



SÄHKÖAUTON KORKEAJÄNNITEAKKU: KIERRÄTYSMENETELMÄT JA RAAKA-AINEET

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2023

Joona Sipiläinen

Tarkastajat: Associate Professor Lassi Aarniovuori ja Tutkijaopettaja Pia Lindh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Joona Sipiläinen

Sähköauton korkeaänniteakku: Kierrätysmenetelmät ja raaka-aineet

Kandidaatintyö

2023

29 sivua, 4 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: Associate Professor Lassi Aarniovuori ja Tutkijaopettaja Pia Lindh

Avainsanat: Sähköauto, akku, litiumioniakku, kierrätys

Tämä kandidaatintyö esittää lukijalle ajankohtaisen katsauksen sähköautoakkujen nykyisestä kierrätystilanteesta. Työn menetelmänä käytetään kirjallisuuskatsausta hyödyntäen tieteellistä tutkimusdataa sekä tieteellisiä artikkeleita. Työ koostuu ajankohtaisista tiedoista ja tekniikasta. Työssä tutustutaan sähköautojen akkumateriaaleihin ja valmistusprosessiin pintapuolisesti ja perehdytään akun kierrätysmenetelmiin tarkemmin.

Työssä tutustutaan aluksi litiumioniakun rakenteeseen ja sen toimintaan. Litiumioniakun suosio on kasvanut sen hyvien ominaisuuksien myötä sekä sähköautojen määrä lisääntynyt. Aihe on siten myös hyvin ajankohtainen. Työssä korostuu akkujen kierrätyksen merkitys ja perehdytään kierrätyksen erilaisiin menetelmiin. Työstä selvisi akussa olevan myös monia kriittisiä raaka-aineita. Työssä perehdytään mistä nämä raaka-aineet tulevat. Työ kuvaa myös pääpiirteittäin akun valmistusprosessin. Työssä mm. kuvattiin mistä osakokonaisuuksista ja raaka-aineista litiumioniakku koostuu.

Ennen lopullista kierrättämistä akut pitää ensin purkaa autosta. Niitä voidaan myös mahdollisesti akun kunnan mukaan uudelleen käyttää. Sähköauton akun lopullisessa kierrätysprosessissa hyödynnetään samoja jo pitkään käytössä olleita menetelmiä. Hydro- sekä pyrometallurginen prosessi on ollut jo pitkään käytössä. Nykyään kuitenkin voidaan yhdistää nämä prosessit ja parantaa talteenotto prosenttia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Joona Sipiläinen

Electric car high voltage battery: recycling methods and battery raw materials

Bachelor's thesis

2023

29 pages, 4 figures and 1 table

Examiners: Associate Professor Lassi Aarniovuori and Senior Instructor Pia Lindh

Keywords: Electric car, battery, lithium ion battery, recycling

This bachelor's thesis presents an up-to-date overview of the current recycling situation of electric car's batteries to the reader. The method of the work is a literature review, by utilizing scientific research data and scientific articles. The work consists of current knowledge and technology. The work involves getting to know the battery materials and manufacturing process of electric cars superficially and getting to know the battery recycling methods in more detail.

The work will initially explore the structure and function of the lithium-ion battery. The lithium-ion battery has grown in popularity due to its good properties, as well as the increasing number of electric cars. The subject is therefore also very topical. The work emphasizes the importance of battery recycling and introduces different methods of recycling. The work also revealed that the battery contains many critical raw materials. Work explains where these raw materials come from. The work also outlines the battery manufacturing process. Among other things, the work described what sub-assemblies and raw materials the lithium-ion battery consists of.

Before the final recycling, the batteries must first take apart from the car. They can be reused depending on the condition of the battery. The same methods have been in use for a long time in the final recycling process of an electric car's battery. The hydro- and pyrometallurgical processes have been in use for a long time. Today, however, these processes can be combined, and the recovery rate can be improved.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto.....	5
1.1	Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät	5
2	Uusimmat akkuteknologiat.....	7
2.1	Litiumioniakun rakenne	7
2.2	Akun raaka-aineet	7
2.3	Tulevaisuuden akkuteknologiat	8
2.4	Akun valmistusprosessi.....	10
3	Akun kriittiset raaka-aineet	12
4	Akun kuluminen ja uudelleenkäyttö.....	16
4.1	Akun kuluminen.....	16
4.2	Akun uudelleenkäyttö ja käyttö uudessa tarkoituksessa	17
5	Akun kierrätysprosessi ja tilanne.....	20
5.1	Hydrometallurginen prosessi	20
5.2	Pyrometallurginen prosessi	21
5.3	Kierrätyksen tilanne maailmalla	21
6	Johtopäätökset	23
	Lähteet	24

1 Johdanto

Nykypäivänä suuresti esillä ollut huoli ilmastonmuutoksesta on saanut sähköautojen kehityksen siirtymään pikaisesti eteenpäin sekä autojen tuotannon kiihtyvään kasvuun. Liikenne on suuri kasvihuonepäästöjen aiheuttaja, sillä se koostuu suurelta osin fossiilisesta energiasta. Vuonna 2019 liikenteen osuus oli noin 25 % EU:n kokonaispäästöistä sekä noin 60,6 %:a liikenteen päästöistä Euroopassa oli peräisin henkilöautoista (Euroopan ympäristökeskus, 2019).

