



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

**LITIUM-POLYMEERI- JA LITIUM-
RAUTAFOSFAATTIAKKUJEN KÄYTTÖ
KANNETTAVASSA AUDIOLAITTEESSA**
**Lithium-polymer and lithium iron phosphate batteries in
a portable audio device**

Juho Matikainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Juho Matikainen

Litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakkujen käyttö kannettavassa audiolaitteessa

2014

Kandidaatintyö.
34 s.

Tarkastaja: DI Joonas Talvitie

Akkuteknologia on kehittynyt viime vuosina erityyppisten litium-ioniakkujen hallitessa markkinoita. Uutta teknologiaa kaupallisissa litium-pohjaisissa akuissa edustavat litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakut. Työn tarkoituksena oli selvittää soveltuvatko litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakut kannettavaan audiolaitteeseen ja verrata näitä Ni-Cd- ja Ni-Mh-akkuihin sekä LiCoO₂- ja LiMnO₄-kemian litium-ioniakkuihin. Kyseisten akkutyypin soveltuvuutta kannettavaan audiolaitteeseen ei kirjallisuudessa ole juuri tutkittu. Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena.

Akun tärkeimmiksi kriteereiksi valikoituivat:

1. Alhainen massa ja pieni koko laitteen riittävän liikuteltavuuden takaamiseksi.
2. Riittävä virranantokyky ja jännite, jotta haluttu audioteho voidaan saavuttaa.
3. Riittävä kapasiteetti, jotta haluttu soittoaika saavutetaan.

Litium-polymeeriakkuja voidaan pitää soveltuvina kannettavaan audiolaitteeseen NiCd- ja Ni-Mh-akkuja korkeamman energiatiheyden ja ominaisenergian takia. Lisäksi kiinteä polymeerielektrolyytti mahdollistaa ns. pussikenojen käytön, jotka omaavat tyypillisimpiä kennotyyppejä paremman pakkaustiheyden ja alhaisemman massan. Ongelmana kyseisellä kennotyypillä on kuitenkin sen herkkyys fyysiselle vahingolle ja mahdollisuus paisua käytössä vapautuvien kaasujen takia. Litium-polymeeriakut tarvitsevat lisäksi litium-ioniakkujen tapaan suojauspiirin, ja oikeanlaisen latausmenetelmän omaavan laturin, johtuen akkumateriaalien kemiallisesta epävakaudesta.

Litium-rautafosfaattiakkujen suurimpina etuina on muita litium-ionikemioita sekä Ni-Cd- ja Ni-Mh-akkuja korkeampi latauspurkusyklien määrä. Lisäksi litium-rautafosfaattiakut ovat kemiallisesti vakaampia verrattuna muihin litium-ionikemioihin. Heikkoutena litium-rautafosfaattiakuilla on alhaisempi energiatiheys ja ominaisenergia verrattuna muihin litium-ionikemioihin. Ni-Cd- ja Ni-Mh-akkuihin verrattuna ominaisenergia on kuitenkin n. 2-kertainen. Litium-rautafosfaattiakku voidaan myös valmistaa polymeerityyppiseksi, jolloin pussikenojen kevyempi rakenne alentaa akun massaa. Osalla litium-rautafosfaattikennoista on myös huomattavan korkeat latausvirrat, mikä mahdollistaa akun pikalataamisen. Litium-rautafosfaattiakut vaativat muidenkin litium-ioniakkujen tapaan suojauspiirin ja soveltuvan laturin. Litium-rautafosfaattiakkuja voidaan pitää soveltuvina kannettavaan audiolaitteeseen erityisesti vakaan kemiansa puolesta, vaikkakaan ne eivät ole optimaalisin vaihtoehto massansa ja tilavuutensa suhteen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Electrical Engineering

Juho Matikainen

Lithium-polymer and lithium iron phosphate batteries in a portable audio device

2014

Bachelor's Thesis.

34 p.

Examiner: M.Sc. (Tech) Joonas Talvitie

Battery technology has advanced in the past years and different types of lithium-ion batteries have dominated the market. Two new battery types in the commercial sector are lithium-polymer and lithium iron phosphate batteries. The purpose of this work was to study the use of lithium-polymer and lithium iron phosphate batteries in a portable audio device and also to compare these batteries to NiCd and NiMh batteries and to lithium-ion batteries of LiCoO_2 and LiMnO_4 chemistries. Not much previous study exists of the use of lithium-polymer and lithium iron phosphate batteries in a portable audio device. The work was done as a literature study.

The main criteria for choosing the battery were:

1. Small size and weight for moveability.
2. Sufficient discharge current and voltage for achieving the wanted audio power.
3. Sufficient capacity for achieving the wanted operating time.

Lithium-polymer batteries can be considered applicable for a portable audio device due to the higher volumetric and gravimetric energy density compared to NiCd and NiMh batteries. In addition because of the use of a solid electrolyte so called pouch cells can be used, which are more lightweight and have a higher packing ratio compared to other cell types. The pouch cells are however vulnerable to physical damage and are prone to swelling when in use. Lithium polymer batteries also need a protection circuit and an applicable charger due to the chemical instability of the battery materials.

The main advantage of lithium iron phosphate batteries is the greater number of charge-discharge cycles compared to other lithium-ion chemistries and NiCd and NiMh batteries. In addition lithium iron phosphate batteries are chemically more stable compared to other lithium-ion chemistries. The main disadvantage is the lesser gravimetric and volumetric energy density compared to other lithium-ion chemistries. Although compared to NiCd and NiMh batteries the gravimetric energy density is approximately two times higher. Lithium-ironphosphate chemistry can also be used in a polymer battery and in this case the use of pouch cells lowers the weight of the battery. Some lithium-ironphosphate also have very high charge currents, which enables fast charging of the battery. Lithium-ironphosphate batteries also require a protection circuit and an applicable charger. Lithium-ironphosphate batteries can be considered applicable for a portable audio device especially due to their stable chemistry, though they are not the most optimal choice in terms of weight and size.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	5
1. Johdanto	6
2. Akun toimintaperiaate.....	7
3. Akkujen kennotyypit	8
3.1 Sylinterikenno.....	9
3.2 Suorakulmainen kenno	9
3.3 Pussikenno.....	10
4. Akkujen ominaisuudet	11
4.1 Kapasiteetti	12
4.2 Lataus- ja purkuvirta sekä C-arvot	14
4.3 Ominaisenergia, energiatiheys ja ominaisteho.....	14
4.4 Käyttöikä ja latauspurku -syklit.....	14
5. Litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakut	15
5.1 Litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakkujen kemia ja rakenne	17
5.2 Ominaisuudet.....	17
5.3 Li-ioni- ja litium-polymeeriakkujen turvallisuus	22
5.4 Akkujen suojaus	24
5.5 Akkujen lataus.....	25
6. Esimerkki sovelluskohteesta: kannettava audiolaitte ”porsas”	27
6.1 Laitteen asettamat vaatimukset akulle	27
6.2 Sopivien kennojen vertailu	27
6.3 Akun valinta ”porsaaseen”	29
7. Johtopäätökset.....	30
LÄHTEET	32

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

C	C-arvo, akun kapasiteetin kerrannainen
EDV	End of discharge voltage, kennon alarajajännite
LiFePO ₄	Litium-rautafosfaatti
LiPo	Litium-polymeeri
Ni-Cd, NiCd	Nikkeli-cadmium
Ni-Mh, NiMh	Nikkeli-metallihydridi
<i>I</i>	akun purkuvirta
<i>C</i>	akun kapasiteetti
<i>T</i>	akun purkautumisaika
<i>C_p</i>	Peukertin lain akun kapasiteetti 1 A:n purkuvirralla
<i>k</i>	Peukertin lain akkukohtainen vakio
<i>C₂₀, C₁₀, C₅</i>	akun kapasiteetti 20, 10 ja 5 tunnin purkautumisajoilla

1. JOHDANTO

Akkuteknologia on ollut viime vuosina jatkuvassa kehityksessä. Kehitystä kiihdyttävät kuluttujaelektroniikan kasvu ja erilaisten akkukäyttöisten työkalujen, kuten akkuporakoneiden ja naulaimien, lisääntyminen. Sähköautot, hybridityökoneet, hissit ja esimerkiksi nosturit ovat myös omalta osaltaan luoneet tarvetta uusilla entistä kehittyneemmille akkutyypeille. Haasteet akkujen kehityksessä liittyvät pääosin akkujen kemiaan, materiaalien kulumiseen ja saatavuuteen, käyttöikään, käyttölämpötiloihin, energian ja tehon tuottoon sekä kokonaiskustannuksiin. (Kularatna 2011) (Väyrynen & Salminen 2011)

Viime vuosina litiumioniakut ovat hallinneet uudelleenladattavien akkutyyppien markkinoita. Uutta teknologiaa kaupallisissa litium-pohjaisissa akuissa edustavat litium-polymeeri akut, jotka ovat saaneet jalansijaa monissa sovelluksissa korkean ominaisenergiansa ja muokattavuutensa ansiosta. Sovelluskohteita litium-polymeeriakuille ovat esimerkiksi sähköautot, sähköpolkupyörät, kannettavat tietokoneet ja matkapuhelimet. Toinen uusi, varsinkin sähköautoissa yleistynyt, litium-ioni akkutyyppi on litium-rautafosfaatti akku. Tämä akkutyyppi on saanut suosioita vaakan ja turvallisen kemiansa, sekä pitkän käyttöikänsä ansiosta. (Kularatna 2011) (Väyrynen & Salminen 2011) (Pruteanu et al. 2012)

Tämän työn tarkoituksena on tutkia litium-polymeeri ja litium-rautafosfaattiakkujen käyttöä kannettavan audiolaitteen energianlähteenä. Audiolaitte vaatii kannettavaksi laitteeksi huomattavaa kapasiteettia ja virranantokykyä akulta, jotta haluttu soittoaika sekä mahdollisesti korkeakin audioteho voidaan saavuttaa. Kyseisten akkutyyppien sopivuutta kannettaviin audiolaitteisiin ei ole kirjallisuudessa juuri tutkittu.

Esimerkki sovelluksena on käytetty Lappeenrannan teknillisen yliopiston Analogiasignaalin käsittely -kurssin harjoitustyönä rakennettua kannettavaa audiontoistolaitetta ”porsasta”, jonka huippuaudioteho on n. 40 W keskimääräistä tehoa. Kriteereinä akun valinnassa ovat:

1. keveys ja pieni koko
2. riittävä kapasiteetti
3. riittävä jännitetaso ja virranantokyky

Lisäksi työ vertailee litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakkuja muihin yleisiin uudeelleenladattaviin akkutyyppisiin. Työtä ohjaavana kysymyksenä on näiden akkutyypin sopivuus kannettavan audiolaitteen energianlähteeksi. Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena.

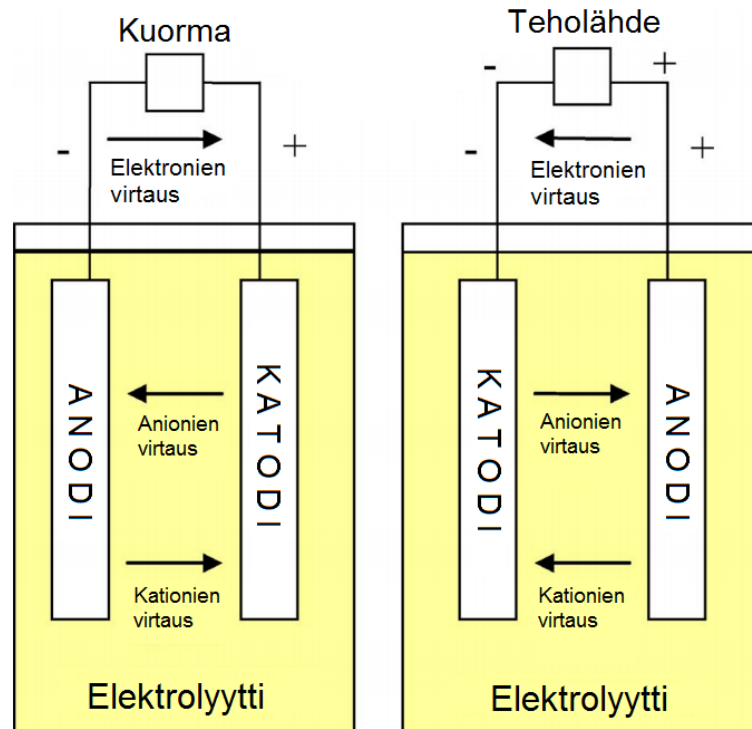
2. AKUN TOIMINTAPERIAATE

Akkuja käytetään sähkökemiallisina energiavarastoina. Akun tarkoituksena on muuntaa kemiallisissa reaktioissa tuotettu energia sähköenergiaksi (akun purkaminen) ja päinvastoin (akun lataus). Tämä tapahtuu akun kennon sisällä kahden elektrodin välillä, jotka on upotettu elektrolyyttiin. Reaktioissa elektronit siirtyvät akun elektrodien välillä akkuun kytketyn ulkoisen kuorman läpi. Akku voi koostua yhdestä tai useammasta kennosta, kytkettynä joko sarjaan tai rinnan. (Hadjipaschalis et al. 2009) Rinnan kytkentä kasvattaa akun kokonaiskapasiteettia ja sarjaan kytkentä puolestaan jännitettä.

