



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Akseli Peltola

Auton akkujen kierrätys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

24.2.2021

Tekijä Otsikko	Akseli Peltola Auton akkujen kierrätys
Sivumäärä Aika	23 sivua + 2 liitettä 24.2.2021
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Jälkimarkkinointi
Ohjaaja	Lehtori Pasi Kovanen
Tämän työn tarkoituksena oli selvittää litiumioni- ja lyijyakkujen kierrätystä nyt ja tulevaisuudessa. Työ on suoritettu kirjallisuustutkimuksena. Työssä käytettiin lähteenä artikkeleja, katsauksia ja valmistajien antamia tietoja. Pääasiassa hyödynnettiin tuoreita verkkoartikkeleita ja -aineistoja. Työn ensimmäisessä osassa tarkastellaan akkujen kierrätyksen taustaa ja siihen liittyvää lainsäädäntöä. Akun rakennetta ja toimintaa käsittelevässä osiossa esitellään tämän hetken yleisimpien ajoneuvoissa käytettävien akkutyyppejen kemiat. Akunhallintajärjestelmän toimintaa käsitellään akkupaketin vaihdon oikea-aikaisuuden näkökulmasta. Lisäksi luodaan katsaus akkujen kierrätyksen merkitykseen kestävän kehityksen ja taloudellisuuden kannalta. Sekä lyijy- että litiumioniakkujen kierrätysprosessin ja kierrätyslaitosten kuvailun yhteydessä paneudutaan kierrätyksen aiheuttamiin ongelmiin kuten terveyshaittoihin. Lopuksi tehdään yhteenveto käsitellyistä asioista luotaamalla niitä myös tulevaisuuteen. Työ osoitti, että kierrätyksen lainsäädäntö ja akkujen kierrätyksen arvoketju ovat EU:ssa ja Suomessa hyvin järjestyksessä. Muualla maailmassa lainsäädäntötyö ja varsinainen turvallinen kierrätys ovat vielä alkutaipaleellaan. Kehitettävänä kohteina nousivat esiin työolot, työturvallisuus ja ekologisuus. Huolen aiheena ovat materiaalien riittävyys ja kallis hinta. Näiden seikkojen vuoksi EU suunnittelee litiumioniakkujen kierrätystoiminnan kotiuttamista. Työ osoitti, että sekä ajoneuvojen akkurakenteissa ja akkujen kierrätyksessä on edelleen kehittämistä. Loppupäätelmänä voidaan todeta, että sähköautojen määrä kaikesta päätellen jatkaa kasvuaan, kierrätysmenetelmät kehittyvät ja terveyshaitat saadaan kotiuttamisella kuriin.	
Avainsanat	litiumioniakku, lyijyakku, kierrätys, sähköauto

Author Title	Akseli Peltola Automotive Battery Recycling
Number of Pages Date	23 pages + 2 appendices 24 February 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive After Sales Engineering
Instructor	Pasi Kovanen, Senior Lecturer
The aim of this thesis was to study the recycling methods and processes of lithium-ion and lead-acid batteries now and in the future. The thesis was carried out as a literature research. Up-to-date scientific articles and reviews together with information provided by the manufactures on the internet, were used as background material and references. In the first part of the thesis, the legislation and the background of battery recycling are addressed, followed by an introduction to structural aspects and chemistries of commonly used car batteries. Battery management system is discussed in the light of determining the most suitable moment for car battery pack replacement. The importance of car battery recycling in sustainable development and economic efficiency is highlighted. The problems and disadvantages in car battery recycling such as health problems, are addressed. Finally, discussed issues and possible future trends are summarized. According to this study, domestic and EU laws are properly enacted. EU value chain for lithium-ion batteries is coming in due course. In the other parts of the world, legislation and safe recycling are on the early stages of development. In the future, working conditions, work safety, and ecological aspects will still be problems to solve. Major concerns in the sufficiency and in the price of precious raw materials will be actual also in the coming years. As a consequence, EU is planning to domicile the recycling businesses to its own area. In conclusion, there are several obstacles to overcome in the car batteries and their recycling methods. However, the number of electric cars will continue to grow exponentially. The development of lithium-ion batteries and their recycling methods might have a positive effect on prevailing health problems, too.	
Keywords	Lithium-ion battery, lead-acid battery, recycling, electric car

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Akkujen kierrätyksen taustaa	1
2.1	Akuista	2
2.2	Sähköautoista	2
2.3	Kierrätysongelmia	3
3	Lainsäädäntö	4
3.1	EU-lainsäädäntö	4
3.2	Suomen lainsäädäntö	5
4	Akun rakenne ja toiminta	5
4.1	Akkupaketti	5
4.2	Akkujen kemia ajoneuvokäytössä	6
4.2.1	Lyijyakku	6
4.2.2	Nikkeli-metallihydridi	8
4.2.3	Litiumioniakut	8
4.3	Akunhallintajärjestelmä	9
4.3.1	Akunhallintajärjestelmän tehtävä	9
4.3.2	State of charge (SOC)	10
4.3.3	State of health (SOH)	10
4.3.4	Balansointi	11
4.3.5	Lämpötilan hallinta	11
5	Akkujen kierrätyksen tarpeellisuus	11
6	Lyijyakkujen kierrätys	12
6.1	Lyijyakkujen kierrätysprosessi	13
6.2	Lyijyakkujen kierrätyslaitokset	14

6.3	Kierrätyksen terveysriskit	15
7	Litiumioniakkujen kierrätys	17
7.1	Kierrätysprosessi	17
7.2	Kierrätystavat	18
7.2.1	Hydrometallurginen prosessi	18
7.2.2	Pyrometallurginen prosessi	19
7.3	Litiumioniakkujen kierrätyslaitokset	20
8	Huomiot ja yhteenveto	21
	Lähdeluettelo	23
	Liitteet	
	Liite 1. Vanhempia sähkö- ja hybridautoja sekä nykyaikaisia sähköautoja	
	Liite 2. Litiumioniakkujen kierrätyslaitoksia ja alan tärkeitä toimijoita	

Lyhenteet

CAGR Compound Annual Growth Rate

BMS Battery management system

SOA Safe Operating Area

SOH State of Health

SOC State of Charge

1 Johdanto

Insinööriyön aiheena on auton akkujen kierrätys. Työssä tarkastellaan ajoneuvoissa käytettäviä akkutyppejä sekä niiden kierrätystä ja erityisesti lyijy- sekä litiumioniakun toimintaa ja kierrätystä.

Sähköautojen määrä kasvaa eksponentiaalisesti, ja valtava akkumäärä tulee jo lähitulevaisuudessa tiensä päähän kierrätettäväksi, joten aihe on hyvinkin ajankohtainen. Tämä työ antaa näkökulmia sille, millä tavoin akut tulisi kierrättää. Työssä paneudutaan myös kierrätyksen lieveilmiöihin kuten terveyshaittoihin. Kierrätyskulujen pienentäminen, turvallisuus sekä kierrätyksen ympäristövaikutusten kontrolloiminen ovat nyt ja tulevaisuudessa huolenaiheita. Todellisena uhkana koetaan myös raskasmetallien riittävyys ja erityisesti koboltin korkea hinta.

Aiheeseen riittävää materiaalia oli runsaasti tarjolla. Tätä kuvaa hyvin Googlen haun tuottama tulos hakutermillä recycling lithiumion car batteries, joka antoi 0,85 sekunnissa yhteensä noin 4,5 miljoonaa hakutulosta, ja hakutermillä recycling old car batteries, joka tuotti 0,75 sekunnissa 25,5 miljoonaa tulosta. Erityisesti artikkeleja oli uusista litiumioniakkujen kierrätysmenetelmistä sekä lyijyakkujen kierrätyksen liittyvistä terveysvaikutuksista. Kaikki lähteet käsittelivät periaatteessa samoja asioita kierrätyksen suhteen, ja näin ollen mitään suurta näkemyseroa kierrätyksen tulevaisuudesta ei ollut kirjoittajien välillä.

2 Akkujen kierrätyksen taustaa

Kierrätyksen tehtävänä on ehkäistä jätteistä ja jätehuollosta aiheutuvaa vaaraa ja haittaa terveydelle ja ympäristölle. Tavoitteena on siis sekä jätteen määrän että haitallisuuden vähentäminen. Kierrätys mahdollistaa myös luonnonvarojen järkevän käytön. Käyttökelvottomien akkujen aiheuttamat jätteet saattavat aiheuttaa vaaraa ympäristölle lähinnä akkujen sisältämien metallien vuoksi. Akkujen kohdalla on tavoitteena materiaalien ja erityisesti arvokkaiden metallien uudelleen käyttö. (Kierrätys ja uudelleenkäyttövoivat vähentää kulutusta ja sen ympäristövaikutuksia 2017.)

2.1 Akkuista

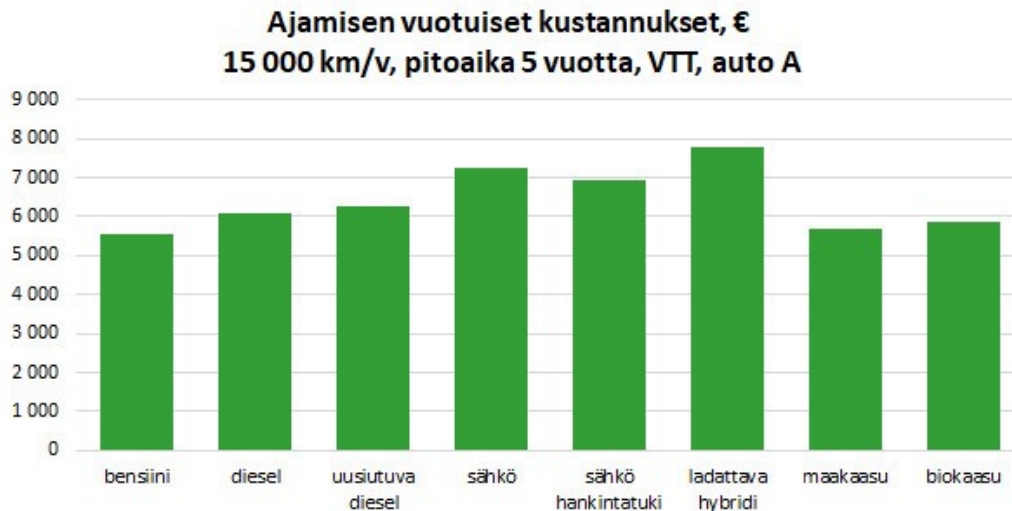
Vuonna 2016 kierrätettiin arviolta vain 5 % maailman litiumioniakuista. Näin ollen valtaosa päätyi kaatopaikalle kuormittamaan ympäristöä. Kuitenkin lyijyakuista palautetaan nykyisin kierrätyspisteisiin noin 90 %. Voidaankin sanoa, että lyijyakkuja kierrätetään paljon vastuullisemmin kuin litiumioniakkuja. (Valio 2018.)