Euroopan komission vuoden 2018 strategiassa yksi päätavoitteista on hiilineutraali Eurooppa vuoteen 2050 mennessä ja hiilineutraali liikenne 2035 mennessä. (Euroopan ympäristökeskus, 2019.) Liikenteen osalta se tarkoittaa keskittymistä yhä vähäpäästöisimpiin liikennemuotoihin sekä päästöttömiin ajoneuvoihin siirtymistä. Euroopan parlamentti on äänestänyt jo polttomootoriautojen kieltämisen puolesta vuoteen 2035 mennessä. Tämän tavoitteen toteutuessa Euroopan sähköautokanta kasvaa ja akkujen kierrätyksen merkitys nousee.

Kierrätys on auton akun elinkaaren viimeinen vaihe ja se tulee suuremmin esille, kun sähköautot vanhenevat. Tällä hetkellä ajossa olevien sähköautojen akut eivät ole elinkaarensa päässä, joten akkuja kierrätetään vain vähän. Kierrätettävät akut ovat peräisin kolariautoista, tai ne ovat muuten vaurioituneita. Sähköauton akulle myönnetään tavallisesti noin 5–8 vuoden tai 100 000–200 000 kilometrin takuu. (Nordic plug, 2022.) Tämä on arvioitu akun kapasiteetin heikkenemisestä ja on täysin riippuvainen autosta ja autossa käytettävästä akusta. Akun varauskyvyille valmistajat ovat asettaneet 70 % rajan (Infinitev, 2023). Akulle ei voida siis sanoa suoraan sopivaa vaihtoväliä.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet ja menetelmät

Tutkimuksen tavoitteena on esittää lukijalle ajankohtainen kirjallisuuskatsaus sähköautojen akkujen nykyisestä kierrätystilanteesta. Tavoitteena on tiivistää ajankohtaisimmat tiedot ja tekniikka. Työssä tutustutaan sähköautojen akkumateriaaleihin ja valmistusprosessiin

pintapuolisesti ja perehdytään akun kierrätysmenetelmiin. Työssä pohditaan myös kierrätykseen liittyviä haasteita sekä niihin mahdollisia ratkaisuja. Tutkimuskysymykset ovat:

- Miten korkeajänniteakut voidaan kierrättää?
- Mitä materiaaleja akusta voidaan ottaa talteen?

Tutkimuksen suorittamiseen käytettiin kirjallisuuskatsausta luotettavien tieteellisten artikkelien pohjalta.

2 Uusimmat akkuteknologiat

1990-luvun jälkeen nopeasti kehittyneet litiumioniakut ovat nousseet tärkeäksi energian varastoksi. 2010-luvulla akkuja aloitettiin ensimmäistä kertaa hyödyntämään ajoneuvoissa ja pian myös suuremmissa energian varastointijärjestelmissä. (Melin, 2019.) Teslan Roadster malli oli ensimmäinen kokonaan sähköllä kulkeva ajoneuvo, jossa hyödynnettiin litiumioniakkua. Kyseinen ajoneuvo esiteltiin vuonna 2008. (Tesla, 2010.) Litiumioni (Li-on) akun hyödyt ovat kestävyys (kestää useita latausyklejä), korkea energiatehokkuus ja hyvä korkean lämpötilan suorituskyky. Tässä luvussa esitellään litiumioniakun rakennetta tarkemmin sekä tutustutaan, miten sähköauton akut valmistetaan. Tähän liittyvät myös valmistuksessa käytettävät raaka-aineet sekä uuden teknologian akut.

2.1 Litiumioniakun rakenne

Suurin osa tämän hetken sähköautoista käyttää litiumioniakkuja. Litiumioniakut ovat energiatihedeltään suurempia kuin lyijy- ja nikkelimetallihydridiakut. Tämän ansiosta pystytään litiumioniakuista rakentamaan mahdollisimman pieniä ja ne säästävät ajoneuvon tilaa. Akun toiminta perustuu kennossa litiumionien liikkeeseen anodilta katodille ja latauksessa päinvastoin. Akut koostuvat jopa tuhansista kennoista. Kenno voi olla rakenteeltaan lieeriömäinen, prismaattinen tai pussimainen. Ne ovat kasattu pakkauksiin. Näitä pakkauksia kutsutaan moduuleiksi. Moduulit ovat lujia ja kestäviä sillä kennot ovat hitsattu tai liimattu yhteen. Tämä vaikeuttaa myös akkujen purkamista niiden elinkaaren loppuvaiheessa. (Nature, 2021.)

