

Tom Ekman
Akkulaboratorio

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

17.11.2016

Tekijä(t) Otsikko	Tom Ekman Akkulaboratorio
Sivumäärä Aika	39 sivua + 2 liitettä 17.11.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Autosähkötekniikka
Ohjaaja(t)	Projektipäällikkö Ville Eskelinen Lehtori Vesa Linja-aho
<p>Tämä insinööriytyö on tehty alustavana kokonaisvaltaisena suunnitelmana tulevaa mahdollista Metropolia AMK:n akkujen testauslaboratoriota varten. Laboratoriossa tulnaisiin tekemään ISO 12405 -standardisarjan mukaisia testejä, joita tässä työssä tarkastellaan. Työssä on huomioitu mahdollisimman laajasti kaikki testaukseen liittyvät asiat akkujen materiaaleista ja rakenteesta lähtien, sähköisen ja mekaanisen puolen suunnittelun kannalta ja selvitetty kustannukset ensimmäiselle viidelle toimintavuodelle.</p> <p>Työn alussa kuvataan, millaisia akkuja aiotaan testata, jotta saadaan käsitys siitä, millainen testauslaitteiston tulee olla. Teoriaan kuuluu sekä akkujen materiaalien selvitys, että erilaisten kennojen rakenteelliset erot. Kun nämä asiat tunnetaan, osataan toimia turvallisesti sellaisten laitteiden kanssa, jotka kykenevät luovuttamaan suuria virtoja. Teoria osuudessa selvitetään myös, mitkä tahot hyötyvät ja miten akkulaboratorion olemassaolosta.</p> <p>Suunnitelmaosuudessa pohditaan, millaista laitteistoa laboratorioon tarvitaan ja tarkastellaan eri vaihtoehtoja ratkaisuiksi. Suunnittelu on jaettu sähköisen ja mekaanisen puolen vaatimusten selvittämiseen, jotta saavutettaisiin turvallinen ja standardien mukainen testiympäristö.</p> <p>Lopulta esitetään laskelma, paljonko koko laboratorion rakentaminen ja ylläpito tulee maksamaan. Kulut on pyritty laskemaan mahdollisimman tarkasti, mutta riittävästi yläkanttiin, jotta vältetään budjetin ylityksiltä.</p> <p>Tämän insinööriytyön on tarkoitus olla pohjustus useammalle kyseiseen akkujen testauslaboratorioon liittyvälle insinööriytyölle, joista jokainen keskittyy omiin osa-alueisiinsa.</p>	
Avainsanat	Litiumakku, ajoakku, testauslaboratorio

Author(s) Title	Tom Ekman Battery Test Laboratory
Number of Pages Date	39 pages + 2 appendices 17 Nov 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Electronics Engineering
Instructor(s)	Ville Eskelinen, Project Manager Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was carried out as a preliminary plan for a possible battery testing laboratory of Helsinki Metropolia University of Applied Sciences. According to this plan ISO 12405 standardized tests would be conducted in this laboratory. This thesis deals with all the essential factors that have to be taken into consideration when testing batteries, e.g. battery materials and structures, planning electrical and mechanical implementation. Also how much the battery laboratory would cost during the first five years was estimated.</p> <p>First this thesis describes what kind of batteries will be tested to get better understanding of what kind of test equipment will be required. There is a theory part of differences in battery cell chemistry and structure. When these attributes are known it will be safe to operate with the equipment which is capable of giving out high currents. The theory part also explains which parties will benefit from the battery laboratory and discusses how they will benefit from it.</p> <p>The planning part describes what kind of testing equipment will be needed and discusses different possibilities for artificial load. The planning work was divided into two parts: determining the electrical and the mechanical requirements so that the new laboratory would have safe environment for testing and it would meet the standard requirements.</p> <p>Finally, this thesis gives an estimate how much it would cost to build the laboratory and keep it running. The expenses are calculated as closely and as realistically as possible so that exceeding the budget would be avoided.</p> <p>The main objective of this thesis was to be a background study for several future Bachelor's theses dealing with this battery testing laboratory and each of them will have their focus on their own field expertise.</p>	
Keywords	Lithium-ion battery, traction battery, laboratory

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Testattavat akut	2
2.1	Akkujen materiaalit	3
2.1.1	Litiumrautafosfaatti, LFP	3
2.1.2	Litiummangaanioksidi, LMO	4
2.1.3	Litiummangaanikobolttioksidi, NMC	5
2.1.4	Litiumkobolttioksidi, LCO	6
2.1.5	Litiumnikkelikobalttialumiinioksidi, NCA	6
2.1.6	Litiumtitanaattioksidi, LTO	7
2.1.7	Litiumpolymeeri, LiPo	8
2.2	Akkujen rakenteet	9
2.2.1	Sylinterit	10
2.2.2	Prismaattiset akut	11
2.2.3	Pussit	12
3	Saavutettavat hyödyt	13
4	Laboratorion suunnittelu	14
4.1	Sähkötekniinen suunnittelu	15
4.1.1	Testaussykli	15
4.1.2	Keinokuorma	18
4.1.3	Tarvittava laitteisto	21
4.1.4	Tulokset	23
4.2	Mekaaninen toteutus	23
4.2.1	Testauskonttiin kohdistuvat vaatimukset	24
4.2.2	Akun tuhoutuminen	25
4.2.3	Testauskontin liikuteltavuus	25
5	Kustannusarvio	26
5.1	Laitteiston hankinta	26
5.2	Henkilöstö	29
5.3	Ylläpito	30

5.4	Tuotto	31
5.5	Kokonaisarvio	32
6	Yhteenveto, pohdinta ja päätelmät	33
	Lähteet	37
	Liitteet	
	Liite 1. Litiumrautafosfaattikennon LY-LFP-72AH datasheet	
	Liite 2. LY-LFP-71AH-kennon valmistajan ilmoittama kapasiteettitesti	

Lyhenteet

BMS	Battery management system. Akunhallintajärjestelmä. Valvoo yleensä akun latausta, purkua ja yleistä tilaa käytön aikana.
C	Suhteellisen virran yksikkö. Virta jaettuna kapasiteetilla.
DUT	Device under test. Testattavana oleva laitteisto.
EV	Electric vehicle, sähköajoneuvo.
ISO	International Organization for Standardization. Kansainvälinen standardointijärjestö.
LCO	Litiumkobalttioksidi.
LFP	Litiumrautafosfaatti.
LMO	Litiummangaanioksidi.
LiPo	Litiumpolymeeri.
LTO	Litiumtitanaattioksidi.
NCA	Litiumnikkelikobalttialumiinioksidi.
NMC	Litiumnikkelimangaanikobalttioksidi.
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle. Latauspisteeltä ladattavissa oleva hybridi ajoneuvo.
PTC	Positive thermal coefficient. Kytkin, joka kuumetessaan menee johtamattomaan tilaan ja viiletessään palautuu johtavaan tilaan.
SOC	State of charge. Akun varaustila prosentteina.

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä luodaan kokonaisvaltainen suunnitelma sähköajoneuvojen akkupakettien ja pienempien akkukennojen ISO 12405 -standardien mukaista testaamista varten Metropolia Ammattikorkeakoulussa. Lisäksi on laskettu alustava budjetti kyseisen laitteiston tuottamiseen sekä ylläpitämiseen. Tämä opinnäytetyö on luotu ohjeeksi myöhempiä opinnäytetyön tekijöitä varten, jotka käsittelevät tarkemmin omia osa-alueitaan tästä työstä.

Suunnitelman osa-alueita ovat testaukseen liittyvän teorian läpikäynti mahdollisimman laaja-alaisesti. Työssä kuvataan akkujen materiaali- ja rakenne-erot sekä niiden vaikutus toimintaan ja testaukseen. Lisäksi pohjustetaan projektin niin sähköisen kuin mekaanisen puolta ja käydään läpi lopputoteutuksessa huomioitavia asioita. Saavutettavat hyödyt oppilaitokselle, akkuteknologialle, markkinoille ja opiskelijoille selvitetään. Varsinaisiin rahallisiin hyötyihin paneudutaan osiossa, jossa tarkastellaan kaikkia kustannuksiin liittyviä asioita.

Työn ensimmäisessä osiossa käydään läpi yleisimmät litiumakkutyypit kemian ja rakenteen osalta, koska nämä ominaisuudet vaikuttavat siihen, kuinka akkuja tulee käsitellä.

Opinnäytetyön sähköisen puolen suunnittelussa käsitellään ISO 12405 -standardiston kolmea osaa. ISO 12405–1:2011 on ensimmäinen osa, ja se käsittelee suurteho akkujen testausta. 12405–2:2012 on toinen osa, jossa käsitellään suurenergia akkujen testausta. 12405–3:2014 on kolmas ja toistaiseksi viimeisin osa, jossa käsitellään pitkälti akkujen turvallisuutta fyysisten testien avulla. Näiden standardien pohjalta luodaan kehykset itse akkukennojen testaukselle. Suunnittelussa perehdytään myös nykyisten ajoakkujen käytännön vaatimuksiin sekä teoriaan niiden toiminnasta. Laboratorio tarvitsee keinokuorman, joten suunnitelmassa pohditaan eri vaihtoehtoja tähän liittyen. Hukkaenergian mahdollista käyttökohdetta on myös selvitetty. Tässä työssä tarkastellaan vain litiumpohjaisten akkujen testausta niiden ajoneuvokäytön ja päivittäiselektroniikan (puhelimet, tabletit jne.) yleisyyden vuoksi, mutta tarvittaessa laitteisto on mahdollista myöhemmässä vaiheessa muuttaa muille akkukemioille soveltuvaksi.

Osa tätä työtä on laitteiston mekaaninen suunnittelu, jossa käsitellään akkukennojen turvallista testaamista, pohditaan laitteiston siirrettävyyden tärkeyttä sekä mekaaniseen testaamiseen liittyvää toteutusta. Suunnittelussa käytetään apuna UN/DOT 38.3 -standardia, jossa käsitellään akkujen liikuttelua ja siihen liittyviä turvallisuusseikkoja, sekä edellä mainittuja ISO 12405 1–3 -standardeja tarpeellisilta osin.

Viimeinen tärkeä osa tätä työtä on luoda kustannusarvio koko laitteiston tuottamiselle ja ylläpidolle sekä arvioida mahdolliset tuotot. Kustannusten arvioiminen on monilta osin haasteellista, sillä ratkaisut saattavat muuttua myöhempien opinnäytetöiden myötä, koska materiaalit ja laitteistot voivat muuttua sekä vaadittava tekniikka tai monet muut seikat kehittyä.

2 Testattavat akut

Tämä luku käsittelee todennäköisimmin testattavaksi tulevia akkuja, jossa selvitetään eri akkukemioita ja rakenteita ja näiden tekijöiden vaikutusta testaukseen. Käytössä olevia yleisimpiä litiumpohjaisia akkuja ovat litiumrautafosfaatti (LFP tai LiFePO_4), litiummangaanioksidi (LMO tai LiMn_2O_4), litiumnikkelimangaanikobolttioksidi (NMC tai LiNiMnCoO_2), litiumpolymeeri (LiPo), litiumkobolttioksidi (LCO tai LiCoO_2) litiumnikkelikobolttialumiinioksidi (NCA tai LiNiCoAlO_2) ja litiumtitanaattioksidi (LTO). Toinen huomioitava asia on, että akuilla on olemassa eri kennorakenteita kuten sylinteri-, pussi- ja prismaattinen rakenne. Näitä akkuja siis tulnaisiin pääasiallisesti testaamaan laboratorioissa eri variaatioina. Vaikka suurin osa akuista on ajoakuiksi sopivia kennoja tai akkupaketteja, poikkeavat niiden ominaisuudet keskenään, joten niitä tulee testata hieman eri tavoin, sillä niillä on hyvin erilaiset ominaisuudet latauksen ja purkamisen suhteen. Toisaalta erilaiset kennot voidaan myös altistaa täysin identtisille testeille, jotta saadaan selvitettyä varmasti, mikä akku täyttää asiakkaan vaatimukset. Mikäli esimerkiksi suurenergia-akkua käsitellään virtojen suhteen kuten suurtehoakkua, on akku todella nopeasti käyttökelvottomassa kunnossa ja mahdollisesti jopa tuhoutuu rajusti. Näin ollen testaus syklien osion suunnittelijan tulee huomioida, että testattavista paketeista osa on suurtehoakkuja ja osa suurenergia-akkuja. On myös mahdollista, että tulevaisuudessa tulee uusia ei-litiumpohjaisia akkuja, mutta näiden testaaminen ja yhteensopivuus tämän laitteiston kanssa selvitetään vasta kun asia on ajankohtainen. Akkumateriaaleista tarkastellaan myös vähemmän ajoakuissa käytettyjä yleisimpiä litiumyhdisteitä, sillä on hyvä tietää muidenkin litiumyhdisteiden ominaisuuksia kuin vain

ajoakkujen, jotta laboratoriossa voitaisiin testata mahdollisimman laaja-alaisesti erilaisia akkuja rajoittumatta vain ajoneuvoihin soveltuviin.

Akuista puhuttaessa monesti puhutaan C-arvosta, englanniksi C-rate ja lyhyesti C, jolla tarkoitetaan suhteellista virtaa, joka on virta sisään tai ulos akusta jaettuna akun maksimikapasiteetilla. Tämä tarkoittaa siis sitä, että mikäli akun maksimikapasiteetti on 1 Ah ja sitä puretaan 1 A:n virralla, on C-arvo tällöin 1. Toisena esimerkkinä 10 Ah:n akkua ladataan 0,1 C:llä, jolloin sitä ladataan 1 A:n virralla.

2.1 Akkujen materiaalit

Akkujen yhdisteet vaikuttavat hyvin oleellisesti niiden ominaisuuksiin, joten on tärkeää tuntea akku teoriassa ennen sen testaamista, sillä on olemassa teho- ja energiaoptimoituja akkuja. Mikäli akkua ladataan tai puretaan väärällä virralla, voidaan saada vääristyneitä tuloksia ja mahdollisesti myös rikotaan testattava akku, jos esimerkiksi energiaoptimoitua akkua käsitellään kuin teho-optimoitua. Tällaiset asiat tulee aina selvittää ennen testausta, jotta voidaan olla varmoja oikeasta toimintatavasta. Käytössä olevilla litiumyhdisteillä on erilaisia maksimiarvoja lataus- ja purkuvirroille. Tämän vuoksi seuraavassa käydään läpi akkujen materiaalit ja niiden yleisimpiä sekä äärimmäisempiä ominaisuuksia tapauskohtaisesti. Pääasiallisesti testattavat akut tulevat olemaan litiumpohjaisia ajoakkupaketteja ja yksittäisiä kennoja, mutta laitteistoa voidaan käyttää muidenkin akkujen testaamiseen tekemällä tarvittavia säätöjä laitteistoon. Lisäksi on huomioitava, että akkutoimittajan tulee aina toimittaa testattavaksi tulevan akun maksimiarvot, joilla sitä saa käsitellä. Tämän luvun litiumakkujen materiaaleja koskevat tiedot ovat suurimmaksi osaksi Battery Universityn artikkelista Types of Lithium-ion, mutta monia kohtia on tarkastettu myös muista lähteistä.

2.1.1 Litiumrautafosfaatti, LFP

Litiumrautafosfaatti-, LFP- tai LiFePO_4 -akut ovat ominaisuuksiltaan suhteellisen turvallisia, mutta niiden energiatiheys ja virran luovutus- ja vastaanottokyky vaihtelee suuresti riippuen siitä, onko kenno teho- vai energiaoptimoitu. Etuja ovat usein pitkä käyttöikä (noin 1000–2000 sykliä), melko hyvät lämpöominaisuudet, ylikuormituksenkestävyys (voidaan pitää täyteen ladattuna pitkiäkin aikoja suorituskyvyn kärsimättä erityisemmin) ja hyvä käyttöturvallisuus. Tällä akkutyyppillä on matala sisäinen

impedanssi ja tasainen käyttöjännite, jotka ovat hyviä ominaisuuksia akulle. LFP sietää huonosti kylmiä oloja. LTO-akkuihin verrattuna energiatiheys on karkeasti kaksinkertainen ja NMC-akkuihin verrattuna noin 15–20 % pienempi. Sopivimpia käyttökohteita ovat yleensä varavoimapaketit ja lyijyisten käynnistysakkujen korvaaminen erittäin suuren virran luovutuskykynsä vuoksi. LFP on yleisesti myös EV/PHEV-käytössä.

