

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

2023

Jarno Hakala

LI-ION AKUSTOJEN RAKENNE JA KEHITTYMINEN SÄHKÖISTYVÄSSÄ LIIKENTEESSÄ



Opinnäytetyö AMK | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

Syyskuu 2023 | 34 sivua

Jarno Hakala

Li-ion akustojen rakenne ja kehittyminen sähköistyvässä liikenteessä

Tämän opinnäytetyön aiheena on Li-ion akustojen rakenne ja niiden kehittyminen sähköistyvässä liikenteessä. Työn tarkoituksena on perehtyä erilaisiin Li-ion akkukemioihin, akkujen toimintaan, valmistusprosesseihin sekä pohtia mahdollisia tulevaisuuden parempia akkuratkaisuja. Työ on luonteeltaan kirjallisuuskatsaus. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi on tuotu myös esille insinöörin luovuutta suunnittelemalla sähköauton akkupaketin runkorakenne.

Opinnäytetyön alussa käsitellään lyhyesti Li-ion akkujen historiaa, jonka jälkeen perehdytään itse akun toimintaperiaatteeseen. Tämän jälkeen tuodaan esille erilaisia akun mitoitus ja laskentakaavoja, jotka kaikki pohjautuvat Ohmin lain ympärille. Työn lopussa perehdytään Li-ion akkujen valmistusprosessiin tehdasympäristössä sekä käytettyjen akkujen kierrätysmahdollisuuksiin ja tulevaisuuden parempiin akkuratkaisuihin.

Opinnäytetyössä voidaan todeta, että Li-ion akut ovat tänäkin päivänä paras vaihtoehto esimerkiksi sähköautojen energianlähteenä. Tulevaisuudessa tulee olemaan vieläkin parempia Li-ion akkukemioita, joilla on suurempi energiakapasiteetti kuin nykyisillä akuilla. [Click here to enter text.](#)

Asiasanat:

Li-ion, akku, akkukemio, akkumoduuli, akkupaketti

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

September 2023 | 34 pages

Jarno Hakala

The structure and development of Li-ion batteries in electrified traffic

The topic of this thesis is the structure of Li-ion batteries and their development in electrified traffic. The purpose of this paper is to learn about various Li-ion battery chemistries, how batteries work, manufacturing processes, and to think about possible better battery solutions for the future. This is done in the form of a literature review. Additionally, the creativity of the engineer is highlighted in the design of the frame structure of the electric car's battery pack.

At the beginning of the thesis, the history of Li-ion batteries is briefly discussed, after which the working principle of the battery itself is introduced. After this, various battery sizing and calculation formulas are introduced, all of which are based around Ohm's law. At the end of the work, we will familiarize ourselves with the manufacturing process of Li-ion batteries in a factory environment, as well as the recycling possibilities of used batteries and better battery solutions in the future.

From this thesis it can be deduced that, with current technology, Li-ion batteries are the best alternative as an energy source, for example, for electric cars. In the future, there will be even better Li-ion battery chemistries with a higher energy capacity than current batteries.

Keywords:

Li-ion, battery, battery cell, battery module, battery pack

Sisältö

1 Johdanto	7
2 Li-ion akkujen historia	8
2.1 Akut nykyään	8
2.2 Sähköautojen akut ja niiden valmistajia	10
3 Li-ion akun toimintaperiaate	12
3.1 Akun lataus ja purkaminen	13
3.2 Pikalataus	15
3.3 Akun soveltuvuudet eri käyttökohteisiin	15
3.4 Li-ion akun edut ja haitat	16
4 Akun mitoitus ja laskentakaavat	18
4.1 Ohmin laki	18
4.2 Akkukennojen määrä	18
4.3 Energiamäärän laskenta	19
4.4 Akkuteho	19
4.5 Maksimi jatkuva varauksen purku	19
4.6 Akun maksimi latausjännite	20
5 Li-ion akkujen valmistus tuotantolinjalla	21
5.1 Turvallisuus akkujen valmistuksessa	21
5.2 Tyypillinen valmistusprosessi	21
5.3 Laadunvarmistuksen menetelmät ja strategiat	25
5.4 Käsittely ja varastointi	25
6 Li-ion akkujen heikkeneminen	26
6.1 Akun lämmönhallinnan merkitys kestävyYTEEN	28
6.2 Akkujen kierrätettävyyys	29
6.3 Tulevaisuuden akkuratkaisut	30
7 Akkupaketin runkorakenteen suunnittelu	32
8 Loppupohdinnat	34

Liitteet

Liite 1. Kurssimateriaali opinnäytetyöstä

Kaavat

Kaava 1. Esimerkki anodin sähkökemiallisesta reaktiosta.	14
Kaava 2. Esimerkki katodin sähkökemiallisesta reaktiosta.	14
Kaava 3. Ohmin laki	18
Kaava 4. Akkukennojen määrä.	18
Kaava 5. Energiamäärän laskenta.	19
Kaava 6. Akkuteho.	19
Kaava 7. Maksimi jatkuva varauksen purku.	19
Kaava 8. Akun maksimi latausjännite.	20

Kuvat

Kuva 1. Sähköautojen akkujen valmistajien vuotuiset myynnit (Fink 2022).	10
Kuva 2. Tesla Model S ja sen akusto (Wikimedia 2012).	11
Kuva 3. Akkukennoja yhdistämällä muodostetaan akkumoduuleita (Bend 2019).	12
Kuva 4. Li-ion akun havainnekuva (Wen ym. 2017).	13
Kuva 5. Lieriömäisen akkukennon valmistusprosessi (Heimes ym. 2019).	22
Kuva 6. Itse suunniteltu sähköauton akkupaketin runkorakenne.	32

Taulukot

Taulukko 1. Li-ion akkujen kierrätysmetodien vertailu (Steward ym. 2019). 29

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

BMS	Battery Management System.
BTMS	Battery Thermal Management System.
C-arvo	Arvo, joka kertoo, että kuinka nopeasti akku voidaan ladata tai purkaa.
CTP	Cell To Pack.
Dendriitti	Nestemäisestä aineesta sen jähmettyessä ensimmäisenä muodostuva puumainen kide.
EOL	End Of Life.
Li-ion	Litiumioni.
Li-S	Litiumrikki.
Memory effect	Toistuvassa lataus- ja purkaussyklissä akku ”muistaa” matalan kapasiteettitason.
OCV	Open Circuit Voltage.
PCM	Phase Change Material.
SEI	Solid Electrolyte Interface.
Shuttle Chair	Litiumionien kulkeminen katodin ja anodin välillä elektrolyyttiä pitkin.

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä Li-ion akustojen rakenteisiin sekä tuoda myös esille niiden mahdollisia ratkaisuja yhä enemmän sähköistyvässä liikenteessä. Esimerkiksi autovalmistajat joutuvat kansainvälisten lainsäädäntöjen pohjalta vaihtamaan polttomoottoristen autojen tuotannon sähköautojen valmistukseen, jonka seurauksena myös Li-ion akkujen kysyntä kasvaa huimasti. Sähköistyvän liikenteen yleistyessä, opinnäytetyössä pyritään lisäksi myös pohtimaan mahdollisia parempia tulevaisuuden akkuratkaisuja sekä niiden kierrätettävyyttä, sillä tällä hetkellä akkujen valmistus tuottaa merkittävästi ympäristöhaittoja.

Työ suoritetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa syvennyttään erinäisiin litiumioniakkuteknikoihin liittyviin tieteellisiin artikkeleihin ja julkaisuihin. Opinnäytetyössä käsitellään muun muassa Li-ion akkujen toimintaperiaatteita, valmistusta, erinäisiä laskenta- ja mitoituskaavoja sekä akustojen heikkenemistä.

2 Li-ion akkujen historia

Ensimmäisten Li-ion akkujen kehitys alkoi tunnetusti vuonna 1976, kun Exxon nimisessä yrityksessä työskennellyt Whittingham raportoi uudelleen ladattavasta akusta. Tämä ensimmäinen litiumioniakku muodostui titaniumsulfidi (TiS_2) päällysteisestä katodista ja metallisesta litiumanodista (Li). Exxon yritti kaupallistaa uutta keksintöään, siinä kuitenkin onnistumatta. (Deng 2015.)

Vuonna 1987 japanilainen Yoshino kehitti patentin sekä rakensi akkukennon prototyypin, jossa on hiilipohjainen anodi ja varaukseton LiCoO_2 katodi. Näistä materiaaleista valmistettu anodi ja katodi ovat vakaita ilman kanssa, joka teki kyseisestä akkuratkaisusta turvallisen valmistaa. Yoshino suoritti myös ensimmäisiä turvallisuustestejä Li-ion akuille pudottamalla metallisen kappaleen akkukennoihin. Li-ion akku ei syttynyt tavalliseen tapansa palamaan, toisin kuin mitä muilla metallisilla litiumioniakuilla kävi. Yoshinon luoma uusi akkuratkaisu oli merkittävä kehitysaskel Li-ion akkujen laajaan valmistukseen 1990-luvun alussa. (Deng 2015.)

Paljon ei mennyt aikaakaan, kun vuonna 1991 maailman johtava henkilökohtaisten elektroniikkalaitteiden valmistaja Sony toi markkinoille uuden Li-ion akkuratkaisun, joka tulisi mullistamaan elektroniikkalaitteiden kehityksen sekä myöhemmin myös sähköautojen. (Deng 2015.)

2.1 Akut nykyään

Monen vuoden tutkimuksen ja kehityksen myötä Li-ion akkuperhe muodostuu monesta erilaisesta akkukennojen kemioista. Nykyään on olemassa monta eri vaihtoehtoa materiaaleille, joita käytetään nykypäivän litiumioniakun positiivisessa ja negatiivisessa elektrodissa, elektrolyytissä sekä separaattorissa. (Yu ym. 2019.)

Positiivinen elektrodi

- LiCoO_2 (Litiumkobolttioksidi)
- LiNiO_2 (Litium-nikkelioksidi)
- LiMn_2O_4 (Litiummangaanioksidi)
- LiFePO_4 (Litium-rautafosfaatti)
- $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y})\text{O}_2$ (Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi)
- $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y})\text{O}_2$ (Litium-nikkeli-kobolttialumiinioksidi)

Negatiivinen elektrodi

- Hiilipitoinen (Carbon Based Electrodes)
- $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (Litiumtitanaatti)
- Litiummetalli (Lithium Metal)
- Metalliseospohjaiset elektrodit (Alloy Based Electrodes)
- Piipohjaiset elektrodit (Silicon Based Electrodes)
- Muunnoselektrodit (Conversion Electrodes)

Tällä hetkellä yleisimmät negatiivisen elektrodin materiaalit ovat hiilipitoinen- sekä litiumtitanaattielektrodi. Loppuja, muita materiaaleja kehitetään vielä.

Elektrolyytit

- Vesipitoiset elektrolyytit (Aqueous Electrolytes)
- Orgaaniset nestemäiset elektrolyytit (Organic Liquid Electrolytes)
- Polymeerielektrolyytit (Polymer Electrolytes)
- Keraamiset elektrolyytit (Ceramic Electrolytes)

2.2 Sähköautojen akut ja niiden valmistajia

Ekologisista, poliittisista ja kaupallisista syistä polttomoottoriautojen valmistajat joutuvat kääntämään katseensa yhä enemmän kohti sähköautojen suunnittelua ja tuotantoa. Tällä hetkellä maailman viisi suurinta sähköautojen valmistajaa ovat Tesla, BYD, GM, Volkswagen ja Hyundai. Yritykset, jotka ovat valmistaneet jo monta vuotta pienemmän koon Li-ion akkuja kodin pienenElektroniikkaan, keskittyvät myös tänä päivänä sähköautojen akkujen valmistamiseen. (Pelegov & Pontes 2018.)

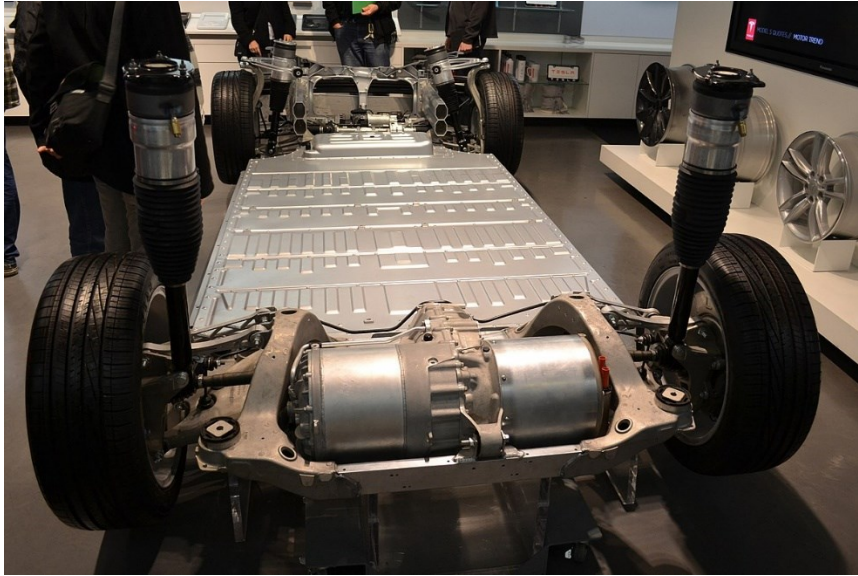
*Annual cumulative global battery usage for electric vehicles (Unit: GWh)						
Rank	Manufacturer Name	Jan-June 2021	Jan-June 2022	Growth Rate	2021 Share	2022 Share
1	CATL	32.9	70.9	115.60%	28.60%	34.80%
2	LG Energy Solutions	27.3	29.2	6.90%	23.80%	14.40%
3	BYD	7.9	24	206.20%	6.80%	11.80%
4	Panasonic	17.3	19.5	12.50%	15.00%	9.60%
5	SK Innovation	6.2	13.2	114.40%	5.30%	6.50%
6	Samsung SDI	6.6	10	50.60%	5.80%	4.90%
7	CALB	3.3	8.4	152.70%	2.90%	4.10%
8	GUOXUAN	2.2	5.8	165.00%	1.90%	2.90%
9	Sunwoda	0.4	3.1	663.30%	0.40%	1.50%
10	SVOLT	1	2.6	147.10%	0.90%	1.30%
	Other	10.00	16.8	68.10%	8.70%	8.20%
	Total	115.1	203.4	76.80%	100.00%	100.00%
*There are some countries where armature sales are not aggregated, and 2021 data excludes non-aggregated country data						
Source: Global EV and Battery Monthly Tracker, SNE Research						

Kuva 1. Sähköautojen akkujen valmistajien vuotuiset myynnit (Fink 2022).