2.2 Akun raaka-aineet

Tyypillisin sähköauton akku on litiumioniakku, jossa katodina eniten käytetyt materiaalit ovat litium-nikkeli-magnaani-kobolttioksidi (NMC) ja litiumrauta-fosfaatti (LFO). Anodina yleisin materiaali on grafiitti. (Hill, Clarce, Blair ja Menadue, 2019.) Yleisimmät katodimateriaalit ovat taulukossa 1.

Taulukosta nähdään litiumrautafosfaatin olevan toiseksi eniten käytetty katodimateriaali vuonna 2019. Litiumrautafosfaattia käytetään paljon katodimateriaalina, sillä sitä on turvallista käyttää, sen kustannukset ovat alhaiset, sillä on korkea syklin suorituskyky ja tasainen jännite. Tällä hetkellä esimerkiksi Tesla käyttää litiumrautafosfaattiakkua model 3:ssa ja vanhemmissa malleissa NCA-akkua (Man, 2023). Litiumrautafosfaattiakku on samankaltainen kuin litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA), mutta se on turvallisempi. (Hill et al.,2019.)

Nikkelin ja koboltin korvaajana pidetyllä litiummangaanioksidiakulla (LMO) on samankaltaiset ominaisuudet kuin NMC-akulla. Kobolttipohjaiset katodimateriaalit ovat paljon käytettyjä litiumioniakuissa, mutta niiden käyttöä rajoittavat niiden korkea hinta sekä ne eivät ole yhtä lämpövakaita. Mangaaniakut ovat halvempia, mutta niilläkin on paljon rajoituksia. Mangaanilla on taipumusta liueta elektrolyyttiin akun syklin aikana, mikä aiheuttaa epävakaa katodisyklin. (Mahmud, Rahman ja Kamruzzaman, 2022.) NMC-akkuja käytetään esimerkiksi Nissan Leaf mallin autossa (Man, 2023).

Taulukko 1. Yleisimmät anodi- ja katodiyhdisteet sähköautojen akuissa (Hill, Clarke, Blair ja Menadue, 2019).

Lyhenne	Katodi	Anodi	Osuus sähköautoista (2016) [%]
LFO	Litium-rauta-fosfaatti	Grafiitti	35 %
LMO	Litium-mangaani-oksidi	Grafiitti	7 %
NMC	Litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidi	Grafiitti	44 %
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-alumiini-oksidi	Grafiitti	14 %

2.3 Tulevaisuuden akkuteknologiat

Jotta sähköautojen määrä voisi kasvaa polttomoottoriautojen ohi, täytyy toimintasäteen olla samaa luokkaa kuin polttomoottoriajoneuvoilla. Jotta tämä toteutuisi, pitää akkujen kapasiteettiä lisätä ajoneuvoissa. Kapasiteettia voidaan lisätä kahdella tavalla. Lisäämällä akkujen määrää. Tämä veisi enemmän tilaa ajoneuvosta sekä akkujen hinta nousisi. Toinen tapa on valmistaa korkeamman energiatihedden akkuja. (Samsung SDI.)

Korvaavia uusia menetelmiä on tutkittu. Yksi näistä on litiumrikkiakku (Li-S). Litiumrikkiakun teoreettinen energiatiheys on erittäin korkea. Se on noin neljä kertaa korkeampi kuin litiumioniakun energiatiheys. (Bernard, 2017.) Litiumrikkiakku on myös halvempi ja ympäristöystävällisempi vaihtoehto litiumioniakulle. Se on myös kevyempi kuin tyypillinen litiumioniakku. Tämän ansiosta se sopisi hyvin tie- ja lentoliikenteeseen. Ongelmana on kuitenkin rikin määrän kasvu litiumin elektrodiin liittämisen aikana. Vaikka litiumrikkiakulla on korkea teoreettinen energiatiheys, ei sen käytännön energiatiheys ole samaa luokkaa. Tämä on yksi suurimmista esteistä sen kaupallistamisessa. Litiumrikin monimutkainen toimintaperiaate vaikeuttaa ja hidastaa akun kehitystä. Ongelmista huolimatta litiumrikkiakku on lupaava vaihtoehto uuden teknologian ladattavaksi akuksi. (Mori, 2023.)

Kiinteäelektrolyyttinen akku on toinen esillä ollut uudemman teknologian akku. Ideana on päästä nestemäisestä elektrolyytistä eroon ja vaihtaa se kiinteään. Kiinteäelektrolyyttinen akku on energiatiheydeltään litiumioniakkua suurempi ja turvallisempi käyttää. Litiumioniakun nestemäinen elektrolyytti aiheuttaa helposti vuotoja, jos siihen kohdistuu iskuja. Kiinteäelektrolyyttinen akku kestää paremmin iskuja, tärinää ja lämpöä, joten se on paloturvallisempi ja ympäristöystävällisempi vaihtoehto. Elektrolyytti pitää muotonsa, vaikka olisi vahingoittunut. Tämä tekee siitä hyvän vaihtoehdon sähköauton akuksi. (Kim et al., 2015.)

