



Open your mind. LUT.
Lappeenranta University of Technology

Sähköautojen akkuteknologioiden tilannekatsaus **Battery Review of Electric Vehicles**

Aarni Falkman

TIIVISTELMÄ

Aarni Falkman
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka
Tarkastaja: professori Pertti Silventoinen

Sähköautojen akkuteknologioiden tilannekatsaus

2016

Kandidaatintyö.
32 s.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia sähköautoissa käytettäviä akkuteknologioita ja verrata niiden ominaisuuksia keskenään sekä sähköautojen asettamien akkuvaatimusten kanssa. Akkuteknologiakartoituksen ja ominaisuusvertailun avulla tutkimuksessa oli tarkoitus selvittää sähköautojen akkujen kehitystä menneestä nykyhetkeen ja luoda katsaus akkuteknologian tulevaisuuteen. Tutkimuksessa painotettiin akkujen suorituskyvynäkökulmaa, mutta tutkimuksessa otettiin kantaa myös eri akkuteknologioiden turvallisuuteen, ympäristötekijöihin ja hintaan. Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena ja lähteinä käytettiin alan kirjallisuutta, IEEE artikkeleita, tutkimusraportteja ja verkkodokumentteja. Lisäksi tutkimuksessa hyödynnettiin akku- ja sähköautovalmistajilta saatavaa tietoa, johon suhtauduttiin varauksin.

Tutkimuksessa kävi ilmi, että erilaisia litiumioniakkuteknologioita käytetään tällä hetkellä eniten sekä täyssähköautoissa että pistokehybrideissä. Huomattiin, että akkujen suorituskyvyn kehittyminen on nopeutunut viime vuosina. Erityisesti akkujen energianvarastointikykyyn vaikuttavat ominaisenergiatasot ovat kasvaneet selkeästi. Nykyisen kehittyneen litiumioniakkuteknologian todettiin täyttävän jo osittain lähivuosien suorituskykytavoitteet. Tutkimuksessa tultiin siihen tulokseen, että litiumrikkiakkuteknologia voi korvata litiumioniakkuteknologian ainakin täyssähköautoissa parempien ominaisenergiatasojen ja halvempien valmistuskustannuksien takia. Myös litiumilma-akkuteknologialla havaittiin olevan mahdollisuuksia haastaa muut litiumakkuteknologiat seuraavalla vuosikymmenellä.

Tutkimuksen johtopäätöksenä todetaan, että sähköautot voivat kaupallistua laajemmin lähivuosina akkujen suorituskykyominaisuuksien kehittyessä jatkuvasti. Suorituskykyominaisuuksien parantuminen tulee todennäköisesti johtamaan siihen, että täyssähköautot yleistyvät enemmän ja pistokehybridit tulevat jäämään sähköautojen välivaiheeksi. Uusien akkuteknologioiden käyttöönotto kaupallisiin sähköautoihin voi viedä kuitenkin odotettua kauemmin, sillä akut tarvitsevat huolellista testausta ja käyttöönotto edellyttää, että kaikki ominaisuudet ovat vaaditulla tasolla.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Aarni Falkman
Battery Review of Electric Vehicles

2016

Bachelor's Thesis.
32 p.

Examiner: professor Pertti Silventoinen

In this Bachelor's Thesis the target was to research battery technologies of electric vehicles and compare properties of those technologies among themselves and also to the battery demands of electric vehicles. Purpose of battery technology survey and property comparison was to chart development of batteries from past to this day and make review for the future. Main perspective in the research was batteries performance but there are also some commitment for batteries safety, environmental aspect and costs. This Bachelor's Thesis was accomplished by literature research and literature of the field, IEEE articles, research reports and network documents were used as sources. Knowledge was also collected from battery and car companies but this knowledge was related with reservation.

Based on the results of this research different Lithium-Ion battery technologies are currently used most in battery electric vehicle and plug-in hybrid vehicle applications. It was also noticed that the development of batteries performance has accelerated over the past few years. Particularly specific energy of the batteries has clearly increased. Existing advanced Lithium-Ion battery technologies already partly fill the performance objectives that electric vehicles set for the near future. In study it was noticed that Lithium-Sulfur batteries have a good potential to replace Lithium-Ion batteries at least in battery electric vehicle applications. Also Lithium-Air batteries have good possibilities to take a place on electric vehicle applications in the next decade.

The conclusions state that electric vehicles can be widely commercialized in the coming years because the development of batteries performance improve constantly. Because of the battery performance improvement battery electric vehicles are coming more common and plug-in hybrid vehicles will be only temporary solutions in electric vehicles. Commercial introduction of the new battery technologies may take longer than expected because all properties of batteries have to be requisite level and batteries also need careful testing.

SISÄLLYSLUETTELO

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	5
1. JOHDANTO	6
2. AKKU SÄHKÖAUTON ENERGIAVARASTONA	7
3. AKKUJEN OMINAISUUDET	8
4. SÄHKÖAUTOJEN ASETTAMAT VAATIMUKSET AKUILLE.....	11
5. SÄHKÖAUTOJEN AKKUTEKNOLOGIAT	13
5.1 Lyijyakku	13
5.2 Nikkelikadmiumakku	15
5.3 Nikkelimetallihydridiakku	15
5.4 Litiumioniakku	17
5.5 Litiumrikki	21
5.6 Litiumilma-akku	22
6. AKKUTEKNOLOGIOIDEN KEHITYS JA VERTAILU	23
7. YHTEENVETO/JOHTOPÄÄTÖKSET	27
LÄHTEET	30

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

AGM	Absorbent Glass Mat Battery, lyijyakku lasikuitumattoon sidotulla elektrolyytillä
BAT	Best Available Techniques, paras käyttökelpoinen tekniikka
BEV	Battery Electric Vehicle, täyssähköauto tai -ajoneuvo
BMS	Battery Management System, akun hallintajärjestelmä
CD-moodi	Charge Depleting Mode, pistokehybridin ajomoodi kuljettaessa akustoon ladatulla sähköenergialla
HEV	Hybrid Electric Vehicle, hybridauto tai -ajoneuvo
Li-Ion	Lithium-Ion Battery, litiumioniakku
Li-S	Lithium-Sulfur Battery, litiumrikkiakku
NiCd	Nickel-Cadmium Battery, nikkelikadmiumakku
NiMH	Nickel-Metal Hybride Battery, nikkelimetallihydridiakku
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle, pistokehybridi
VRLA	Valve Regulated Lead Acid Battery, suljettu lyijyakku

1. JOHDANTO

Ympäristötekijöiden, kuten ilmaston lämpenemisen ja öljyvarantojen hupenemisen seurauksena autovalmistajat ovat pakotettuja tuomaan markkinoille entistä ympäristöystävällisempiä ja energiatehokkaampia automalleja. Tämän ongelman ratkaisemiseksi autonvalmistajat ovat kiinnostuneet kehittämään ja tuomaan markkinoille sähköautoja perinteisten polttomootoriautojen tilalle. Sähköautojen myynnin kasvua ovat hidastaneet korkeat hankintahinnat ja lyhyet toimintasäteet. Lyhyet toimintasäteet johtuvat akkujen heikosta kapasiteetista, jolloin voidaan todeta, että tällä hetkellä akkuteknologia on sähköautojen vaadittavien suorituskykyominaisuuksien pullonkaula. Siksi on tärkeää tutkia sähköautojen akkuteknologiaa ja sen kehittymistä, jotta voidaan tehdä päätelmiä sähköautojen tulevaisuudesta. Sähköautojen akkujen ominaisuuksien riittävyttä sähköautosovelluksiin voidaan tarkastella sähköautojen asettamien vaatimusten pohjalta. Työn tavoitteena on tarkastella sähköautoissa käytettyjä akkuteknologioita niiden ominaisuuksien pohjalta ja verratta ominaisuuksien riittävyttä asetettuihin vaatimuksiin BEV ja PHEV sovelluksissa.

Sähköautolla tarkoitetaan autoa, jonka voimantuotto tapahtuu sähkömoottorilla. Tässä työssä tarkastellaan sähköautoja, joiden energianlähteenä toimivat akut. Tällaisia autotyyppejä ovat täysin akustovoimalla toimivat täyssähköautot BEV ja pistokehybridit PHEV. Nämä sähköautoluokat ovat rakenteeltaan sellaisia, että niillä pystyy ajamaan pelkällä akuston antamalla energialla toisin kuin perinteisellä hybridillä HEV, jonka takia tämä autoluokka jää tutkimuksen ulkopuolelle. BEV ja PHEV autojen akustojen kapasiteetit poikkeavat hieman toisistaan, mutta akkujen purkaussyklit ovat samankaltaisia, jolloin myös akuilta vaaditut muut ominaisuudet ovat yhteneviä. Nämä asiat selkeyttävät akkututkimuksen tekoa akkujen suorituskykyominaisuuksia tarkasteltaessa.

Tutkimus toteutetaan kirjallisuustutkimuksena ja lähteinä käytetään alan kirjallisuutta, IEEE artikkeleita, tutkimusraportteja ja verkkodokumentteja. Lisäksi hyödynnetään akku- ja sähköautovalmistajilta saatavaa tietoa, johon suhtaudutaan kuitenkin riittävän lähdekriittisesti. Aluksi tutkimuksessa tutustutaan akkujen ominaisuuksiin ja vaatimuksiin, joita sähköautot asettavat näille ominaisuuksille. Tutkimuksen pääpaino ominaisuustarkastelussa on akkujen suorituskykyominaisuuksissa, mutta tutkimuksessa huomioidaan myös muita näkökulmia, kuten turvallisuus, ympäristöystävällisyys ja hinta. Akkuteknologioista otetaan tarkasteluun merkittävimmät akkuteknologiat sähköautojen kannalta, joista painotetaan tällä hetkellä käytössä olevia ja tulevia akkuteknologiakandidaatteja. Tarkasteltavien akkuteknologioiden ominaisuuksia on tarkoitus verrata keskenään ja tarkastella ominaisuuksien riittävyttä sähköautojen asettamiin akkuvaatimuksiin. Lisäksi tutkimuksessa on tarkoitus selvittää tähän asti käytettyjen akkuteknologioiden ajallisia vaikutuskausia, jolloin voidaan pyrkiä selvittämään akkujen ominaisuuksien kehityskaarta. Tutkimalla tulevista akkuteknologioista

saatavilla olevaa tietoa liittyen akkujen suorituskykyyn ja vertaamalla tätä tietoa aiempaan akkukehitykseen, pyritään tutkimuksessa kartoittamaan akkuteknologian kehitystä sekä suuntauksia tulevaisuudessa.