Jokainen akun kenno koostuu neljästä peruskomponentista:

1. Anodi (negatiivinen elektrodi), joka luovuttaa elektroneja kuormaan ja hapettuu reaktiossa.
2. Katodi (positiivinen elektrodi), joka vastaanottaa elektroneja ja pelkistyy reaktiossa.
3. Elektrolyytti, joka toimii väliaineena elektronien liikkeelle anodin ja katodin välillä.
4. Anodin ja katodin välillä olevat erottimet, jotka estävät katodin ja anodin sähköisen kontaktin, mutta päästävät ionit (anionit ja kationit) kulkemaan lävitseen mahdollistaakseen virran kulun akussa. (Hadjipaschalis et al. 2009) (Arora & Zhang 2004)

Akun toimintaa on havainnollistettu sekä purkamisessa, että latauksessa kuvassa 2.1.



Kuva 2.1 Akun toimintaperiaatetta havainnollistava kuva (Hadjipaschalis et al. 2009). Akun purkaminen vasemmalla ja lataaminen oikealla. Kuvassa esiintyvät akun peruskomponentit lukuunottamatta erotinta. Erotin on kuvattu eri kennotyyppien kuvissa 3.1, 3.2 ja 3.3

Vasemman puoleinen osa esittää akun purkautumista. Tällöin anionit (negatiivisesti varatut ionit) liikkuvat katodilta anodille ja kationit (positiivisesti varatut ionit) puolestaan anodilta katodille. Oikeamman puoleinen osa esittää akun latausta. Tällöin akkuun on kytketty teholähde, jonka sähköenergia muunnetaan akun kemialliseksi energiaksi. Tässä reaktiossa elektronien liike on päinvastaista purkamiseen verrattuna.

3. AKKUJEN KENNOTYYPIT

Akkujen kennotyypit jaetaan pääsääntöisesti neljään kategoriaan:

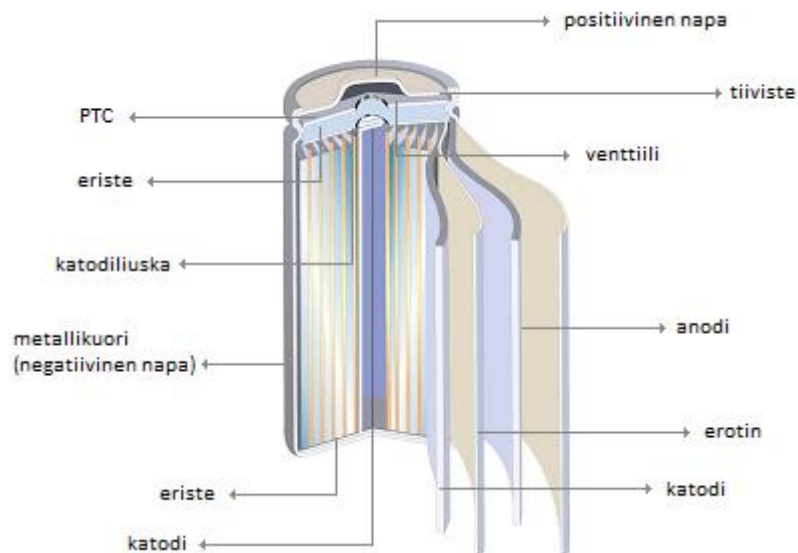
1. sylinterikennot (engl. cylindrical cell)
2. nappikennot (engl. button cell)
3. suorakulmaiset kennot (engl. prismatic cell)
4. pussikennot (engl. pouch cell)

Tässä luvussa käydään läpi nappikennoa lukuunottamatta kunkin kennotyypin edut ja heikkoudet. Nappikennoa ei käydä läpi, sillä se ei ole matalan kapasiteettinsa takia

soveltuva tässä työssä käytettävään sovellusesimerkkiin eli kannettavaan audiolaitteeseen.

3.1 Sylinterikkenno

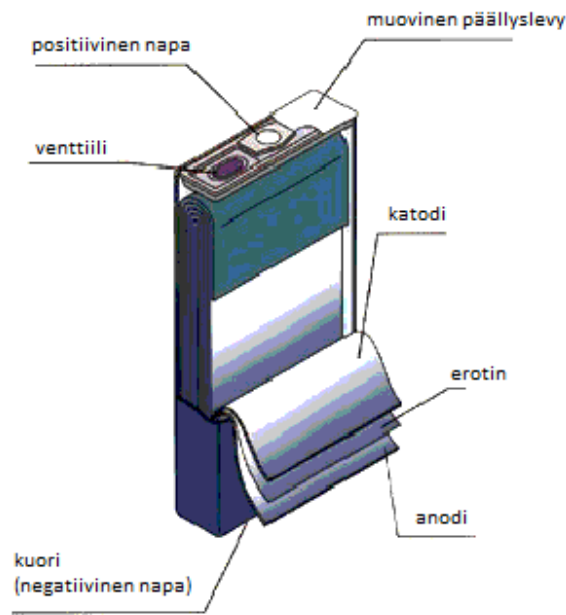
Sylinterikkenno on suosituimpia kennotyyppejä sekä ladattaville, että kertakäyttöisille akuille. Sen etuna on helppo valmistettavuus, kestävä fyysinen rakenne ja pitkä käyttöikä. Metallisen suojuorensa takia kenno kestää sisäistä painetta. Kenno on kuitenkin verrattain raskas ja sen pakkaustiheys on heikko. Sylinterikennoilla on useita ennalta määriteltyjä pakkauskojoja, yleisimpänä näistä 18650-kenno. Sylinterikennolla on käyttökohteita esimerkiksi työkaluissa, kannettavissa tietokoneissa ja sairaaloiden hoitolaitteistoissa. (Buchmann 2013b) Kuvassa 3.1 on esitetty poikkileikkaus sylinterikennosta.



Kuva 3.1. Poikkileikkaus sylinterikennosta. Huomataan, että kennon elektrodit on kierretty rullalle. (Electropaedia 2005b)

3.2 Suorakulmainen kenno

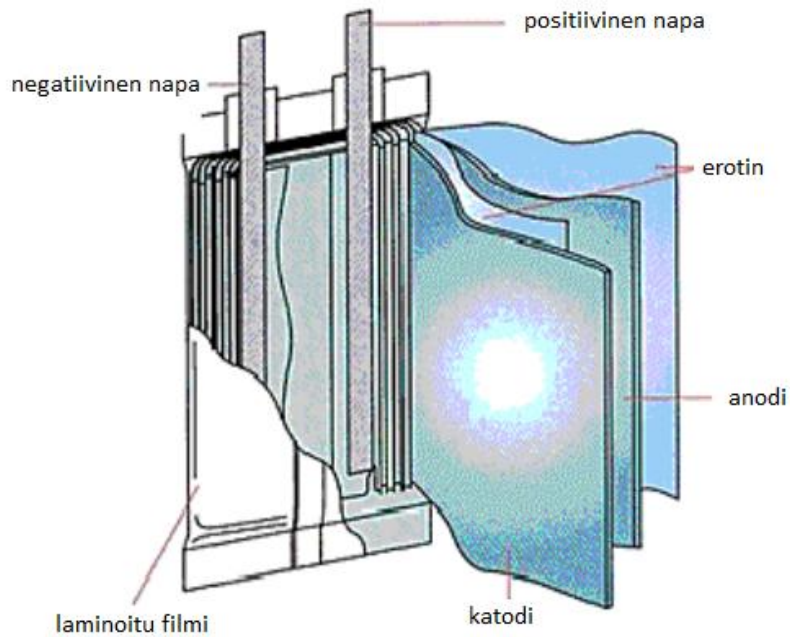
Suorakulmaisen kennon etuna on ohut profiili ja halpa valmistushinta. Suurin sovelluskohde tälle kennotyypille ovat matkapuhelimet. Suorakulmaisella kennolla saavutetaan parempi pakkaustiheys sylinterikennoon nähden. Sylinterikennoille ei ole universaaleja malleja, vaan jokainen valmistaja suunnittelee kennot omien vaatimustensa mukaan. Suorakulmaisia kennoja valmistetaan myös korkeammalle kapasiteetille ja näillä kennoilla on sovellutuksia esimerkiksi sähköautojen energiavarastona. (Buchmann 2013b) Poikkileikkaus suorakulmaisesta kennosta on esitetty kuvassa 3.2.



Kuva 3.2. Poikkileikkaus suorakulmaisesta kennosta. Kennon elektrodit on kierretty litteälle rullalle. (Electropaedia 2005b)

3.3 Pussikkenno

Pussikkenno on uusi kennotyyppi. Pussikkenno ei sisällä lainkaan metallista suojakotelointia vaan kennon elektrodit ja elektrolyytti on yleensä pinottu kerroksittain ja pakattu foliomaiseen pussiin. Pussikennoille ei ole suorakulmaisten kennojen tapaan ennalta määrättyjä kokoja. Pussikennoja käytetään yleensä kiinteän elektrolyytin omaavien akkujen kanssa, yleisimpänä litium-polymeeriakut. (Electropaedia 2005b) Tällä kennotyypillä saavutetaan korkein pakkaustiheys, n. 90-95 %. Metallisen suojakoteloinnin tarpeettomuus pienentää kennojen painoa, mutta kennot ovat herkkiä fyysiselle vahingolle. Lisäksi kennot voivat paisua käytössä niissä vapautuvien kaasujen takia. Kennojen ympärille olisi tästä syystä hyvä jättää vapaata tilaa käytettävässä laitteessa. Pussikennot ovat myös kustannustehokkaampia valmistuksen suhteen suorakulmisiin kennoihin ja sylinterikennoihin nähden. (Buchmann 2013b) (Electropaedia 2005b) Poikkileikkaus pussikennosta on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Pussikennon poikkileikkaus. Kyseisellä kennolla elektrodit on kierretty rullalle ja kennomateriaalit on suljettu foliomaiseen pussiin. Elektrodit voidaan myös pinota kerroksittain. (Nicklin & Belts 2008)

4. AKKUJEN OMINAISUUDET

Akkujen vertailua varten on tärkeää ymmärtää niiden perusominaisuudet, jotka määrittävät akun soveltuvuuden eri käyttökohteisiin. Akkuille on olemassa useita ominaisuuksia, joilla niiden toimintaa ja suorituskykyä voidaan mitata. Tässä luvussa keskitytään niihin akkujen ominaisuuksiin, jotka vaikuttavat suurimmilta osin kannettavan audiolaitteen suorituskykyyn. Kriteereinä audiolaitteelle on alhainen massa ja tilavuus, riittävä soittoaika ja haluttu audioteho. Lisäksi käydään lyhyesti läpi myös akun käyttöikään vaikuttavia termejä.