Globaali sähkökäyttöisten kulkuneuvojen akkujen kierrätyksen markkina-arvo vuonna 2017 on arvoitu olleen 128,6 miljoonaa dollaria ja sen arvioidaan kasvavan vuoteen 2025 mennessä 2272,3 miljoonaan dollariin, jolloin yhdistetty vuosittainen kasvun (CAGR) muutos vuodesta 2018–2025 on noin 41,8 %. (Jadhav 2019.)

2.2 Sähköautoista

Sähköautojen määrä lisääntyy eksponentiaalisesti. Vuosittainen sähköautojen valmistusmäärä ylitti miljoonan rajan vuonna 2017. Vuonna 2015 litiumioniakkujen tarve oli 19 GWh ja vuonna 2030 sen arvioidaan olevan 1293 GWh. Näkökulmaa tulevaisuuteen avaa tieto, että USA:ssa 28,5 miljoonaa litiumakkua tulee tiensä päähän vuoteen 2029 mennessä. Tämä on todellinen ympäristöriski ja valtava haaste kierrätyksen kehitykselle. (Schloesser ym. 2019.) Liitteessä 1 esitellään sekä tämänhetkisiä, että jonkin verran vanhempia sähkö- ja hybridautoja.

Sähköautojen määrän kehitykseen vaikuttaa merkittävästi harjoitettu energiapolitiikka. Sähköautojen hankkimista voidaan tukea verovaroin tai myöntämällä autoon kohdistuviin veroihin ja maksuihin helpotuksia. Suomessa ei ole VTT:n ja VERNEn selvitysten mukaan eroa käyttökustannuksissa akkuja tai fossiilisia polttoaineita käyttävien autojen välillä. Kuvassa 1 on havainnollistettu ajamisen vuosikustannuksia eri käyttövoimilla. (VTT:n laskelma autoilun kustannuksista 2019; VERNEn laskelma autoilun kustannuksista 2019.) Ympäristökysymykset, yleinen ja henkilökohtainen talouden tila, latauspaikkojen määrä ja latauksen maksullisuus mainitaan tämän vuoksi merkittävinä sähköautojen määrän kasvuun vaikuttavina tekijöinä. Tulevaisuuden ongelmana on saada riittävä määrä materiaaleja sähköautojen akkujen valmistukseen. Tämän ongelman myötä kierrätyksen tarve korostuu entisestään.



Kuva 1. Vuotuiset kustannukset (€), kun autolla ajetaan 15 000 km per vuosi.

2.3 Kierrätysongelmia

Akkujen lataaminen mahdollistaa energian uusiokäytön. Jotta tämä hyöty ja materiaallinen tarve saadaan realisoitua, akkujen komponentit tulee voida kierrättää tehokkaasti ja turvallisesti. Fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen, tehokkaiden akkujen kehittäminen ja niiden asiamukainen kierrättäminen ovat puhtaan ympäristön kulmakiviä. Tämä pyrkimys on keskeinen tekijä niin kulkuneuvojen kuin muun energia-alan kehityksessä.

Luontoa säästäviä metodeja litiumioniakkujen kierrätykseen tutkitaan innokkaasti, mutta varsinaisia spesifikaatioita ei ole onnistuttu tekemään täysimittaisen toiminnan mahdollistamiseksi. Näin ollen esimerkiksi kierrätettävien litiumioniakkujen komponenttien kykyä kestää kierrätysprosesseja ei ole tarkemmin selvitetty eikä myöskään siihen liittyviä arvoja määritetty. Ongelmana on myös erilaisten materiaalien ja rakenteiden (esim. kennotakenteiden) perustutkimuksen ja siitä kumpuavan kehitystyön siirtäminen käytännön tasolle akkujen tuotantoon. Litiumioniakuissa katodimateriaaleja on useita ja akkujen rakenteet eroavat valmistajien välillä.

Akkuvalmistajat ovat keskittyneet valmistuskustannusten pienentämiseen ja erilaisten akkukemioiden tutkimiseen. Tavoitteena niillä on siis ollut valmistuskulujen pienentäminen ja akkukapasiteetin suurentaminen. Samanaikaisesti akkujen kierrätettävyyden ja mitava kierrätysinfrastruktuuri ovat jääneet toissijaisiksi.

Ongelmaksi nousee myös taloudellinen kannattavuus. Yritykset eivät välttämättä uskalla sijoittaa suuria summia litiumioniakkujen kierrätykseen, koska uusia käyttövoimainno-vaatioita syntyy jatkuvasti ja raaka-aineiden hintojen muuttumista on vaikea ennustaa pitkälle tulevaisuuteen. (Jacoby 2019.)

3 Lainsäädäntö

Useissa maissa lainsäädäntö ei ole aiemmin edellyttänyt litiumioniakkujen kierrätystä. Esimerkiksi Kiina asetti vasta vuoden 2020 alussa sähköautojen valmistajille velvollisuuden huolehtia käytettyjen akkujen keräyksestä ja kierrätyksestä. Yhdysvalloissa 19 osavaltiossa ei ole edelleenkään akkujen kierrätystä koskevaa lainsäädäntöä. Tuottajavastuulaki on siis vasta tulossa tai kehitteillä ympäri maailmaa. (Recycling Laws By State 2018.)

3.1 EU-lainsäädäntö

Direktiivillä 2006/66/EY pyritään yhtenäistämään EU-jäsenvaltioiden määräyksiä akuista ja pattereista sekä kierrätyksestä. Direktiivillä kielletään myös kadmiumia sisältävien paristojen ja akkujen tukku- ja jälleenmyynti. Akkujen ja paristojen kadmiumin määrä ei saa ylittää 0,002:ta painoprosenttia. Akut eivät saa sisältää enemmän kuin 0,0005 % elohopeaa. (Direktiivi 2006/66/EY.)

Komission asetus (EU) N:o 493/2012 koskee erityisesti akkujen ja paristojen kierrätystä ja antaa akkujen kierrättäjille ohjeet kierrätystehokkuuden laskemiseksi. Tämä on direktiiviin 2006/66/EY liittyvä asetus, jonka mukaan kierrätysprosessilla tarkoitetaan, ”- - mitä tahansa edellä mainitun direktiivin mukaista jälleenkäsittelyä, joka suoritetaan käytetyille esimerkiksi, akuille, ja minkä seurauksena valmistuu jakeita, jotka ovat valmiita käytettäväksi niiden alkuperäiseen tarkoitukseen tai johonkin muuhun tarkoitukseen.”

” 'Kierrätysprosessin kierrätystehokkuudella' tarkoitetaan prosentuaalisesti ilmaistua suhdetta, joka saadaan jakamalla kierrätysprosessista saatavan jakeen massa kierrätysprosessiin syötetyn jakeen massalla, joka koostuu käytetyistä paristoista ja akuista.” (Asetus 493/2012.)

3.2 Suomen lainsäädäntö

Ympäristösuojelulaki toimii Suomessa pohjana kierrätykselle. Lain tarkoituksena on ympäristöystävällisyys, jätteiden vähentäminen sekä jätteistä aiheutuvien vahinkojen ja vaarojen minimoiminen. (Ympäristönsuojelulaki 2014/527 § 1.)

Osa jätteistä kuuluu tuottajavastuulain piiriin. Tuottajavastuulaki koskee myös akkuja ja paristoja, joten akkujen keräyskustannukset sekä keräyksen mahdollistaminen kuuluvat akkujen tuottajille. Myös keräyksen kustannukset kuuluvat tuottajille eli valmistajille. (Jätehuollon vastuut ja järjestäminen 2020.)

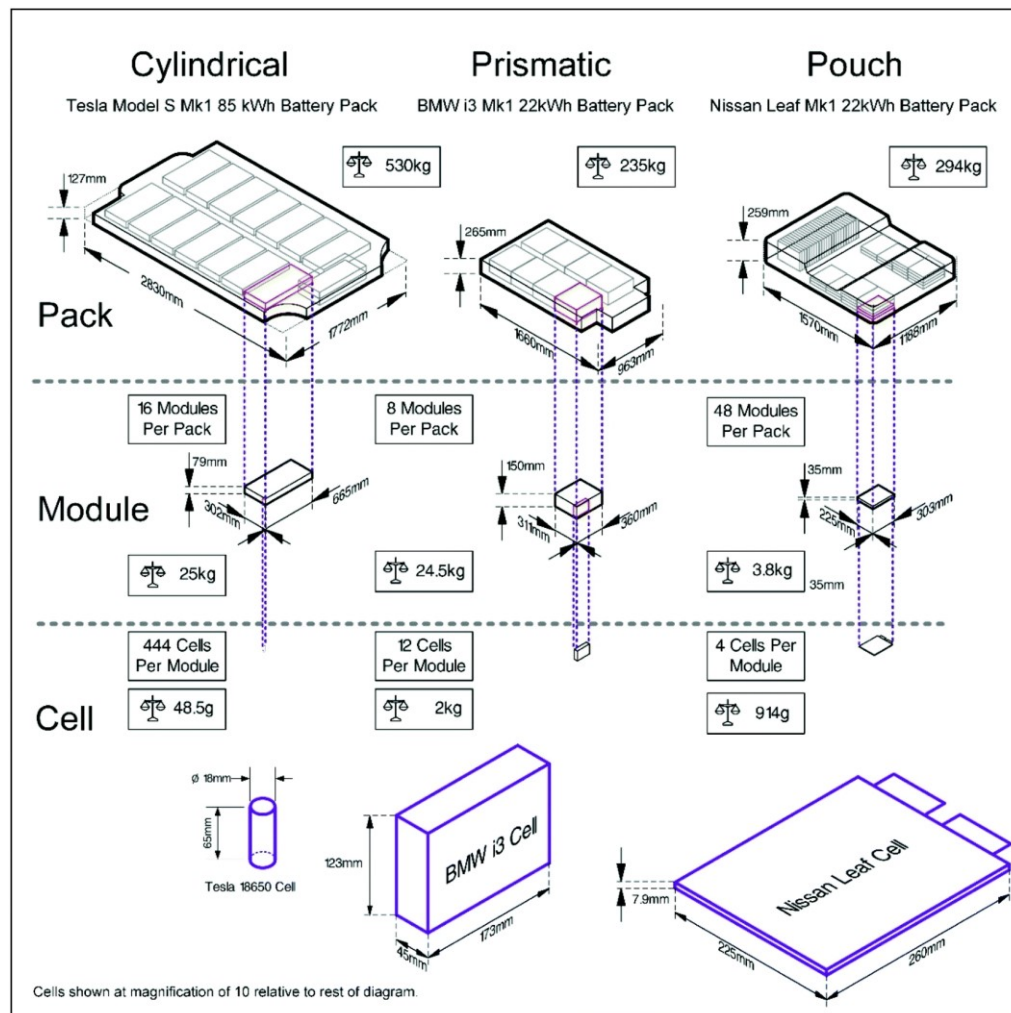
Asetus 520/2014 antaa minimivaatimukset eri akkutyypin painoprosenttien kierrätykselle. Lyijyakuista on kierrätettävä vähintään 65 painoprosenttia, nikkelikadmiumakuista vähintään 75 painoprosenttia sekä muista akuista ja paristoista 50 painoprosenttia. Asetuksen mukaan kierrätyskuluja ei saa ilmoittaa kuluttajalle ostohetkellä. (Asetus 520/2014 § 10.)

