaan sekä sen plusnavan liitoskohtaan.



Kuva 17. Kenno 2 mittauksessa, jossa seurataan myös lämpötilaa.

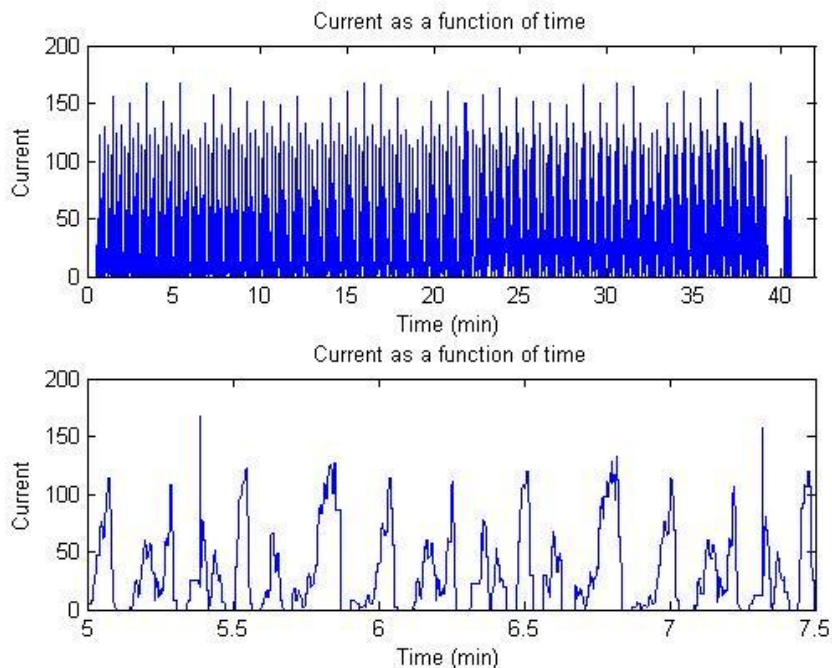
4.6 Endurance-käyttötesti

Kennoilla ajettiin vuoden 2009 Hockenheimin endurancen datan pohjalta simuloitu käyttötesti. Lokitiedoista lasketun tehon perusteella laskettiin sähköauton käyttämä virta kennojen nimellisjännitteellä 3,7 V. Tämän vuoksi testi ei ole virheetön, sillä kuten aiemmin todettiin, nimellisjännitteessä kennojen kapasiteetista on käytetty jo 90 % ja endurance-testin perusteella akustoa ei tulla ajamaan ainakaan tämän alle. Toisaalta mitoittaessa akuston jäähdytystä tämän testin tulosten perusteella, voidaan jäähdytys olettaa riittäväksi.

Virta laskettiin yhdelle kierrokselle, minkä jälkeen virta- ja aikadata siirrettiin kuormalaitteen käyttöliittymän ohjelmaan. Virran muutosnopeutta alennettiin kuormalaitteelle so-

pivaksi. Testi ajettiin neljän tasatun kennon rinnankytkennällä, jotka oli liitetty akustoon suunnitelluilla väliholkeilla. Testissä kennoja ajettiin pelkästään positiivisilla virran arvoilla eli regenerointi jätettiin testistä pois, sillä sen mahdollinen käyttöaste valmiissa sovelluksessa oli testihetkellä vielä epäselvä.

Akut ajettiin täydestä varauksesta tyhjäksi toistamalla yhtä simuloitua kierrosta lähes 40 minuuttia. Lopussa akun jännitettä tarkkailtiin ja sykli katkaistiin kun varaus alkoi laskea lähelle 2,75 V:n jännitettä. Lopussa näkyy hetken tauon jälkeen vielä lyhyt purku, sillä kenno ei tullut täysin tyhjäksi ja siitä haluttiin saada täysi energiasisältö purettua. Maksimivirta testissä oli noin 167 ampeeria. Alkuperäisen datan korkein virtapiikki oli lähes 200 ampeeria, mutta tasattaessa dataa kuormalaitteelle sopivaksi korkeimmat huiput pehmenivät. Kuvassa 18 näkyy ylemmässä kuvaajassa ajettu sykli kokonaisuudessaan, alempi on virtakäyrän muotoa enemmän hahmottava kuvaaja aikaväliltä 5-7,5 minuuttia. Virtapiikit ovat hyvin lyhytaikaisia, minkä vuoksi lämpöhäviö ei ole niin suuri ongelma. Hukkateho nousee virran neliöön, minkä vuoksi hukkatehoa ei pysty laskemaan keskiarvoisen virran perusteella, mutta 29,5 ampeerin keskiarvoinen positiivinen virta kertoo silti jotain käyttösovelluksesta.