Sähköautolla on korkeajännitteinen akku, joka muodostuu tyypillisesti sadoista tai jopa tuhansista akkukennoista, jotka taas muodostavat akkumoduuleita. Akkumoduuleita kytkemällä sarjaan ja rinnan voidaan säädellä niiden synnyttämän jännitteen ja virran suuruutta. Mitä enemmän akkumoduuleita sähköautossa on käytössä, niin sitä suurempi kapasiteetti ja toimintamatka sillä on. Nykyaikaisen älypuhelimien Li-ion akun kapasiteetti on 10-20Wh, kun taas ladattavan sähköauton akulla se on 10-100 kWh, joka on 1000-5000 kertaa suurempi kuin puhelimen akulla. (Pelegov & Pontes 2018.)

Sähköautojen akkujen myynnin uskotaan kasvavan 17 miljardista dollarista 98 miljardiin dollariin vuosien 2019 ja 2028 aikana. Vuonna 2022 kiinalaiset akkuvalmistajat vastasivat 56% maailman myynnistä, jonka jälkeen tulevat

korealaiset (26%) sekä japanilaiset yhtiöt (10%). Tällä hetkellä maailman kymmenen johtavaa sähköautojen akkuvalmistajaa ovat CATL, LG Energy Solutions, BYD, Panasonic, SK On, Samsung SDI, CALB, Guoxuan, Sunwoda sekä SVOLT. CATL on näistä suurin akkuvalmistaja ja se tuottaa Li-ion akkuja Teslalle, Peugeotille, Hyundaiille, Hondalle, BMW:lle, Toyotalle, Volkswagenille ja Volvolle. (Venditti 2022.)



Kuva 2. Tesla Model S ja sen akusto (Wikimedia 2012).

3 Li-ion akun toimintaperiaate

Li-ion akku muodostuu kytkemällä akkukennoja sarjaan ja rinnan tai niiden yhdistelmällä. Kytkemällä akkukennoja rinnan kasvatetaan sähkövirtaa (A) ja kytkemällä sarjaan kasvatetaan jännitettä (V). Akkukennoja yhdistämällä muodostetaan akkumoduuleita ja akkumoduuleita yhdistämällä muodostetaan taas akkupaketteja. Esimerkiksi Teslan akkupaketti koostuu 7104 akkukennosta. (Deng 2015.)



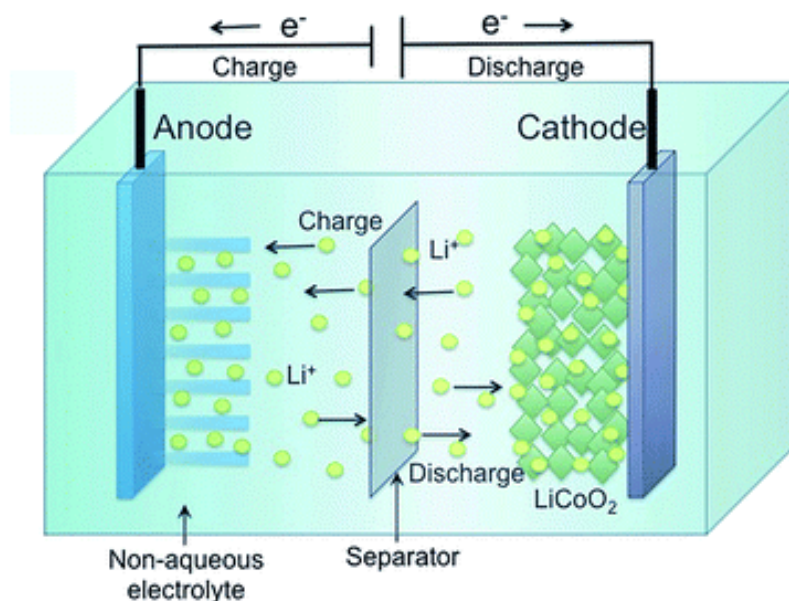
Kuva 3. Akkukennoja yhdistämällä muodostetaan akkumoduuleita (Bend 2019).

Akkukenno koostuu katodista ja anodista. Katodi on positiivinen elektrodi ja anodi on negatiivinen elektrodi. Katodia ja anodia yhdistää niiden välissä oleva elektrolyytti, jota pitkin positiivisesti varautuneet litiumionit (Li^+) kulkevat.

Elektrodit erotetaan toisistaan separaattorin avulla, joka mahdollistaa vain litiumionien molemmiin suuntaisen läpikäymisen elektrodien välillä mutta ei itse elektronien (e^-). Separaattori koostuu normaalisti mikrohuokoisesta polymeerikalvosta. Elektrolyytti on tavallisesti nestemäistä, mutta nykyään on myös kehitteillä polymeeri-, geeli- ja keraamielektrolyyttejä. (Deng 2015; Minos 2023).

Kaupalliseen tuotantoon suunnatuissa Li-ion akuissa käytetään tyypillisesti varauksettomia katodimateriaaleja, kuten esimerkiksi litiumkobolttioksidia (LiCoO_2) tai litium-rautafosfaattia (LiFePO_4). Anodimateriaaleista taas yleisin on

hiilipitoinen elektrodi. Nämä käytetyt positiivisen ja negatiivisen elektrodin materiaalit ovat vakaita ympäristössä ja niitä on helppo valmistaa. (Deng 2015.)



Kuva 4. Li-ion akun havainnekuva (Wen ym. 2017).

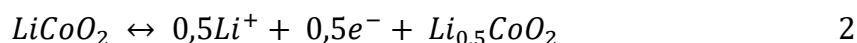
3.1 Akun lataus ja purkaminen

Li-ion akun latauksessa elektrodit ovat kytkettyinä toisiinsa ulkoisen virtalähteen kautta. Katodissa olevat elektronit (e^-) pakotetaan kulkemaan ulkoisesti kohti anodia. Litiumionit (Li^+) kulkevat taas samaan aikaan sisäisesti elektrolyyttiä pitkin katodista kohti anodia. Tämän avulla ulkoinen energia varastoituu sähkökemiallisesti akkuun kemiallisen energian muodossa, jossa elektrodeille syntyy eri kemialliset potentiaalit. (Deng 2015.)

Akun purkaminen taas tapahtuu päinvastoin kuin lataaminen. Siinä elektronit kulkevat anodista kohti katodia ulkoisen kuorman kautta (esimerkiksi lamppu). Litiumionit kulkevat samaan aikaan elektrolyyttiä pitkin anodista katodiin. Ilmiötä, jossa litiumionit kulkevat anodin ja katodin välillä elektrolyyttiä pitkin kutsutaan Shuttle chair -mekanismiksi. Akun purkautuessa elektronien vapautuminen anodista tapahtuu hapettumisreaktion (elektroneja luovutetaan) yhteydessä ja niiden saapuminen katodille tapahtuu pelkistymisreaktion yhteydessä (elektroneja vastaanotetaan). (Deng 2015.)

Esimerkki anodin sähkökemiallisesta reaktiosta

Kyseessä on hiilipohjainen anodi.

Esimerkki katodin sähkökemiallisesta reaktiosta

Kyseessä on litiumkobolttioksidi -katodi.

Li-ion akusta puhuttaessa käytetään termiä ominaisenergia (Wh/kg). Ominaisenergia mittaa energian määrää, joka voidaan vapauttaa tai varastoidaan akun massayksikköä kohti. Se saadaan kertomalla ominaiskapasiteetti (Ah/kg) käyttöakun jännitteellä (V). Ominaiskapasiteetti mittaa varauksen määrää, joka voidaan palautuvasti varastoida massayksikköä kohti. Ominaiskapasiteetti liittyy läheisesti akun latauksessa ja purkamisessa tapahtuvassa sähkökemiallisessa reaktiossa vapautuvien elektronien määrään. (Deng 2015.)

Voidaan puhua akun latauksen ja purkamisen määrästä, kun halutaan tietää, että kuinka nopeasti akku voidaan ladata tai purkaa. Tätä voidaan kutsua termillä C-arvo. Esimerkiksi 1C tarkoittaa, että akku purkautuu yhden tunnin aikana maksimi kapasiteetistaan. Yleisissä Li-ion akuissa, joissa hyödynnetään hiilipitoista anodia, kestää akun täyteen lataaminen noin 1-4h pienelektroniikalla ja sähköautoilla se kestää pidempään (esimerkiksi yön yli). Kuitenkin on jo kehitetty/kehitteillä sähköautojen lataustekniikoita, joissa isoilla sähkövirroilla (esimerkiksi Tesla Supercharger) saadaan akku ladattua nopeasti täyteen. (Deng 2015.)

3.2 Pikalataus

Sähköautoilta vaaditaan nykyään yhä tehokkaampia ja nopeampia pikalatausratkaisuja. Esimerkiksi suomalainen Kempower, joka on vahvasti sukua hitsauslaitteita valmistavalle Kempille, valmistaa kotimaisia ratkaisuja sähköautojen akkujen pikalataukselle. Pikalatauskeskus koostuu enimmillään kahdeksasta pikalatausliitännästä, joka tuottaa yhteensä lataustehoa 600kW saakka. Jousikiinnitteiset latauskaapelit yltävät noin 4-6 metrin päähän ja ne toimivat tasavirralla. Latauskaapelin päässä on standardin mukainen pistoke, joka liitetään sähköautoon kiinni. Pikalatauskeskuksen latausmetodi pohjautuu standardeihin CCS2 ja CHAdeMO. Pikalatauskeskukset ovat joko 500V tai 800V versioita, riippuen sähköauton voimansiirtojännitteen suuruudesta. (Kempower 2023.)

3.3 Akun soveltuvuudet eri käyttökohteisiin

Nyky aikaisten Li-ion akkujen avulla tuotetaan energiaa moniin arkipäivän käyttökohteisiin tehokkaasti ja turvallisesti. Yleisimpiä käyttökohteita Li-ion akuille ovat muun muassa (Relion 2015)

- Hätävirtajärjestelmät
 - Li-ion akku takaa kriittisille laitteille välittömän virran tuoton mahdollisen energiakadon myötä.
- Sähkö- ja vapaa-ajan ajoneuvot
 - Li-ion akku on kevytrakenteinen ja tuottaa energiaa pitkillekin ajomatkoille. Akut kestävät monta vuotta ja varauksen purkautuminen käyttöjaksojen välillä on hyvin pientä.
- Merikulkuneuvot
 - Sähkön tuottaminen meriympäristössä on Li-ion akuilla hyvin huoletonna ja turvallista, joilla voidaan tuottaa energiaa veneen moottorille ja muille sähköjärjestelmille.
- Aurinkoenergian talteenottajat

- Li-ion akkuja hyödynnetään aurinkopaneelien energian talteenottajina, sillä akut latautuvat nopeasti paneelien tuottamassa matalassa sähkövirran resistanssissa.
- Syrjäisten alueiden valvonta- ja hälytysjärjestelmät
 - Li-ion akkujen pieni koko, pitkä ikä sekä minimaalinen varauksen menettäminen epäaktiivisilla jaksoilla takaavat luotettavan energian lähteen valvonta- ja hälytysjärjestelmille, jotka sijaitsevat syrjäisillä alueilla.
- Henkilökohtaiset liikkumisvälineet
 - Li-ion akut ovat paras ratkaisu vammautuneiden ihmisten sähköpyörätuoleihin sekä porrashisseihin, sillä ne ovat kevyitä, pitkäikäisiä ja niiden kokoa on helppo muokata.
- Kannettavat virtalähteet
 - Li-ion akut ovat kevyempiä ja latautuvat nopeammin kuin lyijyakut, joka tekee tietokoneista ja puhelimista paljon kompaktimpia ja kevyitä. Li-ion akut sietävät hyvin liikettä ja lämpötilan vaihteluja sekä takaavat pitkän energian tuoton päivän tarpeisiin yhdellä latauskerralla.
- Kerrostalojen ”Second Life” ratkaisut
 - Käytettyjä Li-ion akkuja voidaan hyödyntää kerrostalojen ja kotitalouksien virtalähteenä. Akkumoduulit ovat integroituna teräksiseen kaappiin ja invertterin avulla kytketään suoraan rakennuksen vaihtovirtaan. (Jasper ym. 2022.)