4 Akun rakenne ja toiminta

4.1 Akkupaketti

Sähköautoissa käytettävät akkupaketit (pack) koostuvat moduuleista (module) ja moduulit akkukennoista (cell). Akkukennot sisältävät elektrodit, elektrolyyttinesteen sekä separaattorin. Moduulissa yhdistetään tietty määrä kennoja suojaakuoreen kennojen suojelemiseksi ulkoisilta iskuilta ja esimerkiksi lämmöltä. Akkupakettiin kuuluu useita akku-moduuleita toisiinsa kytkettynä. Akkupakettiin kuuluu myös kennojen energian kontrolloimiseen ja tarkkailuun liittyviä komponentteja kuten akunhallintajärjestelmä ja akuston

jäähdytys. (The Composition of EV Batteries.) Kuvassa 2 on havainnollistettu akkupaketin rakennetta.



Kuva 2. Erityyppisten akkupakettien rakenteet (Harper ym. 2019).

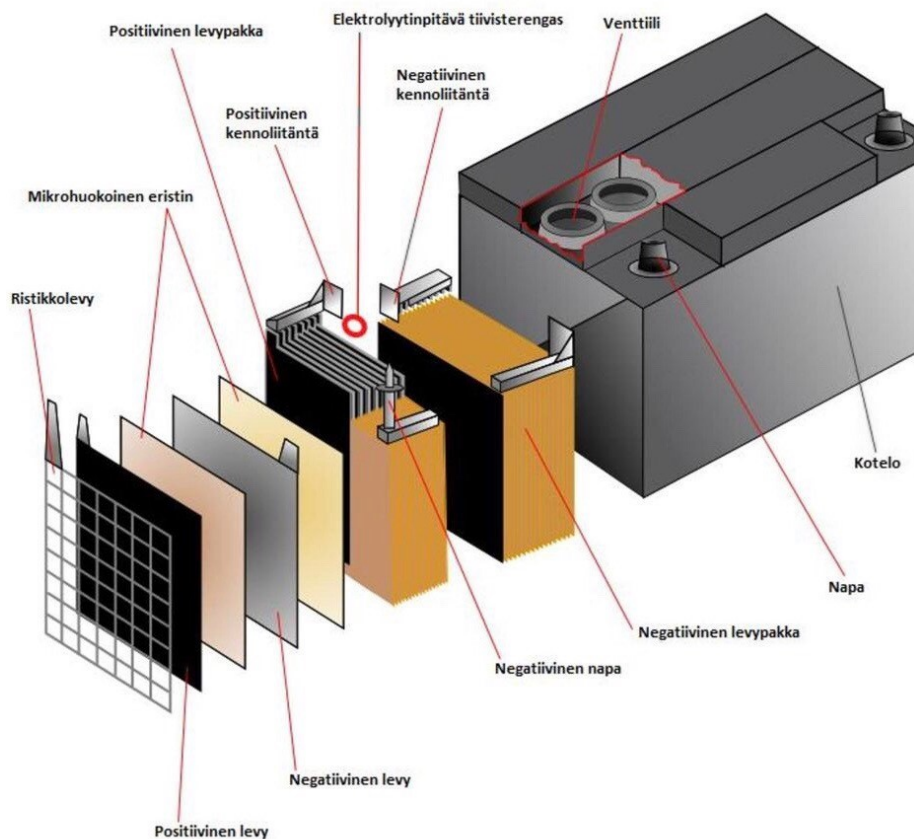
4.2 Akkujen kemia ajoneuvokäytössä

4.2.1 Lyijyakku

Lyijyakku koostuu kennoista, joiden sisällä on lyijylevyjä, jotka muodostavat akun anodit (negatiivinen elektrodi) ja katodit (positiivinen elektrodi) sekä rikkihaposta, joka toimii

elektrolyyttinesteenä. Lyijylevyihin on usein sekoitettu antimonia, tinaa tai seleeniä laadun ja kestävyuden parantamiseksi. Lyijylevyt on erotettu toisistaan muovisilla erotinlevyillä, jotta positiiviset ja negatiiviset levyt eivät mene oikosulkuun. Lyijyakut toimivat autoissa luotettavana energiavarastona käynnistysmoottorille. Lyijyakut ovat luotettavia ja kustannustehokkaita virtalähteitä, mutta niiden käyttöikä on lyhyt. (Warner 2015: 68.)

Lyijyakun elektrolyyttineste koostuu vedestä sekä rikkihaposta. Tyhjän akun elektrodilevyt ovat lyijysulfaattia. Kun akkua varataan, elektrolyyttinesteen rikkihappopitoisuus nousee veden määrän pienentyessä. Negatiivisessa elektrodissa lyijysulfaatti muuttuu lyijyksi ja positiivisessa elektrodissa lyijysulfaatti lyijyoksidiksi. Kun akkua puretaan, elektrolyyttinesteen vesipitoisuus nousee ja rikkihappopitoisuus laskee. Molemmat elektrodilevyt muuttuvat lyijysulfaatiksi. (Juhala ym. 2005: 283.) Kuvassa 3 on esitelty lyijyakun rakenne.



Kuva 3. Lyijyakun rakenne (Liimatainen 2013).

4.2.2 Nikkeli-metallihydridi

Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH) tarjoaa noin kaksinkertaisen energiatihedyyden verrattuna lyijyakuun noin puolet pienemmässä koossa (Warner 2015: 73).

Nikkeli-metallihydridiakun (NiMH) elektrolyyttinesteenä toimii kaliumhydroksidi. Katodit ovat nikkelihydroksidia ja anodit metalliseoksia. Metalliseosten tulee absorboida vetyä. Kaksi erilaista seostyyppiä on yleisesti käytössä: nikkelseokset sekä seokset, jotka sisältävät enimmäkseen titaania ja zirkoniumia. Metalliseokset vaihtelevat akun käyttötarkoituksen mukaisesti. (Kopera 2004.)

4.2.3 Litiumioniakut

Litiumioniakun kenno koostuu ionia johtavasta elektrolyytistä, elektrodilevyistä anodista ja katodista sekä erottimesta. Litiumionit siirtyvät elektrolyyttinesteessä elektrodien välillä riippuen siitä, puretaanko vai ladataanko akkua. Erottimen tehtävänä on eristää anodi ja katodi toisistaan. (Korthauer 2018: 15–22.)

Litiumioniakkujen katodimateriaaleja on useita riippuen akun käyttötarkoituksesta. NMC- eli litium-nikkeli-mangaanikobolttioksidi on erittäin yleinen katodimateriaali sähköajoneuvoissa, sen korkean kapasiteetin ja tehon takia. Anodimateriaalina toimii grafiitti. (BU-295 Types of Lithium-Ion 2020.) Elektrolyyttineste on hiilivetypohjainen. Nesteeseen on lisätty tyyppillisesti karbonaattiestereitä, sen ominaisuuksien muokkaamiseksi. Yhtenä esimerkkinä etyleenikarbonaatti. (Warner 2015: 82.) Litiumioniakun materiaaleja on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1. Litium-ioni-akun materiaalit. (Velázquez-Martínez ym. 2019: 4).

Battery Component	%w/w	Most Commonly Used Material
Case	~25%	Steel/plastics
Cathode	~27%	LiCoO ₂ , LiNi _x Mn _y Co _z O ₂ , LiMn ₂ O ₄ , LiNiO ₂ , LiFePO ₄
Anode	~17%	Graphite/Li ₄ Ti ₅ O ₁₂
Copper and aluminium foils and current collectors	~13%	Cu/Al
Electrolyte	~10%	Solution of LiPF ₆ , LiBF ₄ , LiClO ₄ , and LiSO ₂ dissolved in propylene carbonate, ethylene carbonate, or dimethyl sulfoxide
Separator	~4%	Microporous polypropylene

Litium-ioni-akun materiaalit: case = kotelo, cathode = katodi, anode = anodi, electrolyte = elekt-
lyytti, separator = erotin.

4.3 Akunhallintajärjestelmä

4.3.1 Akunhallintajärjestelmän tehtävä

Akun hallintajärjestelmä (BMS) on sähköinen järjestelmä, joka säätelee ladattavia akkuja estäen niiden toimimisen turvallisuusalueen (SOA) ulkopuolella. Tämä lisää akkujen turvallisuutta ja pidentää niiden käyttöikää. Jos turvallinen käyttöikä pitenee, niin malmien louhinnan ja kierrätyksen tarve vähenevät.