Kuva 18. Virta ajan funktiona endurancen testissä.

Tässä testissä kennojen lämpötilaa mitattiin rinnankytkettyjen kennojen välistä keskeltä, sekä neljännen kennon ulkopinnalta. Molemmissa paikoissa käytettiin kolmea termoparia, joilla mitattiin lämpötilaa kennojen yläosasta, keskeltä ja alhaalta. Yhdellä termoparilla tarkkailtiin positiivisten nastojen välissä olevan holkin lämpötilaa. Värien merkitykset poimittuna Matlab-laskentaohjelmiston käskyrivistä ovat seuraavat:

keskellä keskellä - sininen

alhaalla laidassa - punainen

referenssi huoneenlämmössä - vihreä

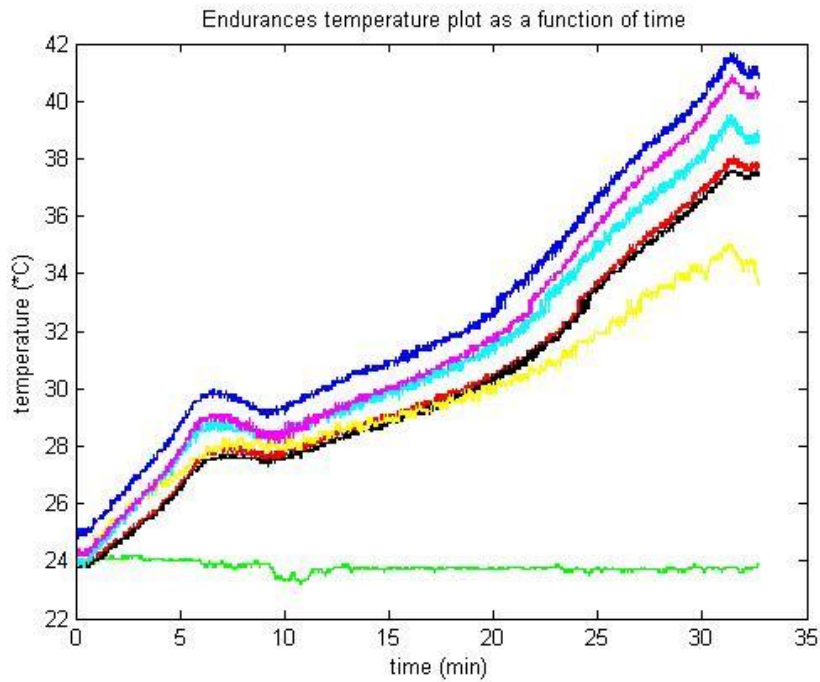
laidassa ylhäällä - musta

Plus holkissa - keltainen

keskellä ylhäällä - turkoosi

keskellä alhaalla – violetti.