3.4 Li-ion akun edut ja haitat

Li-ion akkujen etuina muihin ladattaviin akkuteknikoihin verrattuna voidaan pitää niiden suurta energiakapasiteettia. Litiumioniakuilla päästään nykyään ominaisenergian suurusluokkiin 100-265 Wh/kg. Li-ion akkukennot voivat tuottaa nykyään 3,6 voltia jännitettä, joka on kolme kertaa suurempaa kuin nikkelpohjaisilla (Ni-Cd tai Ni-MH) akkuteknikoilla. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että Li-ion akkuteknikan avulla voidaan tuottaa isoja

sähkövirtoja korkeatehoisille laitteille. Li-ion akuilla ei ole muistiefektiä (memory effect), jossa toistuvassa lataus- ja purkaussyklissä akku ”muistaa” matalan kapasiteettitason. Li-ion akkujen varauksen itsenäinen purkautuminen on noin 1,5-2% kuukaudessa, joka tekee siitä todella energiatehokkaan akkuratkaisun. (University of Washington 2020.)

Tänä päivänäkin Li-ion akuilla on vielä haittapuolia, varsinkin turvallisuuteen liittyen. Li-ion akuilla esiintyy taipumusta ylikuumenemiseen sekä ne voivat vaurioitua korkeilla jännitemäärillä. Tämän takia esimerkiksi sähköautojen Li-ion akuille on kehitetty BMS-järjestelmä (Battery Management System), jonka avulla voidaan kontrolloida lämmön karkaamista sekä havaita ja eristää vioittunut akkukenno ja tämän avulla estää akkupalon syttymistä. Muutaman vuoden käytön jälkeen Li-ion akuilla on taipumusta menettää kapasiteettiaan sekä myös lakata toimimasta. Li-ion akkujen hinnat ovat myös tänä päivänä noin 40% korkeampia kuin nikkelpohjaisten akkujen. (University of Washington 2020.)

4 Akun mitoitus ja laskentakaavat

Akkupaketin mitoituksessa on monia erilaisia laskentakaavoja. Kaikki kyseiset laskentakaavat pohjautuvat Ohmin lakiin, jossa kuvataan jännitteen (U), sähkövirran (I) sekä resistanssin (R) välistä suhdetta. Koska jännitteen ja sähkövirran arvot ovat mitattavia arvoja, ne ovat välttämättömiä akun laskentakaavoja suorittaessa. (Warner 2015.)

4.1 Ohmin laki

Ohmin laki pohjautuu kaavaan, jossa jännite (U) on sähkövirta (I) kerrottuna resistanssilla (R) (Warner 2015). Kaava on:

$$U = I \times R, \quad 3$$

jossa

U on jännite (V)

I on sähkövirta (A)

R on resistanssi (Ω)

4.2 Akkukennojen määrä

Kun tiedetään akkupaketilta vaadittavat jännitteen ja sähkövirran suuruudet, saadaan tarvittavien akkukennojen määrä laskettua kaavalla (Warner 2015):

$$\frac{V_p}{V_c} = \text{akkukennojen määrä}, \quad 4$$

jossa

V_p on akkupaketin jännite (V)

V_c on akkukennon jännite (V)

4.3 Energiämäärän laskenta

Akkupaketin energiämäärän laskenta suoritetaan kaavalla (Warner 2015):

$$E_p = V_p \times I_p , \quad 5$$

jossa

E_p on akkupaketin energiämäärä (kWh)

V_p on akkupaketin jännite (V)

I_p on kapasiteetti (Ah)

4.4 Akkuteho

Akkutehon laskennassa hyödynnetään kaavaa (Warner 2015):

$$P = I^2 \times R, \quad 6$$

jossa

P on akkuteho (W)

I on kapasiteetti (Ah)

R on resistanssi (Ω)

4.5 Maksimi jatkuva varauksen purku

Maksimi jatkuvan varauksen purkamisen sähkövirta lasketaan kaavalla (Warner 2015):

$$N_p \times I_c \times C_{max} = I_{max}, \quad 7$$

jossa

N_p on rinnakkaisten akkukennojen lukumäärä (kpl)

I_c on akkukennon sähkövirta (A)

C_{max} on maksimi C-arvo. (C-arvo tarkoittaa arvoa, joka kertoo, että kuinka nopeasti akku voidaan ladata tai purkaa).

I_{max} on maksimi jatkuva sähkövirta (A)

4.6 Akun maksimi latausjännite

Akun maksimi latausjännite lasketaan kaavalla (Warner 2015):

$$N_s \times V_{cmax} = V_{max},$$

8

jossa

N_s on sarjassa olevien akkukennojen lukumäärä (kpl)

V_{cmax} on akkukennon maksimi jännite (V)

V_{max} on akun maksimi latausjännite (V)

5 Li-ion akkujen valmistus tuotantolinjalla

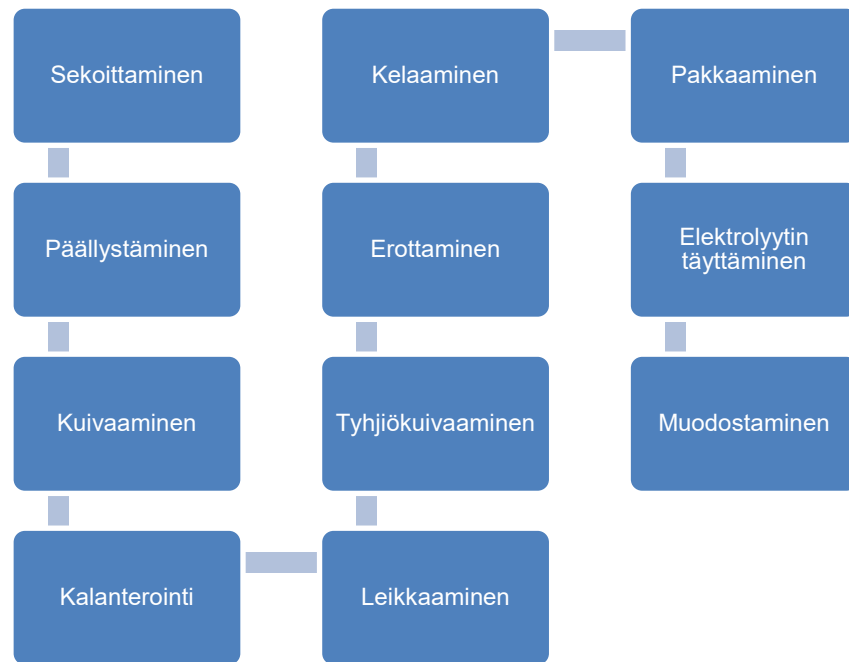
Nykyisin Li-ion akkujen valmistus tuotantolinjalla voidaan suurimmaksi osaksi täysin automatisoida. Ohjaukset voidaan toteuttaa etänä ja tuotantolinjan alkupäästä löytyvät raaka-ainevarastot sekä loppupäässä tapahtuu valmiiden akkujen lajittelu. (Lyric Robot 2021.)

5.1 Turvallisuus akkujen valmistuksessa

Akkujen valmistuksessa turvallisuus on erittäin tärkeää. Tuotantolinjastolla hyödynnetään palotorjuntastrategioita yhdistettyinä ennaltaehkäisyyn ja valvontaan. Vakaat palotorjuntastandardit, turvallinen ja luotettava lämpötilan optinen kuituvalvonta sekä useat palotorjunta- ja hätäsuunnitelmat ovat välttämättömiä paloturvallisuuden varmistamiseksi turvallisessa Li-ion akkujen valmistuksessa. (Lyric Robot 2021.)

5.2 Tyypillinen valmistusprosessi

Elektrodien tuotanto ja kennojen viimeistely ovat pitkälti riippumattomia kennotyypistä, kun taas kennojen kokoonpanossa on erotettava erilaiset akkukennotyypit. Akkukennoja on kolmea eri tyyppiä, jotka ovat lieriömäinen, prismaattinen sekä pussikennoakku. Akkukennojen valmistusprosessi koostuu monesta eri vaiheesta. Tässä keskitytään lieriömäisen akkukennon valmistamiseen. (Heimes ym 2019.)



Kuva 5. Lieriömäisen akkukennon valmistusprosessi (Heimes ym. 2019).

- Sekoittaminen
 - Pyörivän työkalun avulla vähintään kaksi erotettua raaka-ainetta yhdistetään massaksi. Massa vaatii aktiivisten materiaalien lisäksi myös johtavia lisäaineita, liuottimia ja sideaineita. Sekoittaminen koostuu märkäsekoituksesta ja kuivasekoituksesta, jotka erotetaan toisistaan.
- Päälystäminen
 - Kalvo päälystetään massalla levitystyökalun avulla, joko jatkuvasti tai ajoittain päälystyssuunnassa. Yleensä kalvon ylä- ja alisivut päälystetään peräkkäin. Tämän jälkeen kalvo siirretään kuivaimeen, jonka jälkeen kalvon toinen puoli pinnoitetaan edellä olevan prosessin mukaisesti. Kalvon paksuudet (anodi-kuparikalvo ja katodi-alumiinifolio) vaihtelevat 5µm-25µm akkukennon suunnittelusta riippuen.
- Kuivaaminen
 - Päälystyksen jälkeen levitetty aktiivinen materiaali kuivataan jatkuvassa prosessissa. Liuotin poistetaan materiaalista

lämmönsyötöllä, jossa katodipinnoitteen sisältämä helposti syttyvä liuotin otetaan talteen tai käytetään lämpökierrätykseen. Kalvon kuljetus toteutetaan joko rullajärjestelmillä tai kelluvilla ilmavirroilla.

- Kuivausrumpu on jaettu eri lämpötilavyöhykkeisiin yksilöllisen lämpötilaprofiilin toteuttamiseksi. Tämä toteutetaan tavallisesti kammiojärjestelmällä. Kuivurin läpikulkemisen jälkeen kalvo jäähtyy huoneenlämpötilaan asti, jonka jälkeen se rullataan tai päällystetään toiselta puolelta.
- Kalanterointi
 - Kalanteroinnin aikana molemmilta puolilta päällystettyä kupari- tai alumiinifoliota puristetaan pyörivällä telaparilla. Elektrodikalvo puretaan ensin staattisesti ja puhdistetaan harjoilla tai ilmavirroilla. Materiaali tiivistetään ylä- ja alateloilla, jossa telapari muodostaa tarkasti määritellyn linjapaineen. Kalanteroinnin jälkeen elektrodin kalvo puhdistetaan ja rullataan uudelleen.
- Leikkaaminen
 - Kalanteroidut rullat syötetään leikkausasemalle. Leikkaus on erotusprosessi, jossa leveä elektrodikela (emokela) jaetaan useisiin pienempiin elektrodikeloihin (tytärkelat). Tähän tarkoitukseen käytetään yleensä vierintäveitsiä. Yksittäiset tytärkelat puhdistetaan ja rullataan uudelleen leikkausprosessin jälkeen.
- Tyhjiökuivaaminen
 - Pinnoitetut tytärkelat työnnetään erityiselle tavaratelineelle. Telat viedään tyhjiöuuniin, jossa niiden kuivumisaika on noin 12-30 tuntia. Kuivauksen aikana jäännöskosteus ja liuottimet poistuvat tytärkeloista. Kuivauksen jälkeen kelat siirretään suoraan kuivaan huoneeseen tai ne kuivapakataan tyhjiössä.
- Erottaminen
 - Erottaminen on välttämätöntä akkukennon valmistuksessa ja se käsittää anodi-, katodi- sekä separaattorilevyn erottamista toisistaan tytärkeloista. Kuivatut tytärkelat kelataan auki ja

syötetään erotustyökaluun, jossa leikkausprosessi suoritetaan yleensä lävistystyökalulla.

- Kelaaminen
 - Kelaamista tarvitaan prismaattisten ja lieriömäisten akkukennojen valmistuksessa, joka tapahtuu tytärkelojen tyhjiökuivaamisen jälkeen.
 - Elektrodikalvot ja kaksi separaattorikalvoa kierretään kelauskaran (prismaattinen kenno) tai keskitapin (lieriömäinen kenno) ympärille. Käärittyä tuotetta kutsutaan hyytelörullaksi (Jelly Roll) ja sen yksittäisten kalvojen sijainti varmistetaan lopuksi liimanauhalla.
- Pakkaaminen
 - Hyytelörulla työnnetään tukevaan metallikoteloon. Lieriömäisessä akkukennossa pohjaeriste sekä hyytelörulla asetetaan lieriömäiseen koteloon, jonka jälkeen anodin virrankeräin laserhitsataan kotelon pohjaan ja katodin virrankeräin laserhitsataan kotelon kanteen. Lopuksi hyytelörullan ja kannen väliin asetetaan eristerengas.
- Elektrolyytin täyttäminen
 - Pakkaamisen jälkeen suoritetaan elektrolyytin täyttö, jossa elektrolyytti täytetään kennoon tyhjiössä erittäin tarkan annosteluneulan avulla. Asettamalla kennoon painetta (inertin kaasun syöttö ja/tai tyhjiön vuorottelutoiminto) aktivoituu kapillaarivaikutus kennossa. Lopuksi akkukenno suljetaan tyhjiössä.
 - Elektrolyytti (esim. LiPF_6) on yleensä ostettu komponentti, joka asettaa korkeat vaatimukset prosessiympäristölle (palonsuojaus, poisto ym.), koska se on luokiteltu vaaralliseksi aineeksi.
- Muodostaminen
 - Muodostaminen kuvaa akkukennon ensimmäisiä lataus- ja purkuprosesseja. Muodostamista varten akkukennot asetetaan erityisiin telineisiin ja ne saatetaan kosketukseen

jousikuormitteisilla kosketinnastoilla. Sen jälkeen kennot ladataan tai puretaan tarkasti määritelyihin virta- ja jännitekäyriin.

- Muodostamisen aikana muodostuu SEI (Solid Electrolyte Interface), joka luo rajapintakerroksen elektrolyytin ja elektrodin välille.