Moderni BMS voisi ilmoittaa myös sellaisen akkujen tilan, jossa akut olisivat hyvin käytettävissä muuhun sähkölaitteeseen, mutta nykyisessä tarkoituksessa elinaika jäisi lyhyeksi. Jos käytetään akkujen vaihtokriteerinä pelkästään joko auton ajokilometrejä, käyttöaikaa tai latauskertojen lukumäärää, saatetaan akut vaihtaa liian aikaisin ja lisätä tarpeettomasti kierrätettävää materiaalia. Ylikäyttö taas ei mahdollista uudelleen käyttöä ja voi vaikeuttaa kierrätystä. Pääasiassa akkujen kierrätyksessä puhutaan katodirakenteiden kierrätyksestä, mutta myös anodi ja oheislaitteet sisältävät kalliita metalleja. Siis myös BMS:n materiaalit tulee kierrättää. (Bobba ym. 2018.)

Akun hallintajärjestelmä monitoroi akkujen tilaa sekä laskee että raportoi sekundääridataa. Tämän lisäksi se havainnoi, kontrolloi ja tarvittaessa tasapainottaa akkujen toimintaa. BMS hallinnoi akun latautumista ja sen purkautumista eli balansoi kennoja, suojelee akustoa ja kontrolloi akuston lämpötilaa. (Andrea 2010: 15–16.)

Akunhallintajärjestelmän tulisi pystyä ainakin seuraaviin tehtäviin:

- estämään yllilataus kennotasolla lopettamalla latausvirran syöttö
- estämään ylikuumentuminen kennotasolla lopettamalla latausvirran syötön tai pyytämällä jäähdytystä
- estämään liian suuri latausvirta, joko lopettamalla latausvirran syötön tai vähentämällä sitä
- estämään jännitteen putoaminen alle minimin kennotasolla
- estämään liiallinen purkuvirta (Andrea 2010: 15–16.)

4.3.2 State of charge (SOC)

Akun latauksen tilalla tarkoitetaan akusta saatavilla olevaa varausta verrattuna täyteen ladatun akun varaukseen. BMS monitoroi jokaisen kennon lataustilaa erikseen. Latauksen tila ilmaistaan prosentteina. (Andrea 2010: 18.)

4.3.3 State of health (SOH)

Akun kunto ja käyttöikä voidaan määrittää sen käyttöhistorian mukaan. SOH kertoo, milloin akku/akusto ei ole enää kykenevä ylläpitämään annettua tehtävää, esimerkiksi toimimaan energian lähteenä sähkömoottorille. SOH:n avulla pystytään myös arvioimaan kuinka kauan akku tai akusto pystyy suorittamaan annettua tehtävää. Akun kunnon arvioiminen perustuu useisiin parametreihin, kuten kennojen resistanssiin ja käyttösykleihin. (Andrea 2010: 31–33.)

4.3.4 Balansointi

Jotta akun kapasiteetti saadaan maksimoitua ja paikallinen ali- ja ylilataus estettyä, BMS varmistaa aktiivisesti tasapainottamalla, että kaikki akun kennot ovat yhtäläisesti samaan jännitteeseen ladattuja. BMS voi tasapainottaa kennoja usealla eri tavalla: Purkamalla varausta suurimmassa varaustilassa olevasta kennosta, jolloin vähemmän varatut kennot saavat lisää varausta. Ohittamalla suurimmassa varaustilassa olevat kennot, jolloin alhaisemmassa varaustilassa olevat kennot saavat enemmän latausjännitettä. Syöttämällä latausjännitettä vain alhaisessa varaustilassa oleviin kennoihin. (Andrea 2010: 64–65.)

4.3.5 Lämpötilan hallinta

BMS monitoroi akuston lämpötilaa ja säätelee sitä, jotta pysytään optimaalisessa käyttölämpötilassa. Akuston lämmitys tapahtuu latauksesta saatavan energian avulla. Akuston jäähdytys voi olla joko passiivista tai aktiivista. Jäähdytysaineena voi toimia ilma, neste tai jonkin näiden olomuotojen muunnos. Passiivinen lämpötilanhallinta perustuu ympäröivän ilman jäähdyttävään vaikutukseen. Aktiivisessa järjestelmässä käytetään esimerkiksi tuuletinta. Ilmajäähdytyksen heikkous on sen tehottomuus. Nykyisin jäähdytykseen käytetäänkin nestekiertoa. Passiivisen järjestelmän tehon tarve on paljon suurempi kuin aktiivisen järjestelmän. (Dober 2020.)

5 Akkujen kierrätyksen tarpeellisuus

Litiumioniakkujen kierrätys on vielä vähäistä akkujen raakamateriaalien suhteellisen alhaisen hinnan sekä käyttöikänsä päähän tulleiden akkujen pienen määrän takia. Kuitenkin sähköautojen määrän lisääntyessä litiumioniakkujen kierrätys tulee yhä tärkeämmäksi lähitulevaisuudessa.

Litiumioniakut sisältävät useita myrkyllisiä sekä helposti syttyviä aineita, joten toimiva kierrätysjärjestelmä on välttämätöntä, jotta nämä turvallisuusriskit voidaan eliminoida. Akkujen raskasmetallit ja myrkylliset aineet ovat haitallisia maaperälle, mikäli akkuja päätyy kaatopaikoille.

Litiumioniakkujen kierrättämisellä pyritään myös pienentämään sähköautojen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä. Sähköautojen aiheuttamista päästöistä n. 30–50 % aiheutuu akkujen mineraalien louhimisesta ja akkujen valmistamisesta.

Sähköautojen hintaan voidaan vaikuttaa materiaalien kierrätyksellä. On arvioitu, että akuston hintaa voidaan pienentää 30 % käyttämällä kierrätettyjä materiaaleja.

Akkumateriaalien tarve lisääntyy huomattavasti tulevilla vuosikymmenillä. Vaikka kaivosyhtiöt pystyisivät vastaamaan kysyntään, aiheutuu kaivostoiminnasta paljon päästöjä. Materiaalien saatavuus voidaan taata puhtaammin kierrättämällä. Kierrättämällä litiumioniakkuja niiden materiaaleja saadaan helpommin käyttöön myös sellaisiin maihin, jotka eivät louhi näitä materiaaleja.

Akkujenkierrätyslaitosten määrä lisääntyy jatkuvasti ja akkujenkierrätysbisnes voi tuoda maille lisää sekä verotuloja että työpaikkoja. Akkujen kierrätys tulee aina hoitaa kestäväällä tavalla ja epäeettinen toiminta pitää lopettaa. Akkupakettien kuljetus on kallista, joten lähitulevaisuudessa useat maat saattavat perustaa uusia kierrätyslaitoksia omille alueilleen. (Beaudet ym. 2020.)

6 Lyijyakkujen kierrätys

Globaalin kulkuneuvojen lyijyakkumarkkinoiden arvo oli vuonna 2015 noin 34,30 miljardia dollaria ja arvioiden mukaan se kasvaa vuoteen 2021 mennessä 45,03 miljardiin dollariin, jolloin arvioitu CAGR olisi noin 4,7 %. Arviot vaihtelevat jonkin verran tutkimusten välillä, kuitenkin CAGR on kaikissa noin 5 %. Vuonna 2003 raportin arvion mukaan kulkuneuvojen akut sisälsivät 2,6 miljoonaa tonnia lyijyä. Tästä autojen osuus on noin miljoona tonnia. (Lead acid battery market 2019.)

Nykyinen lyijyakkujen kierrätysaste on Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa lähes 100 % (Leblanc 2018). Suomessa pulloista ja tölkeistä vuorostaan kierrätetään yli 90 %. Kuitenkin muissa maissa pulloista kierrätetään noin neljännes ja alumiinitölkeistä hieman yli puolet. Voidaan siis sanoa, että ihmiset suhtautuvat varsin vastuullisesti lyijyakkujen kier-

rätykseen ja ymmärtävät auton akun olevan väärinkäsiteltynä merkittävä ympäristöhaitta. Lyijyakut voidaan kierrättää lähes täysin. Lyijy onkin maailman kierrätetyimpiä materiaaleja. Kierrätys on erityisen tärkeää lyijyn hinnan ja myrkyllisyyden vuoksi.

6.1 Lyijyakkujen kierrätysprosessi

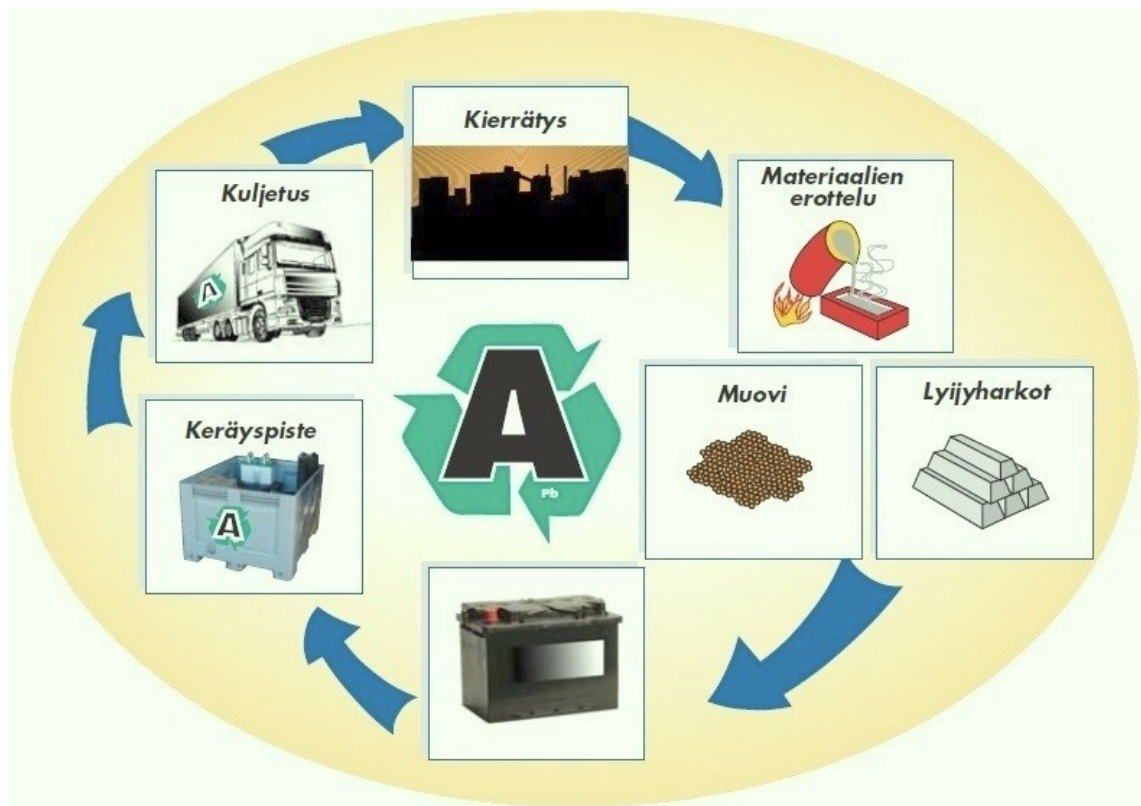
Kierrätyslaitoksessa lyijyakku hajotetaan kolmeen eri osaan, elektrolyytteihin, lyijyyn ja muoviin.