Esimerkkinä LFP 18650 -akusta on AA Portable Power Corp. IFR18650EC-1.5Ah -kenno. Sen jänniterajat ovat 2,0–3,65 V, kapasiteetti välillä 1,4–1,55 Ah riippuen purkuvirran suuruudesta, ja sitä voidaan ladata 1–2 C:n arvoilla ja purkaa jatkuvasti 5 A:n virralla. Lataus voidaan suorittaa -10–45 °C:n ja purku -20–60 °C:n lämpötiloissa. Sykliskestoisuus on yli 2000 sykliä, kun lataus ja purku 1 C välillä 2,0–3,65 V. (Specification Approval Sheet (IFR18650EC-1.5Ah) 2012.) IFR18650-1.5Ah on melko tavallinen LFP-kenno, ja sen ominaisuudet ovat varsin tasaiset.

2.1.2 Litiummangaanioksidi, LMO

Litiummangaanioksidi, LMO tai LiMn_2O_4 , on jo suurelta osin korvattu uudemmilla yhdisteillä, joissa käytetään nikkeliä, kobolttia ja alumiinioksidia. Korvaus on tehty pääasiallisesti litiumnikkelimangaanikobolttialumiinioksidilla (NMC:lla), joka on yksi parhaita litiumyhdisteitä akkukäytössä, tai litiumnikkelikobolttialumiinioksidilla (NCA:lla). Uudemmissa yhdisteillä on saatu aikaiseksi paremmat ominaisuudet. LMO:ta kuitenkin käytetään vielä sen hyvän tehon ja turvallisuuden vuoksi. Nimenomaan hyvän tehon takia LMO akkukemialla käytetään esimerkiksi sähköajoneuvoissa auttamaan akustoa kiihdyttämiseen vaadittavissa ominaisuuksissa, ja niin sanotusti varsinaisena ajoakkukemiana toimii litiummangaanikoboltti (NMC). Tällöin akusta käytetään merkintää LMO(NMC), ja ne on kemiallisesti sekoitettu yhteen. LMO:n kyky luovuttaa virtaa on erittäin hyvä, ja siksi se sopii ajoneuvon kiihdyttämiseen erinomaisesti. LMO(NMC)-akkua käytetään esimerkiksi BMW i3:ssa, Chevrolet Voltissa ja Nissan Leafissa. Näiden ajoneuvojen akut koostuvat noin 30-prosenttisesti LMO:sta. BMW i3 on mainituista ajoneuvoista vielä varsin uusi malli, joten LMO:lla on todennäköisesti vielä annettavaa ajoneuvokäytössä, vaikka se on jo osin korvattu monissa sovelluksissa muilla yhdisteillä.

LMO-esimerkkinä on Sony US18650VTC3 -kenno, joka on teho-optimoitu LMO:n ominaisuuksille tyypilliseen tapaan. Jänniterajat VTC3:lla ovat 2,5–4,2 V, ja kapasiteetti

vaihtelee suuresti purkuvirran mukaan. Alin kapasiteetti on 1,2 Ah 20 A:n purkuvirralla, ja suurin kapasiteetti on 1,6 Ah, kun purkuvirta 0,2 A. VTC3 kykenee myös toimimaan lämpötilavälillä -20–60 °C, mutta jo -10 °C:ssa alkaa sillä muodostumaan purkutestissä notkahdusta jännitteeseen kapasiteettitestin alussa. Tämä ominaisuus kasvaa suuresti -20 °C:n lämpötilassa, mutta kun kennoa on hetken aikaa purettu, kasvaa sen jännite noin 3,3 V, jossa se pysyy lähestulkoon vakiona testin loppuun asti. (Sony US18650VTC3 2016.)

2.1.3 Litiummangaanikobolttioksidi, NMC

Litiumnikkelimangaanikobolttioksidi, NMC tai LiNiMnCoO_2 , on yksi parhaita tämän hetken litiumyhdisteistä akuissa. NMC kykenee tarjoamaan kohtalaisen suuren kapasiteetin ja suuren purkuvirran tehden siitä erittäin monikäyttöisen. NMC- akut voivat luovuttaa helposti 4–5 A jatkuvana ja toisilla kennoilla parhaimmillaan jopa 20 A jatkuvana pienestä 18650-mallisesta kennosta, jonka kapasiteetti on esimerkiksi 2,5 Ah. 18650-kennolla viitataan halkaisijaltaan 18 mm:n ja pituudeltaan 65 mm:n kokoiseen sylinterinmalliseen kennoon. Tämä kennotyyppi on erittäin yleinen valmistusmäärän suhteen, joka oli noin 2,55 miljardia kappaletta vuonna 2013 (Types of Battery Cells 2016). Vuonna 2015 Teslan tarvitsema osuus 18650-kennoista (Tesla käyttää NCA-tyyppin kennoja) oli noin neljännes, joka nostaa niiden tuotannon tarvetta oleellisesti.

Monikäyttöisyyttä voidaan lisätä muuttamalla nikkelin, mangaanin ja koboltin suhteita. Tyypillisin yhdistelmä on niin kutsuttu 1-1-1, jossa kaikkia alkuaineita on yhtä paljon. Koska koboltti on kallis aine, on tämä varsin kustannustehokas vaihtoehto yhdisteeksi. Toimintaperiaate tämän yhdisteen takana on se, että nikkelillä on hyvä energian varastointikyky, mutta se on kovin epävakaa aine yksinään. Mangaanilla taas on huono kyky varastoida energiaa, mutta se on hyvin vakaa ja sen atomirakenteen ominaisuudet sopivat erittäin hyvin akkukäyttöön. Mangaanin vuoksi akkukemialla on myös erittäin matala sisäinen impedanssi. Yhdistettynä nikkeli ja mangaani toimivat toisiaan tukevin aineina. Lisäksi anodin pohjana voidaan käyttää piitä, jolloin saadaan aikaiseksi vielä parempi energianvarastointikyky. Tällöin kuitenkin huononnetaan akun elinikää ja akusta tulee epävakampi. NMC on erittäin käytetty yhdiste litiumakuissa, sillä sitä käytetään lähes kaikkialla kuten esimerkiksi työkaluissa, polkupyörissä ja ajoneuvoissa. Energiaoptimoiduilla kennoilla elinikäkin on erittäin hyvä.

Sony US18650VTC5 on hyvä esimerkki NMC-kennosta. Kennon toiminta-alue jännitteiden suhteen on 2,5–4,2 V, kun sitä puretaan 0,5–2,5 A:n virralla, ja suurin jännite laskee 4 volttiin, kun sitä puretaan 10 A:n virralla, ja noin 3,8 volttiin 20 A:n virralla. Kapasiteetti sillä on noin 2,6 Ah riippumatta siitä, millaisella virralla sitä puretaan. Tämä on osoitus siitä, kuinka hyvä yhdiste NMC on tehon ja kapasiteetin suhteen. Toiminta eri lämpötiloissa VTC5:llä on melko samanlainen kuin VTC3 LMO kennolla, mutta toimintajännite hieman alhaisempi. Syklikestoisuus on noin 300 sykliä, jonka jälkeen kapasiteetti on laskenut noin 2,15 Ah:iin. (Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information 2013.)

2.1.4 Litiumkobolttioksidi, LCO

Litiumkobolttioksidin, LCO tai LiCoO_2 , hyviä ominaisuuksia ovat hyvä energianvarastointikyky ja suhteellisen edullinen hinta. Huonoja puolia ovat suhteellisen lyhyt käyttöikä, huono lämpötasapaino ja melko heikko kyky vastaanottaa ja luovuttaa energiaa. LCO:a käytetään enimmäkseen hyvän energian varastointikykynsä vuoksi puhelimissa, kannettavissa tietokoneissa ja kameroissa. Ajoneuvokäytössä tämä on varsin harvinainen akkutyyppi.

Samsung ICR18650-26H -kenno sopii esimerkiksi LCO-kennosta. Sillä on jokseenkin hyvä kapasiteetti, 2,6 Ah, ja suurin sallittu purkuvirta on 5,2 A. Jännitealue on välillä 2,75–4,2 V, ja sitä voidaan ladata 0–45 °C:n lämpötilassa ja purkaa -20–60 °C:n lämpötilassa. Purkuvirran suuruus vaikuttaa suuresti kennon suhteelliseen kapasiteettiin. 0,2–1 C, purkuvirroilla suhteellinen kapasiteetti on välillä 90–100 % 2,55 Ah:sta. Kuitenkin kun purkuvirta nostetaan 2 C:hen, on suhteellinen kapasiteetti enää 80 %. Samoin tapahtuu latausvirtojen kanssa. Kennon suhteellinen kapasiteetti kärsii myös rajusti jo -10 °C:n lämpötilassa pudoten 50 % 2,55 Ah:sta. 0:n ja 40 °C:n lämpötiloissa suhteellinen kapasiteetti on 80 % ja 100 %, kun lämpötila on 25 °C. (Specification of product for Lithium-ion Rechargeable Cell 2012.)

2.1.5 Litiumnikkelikobalttialumiinioksidi, NCA

Litiumnikkelikobalttialumiinioksidi, NCA tai LiNiCoAlO_2 , on jatkokehitemä litiumnikkelioksidista, jossa alumiini tarjoaa paremman vakauden yhdisteelle. NCA on vastaavan kaltainen kuin NMC ja tarjoaa suuren kapasiteetin ja suhteellisen hyvän

tehon. NCA ei vain ole kovin vakaa tai edullinen vaihtoehto koboltin korkean hinnan vuoksi, ja nämä kaksi mainittua ominaisuutta eivät ole akun ominaisuuksina kovin hyviä kilpailukyvyn lisääjiä, mutta sen etuna toimii erittäin suuri energian varastointikyky ja suhteellisen suuri virran luovutuskyky.

Panasonic NCR18650B on sopiva esimerkki NCA-kennosta, sillä sitä käytetään erittäin paljon. Käyttömäärä johtuu hyvin pitkälti Teslan tarpeesta autojen akustoon, mutta kenno on melko tavallinen NCA-kennoksi. Kennon jänniterajat ovat 2,5–4,2 V, sitä voidaan purkaa jatkuvasti 4,875 A:n ja ladata 1,625 A:n virroilla. Suurin sallittu virta on 12 A 5-6 sekunnin pulsseina (Panasonic 3400mAh 18650 Li-ion 3.7v Battery NCR18650B Flat Top – Case Included 2016). Kapasiteettia sillä on hieman vaihtelevasti: myyntikapasiteetti on 3,2 Ah, yleensä kapasiteetti on välillä 3,25–3,4 Ah, ja tyyppillisin kapasiteetti on 3,35 Ah, kun purkuvirtana 0,65 A. (Sanyo Lithium Ion Battery Specifications 2012.) Kuten kennon ominaisuuksista huomataan, on NCA:lla varsin hyvä kapasiteetti ja kohtalaisen hyvä teho.

2.1.6 Litiumtitanaattioksidit, LTO

Litiumtitanaattioksidit, LTO tai $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, on todennäköisesti eliniältään, suorituskyvyltään ja turvallisuudeltaan paras litiumakku. Elinikä LTO:lla on huomattavasti pitempi kuin muilla kestävinä pidetyillä litiumyhdisteillä: 3000–7000 sykliä, jopa yli 10 000 sykliä. Parhaimmillaan LTO toimii alhaisessakin lämpötilassa saavuttaen jopa -30 °C:ssa 80 % maksimikapasiteetista (Lithium Titanate (LTO) Cells – Technical Advantages 2016), joka on erittäin hyvin verrattuna muihin akkuihin, jotka menettävät usein paljonkin kapasiteettiaan kylmässä. Lisäksi useimmat akut menettävät virran luovutuskykyään kylmissä oloissa, sillä niiden sisäinen impedanssi kasvaa liian suureksi, jotta akku olisi enää kovin käyttökelpoinen. Usein LTO kärsii kylmistä oloista jo -15 °C:n lämpötilassa, kuten muutkin akkukemiat.

LTO:n etu on erittäin matala sisäinen impedanssi, josta seuraa sen hyvä kyky luovuttaa ja vastaanottaa energiaa. Näiden ominaisuuksiensa vuoksi LTO olisi ajoneuvokäyttöön hyvä vaihtoehto, sillä se kykenee tarjoamaan ajoneuvoilta vaadittuja ominaisuuksia, kiihdyttämiseen vaadittua virran luovutuskykyä, pitkää elinikää sykleinä mitattaessa ja pikalatauksen, joka lyhentää latauspisteellä vietettyä aikaa lähemmäs polttomoottorilla varustettujen ajoneuvojen tankkausaikaa.

Suurin heikkouksista on suhteellisen pieni kapasiteetti, joka vaihtelee hieman lähteestä riippuen, mutta on noin 30–110 Wh/kg. Mikäli kapasiteetti olisi suurempi, niin se tasapainottaisi hieman kennon hintaa. Pieni kapasiteetti aiheuttaa kuitenkin sen, että LTO on kovin raskas vaihtoehto akuksi, mikäli sillä halutaan saavuttaa vastaavia ajoetäisyyksiä kuin esimerkiksi NCA:lla. Tosin LTO on hinnastaan riippumatta hyvinkin kustannustehokas ratkaisu pitkän elinikänsä vuoksi, mikäli tarvitaan pitkää toimintakykyä lähes missä tahansa olosuhteissa, ja toisinaan se on lähestulkoon ainoa vaihtoehto.

Yleisiä LTO-akkujen käyttökohteita ovat varavoima-akustot sähkökatkoksien varalle ja EV-ajoakut. Joissakin tapauksissa niitä käytetään myös katuvalaistuksen voimanlähteenä, jolloin ladataan akkuja päiväsaikaan aurinkoenergialla. Aurinkoenergia on erittäin hyvä tapa käyttää LTO akkuja, mikäli latausvirta saadaan kasvatettua riittävän suureksi takaamaan riittävä lataus. Näin saadaan ladattua akustoa säännöllisesti, jolloin sen käyttöikä säilyy mahdollisimman hyvänä, kun sitä ei välttämättä ladata täysin täyteen tai pureta täysin tyhjäksi; tämä pätee kaikkiin litiumakkuihin. Ajoneuvoja, joissa LTO-kennoja on käytetty ainakin ajoakkuina, ovat Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV ja Metropolian ERA. Lisäksi LTO-akkuja käytetään joissakin elektroniikkalaitteissa, kuten Toshibaan kannettavassa tietokoneessa SCiB-akkua (Super Charge ion Battery) ja Seikon kineettisissä kelloissa kondensaattorin sijasta.

LTO-kennosta tyypillinen esimerkki on AA Portable Power Corp. 1865 -kenno. Sen jännitealue on 1,5–2,85 V ja kapasiteetti 1,1 Ah. Sitä voidaan ladata jatkuvasti 5 C:n arvolla pikalatauksessa ja normaalisti 1 C:n arvolla. Kennoa voidaan purkaa jatkuvasti 11 A:n virralla ja 30 A:n alle viiden sekunnin ajan. Lataus voidaan suorittaa lämpötiloissa 0–45 °C ja purku -30–65 °C. Kennon kapasiteetti on tosin -30 °C:n lämpötilassa vain 60 % siitä, mitä se on 25 °C lämpötilassa (100 %), kun sitä puretaan 1 C:n virralla. Kuitenkin -20 °C:ssa sillä on vastaavasti vielä 85 % kapasiteetistaan jäljellä samalla 1 C:n virralla kuormitettuna. Syklikestoisuus sillä on 3000 sykliä, jonka jälkeen sen kapasiteetti on vielä yli 70 % alkuperäisestä. (LTO Battery Specification 2013.) Kenno on varsin tavallinen LTO-kennoksi pienen kapasiteettinsa ja suurien virtojen sietokykynsä vuoksi.

2.1.7 Litiumpolymeeri, LiPo

Litiumpolymeeri (LiPo) -akut ovat nykyään usein pussirakenteiseksi mielletty akkumalli, ja niissä on kyllä pussirakenne, mutta polymeeriakkujen alkuperäisenä ideana on

kuitenkin geelimäinen elektrolyytti, joka korvaa muiden mallien eetterielektrolyytillä kyllästetyt eristemateriaalit. Polymeeriakut ovat pehmeitä, ja niissä kerrokset ovat laminoituja kuten muissakin akkurakenteissa. Prismaattiset ja sylinteriset akkutyyppit käyttävät akun kuorta ikään kuin jousena painaakseen elektrodit yhteen eli luodakseen de-laminointia ehkäisevää kompressiota.

Polymeeriakuissa voidaan käyttää käytännössä mitä tahansa edellä selvitetystä litiumyhdisteistä sekä muita tässä työssä mainitsemattomia litiumyhdisteitä, eivätkä ne näin ollen ole yhdisteiltään mitenkään erikoisempia kuin muutkaan akkutyyppit. Tärkein ero on siis se, miten rakenne poikkeaa perinteisemmistä sylinterimäisistä ja prismaattisista ratkaisuista. Etuihin lasketaan myös muotoiltavuus, jonka ansiosta polymeeriakut voidaan muotoilla erittäin ohuiksi ja muodoltaan vaadittuun sovellukseen sopivaksi, mikä tekee niistä erittäin monikäyttöisen ratkaisun.