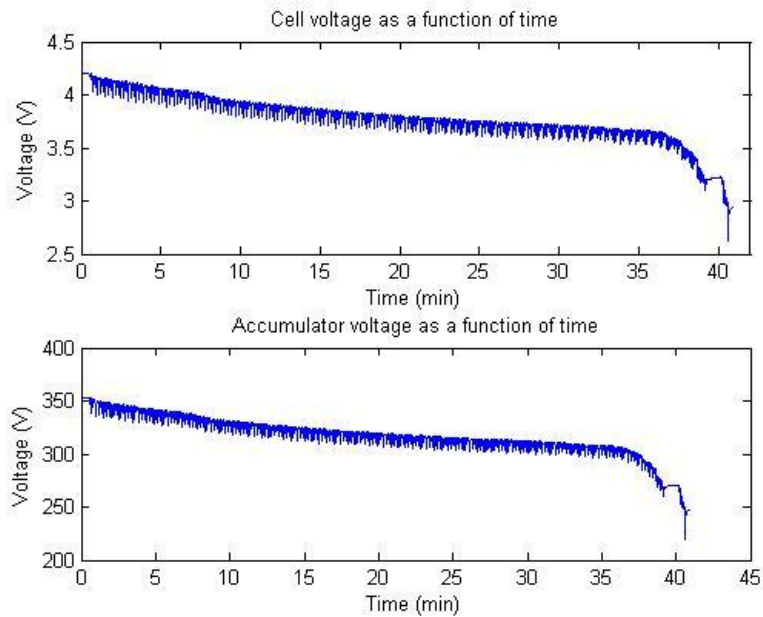
Kuva 19 näyttää lämpötilan nousun eri termopareilla ajan funktiona. Odotetusti kennojen välissä olleet termoparit näyttävät suurempaa lämpötilaa kuin laidassa olleet ja termopareista keskimäinen on antanut suurimmat lämpötilat. Lämpötilan nousu testissä oli pienempi kuin mitä odotettiin, sillä 40 minuutin ajossa lämpötila nousi enimmillään $16,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, saavuttaen lämpötilan $41,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tämä tieto helpotti jo suuresti akuston jäähtymisen mitoitus sekä auttaa simuloitaessa akuston jäähtymistä.



Kuva 19. Termoparien mittaama lämpötila ajan funktiona.

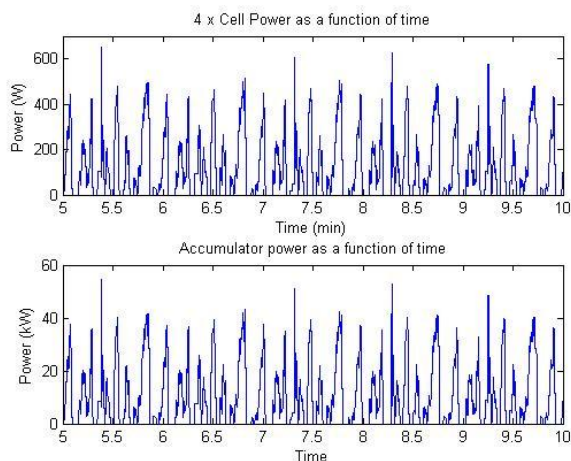
Toisaalta kuvaajasta voidaan huomata, että lämpötila on viiden minuutin jälkeen alkanut laskea, mikä johtuu todennäköisesti ulkoisesta virhetekijästä, joka on päässyt jäädyttämään kennoja. Kuitenkaan referenssilämpötilassa ei ole samanlaista laskua nähtävissä. Kennot olisi pitänyt täysin eristää ympäröivästä ilmasta, jolla olisi saatettu vähentää virheen mahdollisuutta. Toisaalta koko testin ajan ovet olivat kiinni eikä tilassa ollut vetoa, joten tulosten voisi uskoa olevan luotettavia, sillä akustoakin tullaan käyttämään erilaisissa olosuhteissa ja virhemarginaalin voidaan kuvitella olevan tähän verrattuna suhteellisen pieni.

Kuva 20 on endurance-testin jännitekuvaaja. Ylempi kuvaaja on testidatasta saatu kennojen purku täydestä tyhjäksi. Lähtöjännite on 4,202 V. Alempana testipaketin jännitedata on kerrottu 84:llä, jolloin on saatu koko akuston jännitekuvaaja, jolla nähdään, kuinka koko akuston jännite käyttäytyy endurancen aikana.