2. AKKU SÄHKÖAUTON ENERGIAVARASTONA

Akku on sähkökemiallinen komponentti, joka muuntaa latausvaiheessa sähköenergiaa kemialliseksi energiaksi ja purkausvaiheessa se muuntaa varastoitunutta kemiallista energiaa takaisin sähköenergiaksi (MIT Electric Vehicle Team 2008). Akkukennot ovat akun pienimpiä komponentteja. Ne koostuvat negatiivisesta anodista, positiivisesta katodista, elektrolyytistä, erottimesta, kotelosta ja liitinnavoista. Anodin ja katodin väliset hapettumis- ja pelkistymisreaktiot ovat akkujen sähkökemiallisen toiminnan perusta. Purkausvaiheessa anodi hapettuu luovuttaen elektroneja ulkoisen kuorman kautta. Katodi puolestaan pelkistyy vastaanottaessaan anodilta tulevia elektroneja. Lisäksi anodilta virtaa kationeja elektrolyytin välityksellä katodille ja katodilta virtaa anioneja anodille. Latausvaiheessa reaktiot kulkevat vastakkaiseen suuntaan. (Motiva Oy 2013)

Akkukennon sisällä olevan elektrolyytin pitää kyetä johtamaan ioneja, mutta se ei saa johtaa elektroneja. Elektrolyytti voi olla sekä nestemäisessä että kiinteässä muodossa. Eristeen päätehtävä on estää elektrodien eli anodin ja katodin välinen oikosulku. Kennojen kotelointimateriaalina voidaan käyttää metalleja tai muoveja. Tärkein vaikutus on kotelon rakenteella, jossa suositetaan sähköautosovelluksissa lieriön tai särmiön muotoisia rakenteita. Kennojen elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalivaihtoehtoja on monia, jolloin erilaisten kombinaatioiden määrä on suuri. Akkuteknologiat luokitellaan ja nimetään yleensä käytettyjen elektrodimateriaalien mukaan. (Linden & Reddy 2011, 1.1-7.6)

Jännitetasot eri kennoilla vaihtelevat yhdestä kuuteen volttia. Jotta kennojen tarjoamaa jännitetasoa ja kapasiteettia saadaan kasvatettua, on kennoja kytkettävä sarjaan sekä rinnan haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Erilaisia akkukennojen muodostamia kokonaisuuksia kutsutaan akkumoduuleiksi. (MIT Electric Vehicle Team 2008) Sähköautojen kohdalla akulla tarkoitetaan yleensä kokonaista akustoa tai akkupakettia, joka muodostuu edellä mainituista akkumoduuleista sekä erilaisista valvonta- ja suojauspiireistä. Lisäksi akustokokonaisuuteen voidaan laskea kuuluvaksi mukaan mahdollinen jäähdytysjärjestelmä. (Biomeri Oy 2009, 5.2)

Akuston hallintajärjestelmän eli BMS:n tärkeys korostuu suurissa akustoissa, joita sähköautoissa käytetään. Hallintajärjestelmää tarvitaan epävakaisissa akkukennoissa, jotka ovat

herkkiä väärinkäytöille. BMS:n tehtäviin kuuluvat akun valvominen, suojaaminen, suorituskyvyn maksimointi, tilan arvioiminen ja raportointi käyttäjälle tai ulkoiselle laitteelle. Esimerkiksi litiumioniakuissa BMS suojaa ylipurkaukselta ja -lataukselta, mitkä molemmat ovat erittäin haitallisia kyseiselle akkutyypille. Lisäksi BMS balansoi latauksen jälkeen akuston jännitetasoja eri kennojen välillä. Ilman toimivaa akun valvontajärjestelmää voi seurauksena olla mm. akun ylikuumentuminen, joka voi johtaa pahimmassa tapauksessa akun räjähtämiseen. (Davide 2010, s.4-6)

3. AKKUJEN OMINAISUUDET

Akkuja voidaan tarkastella monella eri tavalla. Tässä tutkimuksessa akkuja tutkitaan pääsääntöisesti niiden suorituskyvyllisten ominaisuuksien pohjalta. Lisäksi sähköautosovelluksien kannalta on hyvä tutustua myös muihin oleellisiin eri akkuteknologioille ominaisiin piirteisiin kuten turvallisuuteen, ympäristöystävällisyyteen ja hintaan. Näihin asioihin on syytä kiinnittää huomioita, koska ne vaikuttavat oleellisesti akkuteknologian mahdollisuuksiin kaupallistumisen osalta. Lisäksi akkujen ominaisuuksien ja tyyppisten piirteiden eroavaisuuksien ymmärtämiseksi on hyvä tutustua akkujen kemioihin ja rakenteisiin. Akkukemioihin perehtymällä voidaan esimerkiksi ymmärtää, mistä mahdolliset ongelmat jonkin akkuteknologian kohdalla johtuvat tai kuinka suuri kehityspotentiaali jollakin akkuteknologialla on olemassa. Akun rakenneratkaisut vaikuttavat puolestaan akun ominaisuuksiin ja akkukemiaan. Jokaisella akkuteknologialla on omat etunsa ja haittansa. Kun akuissa kehitetään jotain ominaisuutta, tehdään se monesti jonkin toisen ominaisuuden kustannuksella. Hyvä ja sähköautoihin kaupallisesti sopiva akkuteknologia on sellainen, jossa kaikki ominaisuudet ovat tasapainossa ja vaatimukset täyttävällä tasolla.

Akkujen turvallisuutta tarkasteltaessa voidaan kiinnittää huomiota akkuteknologian stabiiliuteen latauksen tai purkauksen aikana, mekaanisen rasituksen keston, lämmönkeston ja kosteuden sietoon (Kalhammer 2007, s. 34-35). Akkujen ympäristöystävällisyyteen perehtyessä on kiinnitettävä huomiota tarkasteltavan akkuteknologian materiaalien haitallisuuden ympäristölle ja akkujen kierrätettävyyteen. Hintaa voidaan tarkastella energian suhteen eli yksikössä €/kWh, jolloin voidaan muodostaa vertailua eri akkuteknologioiden välillä (Kalhammer 2007, s. 24-25). Hinta on riippuvainen kaupallisuusasteesta ja valmistusmääristä. Koska kaikki vertailtavat akkuteknologiat eivät vielä ole kaupallistuneet tai ovat väistymässä markkinoilta, ei tarkka hintavertailu eri akkuteknologioiden välillä ole relevanttia.

Ennen akkujen varsinaisten suorituskyvyllisten ominaisuuksien läpikäymistä perehdytään akkuihin liittyviin peruskäsitteisiin, jotta voidaan ymmärtää teknisten ominaisuuksien käsitteet. Samoja käsitteitä voidaan soveltaa kenno-, moduuli- ja akustotasolla. Akkuihin liittyviä peruskäsitteitä ovat

- kapasiteetti (Ah)
- C-luku
- E-luku
- nimellisenergia (kWh)
- purkaustaso (DoD %)
- käyttösykli
- sisäinen resistanssi (Ω)
- jännite (V): terminaalijännite, avoimen piirin jännite, nimellisjännite, katkaisujännite

Kapasiteetilla ilmaistaan akun käytettävissä olevat ampeeritunnit määritellyllä purkausvirralla. Purkausvirran suuruus puolestaan ilmaistaan C-lukuna, jolla ilmaistaan kuinka nopeasti käytettävissä oleva kapasiteetti on tarkoitus purkaa tai ladata. Esimerkiksi 1 C:n purkausvirralla akku purkaantuu yhdessä tunnissa, jolloin 1 Ah:n akulla purkausvirtana olisi esimerkkitapauksessa 1 ampeeri. C-luvun tilalla voidaan käyttää E-lukua, jolloin purkaus- tai latausnopeus ilmaistaan tehona. Nimellisenergialla ilmaistaan akun kyky varastoida energiaa määritetyllä C-luvulla. Purkaustaso kertoo, kuinka monta prosenttia akun täydestä kapasiteetista käytetään purkausvaiheessa. Yli 80 %:n purkaustasosta käytetään nimikettä syväpurkaus. Kun akku puretaan täydestä kapasiteetista haluttuun varaustasoon ja ladataan takaisin täyteen kapasiteettiin, käytetään nimitystä käyttösykli. Akun sisäinen resistanssi on ominaisuus, joka vaikuttaa akun hyötysuhteeseen. Sisäinen resistanssi vaihtelee mm. latauksen, purkauksen ja varaustason mukaan. Akun jännite eli potentiaaliero voidaan ilmaista eri tavoin tilanteen mukaan. Terminaalijännitteellä tarkoitetaan akun napojen välistä mitattavaa jännitettä, kun akku on kytketty kuormaan. Avoimen piirin jännite tarkoittaa akun napajännitettä ilman kuormaa. Nimellisjännite ilmaisee akusta ilmoitetun jännitteen, joka voi olla esimerkiksi valmistajan antama arvo. Katkaisujännitteellä tarkoitetaan akun alinta toimintajännitettä, jonka voidaan ajatella ilmaisevan akun olevan tyhjä. (MIT 2008)

Sähköautoissa käytettävien akkuteknologioiden suurimmat tekniset rajoitteet ovat energian varastointiin liittyvissä asioissa. Niiden tutkimiseksi ja vertailemiseksi on selvennettävä niihin liittyviä akkutermejä, joista tutkimuksessa käytetään nimitystä suorituskykyominaisuudet.

Akkujen oleelliset suorituskykyominaisuudet sähköautosovelluksissa ovat

- Ominaisenergia/energiatiheys
- tehotiheys
- elinikä
- hyötysuhde

Ominaisenergia/energiatiheys (Wh/kg)

Ominaisenergia kertoo akun nimellisenergian painon suhteen. Koska kyseessä on suure, joka tarkastelee energiakapasiteettia painon suhteen, voidaan ominaisenergiasta käyttää myös nimitystä energiatiheys. Toisaalta energiatihyyttä voidaan tutkia myös tilavuuden suhteen. (MIT 2008) Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan energiaa painon suhteen, koska sähköautoissa akun paino on yleensä tilavuutta rajoittavampi tekijä.

Tehotiheys (W/kg)

Vaikka sähköautoissa käytettävät akut ovat optimoitu energiaominaisuuksia painottaen, on teho-ominaisuudet silti otettava huomioon. Akun on kyettävä antamaan riittävästi hetkellistä tehoa. Tehonsyötön tarkastelemiseen voidaan käyttää tehotiheyttä, joka kertoo kuinka paljon akku kykenee antamaan tehoa painoyksikköä kohti (MIT 2008).

Elinikä

Akkujen toiminnallista kestoja eli elinikää voidaan tarkastella kahdella tavalla. Elinikää voidaan tutkia joko akkujen käyttösykliä määrän tai ajallisten kestojen mukaan. Akkujen käyttösyklejä tarkasteltaessa käytetään yleensä referenssinä 80 %:in purkaustasoa. Eliniän ajallista tarkastelua tehtäessä akun kesto ilmoitetaan vuosissa. Akun eliniän katsotaan yleisesti olevan lopussa, kun akun täysi kapasiteettitaso on laskenut 20 %:lla verrattuna uuteen. (Kalhammer 2007, s. 22-23)

Hyötysuhde (%)

Akkujen hyötysuhde kertoo kuinka suuri osa käytetystä latausenergiasta saadaan purkaus-syklin aikana hyödynnettyä. Hyötysuhteeseen vaikuttavat monet eri tekijät. Akulle ominaisia hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. sisäinen resistanssi, itsepurkautuminen ja kemiallinen toiminta. Lisäksi hyötysuhteeseen vaikuttavat ympäristön lämpötila sekä käytettävät lataus- ja purkausvirrat. Tässä tutkimuksessa ei paneuduta yksityiskohtaisesti hyötysuhtearvoihin, mutta eri akkuteknologioille tyypillisistä hyötysuhteeseen vaikuttavista ominaisuuksista tullaan tutkimuksessa kiinnittämään huomiota.

4. SÄHKÖAUTOJEN ASETTAMAT VAATIMUKSET AKUILLE

Sähköautot määrittävät käyttösovelluksena hyvin pitkälti sen, minkälaisia ominaisuuksia akuilta vaaditaan. Sekä täyssähköautojen että pistokehybridien akustoilta vaaditaan hyviä suorituskykyominaisuuksia. Akkujen energiaominaisuudet ovat olleet pitkään esteenä sähköautojen laajemmalle kaupallistumiselle. Erityisesti tämä koskee täyssähköautoja, joissa ei ole käytettävissä varavoimanlähdettä. Pistokehybridit eivät ole akkujen energiaominaisuuksiltaan aivan yhtä vaativia, jonka takia ne ovat tällä hetkellä täyssähköautoja yleisempiä. Laajemmalla kaupallistumisella tarkoitetaan tässä yhteydessä tuotettuja sähköautoja miljoonatasolla ja yleisesti ottaen kaupallisen tason vähimmäisvaatimuksena on satatuhatta tuotettua sähköautoa. Riittämättömien suorituskykyominaisuuksien lisäksi sähköautojen laajan kaupallistumisen esteenä ovat korkeat hinnat, jotka johtuvat akustojen korkeista hinnoista (Kalhammer 2007, s. 44). Jotta sähköautot voisivat syrjäyttää polttomoottoriautot, on käytettävien akkuteknologioiden yleistyttävä kaupallisesti laajemmin, jotta tuotantokustannukset laskisivat riittävän alas. Lisäksi akkujen riittävän alhaisille hinnoille on vaatimuksena se, että akkuteknologiassa käytettävät materiaalit ovat tarpeeksi edullisia. Tässä tutkimuksessa pääpaino on sähköautojen akuille asettamissa suorituskykyominaisuusvaatimuksissa, mutta samalla otetaan kantaa akkuteknologioiden mahdollisuuksiin saavuttaa riittävän edullinen hintataso.