Akun turvallisuus säästää komponentteja ja tilaa, jota voimme käyttää hyödyksi. Esimerkiksi lisäämällä akun kapasiteettia. Kiinteäelektrolyyttinen akku sisältää kuitenkin haittapuolia. Se ei sovellu yhtä hyvin alhaiseen lämpötilaan. (Kim et al., 2015.) Sähköautoissa tämä ei kuitenkaan ole suuri ongelma, sillä auto pitää akun lämpimänä myös silloin kun autoa ei ajeta.

Kiinteäelektrolyyttiset akut voidaan jakaa kolmeen luokkaan. Akut perustuvat joko oksideihin, sulfideihin tai polymeereihin. Sulfidipohjaisilla akuilla on turvallisuusriskejä. Oksidipohjaiset ja polymeeripohjaiset ovat vakaampia ja turvallisempia. Tämä vaikuttaa akun kierrättämiseen. Akkujen kierrättämisen vaiheet eroavat nykyisten litiumioniakkujen kierrättämisestä kiinteän elektrolyytin vuoksi. Kierrätys tarvitsee enemmän vaiheita ja on monimutkaisempi. Azhari ehdottaa tutkimuksessaan nykyisten kierrätysmenetelmien yhdistämistä hyödyntäen kiinteiden elektrolyyttien ominaisuuksia. Polymeeri- ja sulfidipohjaisille akuille sopii parhaiten liuottaminen sekä uudelleen kiteyttäminen. Oksidipohjaisille sopii parhaiten hydroterminen- sekä hydrometallurginen prosessi. (Azhari et al., 2020.)

Kiinteäelektrolyyttinen akkuteknologia soveltuu täydellisesti käytettäväksi sähköautoon kestävyytensä, kapasiteettinsa, ja turvallisuutensa vuoksi. Akku mahtuisi pienempään tilaan ja sitä voidaan ladata nopeammin. Esimerkiksi Volkswagenin e-Golf mallin sähköauton kantama kasvaisi nykyisestä 231 km (WLTP) 750 kilometriin, kun kyseisessä mallissa käytettäisiin kiinteäelektrolyyttistä akkua (Volkswagen). Vastaavasti Toyota lupaa vastaavasti rajallisen tuotannon alkavan kyseiselle akkutyypille vuonna 2025 (Toyota).

2.4 Akun valmistusprosessi

Sähköauton akkuna käytettävä korkeajänniteakku on akku, jolla pystytään tuottamaan auton vaatima korkeajännite, sekä varastoimaan ajamiseen tarvittava energia. Jännite on akussa satoja voltteja. (Moottori, 2019.) Korkeajänniteakun rakenne voidaan jakaa eri pääkomponentteihin. Näitä ovat akkumoduuli, akun hallintajärjestelmä, akun jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmä, akun sähköjärjestelmä ja akun runko. (Cavallo.) Akun valmistus voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

- Kennon kokoonpano
- Akku moduulin kokoonpano
- Valmiin akkupaketin kokoonpano

Korkeajänniteakun valmistus alkaa kennon valmistuksella. Kennon valmistus on kaksiosainen prosessi. Prosessin vaiheet ovat elektrodin valmistus sekä kennon kokoonpano. Vaikka kennon valmistajilla on erilaiset kennorakenteet, itse kennon valmistus tapahtuu vakiintuneilla menetelmillä ja prosesseilla. Tässä kohtaa on tärkeää käyttää mahdollisimman vähäpäästöisiä sähköntuotannon menetelmiä, jotta saadaan kennon valmistukseen liittyvät päästöt mahdollisimman alhaiseksi. (IEA, 2022.)

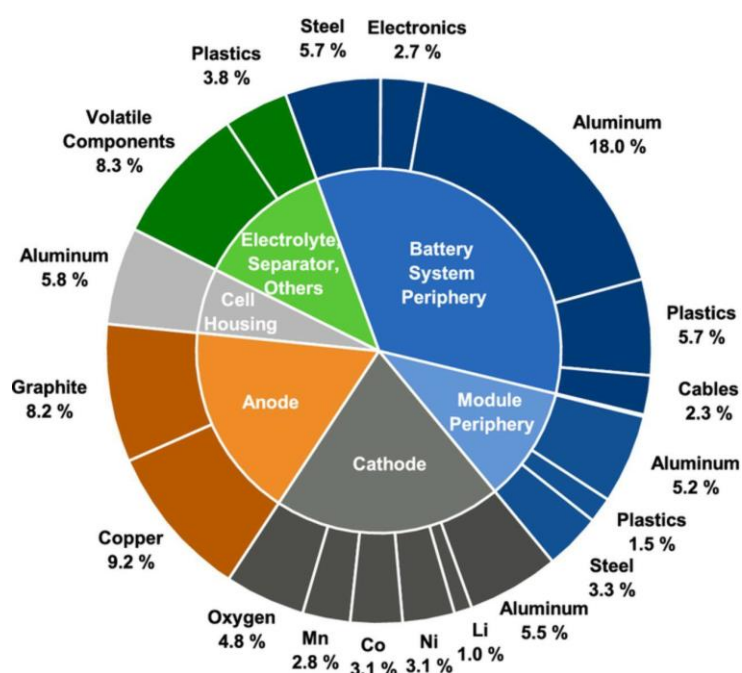
Aluksi katodin ja anodin aktiivinen materiaali sekoitetaan sidosaineeseen, liuottimeen ja li-säaineisiin. Tämän jälkeen anodi ja katodi päällystetään erikseen jatkuvassa päällystys prosessissa virtakollektorilla. Sen jälkeen elektrodit rullataan ja kuivataan. Kenno valmistetaan pinoamalla elektrodit ja laittamalla väliin erotin. (IEA, 2022.)