4.1 Kapasiteetti

Purkautuessaan akku tuottaa energiaa ja tämän energian määrää kuvataan akun kapasiteetilla. On tärkeää huomata, että akun kapasiteetti ei ole absoluuttinen arvo. Akun todellinen kapasiteetti riippuu aina olosuhteista, joissa se on määritetty. (Berdnt 1997)

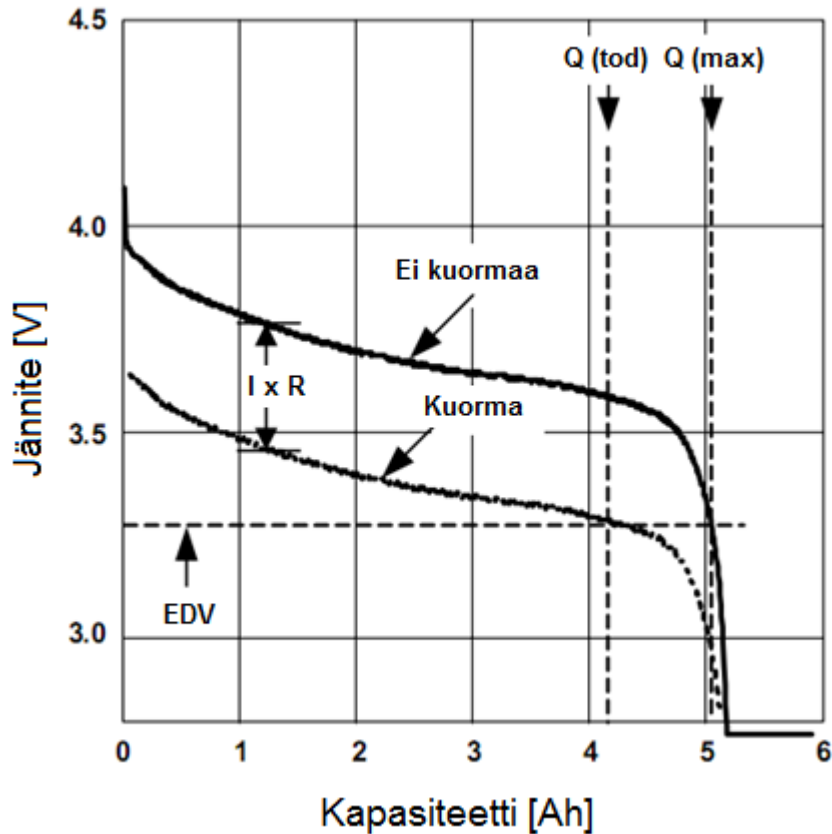
Yleisesti akun kapasiteetti esitetään ampeeritunteina (Ah) ja se voidaan laskea integroimalla akun purkuvirtaa ajan suhteen. Akulle, jonka purkuvirta on vakio, voidaan akun purkautumisaikaa kuvata yhtälöllä

$$T = \frac{C}{I}, \quad (4.1)$$

missä T on akun purkautumisajan pituus tunteina, C on akun käytettävissä oleva kapasiteetti ja I akun purkuvirta. (Berdnt 1997)

Akun käytettävissä oleva kapasiteetti riippuu akun jännitteestä. Kun akku purkautuu, sen napajännite laskee vähitellen ja saavuttaa vähimmäisjännitteen, jolla akun purkamisen jatkaminen vahingoittaisi akkua. Tätä jännitetasoa kutsutaan lyhenteellä EDV (engl. end of discharge voltage). (Barsukov 2006)

Lisäksi akun jännite ei riipu ainoastaan sen varauksen tasosta, vaan siihen vaikuttaa myös akun purkuvirta. Tämä johtuu jännitteenalenemasta, joka on seurausta akun sisäresistanssista. Jännitteenalenema on suurempi korkeilla virroilla ja matalissa lämpötiloissa. Jännitteenalenema laskee suoraan akun käytettävissä olevaa kapasiteettia, sillä sen seurauksena akku saavuttaa EDV-jännitteen nopeammin. (Barsukov 2006) Esimerkki sisäresistanssin vaikutuksesta akun kapasiteettiin on esitetty kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Akun jännite kapasiteetin funktiona kuormituksessa ja ilman. Kuorma aiheuttaa akkuun sisäresistanssista R johtuvan jännitteen aleneman, ja akku saavuttaa EDV-jännitteensä nopeammin vähentäen käytettävissä olevaa kapasiteettia (Q_{tod} vrt. Q_{max}). (Barsukov 2006)

Yleensä valmistajat määrittävät akun nimelliskapasiteetin purkamalla akkua tietyllä vakiovirralla huoneenlämpötilassa, kunnes akku saavuttaa EDV-jännitteen. Akulle voidaan ilmoittaa useita kapasiteetteja eri purkautumisajoilla, esimerkiksi C_{20} , C_{10} ja C_5 . Alaindeksi kertoo akun purkamisajan tunteina. (Berdnt 1997) (MIT 2008)

Käytännössä akun kapasiteetti ei siis pysy vakiona purkuvirran kasvaessa. Hieman tarkempi malli akun purkuajan pituudelle saadaan ns. Peukertin lailla.

$$T = \frac{C_p}{I^k}, \quad (4.2)$$

missä C_p on akun kapasiteetti 1 A:n purkuvirralla, I on akun purkuvirta ampeereina ja k on akkukohtainen vakio. Esimerkiksi lyijyakulla k on n. 1,3, kun taas litium-ioniakuilla se on lähempänä yhtä. (Oswal et al. 2010)

Akun lopullinen käytettävissä oleva kapasiteetti on siis suurimmaksi osin purkuvirrasta riippuva ja täten aina sovelluskohtainen. Arvioidessa laitteen käyttöaikaa eri akuilla voidaan käyttää apuna myös valmistajien ilmoittamia purkuvirran kuvaajia eri kuormilla tai suorittaa akulle purkukoe.

4.2 Lataus- ja purkuvirta sekä C-arvot

Akkujen tapauksessa purkuvirta ilmoitetaan yleensä niin sanottuna C-arvona. C-arvo kertoo akun purkuvirran suuruuden suhteessa sen maksimikapasiteettiin. Esimerkiksi purkamalla akkua 1 C:n viralla akku purkautuu täysin tunnin kuluessa. Akulle, jonka kapasiteetti on 100 Ah, tämä tarkoittaa 100 A:n suuruisia purkuvirtaa. 5 C:n arvo vastaa tälle akulle 500 A:n purkuvirtaa ja C/2 puolestaan 50 A:n purkuvirtaa. (MIT 2008) Purkuvirroille ilmoitetaan yleensä suurin jatkuva-aikainen arvo ja hetkellinen, esimerkiksi 10 sekunnin mittainen, arvo. Myös akulle suositellut latausvirrat ilmoitetaan usein C-arvoina.

Purkuvirta on tärkeä parametri akun valinnassa, sillä akun täytyy pystyä syöttämään sovelluksen vaatima keskimääräinen teho. Lisäksi täytyy ottaa huomioon, että sovellus voi hetkellisesti vaatia korkeita tehopiikkejä.

4.3 Ominaisenergia, energiatiheys ja ominaisteho

Ominaisenergia kuvaa akun sisältämää energiaa akun painon suhteen ja se ilmoitetaan yksikössä Wh/kg. Energiateiheys puolestaan kuvaa akun energiaa sen tilavuuden suhteen ja se ilmoitetaan yksikössä Wh/l. Akun ominaisteholla voidaan kuvata akusta saatavaa tehoa sen painon suhteen. Ominaisesti ilmoitetaan yksikössä W/kg. Akut optimoidaan usein joko energian tai tehon suhteen. Nämä ominaisuudet ovat kuitenkin toisensa poissulkevia. Korkean ominaisenergian akku ei voi omata korkeaa ominaistehoa. (MIT 2008)

4.4 Käyttöikä ja latauspurku -syklit

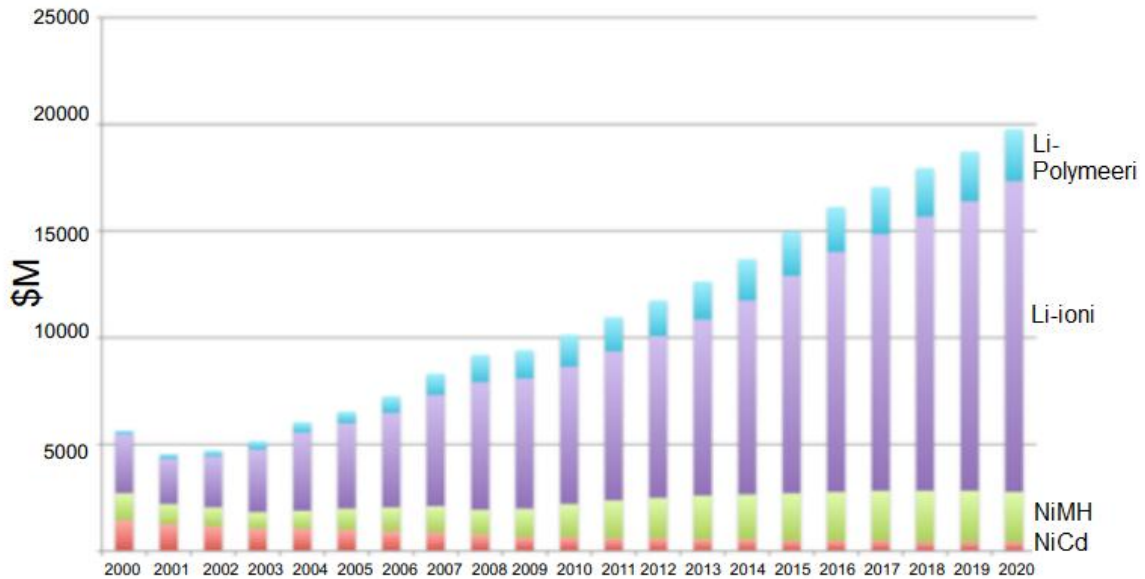
Akku ei säilytä ominaisuuksiaan ikuisesti, vaan sen suorituskyky heikkenee vanhetessa. Merkittävämmät muutokset ovat akun kapasiteetin lasku ja sisäresistanssin kasvu. Akku menettää kapasiteettia vanhetessaan johtuen muutoksista sen kemiallisessa rakenteessa. Kapasiteetin lasku voi olla seurausta esimerkiksi akun uudelleenladattavan materiaalin kristallirakenteen muutoksista. Akkumateriaalin partikkelit voivat myös rikkoutua ja irrota, jolloin ne eivät voi enää osallistua energian varastointiin. On olemassa myös useita muita kemiallisia mekanismeja, jotka vähentävät akun varausta sisältävän materiaalin määrää.

Korkeampi sisäresistanssi saa aikaan suuremman jännitteenaleneman akussa, jolloin akun kennot saavuttavat EDV-jännitteensä nopeammin. Tämä ongelma on suurempi akuilla, joita puretaan korkeilla virroilla. Pienillä purkuvirroilla jännitteenaleneman vaikutus käytettävissä olevaan kapasiteettiin ei ole yhtä merkittävä. (Barsukov 2008)

Akun käyttöikää voi arvioida sille ilmoitettujen latauspurku -sykliä avulla. Lataus-purku -syklit kertovat kuinka monta kertaa akku voidaan ladata ja purkaa kunnes sen kapasiteetti laskee 80 %:iin alkuperäisestä nimellisarvosta. Sykliä määrä määritetään aina tietyissä lataus- ja purkuolosuhteissa. Akun todellinen syklien määrä riippuu siitä, kuinka tyhjäksi asti akku puretaan. Syvämpi purkaminen vähentää latauspurku -sykliä määrää. Akun purun syvyyttä voidaan kuvata ns. DOD-arvolla (engl. depth of discharge). Tämä arvo kertoo akun puretun kapasiteetin suhteen maksimikapasiteettiin prosentteina. Sykliä määrään vaikuttavia tekijöitä ovat myös lämpötila ja kosteus. Lisäksi on syytä huomata, että akun suorituskyky heikkenee myös säilytyksessä ja täten syklien määrä ei anna oikeaa kuvaa akun käyttöikästä, mikäli akku ole käytössä jatkuva-aikaisesti. (MIT 2008) (Electropaedia 2005c) (Barsukov 2006)

5. LITIUM-POLYMEERI- JA LITIUM-RAUTAFOSFAATTIAKUT

Litium on kevein metalli ja omaa korkeimman sähkökemiallisen potentiaalin. Tästä syystä se on erinomainen raaka-aine akulle. Litiumakkujen kehitys alkoi jo vuonna 1912, mutta ensimmäiset ei-ladattavat akut tulivat kaupallisiksi vasta 1970-luvun alkupuolella. 1980-luvulla pyrittiin kehittämään uudelleen ladattavia litiumakkuja, mutta tässä ei onnistuttu anodimateriaalina käytetyn metallisen litiumin epävakauden takia. Tästä syystä tutkimus siirtyi litium-ionien käyttöön. Sony kaupallisti vuonna 1991 ensimmäisen litium-ioniakun ja nykyään litium-ioniakut ovat nopeimmin kasvava akkutyyppe markkinoilla. (Buchmann 2013d) Kuvassa 5.1 on esitetty uudelleenladattavien akkutyyppe markkinaosuuksia.