5.3 Laadunvarmistuksen menetelmät ja strategiat

Akkujen tuotannon loppupäässä suoritetaan akkujen vanhentamisprosessi, jota käytetään laadunvarmistamiseen. Vanhentamisprosessin aikana kennojen ominaisuuksia ja suorituskykyä seurataan mittaamalla säännöllisesti kennon avoimen piirin jännitettä OCV (Open Circuit Voltage) enintään kolmen viikon ajan. Vanhentaminen korkeassa lämpötilassa ja normaalilämpötilassa erotetaan toisistaan, jossa kennot käyvät yleensä ensin korkean lämpötilan ja sitten normaalin lämpötilan ikääntymisen. Akkukennot varastoidaan niin sanotuille ikääntymishyllyille tai -torneille. Jos akkujen ominaisuuksissa ei tapahdu merkittäviä muutoksia koko ajanjakson aikana, voidaan akku toimittaa asiakkaalle, sillä se on täysin toimintakykyinen. (Heimes ym. 2019.)

5.4 Käsittely ja varastointi

Ennen kuin akkukennot poistuvat tehtaalta, ne testataan vielä EOL-testauslaitteessa. Kennot poistetaan ikääntymishyllyiltä ja syötetään testausasemalle, jossa niiden varaus puretaan lataustilaan. Valmistajasta riippuen voidaan suorittaa vielä pulssitestejä, sisäisiä vastusmittauksia, optisia tarkastuksia, OCV-testejä sekä vuototestejä. Testauksen jälkeen monet akkuvalmistajat lajittelevat kennot suorituskykytietojen mukaan (luokitus). Kun testit on läpäisty, akkukennot voidaan pakata ja lähettää asiakkaille. Kuljetusta varten akkukennot ovat yleensä varustettu muovisuojuksilla ja pinottu pahvilaatikon sisään. (Heimes ym. 2019.)

6 Li-ion akkujen heikkeneminen

Li-ion akut heikkenevät ajan mittaan, jonka jälkeen niiden kapasiteetti on jo niin alhainen, että ne täytyy vaihtaa uuteen. Akkujen kapasiteetin heikkenemiseen vaikuttavat monet eri tekijät. Näitä tekijöitä ovat mm. liikakuormitus, elektrolyyttirajapinnan muodostuminen, elektrolyytin hajoaminen, itsepurkautuminen, elektrodin epävakaus sekä nesteen kerääjä. (Tycorun 2022.)

- Liikakuormitus
 - Negatiivisen elektrodin toiminta-alue pienenee, kun elektrodin pinnalle kertynyt litium estää litiumionien pääsyn elektrodiin.
 - Liikakuormitus johtaa positiivisen elektrodin reaktioon, jossa syntyy oksidia. Tämä johtaa akun kapasiteetin laskuun.
 - Korkeassa kuormituksessa (yli 4,5V) elektrolyytti hapettuu helposti muodostaen liukenematonta ainetta (esimerkiksi Li_2Co_3) ja kaasua. Tämä liukenematon aine tukkii elektrodin mikrohuokokset ja estää litiumionien kulkeutumisen, joka taas johtaa kapasiteetin menettämiseen kiertoprosessissa.
- Elektrolyyttirajapinnan muodostuminen
 - Akun purkautuessa ensimmäisen kerran, muodostuu elektrolyytin ja elektrodin välille vakaa ja suojaava kiinteä elektrolyyttirajapinta SEI (Solid Electrolyte Interface).
 - SEI:n muodostuminen kuluttaa osan litiumioneista, mikä johtaa elektrodien väliseen kapasiteetin tasapainon muuttumiseen. Tämä taas vaikuttaa akun ominaiskapasiteetin pienenemiseen.
- Elektrolyytin hajoaminen
 - Elektrolyytin kulumisen muuttaa elektrolyyttipitoisuutta, joka vaikuttaa kennokapasiteettiin.
- Kapasiteetin menetys itsepurkautumisessa
 - Käänteisessä kapasiteetin menetyksessä akun sisällä tapahtuvassa hapettumis-/pelkistymisreaktiossa aiheutuu

elektronien siirto, joka kuluttaa osan kapasiteetista aiheuttaen akun kapasiteetin menetyksen.

- Peruuttamattomassa kapasiteetin menetyksessä dendriitit tunkeutuvat separaattoriin, jonka myötä syntyy mikrokontakti positiivisen ja negatiivisen navan välille. Tämä johtaa lisääntyneeseen itsepurkaukseen ja käytettävissä olevan kapasiteetin menetykseen.
- Elektroodin epävakaus
 - Katodimateriaalin liukenemisessa rakenteelliset viat johtavat sidosennergian heikkenemiseen, helppoon murtumiseen sekä hajoamiseen. Liukenemisessa syntyvä Ni_2 kerääntyy negatiiviselle elektrodille ja tukkii mikrohuokoset vaikuttaen ionien kiinnittymiseen ja irtoamiseen.
 - Latauspotentiaali on liian korkea.
 - Katodimateriaalin hiilimustan pitoisuus. Elektrolyytin hapettumisesta hiilimustan pinnan päälle kertyvät aineet, jotka omaavat katalyyttiset ominaisuudet. Nämä aineet lisäävät metalli-ionien liukenemisnopeutta.
- Kapasiteetin menetys-nesteen kerääjä
 - Positiivisen navan alumiini (Al) ja negatiivinen kupari (Cu).
 - Alumiiniin muodostuu helposti paikallista korroosiota tai pistekorroosiota elektrolyytissä.
 - Kupari ja alumiini ovat alttiita lisäämään akun sisäistä vastusta, joka johtuu pintaoksidikalvon muodostumisesta ja huonosta tarttumisesta.
 - Akun purkautumisen aikana kupari hapettuu Cu_2^+ , diffusoituu negatiiviselle elektrodille elektrolyytin läpi ja pelkistyy sitten latauksen aikana. Negatiivisen elektrodin pinnalle muodostuu kuparidendriittejä, jotka läpäisevät kalvon erittäin helposti ja aiheuttavat oikosulun.

6.1 Akun lämmönhallinnan merkitys kestävyys

Li-ion akun latauksen ja purkamisen aikana tapahtuvien kemiallisten reaktioiden aiheuttamien lämpötilojen nousu vaikuttaa merkittävästi akun kapasiteettiin ja toimintaan. Tämän takia on syytä hyödyntää Li-ion akustoissa erilaisia lämmönhallintajärjestelmiä, jotta akun lämpötila voidaan pitää optimaalisena. (Sirikasemsuk ym. 2023.)

Akun lämmönhallintajärjestelmä, eli BTMS-järjestelmä (Battery Thermal Management System), kontrolloi jokaista akkukennoa, mahdollistaen niiden optimaalisen toimintalämpötilan. Lämpötilan suuruus vaikuttaa huomattavasti akkukennon toimintaan. Erilaisia akkujen lämmönhallintajärjestelmiä ovat ilmajäähdytteinen, nestejäähdytteinen sekä faasivaihto jäähdytysjärjestelmä, eli PCM-järjestelmä (Phase Change Material). (Sirikasemsuk ym. 2023.)

Ilmajäähdytteinen järjestelmä on melko yksinkertainen ja helppo toteuttaa, jossa ilma kulkee omia kanaviaan pitkin varastoiden itseensä akkukennoista syntyvää lämpöä. Nestejäähdytteinen järjestelmä on taas monimutkaisempi järjestelmä, jossa jäähdytinnesteinä hyödynnetään vettä tai öljyä niiden korkeiden lämpöfysikaalisten ominaisuuksiensa takia. Nestemäisen jäähdytysnesteen lämmönpoistoon liittyy epäsuora lämmönsiirtoprosessi, jossa käytetään vaippaa tai putkea akkuenergian säästämiseksi. (Sirikasemsuk ym. 2023.)

PCM-järjestelmä on latenttilämpötilan jäähdytystekniikka, joka imee lämpöä lämmönlähteestä. Se on yksinkertainen jäähdytysjärjestelmä, sillä kyseinen järjestelmä omaa vähemmän painoa ja takaa tasaisen lämmönpoiston. PCM-järjestelmän haittapuoli on kuitenkin se, että se rajoittaa materiaalien lämpöominaisuuksia. (Sirikasemsuk ym. 2023.)

6.2 Akkujen kierrätettävyys

Sähköautojen määrän yhä lisääntyessä myös Li-ion akkujen kysyntä kasvaa mullistavasti. Kun sähköautot saavuttavat elinjaksonsa loppupään, syntyy ongelma, jossa on ratkaistava käytöstä poistuvien Li-ion akkujen oikeaoppinen hävittäminen ja kierrättäminen. Tänä päivänäkin vain murto-osa loppuun käytetyistä Li-ion akuista päätyvät kierrätyskeskuksiin. On suunniteltava parempia ympäristölakeja, joissa rikkoutuneet akut määrätään oikeaoppisesti kierrätettäviksi. Kierrätyksellä on kuitenkin monia etuja uusien akkujen tuotannon kannalta, sillä vanhoista akuista saadaan raaka-aineita uusia akkuja varten. (Steward ym. 2019.)

Li-ion akut muodostuvat katodista, anodista, elektrolyytistä sekä separaattorista, jotka laminoidaan ja puristetaan yhteen sähköisen kontaktin luomiseksi niiden välille. Tänä päivänä Li-ion akuille on erilaisia kierrätysmenetelmiä ja jokaisella on omat hyödyt sekä haittansa (Steward ym 2019.)

Taulukko 1. Li-ion akkujen kierrätysmetodien vertailu (Steward ym. 2019)

Kierrätysmetodi	Hyödyt	Haitat	Talteenotetut materiaalit
Mekaaniset prosessit	Soveltuu jokaiseen akkukemiaan ja konfiguraatioon. Matala energian kulutus. Parantaa arvokkaiden metallien liuotustehoa.	Täytyy yhdistää muihin kierrätysmetodeihin, jotta kaikki materiaali saadaan talteen.	Esim. Li_2Co_3
Hydrometallurgia (vesikemia)	Soveltuu jokaiseen	Vain taloudellista akuille, jotka	Kupari, alumiini, kobaltti, esim.

	akkukemiaan ja konfiguraatioon.	sisältävät kuparia ja nikkeliä.	Li_2Co_3 . Anodi on tuhottu
Pyrometallurgia (esim. sulatus)	Soveltuu jokaiseen akkukemiaan ja konfiguraatioon.	Vain taloudellista akuille, jotka sisältävät kuparia ja nikkeliä. Myrkkyykaasujen suodattamista vaaditaan.	Kobalitti, nikkeli, kupari, jotkin raudat. Anodi on tuhottu
Suora kierrätys	Melkein kaikki akkumateriaali saadaan talteen.	Talteen otettu materiaali ei välttämättä toimi samalla tavalla kuin tuore raaka-aine. Katodimateriaalien sekoittuminen voi alentaa kierrätetyn tuotteen arvoa.	Melkein kaikki komponentit paitsi separaattori

6.3 Tulevaisuuden akkuratkaisut

Akkuyritykset kehittävät jatkuvasti uusia Li-ion akkuratkaisuja, jotka ovat halvempia, tiheämpiä, kevyempiä sekä paljon tehokkaampia kuin nykyiset akut. Maailmassa tarvitaan nykyään parempia akkuratkaisuja, jotka ovat puhtaasti tuotettuja sekä helposti kierrätettäviä. Tämän takia akkujen kehitykseen panostetaan paljon aikaa ja rahaa. (Saft 2023.)

Li-ion akuilta vaaditaan yhä enemmän kapasiteettia, sillä myös meri-, juna- ja lentoliikenne sähköistyvät kovaa vauhtia. Tämän seurauksena nykyisiä akkukemioita ja akkukennoja hienosäädetään, jotta akut latautuisivat yhä

nopeammin ja pystyisivät operoimaan monissa eri lämpötiloissa (-50°C-125°C). Li-ion akkukemioiden kehittämisellä pyritään ilmiöön, jossa positiiviset ja negatiiviset elektrodit voivat varastoida yhä enemmän litiumioneita itseensä. (Saft 2023.)

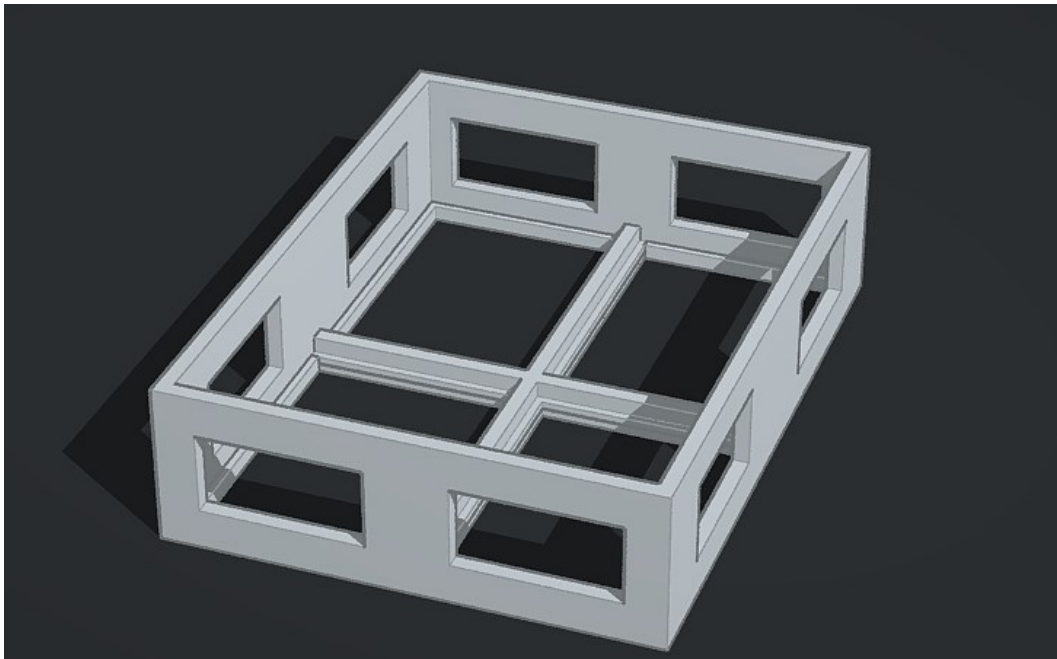
Tulevaisuudessa tullaan myös näkemään Li-S (litiumrikki) akkuja, joita kehitetään parasta aikaa. Litiumrikkiakut tulevat todennäköisesti syrjäyttämään nykyiset Li-ion akut, sillä Li-S akkujen teoreettinen energiatiheys on neljä kertaa suurempi kuin Li-ion akkujen. Tämän vuoksi Li-S akut soveltuvat tulevaisuudessa erityisesti ilmailu- ja avaruusteollisuuden käyttöön. (Saft 2023.)