Seuraavaksi valmistetaan akkumoduuli. Useampi kenno yhdistetään moduuliin. Akkupaketti kootaan yhdistelemällä moduuleja akkukoteloon. Akkupaketin kotelo on valmistettava siten

että se kestää iskuja ja lämpöä. Moduulien lisäksi pakettiin kuuluu akun hallintajärjestelmä, joka vastaa akun varaustilan valvonnasta. Hallintajärjestelmä valvoo akun eri parametrejä kuten akun lämpötilaa, terveyttä ja jännitettä. (Smishad, 2021.) Akun sähköjärjestelmä ja hallintajärjestelmä ovat tiivisti yhteydessä toisiinsa, ja käyttäjä saa täydellisen kuvan mitä jokaisessa kennossa tapahtuu (Cavallo). Tämä helpottaa myös akun vianetsintää jatkossa. Lisäksi akkupakettia on tärkeä lämmittää sekä jäähdyttää. Tästä on vastuussa akun lämmönhallintajärjestelmä. Tämä on tyypillisesti toteutettu suljetulla nestejäähdytyksellä. Järjestelmän on tärkeää olla suljettu, jottei se vuoda ja aiheuta akun vioittumista. (Cavallo.) Lopuksi kotelo tiivistetään ja suljetaan kannella ja akku on valmis asennettavaksi ajoneuvoon.

3 Akun kriittiset raaka-aineet

Akun valmistamiseen käytetään materiaaleja, jotka ovat kriittisiä raaka-aineita ja löytyvät EU:n komission kriittisten raaka-aineiden listalta. Kuvassa 1 näemme yleisien sähköauton akun koostumuksen eri osa-alueittain prosentteina akun kokonaismassasta.

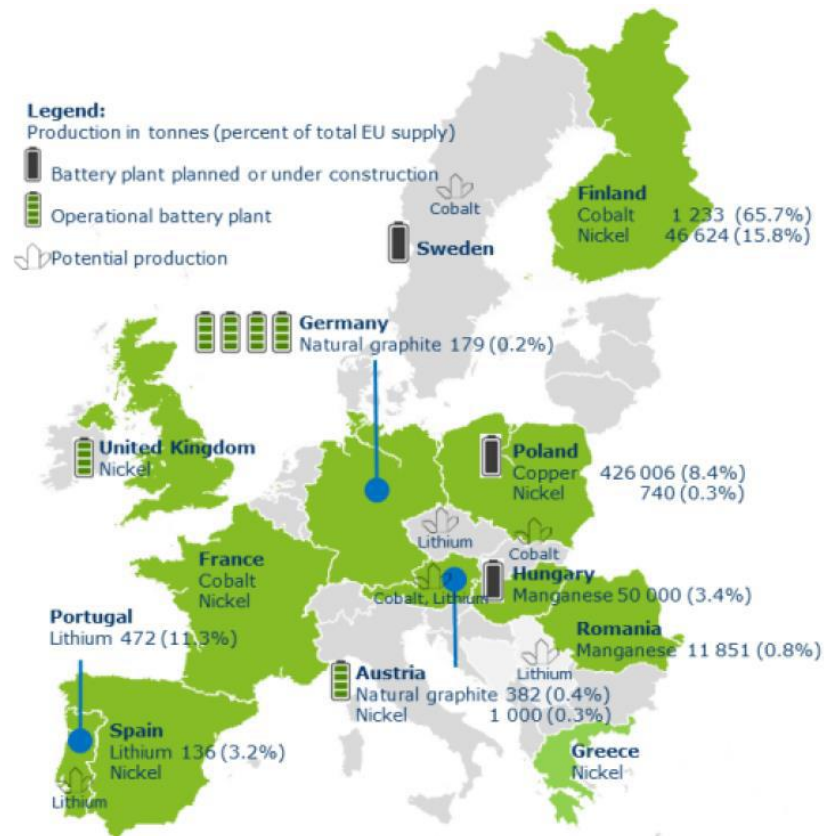


Kuva 1. Korkeajänniteakun koostumus osa-alueittain prosentteina akun kokonaismassasta (Diekmann et al., 2017)