Toinen nykyään ymmärrettävä muoto LiPo-akuille on polymeerimäinen kotelointi, eli rakenne vain muistuttaa polymeeriakkua. Tässä käytössä termi on jonkin verran harhaanjohtava alkuperäiseen tarkoitukseen nähden. Polymeeriakkujen alkuperäinen tarkoitus on ollut luoda mahdollisimman ohuita akkuja, joiden elektrolyytti ei vuoda, vaikka pakkaus hajoaisikin, ja tämä johtuu elektrolyytin muovimaisesta olomuodosta.

Edellä kuvatuissa litiumakkutyypeissä huomioitavaa on se, että käytännössä kaikissa katodina käytetään litiumyhdistettä, mutta LTO on poikkeus, sillä siinä käytetään grafiittia katodina ja itse litiumyhdiste on anodi, juuri toisin päin kuin muissa yhdisteissä. Tämä johtuu siitä, että LTO toimii anodina paremmin kuin grafiitti. LTO:lla saadaan anodin pinta-alaksi 100 m² grammaa kohden, kun grafiitilla vain 3 m² grammaa kohden, ja tämä antaa anodille huomattavasti suuremman kyvyn luovuttaa ja vastaanottaa elektroneja.

2.2 Akkujen rakenteet

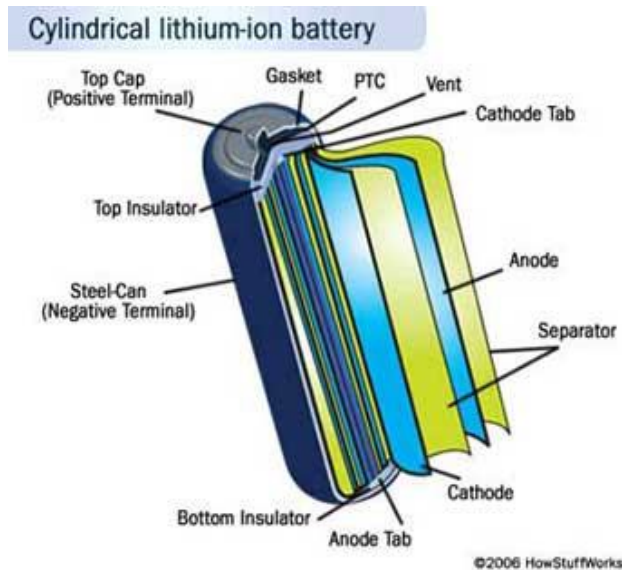
Akuissa käytetään yleisesti kolmea eri rakennetyyppiä: sylinteri, prismaattinen ja pussirakenne. Näistä valitaan sopiva käyttökohteen mukaan. Sylinterinmalliset akut voivat olla tuttuja sormipariston mallisia (AA, AAA, jne.) tai hiukan isompia tai pienempiä vastaavan kaltaisia sylintereitä, joissa ei välttämättä ole positiivisen päädyn kohoumaa, ja usein kohouma puuttuukin. Prismaattisten akkujen tunnusomainen muoto on suorakaide, jonka paksuus vaihtelee. Tätä akkumallia löytyy esimerkiksi puhelimista,

tableteista ja joistakin kannettavista tietokoneista. Pussin mallisia kennoja käytetään useimmiten ajoneuvoissa niiden kompaktiuden ja keveyden vuoksi. Varsinainen ulkokuori ei paina kovin paljoa, ja se sallii enemmän elämistä akulle käytön aikana. Elämisestä seuraa kuitenkin akun sisällä tapahtuva de-laminoituminen katodille, anodille ja eristeelle, josta seuraa selvästi heikentynyt akun toiminta. Akuille on siis hyväksi, että niillä on kompressiota, jolloin ne eivät pääse niin herkästi turpoamaan, ja tämän vuoksi pusseilla on yksi isompi yhteinen kotelo suojanaan.

2.2.1 Sylinterit

Sylinterit ovat kerrostettuja metallitankomaisia rakenteeltaan. Ne muodostuvat metallisesta ulkokuoresta, jonka sisällä on rullattuna katodi ja anodi, joiden välissä on eriste. Eriste on erittäin ohutta reiällistä muovia, ja se on kyllästetty eetteri elektrolyytillä. Toisessa päädyssä kennoa on negatiivinen (anodi) ja toisessa positiivinen (katodi) napa. Sylinterin malliset akut kestävät fyysistä rasitusta erittäin hyvin, ja rakenteensa vuoksi ne kestävät myös sisäistä painetta hyvin, mikä ehkäisee de-laminoitumista, josta seuraisi akun heikentynyt elinikä. Tästä syystä sylinterin malliset akut eivät yleensä turpoa, mutta niissä on turvallisuuden vuoksi ylipaineventtiili. Joissakin malleissa venttiili sulkeutuu uudestaan, kun paine on päässyt poistumaan akusta, mutta useimmissa malleissa venttiili toimii samalla sähköisenä sulakkeena ja on kertakäyttöinen. Samalla kun venttiili aukeaa, voi akusta vuotaa nestettä (elektrolyyttiä) ja akku voi kuivua joko osittain tai kokonaan, minkä jälkeen akku joko ei toimi tai sen toiminta heikkenee oleellisesti.

Osassa sylinterin mallisista akuista on myös PTC-kytkin eli positive thermal coefficient switch, joka akun liiallisen kuumenemisen myötä siirtyy johtamattomaan tilaan. Kuumeneminen johtuu usein laitteessa olevasta oikosulusta, jolloin kennon luovuttama virta nousee liian suureksi. Kun oikosulku on poistettu ja akku jäähtynyt tarpeeksi, siirtyy PTC-kytkin jälleen johtavaan tilaan. Huomioitavaa on, että kaikissa sylinterin mallisissa akuissa ei kuitenkaan ole tätä PTC-kytkintä. Näiden akkujen tiedoissa on monesti mainintana esimerkiksi ”ei suojattu”, ja nämä akut usein tunnistaakin siitä, ettei niissä ole positiivisessa navassa alkaliparistoista (kuten perinteiset AA ja AAA patterit) tuttua kohoumaa. Kuvasta 1 voidaan havaita mainitut rakenteelliset ominaisuudet sylinterikennoille.



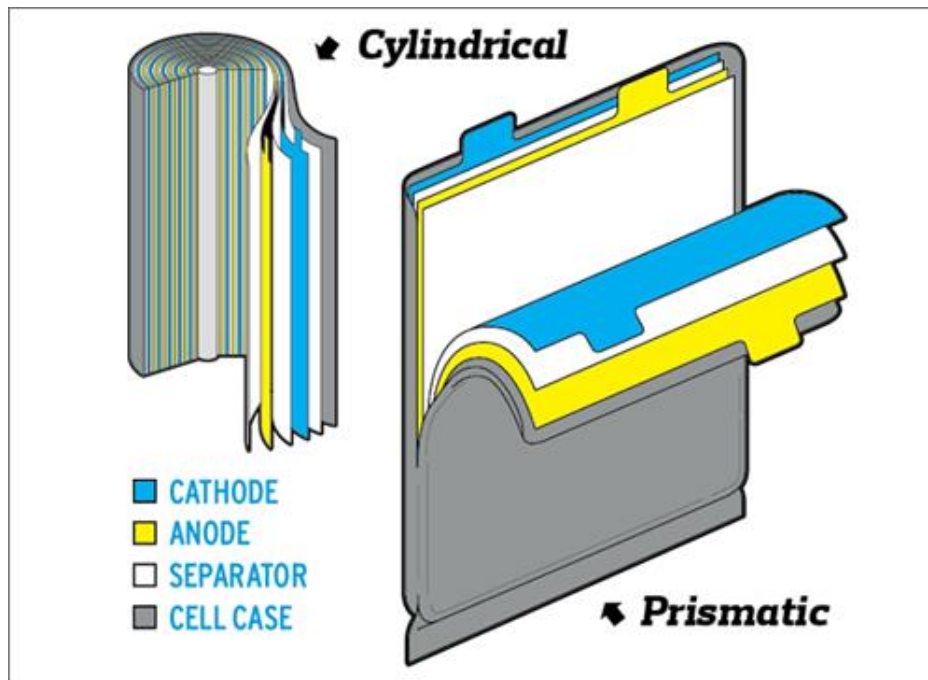
Kuva 1. Sylinterin mallisen litiumakun rakennekuva (How stuff works 2006).

2.2.2 Prismaattiset akut

Prismaattiset akut ovat sisällöltään hyvin samankaltaisia kuin sylinterin malliset, mutta sisusmateriaalit on kerrostettu johonkin laatikon kaltaiseen muotoon. Akut ovat usein ohuita paketteja, jotka on suunniteltu suoraan johonkin laitteeseen sopivaksi. Tämä on harvemmin henkilöajoneuvoissa käytetty rakennemuoto, mutta on olemassa myös isompia ajoneuvokäyttöä varten valmistettuja akkuja, joita käytetään yleisesti raskaassa kalustossa. Ajoneuvokäytössä olevat prismaattiset akut ovat usein hitsattuun alumiinikoteloon tehtyjä paketteja.

Yleisin käyttökohde prismaattisille akuille on mukana kannettava elektroniikka, kuten tietokoneet, tabletit ja puhelimet. Prismaattinen akun rakenne sallii jokseenkin hyvin akun turpoamisen kahden isomman kyljen ansiosta. Esimerkiksi kännyköistä voi löytyä noin viiden millimetrin paksuisia kennoja, joille on normaalia turvota jopa kahdeksan millimetriseksi 500 syklin jälkeen (Types of Battery Cells 2016), eli akulle on normaalia turvota jopa 60 %. Tässä vaiheessa tosin akku on jo varmasti de-laminoitunut ja sen kapasiteetti pienentynyt huomattavasti. Monissa matkapuhelimissa ja muissa päivittäisissä elektroniikkalaitteissa (tabletit, kannettavat tietokoneet jne.) akku on kuitenkin koteloitu muoviin, jolloin sillä on jonkin verran kompressiota pitämässä laminoitua kasassa. Tärkeintä turpoamisessa on huomioida, ettei akku turvottuaan paina itse laitteen elektroniikkaa, ja mikäli akku turpoaa enemmänkin, niin se tulee poistaa käytöstä räjähdysvaaran vuoksi. Kuvasta 2 voidaan havaita vastaavanlaisuus

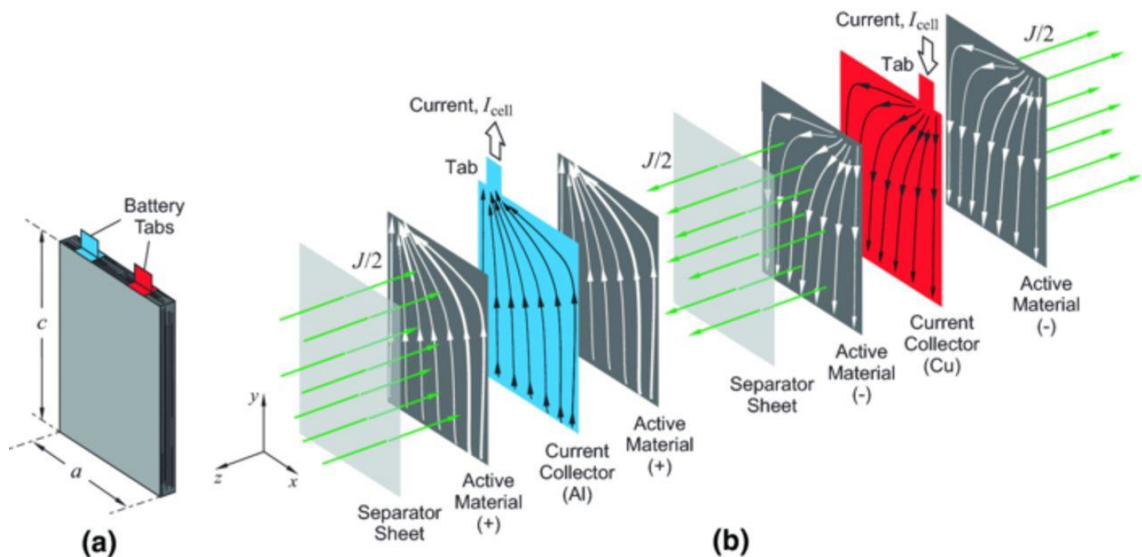
katodin, anodin, eristeen ja koteloinnin suhteen sylinterin mallisilla ja prismaattisilla kennoilla.



Kuva 2. Sylinterikennon rakenne verrattuna prismaattiseen rakenteeseen. Kuvasta nähdään, kuinka sylinterissä katodi, anodi ja eriste on kääritty kotelon sisälle, kun prismaattisessa akussa ne ovat kerrostettu levyksi useammasta kappaleesta kutakin materiaalia. (Auvac 2011.)

2.2.3 Pussit

Pussin malliset akut ovat keveimpiä rakenteeltaan ja tilanhallinnan kannalta erittäin hyviä akkuja sekä todella suosittu ratkaisu ajoneuvokäytössä, sillä akkupaketit saattavat painaa useita satoja kiloja. Mikäli pussilla saavutetaan siis vaikkapa 20 %:n painohyöty verrattuna sylintereihin ja prismaattisiin (Lithium polymer battery 2016), joka saavutetaan polymeeriakuilla, on hyöty jo 300 kg:n paketilla 75 kg, joka vastaa lähes aikuisen miehen painoa. Usein akkupaketit painavat enemmänkin, joten kaikki paino, joka saadaan akuista pois, on eduksi ajoneuvon taloudellisuudelle, hallittavuudelle ja suorituskyvylle. Pussin rakenne katodin, anodin ja eristeen osalta poikkeaa jonkin verran sylinteristä ja prismaattisesta rakenteesta siten, että katodi- ja anodiosien välillä on eriste kuten muissakin ratkaisuissa, mutta kumpaakin materiaalia on mahdollista olla kaksi kerrosta ja niiden välissä on kollektori. Molemmat kollektorit ovat siis kahden katodin ja anodin välissä kummatkin, ja ne on johdettu pussin ulkopuolelle navoiksi. Kuvasta 3 käy ilmi pussikennon rakenne.



Kuva 3. Pussirakenne jaettuna osiin. Kuvasta käy ilmi, kuinka katodien ja anodien välissä on kollektorit, joista on johdettu pussin ulkopuolelle akun navat. (ECS, 2016.)

3 Saavutettavat hyödyt

Oppilaiden oppimisprosessia voidaan tukea laboratorioharjoituksilla, jotka liittyvät omaan alaan, sillä pelkästä teoriasta harvoin saa täyttä ymmärrystä, mitä akut tekevät ja kuinka niitä tulee käsitellä. Monille opiskelijoille jää myös paremmin mieleen käytännössä suoritettavat harjoitukset kuin pelkästään teoriaharjoituksilla toteutettavalla opetuksella. Samalla opitaan erilaisten akkukemioiden eroja havaitsemalla ja kokeilemalla niiden latausta ja purkamista eri olosuhteissa ja näin voidaan oppia suoraan, miten mikäkin kemia ja alkuaine toimivat akkumateriaalina. Ohessa tutustutaan myös aiheeseen liittyviin standardeihin, joista voi olla hyötyä tulevaisuudessa joko akkujen kehittelyn parissa tai muissa aiheeseen liittyvissä tehtävissä. Soveltamistaidot ja ongelmanratkaisukyky paranevat monesti käytännön harjoituksilla, ja nämä taidot kuuluvat insinöörin perustaitoihin. Lisäksi monissa muissa Metropolian projekteissa mukana olleet ovat saaneet omien sanojensa mukaan tarkempaa koulutusta liittyen heidän tehtäväänsä projektin parissa, ja kun opiskelijoita on monelta alalta, päästään vaihtamaan tietoja käytännössä, jolloin tietämys laajenee myös oman alan opetuksen ulkopuolelle. Projekteissa opitaan myös, mitä insinöörin työt voivat olla, ja näin ollen akkulaboratorio olisi erittäin hyvä tukemaan opetusta. Akkulaboratorion ylläpito sopisi erinomaisesti ajoneuvosähkötekniikan opiskelijoille sekä varsinaisen sähkö- ja elektroniikkatekniikan opiskelijoille. Kemian opiskelijoillekin löytyisi varmasti havainnointavaa ja opiskeltavaa akkujen kemiasta laboratorio-oloissa.