Kuva 5.1. Uudelleenladattavien akkutyypin markkinaosuuksia maailmanlaajuisesti. Huomataan litiumioniakkujen hallitsevan markkinoita. Myös litium-polymeeriakkujen osuuden on arvioitu kasvavan tulevaisuudessa hieman. Kuvaaja on vuodelta 2011. (Jones 2011)

Kuvasta huomataan, että litiumioniakut hallitsevat markkinoita melko ylivoimaisesti.

Kuitenkin viime vuosina uudemmat litium-polymeeriakut (lyh. LiPo, Li-Po, Li-Poly) ovat myös yleistyneet jonkin verran. Alkuperäinen idea polymeeriakusta syntyi jo 1970-luvulla. LiPo-akut saivat kaupallista näkyvyyttä kuitenkin vasta 2000-luvun alkupuolella. LiPo-akut ovat suosittuja etenkin radio-ohjattavien lennokkien tehonlähteenä. Toinen yleistynyt akkutyypin on litium-rautafosfaattiakku (lyh. LiFePO₄, LiFePO, LFP). Tämä akkukemia sai syntynsä Teksasin yliopistossa vuonna 1996. Kehitys kaupalliseksi tuotteeksi alkoi vuonna 1997. Tämä akkutyypin on yleistynyt etenkin sähköautoissa vakaan kemiansa takia. (Buchmann 2013a) (Buchmann 2013e) (Värynen & Salminen 2011)

Seuraavissa kappaleissa on tarkoitus käydä läpi tarkemmin litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakkuja ja niiden etuja sekä heikkouksia. Lisäksi käydään läpi myös näiden akkutyypin turvallisuuteen ja käyttöön liittyviä seikkoja.

5.1 Litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakkujen kemia ja rakenne

Litium-polymeeriakku ei poikkea kemialtaan tavallisista litium-ioni akuista. Yleisesti sen katodi materiaaleina käytetään joko litium-koboltti-, litium-mangaani- tai litium-nikkelioksidia. Polymeeriakkujen katodina voidaan käyttää myös litium-rautafosfaattia. Anodi koostuu yleensä litiumilla ionisoidusta hiilestä tai metallisesta litiumista. Suurin ero litiumioniakkuihin on se, että LiPo-akku käyttää elektrolyyttinä ioneja johtavaa kiinteää polymeeriä nestemäisen elektrolyytin sijaan. Tämä poistaa elektrolyytin vuodon mahdollisuuden kennon vahingoittuessa. Polymeerielektrolyytti on kuitenkin heikosti johtavaa, mikä aiheuttaa kennoille korkean sisäresistanssin. Ongelmaa voidaan lievittää kuumentamalla kennoa, mutta käytännön sovelluksissa se ei ole järkevää. Edellä mainitusta syystä osa valmistajista lisää kennoihin geelimäistä elektrolyyttiä johtavuuden parantamiseksi. (Buchmann 2013a) (Electropaedia 2005a)

Koska LiPo-akut eivät sisällä nestemäistä elektrolyyttiä ne eivät tarvitse tyyppillisimpien akkujen tavoin metallista suojakoteloitinta. Täten kennot voidaan valmistaa tasaisiksi levyiksi, suorakulmaiksi pakkauksiksi tai käytännössä mihin tahansa muotoon. Tämä on yksi LiPo-akkujen suurimpia etuja muihin akkutyyppeihin nähden, sillä se mahdollistaa akkujen sijoittamisen eri kokoihin ja muotoisiin tiloihin. Tällöin kennot voidaan myös pakata tiiviisti ja akusta saadaan kevyt ja vähän tilaa vievä. LiPo-akkujen kennot ovat lähes aina pussikennoja. (Electropaedia 2005a)

LiFePO₄-akku poikkeaa kemialliselta koostumukseltaan muista litium-ioni akuista, sillä se käyttää katodinaan litium-rautafosfaatti -yhdistettä yleisempien litium-cobaltin ja litium-mangaanin sijaan. Litium-rautafosfaattiakku voi olla tyyppiltään litium-ioniakku tai litium-polymeeriakku riippuen käytetystä elektrolyytistä. Fosfaattiin perustavan katodin takia LiFePO₄-akut eivät syty tuleen vikatilanteessa ja ovat vakaampia altistuessaan yllätaukselle ja ylipurkamiselle. Lisäksi akut kestävät paremmin korkeita lämpötiloja ja ovat vastustuskykyisiä lämpökarkaamista vastaan. Fosfaattikatodi on myös ympäristöystävällisempi verrattuna esimerkiksi kobolttipohjaiseen katodiin. (Oswal et al. 2010) (Electropaedia 2005a) (Buchmann 2013d)

5.2 Ominaisuudet

Taulukkoon 5.1 on koottu yleisempien uudelleenladattavien akkukemioiden ominaisuuksia. Vanhemmista akku kemioista on huomioitu nikkei-metallihydridiakut ja nikkeli-cadmiumakut. Lyijyakku on jätetty huomiotta sen raskauden takia. Litiumioniakut on jaettu ryhmiin yleisimpien käytettyjen katodien mukaan. Litium-polymeeriakku ei ole

vertailussa, sillä se ei ole kemialtaan uniikki akku. LiPo-akku voidaan valmistaa käyttäen kaikkia taulukossa esitettyjä katodimateriaaleja. Yleisimpänä näistä litium-kobolttioksidi. (Buchmann 2013d)

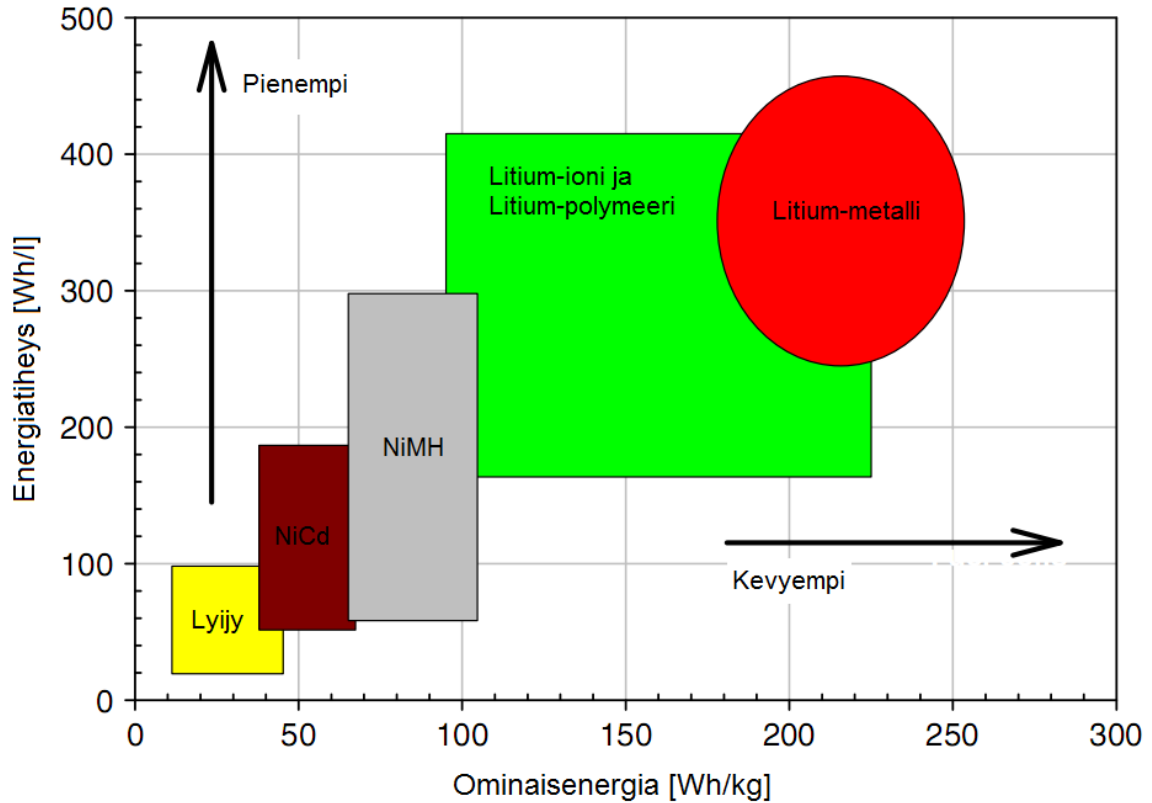
Taulukko 5.1. Uudelleenladattavien akkukemioiden ominaisuuksia. Vasemmalta oikealle: nikkeli-kadmium, nikkeli-metallihydridi, litium-kobolttioksidi, litium-mangaanioksidi ja litium-rautafosfaatti. Kennon jännitteet ovat keskimääräisiä. Sykliä määrä on mitattu purkamalla akun varaus 80 prosenttisesti. Itsepurkautuminen on mitattu huoneenlämmössä kuukautta kohden. (Kularatna 2011) (Väyrynen & Salminen 2011) (Notten & Danilov 2011) (Buchmann 2013c) (Hadjipaschalis et al. 2009)

	Ni-Cd	Ni-MH	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄
Kennon jännite [V]	1,2	1,2	3,7	3,8	3,2
Ominaisenergia [Wh/kg]	40-60	60-80	170-185	90-120	100-140
Energiatiheys [Wh/l]	100-150	200-350	450-500	260-300	200-310
Huippu purkuvirta	20 C	5 C	> 3 C	> 30 C	> 30 C
Syklien määrä	500-1000	500-800	500-1000	500-1000	1500-2000
Itsepurkautuminen	15-25 %	20-25 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Hyötysuhde	60-80 %	65-70 %	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %
Hinta [Wh/€]	2-4	1,4-2,8	3-5	-	0,7-1,6

Verrattuna nikkelpohjaisiin akkuihin litium-ioniakkujen etuna on pienempi itsepurkautuminen, korkeampi hyötysuhde ja kennojännite. Rautafosfaattikemian etuna on selkeästi suurempi latauspurku -sykliä määrä ja hyvä virranantokyky. Pahimpana heikkoutena tällä kemialla on verrattain huono energiatiheys ja ominaisenergia. Lisäksi LiFePO₄-kemian kennojännite on alhaisempi verrattuna muihin litium-ionikemioihin.

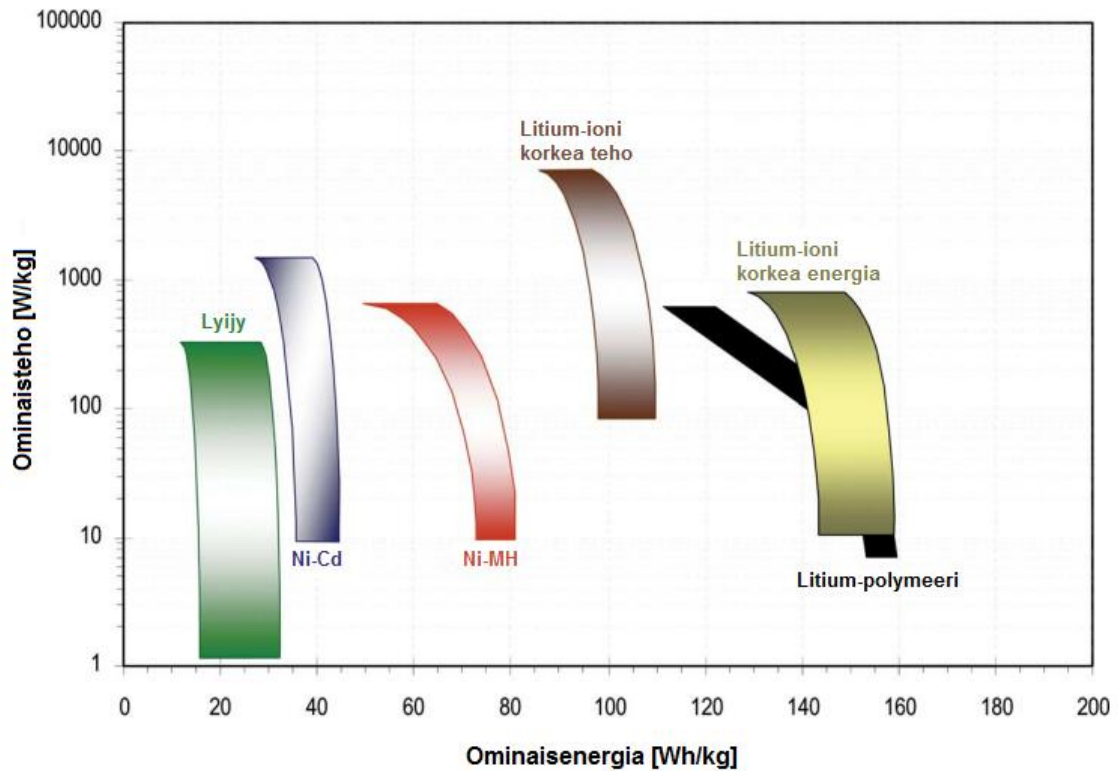
Litium-polymeeriakkujen ominaisuudet riippuvat paljolti käytetystä kemiasta. Polymeeriakkujen heikkoutena perinteisiin litium-ioniakkuihin on kuitenkin merkittävästi alempi käyttöikä. LiPo-akkujen latauspurku -sykliä määrä on parhaimmillaan noin 600 sykliä (Hadjipaschalis et al. 2009). LiPo-akkuilla on myös etuja ja haittoja, jotka ovat seurausta akun uniikista rakenteesta (ks. kappaleet 5.1 ja 3.3).