Kuvassa 1 vihreällä värillä on merkitty elektrolyytissä käytettävät materiaalit, oranssilla anodin materiaalit, harmaalla katodin materiaalit, vaalean sinisellä moduuli sekä tummemman sinisellä akun järjestelmään tarvittavat materiaalit. Jos vertaamme kuvaa Euroopan unionin raporttoimaan kriittisten raaka-aineiden listaan, huomaamme että molemmista löytyvät koboltti, mangaani, nikkeli ja luonnollinen grafiitti. (Euroopan komissio, 2019.) Vuonna 2020 listalle lisättiin myös litium (Euroopan komissio, 2023). Raaka-aineet luokitellaan kriittisiksi, jos niillä taloudellinen merkitys, mutta niitä ei pystytä tuottamaan tarpeeksi EU:ssa. Nämä raaka-aineet on silloin hankittava muualta. (EU, 2021.) Tässä myös ratkaiseva tekijä

on materiaalien kierrätys akun elinkaaren loppupäässä, sillä kierrätys tapahtuisi myös Euroopassa.

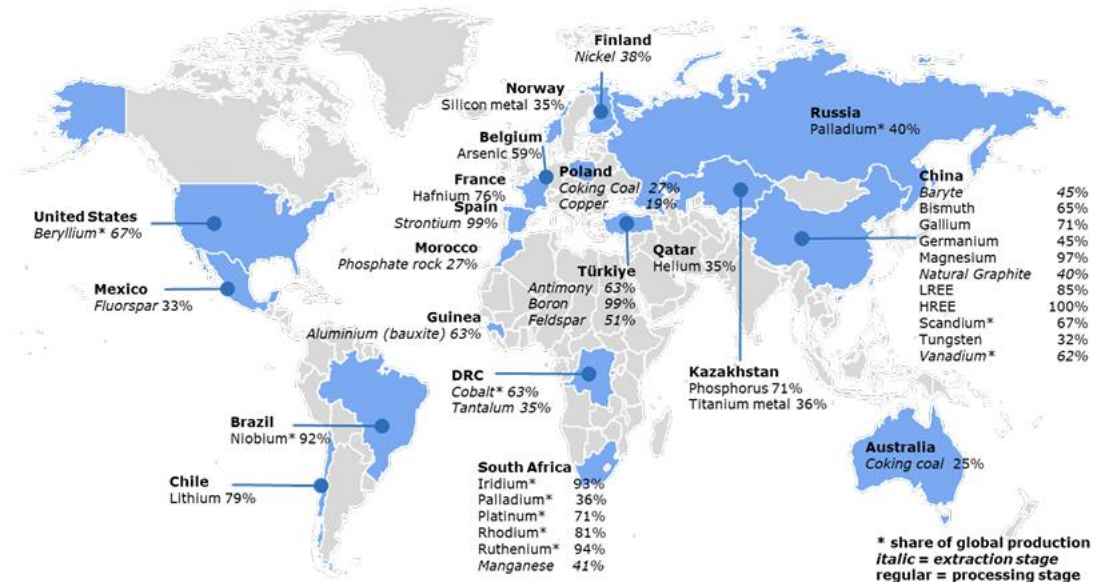
Kuvassa 2 on EU:n maiden akkutehtaat sekä potentiaalinen kaivostuotanto kriittisille materiaaleille. Kuva on vuodelta 2018, joten tilanne on voinut muuttua.



Kuva 2. EU:n maiden akkutehtaat sekä potentiaalinen kaivostuotanto kriittisille materiaaleille. (Hill et al, 2019)