Sähköautojen Li-ion akkuratkaisuna tulevaisuudessa voivat myös toimia kiinteän tilan akut (Solid State Battery), jossa nestemäinen elektrolyytti on korvattu kiinteällä materiaalilla, joka sallii litiumionien kulun tehokkaasti lävitseen. Kiinteillä elektrolyyteillä on monia etuja, sillä ne ei syty palamaan kuumennettaessa, ja se on tiheää mutta kevyttä materiaalia. Kiinteän tilan akut tuottavat paljon energiaa suhteessa painoon, joka tekee niistä oivan tulevaisuuden akkuratkaisun sähköautoihin. (Saft 2023.)

7 Akkupaketin runkorakenteen suunnittelu

Vielä nykyisissä akun valmistusprosessin vaiheissa työ suoritetaan akkukennosta moduuliin ja sitten moduulista akkupakettiin. Akku jaetaan erillisiin akkumoduuleihin, joista jokaisella voi olla oma itsenäinen akunhallinta- (BMS) ja diagnostiikkajärjestelmänsä. Tämä mahdollistaa akkukennojen toimintahäiriöiden hallinnan moduulitasolla sekä mahdollistaa moduulien vaihtamisen yksitellen koko akkupaketin sijaan. Akkumoduulit myös voivat tarjota rakenteellista tukea akkupaketille. (Meng ym. 2020.)

Akkupaketin runkorakenne on yleisesti jaettu moduulikohtaisesti. Kuitenkin nykyään on suunniteltu moduulittomia akkupaketteja CTP-tekniikkaa hyödyntäen (Cell To Pack). CTP-tekniikassa akkupaketit kootaan suoraan akkukennoista ilman moduuleja. Uudella tekniikalla ja akkukennosuunnittelulla akkupaketit ja niiden runkorakenteet voivat olla matalampia kuin perinteisillä sylinterimäisillä tai prismaattisilla akkukennorakenteilla. Tämän avulla pystytään luomaan tilasäästöjä sähköautojen matkustamoihin. (Meng ym. 2020.)



Kuva 6. Itse suunniteltu sähköauton akkupaketin runkorakenne.

Itse suunnitellussa sähköauton akkupaketin runkorakenteessa on suunniteltu omat moduulikohtaiset tilat, joita voidaan lisätä tai vähentää tarpeen mukaan. Akkumoduulit sijaitsevat toisiinsa nähden vieretysten ja runkorakenteesta on pyritty luomaan mahdollisimman kevytrakenteinen poistamalla ylimääräistä materiaalia pois. Akkupaketin runkorakenne on rakenteeltaan kevyt ja jäykkä sekä valmistusmateriaalina toimii alumiini.

8 Loppupohdinnat

Li-ion akkutekniikka on ollut jo kauan aikaa sitten keksitty akkutekniikka, jota on kehitetty joka vuosi parempaan ja ympäristöystävällisempään suuntaan.

Akkutekniikkaa hyödynnetään tänä päivänä niin pienissä kodin laitteissa kuin sähköautoissa. Li-ion akuissa voidaan käyttää monia erilaisia raaka-aineita ja niille löytyy monia erilaisia käyttökohteita. Akkujen elinkaaren loppupäässä akut pyritään kierrättämään tehokkaasti sekä hyödyntämään matalamman kapasiteettitason akkuja esimerkiksi kotitalouksien energianlähteenä.

Tulevaisuudessa kehittyneemmät Li-ion akkukemiat tulevat syrjäyttämään perinteiset lyijyakkuratkaisut sekä nykyisiä Li-ion akkuja niiden suuremman energiatiheiden sekä ympäristöystävällisyyden ansiosta.

Lähteet

- Alexandro, O. 2012. Tesla Motors Model S base. Wikimedia. Viitattu 23.3.2022. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tesla_Motors_Model_S_base.JPG.
- Bend, F. 2019. How to design a lithium battery pack. Electronics-lab. Viitattu 4.9.2023. <https://www.electronics-lab.com/design-lithium-battery-pack/>.
- Bruno, V. 2022. The Top 10 EV Battery Manufacturers in 2022. Visual Capitalist. Viitattu 23.3.2022. <https://www.visualcapitalist.com/the-top-10-ev-battery-manufacturers-in-2022/>.
- Deng, D. 2015. Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. Wiley Online Library. Viitattu 23.3.2023. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ese3.95>.
- Fink, G. 2022. These Are the World's Biggest Battery Manufacturers for Electric Cars. Car and Driver. Viitattu 1.9.2023. <https://www.caranddriver.com/features/a40991227/electric-car-battery-companies/>.
- Jasper, F.; Späthe, J.; Baumann, M.; Peters, J.; Ruhland J. & Weil, M. 2022. Life cycle assessment (LCA) of a battery home storage system based on primary data. ScienceDirect. Viitattu 27.4.2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622024921>.
- Heimes, H.; Kampker, A.; Lienemann, C. & Locke, M. 2019. Lithium-ion battery cell production process. Researchgate. Viitattu 3.7.2023. https://www.researchgate.net/publication/330902286_Lithium-ion_Battery_Cell_Production_Process.
- Kempower 2023. Kempower Satellite. Viitattu 28.4.2023. <https://kempower.com/solution/kempower-satellite/>.
- Lyric Robot 2021. EV Battery Smart Factory Solutions. Viitattu 16.5.2023. <https://en.lyric-robot.com/>.
- Meng, X. & Zheng E. 2020. The Next Generation Battery Pack Design: from the BYD Blade Cell to Module-Free Battery Pack. Battery Bits. Viitattu 6.9.2023. <https://medium.com/batterybits/the-next-generation-battery-pack-design-from-the-byd-blade-cell-to-module-free-battery-pack-2b507d4746d1>.

Minos, S. 2023. How Lithium-ion Batteries Work. Energy.gov. Viitattu 4.9.2023.
<https://www.energy.gov/energysaver/articles/how-lithium-ion-batteries-work>.

Pelegov, D. & Pontes, J. 2018. Main Drivers of Battery Industry Changes: Electric Vehicles – A Market Overview. ProQuest. Viitattu 23.3.2023.
<https://www.proquest.com/docview/2582791760?pq-origsite=primo>.

Relion 2015. The Seven Top Uses for Rechargeable Lithium-Ion Batteries. Viitattu 26.3.2023. <https://relionbattery.com/blog/the-seven-top-uses-for-rechargeable-lithium-ion-batteries>.

Saft 2023. Three battery technologies that could power the future. Viitattu 30.3.2023. <https://www.saft.com/media-resources/our-stories/three-battery-technologies-could-power-future>.

Sirikasemsuk, S.; Naphon, N.; Eiamsa-ard, S. & Naphon, P. 2023. Analysis of nanofluid flow and heat transfer behavior of Li-ion battery modules. ScienceDirect. Viitattu 30.3.2023. <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.turkuamk.fi/science/article/pii/S0017931023002119?via%3Dihub>.

Steward, D.; Mann, A. & Mann, M. 2019. Economics and Challenges of Li-Ion Battery Recycling from End-of-Life Vehicles. ScienceDirect. Viitattu 29.3.2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919305104>.

Tycorun 2022. The reason for lithium battery capacity loss and why there is irreversible capacity loss. Viitattu 9.4.2023.
<https://www.tycorun.com/blogs/news/the-reason-for-lithium-ion-battery-capacity-loss>

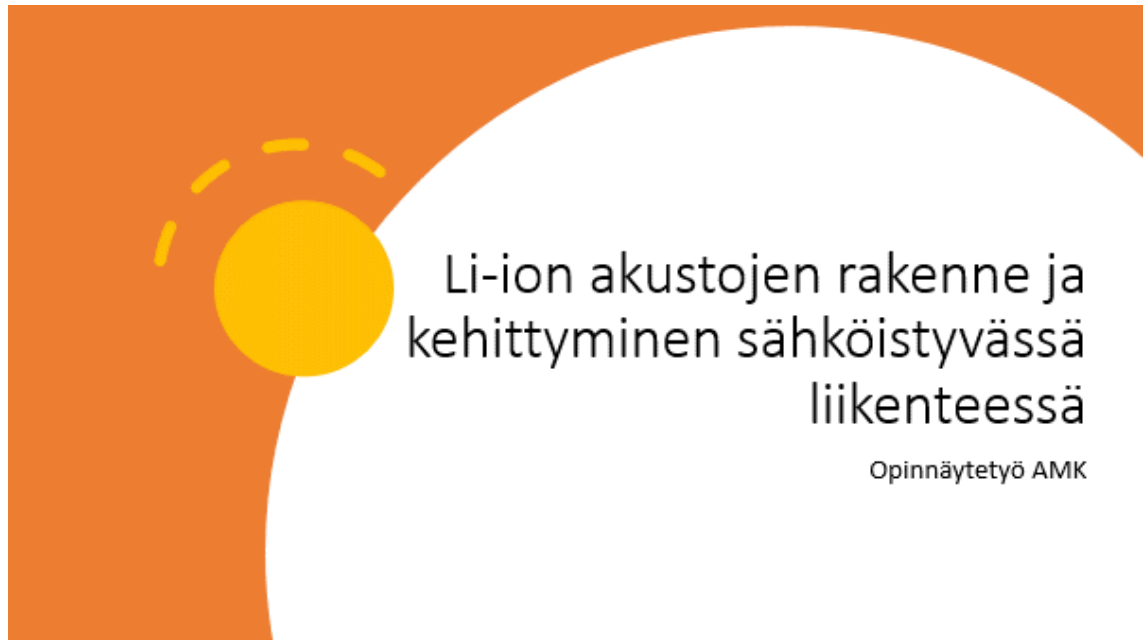
University of Washington 2020. What is a lithium-ion battery and how does it work? Clean Energy Institute. Viitattu 26.3.2023.
<https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>.

Warner, J. 2015. The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design. Elsevier: Amsterdam. Viitattu 14.5.2023.

Wen, Q.; Shapter, J.; Qian, W.; Ting, Y.; Guo, G. & Daxiang, X. 2017. Nanostructured anode materials for lithium-ion batteries: principle, recent progress and future perspectives. Royal Society of Chemistry. Viitattu 25.3.2023. <https://pubs.rsc.org/image/article/2017/TA/c7ta05283a/c7ta05283a-f1.gif>.

Yu, M.; Hynan, P.; Annette, J. & Yokochi, A. 2019. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. ProQuest. Viitattu 24.3.2023.
<https://www.proquest.com/docview/2316710380?pq-origsite=primo>.

Kurssimateriaali opinnäytetyöstä



Li-ion akkujen historia

- Ensimmäisten Li-ion akkujen kehitys alkoi tunnetusti vuonna 1976.
 - Exxon nimisessä yrityksessä työskennellyt Whittingham raportoi uudelleen ladattavasta akusta.
- Ensimmäinen litiumioniakku.
 - Titaniumsulfidi TiS_2 päällysteinen katodi.
 - Metallinen litiumanodi Li .
- Japanilainen Yoshino kehitti vuonna 1987 akkukennon prototyyppin.
 - Hiilipohjainen anodi.
 - Varaukseton LiCoO_2 katodi.

Li-ion akkujen historia

- Yoshino suoritti ensimmäisiä turvallisuustestejä Li-ion akuille.
 - Pudotti metallisen kappaleen akkukennoihin.
 - Ei syttynyt tavalliseen tapaan palamaan.
- Henkilökohtaisten elektroniikkalaitteiden valmistaja Sony toi vuonna 1991 markkinoille uuden Li-ion akkuratkaisun.
 - Tulisi mullistamaan elektroniikkalaitteiden kehityksen sekä myöhemmin myös sähköautojen.

Akut nykyään

- Monen vuoden tutkimuksen ja kehityksen myötä Li-ion akkuperhe muodostuu monesta erilaisesta akkukenttien kemioista.
- Nykyään monta erilaista vaihtoehtoa materiaaleille, joita käytetään litiumioniakun positiivisessa ja negatiivisessa elektrodissa, elektrolyytissä sekä separaattorissa.
- Positiivinen elektrodi
 - LiCoO_2 (Litiumkobolttioksidi)
 - LiNiO_2 (Litium-nikkelioksidi)
 - LiMn_2O_4 (Litiummangaanioksidi)
 - LiFePO_4 (Litium-rautafosfaatti)
 - $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y})\text{O}_2$ (Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi)

Akut nykyään

- $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y})\text{O}_2$ (Litium-nikkeli-kobolttialumiinioksidi)
- **Negatiivinen elektrodi**
 - Hiilipitoinen (Carbon Based Electrodes)
 - $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (Litiumtitanaatti)
 - Litiummetalli (Lithium Metal)
 - Metalliseospohjaiset elektrodit (Alloy Based Electrodes)
 - Piipohjaiset elektrodit (Silicon Based Electrodes)
 - Muunnoselektrodit (Conversion Electrodes)
- Tällä hetkellä yleisimmät negatiivisen elektrodin materiaalit ovat hiilipitoinen sekä litiumtitanaattielektrodi.
- Loppuja, muita materiaaleja kehitetään vielä.