USABC on amerikkalainen sähkökemiallisten energiavarojen kehittämiseen perustettu yhteenliittymä, johon kuuluvat Ford, Fiat Chrysler Automobile ja General Motors (USCAR 2015). USABC:n asettamat akustojen suorituskykyominaisuuksien tavoitteet sähköautoille on esitetty taulukossa 4.1. Täyssähköautojen osalta tavoitteet kohdistuvat vuoteen 2020 ja pistokehybrideillä vuoteen 2018. Vaikka taulukon arvot ovat tavoitearvoja akustoille, voidaan niitä pitää vaatimuksina, koska tavoitteet on tehty sähköautojen vaatimusten pohjalta.

Taulukko 4.1 USABC:n asettamat tavoitteet sähköautojen akustoille. Taulukkoon on listattu oleelliset suorituskykyominaisuudet tavoitearvoineen. Lisäksi tavoitteiden yhteydessä on mainittu mahdollisista ehdoista ja tarkennuksista. (USABC 2015 (a), USABC 2015 (b))

Ominaisuudet	Täyssähköauto (FBEV)	Ehdot/tarkennukset (FBEV)	Pistokehybridi (PHEV)	Ehdot/tarkennukset (PHEV)
Nimellisenergia [kWh]	45	purkausvirta C/3	11,6	CD moodi
Ominaisenergia [Wh/kg]	235	purkausvirta C/3	100	nimellisenergia/paino
Tehotiheys [W/kg]	470	30 s pulssi	320	10 s pulssi
Paino yläraja [kg]	200	nimellise./ominaise.	120	
Elinikä sykleissä	1000	DoD 80 %	5000	
Elinikä vuosissa	15	lämpötila 30 °C	15	lämpötila 30 °C

Sähköauton yksi keskeisimmistä vaatimuksista on toimintasäde eli ajettu matka, joka pitää saavuttaa yhdellä akun latauksella. Sähköauton energiankulutus riippuu monesta eri tekijästä, kuten toimintaympäristöstä, apulaitteiden kuormituksesta, auton painosta ja toimintasyklistä. Porrasperäisen sähköauton keskimääräinen energiankulutus on noin 16 kWh/100 km (Kalhammer 2007, s. 136). Tätä arvoa voidaan käyttää vertailukohtana akuston tarvittavan nimellisenergian määrittämiseksi. USABC:n antamien akuston nimellisenergian ja ominaisenergian sekä sähköauton referenssinä käytettävän energiankulutuksen perusteella täyssähköauton toimintasäteen halutaan olevan vähintään noin 300 km. Pistokeyhybridin toimintasäde on standardoitu 40 mailiin eli reilu 60 km:iin, kun kuljetaan pelkällä akustosta saadulla sähköenergialla eli CD moodilla (USABC 2015 (b)). USABC:n asettama 5000 syklin tavoite pistokeyhybrideille on erittäin korkea, koska tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että akuston tulee kestää noin 250000 km elinkaarellinen ajomatka CD moodilla. Täyssähköautolla elinkaarellinen ajomatka muodostuu suurin piirtein samanmittaiseksi pistokeyhybridin kanssa.

Pistokeyhybridien huomattavasti täyssähköautoja korkeampi eliniän syklikestovaatimus johtuu siitä, että pistokeyhybridien pienemmän kapasiteetin omaavat akustot tyhjenevät täyssähköautojen suurempia akustoja useammin. Koska pistokeyhybrideillä ajetaan usein alhaisilla varaustasoilla, tulee kiinnittää huomiota siihen, että akusto kykenee antamaan riittävästi tehoa ulos myös purkaussyklin lopussa. Lisäksi sekä täyssähköjen että pistokeyhybridien kohdalla on huolehdittava siitä, että akuston suorituskykyvaatimukset toteutuvat kaikilla lämpötila-alueilla. Erityisesti kylmät olosuhteet ovat haastavia akuille. (Kalhammer 2007, s. 21)

Kuten tutkimuksessa aiemmin on mainittu, on akkujen hinnoilla suuri vaikutus sähköautojen kaupallistumiselle. Täyssähköautojen hintatavoitteena on alle 150 €/kWh hintataso, mikä tarkoittaa, että koko akuston kustannukset saavat olla enintään 6000 €. Pistokeyhybrideillä enimmäiskustannus on 300 €/kWh, jolloin akusto saa kustantaa enintään 3000 €. (Kalhammer 2007, s. 24) Eri akkuteknologioiden hintoja verrataan usein jotain kaupallisuusastetta kohden esim. sataatuhatta valmistettua tuotetta kohti. Koska vain harvojen akkuteknologioiden tuotanto on riittävällä kaupallisella tasolla, on eri akkuteknologioiden välinen hintavertailu erittäin vaikeaa. Tästä syystä hintavertailu on lähinnä suuntaa antava.

Turvallisuusvaatimukset ovat tärkeä näkökulma tarkasteltaessa sähköautojen akkuvaatimuksia, sillä sähköauto on akulle vaativa toimintaympäristö. Akkuteknologiasta riippuen akuilla saattaa olla taipumusta reagoida voimakkaasti jos purkaus- tai latausvirran tasot ovat liian korkeita. Lisäksi ylilataus on tyypillinen väärinkäyttöongelma, joka saattaa aiheut-

taa huomattavaa ylikuumenemista. Edellisten tilanteiden varalta akkuja pyritään suojaamaan aiemmin tutkimuksessa mainitulla akun hallintajärjestelmällä ja lisäksi kemiallisin sekä mekaanisin menetelmin. (Kalhammer 2007, s. 23) USABC:n suunnittelema akkujen testausproseduuri ottaa huomioon edeltä mainittujen ongelmatilanteiden lisäksi ulkoisen mekaanisen ja kuumuuden aiheuttaman rasituksen sekä kosteuden vaikutuksen.

USABC:n akkujen turvallisuustestausprotokolla on laajalti hyväksytty menetelmä, jota on käytetty monen standardin pohjana (Kalhammer 2007, s. 34-35). Suomessa sähköautojen akkujen turvallisuuden täytyy olla SFS-EN 50272 –standardin vaatimusten tasolla. Standardi koskee sekä itse akustoa, että siihen liittyvää asennusta sähköautossa. Lisäksi Euroopassa on käytössä sähköautojen akkuteknologioille useita kansainvälisiä standardeja, kuten kansainvälisen sähköalan standardiorganisaation IEC:n standardeja. On huomionarvoista todeta, että eri akkuteknologioille voidaan soveltaa eri standardeja ja uusia turvallisuusstandardeja kehitetään koko ajan lisää tarpeen vaatiessa. Standardeilla taataan se, että sähköautojen käyttö pysyy turvallisella tasolla, kun akkuvalmistajat pyrkivät kehittämään entistä suorituskykyisempiä akkuteknologioita. (Kupiainen 2013)

5. SÄHKÖAUTOJEN AKKUTEKNOLOGIAT

5.1 Lyijyakku

Lyijyakku on keksitty vuonna 1859 ja on edelleen käytössä monissa sovelluksissa. Esimerkiksi autoteollisuudessa lyijyakkuja käytetään lähes poikkeuksetta autojen käynnistysakkuina. Lyijyakut ovat hinnaltaan edullisia ja käytössä erittäin luotettavia. Ne ovat ehtineet kehittyä huomattavasti vuosikymmenten aikana niin rakenteeltaan kuin ominaisuuksiltaan. Lyijyakkujen kierrätys on erinomaisella tasolla, sillä yli 97 % akuista kierrätetään. Lyijyakkuja on saatavilla hyvin laajalti eri kokoluokissa, jännitetasoilla ja rakenneratkaisuilla. Uudenpien akkuteknologioiden kehittymisestä huolimatta lyijyakkuteknologia on edelleen vahva vaikuttaja akkumarkkinoilla. Vuonna 2008 lyijyakut ovat kattaneet 70 % koko akkumarkkinoista. Sähköautokäytössä lyijyakkuja on käytetty aikoinaan laajalti 1900-luvun alussa aikana, jolloin polttomootoriautoja ei ollut vielä markkinoilla. Myöhemmin lyijyakkuja on käytetty pienen kantaman sähköautoissa ja erilaisissa sähköautoprojekteissa. Lyijyakkujen sähköautokäyttöä rajoittavat alhaiset energiatiheysominaisuudet, heikot syväpurkauskestävyydet ja pitkät latausajat. (Linden & Reddy 2011, 16.1-17.9)

Sähköautokäytössä lyijyakut ovat rakenteeltaan suljettuja. Tämän tyyppisistä akuista käytetään lyhennystä VRLA. Suljetun rakenteen omaavissa lyijyakuissa on venttiilejä, jotka säätelevät akkujen sisältä vapautuvien kaasujen määrää. Venttiilien tarkoituksena on tasata

painetta akun sisällä, jota pääsee reaktioiden aikana syntymään. Sylinterimäinen kennorakenne on särmiömallista kestävämpi, jolloin voidaan käyttää suurempaa painetta kennon sisällä (Hämeenoja 1993, 28). Suuremmalla painetasolla häviöt ovat pienemmät ja akun hyötysuhde on parempi. Suljettu rakenne tekee akuista huoltovapaita. Elektrolyytti on hapon sijasta kiinteässä muodossa, jolloin akku on turvallisempi ja kestää paremmin syväpurkausta. Parempi syväpurkauskesto takaa puolestaan pidemmän eliniän. (Larminie & Lowry 2003, 2.3)

Kiinteän elektrolyytin omaavia suljettuja lyijyakkutyyppejä ovat AGM-akut ja geeliakut. AGM-akuissa elektrolyytti on imeytettynä huokoisissa lasikuitumatoissa. Lasikuitumatot toimivat sekä erottimena että elektrolyyttivarastona. Geeliakuissa elektrolyytti on nimensä mukaisesti rakenteeltaan geelimäisessä muodossa. Tämä on toteutettu lisäämällä elektrolyytin sekaan piidioksidia. AGM- ja geeliakkujen lisäksi muutamat akkuvalmistajat ovat kehittäneet hybridiakkuja, joissa akkukennon negatiivisena elektrodina toimii hiilivalmistein superkondensaattori. Hybridiakuilla on pyritty kasvattamaan lyijyakun kapasiteettia, jotta akku soveltuisi paremmin sähköautokäyttöihin. (Linden & Reddy 2011, 16.1-17.9)

Sähköautokäyttöä ajatellen lyijyakkuteknologia on halpaa ja turvallista. Vaikka suljetut lyijy-akut ovat hieman tavallisia lyijyakkuja kalliimpia valmistaa, ovat ne silti halvin akkuvaihtoehto sähköautosovelluksiin jos hinnan suhteuttaa saatavaan kapasiteettiin kilowattitunteina. Pitkän kehitys- ja käyttöhistorian seurauksena lyijyakut ovat erittäin luotettavia. Suljetut akut ovat turvallisia käyttää, erityisesti AGM-akuilla on hyvä värinänkestokyky. Lyijyakkujen kierrätysprosessi on pitkälle kehittyntä ja lähes kaikki akut päätyvät kierrätykseen. Akkujen suuren valmistusmäärän ja monipuolisen soveltuvuuden ansiosta lyijyakkuja on hyvin saatavilla monessa koossa ja eri rakenneratkaisuilla. Lyijyakkujen alhaiset energiatiheddet rajoittavat niiden soveltuvuutta sähköautoihin. Saavutetuilla energiatihedysillä akkuja voidaan käyttää lähinnä lyhyen kantaman sähköautoissa. Myös akkujen pitkät latausajat ja heikot syväpurkauskestot heikentävät lyijyakkuteknologian mahdollisuuksia kilpaileviin akkuteknologioihin verrattuna. Suljettujen lyijyakkujen syväpurkaussyklikestot ovat tyyppillisesti muutamman sadan syklin tasolla, kun vaatimuksena on täyssähköautoilla vähintään tuhat sykliä ja pistokehybrideillä reilusti enemmän. Lyijyakkuteknologiaa pyritään kuitenkin edelleen kehittämään, erityisesti hybridiakut ovat tutkimuksen kohteena. Jos akkujen elinikää ja energiaminimuksia onnistutaan parantamaan, saattaa lyijyakkuteknologiasta olla osittain korvaamaan litiumakkuteknologiaa, jota käsitellään myöhemmin tutkimuksessa.