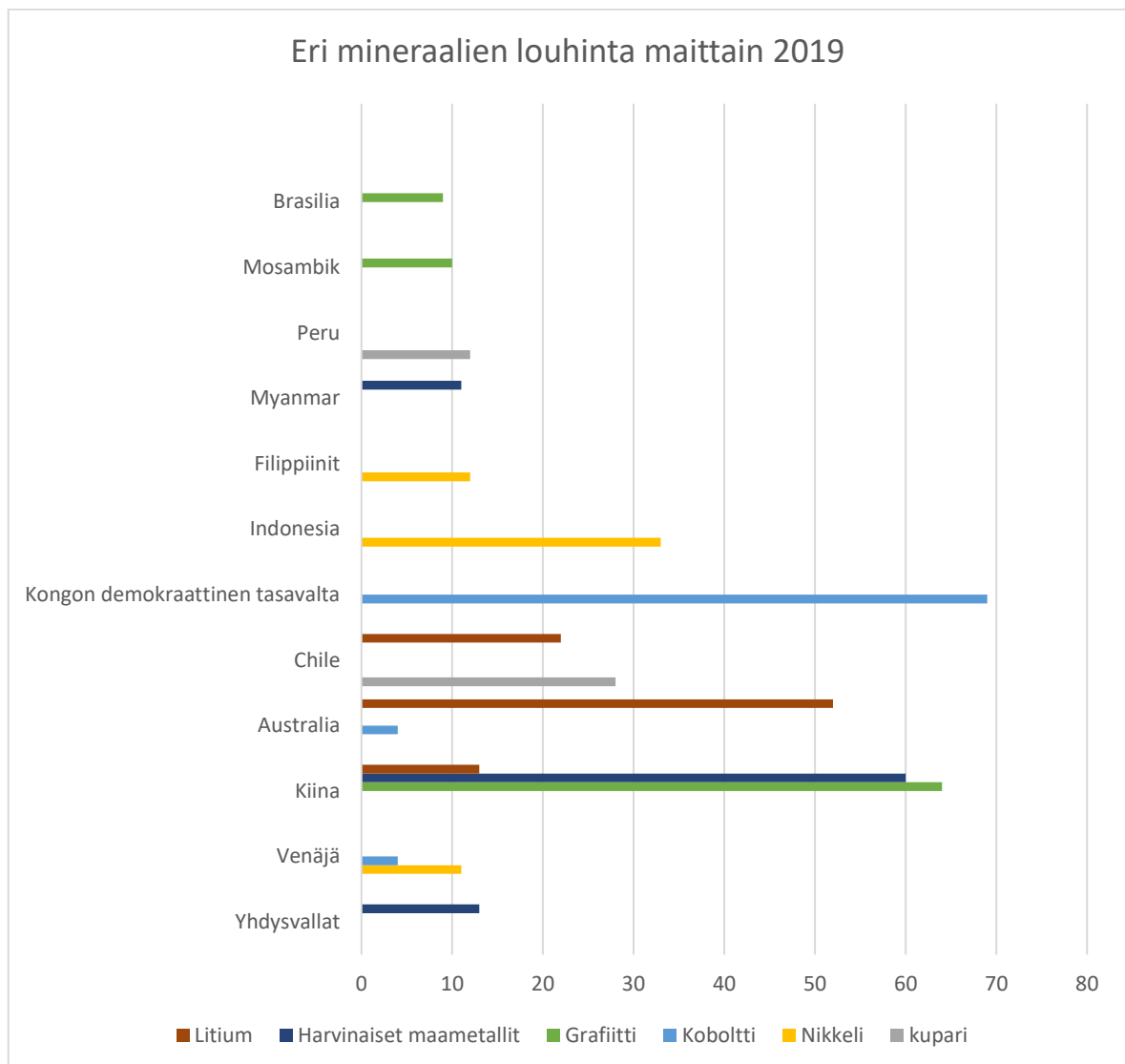
Kuvasta 2 huomaamme Suomella olevan noin 65 % osuus EU:n koboltin kokonaistarjonnasta. Kuvasta 3 voimme kuitenkin havaita suurimpien kobolttivarastojen löytyvän Afrikasta. Suomella on kuitenkin 38 % osuus EU:n alueella käytettävästä nikkelistä. EU:ssa louhitut nikkeli ja koboltti ovat noin 2 % koko maailmassa tuotetusta nikkelistä ja koboltista. Litiumin ja mangaanin kohdalla vastaavasti 0 %. Tämän vuoksi raaka-aineet tuodaan muualta. (Euroopan komissio, 2019.) Kuvassa 3 on suurimmat kriittisten raaka-aineiden toimittajat EU:lle.

Kuvasta 2 nähdään vuonna 2018 toiminnassa olevat akkutehtaat. Euroopasta löytyy akkutehtaita, mutta suurin osa tällä hetkellä toimivista akkutehtaista kokoaa akkuja eikä valmista itse akkukennoja. UK:ssa toimiva akkutehdas valmistaa myös kennoja, mutta elektrodirullat ovat tuotu muualta. Eli akut valmistetaan pääosin muualla ja kootaan osittain Euroopassa. On kuitenkin ennakoitu Euroopan osuuden kasvavan litiumioniakkujen valmistajana nykyisestä 6 %:sta 25 %:n, sillä Eurooppaan avataan jatkuvasti uusia akkutehtaita. Esimerkiksi Tesla on alkanut valmistamaan Saksassa akkuja. Akkujen suurimmat valmistajat ovat kuitenkin Aasiasta kuten Catl, LG chem ja Panasonic. Amerikassa suurin valmistaja on sähköautojakin valmistava Tesla.



Kuva 3. Suurimmat EU:n kriittisten raaka-aineiden toimittajat vuonna 2023 (Euroopan komissio, 2023)

Kuvasta 3 nähdään, EU:n alueelle tuotu sähköautojen kriittisten akkumateriaalien louhinta on enimmäkseen Aasiassa, Afrikassa ja Etelä-Amerikassa. Tätä kuvaa voidaan verrata alempana olevaan kuvaan suurimmista louhijamaista. Kuva 4 kertoo Maailmanlaajuisen tilanteen louhinnasta. Kuvissa voidaan havaita samankaltaisuuksia. Voimme todeta Kiinan olevan aktiivinen louhijamaa. Kiinan osuus on korkea monen eri raaka-aineen kohdalla.