4 Laboratorion suunnittelu

Suunnittelu on jaettu kahteen osaan, jotta mahdollinen tulevaisuuden toteutus olisi selkeämpää sähköisen ja mekaanisen toteutuksen kannalta. Sähkötekniikan suunnittelussa käydään läpi standardeihin merkittävät vaatimuksia ennakoivista valmisteluista ja itse testaamiseen liittyviä asioita. Tässä osiossa huomioidaan myös mahdolliset akun tuhoutumiset ja automaattisten turvajärjestelmien suunnittelu. Mekaaninen puoli käsittelee enemmän varsinaisen testaustilan suunnittelua testaukseen liittyviä vaatimuksia ja turvajärjestelmiä sekä ennen että jälkeen mahdollisen akun tuhoutumisen, jotta vahingot voitaisiin ehkäistä ja minimoida mahdollisimman tehokkaasti. Molempien osuuksien suunnitelmissa huomioidaan myös helppokäyttöisyys. Tulevaisuuden toteutuksessa sekä mekaanisen että sähköisen puolen suunnittelijat ja toteuttajat joutuvat tekemään tiivistä yhteistyötä, jotta kaikki ominaisuudet saadaan toiminnaltaan mahdollisimman sulaviksi.

Käytettäviä standardeja ovat seuraavat:

- ISO 12405–1:2011 Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 1: High-power applications, joka käsittelee pääasiassa suurtehoakkuja, mutta standardisarjan ensimmäisenä osana käsittelee jonkin verran kahden seuraavankin osan aiheita
- ISO 12405–2:2012 Electrically propelled road vehicles – Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 2: High-energy applications, joka käsittelee suurenergia-akkujen testaamista
- ISO 12405–3:2014 Electrically propelled road vehicles – Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 3: Safety performance requirements, jossa keskitytään akkujen fyysisiin testauksiin.

Kahdesta ensimmäisestä standardista löytyy hyvin tarkat ohjeet eri testien valmisteluille ja itse testien suorittamiseen. Kolmannen osan testivaihtoehtoista tultaneen käyttämään aluksi lähinnä sähköisiä testejä, esimerkiksi oikosulku-, yllätaus- ja purkutestejä, minkä lisäksi lämpötilan aiheuttamat vaikutukset akkuun halutaan selvittää. Myöhemmässä vaiheessa käytettäneen muitakin vaihtoehtoja, joissa akku asetetaan mekaanisen rasituksen kohteeksi, kuten törmäyskiihtyvyyksien testaamista.

Lisäksi on olemassa UN/DOT 38.3 –standardi, josta huomioidaan liikutteluun liittyviä säädöksiä. Standardi keskittyy enemmän pidempiin liikutteluihin, mutta on huomioitava mahdollisuus, että testausjärjestelmää liikutellaan muuallekin kuin kylmälaboratorioon ja sieltä ulos. Esimerkiksi laitteisto voidaan viedä messuille esiteltäväksi.

4.1 Sähkötekniinen suunnittelu

Mikäli testauslaboratorio toteutetaan tämän suunnitelman pohjalta, riittää tästä osiosta todennäköisesti tehtävää ainakin kahteen insinööriyöhön. Osiot kannattanee jakaa itse laitteiston rakentamiseen, joka käsittää keinokuroman luomisen ja mittalaitteiston kokoamisen laboratorioon mahdollisimman selkeäksi kokonaisuudeksi. Toisena osiona on testauksen luominen ohjelmallisesti, johon kuuluu varsinaisen testausyösklin luominen, josta sitten saadaan tulokset. Loppukäyttäjän kannalta tehokkainta olisi, kun DUT (Device Under Test) vain kytkettäisiin kiinni laitteistoon, määritettäisiin, mitä ollaan testaamassa, ja käynnistettäisiin testi, eli minimoitaisiin testauksen aikana suoritettavat tehtävät käyttäjältä.

Osiot kannattaa tehdä kuitenkin yhteistyötä tekemällä, sillä ne liittyvät toisiinsa hyvin vahvasti ja tekijät voivat keskustella yksityiskohdista yhdessä, jolloin saadaan mahdollisimman toimiva laitteisto. Mikäli yhteistyötä ei tehdä, on mahdollista, että laitteistossa on puutteita standardien mukaiseen mittaukseen nähden. Samaa yhteistyötä kannattanee tehdä myös mekaanisen puolen toteuttajien kanssa, koska siinäkin on omat vaatimuksensa ja jos tulevaisuudessa halutaan suorittaa akkujen hallittua tuhoamistestausta, osaavat he kertoa siihen vaadittavia seikkoja. Laboratorio tulee siis olemaan erittäin suuri kokonaisuus, jonka eri osuuksien tekijöiden tulee tehdä tiivistä yhteistyötä, jotta saadaan paras mahdollinen laitteisto.

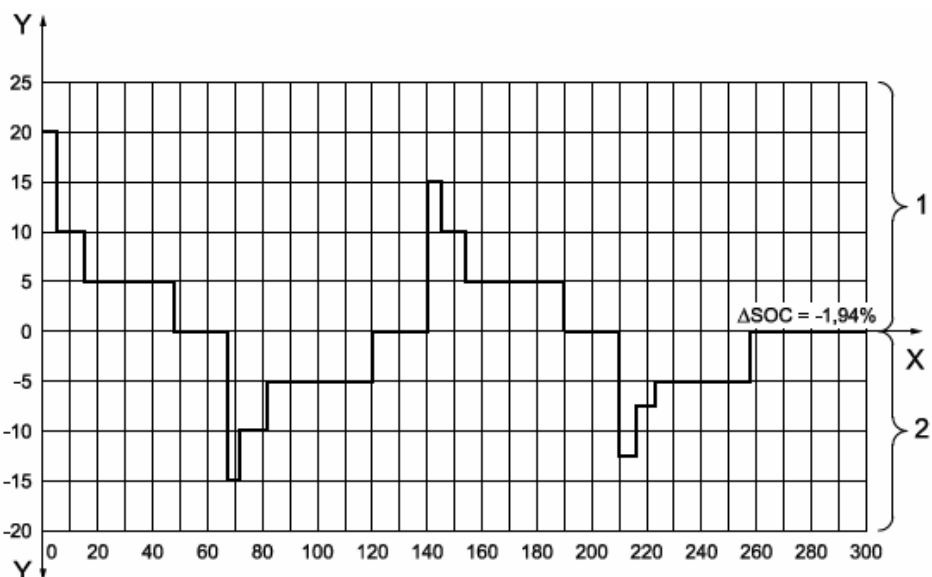
4.1.1 Testausyösklit

Tässä luvussa kuvataan, mitä ISO standardeissa on määritelty siitä, kuinka akkuja tulee testata ja kuinka ne tulee valmistella testiä varten. Näin ollen ennen varsinaista testaamista akuille tulee aina tehdä samat ennakkovalmistelut, jotta voidaan olla varmoja akkujen olevan keskenään vastaavassa tilassa testausta suorittaessa. Nämä suoritettavat valmistelut löytyvät ISO 12405 -standardin kahdesta ensimmäisestä osasta

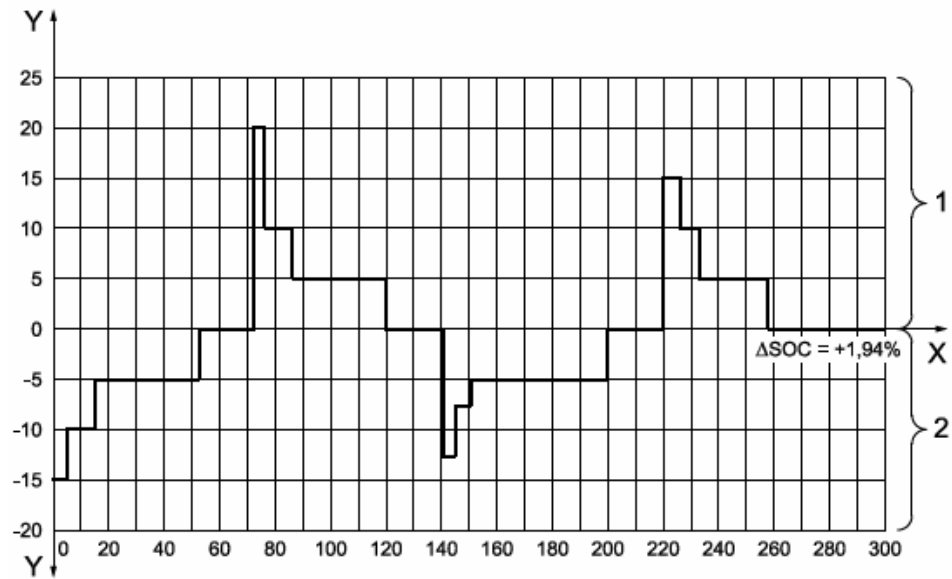
1:2011 ja 2:2012 luvusta 6. Näillä valmisteluilla voidaan myös eliminoida mahdollisia virheellisiä akkuja testaustuloksista, mikäli saadaan erikoisia tuloksia.

Standardien ISO 12405 1–2 testauksilla tullaan määrittelemään akuille tietoja, jotka ovat energia ja kapasiteetti sekä teho ja sisäinen impedanssi eri lämpötiloissa, itsepurkautuvuus, käynnistysvirta, hyötysuhde, syklikesto, ja erilaisia mekaanisia kestävyyyksiä, joita ovat kosteuden, lämpötilan, värinän, iskujen ja kiihtyvyyksien kesto. Viimeksi lueteltuja fyysisiä testejä tosin pohditaan vasta mekaanisen suunnittelun luvussa 4.2.

Varsinaisten testien ja syklien suunnittelu on jätetty tästä työstä pois, sillä ne kuuluvat toteutusvaiheen tekijälle, mutta peruseriaatteet käsitellään kuitenkin tässä luvussa. Monissa ISO 12405 -testeissä akkuja rasitetaan ja ladataan jossakin tietyssä suhteessa siten, että sen SOC joko laskee tai nousee. Esimerkiksi ISO 12405–1:2011:n syklikestotestissä ensin puretaan kuvan 4 mikrosyklien mukaan akku joko asiakkaan määrittelemän SOC-välin mukaan tai välillä 30–80 %. Kun asetettu alaraja saavutetaan, siirrytään lataavaan mikrosykliin, joka on kuvan 5 mukainen, ja sitä jatketaan, kunnes asetettu SOC-yläraja on saavutettu. Tätä syklytystä jatketaan, kunnes saavutetaan haluttu tai toimittajan kanssa ennalta sovittu tilanne. Testi suoritetaan yleensä lämpötilassa välillä 25 ± 2 – 40 °C tai asiakkaan kanssa sovituksessa lämpötilassa. (ISO 12405 2011: 32.)

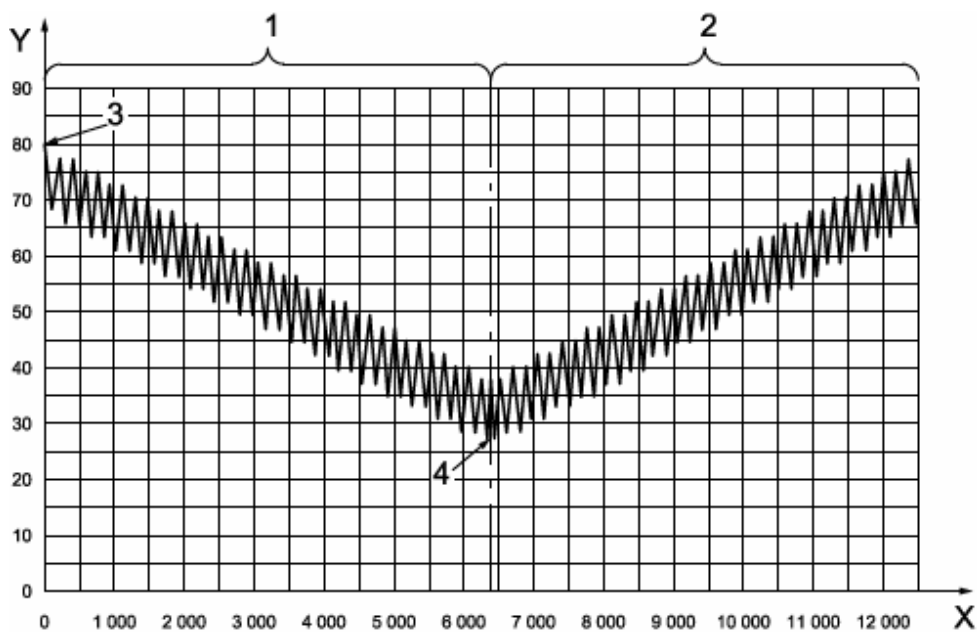


Kuva 4. Purkavan mikrosyklin kuvaaja. X-akselilla aika sekunteina, Y-akselilla virta C-arvona, 1 purkuvirta ja 2 latausvirta. (ISO 12405-1 2011: 33.)



Kuva 5. Lataavan mikrocyklin kuvaaja. Akselit ja merkinnät ovat samat kuin kuvassa 4. (ISO 12405-1 2011: 34.)

Kuvien 4 ja 5 kuvaajien syklit yhdistämällä yhdeksi suureksi sykliksi saadaan kuvan 6 mukainen sykli, joka on tyypillinen syklikestotestin kuvaajaksi.



Kuva 6. Syklikestotestin monta purku- ja latausvaihetta kuvattuna yhdeksi kuvaajaksi. X-akselilla aika sekunteina, Y-akselilla SOC prosentteina, 1 kuvaa purkuvaihetta, 2 kuvaa latausvaihetta, 3 lähtötilanteen SOC ja 4 alarajan SOC, jossa siirrytään latausvaiheeseen. (ISO 12405-1 2011: 35.)

Suurin osa sähköisistä testauksista tulee olemaan tämän kaltaisia tarkoin määriteltyjä syklejä, joilla kullakin määritellään akulle jokin ominaisuuksista kuten tällä syklikesto. Lisäksi virroista tulee huomioida, että käytetään valmistajan tai toimittajan määrittelemiä maksimiarvoja, ja sama pätee kaikkiin muihin arvoihin. Tarkoituksena esimerkiksi edellä läpikäytyssä syklikestotestissä ei ole rasittaa akkua liiaksi, vaan tarkoitus on vain selvittää, kuinka monta sykliä akku kestää. Huomioitavaa vielä on se, että kyseiseen kestotestiin liittyy muitakin vaatimuksia kuin edellä mainitut, mutta niitä ei tarkastella tässä opinnäytetyössä, sillä ne eivät kuulu aiheeseen ja edellä läpi käyty on vain havainnollistavana esimerkkinä testausykleistä.

Testausyklad tulisi suunnitella ensimmäisenä kokonaisuutena, jotta tiedetään, mitä ominaisuuksia laitteistolla tulee olla. Todennäköisesti aihe on sen verran laaja, että siitä riittää tehtävää kokonaiseen insinööriyöhön, kun huomioidaan, kuinka paljon eri testejä akuille voidaan tai tullaan tekemään. Sykliä suunnittelun jälkeen tiedetään tarkemmin, millaisia virtoja laitteisto tulee käyttämään, ja tästä voidaan laskea, millaisia lataus- ja purkutehojen tulee olla. Vasta näiden arvojen selvittämisen jälkeen voidaan suunnitella, mitä laitteistoa tulee hankkia vai joudutaanko osa laitteista jopa rakentamaan Metropoliassa joko tarjonnan vähyyden tai kustannusten vuoksi. Nyt jo kuitenkin tiedetään, että virrat, jännitteet ja niiden pohjalta tehot tulee laitteistolla olla suuret, mikäli aiotaan testata isompia akkupaketteja, joten seuraavissa alaluvuissa on jo arvioitu, millaista laitteiston tulee olla.

4.1.2 Keinokuorma

Keinokuorman tarkoitus on rasittaa testattavaa yksikköä suunnitellulla tavalla, jotta voidaan mitata, mitä akussa tapahtuu rasituksen aikana. Huomioitavaa kuitenkin on, että testin aikana suoritetaan myös latausta, joten olisi tyhmää hukata valtava määrä energiaa vain lämmöksi. Näin ollen kannattaa tutkia mahdollisia vaihtoehtoja kuormaksi. Tätä työtä tehdessä on keksitty kaksi vaihtoehtoa, jotka voisivat toimia keinokuormana ja näiden jokaisen vaihtoehdon mielekkyyttä helppouden ja kustannusten kannalta pyritään pohtimaan tässä luvussa.