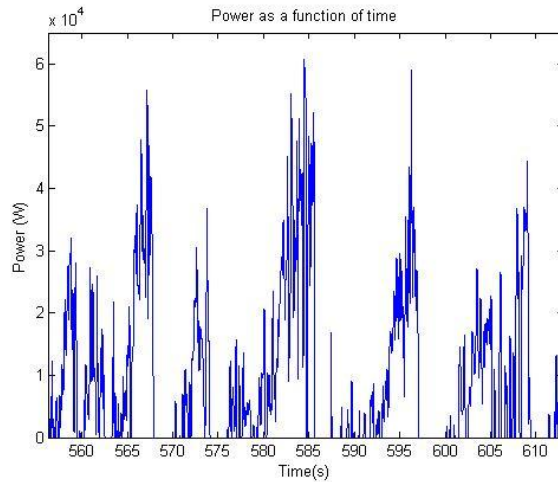
Kuva 20. Kennon jännite ja laskettu koko akuston jännite ajan funktiona.

Kuvassa 21 on tehokuvaajat endurancesta. Ylempi kuvaaja on mittaustuloksista saatu testatun rinnankytkennän tehokuvaaja ja alempi on testidatan perusteella laskettu tehokuvaaja koko akustolta. Laskettu maksimiteho koko akustolta on noin 55 kW, ja keskiarvoinen teho on noin 9,2 kW, joka on pelkästään positiivisista tehon arvoista laskettu.



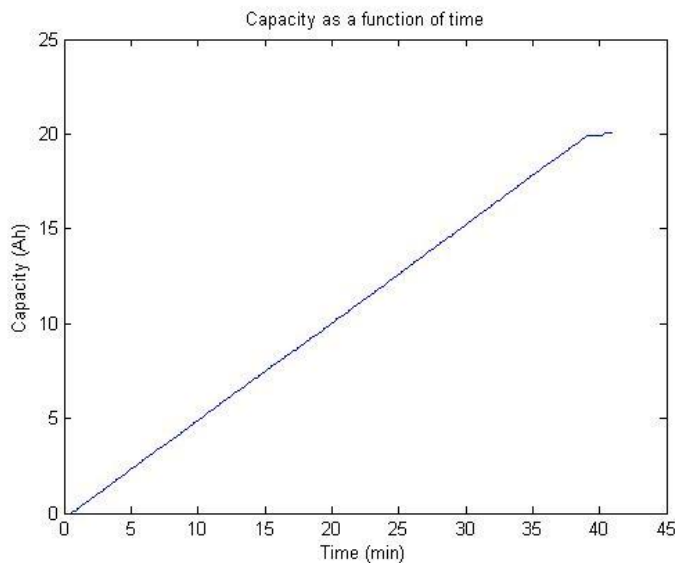
Kuva 21. Kennosta purettava teho ja laskettu koko akustosta purettava teho ajan funktiona.

Kuvassa 22 on esitetty alkuperäinen endurancen datasta laskettu teho, jota vertaamalla kuvaan 21 huomaa, kuinka paljon dataa on pehmennetty kuormalaitteelle.



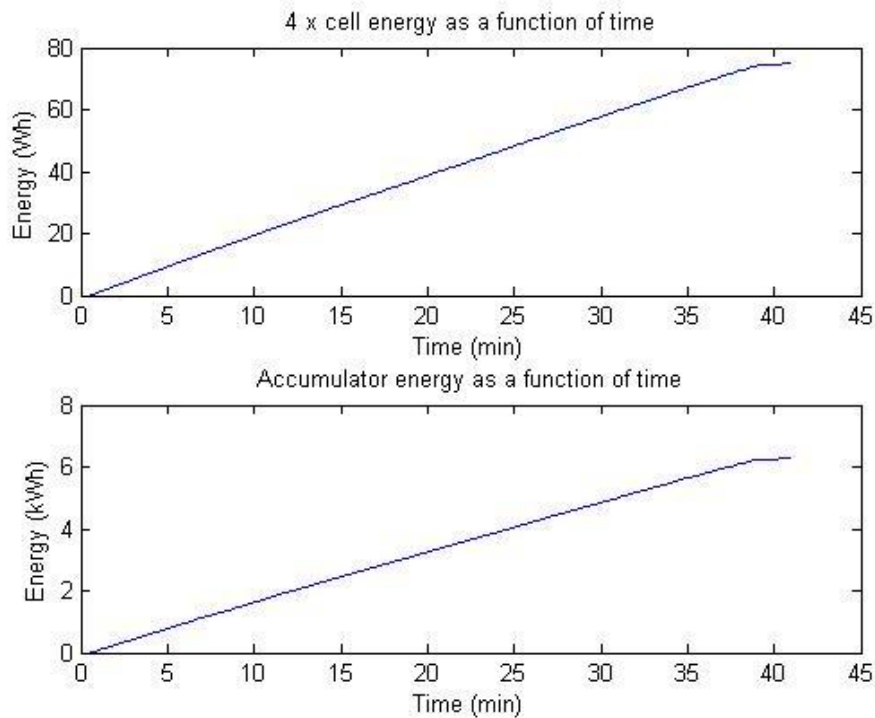
Kuva 22. Käsittelemätön tehokuvaaja 2009 vuoden endurancesta.