Akun kuori on useimmiten tehty polypropyleenista, joka on kierrätettävä materiaali. Seulonnessa poistetaan termoplastiset materiaalit, jolloin jäljelle jää kuivat lyijykomponentit. Termoplastiset materiaalit pestään ja lähetetään muovinkäsittelylaitoksiin. Akkujen muovikuoret hajotetaan pieniksi muovipelleteiksi. Pelletit sulatetaan ja niistä valmistetaan uusia akun kuoria.

Ekstraktiossa lyijy- ja raskasmetallikomponentit erotellaan muista akun osista. Yleisimmin käytetään kaksiportaista menetelmää. Ensimmäisessä vaiheessa erotuksessa hyödynnetään nestemäisiä liuoksia. Toisessa vaiheessa puolestaan käytetään korkeaa lämpötilaa. Lyijy käy läpi kalsinoinnin, paahtamisen ja sulattamisen. Lyijy sulatetaan harkoiksi. Akun sisältämän lyijyn lisäksi harkoissa on lyijyä myös navoista ja liittimistä. Epäpuhtauksien poistamiseksi lyijy puhdistetaan kemikaaleilla ja mekaanisesti. Sula massa valetaan muotteihin ja jäähdytetään. Valumuottien poistamisen jälkeen se on valmista uusiokäyttöön. Lyijy voidaan hyödyntää akkujen valmistuksessa. Myös lyijyoksidia voidaan käyttää uudelleen akkujen valmistuksessa.

Elektrolyyttien kierrätys on prosessin keskeisiä osia. Akkujen tavallisin elektrolyytti on rikkihappo, jonka konsentraatio on 15–35 %. Tämän vahvuinen happo on vaarallista ja se saattaa reagoida helposti orgaanisten materiaalien kanssa kuten ihmiskudokset. Hapon hengittäminen ja nieleminen on vaarallista samoin kuin roiskeet silmille ja iholle. Tapaturmat vaativat pääsääntöisesti aina lääkärin tutkimusta ja hoitoa. Prosessissa happo neutraloidaan ja reaktion tuloksena syntyy vettä. Tämän jälkeen vesi käsitellään ennen sen laskemista viemäristöön. Vaihtoehtoisesti happo voidaan muuttaa natrium-

sulfaatiksi. Natriumsulfaatti käytetään pyykinpesuaineiden, tekstiilien ja lasin valmistamisessa. Kuvassa 4 yksinkertaistettu lyijyakkujen kierrätysprosessi. (Osamanbasic 2020; Ballantyne ym. 2018.)



Kuva 4. Lyijyakkujen kierrätysprosessi (Akkujen kierrätys).

6.2 Lyijyakkujen kierrätyslaitokset

Lyijyakkujen kierrätys on kannattavaa liiketoimintaa. Lyijyakkujen kierrätyslaitoksia on lähes jokaisessa kehitysmaassa. Pääosin ne sijaitsevat suurten kaupunkien lähetyillä. Laitokset ostavat suuria määriä käytettyjä lyijyakkuja teollistuneista maista ja Lähi-Idästä. Tämänkaltaisessa kierrätyksessä ympäristö- ja terveysnäkökohdat jäävät useimmiten ottamatta huomioon.

Etelä-Amerikassa, Afrikassa ja Etelä-Aasiassa jätteet pääsääntöisesti lasketaan puhdistamattomina luontoon. Blacksmith Instituutin arvion mukaan näissä laitoksissa on lyijylle altistuneita työntekijöitä noin 12 miljoonaa.

Kehitysmaiden laitosten toimintaa on vaikea valvoa. Strategiaksi näillä alueilla onkin valittu alueiden puhdistaminen, koulutus ja tiedon levittäminen. Blacksmith's Lead Poisoning and Car Batteries Project toimii tällä hetkellä lähes kymmenessä maassa, joista tärkeimpiä ovat Senegal, Dominikaaninen tasavalta, Intia ja Filippiinit. Tavoitteena on eri strategioilla lopettaa vaaralliset lyijyakkujen kierrätyslaitokset.

Käytettyjen akkujen tietä näihin laitoksiin ei pystytä jäljittämään eikä syyllisiä saada vastuuseen. Kehittyneiden maiden teollisuutta kannustetaan vapaaehtoisesti lopettamaan käytettyjen akkujen lähettämisen kehitysmaihiin. Näin pyritään painostamaan kehitysmaita parantamaan laitostensa ympäristöystävällisyyttä. Tämä saattaa parantaa myös kehitysmaiden poliittista päätöksentekoa ympäristökysymyksissä. (Zafar 2020.)

Suomessa akkujätteiden keräyspaikkoja on kattavasti koko maassa. Akkujen jättäminen keräyspaikkaan on asiakkaalle aina maksutonta. Akut voi jättää niitä myyviin liikkeisiin tai kierrätyspisteisiin. Niitä ei voi kuitenkaan viedä elektroniikkaliikkeisiin.

Raumalaisella Suomen Akkukeräys Oy:llä on pitkät perinteet akkujen keräyksestä sekä kierrätyksestä. Yritystä pidetään vastuullisena yrityksenä, joka huolehtii niin ympäristön kuin henkilöstönkin hyvinvoinnista. Yrityksellä on Pohjoismaiden ainoa murskain-erottelija. Aiemmin akut lähetettiin kierrätettäväksi Ruotsiin tai Viroon. (Suomen Akkukeräys.)

6.3 Kierrätyksen terveysriskit

Akkujen kierrätykseen sisältyy terveydellisiä riskejä kierrätyslaitoksen työntekijöille sekä sen ympäristön asukkaille. Ongelmana ovat erityisesti laitokset kehitysmaissa. Näissä maissa ei aina olla tietoisia metalleihin ja kemikaaleihin mahdollisesti liittyvistä vaaroista tai niistä ei välitetä. Työntekijöiden terveyttä on kliinisesti seurattava. Kohtuuhintaisia testejä veren lyijypitoisuuden mittaamiseen ja mahdollisten muiden elimistölle haitallisten muutosten seuraamiseen on runsaasti tarjolla. Terveysasiat tulisikin nostaa laitoksien toimilupien myöntämisen ehdottomaksi edellytykseksi. (Schaddelee-Scholten & Tempowski 2017: 9–13.)

Vaikka työturvallisuusnäkökohtiin liittyvä välinpitämättömyys on toisaalta ymmärrettävää, ihmisten terveyden vaarantaminen on tuomittavaa riippumatta siitä, missä maassa

se tapahtuu. Kuvassa 5 on eräs Intialainen lyijyakkujen kierrätyspiste sekä lyijyn aiheuttamaa tuhoa sen lähiympäristölle.

Lyijymyrkytys on Afrikassa vakava ongelma. Esimerkiksi Senegalissa raportoidaan runsaasti lasten kuolemiin johtavia lyijymyrkytyksiä. Keniassa kierrätyslaitokset aiheuttavat merkittäviä terveyshaittoja ympäristön asukkaille. Nigeriassa laitos myrkytti valtavan määrän ihmisiä ja ympäristöä. (Schaddelee-Scholten & Tempowski 2017: 9-13.)



Kuva 5. Lyijyakkujen kierrätystä Patnassa, Intiassa (Pearce 2020).

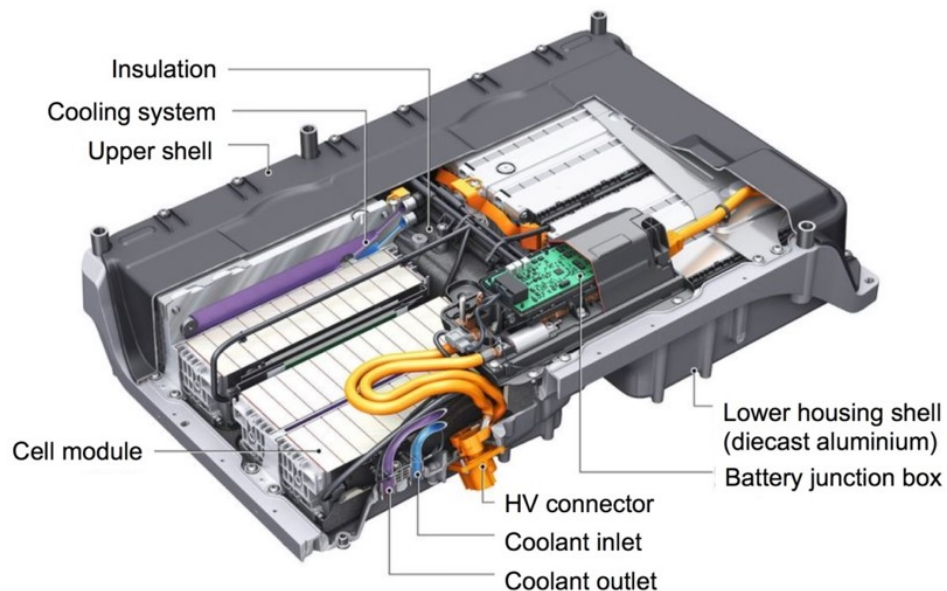
7 Litiumioniakkujen kierrätys

7.1 Kierrätysprosessi

Litiumioniakkujen kierrätysprosessi voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen: stabilointi, avaaminen ja materiaalien erottelu. Itse materiaalien kierrätykseen käytetään sekä mekaanisia että kemiallisia prosesseja. (Velázquez-Martínez ym. 2019: 6.)