Ensimmäisenä ja ehkä kustannusten kannalta parhaana vaihtoehtona olisi rakentaa akkupaketti, jonka varaus pidetään jonain tiettyinä testien välillä ja jonka olotila olisi muutoinkin tarkoin monitoroitu, jotta siihen voidaan purkaa testattavaa akkua keräten talteen muutoin lämmöksi häviävä energia. Tällä järjestelmällä voitaisiin myös helposti

ladata testattavaa yksikköä samalla energialla latausjakson aikana hukkaamatta kovin paljon energiaa.

Tällä tavoin toteutettu järjestelmä ei välttämättä ole edullisin rakentaa akkupaketin rakentamiskustannusten vuoksi, sillä paketin jännitteen ja kapasiteetin tulisi olla melko suuri, jotta suurimmatkin ajoakkupaketit kyettäisiin testaamaan ongelmitta. Jos testattavan akuston kannalta otetaan esimerkiksi Teslan P90-akkumalli, jossa akusto on 400 V ja 90 kWh, tarvittaisiin tällöin keinokuorma-akusto, jonka kapasiteetti ylittäisi P90-akun kapasiteetin. Tällöin välttyttäisiin tuottamasta tarpeettomasti hukkaenergiaa purkujaksojen aikana. Keinokuorman SOC voisi olla esimerkiksi noin 50 % ja maksimikapasiteetti 150 kWh, jolloin sillä olisi reilusti varaa ottaa virtaa vastaan suuremmiltakin testattavilta akkupaketeilta. Maksimijännitteen olisi hyvä olla samaa kokoluokkaa tai hieman suurempi kuin suurimpien testattavien akkujen, jotta lataussyklin aikana varmistettaisiin riittävä latausteho. Kaikkein suurimpien akkupakettien kanssa keinokuorman SOC voitaisiin pienentää riittävälle tasolle, jotta testaus onnistuu sujuvammin.

Pienempien testattavien akkujen kohdalla on parempi, että kuormana on isompi akku kuin suuremmilla liian pieni, sillä tällä järjestelmällä tultaisiin käyttämään DC-DC-muunninta sovittamaan testattavana ja kuormana toimivien akkujen jännitteet sekä rajoittamaan virtaa purun ja latauksen aikana. Mikäli kuormana toimiva akku olisi liian pieni, olisi sillä hankalaa saavuttaa tarvittava latausteho ja pahimmillaan sillä ei riittäisi kapasiteetti vastaanottamaan isoimpien akkujen virtaa. Tesla Model S toimii tässä esimerkkinä, koska sen akkupaketti on yksi iso kokonaisuus, kun joissakin muissa ajoneuvoissa akut koostuvat pienemmistä paketeista.

Tähän tarkoitukseen sopisi erinomaisesti LFP kennojen turvallisuuden, virran siirto-ominaisuuden, kapasiteetin ja syklikeston vuoksi. Lisäksi LFP-kennot ovat monesti edullisempia kuin muista yhdisteistä tehdyt kennot, jolloin laboratorion rakentamiskustannukset pysyvät maltillisempina. Hinta akustolle 520 kappaleella kennoja olisi noin 43000 €, kun kennon kappalehintana olisi noin 82 €/kpl (GWL/Power Lithium Iron LiFePO₄- Battery Cell – LFP 3.2V 72AH 2016). Näillä kennoilla akuston rakenne tulisi olemaan 130s4p ja sen suurin jännite olisi 474 V laskematta mukaan jännitehäviöitä, kun yksittäisten kennojen maksimi on 3,65 V ja kapasiteetti 136,5 kWh.

Jos LFP:a verrataan esimerkiksi toiseen potentiaaliseen vaihtoehtoon, joka on NMC, olisi hinta tällöin XALT 75 Ah HE (NMC 75 Ah high-energy -malli) kennoilla ~71000 \$ ja kappalehinta 177 \$, mikäli hinta on lainkaan verrattavissa HP (high-power) akkuun, joka on ainoa löytynyt hinta sähköautofoorumilta (Prismatic cells New Xalt energy 75 Ah HP 2016) XALT:n kennoille. Dollarien ja eurojen vertailu toki vaatii alati muuttuvan kertoimen käyttöä, mutta muuntamalla kumpaakaan suuntaan tai toiseen voidaan huomata, että akuilla on selkeä ero hinnassa, sillä kerroin on usein melko lähellä yhtä. NMC-akuston maksimijännite olisi kalliimmasta hinnasta huolimatta vain 420 V ja kapasiteetti 126 kWh, joten vastaavan akuston saavuttaminen NMC:lla olisi erittäin paljon kalliimpaa.

Akku keinokuormana toki vaatii lisäksi vielä suuria tehoja kestäviä kaapeleita ja BMS:n (battery management system) vahtimaan akkupaketin tilaa, jotta kennoja ei rikottaisi ja monia muita laitteita. BMS ja muut siihen liittyvät oheislaitteet käydään tarkemmin läpi luvussa 3.2.3 Laitteisto.

Akkupohjaisessa keinokuorma vaihtoehdossa voitaisiin akustoon liittää myös EV/PHEV-latauspiste akkulaboratorion läheisyyteen. Tällöin suuremmista testattavista akuista purettavaa virtaa voitaisiin käyttää latauspisteellä olevan ajoneuvon lataamiseen, kun keinokuorma on saavuttanut ylärajansa varauksen suhteen.

Toinen ja edullisempi vaihtoehto täysin uusista kennoista rakennetulle akkupaketille on hankkia vanhoja EV/PHEV-akkupaketteja, jotka sitten kytketään rinnakkain kapasiteettia varten ja tarvittaessa sarjaan riittävän jännitetason saavuttamiseksi. Tällöin saadaan suuri kapasiteetti suhteellisen edullisesti ja vanhat akut saavat uuden käyttökohteen, vaikka eivät enää sovi ajoneuvokäyttöön alentuneen kapasiteetin vuoksi. Paikallaan olevassa laitteistossa ei haittaa, vaikka keinokuorma-akusto painaisikin reilummin.

Toinen vaihtoehto keinokuromaksi on muuttaa testattavan akun varaus lämmöksi, mutta tämä vaihtoehto on kovin epäekologinen, joten sitä ei edes harkita todelliseksi vaihtoehdoksi akkupohjaiselle keinokuormalle, mutta sen etuja olisi lyhyen aikavälin edullisuus, kun suuren akkupaketin ja siihen liittyvien laitteiden hankinta jää pois hankinta kustannuksista. Nykyaikana kuitenkin on erittäin tuomittavaa toimintaa muuttaa suuria määriä energiaa lämmöksi ja sitten ladata akku uudestaan sähköverkosta, jotta se voitaisiin jälleen purkaa uudestaan lämmöksi. Tässä vaihtoehdossa on vielä huomioitava se, että kokeet tullaan tekemään kylmälaboratoriossa, jotta saavutetaan standardien vaatima alhaisin testauslämpötila, joka on -18 °C (ISO 12405:1–2011: 16),

ja mikäli tätä tilaa lämmitetään tarpeettomasti, lisää se turhia testauskuluja laboratorion lisääntyneen jäähdystarpeen vuoksi.

Keinokuorman todellinen suunnittelu on myös sen verran laaja kokonaisuus, että siinä riittänee tehtävää myös yhteen insinööriyöhön. Suunnittelussa kannattaa huomiota erityisesti painottaa testausykleihin, jotta voidaan taata standardien kannalta aukoton testausympäristö. Keinokuormaan voitaneen liittää siihen liittyvien oheislaitteiden lopullinen selvitys, sillä se, millaiseen kuormaan päädytään, vaikuttaa tarvittaviin laitteisiin oleellisesti. Esimerkiksi mikäli kuorma on akkupohjainen, se tarvitsee BMS:n valvomaan tilaansa, mutta jos päädytään johonkin muuhun vaihtoehtoon, johon ei kuulu akkua, voidaan BMS mahdollisesti jättää kokonaan pois laitteistosta.

4.1.3 Tarvittava laitteisto

Mikäli laboratorion keinokuorma toteutetaan akkupaketilla, niin tarvitaan myös BMS eli battery management system, joka valvoo keinokuorman olotilaa jännitteen, lämmön ja virran suhteen. Ja koska käytettävät virrat ja jännitteet ovat sitä kokoluokkaa, että BMS:n tulee olla vastaavaa tasoa kuin ajoneuvoissakin käytetyt, niin halvimmat joudutaan sivuuttamaan tässä käytössä kokonaan, jotta keinokuorma akuston elinikä voidaan maksimoida. BMS:n hinta voi olla laadusta ja halutuista ominaisuuksista riippuen hyvinkin suurella välillä oleva tekijä, joten ensiksi tulisi päättää, mitkä ominaisuudet ovat välttämättömiä keinokuorma-akuston kannalta ja mitkä voidaan hylätä täysin tarpeettomina. Kannattavinta on kuitenkin hankkia BMS samalta valmistajalta kuin akkukin, sillä akkupaketin valmistaja on se, joka tuntee akkunsa parhaiten. Näin taataan varmasti toimiva kokonaisuus.

Tärkeintä on valvoa jokaisen kennon jännitettä jatkuvasti. Jännitteen pohjalta BMS voi tasapainottaa akkupaketin kennot samaan tilaan. Tyypillisesti valvotaan noin joka toisen yksittäisen kennon lämpötilaa. Lämpötilatiedon avulla voidaan arvioida, onko jokin kennoista liian kuuma, ja siitä voidaan päätellä, onko joillakin kennoilla tai kennoryhmällä jokin ongelma kapasiteetin tai virtojen suhteen. BMS voidaan ohjelmoida toimimaan jännite- ja lämpötilatiedon pohjalta rajoittamaan virtaa, balansoimaan kennojännitteitä tai kytkemään akku kokonaan irti kuormasta tarvittaessa.

Virran suuruuksia tulee myös tarkastella kennoryhmittäin. Tälläkin keinolla voidaan havaita, onko jollakin ryhmällä ongelmia latauksessa tai virranluovutuksessa

testaustilanteessa. Virtoja tarkkailemalla voidaan tarvittaessa sulkea akusto ja tällä tavoin pelastaa kallis akusto itsensä tuhoamiselta, mikäli BMS havaitsee liian suuria virtoja. Vastaavasti koko akuston jännitettä tulee valvoa, josta voidaan päätellä akkupaketin SOC laskennallisesti kennojen määrästä, mitatuista ja valmistajan niille antamista jänniterajoista.

DC-DC-muunnin tarvitaan akkujen välille muuntamaan purettavan akun jännite keinokuorma-akkuun sopivaksi ja säätelämään purkuvirtaa. Muuntimen tulisi myös olla tietokoneohjattu, jotta testit olisivat mahdollisimman autonomisia ja voitaisiin käyttää ennalta säädettyjä testausyklejä. Jos käytetään virrankeston esimerkkinä edellä käydyn Tesla Model S:n akustoa, niin tarvitaan ainakin 400 voltin sisääntulojännitteeseen kykenevä muuntaja. Myös virrankeston tulee olla huomioituna, kun jo syklikestotestissä voidaan käyttää jopa 20 C:n arvoja, ja mikäli Teslan akustolle olisi sallittu kyseinen purkuvirran suuruus, tarkoittaisi se noin 4250 A:n virtaa. Akuston suurin sallittu purkuvirta on kuitenkin 1,5 kA. DC-DC-muuntimen tulee siis kyetä käsittelemään ainakin 1,5 kA:n virtaa, mutta tulevaisuutta ajatellen on löydettävä jokin tasapaino siinä, kuinka suurta sisään tulevaa virtaa muuntimen tulee suurimmillaan kestävä, kauanko voidaan testeihin käyttää aikaa ja kuinka suurella teholla voidaan keinokuormaa ladata. Sillä mitä suurempaa virtaa testattavasta akusta halutaan DC-DC-muuntimeen purkaa, sitä kalliimpi siitä tulee, mutta samalla testausaika lyhenee. Jännitealueiden tulisi olla kuitenkin suurempaa luokkaa, jotta testejä voidaan suorittaa maltillisemmilla virroilla tehon laskematta liikaa. Oikosulkua vaativat testit jouduttaisiin silti suorittamaan muilla keinoilla kuin muuntimen kautta purkamalla; esimerkiksi lämmöksi muuttamalla olisi yksi vaihtoehto tässä tapauksessa.

Virran ja jännitteen kestojen lisäksi tulisi muuntimen kyetä tarkkoihin suorituksiin pienillä virroilla yksittäisten kennojen kanssa. On siis mahdollisesti kannattavaa hankkia pienemmille arvoille tarkoitettu laitteisto erikseen, jolla voidaan suorittaa tarkempia mittauksia esimerkiksi alle 1 A:n virroilla. Pienemmillä arvoilla toimivat laitteet ovat usein edullisempiäkin, kun ei tarvita järeää tehoelektroniikkaa. Yksi huomioitava puoli on, että todennäköisesti Metropolian tulee rakentaa suuremmille tehoille vaadittu muunnin itse, joten on myös mahdollista rakentaa suur- ja pienjänniteominaisuudet yhteen laitteeseen kuten ajoneuvojen akkupaketit on toteutettu. Hyvät virran toiminta-alueet voisivat olla yhden kennon jännitteistä lähtien, eli alarajaksi noin 1,5 V suurempien pakettien jännitteisiin, jotka ovat ajoneuvoissa yleensä vain joitakin satoja voltteja, mutta yläraja voisi olla tulevaisuus huomioiden 1 kV tai yli mahdollisuuksien mukaan. Käsiteltävien

virtojen alaraja olisi vastaavasti alle 1 A tarpeen mukaan ja suurimmat paketit huomioiden noin 2 kA.

Mittalaitteiden, joita tarvitaan tietojen keräämiseen, tulee olla suunniteltuja jännitteen, virran, lämpötilan, ajan, massan ja pituuksien mittaamista varten. Testilaitteiston ulkopuolisten mittavälineiden tulee olla kalibroitu vähintään siten, että virran ja jännitteen mittauksien tulee olla tarkkuudella $\pm 0,5$ % ja lämpötilan ± 1 K. Testauslaitteiston omien mittalaitteiden, joita voidaan hallita ja käyttää esimerkiksi ohjelmallisesti, tulee olla kalibroitu vähintään seuraavien toleranssien mukaan: virta ja jännite ± 1 %, lämpötila ± 2 K, aika, massa ja pituus $\pm 0,1$ %. Mittaustulokset on kirjattava vähintään niin usein, kun arviolta 5 % on purettu tai ladattu arvioidusta testin kokonaisajasta. Poikkeavasti vain, jos jossakin testissä määritellään muutoin.

4.1.4 Tulokset

Tuloksien tulisi olla selviä kuvaajia ja taulukoita, jotta niitä olisi mahdollisimman helppo tulkita oikein. Lisäksi testauksen yhteydessä havaitut asiat tulisi kirjata ylös, kuten akusta lähtevät hajut, höyryt, savut jne. Mahdollisia syitä kannattaa myös tutkia ja pohtia havaituille puutteille ja vioille. Olisi hyvä olla jokin arvosteluasteikko, josta selviää kumulatiivisesti kennon tai akkupaketin suorituskyky. Asteikko voisi olla esimerkiksi kuten energialuokitustaulukko, jossa huomioitaisiin vaikkapa seuraavat asiat: itsepurkautuvuus, sisäinen impedanssi, virran luovutus- ja vastaanottokyky, jännitteen tasaisuus, syklikesto ja lämpötasapaino. Näin saataisiin aikaiseksi arvosana, jota akkutoimittaja voisi halutessaan parantaa kehittämällä sitä osa-aluetta, joka on suoritunut muihin verrattuna heikommin.

4.2 Mekaaninen toteutus

Suunnitelman tässä luvussa käsitellään sitä, millainen testauslaitteiston tulee olla fyysisiltä ominaisuuksiltaan, jotta saavutetaan turvallinen testausympäristö ja standardeissa vaaditut mittaukset saadaan suoritettua mahdollisimman vaivattomasti. Testauskontin mekaanisessa toteutuksessa tulee huomioida turvallisuuteen, käytettävyyteen ja testattavan akun mekaaniseen rasitukseen liittyviä tekijöitä, jotka ovat tärinä, lämpötila välillä -20 – 40 °C, laitteiston liikuteltavuuden tärkeys ja turvallisuus. Turvallisuuteen liittyy potentiaalisesti jännitteellisten osien eristäminen testien aikana,

jotta vältetään mahdollisilta kosketuksilta jännitteellisiin kohtiin, ja mikäli akku tuhoutuu tai siitä alkaa muodostua kaasuja, niin näihin seikkoihin on kiinnitettävä huomioita, jottei ihmisiin kohdistu vaaraa. Tarkempi suunnittelu on todennäköisesti oma insinööriyönsä, joten tässä työssä ei keskitytä kontin suunnittelun yksityiskohtiin, vaan seuraavassa pyritään tuomaan esille mahdollisimman laajasti ja selkeästi vaadittavia asioita.