Akut nykyään

- **Elektrolyytit**
 - Vesipitoiset elektrolyytit (Aqueous Electrolytes)
 - Orgaaniset nestemäiset elektrolyytit (Organic Liquid Electrolytes)
 - Polymeerielektrolyytit (Polymer Electrolytes)
 - Keraamiset elektrolyytit (Ceramic Electrolytes)

Sähköautojen akut ja niiden valmistajia

- Ekologisista, poliittisista ja kaupallisista syistä polttomoottoriautojen valmistajat joutuvat kääntämään katseensa yhä enemmän kohti sähköautojen suunnittelua ja tuotantoa.
- Tällä hetkellä maailman viisi suurinta sähköautojen valmistajaa ovat:
 - Tesla
 - BYD
 - GM
 - Volkswagen
 - Hyundai

Sähköautojen
akkujen
valmistajien
vuotuiset
myynnit

*Annual cumulative global battery usage for electric vehicles
(Unit: GWh)

Rank	Manufacturer Name	Jan-June 2021	Jan-June 2022	Growth Rate	2021 Share	2022 Share
1	CATL	32.9	70.9	115.60%	28.60%	34.80%
2	LG Energy Solutions	27.3	29.2	6.90%	23.80%	14.40%
3	BYD	7.9	24	206.20%	6.80%	11.80%
4	Panasonic	17.3	19.5	12.50%	15.00%	9.60%
5	SK Innovation	6.2	13.2	114.40%	5.30%	6.50%
6	Samsung SDI	6.6	10	50.60%	5.80%	4.90%
7	CALB	3.3	8.4	152.70%	2.90%	4.10%
8	GUOXUAN	2.2	5.8	165.00%	1.90%	2.90%
9	Sunwoda	0.4	3.1	663.30%	0.40%	1.50%
10	SVOLT	1	2.6	147.10%	0.90%	1.30%
	Other	10.00	16.8	68.10%	8.70%	8.20%
	Total	115.1	203.4	76.80%	100.00%	100.00%

*There are some countries where immature sales are not aggregated, and 2021 data excludes non-aggregated country data
Source: Global EV and Battery Monthly Tracker, SNE Research

Sähköautojen akut ja niiden valmistajia

- Sähköautolla on korkeajännitteinen akku.
 - Koostuu sadoista tai jopa tuhansista akkukennoista.
 - Akkukennot muodostavat akkumoduuleita.
- Akkumoduuleita kytkemällä sarjaan ja rinnan voidaan säädellä niiden synnyttämää jännitteen ja virran suuruutta.
 - Mitä enemmän akkumoduuleita sähköautossa on käytössä, niin sitä suurempi kapasiteetti ja toimintamatka sillä on.
- Nykyaikaisen älypuhelimien Li-ion akun kapasiteetti on 10-20Wh.
- Sähköautolla akun kapasiteetti on 10-100kWh.
 - 1000-5000 kertaa suurempi kapasiteetti kuin puhelimen akulla.

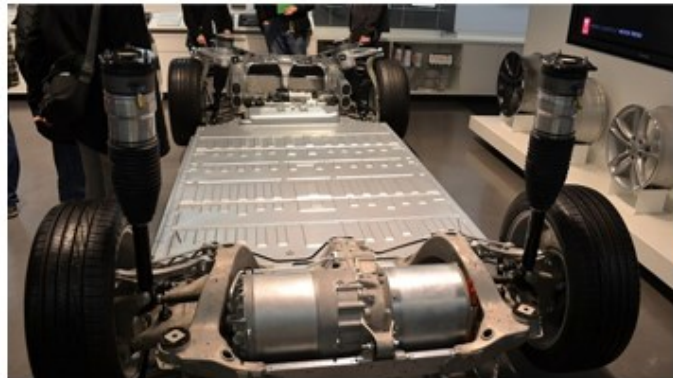
Sähköautojen akut ja niiden valmistajia

- Sähköautojen akkujen myynnin uskotaan kasvavan 17 miljardista dollarista 98 miljardiin dollariin vuosien 2019 ja 2028 aikana.
- Vuonna 2022 kiinalaiset akkuvalmistajat vastasivat 56% maailman myynnistä, jonka jälkeen tulevat korealaiset (26%) sekä japanilaiset yhtiöt (10%).
- Tällä hetkellä maailman kymmenen johtavaa sähköautojen akkuvalmistajaa ovat:
 - CATL
 - LG Energy Solutions
 - BYD

Sähköautojen akut ja niiden valmistajia

- Panasonic
- SK On
- Samsung SDI
- CALB
- Guoxuan
- Sunwoda
- SVOLT
- CATL on näistä suurin akkuvalmistaja ja se tuottaa Li-ion akkuja Teslalle, Peugeotille, Hyundaiille, Hondalle, BMW:lle, Toyotalle, Volkswagenille ja Volvolle.

Tesla Model
S ja sen
akusto



Li-ion akun toimintaperiaate

- Li-ion akku muodostuu kytkemällä akkukennoja sarjaan ja rinnan tai niiden yhdistelmällä.
 - Kytkemällä akkukennoja rinnan kasvatetaan sähkövirtaa (A).
 - Kytkemällä akkukennoja sarjaan kasvatetaan jännitettä (V).
- Akkukennoja yhdistämällä muodostetaan akkumoduuleita ja akkumoduuleita yhdistämällä muodostetaan taas akkupaketteja.
 - Esimerkiksi Teslan akkupaketti koostuu 7104 akkukennosta.
- Akkukenno koostuu katodista ja anodista.
 - Katodi on positiivinen elektrodi ja anodi on negatiivinen elektrodi.

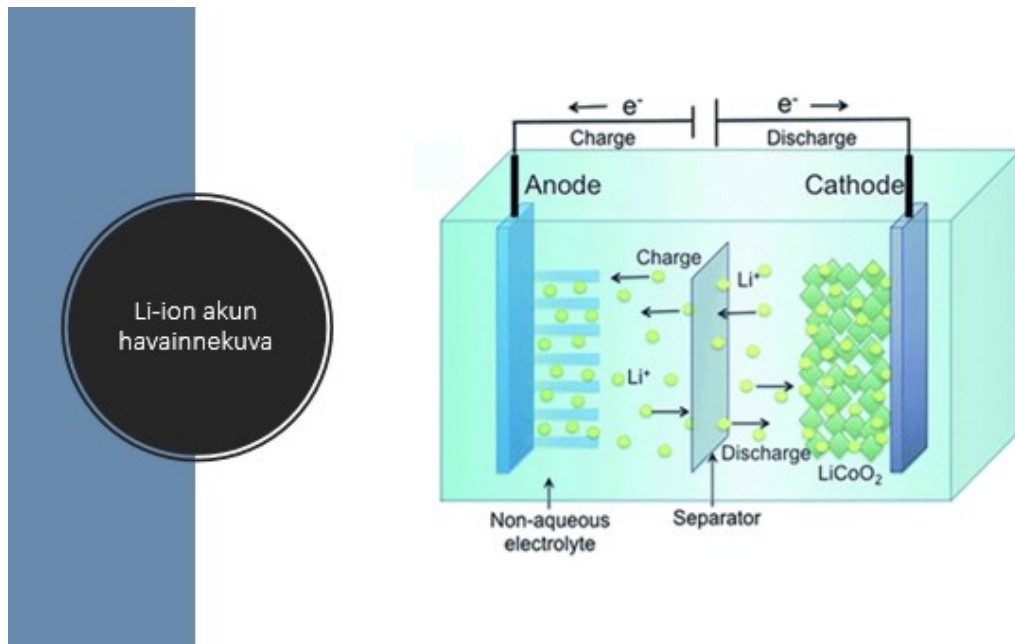


Li-ion akun toimintaperiaate

- Katodia ja anodia yhdistää niiden välissä oleva elektrolyytti.
 - Positiivisesti varautuneet litiumionit (Li^+) kulkevat elektrolyyttiä pitkin.
- Elektrodit erotetaan toisistaan separaattorin avulla.
 - Separattori mahdollistaa vain litiumionien molemmiin suuntaisen läpipääsyn elektrodien välillä mutta ei itse elektronien (e^-).
 - Separattori koostuu normaalisti mikrohuokoisesta polymeerikalvosta.
- Elektrolyytti on tavallisesti nestemäistä, mutta nykyään on myös kehitteillä polymeeri-, geeli- ja keraamielektrolyyttejä.

Li-ion akun toimintaperiaate

- Kaupalliseen tuotantoon suunnatuissa Li-ion akuissa käytetään tyypillisesti varauksettomia katodimateriaaleja.
 - Esimerkiksi litiumkobolttioksidi (LiCoO_2) tai litium-rautafosfaattia (LiFePO_4).
- Anodimateriaaleista taas yleisin on hiilipitoinen elektrodi.
- Nämä käytetyt positiivisen ja negatiivisen elektrodin materiaalit ovat vakaita ympäristössä ja niitä on helppo valmistaa.



Akun lataus ja purkaminen

- Li-ion akun latauksessa elektrodit ovat kytkettyinä toisiinsa ulkoisen virtalähteen kautta.
 - Katodissa olevat elektronit (e^-) pakotetaan kulkemaan ulkoisesti kohti anodia.
 - Litiumionit (Li^+) kulkevat taas samaan aikaan sisäisesti elektrolyyttiä pitkin katodista kohti anodia.
 - Tämän avulla ulkoinen energia varastoituu sähkökemiallisesti akkuun kemiallisen energian muodossa, jossa elektrodeille syntyy eri kemialliset potentiaalit.
- Akun purkaminen taas tapahtuu päinvastoin kuin lataaminen.
 - Elektronit kulkevat anodista kohti katodia ulkoisen kuorman kautta.
 - Litiumionit kulkevat samaan aikaan elektrolyyttiä pitkin anodista katodiin.

Akun lataus ja purkaminen

- Ilmiötä, jossa litiumionit kulkevat anodin ja katodin välillä elektrolyyttiä pitkin kutsutaan Shuttle Chair –mekanismiksi.
- Akun purkautuessa elektronien vapautuminen anodista tapahtuu hapettumisreaktion (elektroneja luovutetaan) yhteydessä ja niiden saapuminen katodille tapahtuu pelkistymisreaktion (elektroneja vastaanotetaan) yhteydessä.

Akun lataus ja purkaminen

- Esimerkki anodin sähkökemiallisesta reaktiosta:
 - $\text{Li}^+ + e^- + \text{C}_6 \leftrightarrow \text{LiC}_6$
 - Kyseessä on hiilipohjainen anodi.
- Esimerkki katodin sähkökemiallisesta reaktiosta:
 - $\text{LiCoO}_2 \leftrightarrow 0,5\text{Li}^+ + 0,5e^- + \text{Li}_{0,5}\text{CoO}_2$
 - Kyseessä on litiumkobolttioksidi-katodi.
- Li-ion akusta puhuttaessa käytetään termiä ominaisenergia (Wh/kg).
 - Ominaisenergia mittaa määrää, joka voidaan vapauttaa tai varastoida akun massayksikköä kohti.
 - Se saadaan kertomalla ominaiskapasiteetti (Ah/kg) käyttöakun jännitteellä (V).

Akun lataus ja purkaminen

- Ominaiskapasiteetti mittaa varauksen määrää, joka voidaan palautuvasti varastoida massayksikköä kohti.
 - Ominaiskapasiteetti liittyy läheisesti akun latauksessa ja purkamisessa tapahtuvassa sähkökemiallisessa reaktiossa vapautuvien elektronien määrään.
- Voidaan puhua akun latauksen ja purkamisen määrästä, kun halutaan tietää, että kuinka nopeasti akku voidaan ladata tai purkaa.
- Tätä voidaan kutsua termillä C-arvo.
 - Esimerkiksi 1C tarkoittaa, että akku purkautuu yhden tunnin aikana maksimi kapasiteetistaan.

Pikalataus

- Sähköautoilta vaaditaan nykyään yhä tehokkaampia ja nopeampia pikalatausratkaisuja.
- Pikalatauskeskus koostuu enimmillään kahdeksasta pikalatausliitännästä, joka tuottaa lataustehoa yhteensä 600kW saakka.
 - Jousikiinnitteiset latauskaapelit yltävät noin 4-6 metrin päähän ja ne toimivat tasavirralla.
 - Latauskaapelin päässä on standardin mukainen pistoke, joka liitetään sähköautoon kiinni.
 - Pikalatauskeskukset ovat joko 500V tai 800V versioita, riippuen sähköauton voimansiirtojännitteen suuruudesta.