Kuvassa 5.2 on esitetty eri akkutyypin energiatiheddet ja ominaisenergiat.



Kuva 5.2. Ragone-kuvaaja eri akkutyypeistä (Väyrynen & Salminen 2011). Kuvaaja kuvaa akkujen ominaisenergian energiatihedden suhteen. Akun paino pienenee ylöspäin ja koko oikealle päin mentäessä. Kuvaajassa on esitetty myös litium-metalliakut. Nämä ovat kuitenkin vielä kaupallisesti yleisiä ainoastaan ei-uudelleenladattavina akkuina (Kanamura 2013).

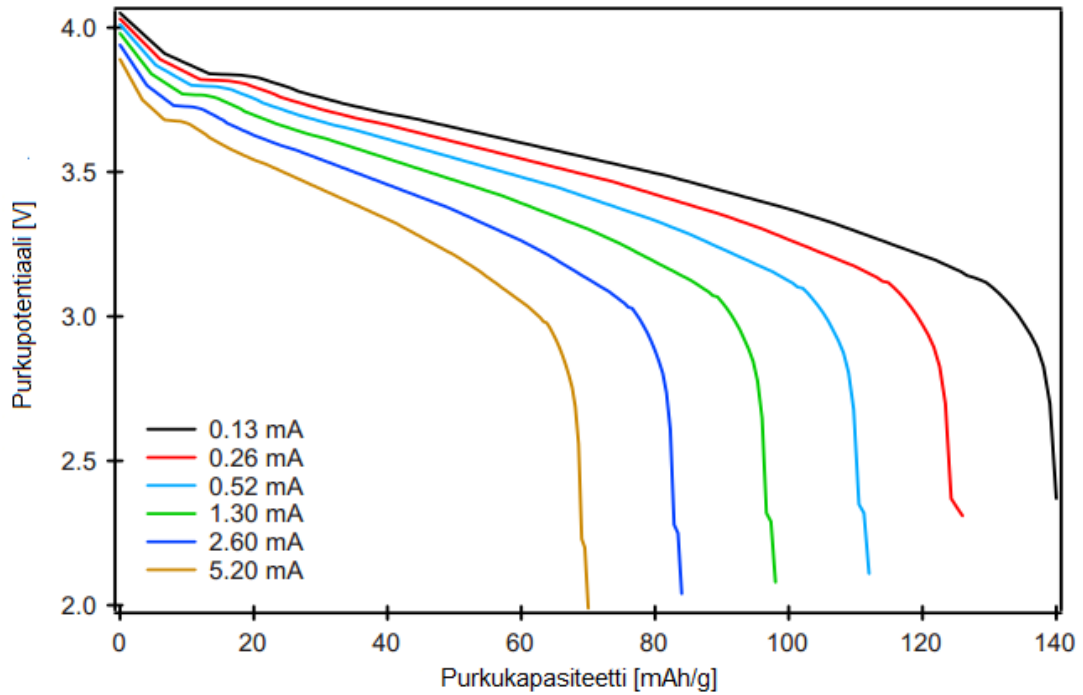
Kuvasta huomataan litiumioni-akkujen korkeampi energiatiheys ja ominaisenergia verrattuna vanhempiin akkutyyppeihin. Litium-polymeeriakkujen energiatiheys ja ominaisenergia ovat samaa luokkaa litium-ioniakkujen kanssa. Kuvassa 5.3 on esitetty eri akkutyypin ominaisteho ominaisenergian suhteen.



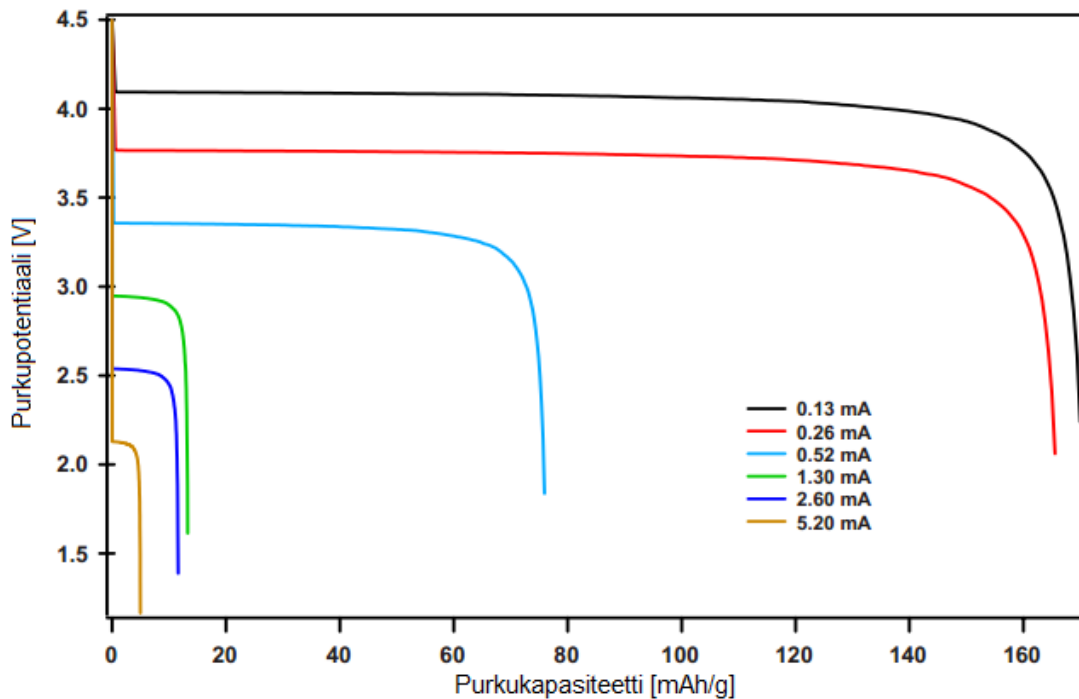
Kuva 5.3. Eri akkutyypin ominaisenergiat ominaistehon suhteen. Litium-polymeeriakku omaan erittäin hyvän ominaisenergian, mutta ei pärjää ominaistehossa korkean tehon litiumioniakulle. (Dunn-Rankin et al. 2005)

Kuvaajasta huomataan litiumioniakkujen optimointi joko korkean energian tai tehon suhteen. Litium-polymeeriakku sijoittuu ominaisenergialtaan ääripäähän, mutta ei pärjää ominaistehossa korkean tehon litiumioniakuille.

Kuvissa 5.4 ja 5.5 on esitetty sekä litium-kobolttioksidi ja litium-rautafosfaattikemiaan pohjautuvien akkujen tyypilliset purkauskäyrät.



Kuva 5.4. LiCoO₂-kemiaan pohjautuvan akun tyypillinen purkauskäyrä erilaisilla virrantiheyksillä. Huomataan jännitteen laskevan alussa tasaisesti ja lopussa nytkähtävän. (Harinipriya et al. 2008)



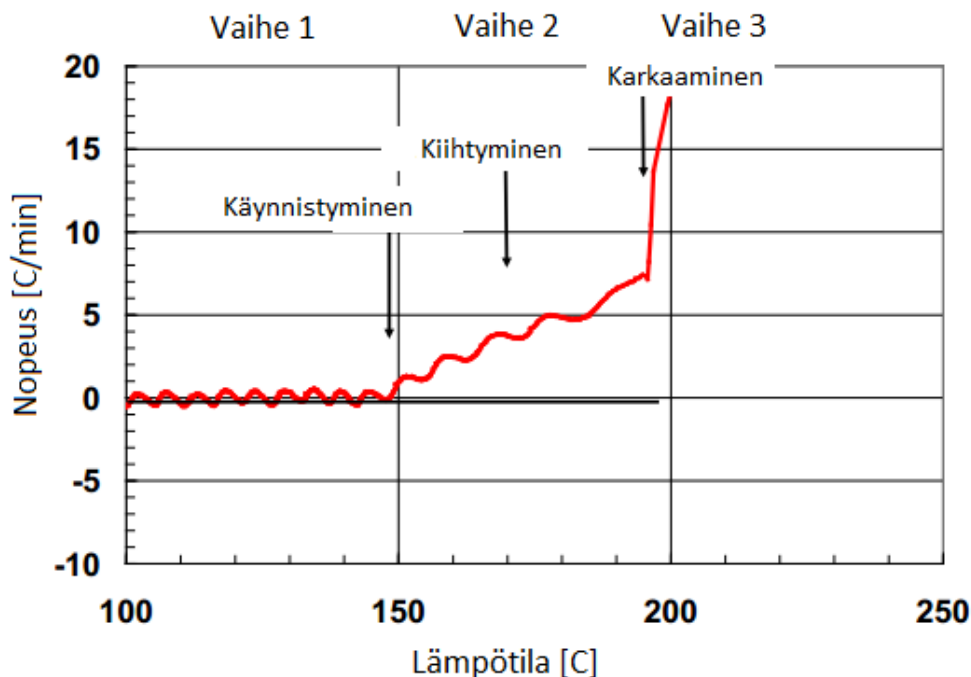
Kuva 5.5. LiFePO₄-kemiaan pohjautuvan akun tyypillinen purkauskäyrä erilaisilla virrantiheyksillä. Huomataan jännitteen pysyvän tasaisena aivan purkautumisen loppuun saakka ja tämän jälkeen nytkähtävän äkillisesti. (Harinipriya et al. 2008)

Kuvista huomataan, että litium-rautafosfaattikemian akulla purkauskäyrä on huomattavasti tasaisempi verrattuna litium-kobolttioksidiin. Tästä on hyötyä mikäli sovellus vaatii ehdottoman tasaisen jännitteen. Toisaalta huomataan, että rautafosfaattikemian akku näyttäisi menettävän kapasiteettiaan nopeammin virrantiheyden kasvaessa.

5.3 Li-ioni- ja litium-polymeeriakkujen turvallisuus

Litiumioni- ja litium-polymeeriakkujen heikkoutena muihin akkutyyppeihin nähden on niiden kemiallinen epävakaus. Akkujen energiatiheys on suuri ja litium on kemiallisesti hyvin reaktiivinen aine. Akkujen vikatilanteet ovat tyypillisesti seurausta kennojen ylikuumenemisesta. Ylikuumeneminen aiheutuu puolestaan yleensä kennojen ylilatauksesta, ylipurkamisesta, oikosulusta tai fyysisestä vahingoittumisesta. (Doughty & Roth 2012).

Ylikuumenemisessa kennon lämpötila nousee esimerkiksi oikosulun tai ylilataamisen seurauksena niin paljon, että kenno sisäiset reaktiot alkavat itsessään kuumentaa kennoa. Näissä reaktioissa katodimateriaali (esimerkiksi kobolttioksidi), vapauttaa happea, joka hapettaa akun muita materiaaleja. Tämä tuottaa yhä enemmän lämpöenergiaa, mikä johtaa lämpökarkaamiseksi kutsuttuun ilmiöön, jossa kennon katodin ja anodin väliset kiivaat reaktiot aiheuttavat lämpötilan hallitsemattoman nousun. Tämä voi johtaa kennon syttymiseen tai jopa räjähtämiseen. (Doughty & Roth 2012) (Sillanpää 2012) Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 5.6.