4.2.1 Testauskonttiin kohdistuvat vaatimukset

Mekaanisiin testauksiin liittyvät vaatimukset selviävät yksityiskohtaisesti standardista ISO 12405–3:2014, ja osa muista testauksiin tarvittavista tiedoista löytyy standardisarjan osista 1 ja 2. Tärkeimpiä testejä mekaanisen toteutuksen kannalta ovat lämpötilan vaihtelua tai tasaista lämpötilaa vaativat testit. Myöhemmässä vaiheessa, mikäli akkuja aletaan testaamaan fyysisiltä ominaisuuksiltaan, tulee monia eri ominaisuuksia kuten tärinä, kiihtyvyys (esimerkiksi törmäyksestä muodostuva tietyn suuntainen kiihtyvyys), ilmastoon liittyviä testejä ja simuloituja ajoneuvo-onnettomuuksia, joihin kuuluu testien kannalta tärkeitä vedelle ja tulelle altistamiskokeita. Pääpaino tulee kuitenkin toistaiseksi olemaan lämpötilan muutoksissa ja sähköisissä testeissä, joten selvitetään, mitä ominaisuuksia testauskontilla tulee näitä varten olla.

Testien sujuvuuden vuoksi tulisi konttiolosuhteita kyetä muuttamaan nopeasti, sillä kun suoritetaan kylmätestejä akuille, niin kaikkien kylmätilassa olevien osien tulee olla kauttaaltaan standardin määräämässä lämpötilassa. Kontin siis tulee olla hyvin lämpöä johtavaa materiaalia, mutta samalla tulee huomioida materiaalin kestävyys mahdollisten tulipalojen kannalta. Useissa litiumakkujen polttovideoissa teräkseltä näyttävä materiaali näyttäisi olevan riittävän kestävä palamisen kannalta, ja 0,5 % hiiltä sisältävän teräksen sulamispiste on 1480 °C (Metallien ominaisuuksia 2016) ja sen pitäisi kestää rajumpikin litiumakun tulipalo. Teräs siis olisi hyvä materiaali lämmönjohtavuutensa ja kestävyytensä kannalta, mutta se johtaa sähköäkin erittäin hyvin, ja koska ollaan tekemisissä suurjännitteellisten akkupakettienkin kanssa, on teräs huono valinta yksistään. Kontti siis tulee joko eristää jotenkin ulko- tai sisäpinnoiltaan. Yksi vaihtoehto olisi rakentaa kahdesta kerroksesta koostuva testauskontti, jonka kerrokset olisi eristetty toisistaan ja sisempään ei pääse koskemaan ulkopuolelta, mikäli havaitaan oikosulku konttiin. Lisäksi kontin sisälle pääseminen tulee estää testien aikana ohjelmallisella lukituksella, joka lukitsee oven, kun testi kytketään päälle, ja aukeaa, kun testi on päättynyt. Näillä toimenpiteillä päästään ainakin alkuun henkilöille turvallisessa

testaamisessa, mutta kontin suunnittelijan tulee huomioida kaikki muutkin mahdolliset henkilöihin liittyvät turvallisuusseikat, joita tässä työssä ei ole huomattu.

4.2.2 Akun tuhoutuminen

Akkujen tuhoutumiseen liittyviä asioita ovat tulipalo ja siitä aiheutuvat kaasut. Molemmat ongelmat tulee voida ratkaista turvallisesti, sillä litiumakuista lähtee monia haitallisia kaasuja, mikä selviää vielä tätä työtä tehdessä julkaisemattomasta Työterveyslaitoksen tutkimuksesta. Kaasut tulisi kyetä joko suodattamaan tai keräämään johonkin säiliöön talteen, josta ne voidaan käsitellä turvallisesti, mutta niille ei tulisi altistua, koska seassa on sekä ihon läpi imeytyviä että hengitettynä vaarallisia ja haitallisia kaasuja. Huomion arvoinen seikka on se, että sammuttaessa akkuja vedellä tai vaahdolla aiheutetaan monesti enemmän kaasuja kuin puhtaalla poltolla. Kuitenkin kontissa akkujen palaessa ne ovat jokseenkin hyvin eristettynä ja kaasujen käsittelyn tehosta riippuen aiheutuva haitta on melko mitätön. Suodatettavien kaasujen määrät ja laatu tulee selvittää kontin suunnitteluvaiheessa, kun tutkimus akkujen polttamisesta on julkaistu. Tärkeämpää on pitää huoli, että testauslaitteisto (johdot, liittimet jne.) ei vahingoitu kontin sisällä palotilanteessa. Lisäksi palaneita akkuja tulee käsitellä varoen, sillä ne voivat syttyä uudelleen, mikäli ne on sammutettu ja niille tulee keksiä turvallinen loppusijoituspaikka, jossa ne aiheuttavat mahdollisimman vähän vaaraa. Usein kuitenkin ulkopuolinen lämmönlähde ei aiheuta akuille tulipalovaaraa, vaan suurempi riski tulipalolle on akun sisäinen oikosulku tai muu lämpökarkaamiseen johtava tekijä. Akut on nimittäin usein pakattu siten, että ne ovat huonosti palavien materiaalien sisällä. Useimmat akkupaketit kestävät jopa yksittäisten kennojen räjähdysisiä muuttamatta juurikaan muotoaan. Palotilanteessa akku voidaan kuitenkin tarvittaessa sammuttaa joko vedellä tai vaahdolla.

4.2.3 Testauskontin liikuteltavuus

Kontin suunnittelijan tulee pohtia, kuinka kontti tulee toteuttaa liikuteltavuuden suhteen, mutta liikuttelun mahdollisuus olisi suotavaa, jotta voitaisiin käyttää samaa kylmälaboratoriota kuin ajoneuvojen päästömittauksissa käytetään. Tällöin saataisiin reilun kokoinen tila, jonka lämpötila voidaan jäähdyttää tarpeeksi alas tarvitsematta rakentaa omia jäähdyttimiä kontille. Haasteena liikuteltavuuden kannalta toki on se, että sen tulisi olla tarpeeksi suuri kokonaisille akkupaketeille mutta riittävän pieni

mahtuakseen kylmälaboratorioon. Siirrettävyydenkin tulisi olla mahdollisimman vaivatonta, joten mahdollisesti kontilla kannattaisi olla oma alustansa, jolla se liikkuu esimerkiksi kauko-ohjattuna. Testauskontilla tällöin voisi olla oma pieni akustonsa, jolla se kykenisi liikkumaan tarvittavat lyhyet siirtymät kylmätilaan ja sieltä pois. Akuston ei tällöin tarvitse olla kovinkaan suuri, ja se voi olla eristetty kylmälaboratorion jäähdyttävältä vaikutukselta. Lisäksi liikutteluun tarkoitettua akkua voitaisiin käyttää pienempien akkujen ja kennojen purkua varten keinokuormana.

Testauskonttiin tulisi siis vain oleelliset laitteet tulipalojen sammutusta, kaasujen poistoa, testauslaitteiston liitäntöjä varten, mahdollinen oma akusto ja moottori ohjauksineen. Itse elektroniikka ja keinokuorma pidettäisiin erillään testattavasta akusta ja kylmästä. Näin minimoidaan riski rikkoa jotain kallista sekä vältetään jäähdyttämästä ja lämmittämästä ylimääräistä massaa turhan vuoksi ja mahdolliselta elektroniikan hajoamiselta kylmässä.

5 Kustannusarvio

Kustannusarvion laatiminen on oleellinen osa tätä suunnitelmaa ja mahdollista laboratoriahanketta silmällä pitäen, joten tätä käydään enemmänkin läpi, jotta saadaan mahdollisimman täydellinen kokonaiskuva. Tästä syystä kustannusarvio on jaettu useampaan alalukuun, jotka ovat 5.1 Laitteiston hankinta, 5.2 Henkilöstö, 5.3 Ylläpito, 5.4 Tuotto ja 5.5 Kokonaisarvio, jossa lopulta käydään lävitse kulut ja tuotot kokonaisuutena. Kustannusten arviointi on tärkeytensä ohella myös yksi haastavimpia aiheita, sillä vastaavien laitteistojen tuottamisesta ei liiemmin ole saatavilla tietoa hintojen osalta. Arviot ovat siis vain arvioita, mutta mahdollisimman tarkaksi tehtyjä saatavilla olevien tietojen valossa.

5.1 Laitteiston hankinta

Tähän lukuun on pyritty kokoamaan laitteiston hankintakustannukset sisältäen niin elektroniikan kuin itse kontin kokonaisuudessaan. Tässä lasketaan laitteiston hinta siten, että keinokuormana toimii akkupaketti, keinokuorman BMS ja testattavien akkujen purku suoritetaan DC-DC-muuntimella, joka on ohjelmoitavissa tietokoneella. Lisäksi huomioidaan kaikki tarvittavat mittavälineet ajalle, pituuksille, lämmölle, painolle, virralle ja jännitteelle.

Mikäli keinokuorma toteutetaan edellä mainituilla LFP-akuilla, joiden pohjalta aikaisemmin laskettiin akuston hinnaksi noin 43 000 €, voitaisiin tällöin ottaa turvallisesti budjetiksi noin 60 000 € keinokuorman akkupakettia varten. Tällöin mahdollisesti vältetään budjetin ylittymiseltä tai ainakin ollaan lähempänä todellista kuluja, sillä huomioitavana osana on vielä akuston kotelointi, liittimet ja johdotukset BMS:lle, josta taas DC-DC-muuntimelle ja testattavalle akulle.

BMS on myös melko kallis laitteisto riippuen siitä, mitä ominaisuuksia siltä vaaditaan. Tässä tapauksessa halutaan valvoa lämpötilaa, virtojen ja jännitteiden suuruuksia varsin tarkkaan, joten todennäköisesti BMS:n tulee olla mallia, missä on niin kutsuttu master- ja useampi slave-yksikkö, jolloin voidaan valvoa pienemmissä ryhmissä akkupakettia. Lämpötilasta voidaan muodostaa kartan kaltainen visuaali, jonka avulla voidaan tutkia, onko jossain kohdin akkupakettia jotain ongelmaa, mikäli lämpötila on jossakin kohdin suurempi. Master-yksikön hinta on tällaisessa ratkaisussa usein huomattavasti suurempi kuin slave-yksiköiden, jotka ovat parhaimmillaan vain noin A5-paperin kokoisia tai pienempiä piirikortteja, joista tieto vietään masterille. Hinta masterille voi olla useita tuhansia, ja kalleimmat ovat kymmenissä tuhansissa. Koska tätä akkupakettia halutaan valvoa todella tarkasti, tulisi todennäköisesti master-yksikön olla kalliimmasta päästä hintaskaalaa, joten voitaneen arvioida hinnaksi noin 10 000 €. Slave-yksiköiden hinta on usein kymmenistä euroista joihinkin satoihin, ja tässä tapauksessa todennäköisesti päädytään noin sadan euron luokkaan. Slave-yksiköiden määrä tulee miettiä tarkkaan toteutusvaiheessa, mutta arviona voidaan käyttää yksi yksikkö kymmentä kennoa kohden, jolloin kokonaismääräksi tulee 52 kappaletta. Käytetään hintana mainittua 100 €:a, jolloin kokonaissummaksi muodostuu 5200 €. Näin saadaan BMS-järjestelmän kokonaiskustannukseksi noin 15 200 €, joka voidaan pyöristää 16 000 €:oon, jotta säilytetään turvallinen marginaali.

DC-DC-muunnin on hyvin hankala laskea edes suuntaa antavasti oikein tähän sovellukseen sopivien yksiköiden heikon tarjonnan vuoksi. Monilla valmistajilla on vain joihinkin watteihin kykeneviä muuntimia, ja sen jälkeen tarjonta on käytännössä tilaustyötä, mikäli valmis tarjonta ei tarjoa sopivaa ratkaisua. Osaksi ongelmaa muodostuu myös se, että useimmat muuntimet ovat vain noin 120 volttiin kykeneviä, eli ne eivät ole edes oikealla jännitealueella. Monet toimivat jopa alemmilla maksimijännitteillä, joten useimmilla valmistajilla tarjonta rajoittuu tilaustuotteisiin, joiden hinta voi olla lähes mitä vain. Joko valmistajat tulisi kilpailuttaa tarjonnan suhteen tai sitten Metropolian tulee suunnitella ja valmistaa sopiva muunnin. Hinta muuntimelle voi

kummassakin tapauksessa olla arvioituna jopa kymmeniä tuhansia euroja, sillä muuntimen tulee kyetä suuriin tehoihin. Suuntaa antavana tehorajana voidaan käyttää mahdollisesti tämän hetken tehokkainta sähköautoa, joka on Tesla Model X P90D tai Model S P90D, jossa voidaan käyttää tehon likiarvona 500 kW:a (Tesla is secretly adding over 50 hp to Model S P90D Ludicrous based on 3rd party testing, what does it mean? 2016). DC-DC-muuntimen siis tulisi kyetä vähintään mainittuun 500 kW:n purkutehoihin, mikäli testataan tämän kaltaisia suurtehoakkupaketteja. Hyvänä ohjeena kuitenkin voitaneen pitää maltillisempaa tehoa kuten 300 kW:a, joka on yleisesti ottaen jo varsin suuri teho ajoneuvoissa. Kustannuksen kannalta suuntaa antavana laitteena voitaneen pitää BMS:n hintaa, sillä laitteilla on vastaavan kaltaisia ominaisuuksia ja toimintoja. Arvioidaan siis DC-DC-muuntimen hinnaksi sama kuin BMS:n eli noin 16 000 €.

Laboratorioon tarvitaan mittavälineitä, joilla voidaan mitata akkujen pituusmitat, paino, lämpö, luovuttama virta ja napajännite, sekä kello, joilla voidaan kaikilla mitata edellä käytyjen ISO 12405 -standardien mukaisilla tarkkuuksilla. Pituusmittoihin riittänee hyvin kalibroitu työntömitta pienemmille kennoille ja suuremmille hyvä mittanauha. Työntömitan tulee olla johtamattomilla mittakärjillä oleva malli, jottei esimerkiksi sylinterikennon pituutta mitatessa saateta kennoa oikosulkuun. Helppokäyttöisyyttä ajatellen näiden mittavälineiden kannattaa olla sellaisia, että ne ovat suoraan tietokoneeseen yhteydessä, jolla akkujen testien arvoja kirjataan. Näin välttyttäisiin luku- ja kirjausvirheiltä pituuksien suhteen. Ajan mittaus voi olla toteutettu tietokoneellisesti ja testeissä vaadittujen arvojen kirjaus tapahtua automaattisesti määrättyinä hetkinä, jolloin välttytään myös inhimillisiltä virheiltä mittaustilanteissa. Nämä kolme mittavälinettä ovat varsin edullisia ja kuluina puhutaan korkeintaan sadoista euroista riippuen lähteestä ja laitteen laadusta päätellen ulkoisesta olemuksesta, joten käytetään kululaskelmia varten 200 €:a budjettina.

Vaa'atkin ovat melko edullisia ja tarkkoja, ja pienemmille kennoille kannattanee hankkia tietokoneeseen kytkettävissä oleva elektroninen vaaka, jolloin jälleen välttytään käsin kirjaamiselta ja inhimillisiltä virheiltä. Ominaisuuksista riippuen pienen vaa'an hinnat ovat satoja euroja, ja riittävillä ominaisuuksilla olevan saa noin 700 €:lla (Myymlävaaka 2016.) Suuremmille akkupaketeille vaa'aksi tarvitaan esimerkiksi logistiikan puolella käytettävää vaakaa, jolla voidaan punnita satoja tai jopa tuhansia kiloja varsin tarkasti oikean kuormaamisen vuoksi. Tällaisten vaakojen hinnat ovat noin tuhannesta kahteen tuhanteen euroon. Käytettäköön siis laskelmia varten 2000 €:a (Lattiavaaka 2016), jolloin

saadaan varmasti riittävällä suorituskyvyllä oleva vaaka isoimpien akkupakettien punnitsemiseen.

Vaikka DC-DC-muuntimen tuleekin kyetä mittaamaan virtaa ja jännitettä, jolla testattava akku purkautuu, niin kannattaa näitä arvoja silti valvoa ulkoisillakin mittalaitteilla, jotta voidaan varmistua tuloksien oikeellisuudesta. Näidenkin laitteiden kannattaa olla sellaisia, että ne kykenevät kirjaamaan mitatut arvot suoraan tietokoneelle. Näille mittalaitteille kuluarvio voisi olla noin 1000 €.