Kuvassa 23 on rinnankytkennästä testin aikana purettu kapasiteetti ampeeritunteina ajan funktiona. Testistä saatu kapasiteetti oli 20,094 Ah. Neljän rinnankytketyn kennon paketista saatiin täysi kapasiteetti, koska $5 \text{ Ah} * 4 = 20 \text{ Ah}$. Tämä oli osittain ehkä jopa hieman yllättävää, sillä kennoista otettiin suuria virtoja ja kuormitus oli hyvin vaihtelevaa. Yleisesti kennojen kapasiteetin voisi olettaa suuremmalla kuormituksella mitattuna olevan pienempi kuin tarkasti valmistajan ohjeiden mukaisesti pienellä vakiovirralla mitattu kapasiteetti. Näin odotettiin tapahtuvan tässäkin tapauksessa, mutta yllätyimme positiivisesti hyvistä tuloksista ja kysymys siitä, mikä kapasiteetti kennoilta voidaan todellisuudessa saada endurancen aikana, sai vastauksen.



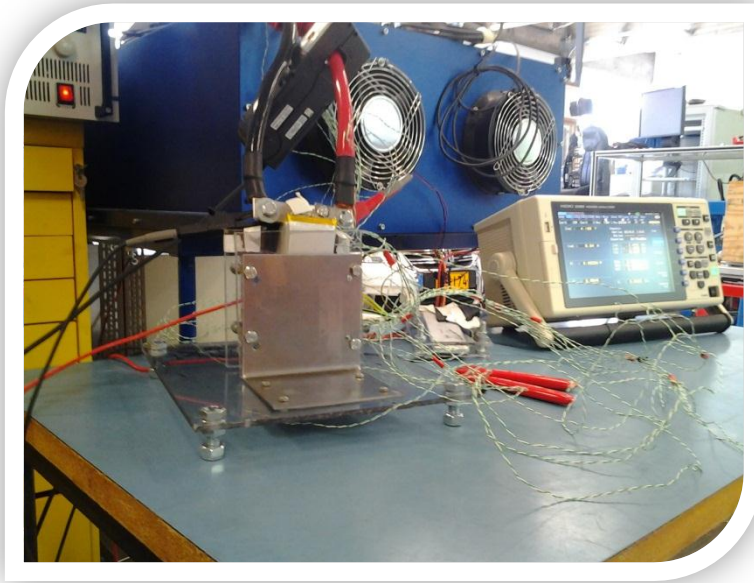
Kuva 23. Mitattu kapasiteetti ajan funktiona.

Kuvassa 24 nähdään akuilta mitatun energiasisällön kuvaaja ajan funktiona. Ylempi kuvaaja on suoraan mitattu energiasisältö neljältä rinnankytketyltä kennolta, alempi kuvaaja on mitatun datan perusteella laskettu energiasisältö koko akustolla. Neljälle rinnankytketylle kennolle saatiin energiasisällöksi 74,94 Wh, valmistajan ilmoittamien kennon speksien mukaan laskemalla saadaan tulos 74 Wh. Näin ollen siis energiasisältö saavutettiin ja jopa hieman ylitettiin. Koko akustolle saatiin energiasisällöksi 6,295 kWh, ja valmistajan speksien mukaan laskemalla energiasisällöksi saadaan 6,216 kWh.



Kuva 24. Testissä mitattu energiasisältö ajan funktiona.