Kuva 5.6. Litium-ioniakun ylikuumeneminen. Vaiheessa yksi kennon lämpötila kasvaa kunnes se saavuttaa käynnistymislämpötilan (tässä tapauksessa n. 150 °C). Tämän jälkeen kennon sisäiset reaktiot nostavat lämpötilaa kiihtyvällä nopeudella (vaihe 2). Kennon lämpötilan noustessa n. 190 °C tapahtuu lämpökarkaaminen (vaihe 3). Tämän jälkeen lämpötilan nousu on hallitsematonta. (Doughty & Roth 2012)

Litium-ioniakun turvallisuus riippuu merkittävästi käytetystä katodimateriaalista. Exponent-konsultointiyrityksen eri litium-ionikemioille toteutetussa testissä kokeiltiin yksittäisten kennojen käyttäytymistä erilaisissa vikatilanteissa (kennoja mm. lämmitettiin ulkoisella lämmönlähteellä ja murskattiin). Testissä oli mukana kolmen eri kemian kennoja, litium-kobolttioksidi, litium-rautafosfaatti ja litium-kobalttinikkelimangaanioksidi.

Testin perusteella rautafosfaattikemiaan perustuva kenno lämpenee vikatilanteessa muita testissä olleita kennoja hitaammin. Rautafosfaatti-kennon kuoren huippulämpötila pysyy alheisempana muihin kennoihin verrattuna, eikä ylitä kennon elektrolyytin syttymislämpötilaa. Lisäksi kenno ei syttynyt liekkeihin eikä tuottanut irronnaista palavaa materiaalia testeissä. Litium-rautafosfaattikemian akkuja pidetäänkin tällä hetkellä muita litium-ionikemioita turvallisempana. (Doughty & Roth 2012) (Exponent 2007)

USA:n liikenneviraston toteuttamassa testissä tutkittiin myös litium-ioniakkujen turvallisuutta altistamalla kennot ulkoiselle tulelle. Tässä testissä oli mukana perinteisiä litium-ionikennoja (sylinteri), mutta myös litium-polymeerikennoja (pussikenno). Testien

perusteella LiPo-kennot saavuttivat huomattavasti korkeammat lämpötilat sekä paineen nousun litium-ionikennoihin verrattuna. Lisäksi LiPo-kennot syttyivät tuleen litium-ionikennoja alhaisemmassa lämpötilassa. (Summer 2010)

5.4 Akkujen suojaus

Litium-ioni- ja LiPo-akut käyttävät useita suojaustoimintoja estääkseen liiallisen paineen ja lämpötilan nousun kennoissa:

1. Erotinta (engl. shutdown separator), joka sijoitetaan kennon anodin ja katodin välille. Erotin estää kennon purkautumisen ja lataamisen katkaisemalla ionien johtumisen, mikäli kennon lämpötila ylittää määritellyn ylärajan.
2. Repäisyliuskaa (engl. tear-away tab) tai venttiiliä, mikä mahdollistaa kennoon syntyneen liiallisen paineen vapautumisen.
3. Virran katkaisin (engl. CID, current interrupt device), joka rikkoo kennon sisäisen sähköisen kytkennän, mikäli kennon sisäinen paine kasvaa liian suureksi.
4. PTC-termistori (engl. positive temperature coefficient), jolla rajoitetaan kennon virtaa.
5. Virtaa rajoittava sulake. Voidaan käyttää PTC-termistorin tilalla.
6. Diodi, jolla voidaan estää tahaton akun napojen väärinpäin kytkeminen latauksessa (estodiodi), tai ohjata purkuvirtaa heikon kennon ohi akun purkamisessa (ohitusdiodi). (Doughty & Roth 2012) (Oswal et al. 2010)

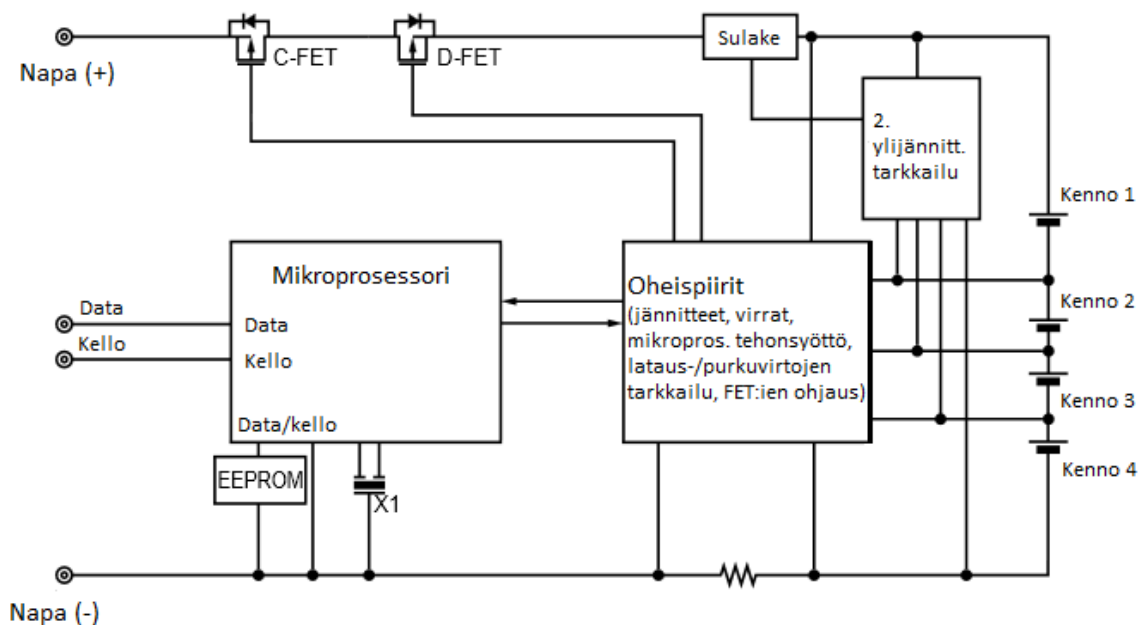
Riippuen akkupaketin rakenteesta sekä lataus- ja purkuolosuhteista, osa toiminnoista voidaan jättää käyttämättä. (Sony 2001)

Edellä mainittujen toimintojen lisäksi litium-ioni ja LiPo-akkujen kanssa tulisi käyttää ulkoista suojauspiiriä. Tämä piiri toteuttaa yleensä seuraavat suojaustoiminnot:

1. Jokaisen akkupaketin kennon latausjännitteen tarkkailu ylilataamisen estämiseksi. Mikäli akun yksittäisen kennon jännite nousee asetetun rajan yli latauksessa, lataus katkaistaan.
2. Jokaisen akkupaketin kennon purkujännitteen tarkkailu. Mikä akun yksittäisen kennon jännite laskee asetetun rajan alle akun purkautuessa, purkaminen katkaistaan. Tällä estetään kennojen ylipurkaminen.
3. Oikosulkusuojaus, joka katkaisee akun purkautumisen, mikäli purkuvirta ylittää asetetun rajan. (Sony 2001)

Kennojen sallitut jännitteen ylä- ja alarajat riippuvat käytetystä kemiasta, esimerkiksi LiFePO₄-kemialle ne ovat väliltä 2,5 – 3,65 V (Väyrynen & Salminen 2011). Jännitteiden tarkkailu on välttämätöntä litium-ioni- ja litium-polymeeriakuille, sillä kennon ylilataaminen aiheuttaa metallisen litiumin muodostumista kennon anodin pinnalle, joka voi johtaa kennon sisäiseen oikosulkuun. Ylipurkaminen puolestaan aiheuttaa kuparin saostumista kennon katodin pinnalle, joka voi johtaa myös kennon sisäiseen oikosulkuun. (Sony 2001)

Lisäksi akkupaketissa on yleensä ylimääräisenä suojauspiirinä myös latausvirtaa tarkkaileva piiri, joka katkaisee akun latauksen, mikäli akkua ladataan liian suurella virralla. Akkupakettiin voi olla myös lisätty toiminto, joka estää akun purkamisen, mikäli se ei ole kytketty akulle tarkoitettuun laitteeseen. (Sony 2001) Esimerkkikytkentä suojauspiiristä on esitetty kuvassa 5.7.

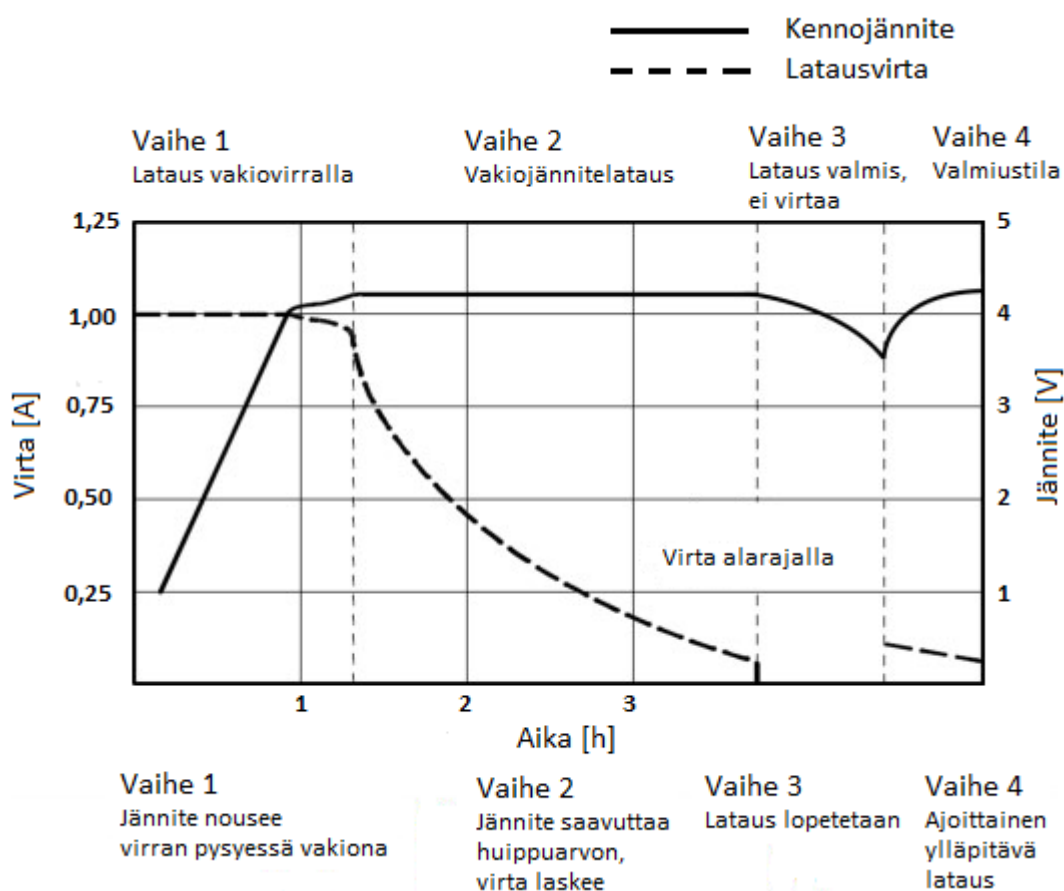


Kuva 5.7. Esimerkki litium-ioniakun suojauspiirin kytkennästä. C-FET –transistori katkaisee akun latauksen kennon jännitteen ylittäessä ylärajan. D-FET –transistori katkaisee akun purkamisen kennon jännitteen alittaessa alarajan. Oheispiirit mittaavat kennojen jännitteet ja virrat sekä ohjaavat FET:jä. Mikroprosessori ohjaa oheispiirejä. (Sony 2001)

5.5 Akkujen lataus

Litiumioni- ja LiPo-akut ladataan useimmiten tasaisen virran ja tasaisen jännitteen menetelmällä, eli niin sanotulla CC-CV -menetelmällä (Constant Current - Constant

Voltage). Akun lataaminen aloitetaan ensin vakiovirralla. Akkua ladataan kunnes kennojen jännitteet saavuttavat ylärajan (esim. LiCoO_2 n. 4,2 V ja LiFePO_4 n. 3,65 V). Tämän jälkeen akkujen jännitettä pidetään vakiona, kunnes latausvirta laskee määritettyyn raja-arvoon, jonka jälkeen lataus lopetetaan. Raja-arvo voi olla valmistajasta riippuen kiinteä (esim. 50 mA) tai akun nimelliskapasiteetin kerrannainen (esim. 0,1 C) (Chu 2009). Koska akut vaativat erityisen latausmenetelmän, lataaminen täytyy aina suorittaa erityisellä näille akkutyypeille sopivalla laturilla. LiPo-akkujen kanssa voi käyttää litium-ioniakuille tarkoitettuja latureita. (Marks 2003) Kuvassa 5.8 on esitetty litium-ionikennon latauksen eri vaiheet.