5.2 Nikkelikadmiumakku

Nikkelikadmiumakkuja on käytetty useita vuosia kattavasti erilaisissa käyttökohteissa ja erityisesti pienissä sovelluksissa. NiCd-akut ovat tulleet kaupalliseen käyttöön 1900-luvun puolen välin jälkeen, mutta kyseinen akkuteknologia on kehitetty jo vuonna 1899 (Electropaedia 2005 (a)). Suurin kehitysaskel nikkelikadmiumakulla lyijyakkuun verrattuna on tapahtunut tehotiheydessä. Sähköautokäytöissä NiCd-akkuja on käytetty lähinnä erilaisissa projekteissa, mutta laajempi suosio on jäänyt saavuttamatta. Alhaiseksi jääneet energiatiheystasot ja kadmiumin myrkyllisyys sekä saatavuus ovat olleet pääsyitä siihen, miksi NiCd-akkuteknologia ei ole saavuttanut merkittävää asemaa sähköautosovelluksissa.

NiCd-akussa käytetään nikkelihydroksidia katodissa, kadmiumia anodissa ja kaliumhydroksidia elektrolyytissä. Nikkelihydroksidin seassa käytetään grafiittia johtokyvyn parantamiseen sekä barium- tai kobolttiyhdisteitä eliniän ja kapasiteetin kasvattamiseksi. Kadmiumia saadaan luonnosta sinkin sivutuotteena ja se luokitellaan ympäristölle haitalliseksi aineeksi, joka on myrkyllistä ihmiselle jo pieninä määrinä (Luonnonturvakeskus 2013). Sähköautokäyttöjä varten elektrodeihin on kehitetty aikoinaan kuitumainen nikkeli-laattarakente, joka on myöhemmin yleistynyt käytettäväksi kaupallisissa NiCd-kennoissa. (Linden & Reddy 2011, 19.1-19.4)

Nikkelikadmiumakkujen tehotiheys on hyvällä tasolla verrattuna lyijyakkuihin, mutta hinta on huomattavasti suurempi johtuen pitkälti kadmiumin saatavuudesta. NiCd-akut toimivat hyvin laajalla lämpötila-alueella, mikä on ollut ongelmana monelle muulle akkuteknologialle. NiCd-akut ovat myös stabiileja muille ympäristön rasituksille. Ne käyttäytyvät tasaisesti lataus- ja purkaustilanteissa sekä ovat käyttösyklikestoltaan pitkäikäisiä. Haittapuolena NiCd-akuilla on ominainen muisti-ilmiö, jonka ansiosta ne oppivat muistamaan edellisten purkausyhtäysten tasot. Tämän seurauksena akkujen purkauskyky heikkenee, mikä johtaa kapasiteetin pienenemiseen. NiCd-akuissa käytetty kadmium on myrkyllistä ja siksi akkujen kierrättäminen on vaikeaa. Nikkelikadmiumakkujen heikot energiatiheydet eivät yllä sähköautojen vaatimalle tasolle. NiMH-akkuteknologian kehittyminen muutamia vuosia NiCd-akkujen kaupallistumisen jälkeen syrjäytti nikkelikadmiumakut parempien energiatiheysominaisuuksien takia. (Battery University 2015 (a); Linden & Reddy 2011, 19.1-19.4)

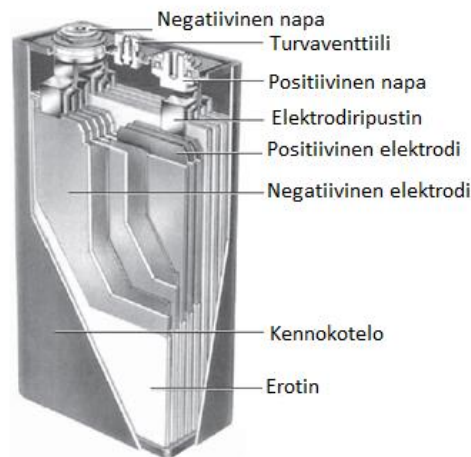
5.3 Nikkelimetallihydridiakku

Nikkelimetallihydridiakut ovat saavuttaneet hyvän kaupallisen aseman akkuteollisuudessa. Niitä on käytetty onnistuneesti kaikissa sähköautosovelluksissa (U.S. Department of Energy 2015). Vuonna 2008 tämä akkutyyppi on kattanut 10 % koko akkuteollisuudesta. NiMH-

akkujen kehitys on alkanut 1960-luvulta ja sitä testattiin aluksi mm. satelliiteissa. Myöhemmin 1990-luvulla kyseinen akkutyypin on yleistynyt kaupallisissa hybridi-autoissa. Tähän ovat olleet syynä NiMH-akun hyvä suorituskyky, luotettavuus ja alhainen hinta. Lyijyakkuihin verrattuna nikkelimetallihydridiakkujen ominaisenergiat ja tehotehiheydet ovat paremmat. (Linden & Reddy 2011, 22.1)

NiMH-akku on poikkeuksellinen siinä mielessä, että sen aktiivinen metallihybridi materiaali koostuu useamman metallin seoksesta. Käytettyjä seosversioita on useampia ja niiden ominaisuudet poikkeavat hieman toisistaan. AB_5 -seos on käytetyin, koska se on mm. kustannustehokkain ja sillä on suuri purkauskapasiteetti. Sähköautokäytössä suurta akuston energiatiheyttä tavoiteltaessa on järkevämpää valita NiMH-kennoihin A_2B_7 - tai AB_2 -seos. Näissä seoksissa käytettyjen metallien luontaiset energiatiheydet ovat AB_5 -seoksen materiaaleja parempia. A_2B_7 -seosten kapasiteetit vaihtelevat välillä 335 – 400 mAh/g ja AB_2 -seoksilla välillä 385 – 450 mAh/g. (Linden & Reddy 2011, 22.3)

NiMH-kennot ovat rakenteeltaan tyypillisesti lieriön tai särmiön muotoisia. Koska nikkelimetallihydridiakut kestävät hyvin yllilatausta ja -purkautumista, voidaan sähköautokäytössä käyttää yksiosaista kennorakennetta. Samanlainen ratkaisu tuottaisi ongelmia monelle muulle akkuteknologialle. Yksiosaisen kennorakenteen sisään voidaan sijoittaa useita anodi- ja katodilevyjä, jotka erotetaan ohuilla sisäseinämillä toisistaan. Yksiosainen ilmajäähdytyksellä varustettu NiMH-kkenno on esitetty kuvassa 5.1. (Linden & Reddy 2011, 22.4)



Kuva 5.1. Yksiosainen ilmajäähdytyksellä varustettu NiMH-kkenno (Linden & Reddy 2011, 22.4).

Yksiosaisella rakenteella saadaan säästettyä tilaa ja kustannuksia, kun useampi kkenno-komponentti voidaan sijoittaa samaan tilaan. Jäähdytys kennorakenteen sisällä voidaan toteuttaa ilmalla tai nesteellä. (Linden & Reddy 2011, 22.4)

Nikkelimetallihydridiakkujen ominaisenergia on noin puolet parempi kuin nikkelikadmium-akuilla. Ne ovat toiminnaltaan stabiileja ja siksi turvallisia käyttää. NiMH-akuissa käytetyt materiaalit ovat ympäristöystävällisiä ja hyvin kierrätettävissä. NiMH-akku kestää keskimäärin noin 3000 syväpurkaussykliä eli se on hyvin pitkäikäinen. Suuren kaupallisen tuotannon ansiosta erilaisia nikkelimetallihydridikennoja on saatavilla runsaasti ja hinta on kohtuullinen. Suurimpana heikkoutena NiMH-akuilla on korkea itsepurkautuminen ja alhainen suorituskyky kylmissä olosuhteissa. (Electropaedia 2005 (b))

Nikkelimetallihydridiakku on edelleen vahva vaihtoehto perinteisissä hybrideissä, mutta verkosta ladattavissa autoissa akkutyypin saavutettavissa olevat energiatiheddet ovat vaatimustasojen alarajoilla. Pistokehybrideissä NiMH-akun käyttö on vielä mahdollista, mutta täyssähköauton akuston toteutukseen on olemassa parempia akkuteknologioita, joiden ominaisenergiat ovat paremmalla tasolla.

5.4 Litiumioniakku

Litiumilla on materiaalina loistavat edellytykset akkuteknologian suhteen. Maapallolla esiintyvistä metalleista litium on kaikkein kevyintä. Sillä on alkuaineena paras sähkökemiallinen potentiaali johtuen sen normaalipotentiaalista. Litiumin normaalipotentiaali eli potentiaali vetyelektrodiin nähden on kaikkein alhaisin, jonka takia litium on voimakkain pelkistin (Bratsch 1988). Vahva pelkistin luovuttaa herkästi elektrodeja, jolloin litium on teoreettisesti paras metalli akkukennon anodiksi. Lisäksi edellä mainittujen etujen lisäksi litiumin energiatiheys on korkein painoon suhteutettuna. Nämä ominaisuudet tekevät litiumista erinomaisen materiaalivehtoehdon akkuihin. (Battery University 2015 (b))

Ensimmäiset litiumioniakut ovat tulleet markkinoille vuonna 1991. Ennen litiumioniakkuteknologiaa on testattu ja myös ehditty myydä erilaisia metallipohjaisia litiumakkuja, joissa on havaittu silloin vakavia turvallisuuspuutteita. Litiumioniakkujen energiatiheddet ovat olleet tullessaan markkinoille hieman metallipohjaisia litiumakkuja heikompia, mutta ne ovat korvanneet litiumin käytössä aiemmin ilmenneet vakavat turvallisuusongelmat. Lisäetuna litiumioniakkujen käyttöikä on huomattavasti litiummetalliakkuja pidempi. Litiumioniakuista on tullut vuosien varrella erittäin suosittu akkuteknologia ja kaupallisella tasolla mitattuna ne ovat saavuttaneet 38 %:in markkinaosuuden akkumarkkinoilla vuonna 2009. Nykyään suurin osa täyssähköautojen ja pistokehybridien akuista on litiumioniakkuja. Erilaisia litiumioniteknologioita on ehtinyt kehittyä useita vuosien aikana ja ne eroavat toisistaan käytettyjen elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalien osalta. Vaikka eri litiumioniteknologiat poikkeavatkin hieman toisistaan, on niille kaikille yhteistä huomattava energiatihedden kehitys

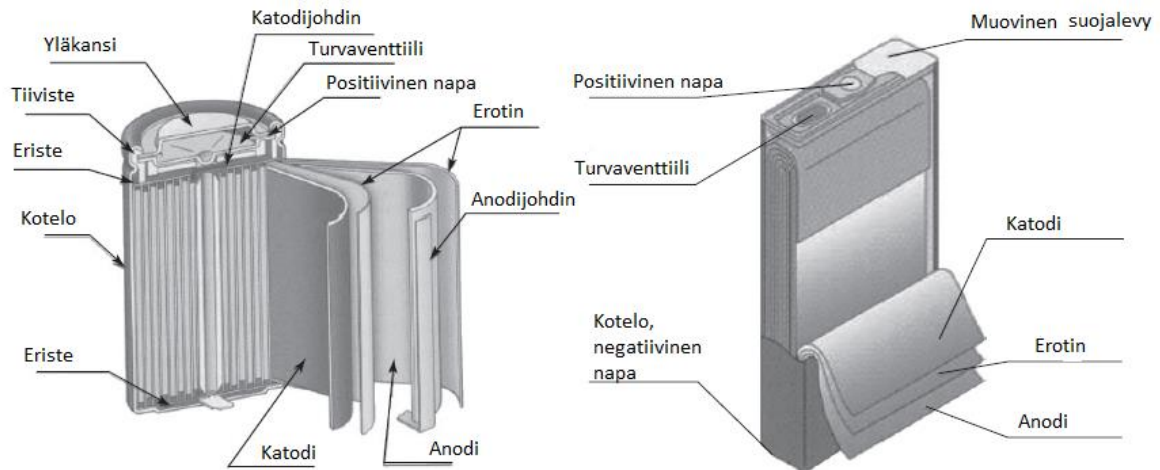
verrattuna aiempiin kaupallisesti merkittäviin akkuteknologioihin, joita ovat olleet mm. lyijy- ja NiMH-akut. (Battery University 2015 (b))