Kuvassa 25 on neljän rinnankytketyn kennon paketti asetettuna yksinkertaiseen testipenkkiin sekä termoparit kytkettynä. Pöydällä on testiä mittaamassa Hioki 3390.



Kuva 25. Rinnankytketty paketti testiolosuhteissa.

5 Yhteenveto

Insinööriyössä tutkittiin formulatiimin kilpa-autoon tulevaksi suunnitellun akkutyyppin kapasiteettia, sisäistä resistanssia, virran purkukykyä ja lämpenemistä.

Koska akuston suunnittelua varten kaivattiin tarkempaa tietoa akuston käyttäytymisestä kilpailun aikana, tehtiin neljälle rinnankytketylle kennolle endurance-käyttötesti. Testissä akut ajettiin täydestä varauksesta tyhjäksi toistamalla yhtä simuloitua kierrosta lähes 40 minuuttia. Testissä mitattiin virtaa, jännitettä, tehoa, kapasiteettia, energiankulutusta ja lämpötilaa useammasta paikasta. Testistä saatiin paljon käyttökelpoisia tuloksia ja lämpötilan nousun havaittiin olevan maltillista endurancenkin aikana.

Kapasiteetin ja virran purkukyvyn havaittiin täyttävän valmistajan ilmoittamat arvot erilaisissakin kuormituksissa. Sisäiselle resistanssille saatiin arvo nimenomaan suunnittelussa tasavirtakäytössä. Kennojen lämpenemisen havaittiin olevan maltillista ja kennojen havaittiin lämpenevän suhteellisen tasaisesti joka kohdasta.

Testeistä ei rajallisen ajan vuoksi saatu paljoa toistoja, eivätkä mittaukset olleet täysin suojassa häiriötekijöiltä ja virhettä varmasti esiintyi. Kun otetaan huomioon mahdollis-

ten mittausten virheiden ja epätarkkuuksien suuruus, voidaan ne kuitenkin olettaa käytännön tasolla riittävän pieniksi. Kun ajatellaan kennojen käyttösovellusta ja siellä mahdollisesti esiintyviä antureiden epätarkkuuksia, kuin myös järjestelmän osien häviöitä, voi olla sitä mieltä että mittausten tulokset olivat kaikin puolin riittävän luotettavia. Myös laskenta on käytännössä mahdoton tehdä täysin oikein esimerkiksi kapasiteetin riittävyyden osalta. Endurance-testiin laskettu teho ja tarvittava kapasiteetti vaihtelevat eri radoilla. Radoilla on erilaisia pintoja, hieman eri keskinopeudet ja jokaisen radan olosuhteet ovat erilaiset. Näin ollen kapasiteetti on vain saatava riittäväksi, tai tehoa rajoitetaan radalla tilanteen mukaan. Nämä mittaukset antavat endurancen osalta yhden tuloksen kapasiteetin ja lämpötilan osalta. Kapasiteetti, energiasisältö ja sisäinen resistanssi ovat kennon ominaisuuksia mitattaessa taas tuloksia, joista saadaan suoraan varmemmat ja tärkeämmät tiedot, joissa toisaalta myös virheen suuruus korostuu.

Testit olivat myös monipuolisuudeltaan testaushetkellä olosuhteisiin nähden mielestämme riittävät. Lähtötiedot ja -taidot olivat testattaessa sillä tasolla kuin olivat, mutta oppimisen ja ymmärtämisen halu oli suurta. Tulokset olivat kuitenkin hyviä, ja niihin oltiin tyytyväisiä. Mittaukset osoittivat testikennojen täyttävän kaikki ne ominaisuudet, jotka valmistaja lupasi ja jotka haluttiin varmistaa. Myös kaikkiin avoimiin kysymyksiin saatiin vastaukset, ja tulokset olivat oikeastaan kaikilta osin paremmat kuin mihin oli varauduttu. Testin tulosten perusteella monissa epäselvissä asioissa päästiin välittömästi eteenpäin, ja mittatulokset antoivat apua niin laskennoissa, joita vastaan tuli vielä suunnittelukaudella kuin myös kisojen staattisissa osioissa. Ennen kaikkea testien perusteella uskallettiin tehdä päätös kennojen sopivuudesta tiimin sovellukseen ja päätös niiden tilaamisesta.