Kuva 5.8. Litium-ionikennon latauksen vaiheet ja jännitteen sekä virran kuvaajat. Akun lataus aloitetaan vakiovirralla (Vaihe 1), kunnes kennon jännite saavuttaa ylärajan. Tämän jälkeen kennon jännitettä pidetään vakiona (Vaihe 2), kunnes latausvirta laskee määritetyn alarajan alle, jonka jälkeen lataus lopetetaan (Vaihe 3). Osalatureista ylläpitää akun varausta akun ollessa kiinni laturissa (Vaihe 4). (Buchmann 2013f)

Suosittelut latausvirrat ovat akkukohtaisia. Latausvirraksi Lipo-akuille suositellaan 1 C:n suuruista latausvirtaa. Tämä mahdollistaa akulle pisimmän mahdollisen käyttöiän. (Marks

2003) Saft batteries -yrityksen valmistamaa LiFePO_4 -kemiaan perustuvaa litium-ionikennoa on mahdollista pikaladata jopa 15 C:n suuruisella latausvirralla. Tällekin kennolle suositellaan kuitenkin 1 C:n latausvirtaa pisimmän mahdollisen käyttöiän takaamiseksi. (Saft Batteries 2010) Koska latausvirta laskee vakiojännitevaiheessa, litium-ioni- ja litiumpolymeeriakkujen latausaika on n. 2 tuntia käytettäessä 1 C:n suuruista latausvirtaa. (Simpson 2011)

6. ESIMERKKI SOVELLUSKOHTEESTA: KANNETTAVA AUDIOLAITE ”PORSAS”

Esimerkkinä sovelluskohteesta LiPo- ja LiFePO-akulle on käytetty Lappeenrannan teknillisen yliopiston analogiasignaalinkäsittely -kurssilla rakennettua kannettavaa audiolaitetta ”porsasta”. ”Porsaasta” voi lukea tarkemmin sen dokumentaatiosta: http://asig2011.wikispaces.com/file/view/porsaan_loppuraportti_v2.pdf.

Tässä luvussa käydään läpi alustava mitoitus ”porsaaseen” sopivalle akulle. Lisäksi esitetään esimerkkejä sopivista kaupallisista akkukennoista.

6.1 Laitteen asettamat vaatimukset akulle

Porsaan D-luokan vahvistimen keskimääräinen teho on tällä hetkellä parhaimmillaan n. 40 W ja vaadittu käyttöjännite on 12 V (Talvitie et al. 2011). Keskimääräinen audioteho on tästä 1/8 - 1/3 (Mendenhall 2005). Täten jatkuva-aikaisen tehon voidaan arvioida olevan n. $1/5 * 40 \text{ W} = 8 \text{ W}$. Riittävänä soittoaikana voidaan pitää 12 h.

Tällöin akulta vaadittava energia on $8 \text{ W} * 12 \text{ h} = 96 \text{ Wh}$. Lisäksi ottamalla huomioon akun (li-ioni tai LiPo) ja D-luokan vahvistimen n. 90 % hyötysuhde, saadaan akulta vaadittavaksi energiaksi $96 \text{ Wh} / (0,9 * 0,9) \approx 119 \text{ Wh}$ (Mendenhall 2005). Tästä saadaan akulta vaadittavaksi kapasiteetiksi $119 \text{ Wh} / 12 \text{ V} \approx 10 \text{ Ah}$. Porsaan audiotehon huippuarvoksi saadaan keskimääräisen tehon avulla $40 \text{ W} * 2 = 80 \text{ W}$. Tästä saadaan akulta vaadittavaksi virranantokyvyksi $80 \text{ W} / 12 \text{ V} \approx 6,7 \text{ A}$.

6.2 Sopivien kennojen vertailu

Taulukkoon 6.1 on koottu muutamia esimerkkejä erityyppisistä kaupallisesti saatavista kennoista. Vertailuun on valittu kappaleessa 5.2 esitettyjen kemioiden kennoja. Litiumrautafosfaattikemian kennoja on sekä litium-ioni, että litiumpolymeerityyppisinä. Kennot on valittu kapasiteettiin perusteella siten, että haluttu 10 Ah:n kapasiteetti saavutettaisiin tasamäärällä kennoja. Kennoille 4, 5 ja 6 ei ollut ilmoitettu käytettyä

kemiaa. Nimellisjännitteen perusteella kennot voisivat olla litium-kobolttioksidikemiaan perustuvia.

Taulukko 6.1. Muutamien sovelluksen mukaan valittujen akkukennojen arvoja. Jännitteet ja kapasiteetit ovat nimellisiä. Kennojen tilavuudet on laskettu käyttäen apuna datalehdissä ilmoitettuja kennojen mittoja.

	Kemia / tyyppi	Kennotyyppi	Kapasit. [Ah]	Jännite [V]	Purkuvirta	Latausvirta	Paino [g]	Tilav. [ml]
# 1	Ni-Cd	Sylinteri	10,0	1,2	4 C ¹⁾	0,1 C ⁴⁾	395,0	133,0
# 2	Ni-Mh	Sylinteri	2,5	1,2	3 C ¹⁾	0,1 C / 0,5 C ⁵⁾	55,0	17,9
# 3	LiCoO ₂ / Li- ioni	Suorakulm.	2,0	3,7	1,3 C ²⁾	1 C ⁴⁾	41,5	18,4
# 4	Li-ioni	Sylinteri	2,0	3,6	3 C ¹⁾	0,7 C ⁴⁾	45,5	17,5
# 5	LiPo	Pussi	5,0	3,7	30 C / 50 C ³⁾	2 C ⁶⁾	132,0	72,5
# 6	LiPo	Pussi	10,0	3,7	3 C / 5 C ³⁾	2 C ⁶⁾	210,0	110,0
# 7	LiFePO ₄ / LiPo	Pussi	5,0	3,2	2 C / 3 C ³⁾	1 C ⁶⁾	135,0	66,9
# 8	LiFePO ₄ / LiPo	Pussi	10,0	3,2	2 C / 3 C ³⁾	1 C ⁶⁾	270,0	131,9
# 9	LiFePO ₄ / Li- ioni	Sylinteri	2,5	3,2	10 C / 40 C ³⁾	1 C / 10 C ⁵⁾	79,0	35,3
# 10	LiFePO ₄ / Li- ioni	Suorakulm.	10,0	3,2	2 C / 3 C ³⁾	1 C ⁶⁾	350,0	167,2

1) Suurin akun purkukäyrissä esitetty purkuvirta.

2) Maksimipurkuvirta.

3) Maksimi jatkuva-aikainen purkuvirta / maksimi hetkellinen purkuvirta.

4) Suositeltu latausvirta.

5) Normaali latausvirta / pikalatausvirta.

6) Suurin sallittu latausvirta.

LiPo-kennoja oli saatavilla sekä korkealle teholle, että korkealle energialle optimoituina. Kenno 5 on korkean tehon kenno, mikä havaitaan purkuvirtojen korkeista arvoista. Kenno 6 on puolestaan korkean energian kenno, mikä havaitaan paremmasta kapasiteetin ja massan suhteesta. Rautafosfaatti-kemian litium-ionikenno eli kenno 9 näyttäisi omaavan myös melko korkeat purkuvirran arvot. Lisäksi kennoa on mahdollista pikaladata huomattavan korkealla virralla.

Taulukkoon 6.2 on laskettu em. kennojen kokonaismäärät halutun kapasiteetin ja jännitteen saavuttamiseksi (10 Ah ja 12 V). Esimerkiksi kennon kaksi tapauksessa saadaan sarjaan kytkettävien kennojen määräksi $12 \text{ V} / 1,2 \text{ V} = 10$ kappaletta ja rinnan kytkettävien määräksi $10 \text{ Ah} / 2,5 \text{ Ah} = 4$ kappaletta. Tästä saadaan kennojen kokonaismääräksi $10 * 4 = 40$ kappaletta. Painot ja tilavuudet on laskettu kertomalla

yksittäisen kennon paino ja tilavuus vaaditulla kennomäärällä. Kennot on järjestetty kokonaispainon mukaan suurimmasta pienimpään.

Taulukko 6.2. Taulukossa 6.1 esitettyjen kennojen kytkennät, kokonaismäärät, painot ja tilavuudet. KytKentä tarkoittaa kennojen sarjaan- ja rinnankytkentöjen konfiguraatioita (esim. 10S 4R tarkoittaa, että akku on rakennettu käyttäen 10 kennon sarjaankytkentää, joita on kytketty 4 rinnan).

	KytKentä	Kennojen lkm.	Paino [g]	Tilavuus [ml]
# 1	10S	10	3950	1330
# 2	10S 4R	40	2200	715
# 10	4S	4	1400	669
# 9	4S 4R	16	1264	564
# 5	4S 2R	8	1056	580
# 7	4S 2R	8	1080	535
# 8	4S	4	1080	527
# 4	4S 5R	20	910	350
# 6	4S	4	840	440
# 3	4S 5R	20	830	367

Selkeästi huonoimpana vaihtoehtona sekä massan, että tilavuuden suhteen näyttäisivät olevan Ni-Cd- ja Ni-Mh-kennot. Näiden jälkeen raskaimpina vaihtoehtoina tulevat LiFePO₄-kemian litium-ionikennot. Nämä havainnot ovat yhdenmukaisia kappaleessa 5.2 esitettyjen teoreettisten arvojen kanssa. Massan ja tilavuuden suhteen parhaimpana vaihtoehtona näyttäisi olevan LiCoO₂-kemian litium-ionikemio.

Pussikennojen oletettu kevyempi rakenne ja parempi pakkaustiheys näkyy jonkin verran vertailtaessa LiFePO₄-kemian kennoja keskenään. Esimerkiksi kennon 10 (suorakulmainen kenno) ja kennon 7 (pussikenno) välillä on massassa eroa jo noin 30 %.

6.3 Akun valinta "porsaaseen"

Vertailun sekä aiemmin esitettyjen teoreettisten arvojen perusteella "Porsaaseen" voisi alustavasti harkita LiFePO₄-kemian perustuvaa litiumpolymeeriakkua (kennot 7 ja 8). Valintaa puoltavat LiFePO₄-kemian korkea syklinen käyttöikä ja kemiallinen vakaus. Lisäksi valitsemalla akun polymeerityyppiseksi saadaan hyödynnettyä pussikennojen kevyes ja korkea pakkaustiheys. Tämän tyyppinen akku ei ole massan ja tilavuuden suhteen kaikkein optimaalisin vaihtoehto. Ottaen kuitenkin huomioon "porsaan" melko

massiivisen koon, paino n. 20 kg (Talvitie et al. 2011), jää akun kokonaisuudessa n. 5 % laitteen kokonaispainosta. Tätä voidaan pitää riittävänä.

Lisäksi kennojen 1 C:n suuruisen latausvirran voidaan katsoa olevan riittävä, akun latautessa tällöin noin kahdessa tunnissa. Kennosta 7 saa jatkuva-aikasta purkuvirtaa 10 A ja hetkellistä 15 A ja kennosta 8 puolestaan 20 A jatkuva-aikaista ja 30 A hetkellistä. Kennojen virranantokyky on täten riittävä vahvistimen 6,7 A:n huippuvirran saavuttamiseen, ja mahdollistaa myös nimellisteholtaan korkeampienkin vahvistimien syöttämisen.

Akun ongelmina voidaan mainita pussikennojen ulkoiselle vahingolle herkkä rakenne ja taipumus paisumiseen. Lisäksi akku vaatii asianmukaisen suojapiirin ja riittävän älyn sisältävän laturin. Mikäli akku halutaan optimoida massan ja tilavuuden suhteen ei litiumrautafosfaatti ole optimaalisin katodimateriaali, vaan tällöin voi olla kannattavampaa käyttää esimerkiksi litium-kobolttioksidikemian akkua.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli tutkia litium-polymeeri- ja litium-rautafosfaattiakkujen käyttöä kannettavan audiolaitteen energianlähteenä. Kyseiset akkutyypit valikoituivat, sillä ne ovat suhteellisen uusia kaupallisesti ja vaikuttivat ominaisuuksiensa puolesta lupaavilta. Työ vertaili myös näitä akkutyyppejä muihin yleisiin uudelleenladattaviin akkutyyppeihin. Esimerkki sovelluksena käytettiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston Analogiasignaalin käsittely -kurssin harjoitustyönä rakennettua kannettavaa audiontoistolaitetta ”porsasta”. Kriteereinä akun valinnassa oli keveys ja pieni koko sekä riittävä kapasiteetti, jännitetaso ja virranantokyky.