Akun soveltuvuudet eri käyttökohteisiin

- Nykyaikaisten Li-ion akkujen avulla tuotetaan energiaa moniin arkipäivän käyttökohteisiin tehokkaasti ja turvallisesti.
- Yleisimpiä käyttökohteita Li-ion akuille ovat muun muassa:
 - Hätävirtajärjestelmät
 - Sähkö- ja vapaa-ajan ajoneuvot
 - Merikulkuneuvot
 - Aurinkoenergian talteenottajat
 - Syrjäisten alueiden valvonta- ja hälytysjärjestelmät
 - Henkilökohtaiset liikkumisvälineet
 - Kannettavat virtalähteet
 - Kerrostalojen "Second Life" ratkaisut

Li-ion akun edut ja haitat

- Li-ion akkujen etuina muihin ladattaviin akkuteknikoihin verrattuna voidaan pitää niiden suurta energiakapasiteettia.
- Litiumioniakuilla päästään nykyään ominaisenergian suuruusluokkiin 100-265 Wh/kg.
- Li-ion akkukennot voivat tuottaa nykyään 3,6 voltia jännitettä, mikä on kolme kertaa suurempaa kuin nikkelipohjaisilla (Ni-Cd tai Ni-MH) akkuteknikoilla.
 - Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että Li-ion akkutekniikan avulla voidaan tuottaa isoja sähkövirtoja korkeatehoisille laitteille.

Li-ion akun edut ja haitat

- Li-ion akuilla ei ole muistiefektiä (memory effect), jossa toistuvassa lataus- ja purkaussykliissä akku ”muistaa” matalan kapasiteettitason.
- Li-ion akkujen varauksen itsenäinen purkautuminen on noin 1,5-2% kuukaudessa, joka tekee siitä todella energiatehokkaan akkuratkaisun.
- Tänä päivänäkin Li-ion akuilla on vielä haittapuolia, varsinkin turvallisuuteen liittyen.
 - Li-ion akuilla esiintyy taipumusta ylikuumenemiseen sekä ne voivat vaurioitua korkeilla jännitemäärillä.
- Tämän takia esimerkiksi sähköautojen Li-ion akuille on kehitetty BMS-järjestelmä (Battery Management System).

Li-ion akun edut ja haitat

- BMS-järjestelmän avulla voidaan kontrolloida lämmön karkaamista sekä havaita ja eristää vioittunut akkukenno ja tämän avulla estää akkupalon syttymistä.
- Muutaman vuoden käytön jälkeen Li-ion akuilla on taipumusta menettää kapasiteettiaan sekä myös lakata toimimasta.
- Li-ion akkujen hinnat ovat myös tänä päivänä noin 40% korkeampia kuin nikkelpohjaisten akkujen.

Akun mitoitus ja laskentakaavat

- Akkupaketin mitoituksessa on monia erilaisia laskentakaavoja.
- Kaikki kyseiset laskentakaavat pohjautuvat Ohmin lakiin, jossa kuvataan jännitteen (V), sähkövirran (I) sekä resistanssin (R) välistä suhdetta.
- Koska jännitteen ja sähkövirran arvot ovat mitattavia arvoja, ne ovat välttämättömiä akun laskentakaavoja suoritettaessa.

Ohmin laki

- Ohmin laki pohjautuu kaavaan, jossa jännite (U) on sähkövirta (I) kerrottuna resistanssilla (R).
- $U = I \times R$,
- Jossa
 - U on jännite (V)
 - I on sähkövirta (A)
 - R on resistanssi (Ω)

Akkukennojen määrä

- Kun tiedetään akkupaketilta vaadittavat jännitteen ja sähkövirran suuruudet, saadaan tarvittavien akkukennojen määrä laskettua kaavalla:
- $\frac{V_p}{V_c} = \text{akkukennojen määrä}$,
- Jossa
 - V_p on akkupaketin jännite (V)
 - V_c on akkukennon jännite (V)

Energiamäärän laskenta

- Akkupaketin energiamäärän laskenta suoritetaan kaavalla:
- $E_p = V_p \times I_p$,
- Jossa
 - E_p on akkupaketin energiamäärä (kWh)
 - V_p on akkupaketin jännite (V)
 - I_p on kapasiteetti (Ah)

Akkuteho

- Akkutehon laskennassa hyödynnetään kaavaa:
- $P = I^2 \times R$,
- Jossa
 - P on akkuteho (W)
 - I on kapasiteetti (Ah)
 - R on resistanssi (Ω)

Maksimi jatkuva varauksen purku

- Maksimi jatkuvan varauksen purkamisen sähkövirta lasketaan kaavalla:
- $N_p \times I_c \times C_{max} = I_{max}$,
- Jossa
 - N_p on rinnakkaisten akkukennojen lukumäärä (kpl)
 - I_c on akkukennon sähkövirta (A)
 - C_{max} on maksimi C-arvo (C-arvo tarkoittaa arvoa, joka kertoo, että kuinka nopeasti akku voidaan ladata tai purkaa).
 - I_{max} on maksimi jatkuva sähkövirta (A)

Akun maksimi latausjännite

- Akun maksimi latausjännite lasketaan kaavalla:
- $N_s \times V_{cmax} = V_{max}$
- Jossa
 - N_s on sarjassa olevien akkukennojen lukumäärä (kpl)
 - V_{cmax} on akkukennon maksimi jännite (V)
 - V_{max} on akun maksimi latausjännite (V)

Li-ion akkujen valmistus tuotantolinjalla

- Nykyisin Li-ion akkujen valmistus tuotantolinjalla voidaan suurimmaksi osaksi täysin automatisoida.
- Ohjaukset voidaan toteuttaa etänä.
- Tuotantolinjan alkupäästä löytyvät raaka-ainevarastot sekä loppupäässä tapahtuu valmiiden akkujen lajittelu.

Turvallisuus akkujen valmistuksessa

- Akkujen valmistuksessa turvallisuus on erittäin tärkeää.
- Tuotantolinjastolla hyödynnetään palotorjuntastrategioita yhdistettyinä ennaltaehkäisyyn ja valvontaan.
- Vakaat palotorjuntastandardit, turvallinen ja luotettava lämpötilan optinen kuituvalvonta sekä useat palotorjunta- ja hätäsuunnitelmat ovat välttämättömiä paloturvallisuuden varmistamiseksi turvallisessa Li-ion akkujen valmistuksessa.

Tyypillinen valmistusprosessi

- Elektrodien tuotanto ja kennojen viimeistely ovat pitkälti riippumattomia kennotyypistä, kun taas kennojen kokoonpanossa on erotettava erilaiset akkukennotyypit.
- Akkukennoja on kolmea eri tyyppiä:
 - Lieriömäinen
 - Prismaattinen
 - Pussikennoakku
- Akkukennojen valmistusprosessi koostuu monesta eri vaiheesta

Tyypillinen valmistusprosessi

- Lieriömäisen akkukennon valmistamisen vaiheet ovat:

- Sekoittaminen
- Päälystäminen
- Kuivaaminen
- Kalanterointi
- Leikkaaminen
- Tyhjiökuivaaminen
- Erottaminen
- Kelaaminen
- Pakkaaminen
- Elektrolyytin täyttäminen
- Muodostaminen



Sekoittaminen

- Pyörivän työkalun avulla vähintään kaksi erotettua raaka-ainetta yhdistetään massaksi. Massa vaatii aktiivisten materiaalien lisäksi myös johtavia lisäaineita, liuottimia ja sideaineita. Sekoittaminen koostuu märkäsekoituksesta ja kuivasekoituksesta, jotka erotetaan toisistaan.

Päällystäminen

- Kalvo päällystetään massalla levitystyökalun avulla, joko jatkuvasti tai ajoittain päällystysuunnassa. Yleensä kalvon ylä- ja alisivut päällystetään peräkkäin. Tämän jälkeen kalvo siirretään kuivaimeen, jonka jälkeen kalvon toinen puoli pinnoitetaan edellä olevan prosessin mukaisesti. Kalvon paksuudet (anodi-kuparikalvo ja katodi-alumiinifolio) vaihtelevat 5µm-25µm akkukennon suunnittelusta riippuen.

Kuivaaminen

- Päälystykseen jälkeen levitetty aktiivinen materiaali kuivataan jatkuvassa prosessissa. Liuotin poistetaan materiaalista lämmönsyötöllä, jossa katodipinnoitteen sisältämä helposti syttyvä liuotin otetaan talteen tai käytetään lämpökierrätykseen. Kalvon kuljetus toteutetaan joko rullajärjestelmillä tai kelluvilla ilmavirroilla.
- Kuivausrumpu on jaettu eri lämpötilavyöhykkeisiin yksilöllisen lämpötilaprofiilin toteuttamiseksi. Tämä toteutetaan tavallisesti kammiojärjestelmällä. Kuivurin läpikulkemisen jälkeen kalvo jäähtyy huoneenlämpötilaan asti, jonka jälkeen se rullataan tai päälystetään toiselta puolelta.

Kalanterointi

- Kalanteroinnin aikana molemmilta puolilta päälystettyä kupari- tai alumiinifoliota puristetaan pyörivällä telaparilla. Elektrodikalvo puretaan ensin staattisesti ja puhdistetaan harjoilla tai ilmavirroilla. Materiaali tiivistetään ylä- ja alateloilla, jossa telapari muodostaa tarkasti määritellyn linjapaineen. Kalanteroinnin jälkeen elektrodin kalvo puhdistetaan ja rullataan uudelleen.

Leikkaaminen

- Kalanteroidut rullat syötetään leikkausasemalle. Leikkaus on erotusprosessi, jossa leveä elektrodikela (emokela) jaetaan useisiin pienempiin elektrodikeloihin (tytärkelat). Tähän tarkoitukseen käytetään yleensä vierintäveitsiä. Yksittäiset tytärkelat puhdistetaan ja rullataan uudelleen leikkausprosessin jälkeen.

Tyhjiökuivaaminen

- Pinnoitetut tytärkelat työnnetään erityiselle tavaratelineelle. Telat viedään tyhjiöuuniin, jossa niiden kuivumisaika on noin 12-30 tuntia. Kuivauksen aikana jäännöskosteus ja liuottimet poistuvat tytärkeloista. Kuivauksen jälkeen kelat siirretään suoraan kuivaan huoneeseen tai ne kuivapakataan tyhjiössä.

Erottaminen

- Erottaminen on välttämätöntä akkukennon valmistuksessa ja se käsittää anodi-, katodi- sekä separaattorilevyn erottamista toisistaan tytärkeloista. Kuivatut tytärkelat kelataan auki ja syötetään erotustyökaluun, jossa leikkausprosessi suoritetaan yleensä lävistystyökalulla.

Kelaaminen

- Kelaamista tarvitaan prismaattisten ja lieriömäisten akkukennojen valmistuksessa, joka tapahtuu tytärkelojen tyhjiökuivaamisen jälkeen.
- Elektrodikalvot ja kaksi separaattorikalvoa kierretään kelauskaran (prismaattinen kenno) tai keskitapin (lieriömäinen kenno) ympärille. Käärityä tuotetta kutsutaan hyytelörullaksi (Jelly Roll) ja sen yksittäisten kalvojen sijainti varmistetaan lopuksi liimanauhalla.

Pakkaaminen

- Hyytelörulla työnnetään tukevaan metallikoteloon. Lieriömäisessä akkukennossa pohjaeriste sekä hyytelörulla asetetaan lieriömäiseen koteloon, jonka jälkeen anodin virrankeräin laserhitsataan kotelon pohjaan ja katodin virrankeräin laserhitsataan kotelon kanteen. Lopuksi hyytelörullan ja kannen väliin asetetaan eristerengas.

Elektrolyytin täyttäminen

- Pakkaamisen jälkeen suoritetaan elektrolyytin täyttö, jossa elektrolyytti täytetään kennoon tyhjiössä erittäin tarkan annosteluneulan avulla. Asettamalla kennoon painetta (inertin kaasun syöttö ja/tai tyhjiön vuorottelutoiminto) aktivoituu kapillaarivaikutus kennossa. Lopuksi akkukenno suljetaan tyhjiössä.
- Elektrolyytti (esim. LiPF₆) on yleensä ostettu komponentti, joka asettaa korkeat vaatimukset prosessiympäristölle (palonsuojaus, poisto ym.), koska se on luokiteltu vaaralliseksi aineeksi.

Muodostaminen

- Muodostaminen kuvaa akkukennon ensimmäisiä lataus- ja purkuprosesseja. Muodostamista varten akkukennot asetetaan erityisiin telineisiin ja ne saatetaan kosketukseen jousikuormitteisilla kosketinnastoilla. Sen jälkeen kennot ladataan tai puretaan tarkasti määriteltyihin virta- ja jännitekäyriin.
- Muodostamisen aikana muodostuu SEI (Solid Electrolyte Interface), joka luo rajapintakerroksen elektrolyytin ja elektrodin välille.

Laadunvarmistuksen menetelmät ja strategiat

- Akkujen tuotannon loppupäässä suoritetaan akkujen vanhentamisprosessi, jota käytetään laadunvarmistamiseen.
- Vanhentamisprosessin aikana kennojen ominaisuuksia ja suorituskykyä seurataan mittaamalla säännöllisesti kennon avoimen piirin jännitettä OCV (Open Circuit Voltage) enintään kolmen viikon ajan.
- Vanhentaminen korkeassa lämpötilassa ja normaalilämpötilassa erotetaan toisistaan.
 - Kennot käyvät yleensä ensin korkean lämpötilan ja sitten normaalin lämpötilan ikääntymisen.

Laadunvarmistuksen menetelmät ja strategiat

- Akkukennot varastoidaan niin sanotuille ikääntymishyllyille tai –torneille.
- Jos akkujen ominaisuuksissa ei tapahdu merkittäviä muutoksia koko ajanjakson aikana.
 - Akku on täysin toimintakykyinen.
 - Voidaan toimittaa asiakkaalle.