Litiumioniakkujen toiminta pohjautuu akkukennojen sisällä tapahtuvien litiumionien liikkeisiin elektrolyytin välityksellä elektrodien välillä. Litiumioniakkujen anodimateriaalina käytetään pääsääntöisesti kuparia, joka on pinnoitettu litioidulla grafiitilla. Grafiittipinnoitteen avulla saadaan litiumionikennoille tyypillinen tasaisena pysyvä purkausjännite, joka laskee roimasti vasta purkaussyklin lopussa. Uusimpien kehitysaskelien myötä grafiitin sekaan on soveltuviissa määrin lisätty pinnalle hiiltä, jolla saadaan pienennettyä pinta-alaa ja estettyä pinnan kuorinta (Park 2009, 553-557). Tämä on puolestaan johtanut kasvaneisiin hyötysuhteisiin ja parempaan termiseen stabiiliuteen lataussykliä aikana. Grafiitille vaihtoehtoinen anodimateriaali on sähköautokäytöissäkin yleistynyt litiumtitanaatti eli $\text{Li}_{4/3}\text{Ti}_{5/3}\text{O}_4$. Litiumtitanaatilla saavutetaan pidemmät käyttöiät ja lyhemmät latausajat litiumionikennoissa. Myös turvallisuus on litiumtitanaattia käytettäessä paremmalla tasolla. Litiumtitanaatin haittapuolena on grafiittia alhaisempi potentiaaliero, jonka takia saavutetut energiatiheystasot jäävät pienemmiksi. Grafiitin ja litiumtitanaatin lisäksi anodissa olisi mahdollista käyttää piitä tai tinaa. Piin ja tinan avulla on saavutettavissa entistä korkeampia energiatiheyyksiä. Tina-anodiin pohjautuvia litiumionikennoja on jo kaupallisesti saatavilla. Pii-anodit ovat vielä kehityksen alla, mutta ensimmäiset kaupalliset kennot ovat jo markkinoilla ja niitä on toimitettu mm. älypuhelimien valmistajille (Anthony 2014). Pii-anodisilla testauskennoilla on laboratoriomittauksissa saavutettu yli 250 Wh/kg:n energiatiheyyksiä, mikä on erinomainen tulos litiumionikennolle (Vitins 2014). (Linden & Reddy 2011, 26.2)

Katodimateriaaleina litiumionikennoissa käytetään litioituja metallioksiedeja tai litioituja metallifosfaatteja, joiden mukaan myös nimetään eri litiumioniteknologiat. Litioidulla aineella tarkoitetaan ainetta, joka on käsitelty litiumilla tai yhdellä sen yhdisteellä. Katodissa käytettäviä litiumseoksia ovat litiumkoolttioksidi, litiummangaanioksidi, litiumnikkelioksidi ja litiumrautafosfaatti. Eri seosten potentiaalierot litiumiin verrattuna vaihtelevat hieman toisistaan, josta johtuvat vaihtelut kennokapasiteeteissa. Lisäksi valmistuskustannuksissa esiintyy eroja. Litiumkoolttioksidi on yleisin katodimateriaali omaten hyvät kapasiteettiominaisuudet. Muista vaihtoehdoista litiumrautafosfaatti on suosittu sähköautovalmistajien keskuudessa. Sen etuina muihin katodimateriaaleihin ovat turvallisuustekijät, ympäristöystävällisyys ja alhaisemmat valmistuskustannukset. Haittapuolena litiumrautafosfaatilla on hieman alhaisempi kapasiteetti johtuen pienemmästä potentiaalierosta. Litiumrautafosfaatin lisäksi erilaisten litiummangaaniyhdisteiden avulla on saatu kehitettyä uusia potentiaalisia korkean kapasiteetin omaavia litiumionikennovaihtoehtoja. (Linden & Reddy 2011, 26.2)

Litiumioniakkujen elektrolyytti on pääsääntöisesti nestemäisessä tai geelimäisessä muodossa muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Nestemäiset elektrolyytit ovat kaikkein yleisimpiä litiumionikenoissa. Nestemäisissä elektrolyyteissä käytetään liuoksia, joissa litiumsuoloja on yhdistetty yhteen tai useampaan orgaaniseen liuottimeen. Liuottimina käytetään useimmin karbonaatteja. Geelimäisissä elektrolyyteissä suolat ja liuottimet ovat liuenneet tai sekoittuneet suuren moolimassan omaaviin polymeereihin. Geelimäinen elektrolyytti on tyypillisesti ohuena kalvomaisena rakenteena, jolloin se on myös helposti muotoiltavissa. Eniten käytetty litiumsuola elektrolyyteissä on LiPF_6 , koska sillä on korkein ionijohtavuus. Erottimena litiumionikenoissa käytetään huokoista $16\ \mu\text{m}$:stä $40\ \mu\text{m}$:iin paksumaa kalvoa, joka on tavallisesti tehty polyolefiinistä. (Linden & Reddy 2011, 26.2)

Litiumionikenojen kotelot ovat rakenteeltaan lieriön tai särmiön muotoisia. Kotelon materiaali voi olla muovia tai metallia. Metallinen rakenne kestää muovia paremmin lämpöä ja ne ovat myös tiiviimpiä, jolloin kennojen odotettu elinikä on pidempi. Kennon elektrodit ovat ohuissa foliomaisissa muodoissa, joista katodi on alumiinipohjainen ja anodi kuparipohjainen. Foliot päällystetään molemmiin puoliin pinnoiteaineilla, joita ovat siis katodeissa ja anodeissa käytetyt yhdisteet. Pinnoitteiden kerrospaksuuksilla pystytään vaikuttamaan kennon energia- ja teho-ominaisuuksiin. Käyttämällä mahdollisimman paksumaa pinnoitekerrosta katodifolioiden päällä saadaan energiatiheyttä kasvatettua. Ohuemmalla kerrostuksella saadaan puolestaan lisää teho-ominaisuuksia energiatiheyden kustannuksella. Energiaoptimoituissa kennoissa käytetään yli $100\ \mu\text{m}$:n pinnoitepaksuuksia ja teho-optimoiduissa noin $50\ \mu\text{m}$:n paksuuksia. Sähköautosovelluksissa tarvitaan juuri energiaoptimoituja kennoja, jolloin niihin tarkoitetuissa kennoissa käytetään paksumpia pinnoitekerroksia. Elektrodikalvot yhdessä eristekalvojen kanssa voidaan asettaa kennon sisälle joko pinotusti tai käämien. Kuvassa 5.2 on esitetty käämittyjen lieriö- ja särmiökenttien rakenteet.



Kuva 5.2. Kuvassa on esitettyä käämityt litiumionikennot. Lieriörakenne kuvataan vasemmalla ja särmiörakenne oikealla. (Linden & Reddy 2011, 26.3.1).

Litiumpolymeeriakku poikkeaa hieman tavallisesta litiumioniakusta, mutta se voidaan silti laskea kuuluvaksi litiumioniakkuihin. Litiumpolymeeriakuissa elektrodit ja elektrolyytti on korvattu polymeereillä. Litiumpolymeerikennossa ei tarvita erillistä erotinta, vaan polymeerinen elektrolyytti toimii myös erottimena. Kennojen kotelomateriaalina käytetään taipuisaa alumiinointua muovia. Litiumpolymeeriakun vahvuutena ovat keveys, muotoiltavuus ja hyvät turvallisuusominaisuudet. Paremmat turvallisuusominaisuudet johtuvat kiinteästä elektrolyytistä, joka takaa nestemäistä vankemman rakenteen. Lisäksi polymeerielektrolyytti ei sisällä liuottimia, jotka ovat herkästi syttyviä ja myrkyllisiä. Heikkoutena litiumpolymeeriakuilla muihin litiumioniakkuihin on alhaisempi huippuvirranantokyky. (Linden & Reddy 2011, 26.3.3)

Kuten aiemmin on todettu, litium on herkkä metalli reagoimaan. Tästä johtuen litiumioniakut tarvitsevat aina tuekseen BMS:n. Hyvällä akunhallintajärjestelmällä pystytään osittain korvaamaan epästabiilia käyttäytymistä lataus- ja purkaussykliä aikana sekä parantamaan turvallisuustekijöitä. BMS tuo akulle lisää hintaa ja se ei täysin paikkaa litiumioniakkujen turvallisuusriskejä. Litiumioniakkujen suorituskyky on erityisen heikko kylmissä olosuhteissa ja pakkasolosuhteissa lataaminen on akuille haitallista. Litiumioniakkujen hyvien ominaisuuksien kirjo on kuitenkin haittapuolia runsaampi. Litiumioniakkujen energia- ja tehotiheydet ovat omalla tasollaan verrattuna muihin kaupallisiin akkuteknologioihin. Saavutetut energiatiheydet sähköautoissa ovat parhaimmillaan hieman yli 200 Wh/kg ja laboratoriomittauksissa on saavutettu yli 250 Wh/kg arvoja hyödyntäen piianodeja (Vitins 2014). Litiumioniakkujen käyttöikä on 5-10 vuotta ja käyttösyklejä saadaan käytetystä teknologiasta riippuen 80 %:in kuormitusasteella jopa useita tuhansia. Litiumioniakkujen itsepurkautuvuus

on hyvin pientä ja nikkelpohjaisille akkuteknologioille tyypillistä muisti-ilmiötä ei esiinny. Litiumioniakkujen ympäristörasitetta voidaan pienentää akkujen uusiokäytöllä (Linden & Reddy 2011, 26)

Litiumionikemien ja -akkujen valmistajat joutuvat valitsemaan sähköautoissa käytettävän litiumioniteknologian turvallisuus ja käyttövarmuustekijät huomioiden. Näiden kriteerien jälkeen voidaan keskittyä energiatiheysominaisuuksien optimointiin unohtamatta kustannuksia. Litiumioniakkujen hinnat ovat jatkuvasti laskeneet ja akut maksavat tällä hetkellä halvimmillaan noin 200 €/kWh (Nykvist & Nilsson 2015). USABC:n minivaatimuksena on ollut alittaa 150 €/kWh:n raja. Tämä tulee toteutumaan suurella todennäköisyydellä litiumioniakkujen osalta ensi vuosikymmenen vaihteessa (Nykvist & Nilsson 2015; Canis 2013). Litiumioniakkuteknologian monipuolisuuden takia akkujen ominaisuuksia pystytään hyvin optimoimaan käyttötarkoitukseen sopiviksi vaihtelemalla kennomateriaaleja ja -rakenteita. Tämä on taannut sen, että litiumioniteknologia sopii hyvin käytettäväksi sekä täyssähköautoissa että pistokehybrideissä.

5.5 Litiumrikki

Litiumioniakkuteknologian rinnalla käydään kasvavaa kehitystyötä litiummetalliakkujen parissa. Metallipohjaisia litiumakkuja on ehditty testata sekä käyttää avaruus- ja armeijasovelluksissa ennen litiumioniakkuteknologian kehittymistä, mutta vakavat puutteet turvallisuustekijöissä eivät tuolloin mahdollistaneet metallipohjaisten litiumakkujen leviämistä yleiselle kaupallisuustasolle. Lupaavinta litiummetallipohjaista akkuteknologiaa edustaa litiumrikkiakku, josta on raportoitu ensimmäisen kerran jo vuonna 1979. Litiumrikkiakun teoreettinen ominaisenergia on 2500 Wh/kg, mikä on suurin verrattuna muihin vastaaviin litiummetalliakkuteknologioihin. Litiumrikkiakkuteknologiaa on kehitetty eteenpäin muutaman yrityksen sekä yliopiston voimin, ja kemien ominaisenergioita on saatu kasvatettua moninkertaisesti kehitysvuosien aikana. (Linden & Reddy 2011, 27.1)

Litiumioniakkuteknologialla on rajalliset mahdollisuudet kehittyä energiatiheysominaisuuksissa ja siksi korvaavan akkuteknologian tuominen sähköautomarkkinoille on tarpeellista. Litiumrikkiakulla on moninkertaisesti suurempi ominaisenergia verrattuna litiumioniakkuun. Litiumrikkiakku on edullinen valmistaa ja erilaiset valmistusmenetelmät voidaan toteuttaa hyvin pitkälle samalla tavalla kuin litiumioniakutkin. Rikki on materiaalina huomattavasti litiumioniakkujen katodeissa käytettäviä materiaaleja halvempaa, mikä nostaa rikin kaupallista potentiaalia. Litiumrikkiakku on toiminnaltaan sellainen, että se kykenee luonnostaan toimimaan turvallisesti ja vakaasti. Rikkiakkujen heikkoutena ovat alhaiset hyötysuhteet käytettäessä korkeita purkausvirtoja. Lisäksi rikkikemien energiakapasiteetit heikkenevät

kumulatiivisesti lataussykliä aikana, josta aiheutuvat vähäiset käyttösyklikestoisuudet. Energiakapasiteetin heikkeneminen johtuu siitä, että kaikki rikki ei palaudu latausvaiheessa alkuainerikin S_8 muotoon vaan osa rikistä menee sivureaktioihin, jossa litium yhdistyy rikin kanssa muodostaen erilaisia polysulfideja. (Johansson & Dominko 2013)