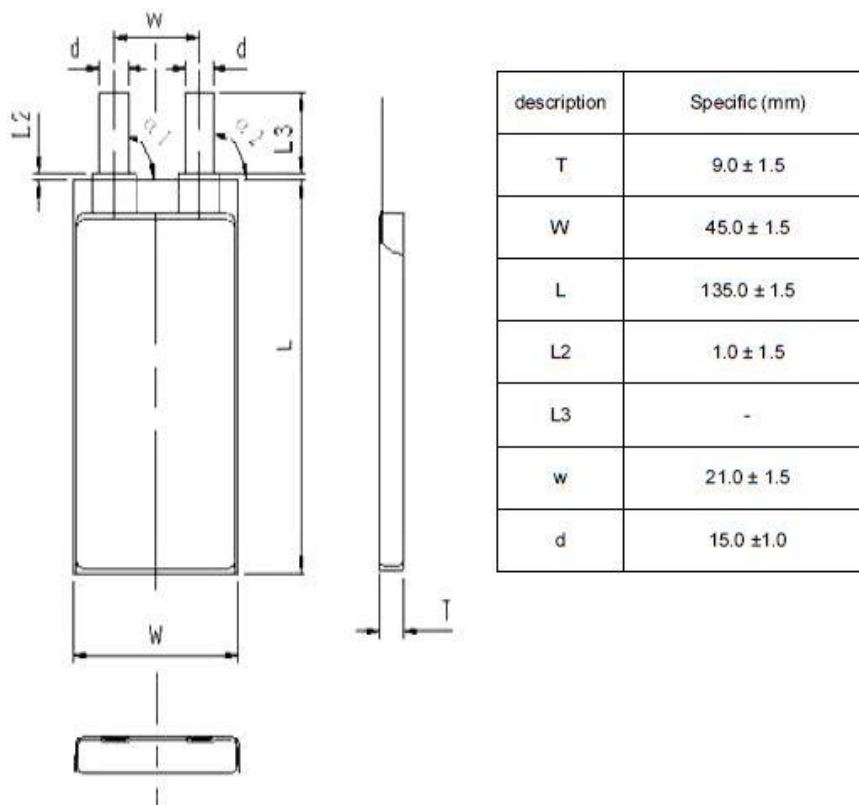
Lähteet

- 1 About Formula SAE® Series. Verkkodokumentti. SAE International. <<http://students.sae.org/cds/formulaseries/about.htm>>. Luettu 4.7.2014.
- 2 Team History. Verkkodokumentti. Metropolia Motorsport. <<http://metropoliamotorsport.fi/team/team-history/>>. Luettu 4.7.2014.
- 3 Dell, Ronald M. & Rand, David A. J. 2001. Understanding Batteries. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- 4 Rand, D. A. J., Woods, R. & Dell, R.M. 1998. Batteries for Electric Vehicles. Somerset: SRP Ltd.
- 5 2012 Formula SAE® Rules. Verkkodokumentti. SAE International. <http://www.fsaeonline.com/content/2012_FSAE_Rules_Version_90111K.pdf>. Luettu 1.1.2012.
- 6 Formula Student Electric Rules 2011. Verkkodokumentti. Formula Student Germany. <https://www.formulastudent.de/uploads/media/FSE_Rules_2011_v1.1.0.pdf>. Luettu 1.4.2011.
- 7 Product Specification. 2012. Nomura.Co. Luettu 1.9.2014.
- 8 Suvanto, Kari. 2008. Tekniikan Fysiikka. Helsinki: Edita.

Ote kennon mitoista kennon datalehdeltä

Description Lithium Ion Polymer battery Polymer Lithium-Ion 9045135SH25G-SP1	Document No. PS-PLIB-9045135SH25G-SP1	Date 2012-12-1	Rev. 0.0
--	--	-------------------	-------------

Fig.1 Dimensional Drawing



NOMURA CO. 野村商会

Tel: +81 90 1586 7484 Fax: +81 6 6453 0635
ZIP 659-0043 34-6, Shiomi, Ashiya, Hyogo Japan