Tällä hetkellä akuston purkaminen ja sen eri komponenttien erottelu tehdään käsityönä erilaisten akkukemioiden sekä kennorakenteiden takia. Myös akkujen komponenteissa on rakenteellisia eroja. Esimerkiksi erilaiset BMS-rakenteet tulee ottaa huomioon akkupakettia purettaessa. (Harper ym. 2020.)

Kun auton akkupaketti saapuu kierrätykseen, sen kotelosta puretaan käsin akkumoduulit, akunhallintajärjestelmä, johtosarja, ruuvit sekä akkupaketin jäähdytysjärjestelmä. Itse akkumoduulit jatkavat eteenpäin murskaukseen. (Duesenfeld.) Kuvassa 6 on esitelty akkupaketin eri komponentteja.



Kuva 6. Litiumioniakkupaketin komponentteja (Djukanovic 2019).

Ensimmäisessä vaiheessa akku tulee saada stabiiliksi käsittelyä varten eli akun jännite puretaan mahdollisimman alhaiselle tasolle. Kulujen pienentämiseksi akun stabilointi yhdistetään usein akun avaamiseen.

Akkupaketista puretut akkumoduulit murskataan suojakaasussa, joka voi olla esimerkiksi typpikaasua tai hiilidioksidia. Samalla elektrolyyttineste kerätään talteen. (Harper ym. 2020.) Murskaamisen jälkeen kuiva materiaali erotellaan partikkelikoon, tiheyden ja magneettisuuden mukaan, jotta jatkokäsittelyyn menevä materiaali saadaan erotettua. Kupari-, rauta- ja alumiinipartikkelit kierrätetään erikseen niille tarkoitetuissa kierrätyslaitoksissa. Kierrätyslaitoksen hydrometallurgiseen prosessiin jatkaa elektrodien aktiivimateriaalit, joista muodostuu musta massa. Esimerkiksi Duesenfeldin kierrätyslaitoksessa hydrometallurgisesti pystytään keräämään talteen mustasta massasta litium, koboltti, nikkeli, mangaani sekä grafiitti. (Ecofriendly recycling of lithium-ion batteries.)

7.2 Kierrätystavat

Litiumioniakut kierrätetään pääasiassa hydrometallurgisella ja pyrometallurgisilla menetelmillä tai niiden kombinaatiolla. Pyrometallurgiassa kierrätykseen käytetään korkeita lämpötiloja. Hydrometallurgiassa materiaalien erotteluun käytetään vesikemiaa. Hydrometallurgiset menetelmät ovat usein monimutkaisempia. Pyrometallurgisissa menetelmissä litium menetetään prosessin yhteydessä metallikuonaan, mutta muut arvokkaat materiaalit saadaan talteen. Niiden eristämiseen tarvitaan kuitenkin hydrometallurgiaa epäpuhtauksien poistamiseksi. (Hanisch ym 2015.)

7.2.1 Hydrometallurginen prosessi

Hydrometallurgisessa prosessissa arvokkaat materiaalit erotellaan ja otetaan talteen käyttämällä vettä liuottimena. Litiumioniakkujen kierrätyksessä käytetään pääasiassa hydrometallurgisia prosesseja. (Larouche ym. 2020: 15–32.)

Nykyisin käytettyjen litiumioniakkujen kierrätyksen ja käsittelyjen tarkoituksena on pääasiassa kalliiden metallien talteenotto katodista. Katodissa on aina litiumia sekä riippuen akun tyypistä muita yhdisteitä, kuten koboltti-, nikkeli- ja mangaaniyhdisteitä.

Hydrometallurgiseen kierrätykseen on useita erilaisia patentoituja menetelmiä. Yleisesti menetelmissä on kolme eri vaihetta: uuttaminen, erottelu ja talteenotto. Uuttamisessa metallit liuotetaan akkumateriaalista happojen avulla. Happona voidaan käyttää esimerkiksi rikkihappoa tai suolahappoa. Myös oikea uuttamislämpötila on tärkeä kemiallisen reaktion onnistumiseksi. Saostamisessa eli materiaalien erottelussa haluttu materiaali saadaan eroteltua lisäämällä siihen uuttoainetta. (Larouche ym. 2020: 15–32.)

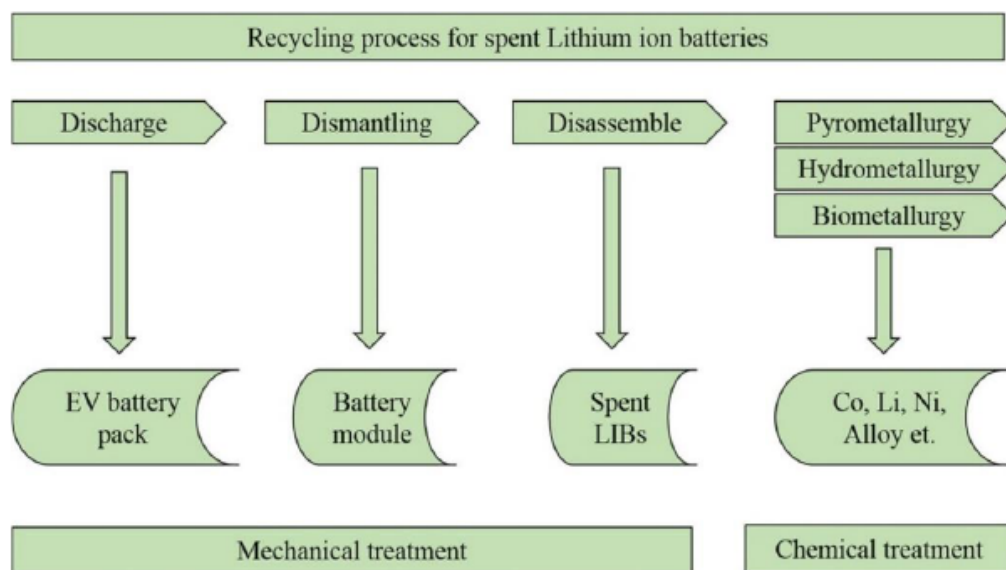
7.2.2 Pyrometallurginen prosessi

Pyrometallurgia tarkoittaa prosesseja, joissa metalleja valmistetaan korkeita lämpötiloja käyttämällä. Pyrometallurgisessa kierrätyksessä käytetään korkealämpötilaisia sulatusuuneja, lämpötila noin 1500 °C. Prosessissa pystytään keräämään talteen arvokkaita materiaaleja, kobolttia, kuparia ja nikkeliä. Alumiinia, litiumia tai orgaanisia yhdisteitä ei tällä metodilla pystytä kierrättämään. (Chung-Yen Jung ym. 2021:13–14.)

Esikäsittelyvaiheessa akuista ei tarvitse välttämättä poistaa metallisia kuoria, elektrolyyttejä tai muoveja, koska korkea lämpötila mahdollistaa niiden eliminoimisen. Tämä on kuitenkin suositeltavaa, jotta välttyään kuonan epäpuhtauksilta ja mahdollisilta kaasupäästöiltä. (Samarukha 2020.)

Esikäsittelyn jälkeen akuista muodostetaan metalliseos sulattamalla. Muista materiaaleista muodostetaan kuonaa tai vaihtoehtoisesti niitä hyödynnetään pelkistysaineena. Sulatuksen aikana orgaaniset aineet ja grafiitti poistuvat palamisen yhteydessä. Sulatusuunissa olevasta massasta kerätään metallit kuten rauta, kupari, koboltti ja nikkeli. Pelkistysaineena käytetään akun orgaanisia yhdisteitä. Lopuksi metalliseoksesta erotellaan siinä sijaitsevat arvokkaat metallit ja kuonasta akun muut aineet. Pyrometallurgisen prosessin tärkein osa on metalliseoksen käsittely. Koboltti ja nikkeli uutetaan massasta happojen avulla. Nikkeliä ja kobolttia voidaan uudelleen käyttää esimerkiksi katodien valmistuksessa. (Samarukha 2020.) Kuvassa 7 on yksinkertaistettuna litiumioniakkujen kierrätysprosessi.

Figure 2: A comprehensive process of recycling lithium-ion batteries from Evs



Source: Yun et al, 2018

Kuva 7. Litiumioniakkujen kierrätysprosessi (Liu 2018).

7.3 Litiumioniakkujen kierrätyslaitokset

Litiumioniakkujen kierrätys on houkutteleva teollisuuden ala. Tällä hetkellä suurin osa kierrätysyrityksistä sijaitsee Kiinassa. Ne hyötyvät maan suuresta sähköautomäärästä. Valtion tuki on merkittävää ja kierrätettävää materiaalia on runsaasti. (Li-ion battery recycling, a catalyzer to proper waste regulation.) Myös Suomesta ja Euroopasta löytyy kierrätyslaitoksia ja tärkeitä kierrätykseen liittyviä toimijoita (liite 2).

Jos kierrätyslaitos ymmärtää tuotteiden virtauksen periaatteet, kierrätyksen säädökset ja sen geopoliittiset seuraukset, se on jo sinänsä merkittävämpi yhteiskunnallinen luontoa säästävä arvo kuin pelkkä kierrätyksen avulla saatu taloudellinen hyöty. Asiakkaiden tulee voida luottaa, ettei laitos lopeta toimintaansa tai muuta sitä merkittävästi markkinoiden heilahdellessa. Nykyisin ei ole siis tärkeintä kierrätyksessä sen halpuus vaan ympäristöystävällisyys. (Terrell 2017.)

8 Huomiot ja yhteenveto

Tulevaisuuden haasteet ovat samankaltaisia kuin tämän päivä haasteet. Tällä hetkellä litiumioniakkujen kierrätyksen standardisointi puuttuu. EU on asettanut päämääräkseen luoda täysmittaisen litiumioniakkujen kierrättämisen arvoketjun, joka voidaan jakaa kuuteen päämäärään: raakamateriaalien saatavuuden varmistaminen, kennojen valmistus, innovaatioiden tukeminen, työvoiman koulutus, ympäristöystävällisyys ja laadun varmistaminen. Tällä saadaan myös kierrätykselle tarkemmat spesifikaatiot, jotka perustuvat EU-lainsäädäntöön. Useat maat eivät vielä pysty täyttämään sen sisältöä. (European battery alliance 2018.)