Litiumrikkikennot voidaan toteuttaa niin, että elektrolyytti on orgaanisessa nestemäisessä muodossa tai polymeerinä. Nestemäisillä elektrolyyteillä saavutetaan korkeammat ominaisenergiat, mutta ne ovat erittäin herkkiä aiemmin mainituille polysulfidireaktioille. Näitä reaktioita on pyritty torjumaan lisäämällä rikkikatodin sekaan hiiltä tai johtavia polymeerejä. Lisäksi elektrolyytin joukkoon on voitu lisätä erilaisia lisäaineita, kuten cesiumia passivoimaan litium-metallin pintaa, jotta polysulfidireaktioita ei pääsisi syntymään. Sekoitteiden sekä lisämateriaalien käytöllä litiumriikkiakkujen käyttösyklikestoa saatu parannettua, ja tällä hetkellä käyttösykleissä on saavutettu 500 syklin taso. (Guangmin 2015)

Litiumrikkikennoja on tällä hetkellä saatavilla usealta eri valmistajalta ja akkuja on kehitteillä myös sähköautosovelluksiin. Litiumriikkiakkuteknologian etuina ovat hyvä ominaisenergia, edulliset materiaalit verrattuna litiumioniteknologiaan, turvallisuus ja ympäristöystävällisyys. Litiumriikkiakut voidaan purkaa 100 %:en tyhjiksi, mikä mahdollistaa koko kapasiteetin hyödyntämisen (Canas 2014). Litiumriikkiakkuteknologian suurimmat rajoitteet ovat käyttösykliä kesto ja alhainen purkaushyötysuhde. Joidenkin valmistajien litiumrikkikennot, kuten OXIS Energy:n kennojen ominaisenergiat ovat parhaimpien litiumionikennojen tasolla ja syklikestot ovat lupaavalla 1500 syklin tasolla (OXIS Energy 2015).

5.6 Litiumilma-akku

Litiumilma-akku on tutkinta- ja kehitysasteella oleva akkuteknologia, jota kehitetään lähinnä sähköautosovelluksia varten. Ensimmäiset litiumilma-akut on kehitetty jo vuonna 1996 (Kraytsberg 2010). Litiumilma-akku kuuluu metalli-ilma-akkujen sarjaan, joista litiumilma-akku omaa suurimman potentiaalisen energiatiheyden suhteen. Litiumilma-akun teoreettinen ominaisenergia on moninkertainen litiumioniakkuun ja litiumriikkiakkuun verrattuna. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että litiumilma-akuilla varustetuilla sähköautoilla voidaan saavuttaa yli 800 km toimintasäde yhdellä latauksella (Mizuno 2010).

Suuri energiapotentiaali litiumilma-akun kohdalla selittyy sen toimintatavalla, joka poikkeaa merkittävästi aiemmin esitellyistä litiumakkuteknologioista. Litiumilma-akkujen rakenne ei ole suljettu, vaan akun katodille johdetaan ilmaa ympäristöstä. Tällaista ympäristön energiaa hyödyntävää akkua kutsutaan yleisesti virtausakuksi. Kun akun paino muodostuu lähinnä metallisesta litiumanodista ja elektrolyytistä, akusta saadaan tehtyä erittäin kevyitä.

Tästä puolestaan seuraa erittäin korkea akun ominaisenergia, joka voi käytännön tasolla olla jopa yli 1000 Wh/kg. (Kraytsberg 2010)

Litiumilma-akun reaktio litiumin ja hapen välillä voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla niin, että reaktioyhtälön lopputuotteena muodostuu joko litiumperoksidia tai litiumoksidia. Elektrolyytti voidaan toteuttaa joko vesipitoisena tai ilman vesipitoisuutta. Elektrolyytin olomuoto voi olla nestemäinen tai polymeerinen. Erilaisten elektrolyyttivaihtoehtojen ominaisuudet ovat kompromisseja korkean energiatiheyden ja käyttösyklikestoisuuden välillä. Akulle haitallisten ulkopuolisten ilmasta tulevien molekyylien kuten veden, typen ja hiilidioksidin suodattaminen on erittäin tärkeää ja lisäksi todella haasteellista. Ylimääräisten molekyylien pääsy akkukennojen sisälle aiheuttaa mm. korroosiota ja ei toivottuja sivureaktioita. Ylimääräisten molekyylien suodattamisen lisäksi on pidettävä huolta siitä, että elektrolyyttiä ei pääse karkaamaan kennojen ulkopuolelle, mikä tapahtuu helposti avoimen rakenteen ansiosta. Metalliset litiumanodit ovat sähkökemiallisesti hyvin epästabiileja, joten anodeihin tarvitaan huolellinen suojaus turvallisuuden varmistamiseksi. (Christensen 2011)

Kuten aiemmin on todettu, litiumilma-akkuihin liittyy monenlaisia haasteita, jotka vaativat lisää tutkimusta. Lisäksi ongelmia ovat aiheuttaneet litiumilma-akkujen lyhyet käyttösykkeliniät, jotka ovat vaihdelleet muutamasta kymmenestä syklistä parhaimmillaan reiluun sataan sykliin (Mizuno 2010, Christensen 2011). Cambridgen yliopisto on kuitenkin tuoreiden tutkimusten mukaan demonstroinut onnistuneesti litiumilma-akulle jopa 2000 käyttösykliä (Tao 2015). Litiumilma-akkuteknologian suurimpana etuna voidaan pitää sen suurta teoreettista energiatiheyttä. Jos teoreettinen potentiaali saadaan valjastettua litiumilma-akkujen osalta myös käytännön tasolle, niin että käyttösyklit ja turvallisuustekijät ovat vaaditulla tasolla, niin litiumilma-akut omaavat vahvan potentiaalilin tulla tulevaisuudessa vallitsevaksi akkuteknologiaksi täyssähköautoissa.

6. AKKUTEKNOLOGIOIDEN KEHITYS JA VERTAILU

Aiemmin tutkimuksessa on esitelty sähköautoissa käytettyjä akkuteknologioita sekä pari tulevaisuuden akkuteknologiavaihtoehtoa. Näiden akkuteknologioiden suorituskyvylliset ominaisuudet poikkeavat huomattavasti toisistaan ja lisäksi jokaisella akkuteknologialla on sille ominaisia erityispiirteitä. Vertailemalla akkuteknologioita keskenään saadaan käsitystä erilaisten akkujen todellisista eroista. Vertailuissa voidaan käyttää vertailupohjana sähköautoissa vallitsevaa litiumioniakkuteknologiaa. Lisäksi eri akkuteknologioiden ominaisuuksia voidaan peilata täyssähköautojen ja pistokehybridien asettamiin vaatimuksiin akuston suhteen, jolloin voidaan havaita puutteita ja haasteita eri akkuteknologioissa. Tarkastelemalla

akkuteknologioiden ominaisuuksien lisäksi niiden vaikutuksellisia aikakausia, saadaan selville akkujen ominaisuuksien kronologinen kehitys. Tällöin nähdään esimerkiksi akkujen ominaisenergioiden kehitys vuosien saatossa, josta voidaan mahdollisesti tehdä päätelmiä tulevaisuuden suhteen.

Tarkastellaan seuraavaksi akkuteknologioiden suorituskykyominaisuuksia ja niiden vastavuuksia USABC:n asettamiin tavoitteisiin sähköautojen akuston osalta. Akkujen tarkasteltavat ominaisuudet ovat ominaisenergia, tehottiheys, käyttösyklit 80 %:n syväpurkaustasolla ja käyttösyklit vuosissa. Ominaisuudet on esitetty akkuteknologiakohtaisesti USABC:n tavoitteiden kanssa taulukossa 6.1.

Taulukko 6.1 USABC:n akuston suorituskykytavoitteet ja sähköautojen akkuteknologioiden suorituskykyominaisuuksien arvot esitettynä taulukkomuodossa. (USABC:n tavoitteet: USABC 2015 (a), USABC 2015 (b)), (lyijyakku: Larminie 2003, s. 31-35; Linden 2011, 15.3), (NiCd: Larminie 2003, s. 37; Linden 2011, 19.4), (NiMH: Linden 2011, 22.6), (Li-ioni: Linden 2011, 26.4), (Li-ioni kehittyneet: Panasonic Battery Group 2012, Kane 2015, Ranard 2012; Linden 2011, 26.4), (Li-S: Linden 2011, 27.3; Guangmin 2015, OXIS Energy 2015), (Li-ilma: Kraysberg 2011, Mizuno 2010, Christensen 2011, Tao 2015, Johnson 2010)

USABC:n asettamat vaatimukset		Tarkasteltavat ominaisuudet	Akkuteknologiat						
PHEV vuodelle 2018	BEV vuodelle 2020		Väistyneet			Vallitsevat		Tulevat/tutkinta-asteella	
			Lyijyakku	NiCd	NiMH	Li-ioni	Li-ioni kehittyneet	Li-S	Li-ilma
100	235	Ominaisenergia [Wh/kg]	20-35	40-56	60-100	100-150	200-400	>350	>1000
320	470	Tehottiheys [W/kg]	<100	n. 125	n. 220	1000-4000 lyhyt pulssi	1000-4000 lyhyt pulssi	3000	400
5000	1000	Käyttösyklit (DoD 80 %)	700-1500	normaalisti 1200, >2000 mahdollinen	600-1200	500-4000	>500	500-1500 vuonna 2015	n. 100 vuosina 2010-2015, >2000 tulevaisuudessa
15	15	Käyttöikä vuosissa	5-6	15-25	10	>5, 20 mahdollinen	>5	?	?

Taulukossa 6.1 on eritelty väistyneet, vallitsevat sekä tulevat ja tutkinta-asteella olevat sähköautojen akkuteknologiat omissa värilohkoissaan ajallisen kehitystarkastelun helpottamiseksi. Kehittyneillä litiumioniakkuteknologioilla viitataan uusimpiin entistä suuremman ominaisenergian omaaviin litiumioniakkuihin ja lisäksi tulevaisuuden litiumioniakkuteknologioihin. Taulukon vasemmassa laidassa on ominaisuustavoitteet pistokehybrideille kohdistettuna vuodelle 2018 ja täyssähköautoille vuodelle 2020. Kehittyneiden litiumioni-, litiumrikki- ja litiumilma-akkuteknologioiden arvot ovat varsin epätarkkoja ja niihin tulee suhtautua kriittisesti. Näiden ominaisuuksien tarkastelussa on käytetty valmistajien ilmoittamia tietoja, yksittäisiä raporttituloksia ja tutkijoiden ilmoittamia arvioita. Ajallisten käyttöikä arvioiminen

litiumrikki- ja litiumilma-akkuteknologioiden kohdalla on erittäin vaikeaa olemassa olevan tiedon pohjalta, ja siksi niille ei ole annettu lainkaan arviota. Tarkasteltaessa kaikkien akkuteknologioiden arvoja, voidaan huomata ilmoitetuissa arvoissa suuria vaihteluvälejä. Suuret vaihteluvälit yksittäisten ominaisuuskohtien arvoissa johtuvat siitä, että akkuja voidaan optimoida hyvin eri tavoin ja yksittäinen akkuteknologia voidaan toteuttaa hyvinkin erilaisilla kemiallisilla sekä mekaanisilla ratkaisuilla, kuten tutkimuksessa on aiemmin todettu.