Testauskontti ja vaadittavat oheislaitteet todennäköisesti tulee eritellä siten, että kontti käsitellään omana osuutenaan ja turvallisuuteen liittyvät omanaan. Turvallisuuslaitteita ovat sammutukseen ja kaasun poistoon ja suodatukseen liittyviä laitteita. Muut turvatoimet voidaan kytkeä ohjelmallisesti toimimaan automaattisesti ja tarvittaessa manuaalisesti. Kontin valmistuskustannukset todennäköisesti ovat noin 10 000 €:a, jolla katetaan kontin teräs- ja eristemateriaalit, sammutuslaitteiston ja ilmanvaihdon putkistot, mahdolliset liikutteluun vaadittava elektroniikka ja muut mahdolliset oheislaitteet. Kustannukset riippuvat sammutusjärjestelmästä, käytetäänkö vettä, vaahtoa vai peräti jotain muuta tehokkaampaa ja vähemmän palotapahtumasta päästöjä lisäävää ainetta, mutta pysyvät melko alhaalla kokonaiskustannuksiin nähden, joten lasketaan kulut käyttökertaa kohden vain sadoissa euroissa ja käytettäköön laskelmiin 500 €:a kuluhintana. Sammutusta vaativien tilanteiden määrää on vaikea ennalta arvioida, mutta mikäli akkuja ei aleta tuhoamaan tarkoituksellisesti, voidaan todennäköisesti käyttää arviona korkeintaan viittä palotilannetta vuodessa, jolloin sammutuksen kokonaiskustannukset vuosittain olisivat 2500 €. Kaasuja, joita palotilanteessa vapautuu, on sen verran monia, että on vaikea arvioida tässä työssä paneutumatta liian syvällisesti aiheeseen, tarjoaako mikään valmistaja yhtä suodatinta, joka suodattaisi kaikki haitalliset kaasut kerralla. Sitäkään ei tiedetä, kuinka pitkän ajan tai suuren määrän yksi suodatin kykenee suodattamaan riittävällä tasolla kaasuja. Niinpä tässä käytetään suodattimien kuluarviona täysin arvauksena toimivaa summaa, joka on 10 000 € yhtä palotapahtumaa kohden.

5.2 Henkilöstö

Tärkein huomioitava asia henkilöstöön liittyen on, että henkilökunnassa tulee olla henkilö, joka voi toimia sähkötöiden johtajana, kun tehdään töitä Metropolian

ulkopuoliselle asiakkaalle. Setin (2016) mukaan sähköturvallisuus 3 tutkinnon omaava henkilö on oikeutettu toimimaan sähkötöiden johtajan tehtävissä enintään 1 kV:n vaihtojännitteiseen ja 1,5 kV:n tasajännitteiseen verkkoon liitettäväksi tarkoitettujen sähkölaitteiden ja niihin verrattavien sähkölaitteistojen korjaustöissä, ja tällainen henkilö Metropolialta löytyy jo. Esimerkiksi kustannus, joka koulutuksesta tulee, on 180 €/henkilö (Sähköturvallisuustutkinto 3, 2016) AEL:lla. Sähköturvallisuustutkinto on voimassa viisi vuotta ja pätevyys ikuisesti, ellei lakiin tule muutosta. Koulutuksesta muodostuva kulu on siis varsin olematon verrattuna laboratorion kokonaiskustannuksiin. Muutoin laboratorion valvojaksi riittää sähköalan ammattihenkilö.

Henkilöstön palkat taas ovat monesti yksilöllisiä, mutta mikäli arvioidaan esimerkiksi kolmella laboratoriota valvovalla henkilöllä kiinteitä säännöllisiä kuluja, niin voitaneen olettaa kaikkien olevan insinöörejä, joiden mediaanipalkka oli 3900 €/kk, vastavalmistuneilla 2676 €/kk (Insinöörien keskipalkka laski - eniten merkitsee työuran alku 2016), ja näistä voitaneen arvioida noin puolesta välistä laboratoriota valvovien keskipalkaksi noin 3200 €/kk. Tällä henkilöstön bruttopalkka-arviolla voidaan arvioida laboratorionhenkilöstöön kohdistuvat kuukausittaiset kokonaiskulut, jotka ovat karkeasti 1,5-kertaiset työntekijän bruttopalkkaan nähden, kun otetaan työntekijöistä muodostuvat sivukulut ja lomarahat huomioon. Metropolialle laboratorionhenkilöstöstä kohdistuvat kulut olisivat siis pyöristettynä ylöspäin noin 15 000 €/kk. Summa voi elää suuntaan tai toiseen riippuen henkilöstön palkoista, mutta huomioitavaa on, että laboratoriossa mukana olevat henkilöt ovat usein myös muissa tehtävissä samalla palkalla, joten edellä laskettua kuluja ei tule laskea kokonaisuudessaan laboratorion ylläpitoon. Se toimii siis vain suuntaa antavana laskelmana.

5.3 Ylläpito

Ylläpidolliset kulut laboratoriolle ovat todennäköisesti enimmäkseen laitteiston päivittämiseen liittyviä kuluja tai rikkoutuneen laitteen korvaamista uudella. Elektroniikka on usein varsin kestävä, ja mikäli keinokuorma on toteutettu akuilla, on sen elinikäkin oikein käytettynä varsin pitkä. Todennäköisesti ylläpitoon vaadittavat summat ovat satunnaisia, mutta jokseenkin suuria laitteiston hinnan vuoksi. Todennäköisimmin jokin tehoelektronikkalaitte rikkoutuu, jolloin hinnaksi voidaan arvioida useita tuhansia. Virhemarginaalin vuoksi arvioidaan tämäkin yläkanttiin, joten vuotuinen ylläpitoon kuluva summa olisi noin 15 000 €. Lisäksi toteutusvaiheessa tulee selvittää, tarvitseeko tällainen

laboratorio jonkin oman vakuutuksensa, jotta mahdolliset henkilöihin tai materiaaliin kohdistuvat tapaturmat saadaan korvattua.

5.4 Tuotto

Testien hinnan määrittelyyn kannattanee käyttää esimerkiksi akun tai akuston kapasiteettia, sillä pienikapasiteettisen akun testaaminen on suhteellisen nopeaa ja näin ollen siitä ei kannata veloittaa samaa hintaa kuin suuren akkupaketin testaamisesta. Näin saadaan alennettua kynnystä testauttaa myös pienemmät akut, kun veloitus ei ole sama kuin suuritöisestä akkupaketista. Lisäksi kun huomioidaan, että laboratorio tulee olemaan suurelta osin opetusta tukeva laitteisto, niin sen tulisi olla suhteellisen matalatuottoinen sijoitus ja näin ollen sen takaisinmaksuaika suhteellisen pitkä. Näin taataan riittävä määrä asiakkaita, jotta testattavia akkuja olisi tasaisesti ja opiskelijoille riittäisi tekemistä. Alihinnoittelua tulee kuitenkin välttää, jotta laboratorio pysyy tuottavalla puolella loppulaskemissa.

Ohjeena hinnoittelulle voinee siis mieltiä ehdotettua kapasiteettipohjaista kerrointa. Kerroin kannattaa laskea myöhemmin tarkemmin uudestaan, kun tiedetään, millaisia akkuja tullaan testaamaan ja mitä testejä tehdään eniten ja osataan arvioida, kauanko yhteen testiin kuluu aikaa. Huomioitavaa on myös suurenergia- ja -tehoakkujen erilaiset testisyklit muun muassa kapasiteetille, sillä niiden testausajat poikkeavat huomattavasti toisistaan, koska suurtehoakkujen suuren purkuvirran ja pienemmän kapasiteetin testi on nopeampi kuin suurenergia-akun suuren kapasiteetin ja matalampien purkuvirtojen vastaava kapasiteettitesti.

Kuitenkin jonkin asteinen suunta saadaan hinnoittelulle, jos pohditaan kaikkia edellä käytyjä kuluja ja pyritään vaikkapa viiden vuoden takaisinmaksuajkaan. Käytetään suoraviivaista matematiikkaa, jossa ei huomioida tuotteen hinnanalenemista eikä muitakaan talousmatemaattisia yksityiskohtia, ja oletetaan, että laitteisto valmistetaan ilman lainarahaa.

Tällöin kapasiteettipohjaiseksi kertoimeksi saadaan seuraavien laskelmien mukainen tulos, kun ensin lasketaan ensimmäisen viiden vuoden kulut yhteen, pyöristetään laitteiston kulut summasta 106400 € -> 120000 € ja lasketaan henkilöstön palkat ja muut vuotuiset kulut mukaan viiden vuoden ajalta.

$$5 v * (180000 \text{ €/v} + 67500 \text{ €/v}) + 120000 \text{ €} = 1197500 \text{ €}$$

Seuraavaksi lasketaan, kuinka paljon kulut ovat vuotta kohden viiden ensimmäisen vuoden aikana.

$$\frac{1197500 \text{ €}}{5 v} = 239500 \text{ €/v}$$

Edellä lasketusta arvosta voidaan laskea, paljonko testin hinnan tulisi olla ampeerituntia kohden, mikäli arvioidaan, että akkuja testataan 1 kAh:n edestä vuodessa.

$$\frac{239500 \text{ €/v}}{1000 \text{ Ah}} = 239,50 \text{ €/Ah}$$

239,50 €/Ah voidaan pyöristää vaikkapa summaksi 250 €/Ah, joka olisi vielä varsin maltillinen kulu standardin mukaisesta testistä, ja tämä summa olisi aina yhtä testattavaa ominaisuutta kohden. Jos kuitenkin haluttaisiin käyttää esimerkiksi testaushintana aina kiinteää summaa, voidaan vuotuisena testimääränä ajatella alustavasti noin 200:aa testiä vuodessa. Olkoon t = testi laskelmissa.

$$\frac{239500 \text{ €/v}}{200 \text{ t/v}} = 1197,50 \text{ €/t}$$

1197,50 €/t, joka voidaan myös pyöristää 1250 €/t ja on myös kohtuullinen hinnoittelu, mutta kummassakin hinnoittelulaskelmassa on huomioitava se tosiseikka, että myytyjen testausten määrää on hyvin hankala arvioida ennalta, joten tuoton suuruuteen liittyy alussa ali- tai ylihinnoittelun riski. Kysyntäkin voi ylittää tai alittaa tässä työssä arvioidut määrät.

5.5 Kokonaisarvio

Laitteiston kulut ovat ensimmäiselle viidelle vuodelle varsin suuret ja tämänkin ajan jälkeen saatavat tuotot ovat melko pieniä, mutta on myös huomioitava, että moni kuluista on laskettu reilusti yläkanttiin, jottei budjettia ylitettäisi. Näitä kohtia ovat ainakin henkilöstön palkat ja hyvin todennäköisesti laitteiston ylläpitokulut. Tässä työssä laskettu hinnoittelu on kuitenkin vain suuntaa-antava minimihinta. Tuotto pitää kuitenkin laskea

siten, että laboratorion riittää asiakkaita, jotta oppilailta olisi riittävästi tehtävää sen parissa. Laboratorion ei siis tulisi edes olla kovin paljoa rahallista tuottoa tuottava, vaan enemmän kokemusta tuottavaa toimintaa.

Kokonaisuutena arvioituna laboratorio olisi todella kannattava tässä vaiheessa akkujen kehitysvaihetta, sillä oppilaat saisivat sitä kautta erittäin hyvää kokemusta, josta seuraisi tulevaisuudessa mahdollisesti parempia akkuja oppilaiden siirtyessä opinnoista töihin akkujen pariin. On myös mahdollista, että osa mukana olleista oppilaista perustaisi oman akkuyrityksensä suomalaisten vahvan teknologiaosaamisen vuoksi ja heille olisi helppo tuoda tuotteitaan Metropolian testilaboratorioon testattavaksi. Joka tapauksessa on erittäin oletettavaa, että akkujen parissa toimineet oppilaat siirtyvät tulevaisuudessa kehitystyön pariin. Näin tarkasteltuna akkulaboratorio olisi sijoitus tulevaisuuteen ja puhtaampaan liikenteeseen, sillä hyvin todennäköisesti valtaosa ajoneuvoista tulee olemaan sähköllä toimivia, jolloin kaikki alalle siirtyvä kokemus on suureksi eduksi tulevaisuutta silmällä pitäen.

6 Yhteenveto, pohdinta ja päätelmät

Tämän insinööriyön tarkoitus on toimia ohjeena akkujen testauslaboratorion tulevaisuuden insinööritöitä varten ja pohjustaa sekä jakaa kyseisiä töitä. Tältä osin työ on pyritty jakamaan mahdollisimman hyvin, jotta aihepiirit olisivat mahdollisimman selvät. Tämän kannalta työssä on onnistuttu suhteellisen hyvin, mutta ongelmaksi muodostui jokseenkin huonosti löytyvä tieto ja sen määrä moniin tässä työssä käsiteltyihin asioihin liittyen. Joihinkin kohtiin olisi voitu perehtyä tarkemminkin, mutta tämä työ on pyritty pitämään sopivana aihepiirin laajuuden vuoksi ja siksi ei ole lähdetty liiaksi laajentamaan tai syventämään kyseisiä asioita, vaan jätetty enemmänkin pohdintojen tasolle tulevaisuutta ajatellen. Laboratorion suunnittelu tulee vaatimaan useamman insinööriyön tämän lisäksi, sillä mikäli tässä työssä olisi käsitelty kaikki laboratorion rakentamiseen vaadittavat osa-alueet perin pohjin, olisi tämä työn työmäärä paisunut valtavasti suuremmaksi kuin normaalisti insinööriyöltä vaaditaan. Lisäksi on huomioitava, että ala tämän aiheen ympärillä kehittyy jatkuvasti ja monilla yrityksillä on syykin pitää asioita salassa ulkopuolisilta. Kehittymistahdin vuoksi on myös turha käsitellä liian syvästi asioita, jotka voivat olla jo parissa vuodessa vanhentunutta tietoa.

Teorian osalta työssä on tarkasteltu ensimmäiseksi, mitä ollaan tutkimassa ja millaisia ominaisuuksia akuilla ja laitteilla on. On tärkeää tuntea laitteiden ominaisuudet ennen kuin niitä testataan. Tässä tapauksessa testattavat laitteet ovat hyvin suurella todennäköisyydellä pääasiassa litiumpohjaisia akkuja. Litiumakuista onkin tärkeää tuntea niiden kemia ja sen vaikutus akun energia-, jännite-, virta-, lämpökarkaus- yms. ominaisuuksiin, jotka vaikuttavat turvalliseen ja oikeaoppiseen testaamiseen.

Sähköteknisessä suunnittelussa on selvitetty mahdollisimman laajasti, mitä laitteistoa tullaan tarvitsemaan, jotta saavutetaan sellainen laboratorio, jossa voidaan suorittaa ISO-standardien mukaista testausta. Tässä osassa työtä on pyritty pohtimaan vaihtoehtoja eri toteutuskeinoille laboratorion laitteiston suhteen. Todennäköisesti pitkällä aikavälillä kustannustehokkain tapa rakentaa laboratorio on ehdotettu akkupaketilla toteutettu keinokuorma. Tällöin säästettäisiin laboratorion sähkönkulutuksessa, kun ei tarvitse ladata suurimpia testattavana olevia akkupaketteja, vaan voitaisiin siirtää energia akkupaketista toiseen DC-DC-muuntimen avulla. Sähköpuolen suunnittelijan tulee tarkkaan laskea, mikä toteutuskeino on todellisuudessa kustannustehokkain pitkällä aikavälillä. Tässä kannattaa myös huomioida akkuteollisuuden mahdollinen äkillinen kehitys esimerkiksi kapasiteetissa tai jollakin muulla osa-alueella, jonka johdosta esimerkiksi jokin osa laitteistosta vanhenisi ennen aikaisesti aiheuttaen suuren kulun, kun sen joutuu uusimaan. Tämän kaltainen tilanne tuskin tulee eteen, mutta oikein varautuminen suunnitteluvaiheessa kaikkiin tilanteisiin on erittäin tärkeää.

Mekaanisen osion suunnittelussa on myös pyritty tuomaan esille kaikki vaadittavat seikat sekä testien että turvallisuuden kannalta. Tämän osion suunnittelijan tulee osata ottaa huomioon sähköisen puolen vaatimukset sekä suunnitteluvaiheissa että toteutusvaiheissa, jotta saavutetaan mahdollisimman sulavatoiminen ja turvallinen laitteisto.