Litium-polymeeriakkuja voidaan pitää soveltuvina kannettavan audiolaitteen energianlähteenä. LiPo-akkujen energiatiheys- ja ominaisenergia ovat samaa luokkaa litium-ioniakkujen kanssa, jolloin ne ovat massan ja tilavuutensa suhteen huomattavasti parempi vaihtoehto verrattuna vanhempiin NiCd- ja NiMH-akkuihin. Lisäksi kiinteä elektrolyytti mahdollistaa pussimaisten kennojen käytön, jotka ovat kevyempiä ja omaavat paremman pakkaustiheyden sylinteri- ja suorakulmaisiin kennoihin nähden. Litium-polymeeriakut voidaan myös valmistaa käytännössä mihin tahansa muotoon, jolloin ne on mahdollista sijoittaa eri kokoihin ja muotoisiin tiloihin.

Ongelmana litium-polymeeriakuilla on pussikennojen herkkyys fyysiselle vahingolle, ja taipuvuus paisua käytössä. Lisäksi polymeeri-akut ovat litium-ioniakkujen tapaan

kemiallisesti epävakaita, ja tarvitsevat täten aina suojauspiirin, joka valvoo akun kennojen jännitteitä ja purkuvirtaa. LiPo-akkujen lataus ei poikkea litium-ioniakuista, ja täten akut vaativat li-ioniakuille sopivan laturin.

Litium-rautafosfaattikemian akkujen etuna vaikuttaisi olevan ennenkaikkea korkeampi lataus-purkusykliden määrä ja vakaampi kemiallinen rakenne muihin litium-ionikemioihin verrattuna. Koska rautafosfaatti on käytännössä ainoastaan akun katodin materiaali, voidaan litium-rautafosfaattiakku valmistaa sekä perinteiseksi litium-ioniakuksi, että litium-polymeeriakuksi. Litium-rautafosfaattiakkujen suurimpana heikkoutena on niiden huonompi energiatiheys ja ominaisenergia verrattuna muihin litium-ionikemioihin, jolloin ne eivät välttämättä aina ole optimaalinen vaihtoehto kannettavan laitteen energianlähteeksi. Verrattuna NiMH- ja NiCd-akkuihin litium-rautafosfaattiakkujen ominaisenergia on kuitenkin n. 2-kertainen. Osa rautafosfaattikemian akuista vaikuttaisi myös omaavan melko korkeat latausvirran arvot, esimerkiksi Saft Batteries -yrityksen valmistamaa 10 Ah:n LiFePO_4 -kennoa on mahdollista ladata jopa 150 A:n virralla. LiFePO_4 -akut vaativat muidenkin litium-ioni- ja litium-polymeeriakkujen tapaan suojauspiirin sekä sopivan laturin.

"Porsaaseen" valittiin LiFePO_4 -kemian litium-polymeeriakku. Valitsemalla polymeeriakku saadaan hyodynnettyä pussikennojen keveys ja korkea pakkaustiheys verrattuna muihin kennotyyppeihin. Akun valintaa puoltavat myös LiFePO_4 -kemian pitkä syklinen käyttöikä ja kemiallinen vakaus. Vertaulussa olleiden esimerkkikennojen perusteella akun kokonaispainoksi tulisi n. 1 kg ja tilavuudeksi n. 0,5 l. Ottaen huomioon "porsaan" melko massiivisen koon, paino n. 20 kg, voidaan näitä arvoja pitää riittävänä. Lisäksi kennoista saa jatkuva-aikaista purkuvirtaa 10 - 20 A ja hetkellistä 15 - 30 A. Tämä riittää vahvistimen huipputehon tarpeen täyttämiseen. Kennojen latausvirraksi oli annettu 1 C, jolloin akku latautuisi karkeasti n. 2 h. Tätä voidaan pitää riittävänä latausnopeutena.

LÄHTEET

- Barsukov, Y. Battery Selection, Safety, and Monitoring in Mobile Applications. Texas Instruments. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.1.2013]. Saatavissa: <http://focus.ti.com/download/trng/docs/seminar/Topic%20%20Battery%20Selection,%20Safety%20and%20Monitoring%20in%20Mobile%20Applications.pdf>
- Berndt, D. 1997. *Maintenance-Free Batteries*, Second Edition. Somerset, England: Research Studies Press Ltd.
- Buchmann, I. 2013a. Li-polymer Battery: Substance or Hype? Verkkosivusto. [viitattu 22.5.2013]. http://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype
- Buchmann, I. 2013b. Types of Battery Cells. Verkkosivusto. [viitattu 22.5.2013]. http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells
- Buchmann, I. 2013c. Comparison Table of Secondary Batteries. Verkkosivusto. [viitattu 22.5.2013]. http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries
- Buchmann, I. 2013d. Lithium-based Batteries. Verkkosivusto. [viitattu 21.8.2013]. http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries
- Buchmann, I. 2013e. Types of Lithium-ion. Verkkosivusto. [viitattu 21.8.2013]. http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- Buchmann, I. 2013f. Charging Lithium-ion. Verkkosivusto. [viitattu 26.8.2013]. http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries
- B. Chu, "Design Feature, LiFePO₄ Batteries Help Consumer Devices Come to Life", *Power Electronics Technology Magazine*, Prism Business Media, 2009.
- Doughty, D., Roth, P.E. 2012. A General Discussion of Li-ion Battery Safety. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.4.2013]. Saatavilla: http://www.electrochem.org/dl/interface/sum/sum12/sum12_p037_044.pdf
- D. Dunn-Rankin, E. Martins Leal, D. C. Walther, "Personal power systems", *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(5-6): 422-465, 2005. Saatavilla Science Direct –portaalin kautta [www.sciencedirect.com].
- Electropaedia. 2005a. Rechargeable Lithium Batteries. Verkkosivusto. [viitattu 22.5.2013]. <http://www.mpoweruk.com/lithiumS.htm>
- Electropaedia. 2005b. Cell Construction. Verkkosivusto. [viitattu 22.5.2013]. http://www.mpoweruk.com/cell_construction.htm
- Electropaedia. 2005c. Battery Performance Characteristics. Verkkosivusto. [viitattu 20.8.2013]. <http://www.mpoweruk.com/performance.htm#life>
- Exponent, Mechanics and Materials Practice. 2007. Comparison of Selected Lithium-Ion Battery Chemistries, Testing Report. [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2013]. Saatavissa: http://www.valence.com/sites/default/files/exponent_report.pdf
- I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications", *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7): 1513-1522, 2009. Saatavilla Science Direct –portaalin kautta [www.sciencedirect.com].
- Harinipriya, S., Vinten, D., Venkat, R. 2008. Journal of The Electrochemical Society. Performance Characteristics of Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries: A Monte Carlo Strategy. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.5.2013]. Saatavissa: http://www.maple.eece.wustl.edu/pubs/29-JES-Battery_MC-2008.pdf

- Jones, K. S. 2011. University of Florida. State of Solid-State batteries. Esityskalvot. [verkkodokumentti]. [viitattu 21.5.2013]. Saatavissa: <http://ceramics.org/wp-content/uploads/2011/08/energy-ss-batteries-jones.pdf>
- Kanamura, K. 2013. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, p. 27-39. Secondary Batteries - Lithium Rechargeable Systems, Negative Electrodes: Lithium Metal.
- N. Kularatna, "Rechargeable batteries and their management", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 14(2): 20-33, 2011. Saatavilla IEEE-kirjaston kautta [www.ieee.org].
- Marks, F. 2003. The Kokam USA Lithium Polymer Battery System. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.3.2013]. Saatavilla: http://ygdes.com/LiIon/technique/Kokam_LiPo.pdf
- E. Mendenhall, "SMPS for Audio Power Electronics", *Switching Power Magazine*, 2005.
- MIT Electric Vehicle Team. 2008. A Guide To Understanding Battery Specifications. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.8.2013]. Saatavilla: http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf
- Nicklin, M., Belts, T. 2008. Rechargeable Batteries and Cells NiCd, NiMH & LiPo. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.3.2013]. Saatavissa: <http://www.wamasc.org.au/pdf/technical/RechargeableBatteriesandCells.pdf>
- P. H. L. Notten, D. Danilov, "From Battery Modeling to Battery Management", in the 33rd *IEEE International on Telecommunications Energy*, pages 1-8, 2011. Saatavilla IEEE-kirjaston kautta [www.ieee.org].
- Oswal, M., Paul, J., Zhao, R. 2010. A comparative study of lithium-ion batteries. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.3.2013]. Saatavilla: http://www.scf.usc.edu/~rzhao/LFP_study.pdf
- Arora, P., Zhang, Z. 2004. Chemical Reviews, Vol. 104, No. 10. Battery Separators. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.1.2014]. Saatavissa: <http://tinhoahoc.com/Battery/cr020738u.pdf>
- A. Pruteanu, B. Florean, G. Moraru, R. Ciobanu, G. Asachi, "Development of a thermal simulation and testing model for a superior lithium-ion-polymer battery", in the 13th *IEEE International on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, pages 947-952, 2012. Saatavissa IEEE-kirjaston kautta [www.ieee.org].
- Saft Batteries. 2010. Rechargeable LiFePO₄ lithium-ion battery, Super-Phosphate VL 10V Fe. Datalehti. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.8.2013]. Saatavissa: www.saftbatteries.com
- Sillanpää, T. 2012. Litium-ioniakun tasapainon hallinta, Kandidaatintyö. Saatavilla LutPub-palvelun kautta [<http://www.doria.fi/handle/10024/4000>].
- Simpson, C. 2011. Battery Charging. Texas Instruments. [verkkodokumentti]. [viitattu 3.11.2013]. Saatavilla: <http://www.ti.com/lit/an/snva557/snva557.pdf>
- Sony. 2001. Lithium Ion Rechargeable Batteries, Technical Handbook. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.8.2013]. Saatavissa: <http://www.sony.com.cn/products/ed/battery/download.pdf>
- Summer, S. 2010. Flammability Assessment of Lithium-Ion and Lithium-Ion Polymer Battery Cells Designed for Aircraft Power Usage. [verkkodokumentti]. [viitattu 23.8.2013]. Saatavissa: <http://www.fire.tc.faa.gov/pdf/09-55.pdf>
- Talvitie, J., Toikka, J., Summanen, A. 2011. Analogiasignaalinkäsittely, harjoitustyön loppuraportti. [verkkodokumentti]. [viitattu 21.5.2013]. Saatavissa: http://asig2011.wikispaces.com/file/view/porsaan_loppuraportti_v2.pdf

A. Väyrynen, J. Salminen, "Lithium ion battery production", *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 46: 80-85, 2011. Saatavilla Science Direct –portaalin kautta [www.sciencedirect.com].

Vertailussa käytetyt kennot:

- 1: Panasonic. KR-10000M. Data-lehti. Saatavissa:
<http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf2/ACC4000/ACC4000CE24.pdf>
- 2: Panasonic. HHR250SCH. Data-lehti. Saatavissa:
http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/Panasonic_NiMH_HHR250SCH.pdf
- 3: Molicel. Model ICP103450CA. Data-lehti. Saatavissa:
http://www.molicel.com/hq/download/DM/DM_ICP103450CA-80057.pdf
- 4: Panasonic. UR18650E. Data-lehti. Saatavissa:
<http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/UR18650E.pdf>
- 5: Kokam. SLPB11543140H5. Data-lehti. Saatavissa:
http://www.dowkokam.com/data-sheets/5.000Ah_KD05-RH03-25_SLPB11543140H5_Tech_Spec.pdf
- 6: Kokam. SLPB98106100. Data-lehti. Saatavissa:
http://www.dowkokam.com/data-sheets/10.000Ah_KD07-RD06-01_SLPB98106100_A1_Tech_Spec.pdf
- 7, 8,10: B&K. BK5299130P-Fe, BK7068277P-Fe ja BK306880S-Fe. Akku-katalogi. Saatavissa:
<http://enersourceglobal.com/wp-content/uploads/Battery-Catalog.pdf>
- 9: Valence. IFR26650PC. Data-lehti. Saatavissa:
http://www.valence.com/sites/default/files/26650_datasheet_april_2013.pdf