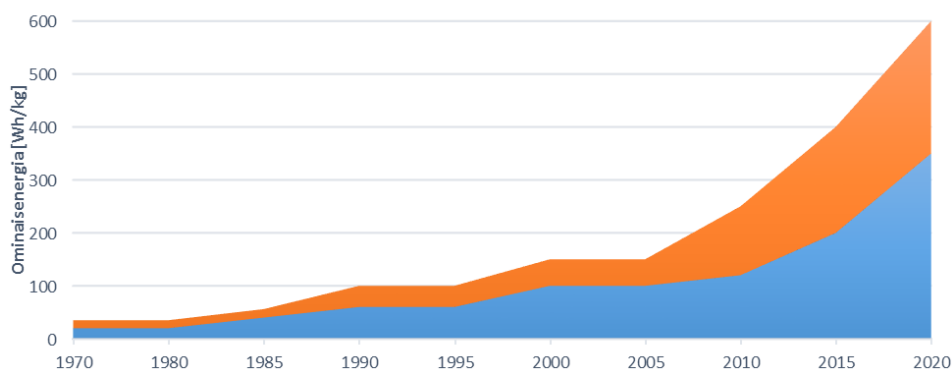
Tarkastellaan tarkemmin taulukkoon 6.1 saatuja tuloksia. Vertaamalla väistyneiden akkuteknologioiden ominaisuuksia annettuihin tavoitteisiin, voidaan havaita selviä puutteita erityisesti ominaisenergioissa ja tehosiheyksissä. Väistyneistä akkuteknologioista ainoastaan nikkelimetallihydridiakuilla olisi osittain mahdollista toteuttaa nykyaikainen pistokehybridi tarkasteltujen suorituskykyominaisuuksien osalta. Kun tarkastellaan litiumioniakkuteknologioita, nähdään selvää kehitystä ominaisenergioissa ja tehosiheyksissä. Uusimpien litiumioniakkujen ominaisenergiat ovat jopa kymmenkertaiset lyijyakkuihin verrattuna. Kehittyneiden litiumioniakkuteknologioiden ominaisenergiat ovat puolestaan 2-3 kertaa suurempia kuin niiden litiumioniakkuteknologioiden, joita on käytetty kaupallisesti 2010-luvun taitteessa olevissa sähköautoissa.

Akkujen käyttöiät eivät ole oikeastaan kasvaneet syklisesti tai ajallisesti nikkeliakkuteknologiasta siirryttäessä litiumakkuteknologiaan. Akkujen eliniät ovat pikemminkin tapauskohtaisia sekä syklisesti että ajallisesti tarkasteltuna. Kehittyneiden litiumioniakkuteknologioiden eliniät ovat jopa lyhentyneet aikaisemmin sähköautoissa käytetyistä litiumioniteknologioista, kun akkujen ominaisenergioita ja tehosiheyksiä on pyritty kehittämään äärimmilleen. Litiumioniakut saadaan kuitenkin kestäämään tuhansia syklejä ja ajallisesti jopa yli 20 vuotta, jos käytetään oikeanlaista akkukemiaa ja akku optimoidaan pitkälle käyttöiälle ominaisenergian ja tehosiheyden rajoittamisella.

Vertailtaessa litiumioniakkuteknologioita USABC:n asettamiin tavoitteisiin nähdään, että nykyisillä litiumioniakuilla voidaan täyttää ominaisenergia- ja tehosiheystavoitteet sekä pistokehybrideissä että täyssähköautoissa. Käyttösykliä kesto- ja ajalliset tavoitteet ovat litiumioniakkuteknologian kohdalla akkukohtaisia. Uusimpien litiumioniakkujen kohdalla, joita käytetään esimerkiksi Tesla Model S:ssä Panasonicin kennojen muodossa, saatetaan jäädä huomattavasti akun syklisestä ja ajallisesta käyttöikätaavoitteesta tarkasteltaessa Panasonicin kennojen teknisiä tietoja (Panasonic Battery Group 2012). Vaikka kyseessä on yksittäistapaus, voidaan asiasta tehdä joitain päätelmiä siihen suuntaan, että akkuvalmistajilla tulee olemaan edessään haasteita litiumionikennojen käyttöikänsä säilyttämisessä samalla, kun kennojen ominaisenergia ja tehosiheys pyritään maksimoimaan.

Tarkastelemalla taulukon 6.1 tulevia sähköautojen akkuteknologioita nähdään, että litiumrikkiakkuteknologialla on litiumioniakkuteknologiaa paremmat ominaisenergia- ja tehotiheysominaisuudet jo tällä hetkellä kennotasolla tarkasteltuna. Lisäksi litiumrikkiakkuteknologia omaa hyvän kehityspotentiaalin näiden ominaisuuksien osalta, toisin kuin litiumioniakkuteknologia. Litiumrikkiakuilla voidaan saavuttaa USABC:n täyssähköautojen käyttösyklikestotavoite vuodelle 2020, mutta pistokehybrideille asetettu vastaava tavoite vuodelle 2018 tulee todennäköisesti olemaan mahdoton. Litiumilma-akkuteknologia on toistaiseksi niin kehitys- ja tutkinta-asteella, että sen elinikä tarkastelu on pitkälti erilaisten arvioiden varassa, jotka perustuvat yksittäisiin laboratoriomittauksiin. Litiumilmakemenoille on laboratorioolosuhteissa saavutettu yli sadan syklin toistettavuuksia ilman kapasiteetin selkeää romahdamista. Ominaisenergiat litiumilma-akuilla ovat moninkertaiset litiumioniakkuihin verrattuna ja tehotiheysarvot ovat tyydyttävällä tasolla USABC:n tavoitteisiin nähden.

Tarkastellaan seuraavaksi sähköautoissa käytettyjen ominaisenergioiden kronologista kehitystä hyödyntäen taulukon 6.1 arvoja. Kuvasta 6.1 nähdään akkujen ominaisenergioiden ajallinen kehitys.



Kuva 6.1 Akkujen ominaisenergioiden kronologinen kehittyminen parhaimman käytettävissä olevan teknologian BAT mukaan. Sinisen alueen yläreuna kuvaa alinta kehitystasoa ominaisenergioissa ja oranssi alue kuvaa BAT vaihteluväliä. (Linden 15.1-29.2; Bazzi 2013)

Kuvan 6.1 ominaisenergioiden kehityskäyrät lähtevät 1970-luvulta, jolloin kaupallisten sähköautojen kehitystyö sai uuden sysäyksen öljykriisin seurauksena. Kehitystä on olemassa olevien tietojen pohjalta arvioitu nykyhetkestä vuoteen 2020. Taulukossa 6.1 ilmoitetut ominaisenergia-arvojen vaihteluvälit toimivat kuvaajan kehityskaarien herkkyysanalyysinä. Kuvaajasta nähdään, että ominaisenergioiden kehitys on ollut hidasta ja tasaista 1970-luvulta 2000-luvun alkuun asti, jonka jälkeen kehitys on nopeutunut huomattavasti litiumioniakkuteknologian käyttöönoton myötä. Kuvaajan perusteella voidaan todeta, että tarkastelujaksolla ei esiinny kuitenkaan suuria kehityspiikkejä, jonka perusteella ajoittain sähköautojen

yhteydessä uutisoitujen korkeiden ominaisenergioiden omaavien superakkujen nopea tuleminen markkinoille on epätodennäköistä.

7. YHTEENVETO/JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä on tutkittu täyssähköautoissa ja pistokehybrideissä käytettyjä akkuteknologioita. Tarkoituksena on ollut kartoittaa sähköautoissa käytettyjä akkuteknologioita ja tarkastella soveltuvia tulevaisuuden akkuteknologioita. Akkujen suorituskykyä ja muita ominaisuuksia on verrattu keskenään sekä sähköautojen asettamien akkuvaatimusten kanssa. Tutkimuksessa on huomattu, että tällä hetkellä erilaiset litiumioniakkuteknologiat vallitsevat sekä täyssähköautoissa että pistokehybrideissä. Sähköautojen toimintasäteen pitkälti määrittävät akkujen ominaisenergiatasot ovat jatkuvasti kasvaneet. Myös muissa tutkimuksessa tarkastelluissa suorituskykyominaisuuksissa on havaittu kehittymistä. Akkujen suorituskykyominaisuuksien kehitys on ollut hidasta ja tasaista viime vuosisadan lopulla lyijy- ja nikkeliakkuteknologioiden aikakaudella, mutta kehityksen huomataan nopeutuneen litiumioniakkuteknologian tultua sähköautoihin 2000-luvun alussa. Suorituskykyominaisuuksien lisäksi on tarkasteltu akkuja myös hieman muista näkökulmista paremman kokonaiskuvan saamiseksi. Sähköautoissa käytettyjen akkujen turvallisuustekijöiden on havaittu olevan kunnossa käytetyissä akkuteknologioissa, vaikka joillakin akkuteknologioilla on huomattu olevan luontaisia piirteitä epästabiilimmalle käyttäytymiselle käytön aikana. Ympäristötekijöiden tarkastelu on jätetty tutkimuksessa hieman taka-alalle, mutta akkuteknologiasta riippuen kaikkien käytettyjen akkujen ympäristöhaittoja on pyritty pienentämään joko kierrätysellä tai uusiokäytöllä.

USABC:n asettamat tavoitteet pistokehybridien ja täyssähköautojen akustoille lähivuosille voidaan saavuttaa jo osittain uusimmalla olemassa olevalla akkuteknologialla. Jos akkujen kehitys jatkuu samanlaisena lähivuosina, niin USABC:n tavoitteet tullaan saavuttamaan kokonaan asetettuihin määräaikoihin mennessä. Lähitulevaisuudessa muutaman vuoden sisällä litiumrikkiakkuteknologiasta voidaan odottaa korvaajaa litiumioniakkuteknologialle, koska litiumrikkiakkujen ominaisenergiatasot ovat litiumioniakkuja huomattavasti parempia ja litiumrikkiakku voidaan valmistaa huomattavasti edullisemmin johtuen rikin edullisuudesta. Lisäksi litiumrikkiakkujen muut suorituskykyominaisuudet ovat hyvin tasapainossa ja litiumrikkikennoja on jo nyt kaupallisesti saatavilla. Myös litiumioniakkujen ominaisenergiatasoja voidaan vielä kehittää, mutta kehitysmahdollisuudet ovat rajalliset. Litiumrikkiakkuteknologian lisäksi litiumilma-akkuja kehitetään jatkuvasti sähköautosovelluksia varten. Litiumilma-akkujen ominaisenergiatasot ovat litiumrikkiakkujakin huomattavasti paremmat, mutta muiden suorituskykyominaisuuksien kehittäminen tarvitsee vielä paljon tutkimus- ja

kehitystyötä. Jos litiumilma-akkuihin liittyvät ongelmat onnistutaan ratkaisemaan, tulee litiumilma-akkuteknologia mullistamaan sähköautoteollisuuden tulevaisuudessa. Tämä voisi tapahtua alan asiantuntijoiden mukaan aikaisintaan kymmenen vuoden kuluttua.

Tutkimuksen pohjalta voidaan tehdä johtopäätöksiä siihen suuntaan, että sähköautot voivat kaupallistua laajemmin lähivuosina akkujen suorituskykyominaisuuksien parantuessa, joista erityisesti akkujen alhaisia ominaisenergioita on pidetty ongelmallisena. Suorituskykyominaisuuksien kehittyminen tulee todennäköisesti johtamaan siihen, että täyssähköautot yleistyvät enemmän ja pistokehybridit tulevat jäämään sähköautojen välivaiheeksi. Uusien akkuteknologioiden käyttöönotto kaupallisiin sähköautoihin voi viedä odotettua kauemmin, sillä akut tarvitsevat huolellista testausta ja käyttöönotto edellyttää, että kaikki ominaisuudet ovat vaaditulla tasolla.

Akkujen hintojen voidaan odottaa laskevan, sillä akkujen tuotantomäärät tulevat kasvamaan sähköautojen määrän kasvaessa. Lisäksi lähitulevaisuudessa siirtyminen litiumioniakuista litiumrikkiakkuihin laskisi kustannuksia, koska litiumrikkiakkujen valmistaminen on huomattavasti halvempaa, kuten tutkimuksessa on aiemmin todettu. Akkujen yleiseen hintakehitykseen tulee kuitenkin vaikuttamaan raaka-aineena käytettävän litiumin hinnan kehitys, joka riippuu litiumin saatavuudesta ja tuotantomääristä. Litium-varannot tulevat riittämään maapallolla ainakin sadaksi vuodeksi eteenpäin, vaikka sähköautojen laaja kaupallistuminen tapahtuisi nopeasti litiumakkuteknologioilla (Gruber 2011). Tästä voidaan päätellä, että vaikka litiumin hinta hieman nousisi tuotantomäärien nousun myötä, niin suurten hintapiikkien tapahtuminen lähivuosien aikana on epätodennäköistä. Akkujen suorituskykyominaisuuksien kehittymisen voidaan olettaa jatkossa hieman nopeutuvan, koska sähköautojen kaupallistumisen myötä akkuja kehitetään entistä enemmän juuri sähköautosovelluksiin. Tämä puolestaan johtaa siihen, että akuissa tullaan painottamaan juuri niitä tärkeimpiä ominaisuuksia sähköautojen kannalta. Lisäksi autovalmistajat ovat valmiita laittamaan jatkuvasti enemmän rahaa akkututkimuksiin ja tuotekehitykseen.