Kulujen arvioinnissa on melko pitkälti turvauduttu valistuneisiin arvauksiin vaadittujen laitteiden hinta-arvioissa, sillä monissa tapauksissa tietoa ei ole joko saatavilla mistään tai lähes jokaisesta asiasta tulisi lähettää erillinen tarkka kysely laitteistoja valmistaville yrityksille. Tällainen olisi ollut erittäin suuritöinen selvitystyö, ja useimmissa tapauksissa tulisi tietää hyvin paljon tarkemmin, millaisia akkuja tullaan testaamaan, ja tällöin tulisi myös olla tarkempien suunnitelmien selvillä. Tästä syystä on siis päädytty sekä suunnittelemaan enemmänkin kokonaiskuvaa kuin mitään tarkempia yksityiskohtia että

suorittamaan olemassa olevan pohjatiedon ja löytyneen tiedon pohjalta arvioita kustannuksista.

Laboratoriossa suoritetuista mittauksista saataisiin vertailupohjaa olemassa oleviin ja tuleviin akkuihin, minkä pohjalta opiskelijat voivat mahdollisesti myöhemmin saamansa kokemuksen turvin siirtyä tulevaisuudessa akkujen kehitystyön pariin työelämässä. Näin saataisiin hyvää kokemusta jo nuorella iällä työmarkkinoille, minkä seurauksena voi syntyä uusia entistä parempia akkuja. On myös mahdollista, että syntyy täysin uusia innovaatioita ja yrityksiä uusien lähestymiskulmien myötä, kun saadaan laajemmin kiinnostuneita osallistumaan laboratorion ylläpitoon, aivan kuten muutkin Metropolia AMK:n vetämät projektit ovat keränneet osallistuvia ihmisiä mukaansa. Heistäkin osa on saanut projektien kautta työtarjouksia oppilaitoksen ulkopuolelta.

Metropolialle tulevat suorat hyödyt olisivat testauksista saatavat maksut, joita asiakkaat maksaisivat akkujen testaamisesta. Ammattikorkeakoululla on jo valmiiksi asiakaskuntaa muiden projektien ja töiden osalta, joten siitä olisi hyvä laajentaa akkujen testaukseen, sillä akkujen testaaminen tulee lähes varmasti lisääntymään tulevaisuudessa litiumakkujen yleistyessä entisestään. Jo nyt litiumakkuja käytetään runsaasti, mutta tulevaisuudessa niitä tullaan käyttämään varmasti entistä enemmän EV- ja PHEV-sovelluksissa sekä esimerkiksi sähköavusteisissa polkupyörissä. Viimeksi mainittujen myynti on kasvanut tasaisesti useamman vuoden ajan, ja on ennustettavaa, että myynti jatkaa kasvuaan, mikäli tarkastellaan Keski-Eurooppaa (Kauppiat povaavat sähköpyörän läpilyöntiä 2016). Esimerkiksi Keski-Euroopassa sähköavusteiset pyörät ovat jo todella suosittuja, ja nykyään lähes kaikissa näissä on litiumpohjainen akku. On oletettavaa, että moni laite jatkaa toimintaansa vielä akun eliniän jälkeen, eli on olemassa mahdollisuus, että osa käyttäjistä haluaa jonkin muun valmistajan kennoja kuin alkuperäisiä, mikäli on saatavilla alkuperäistä parempaa suorituskykyä. Näin ollen Metropolian tekemät standardien mukaiset testit olisivat akkuvalmistajille oivallinen keino mainostaa tuotteitaan, ja mitä enemmän kennoja kehitetään, sitä enemmän niitä tulee testata. Moni valmistaja halunnee varmasti standardien mukaiset riippumattomat testit, joka olisivat Metropolialle mahdollisesti kannattava markkinarako.

Tämän työn tärkein tehtävä on selvittää tulevia insinööritöitä tekeville, millainen kokonaisuus on kyseessä akkujen testauslaboratorion suhteen. Tältä osin työssä on onnistuttu hyvin, ja siitä on myös toivottavasti hyötyä tulevia töitä tekeville.

Lähteet

All About Batteries, Part 12: Lithium-titanate (LTO). 2015. Verkkodokumentti. EE Times.

<http://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1325358>. Luettu 14.9.2016.

Awesome Batteries Part 2 – Inspecting the Samsung 25R. 2015. Verkkodokumentti. Batterybro.

<<https://batterybro.com/blogs/18650-wholesale-battery-reviews/18637163-awesome-batteries-part-2-inspecting-the-samsung-25r>>. Luettu 3.10.2016.

Cathode. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia.

<<https://en.wikipedia.org/wiki/Cathode>>. Luettu 9.9.2016.

Charging Lithium-ion. 2016. Verkkodokumentti. Battery University.

<http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries>. Luettu 21.9.2016.

Datasheet-LY-LFP-72. 2016. Verkkodokumentti. GWL Power.

<https://files.i4wifi.cz/inc/_doc/attach/Stoltem/4490/Datasheet-LY-LFP-72Ah.pdf>. Tulostettu 29.9.2016.

GWL/Power Lithium Iron LiFePO4- Battery Cell - LFP 3.2V 72AH. 2016.

Verkkodokumentti. EV-Power.

<<https://www.ev-power.eu/LiFePO4-special-cells/Lithium-Iron-LiFePO4-Battery-Cell-LFP-3-2V-72AH.html?cur=1>>. Tulostettu 29.9.2016.

Haikonen, Markku. 2016. Akkukennojen ja akkujen palotutkimus – kooste akkujen palokokeista Kuopion Pelastusopiston harjoitusalueella 7.6.2016. Verkkodokumentti. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

<http://sppl.fi/files/3162/Kooste_akkupalokokeista.pdf>. Luettu 7.10.2016.

How Lithium-ion Batteries Work. 2006. Verkkodokumentti. How stuff works.

<<http://electronics.howstuffworks.com/everyday-tech/lithium-ion-battery1.htm>>. Luettu 9.9.2016.

Insinöörien keskipalkka laski – eniten merkitsee työuran alku. 2016. Verkkodokumentti. Tivi.

<http://www.tivi.fi/Kaikki_uutiset/insinoorien-keskipalkka-laski-eniten-merkitsee-tyouran-alku-6244618>. Luettu 19.10.2016

ISO 12405-1:2011. Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems - Part 1: High-power applications.

ISO 12405-2:2012. Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems - Part 2: High-energy applications.

ISO 12405-3:2014. Electrically propelled road vehicles - Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems - Part 3: Safety performance requirements.

Kauppiaat povaavat sähköpyörän läpilyöntiä – mitä ne maksavat ja mistä kannattaa maksaa? 2016. Verkkodokumentti. Helsingin Sanomat.
<<http://www.hs.fi/talous/a1460350122254>>. Luettu 30.9.2016.

Lattiavaaka. 2016. Verkkodokumentti. Teollisuusvaaka.
<<http://www.teollisuusvaaka.fi/tuotteet/lattiavaaka/>>. Luettu 19.10.2016.

Lithium-ion batteries. 2016. Verkkodokumentti. Physics Central.
<<http://www.physicscentral.com/explore/action/lithium.cfm>>. Luettu 9.9.2016.

Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information. 2013. Verkkodokumentti.
<<https://cdn.shopify.com/s/files/1/0674/3651/files/VTC5.pdf?740>>. Luettu 2.11. 2016.

Lithium iron phosphate battery. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_iron_phosphate_battery>. Luettu 5.9.2016.

Lithium polymer battery. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium_polymer_battery>. Luettu 14.9.2016.

Lithium-titanate battery. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-titanate_battery>. Luettu 14.9.2016.

Lithium Titanate (LTO) Cells – Technical Advantages. 2016. Verkkodokumentti. GWL Power.
<<https://www.ev-power.eu/LTO-Tech/>>. Luettu 1.11.2016.

LTO Battery Specification. 2013. Verkkodokumentti. Batteryspace.
<<http://www.batteryspace.com/prod-specs/7471.pdf>>. Luettu 2.11.2016.

Metallien ominaisuuksia. 2016. Verkkodokumentti.
<http://www.kolumbus.fi/wiiklund/metallien_tyypit.htm>. Luettu 19.10.2016.

Panasonic 3400mAh 18650 Li-ion 3.7v Battery NCR18650B Flat Top – Case Included. 2016. Verkkodokumentti. Orbtronic.
<<http://www.orbtronic.com/batteries-chargers/panasonic-3400mah-18650-li-ion-battery-cell-ncr18650b>>. Luettu 2.11.2016.

Pics/info: Inside the battery pack. 2015. Verkkodokumentti. Tesla Motors Club forum.
<<https://teslamotorsclub.com/tmc/threads/pics-info-inside-the-battery-pack.34934/>>. Luettu 27.9.2016.

Prismatic cells New Xalt energy 75 Ah HP. 2016. Verkkodokumentti. DIY Electric Car forum.
<<http://www.diyelectriccar.com/forums/showthread.php/prismatic-cells-new-xalt-energy-75ah-169985.html>>. Luettu 29.9.2016.

Pussi rakenteen kuva. Kuva 3. 2016. Verkkodokumentti. ECS, Journal of The Electrochemical Society.
<<http://jes.ecsdl.org/content/161/14/A1953/F1.large.jpg>>.
<<http://jes.ecsdl.org/content/161/14/A1953/F1.expansion.html>>.

Pöytävaaka. 2016. Verkkodokumentti. Teollisuusvaaka.
<<http://www.teollisuusvaaka.fi/tuotteet/poytavaaka/>>. Luettu 19.10.2016.

Sanyo Lithium Ion Battery Specifications. 2012. Verkkodokumentti.
<https://cdn.shopify.com/s/files/1/0674/3651/files/Panasonic_NCR18650B.pdf?841>. Luettu 2.11.2016.

Sony US18650VTC3. 2016. Verkkodokumentti.
<https://cdn.shopify.com/s/files/1/0674/3651/files/Sony_VTC3.pdf?840>. Luettu 2.11.2016.

Specification Approval Sheet (IFR18650EC-1.5Ah). 2012. Verkkodokumentti. Batteryspace.
<<http://www.batteryspace.com/prod-specs/919-LFP-18650-1500.pdf>>. Luettu 2.11.2016.

Specification of product for Lithium-ion Rechargeable Cell. 2012. Verkkodokumentti.
<https://cdn.shopify.com/s/files/1/0674/3651/files/Samsung_ICR18650-26H.pdf?834>. Luettu 2.11.2016.

Sähköpäteys 3. 2016. Verkkodokumentti. Seti.
<<http://www.seti.fi/index.php?k=19013>>. Luettu 30.9.2016.

Sähköturvallisuustutkinto 3. 2016. Verkkodokumentti. AEL.
<<https://www.ael.fi/koulutustarjonta/sahkoturvallisuustutkinto-3>>. Luettu 19.10.2016.

Tesla is secretly adding over 50 hp to the Model S P90D Ludicrous based on 3rd party testing, what does it mean? 2016. Verkkodokumentti. Electrek.
<<https://electrek.co/2016/06/20/tesla-model-s-p90d-ludicrous-power-output-horsepower/>>. Luettu 19.10.2016.

Tesla Model S. 2016. Verkkodokumentti. Wikipedia.
<https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S#Battery>. Luettu 20.9.2016.

The Current Condition and Future Potential of Automotive Batteries – Tech Dept. 2011. Verkkodokumentti. Auvac – Autonomous Undersea Vehicle Applications Center.
<<http://auvac.org/newsitems/view/1082>>. Luettu 12.9.2016.

Types of Battery Cells. 2016. Verkkodokumentti. Battery University.
<http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells>. Luettu 5.9.2016.

Types of Lithium-ion. 2016. Verkkodokumentti. Battery University.
<http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>. Luettu 5.9.2016.

You've been charging your smartphone wrong. 2015. Verkkodokumentti. Techinsider.
<<http://www.techinsider.io/the-best-way-to-charge-your-phone-2015-9>>. Luettu 21.9.2016.

What is C-rate? 2016. Verkkodokumentti. Battery University.
<http://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate>. Luettu 5.9.2016.

Litiumrautafoosfaatti kennon LY-LFP-72AH datasheet



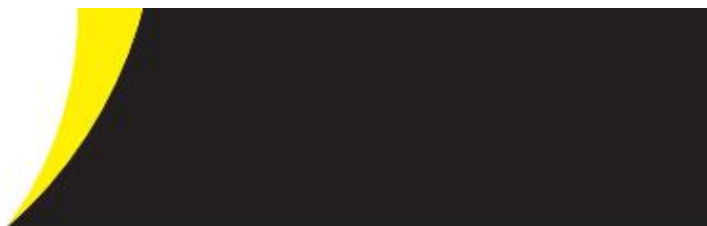
www.ev-power.eu
Your complete power solutions.

Technical specification

LY-LFP-72AH



www.ev-power.eu



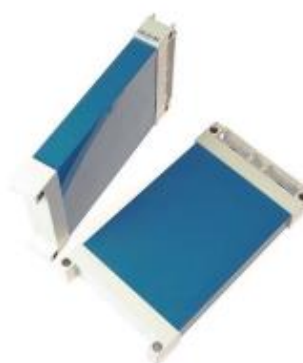
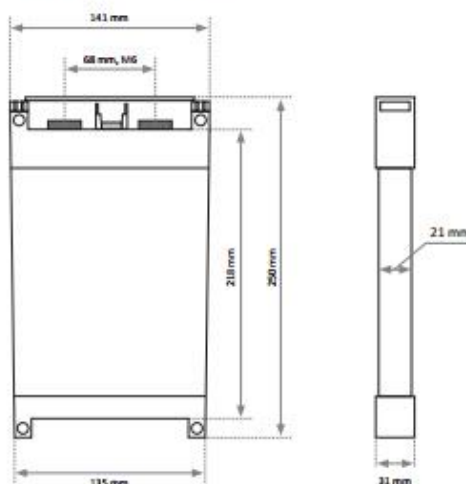
The technical specification of the LY-LFP-72AH cell

THE ADVANTAGES OF THE LY-LFP-72AH CELLS

The LY-LFP-72AH prismatic cell providing high continuous discharging current up to 5C with excellent life performance special designed for EV applications and useful for energy storages.

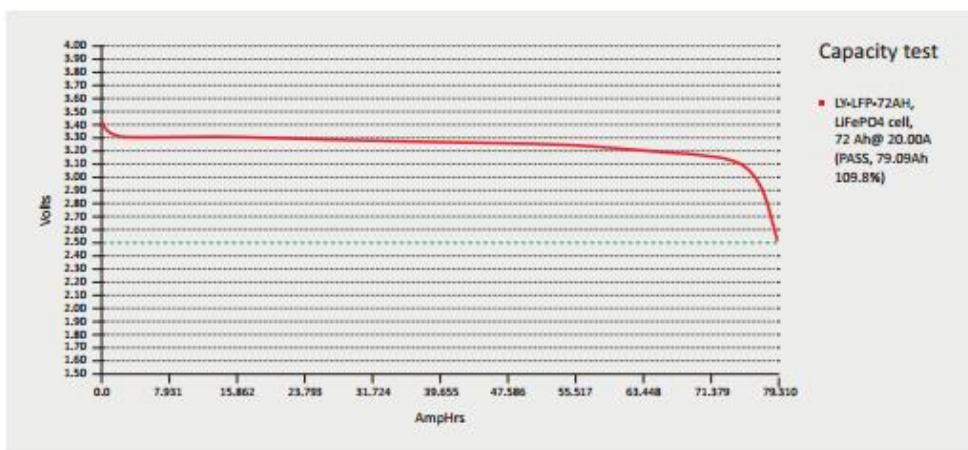
Model name	LY-LFP-72AH
Nominal voltage (V)	3.20 V
Nominal capacity (Ah)	72 Ah (@0.33C, 25°C)
Rated charge voltage (V)	3.65 V
Maximal voltage (V)	3.80 V
Discharge voltage (V)	2.80 V
Minimal voltage (V)	2.50 V
Rated discharge current 0.33C (Amp)	24 A
Maximal continuous discharge current 5C (Amp)	360 A
Rated charge current 0.3C (Amp)	24 A
Maximal charge current 3C (Amp)	216 A
Internal resistance (mOhm)	< 1.5 mOhm
Cycle life (at 0,33C, 20°C)	5000 cycles at 80% DoD up to 80% residual capacity
Self discharge rate (% per month)	< 3%
Operating temperature (charging)	0 to 50 °C (at 0.33C or less)
Operating temperature (discharging)	-20 to 55 °C (at 0.33C or less)
Dimensions width x length x height (mm)	135 x 30 x 220 mm
Weight (tolerance +/- 30g)	1.75 kg

Dimensions: 135 x 30 x 220 mm





Operation test data for the LY-LFP-72AH cell



GWL Power Ltd., Průmyslová 11, 102 19 Prague 10, Czech Republic, European Union

www.ev-power.eu

LY-LFP-71AH kennon valmistajan ilmoittama kapasiteettitesti