Kaikkien akkuvalmistajien tulisi noudattaa EU:n antamia ohjeita, vaikka se olisi taloudellisesti kannattamattomampaa kuin raakamateriaalien ostaminen. Kuitenkin EU:n on saatava tiensä päähän tulleet akut kerättyä ja kierrätettyä. EU:n tavoitteen mukaan kierrättämisen tulisi olla taloudellisesti kannattavaa EU:n alueella vuoteen 2030 mennessä. (Drabik & Rizos 2018: 22–23.) Sähkö- ja hybridautoja pidetään pääsääntöisesti ympäristöystävällisempinä kuin bensiini- ja dieselautoja. Kuitenkin sähköautojen ja akkujen valmistaminen, käyttö ja kierrätys vaativat valtavasti energiaa ja siten luovat merkittävää hiilijalanjälkeä myös EU:n alueella. Tämä on ongelma, johon ratkaisua pitää hakea sähköautojen koko elinkaaresta. Paikallinen akkujen kierrättäminen uusituvalle energialla vähentääkin huomattavasti sähköauton elinkaaren hiilijalanjälkeä. Paikallinen kierrättäminen takaa myös raakamateriaalien saatavuuden ja akkujen valmistukseen ei tarvitse välttämättä käyttää ainoastaan materiaaleja, jotka tulevat louhoksista ulkomailta, joissa on huonot työolot.

Akkujen varauksen purkaminen vaatii ammattitaitoa, jotta vältytään räjähdyksiltä ja kuumuuden aiheuttamilta palovammoilta. Terveydelle ja luonnolle aiheutuvien haittojen hallitseminen on ratkaisematta. Kehitysmaiden välinpitämättömyys on saatava kuriin.

Maapallon yhteenlasketut kobolttivarannot ovat noin 25 Mt, ja Suomen tunnetut kobolttivarannot noin 0,4 Mt. Koboltti on kallista (noin 91 tuhatta dollaria/tonni, vrt. litium 16 tuhatta dollaria/tonni), ja sen hinnan arvioidaan nousevan merkittävästi. Kongon demokraattisen tasavallan osuus maailman koboltin raaka-aineen tuotannosta on noin 50 %.

Maan epävakaa poliittinen tila sekä laajalle levinnyt rikollisuus ja erityisesti lasten pakotyö voi muodostua ongelmaksi. Tämän vuoksi katodirakenteissa tulisi käyttää vähän tai ei ollenkaan kobolttia. (Jacoby 2019; DR Congo Population.)

Uusia koboltittomia akkuja kehitelläänkin jatkuvasti ja esimerkiksi autovalmistaja Tesla on ilmoittanut seuraavien akkueriensä olevan litium-rautafosfaattiakkuja (LFP). Kiinalainen yritys SVOLT julkaisi kaksi uutta akkua, jotka ovat kobolttivapaita. Akkujen ominaisuudet, kuten energiatiheys ja turvallisuus, ovat myös yrityksen mukaan paremmat kuin nykyisissä akuissa. Nähtäväksi jää, miten hyvin autovalmistajat ottava uudet innovaatiot vastaan ja miten hyvin yrityksen akut täyttävät lupauksensa. (Smith 2020.)

Lähdeluettelo

Akkujen kierrätys. Verkkoaineisto. Akkukierrätys Pb Oy. <<https://akkukierratyspb.fi/akkujen-kierratys/>>. Luettu 13.12.2020.

Andrea, Davide. 2010. Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs. E-kirja. Artech House.

Asetus 493/2012. Komission asetus (EU) N:o 493/2012, annettu 11 päivänä kesäkuuta 2012, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2006/66/EY mukaisten käytettyjen paristojen ja akkujen kierrätysprosessien kierrätystehokkuuksien laskemista koskevien yksityiskohtaisten sääntöjen vahvistamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti 12.6.2012. <<https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:151:0009:0021:FI:PDF>>.

Asetus 520/2014. Valtioneuvoston asetus paristoista ja akuista.

Ballantyne, Andrew; Hallet, Jason P.; Riley, Jason D. & Shah, Nilay. 2018. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/325172563_Lead_acid_battery_recycling_for_the_twenty-first_century/link/5b0e5d8daca2725783f23de2/download>. Luettu 12.12.2020.

Beaudet, Alexandre; Larouche, Francois; Amouzegar, Kamyab & Bouchard, Patrick. 2020. Key Challenges and Opportunities for Recycling Electric Vehicle Battery Materials. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/343087669_Key_Challenges_and_Opportunities_for_Recycling_Electric_Vehicle_Battery_Materials>. Luettu 5.12.2020.

Bobba, Silvia; Podias, Andreas; Di Persio, Franco; Messagie, Maarten; Tecchio, Paolo; Cusenza, Maria Anna; Eynard, Umberto; Mathieux, Fabrice & Pfrang, Andreas. Verkkoaineisto. JRC Technical Reports. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC112543/saslab_final_report_2018_2018-08-28.pdf>. Luettu 14.2.2021.

BU-205: Types of Lithium-Ion. 2020. Verkkoaineisto. Battery University. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>. Luettu 28.11.2020.

Chung-Yen Jung, Joey; Pang-Chieh, Sui & Zhang, Jiujun. 2021. A review of recycling spent lithium-ion battery cathode materials using hydrometallurgical treatments. Verkkoaineisto. ScienceDirect. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X20320405>> Luettu 31.1.2021.

Circular Economy Perspective. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/337063279_A_Critical_Review_of_Lithium-Ion_Battery_Recycling_Processes_from_a_Circular_Economy_Perspective/download>. Luettu 21.11.2020.

Direktiivi 2006/66/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2006/66/EY, paristoista ja akuista sekä käytetyistä paristoista ja akuista ja direktiivin 91/157/ETY kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti 26.9.2006. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0066&from=HR>>. Luettu 6.9.2020.

Djukanovic, Goran. 2019. Aluminium Extrusions Are Winning The Race For B Enclosure In EVs. Verkkoaineisto. Aluminium Insider. <<https://aluminiuminsider.com/aluminium-extrusions-are-winning-the-race-for-battery-enclosure-in-evs/>>. Luettu 17.12.2020.

Drabik, Eleanor & Rizos, Vasileios. 2018. Prospects for electric vehicle batteries in a circular economy. CEPS. Luettu 16.1.2021.

DR Congo Population. Verkkoaineisto. Wolrdometer. <<https://www.worldometers.info/world-population/democratic-republic-of-the-congo-population/>>. Luettu 16.1.2021.

Ecofriendly recycling of lithium-ion batteries. Verkkoaineisto. Duesenfeld GmbH. <https://www.duesenfeld.com/recycling_en.html>. Luettu 29.12.2020.

Tobias, E; Goldmann, D; Römer, F; Buchert, M; Merz, C; Schueler, D; Sutter, J. 2015. Verkkoaineisto. MDPI. <<https://www.mdpi.com/2313-4321/1/1/25>>. Luettu 29.12.2020.

European Battery Alliance. 2018. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/european-battery-alliance_en>. Luettu 10.1.2021.

Hanisch, Christian; Diekmann, Jan; Stieger, Alexander; Haselrieder, Wolfgang & Kwade, Arno. 2015. Recycling of Lithium-Ion batteries. E-kirja. Wiley.

Harper, Gavin; Sommerville, Roberto; Kendrick, Emma; Driscoll, Laura; Slater, Peter; Stolkin, Rustam; Walton, Allan; Christensen, Paul; Heidrich, Oliver; Lambert, Simon; Abbott, Andrew; Ryder, Karl; Gaines, Linda & Anderson, Paul. 2019. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Verkkoaineisto. Nature. <<https://www.nature.com/articles/s41586-019-1682-5>>. Luettu 21.11.2021.

Jadhav, Akshay. 2019. Electric Vehicle Battery Recycling Market by Application (Electric Cars, Electric Buses, Energy Storage Systems, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2018–2025. Verkkoaineisto. Allied Market Research. <<https://www.alliedmarketresearch.com/electric-vehicle-battery-recycling-market>>. Luettu 3.8.2020.

Jacoby, Mitch. 2019. It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries. Verkkoaineisto. C&EN. <<https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>>. Luettu 25.10.2020.

Juhala, Matti; Lehtinen, Arto; Suominen, Matti & Tammi, Kari. 2005. Moottorialan sähköoppi. Suomen Autoteknillinen Liitto Ry.

Jätehuollon vastuut ja järjestäminen. 2013. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Jatteet_ja_jatehuolto/Jatehuollon_vastuut_ja_jarjestaminen>. Päivitetty 1.10.2020. Luettu 10.10.2020.

Kierrätys ja uudelleenkäyttövoivat vähentää kulutusta ja sen ympäristövaikutuksia. Verkkoaineisto. <<https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/8bde6ca5-7802-4c36-a4da-34086e9c5287/kierratys-ja-uusiokaytto.html>> Ilmasto-opas. Luettu 3.8.2020

Kopera, John. 2004. Inside the Nickel Metal Hydride Battery. Verkkoaineisto. Cobasys. <https://www.cobasys.com/pdf/tutorial/InsideNimhBattery/inside_nimh_battery_technology.html>. Luettu 13.11.2020.

Korthauer, Reiner. 2018. Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications. E-kirja. Springer.

Larouche, François; Tedjar, Farouk; Amouzegar, Kamyab; Houlachi, Georges; Bouchaard, Patrick; Demopoulos, George P. & Zaghib, Karim. 2020. Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond. Verkkoaineisto. MDPI. <<https://www.mdpi.com/1996-1944/13/3/801>>. Luettu 2.1.2021.

Leblanc, Rick. 2018. The Amazing story of lead recycling. Verkkoaineisto. The balance small business. <<https://www.thebalancesmb.com/the-amazing-story-of-lead-recycling-2877926>>. Luettu 4.12.2020.

Lead acid battery market. 2019. Verkkoaineisto. Market and Markets. <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/lead-acid-battery-market-161171997.html>>. Luettu 10.10.2020.