Akkujen kehitys on tällä hetkellä hyvin nopeaa ja tutkimustyötä käydään hyvin laajasti, kun sähköautomarkkinat ja niiden kautta myös akkumarkkinat nähdään houkuttelevana sijoituskohteena. Uutta tietoa tuoreimmista akkuteknologioista saadaan jatkuvasti, mutta tieto on hyvin pitkälti vain valmistajien saatavilla. Lisäksi ainoastaan valmistajilta saatavaan tietoon tulee suhtautua kriittisesti ja varauksin. Uusinta tutkimustietoa julkaistaan myös erilaisissa raporteissa mm. konferenssien yhteydessä, mutta nämä tiedot on tarkoitettu lähinnä yrityksille ja luovutetut tutkimusraportit ovat kalliita. Tähän tutkimukseen on onnistuttu keräämään jonkin verran aineistoa myös tulevaisuuden akkuteknologioista laajan lähdeaineiston avulla. Saatua tietoa ei kuitenkaan ole yhtä luotettavaa kuin tähän asti käytettyjen akkuteknologioiden

kohdalla, joten tulokset ovat tältä osin suuntaa antavia ja niihin on suhtauduttava varauksin. Eri akkuteknologioiden välillä tehtävä tarkempi suorituskykyvertailu ei ole järkevää, sillä akuissa on suuriakin eroja, vaikka ne edustaisivat samaa akkuteknologiaa. Tutkimuksen teoriaosiossa on pyritty avaamaan syitä näihin eroavaisuuksiin. Tutkimuksessa on onnistuttu tekemään suuntaa antavaa vertailua rajattujen suorituskykyominaisuuksien puitteissa ja ominaisuuksia on saatu verrattua USABC:n lähivuosien tavoitearvoihin, joita tässä tutkimuksessa on pidetty vaatimustasoreferenssinä.

Sähköautojen akkuihin kohdistuvaa tutkimusta on tärkeää tehdä kaikista mahdollisista näkökulmista paremman kokonaiskuvan saamiseksi. Tämän tutkimuksen päänäkökulmaksi on valittu akkujen suorituskykyominaisuudet. Näistä ominaisuuksista tutkimuksen lähtökohteisesti suurimpana haasteena akkujen suorituskyvyn kannalta pidetyt ominaisenergiatasot eivät tulevaisuudessa välttämättä ole akkujen suurin ongelma, vaan suurin kehitysaskel on otettava akkujen eliniän kestoissa, johon on syytä kiinnittää jatkossa huomioita, kun kehitetään äärimmäisiä energiaominaisuuksia omaavia akkuja. Uusien akkuteknologioiden tutkiminen sähköautojen asettamissa vaativissa toimintaolosuhteissa on jatkossa tärkeää, jotta akkuteknologia voidaan ottaa kaupallisesti käyttöön. Tulevaisuudessa akkuteknologia on kehittymässä entistä enemmän litiumpainotteisemmaksi, jolloin myös muiden vaihtoehtoisten materiaalien tutkiminen akkuteknologioissa on tärkeää, jotta voidaan taata kestävä kehityksen periaatteet sähköautojen akuissa. Lisäksi on hyvä kartoittaa lisää sovelluskohteita sähköautoissa käytettävien korkean energiakapasiteetin omaaville akuille akkumarkkinoiden sekä akkututkimuksen vauhdittamiseksi.

LÄHTEET

Anthony Sebastian 2014. Extreme Tech. At long last, new lithium battery tech actually arrives on the market (and might already be in your smartphone). [verkkodokumentti]. [viitattu 5.4.2014]. <http://www.extremetech.com/extreme/174477-at-long-last-new-lithium-battery-tech-actually-arrives-on-the-market-and-might-already-be-in-your-smartphone>

Battery University 2015 (a). Nickel-based Batteries. [verkkodokumentti]. [viitattu 14.3.2015]. http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries/1

Battery University 2015 (b). Lithium-based Batteries. [verkkodokumentti]. [viitattu 4.4.2015]. http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries

Bazzi Ali M. 2013. Electric Machines and Energy Storage Technologies in EVs and HEVs for Over a Century. Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE International, Chigago, USA, May 12-15, s. 212-219.

Biomeri Oy 2009. Sähköajoneuvot Suomessa – selvitys. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.2.2015]. http://www.tem.fi/files/24099/Sahkoajoneuvot_Suomessa-selvitys.pdf

Bratsch Steven G. 1988. Standard Electrode Potentials and Temperature Coefficients in Water at 298.15 K. [verkkodokumentti]. [viitattu 4.4.2015]. <http://www.nist.gov/data/PDFfiles/jpcrd355.pdf>

Canas Natalia, Fronczek David, Wagner Norbert, Latz Arnulf, Friedrich K. 2014. Experimental and Theoretical Analysis of Products and Reaction Intermediates of Lithium–Sulfur Batteries. The Journal of Physical Chemistry Article. Ulm & Stuttgart, Germany. April 19. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.10.2015]. http://www.researchgate.net/publication/263039974_Experimental_and_Theoretical_Analysis_of_Products_and_Reaction_Intermediates_of_LithiumSulfur_Batteries

Canis Bill 2013. Battery Manufacturing for Hybrid and Electric Vehicles: Policy Issues. CRS Report for Congress. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.4.2015]. <https://fas.org/sgp/crs/misc/R41709.pdf>
Christensen Jake, Albertus Paul, Sanchez-Carrera Roel S., Lohmann Timm, Kozinsky Boris, Liedtke Ralf, Ahmed Jasim, Kojie Aleksandar 2011. Journal of The Electrochemical Society 159 R1-R30 (2012). A Critical Review of Li/Air Batteries. The Electrochemical Society.

Davide Andrea 2010. Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs. Artech House.

Electropaedia 2005 (a). Battery and Energy Technologies. Nickel Cadmium Batteries [verkkodokumentti]. [viitattu 11.3.2015]. <http://mpoweruk.com/nicad.htm>

Electropaedia 2005 (b). Battery and Energy Technologies. Nickel Metal Hybride Batteries. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.2.2015]. <http://www.mpoweruk.com/nimh.htm>

Gruber Paul W., Medina Pablo A., Keoleian Gregory A., Kesler Stephen E., Everson Mark P., Wallington Timonhy J. 2011. Global Lithium Availability - A Constant for Electric Vehicles?. Journal of Industrial Ecology, Vol. 15, No. 5.

Hämeenoja Eeva 1993. Akkuopas. Espoo. Erkki Ahlavo oy.

Johansson Patrik, Dominko Robert 2013. Eurolis – European lithium Sulphur cells for automotive applications. IEEE EVS27, Symposium, Barcelona, Spain. November 17-20. S. 1-3.

Johnson Lonnie 2010. The Viability of High Specific Energy Lithium Air Batteries. Excellatron Solid State LLC. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.12.2015]. https://web.ornl.gov/ccsd_registrations/battery/presentations/Session4-350-Johnson.pdf

Kalhammer Fritz R., Kopf Bruce M., Swan David H., Roan Vernon P., Walsh Michael P. 2007. Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology. Report of the ARB Independent Expert Panel. State of California Air Resources Board, Sacramento, California April 13.

Kane Mark 2015. Tesla Model S, Model X and Gen 3: 2 Billion Lithium-Ion Battery Cells Deployment Graph. Inside EVs. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.12.2015] <http://insideevs.com/2-billion-lithium-ion-battery-cells-deployment-graph/>

Kraytsberg Alexander, Ein-Eli Yair 2010. Journal of Power Sources 196. 886-893 (2011). Review on Li-air batteries—Opportunities, limitations and perspective. Elsevier B.V.

Kupiainen Tuomo 2013. Sähköautojen testausprotokollat. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.11.2015]. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/71026/978-952-6602-58-5.pdf?sequence=1>

Larminie James, Lowry John 2003. Electric Vehicle Technology Explained. John Wiley & Sons, Ltd., The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.

Linden David, Reddy Thomas B. 2011. Linden's Handbook of Batteries. Fourth Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc.

Liu Tao, Leskes Michael, Yu Wanjing, Moore Amy J., Zhou Lina, Bayley Paul M., Kim Gunwoo, Grey Clare P. 2015. Cycling Li-O₂ batteries via LiOH formation and decomposition. Department of Chemistry, University of Cambridge, Cambridge, UK. Science AAAS, October 30, 2015, s. 530-533.

Luonnonturvakeskus 2013. Raskasmetallilaskeuma. Kadmium. [verkkodokumentti]. [viitattu 14.3.2015]. <http://www.metla.fi/metinfo/metsienterveys/raskasmetalli/kartta-kadmium.htm>

MIT Electric Vehicle Team 2008. A Guide to Understanding Battery Specifications. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.2.2015] http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf

Mizuno Fuminori, Nakanishi Shinji, Kotani Yukinari, Yokoishi Shoji, Iba Hideki 2010. Rechargeable Li-Air Batteries with Carbonate-Based Liquid Electrolytes. Battery Research Division, Toyota Motor Corporation Higashifuji Technical Center. Mishuku, Susono, Shizuoka, Japan, January 12.

Motiva Oy 2013. Ajoneuvotekniikka – Akut. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.2.2015] http://www.motiva.fi/liikenne/henkiloautoilu/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut

Nykvist Björn, Nilsson Måns 2015. Falling battery prices boost outlook for electric vehicles. [verkkodokumentti]. [viitattu 7.4.2015]. <http://www.rtcc.org/2015/03/23/falling-battery-prices-boost-outlook-for-electric-vehicles/>

OXIS Energy 2015. Long Life Lithium Sulfur Pouch Cell. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.12.2015] http://oxisenergy.com/uploads/OXIS_Li-S_Long_Life_Cell_v2.5.pdf

Panasonic Battery Group 2012. Panasonic NCR18650B Datasheet. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.12.2015]. <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/597043/PANASONICBATTERY/NCR18650B.html>

Rahn Christopher D., Wang Chao-Yang 2013. Battery Systems Engineering. John Wiley & Sons, Ltd.

Ranard Douglas 2012. Verification and Validation of Prototype Cells From Envia Systems. Commanding Officer, Naval Surface Warfare Center, Crane Division, Department of The Navy. 28 Juny 2012. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.12.2015]. <https://www.documentcloud.org/documents/929350-us-navys-test-summary-for-the-arpa-e-envia.html>

USABC 2015 (a). USABC Goals for Advanced Batteries for EVs - CY 2020 Commercialization. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.10.2015] http://www.uscar.org/commands/files_download.php?files_id=364

USABC 2015 (b). USABC Goals for Advanced Batteries for PHEVs for FY 2018 to 2020 Commercialization. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.10.2015] http://www.uscar.org/commands/files_download.php?files_id=365

USCAR 2015. U.S. Advanced Battery Consortium LLC. [verkkodokumentti]. [viitattu 28.10.2015]. <http://www.uscar.org/guest/teams/12/U-S-Advanced-Battery-Consortium-LLC>

U.S. Department of Energy 2015. Batteries for Hybrid and Plug-In Electric Vehicles. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.2.2015]. http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html

Vitins Girts 2014. High Specific Energy Li-ion Cells with Si Anodes for EV Batteries. UK Energy Storage Conference. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.4.2015]. <http://ukenergystorage.co/2014/assets/downloads/presentations/g-vitins.pdf>

Y.-S. Park, H. J. Bang, S.-M. Oh, Y.-K. Sun, S.-M. Lee 2009. Journal of Power Sources 190. 553–557 (2009). Elsevier B.Y.

Zhou Chengke, Qian Kejun, Allan Malcolm, Zhou Wenjun 2011. Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 26, No. 4, December 2011.

Zhou Guangmin, Paek Eunsu, Gyeonng S. Hwang, Mantriam Arumugam 2015. Long-life Li/poly-sulphide batteries with high sulphur loading enabled by lightweight. Nature Communications Article. July 17. [verkkodokumentti]. [viitattu 6.10.2015]. <http://www.nature.com/ncomms/2015/150717/ncomms8760/pdf/ncomms8760.pdf>