Käsittely ja varastointi

- Ennen kuin akkukennot poistuvat tehtaalta, ne testataan vielä EOL-testauslaitteessa.
- Kennot poistetaan ikääntymishyllyiltä ja syötetään testausasemalle, jossa niiden varaus puretaan lataustilaan.
 - Valmistajasta riippuen voidaan suorittaa vielä pulssitestejä, sisäisiä vastusmittauksia, optisia tarkastuksia, OCV-testejä sekä vuototestejä.
- Testauksen jälkeen monet akkuvalmistajat lajittelevat kennot suorituskykytietojen mukaan (luokitus).
- Kun testit on läpäisty, akkukennot voidaan pakata ja lähettää asiakkaille.
 - Kuljetusta varten akkukennot ovat yleensä varustettu muovisuojausilla ja pinottu pahvilaatikon sisään.

Li-ion akkujen heikkeneminen

- Li-ion akut heikkenevät ajan mittaan, jonka jälkeen niiden kapasiteetti on jo niin alhainen, että ne täytyy vaihtaa uuteen.
- Akun kapasiteetin heikkenemiseen vaikuttaa monet eri tekijät.
- Näitä tekijöitä ovat mm:
 - Liikakuormitus
 - Elektrolyyttirajapinnan muodostuminen
 - Elektrolyytin hajoaminen
 - Itsepurkautuminen
 - Elektroodin epävakaus
 - Nesteiden kerääjä

Liikakuormitus

- Negatiivisen elektrodin toiminta-alue pienenee, kun elektrodin pinnalle kertynyt litium estää litiumionien pääsyn elektrodiin.
- Liikakuormitus johtaa positiivisen elektrodin reaktioon, jossa syntyy oksidia. Tämä johtaa akun kapasiteetin laskuun.
- Korkeassa kuormituksessa (yli 4,5V) elektrolyytti hapettuu helposti muodostaen liukenematonta ainetta (esimerkiksi Li_2Co_3) ja kaasua. Tämä liukenematon aine tukkii elektrodin mikrohuokoset ja estää litiumionien kulkeutumisen, joka taas johtaa kapasiteetin menettämiseen kiertoprosessissa.

Elektrolyyttirajapinnan muodostuminen

- Akun purkautuessa ensimmäisen kerran, muodostuu elektrolyytin ja elektrodin välille vakaa ja suojaava kiinteä elektrolyyttirajapinta SEI (Solid Electrolyte Interface).
- SEI:n muodostuminen kuluttaa osan litiumioneista, mikä johtaa elektrodien väliseen kapasiteetin tasapainon muuttumiseen. Tämä taas vaikuttaa akun ominaiskapasiteetin pienenemiseen.

Elektrolyytin hajoaminen

- Elektrolyytin kulumisen muuttaa elektrolyyttipitoisuutta, joka vaikuttaa kennokapasiteettiin.

Kapasiteetin menetys itsepurkautumisessa

- Käänteisessä kapasiteetin menetyksessä akun sisällä tapahtuvassa hapettumis-/pelkistymisreaktiossa aiheutuu elektronien siirto, joka kuluttaa osan kapasiteetista aiheuttaen akun kapasiteetin menetyksen.
- Peruuttamattomassa kapasiteetin menetyksessä dendriitit tunkeutuvat separaattoriin, jonka myötä syntyy mikrokontakti positiivisen ja negatiivisen navan välille. Tämä johtaa lisääntyneeseen itsepurkautumiseen ja käytettävissä olevan kapasiteetin menetykseen.

Elektrodin epävakaus

- Katodimateriaalin liukenemisessa rakenteelliset viat johtavat sidosenergian heikkenemiseen, helppoon murtumiseen sekä hajoamiseen. Liukenemisessa syntyvä Ni_2 kerääntyy negatiiviselle elektrodille ja tukkii mikrohuokoset vaikuttaen ionien kiinnittymiseen ja irtoamiseen.
- Latauspotentiaali on liian korkea.
- Katodimateriaalin hiilimustan pitoisuus. Elektrolyytin hapettumisesta hiilimustan pinnan päälle kertyvät aineet, jotka omaavat katalyyttiset ominaisuudet. Nämä aineet lisäävät metalli-ionien liukenemisnopeutta.

Kapasiteetin menetys-nesteen kerääjä

- Positiivisen navan alumiini (Al) ja negatiivinen kupari (Cu).
- Alumiiniin muodostuu helposti paikallista korroosiota tai pistekorroosiota elektrolyytissä.
- Kupari ja alumiini ovat alttiita lisäämään akun sisäistä vastusta, joka johtuu pintaoksidikalvon muodostumisesta ja huonosta tarttumisesta.
- Akun purkautumisen aikana kupari hapettuu Cu_2^+ , diffusoituu negatiiviselle elektrodille elektrolyytin läpi ja pelkistyy sitten latauksen aikana. Negatiivisen elektrodin pinnalle muodostuu kuparidendriittejä, jotka läpäisevät kalvon erittäin helposti ja aiheuttavat oikosulun.

Akun lämmönhallinnan merkitys kestävyYTEEN

- Li-ion akun latauksen ja purkamisen aikana tapahtuvien kemiallisten reaktioiden aiheuttamien lämpötilojen nousu vaikuttaa merkittävästi akun kapasiteettiin ja toimintaan.
- Tämän takia on syytä hyödyntää Li-ion akustoissa erilaisia lämmönhallintajärjestelmiä, jotta akun lämpötila voidaan pitää optimaalisena.
- Akun lämmönhallintajärjestelmä, eli BTMS-järjestelmä (Battery Thermal Management System), kontrolloi jokaista akkukennoa mahdollistaen niiden optimaalisen toimintalämpötilan.

Akun lämmönhallinnan merkitys kestävyYTEEN

- Lämpötilan suuruus vaikuttaa huomattavasti akkukennon toimintaan.
- Erilaisia akkujen lämmönhallintajärjestelmiä ovat:
 - Ilmajäähdytteinen
 - Nestejäähdytteinen
 - Faasivaihto jäähdytysjärjestelmä, eli PCM-järjestelmä (Phase Change Material)
- Ilmajäähdytteinen järjestelmä on melko yksinkertainen ja helppo toteuttaa.
 - Ilma kulkee omia kanaviaan pitkin varastoiden itseensä akkukennoista syntyvää lämpöä.

Akun lämmönhallinnan merkitys kestävyYTEEN

- Nestejäähdytteinen järjestelmä on taas monimutkaisempi järjestelmä.
 - Jäähdytinnesteinä hyödynnetään vettä tai öljyä niiden korkeiden lämpöfysikaalisten ominaisuuksien takia.
 - Nestemäisen jäähdytinnesteen lämmönpoistoon liittyy epäsuora lämmönsiirtoprosessi, jossa käytetään vaippaa tai putkea akkuenergian säästämiseksi.
- PCM-järjestelmä on latenttilämpötilan jäähdytystekniikka, joka imee lämpöä lämmönlähteestä.
 - Yksinkertainen jäähdytysjärjestelmä, sillä kyseinen järjestelmä omaa vähemmän painoa ja takaa tasaisen lämmönpoiston.
 - Järjestelmän haittapuoli on kuitenkin se, että se rajoittaa materiaalien lämpöominaisuuksia.

Akkujen kierrätettävyys

- Sähköautojen määrän yhä lisääntyessä myös Li-ion akkujen kysyntä kasvaa mullistavasti.
- Kun sähköautot saavuttavat elinjaksonsa loppupään, syntyy ongelma, jossa on ratkaistava käytöstä poistuvien Li-ion akkujen oikeaoppinen hävittäminen ja kierrättäminen.
 - Tänä päivänäkin vain murto-osa loppuun käytetyistä Li-ion akuista päätyvät kierrätyskeskuksiin.
- On suunniteltava parempia ympäristölakeja, joissa rikkoutuneet akut määrätään oikeaoppisesti kierrätettäviksi.
- Kierrätyksellä on kuitenkin monia etuja uusien akkujen tuotannon kannalta, sillä vanhoista akuista saadaan raaka-aineita uusia akkuja varten.

Akkujen kierrätettävyys

- Tänä päivänä Li-ion akuille on monia erilaisia kierrätysmenetelmiä ja jokaisella on omat hyödyt sekä haittansa.
- Erilaisia kierrätysmetodeja ovat:
 - Mekaaniset prosessit
 - Hydrometallurgia (vesikemia)
 - Pyrometallurgia (esim. sulatus)
 - Suora kierrätys

Mekaaniset prosessit

- Hyödyt:
 - Soveltuu jokaiseen akkukemiaan ja konfiguraatioon.
 - Matala energian kulutus.
 - Parantaa arvokkaiden metallien liuotustehoa.
- Haitat:
 - Täytyy yhdistää muihin kierrätysmetodeihin, jotta kaikki materiaali saadaan talteen.
- Talteenotetut materiaalit:
 - Esim. Li_2Co_3

Hydrometallurgia

- Hyödyt:
 - Soveltuu jokaiseen akkukemiaan ja konfiguraatioon.
- Haitat:
 - Vain taloudellista akuille, jotka sisältävät kuparia ja nikkeliä.
- Talteenotetut materiaalit:
 - Kupari
 - Alumiini
 - Kobaltti
 - Anodi on tuhottu
 - Esim. Li_2Co_3

Pyrometallurgia

- Hyödyt:
 - Soveltuu jokaiseen akkukemiaan ja konfiguraatioon.
- Haitat:
 - Vain taloudellista akuille, jotka sisältävät kuparia ja nikkeliä.
 - Myrkkyykaasujen suodattamista vaaditaan.
- Talteenotetut materiaalit:
 - Kobaltti
 - Nikkeli
 - Kupari
 - Jotkin raudat
 - Anodi on tuhottu

Suora kierrätys

- Hyödyt:
 - Melkein kaikki akkumateriaali saadaan talteen.
- Haitat:
 - Talteen otettu materiaali ei välttämättä toimi samalla tavalla kuin tuore raaka-aine.
 - Katodimateriaalien sekoittuminen voi alentaa kierrätetyn tuotteen arvoa.
- Talteenotetut materiaalit:
 - Melkein kaikki komponentit paitsi separaattori.

Tulevaisuuden akkuratkaisut

- Akkuyritykset kehittävät jatkuvasti uusia Li-ion akkuratkaisuja, jotka ovat halvempia, tiheämpiä, kevyempiä sekä paljon tehokkaampia kuin nykyiset akut.
- Maailmassa tarvitaan nykyään parempia akkuratkaisuja, jotka ovat puhtaasti tuotettuja sekä helposti kierrätettäviä.
 - Tämän takia akkujen kehitykseen panostetaan paljon aikaa ja rahaa.
- Li-ion akuilta vaaditaan yhä enemmän kapasiteettia, sillä myös meri-, juna-, ja lentoliikenne sähköistyvät kovaa vauhtia.
 - Tämän seurauksena nykyisiä akkukemioita ja akkukennoja hienosäädetään, jotta akut latautuisivat yhä nopeammin ja pystyisivät operoimaan monissa eri lämpötiloissa (-50°C-125°C).

Tulevaisuuden akkuratkaisut

- Li-ion akkukemioiden kehittämisellä pyritään ilmiöön, jossa positiiviset ja negatiiviset elektrodit voivat varastoida yhä enemmän litiumioneita itseensä.
- Tulevaisuudessa tullaan myös näkemään Li-S (litiumrikki) akkuja, joita kehitetään parasta aikaa.
 - Litiumrikkiakut tulevat todennäköisesti syrjäyttämään nykyiset Li-ion akut, sillä Li-S akkujen teoreettinen energiatiheys on neljä kertaa suurempi kuin Li-ion akkujen.
 - Tämän vuoksi Li-S akut soveltuvat tulevaisuudessa erityisesti ilmailu- ja avaruusteollisuuden käyttöön.

Tulevaisuuden akkuratkaisut

- Sähköautojen Li-ion akkuratkaisuna tulevaisuudessa voivat myös toimia kiinteän tilan akut (Solid State Battery).
 - Nestemäinen elektrolyytti on korvattu kiinteällä materiaalilla, joka sallii litiumionien kulun tehokkaasti lävitseen.
- Kiinteillä elektrolyyteillä on monia etuja:
 - Ei syty palamaan kuumennettaessa.
 - Tiheää mutta kevyttä materiaalia.
 - Kiinteän tilan akut tuottavat paljon energiaa suhteessa painoon, joka tekee niistä oivan tulevaisuuden akkuratkaisun sähköautoihin.

Akkupaketin runkorakenteen suunnittelu

- Vielä nykyisissä akun valmistusprosessin vaiheissa työ suoritetaan akkukennosta moduuliin ja sitten moduulista akkupakettiin.
- Akku jaetaan erillisiin akkumoduuleihin, joista jokaisella voi olla oma itsenäinen akunhallinta- (BMS) ja diagnostiikkajärjestelmänsä.
 - Tämä mahdollistaa akkukennojen toimintahäiriöiden hallinnan moduulitasolla sekä mahdollistaa moduulien vaihtamisen yksitellen koko akkupaketin sijaan.
 - Akkumoduulit myös voivat tarjota rakenteellista tukea akkupaketille.
- Akkupaketin runkorakenne on yleisesti jaettu moduulikohtaisesti.
 - Kuitenkin nykyään on suunniteltu moduulittomia akkupaketteja CTP-tekniikkaa hyödyntäen (Cell To Pack).
- CTP-tekniikassa akkupaketit kootaan suoraan akkukennoista ilman moduuleja.
- Uudella tekniikalla ja akkukennosuunnittelulla akkupaketit ja niiden runkorakenteet voivat olla matalampia kuin perinteisillä sylinterimäisillä tai prismaattisilla akkukennorakenteilla.
 - Tämän avulla pystytään luomaan tilasäästöjä sähköautojen matkustamoihin.