Liimatainen, Lauri. 2013. AKUT käytetyimpien akkutyyppien kehitys. Opinnäytetyö. Centria Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Li-ion battery recycling, a catalyzer to proper waste regulation. 2020. Verkkoaineisto. Yole Développement. <http://www.yole.fr/Li-ionBatteryRecycling_MarketUpdate.aspx>. Luettu 7.1.2021.

Lithium-ion battery pack & methods of cooling them. Verkkoaineisto. Dober. <https://www.dober.com/electric-vehicle-cooling-systems#electric_vehicle_cooling_systems>. Luettu 30.11.2020.

Liu, Yun; Duy, Linh; Li, Shui; Xiongbina, Peng; Akhil, Garg; My Loan, Phung; Saeed, Asghari; Jayne, Sandoval. 2018. Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles. E-kirja. Elsevier.

Osamanbasic, Edis. 2020. Battery Recycling Technologies - part 2: Recycling Lead-Acid and Li-ion. Verkkoaineisto. Engineering.com. <<https://www.engineering.com/story/battery-recycling-technologies-part-2-recycling-lead-acid-and-li-ion>>. Luettu 12.12.2020.

Pearce, Fred. 2020. Getting the lead out: Why battery recycling is a global health hazard. Verkkoaineisto. Yale Environment 360. Luettu 18.12.2020.

Raj, Aswinth. 2018. Battery Management System (BMS) for Electric Vehicles. Verkkoaineisto. CircuitDigest. <<https://circuitdigest.com/article/battery-management-system-bms-for-electric-vehicles>>. Luettu 28.11.2020.

Recycling Laws By State. 2018. Verkkoaineisto. Call2recycle. <<https://www.call2recycle.org/recycling-laws-by-state/> Call2recycle>. Luettu 5.9.2020.

Samarukha, Iryna. 2020. Recycling strategies for End-of-Life Li-ion Batteries from Heavy Electric Vehicles. Pro gradu -tutkielma. KTH. KTH Degree Project Portal.

Schaddelee-Scholten, Bernice & Tempowski, Joanna. 2017. Recycling used lead-acid batteries: health considerations. Verkkoaineisto. World Health Organization. <<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259447/9789241512855-eng.pdf;jsessionid=DE707557C9481D70B0254A6C19800F1A?sequence=1>>. Luettu 27.12.2020.

Schloesser, Martin; Niemann, Jörg; Fussenecker, Claudia & Aschmann, Günther. 2019. Analysing the current energy storage development in South Africa. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/figure/Forecasted-demand-for-lithium-ion-batteries-from-EVs-20102030-GWh-22_fig2_329466298>. Luettu 5.9.2020.

Smith, Brett 2020. SVOLT: The future of cobalt-free batteries for electric vehicles. Verkkoaineisto. AZO Materials. <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=19915>>. Luettu 30.1.2021

Suomen Akkukeräys. Verkkoaineisto. <<https://akkukerays.fi/>>. Luettu 22.12.2020.

Terrell, Brian. 2017. The Recycling Corner. Verkkoaineisto. American Recycling. <<http://americanrecyclingca.com/2017/07/recycling/the-recycling-corner/>>. Luettu 16.1.2021.

The Composition of EV Batteries: Cells? Modules? Packs? Let`s Understand Properly!. Verkkoaineisto. <<https://www.samsungsdi.com/column/all/detail/54344.html>>. Luettu 7.11.2020.

Valtioneuvoston asetus paristoista ja akuista 2014. 520/2014.

Velázquez-Martínez, Omar; Valio, Johanna; Santasalo-Aarnio, Annukka & Reuter, Markus A. 2019. A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. Verkkoaineisto. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/337063279_A_Critical_Review_of_Lithium-Ion_Battery_Recycling_Processes_from_a_Circular_Economy_Perspective/download>. Luettu 21.11.2020.

Valio, Johanna. 2018. Tulevaisuuden akkuekosysteemi. Verkkoaineisto. Sitra. <<https://media.sitra.fi/2018/06/18131530/tulevaisuuden-akkuekosysteemi.pdf>>. 15.6.2018. Luettu 3.8.2020.

VERNE:n laskelma autoilun kustannuksista. Verkkoaineisto. 2019. Traficom. <<https://www.traficom.fi/fi/ajavaihtoehtoa/vernen-laskelma-autoilun-kustannuksista>>. Luettu 4.8.2020.

VTT:n laskelma autoilun kustannuksista. Verkkoaineisto. 2019. Traficom. <<https://www.traficom.fi/fi/ajavaihtoehtoa/vtn-laskelma-autoilun-kustannuksista?toggle=Tietoa%20laskelmien%20taustoista>>. Luettu 4.8.2020.

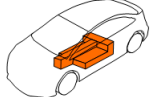
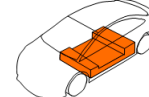
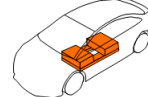
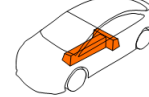
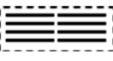
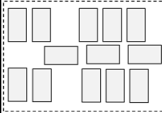
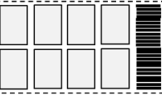
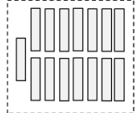
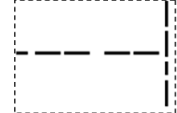
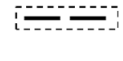
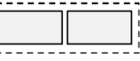
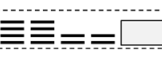
Warner, John. 2015. The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design. E-kirja. Elsevier Science & Technology.

Weal, E. & Kumar R. Vasant. 2013. Lead/acid batteries. University of Cambridge. Wwwwdokumentti. Saatavissa: http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/batteries/batteries_lead_acid.php Luettu 25.9.2020

Ympäristönsuojelulaki. 2014. 27.6.2014/527.

Zafar, Salman. 2020. The Dangers of Used Lead Acid Batteries. Verkkoaineisto. Blogging Junction. <<https://salmanzafar.me/used-lead-acid-batteries/>> Luettu 22.12.2020.

Vanhempia sähkö- ja hybridiautoja sekä nykyaikaisia sähköautoja

OEM Model	BMW i3	VW E-Up	Nissan Leaf	Mitsubishi i-MiEV	Tesla Model S	Opel Ampera	Ford Mondeo
Position of battery in the car							
Type of drive	EV	EV	EV	EV	EV	EREV	HEV
Manufacturer	Samsung SDI	Samsung SDI	AESC	GS Yuasa	Panasonic/ Sanyo	LG Chem	Panasonic/ Sanyo
Cell shape	prismatic	prismatic	pouch	prismatic	cylindrical	pouch	prismatic
Capacity [kWh]	18,8	18,7	24	16	16,2- 17,7	16	7,6
Nominal voltage [V]	360	374	360	330	402	360	
Number of cells	96	204	192	88	7104	288	76
Number of modules x Cells	8 x 12	17 x 12	48 x 4	10 x 8 2 x 4	16 x 444	7 x 36 2 x 18	2 x 38
Module dimensions (l x w x h in [mm])	-	1726 x 1132 x 303	303 x 223 x 35	1. 350 x 194 x 116 2. 175 x 194 x 116	178 x 102 x 152	1. 230 x 220 x 25 2. 140 x 220 x 25	-
Module weight [kg]	-	10,5	3,8	1. 15 2. 7,5	-	1. 19 2. 9	-
Arrangement of modules (top view)							
Arrangement of modules (side view)							
Electric range [km]	190	160	175	160	400	40 - 80	34
Pack weight [kg]	230	230	300	200	600	198	240

Malli	Akkukapasiteetti (kWh)	Toimintamatka (km)
BMW iX (2021)	100	600
Honda e (2020)	35,5	217
Ford Mustang Mach-E (2021)	75	610
Tesla model Y (2020)	75	540

Lähteet: (Elwert ym. 2015) (ylempi), valmistajien sivustot (alempi).

Litiumioniakkujen kierrätyslaitoksia ja alan tärkeitä toimijoita

Yritys	Maa	Kierrättää	Erityistä	Linkki
Brump	Kiina	Litiumioniakut	Aasian suurin. Kierrättää satatuhatta tonnia vuodessa akkujätettä	https://www.iru-miru.com/en/article_detail.php?id=29876
Huayou Cobalt	Kiina	Litiumioniakut	Materiaalitutkimus, kierrätys, koboltti-nikkeli teknologia	http://en.huayou.com/about.html?introId=29
GEM	Kiina/Etelä-Afrikka/Indonesi	Monialainen	Erittäin ympäristöystävällinen	http://en.gem.com.cn/en/AboutTheGroup/index.html
TES-AMM	Maailmanlaajuinen (Ranska)	Litiumioniakut ja elektronikkajäte	Kierrätettyjen akkumateriaalien puhtausaste >99 % (suurimpia alalla)	https://www.tes-amm.com/news/lithium-battery-recycling-presents-challenges
Duesenfeld	Saksa	Litiumioniakut	Materiaalien kierrätysaste 91 %	https://www.duesenfeld.com/ecobalance.html
Umicore	Belgia, Saksa	Metallit	On mukana akkujen kehitystyössä	https://www.umi-core.com/en/industries/
Accurec	Saksa	Litiumioniakut ja nikkelipohjaiset akkukemiat	Käyttää 100 % uusiutuvaa energiaa	https://accurec.de/key-figures
Fortum (CrisolteQ)	Suomi	Litiumioniakut	Hydrometallurginen innovaatio	https://www.fortum.fi/
Nornickel	Suomi		Valmistaa nikkeli- ja kobolttikemikaaleja	https://www.nornickel.fi/nornickel-harjavalta
AkkuSer	Suomi	Litiumioni-, lyijy ja NiMH-akut	Dry-Technology kuivakierrätysmenetelmä	https://www.akkuser.fi/prosessi/
BASF	Maailmanlaajuinen	Suomessa katalyyttisten materiaalien tuottaminen	Käynnistyy 2022. Materiaalituetanto 400 000 sähköautoon vuositain.	https://www.basf.com/fi/en.html
Eramet	Ranska	Monialainen	Omistaa myös litiumkaivannon	https://www.eramet.com/en
Li-Cycle	Pohjois-Amerikka	Litiumioniakut	Rakentaa Pohjois-Amerikan suurimman kierrätyslaitoksen New Yorkiin	https://li-cycle.com/