Kuva 4. Akuissa käytettyjen mineraalien louhinta (IEA, 2019)

Kuvassa 4 on suurimmat louhijamaat. Kun katsotaan Kiinaa kuvassa 4, huomaamme sen louhivan grafiittia, ja harvinaisia metalleja yli 60 % osuudella maailmassa. Litiumia louhitaan paljon Chilessä ja Australiassa. Kobolttia louhitaan reilusti eniten Kongossa. Kuvassa ei ole yhtään Euroopan maata, mutta kuvan 3 perusteella EU suosii myös Euroopan alueella louhittuja raaka-aineita.

Akkuteollisuudessa täytyy keskittyä akkujen kierrättämiseen, jotta saamme mahdollisimman paljon materiaaleja uusiokäyttöön.

4 Akun kuluminen ja uudelleenkäyttö

Akkujen kierrätys on monivaiheinen prosessi. Kierrätysprosessi voidaan jakaa seuraaviin vaiheisiin:

1. akun purku
2. akun uudelleenkäyttö
3. akun toinen tai käyttö uudessa tarkoituksessa
4. kierrätys ja materiaalien talteenotto

Tässä luvussa keskitytään, miten akku kuluu ja milloin se on valmis kierrätettäväksi tai akun uudelleenkäyttöön.

4.1 Akun kuluminen

Sähköauton akun kuluminen on yleinen huolenaihe. Kuluminen vaikuttaa akun käyttöikänsä. Akulle myönnetään pidempi takuu kuin uudelle autolle tällä hetkellä. Tavallinen sähköauton akun takuu on noin kahdeksan vuotta tai 160 000 km. (Lesonen, 2021.) Takuuehdoissa mainitaan myös akun kapasiteetti. Tyypillisesti sähköauto menettää akun kapasiteettiä noin 2 % vuodessa.

Akun terveyttä voidaan kuvata akun terveydentilaa kuvaavalla luvulla eli state of health (SOH) luvulla. Uudella akulla SOH-luku on 100 % ja se vähenee akun käyttöiän myötä. Akun terveyteen vaikuttavat, käyttölämpötila, käyttösykli ja latausteho. (Argur, 2020.)

Akun varaustilaa kuvaava lyhenne (SOC) kertoo akun varaustason suhteessa kapasiteettiin. Tutkimusten mukaan pitämällä akun varaustaso 20 % :n sekä 80 % :n välillä voidaan vähentää akun kapasiteetin heikkenemisestä. Tämä kuitenkin lisää pelkoa akun loppumisesta, sillä auton toimintamatka on tällöin huomattavasti lyhyempi. Akun lataus pystytään rajoittamaan haluamaansa varaustasoon suoraan autosta tai älypuhelimien sovelluksesta. (Kostopoulos, Spyropoulos ja Kaldellis, 2020.)

Ajoneuvon lataukset jaetaan neljään eri lataustapaan. Lataustapa 3 (Mode 3) tarkoittaa ajoneuvon lataamista kiinteästi asennetulla latauslaitteella esimerkiksi kotona. Pikalataus eli lataustapa 4 vähentää akun kuntoa nopeammin kuin muut lataustavat. Pikalataus eli lataustapa 4 (Mode 4) on nopea lataustapa, jossa käytetään tasavirtalaturia. Pikalatauksella autoa saadaan ladattua nopeasti riippuen akun lataustehosta. (Plugit.) Pikalatauksen aikana lämpötilat kohoavat korkeammaksi kuin hitaammin ladattaessa. Tällöin myös virta on paljon korkeampi. Geotab:n tutkijat testasivat pikalatauksen vaikutusta akun varauskyvyn putoamiseen. Neljän vuoden aikana kahta autoa ladattiin siten että toista ei pikaladattu ollenkaan ja toista pikaladattiin enemmän kuin kolme kertaa kuukaudessa. SOH-luku oli testin jälkeen ensimmäisessä autossa 90 %. Toisessa se oli tippunut noin 81 %:iin. Testin perusteella pikalatauksella on huomattava vaikutus akun kuntoon. Sähköautoilijoiden on hyvä priorisoida pienemmän lataustehon lataustavat. (Argue, 2020.)

Lataussyklien määrä vaikuttaa SOH-arvoon. V2G ratkaisuissa lataussyklien määrä kasvaa, kun auton akkua puretaan sekä ladataan enemmän. V2G tarkoittaa energian siirtämistä autosta sähköverkkoon. V2G vaikuttaa siis akkuun kapasiteetin huononemisella pitkällä aikavälillä. Kun akkua hyödynnetään V2G systeemissä on muistettava myös, miten akun varaus-tila vaikuttaa kapasiteettiin. Akkua ei suositella purettavan alle 20 %. Huomioon on myös otettava V2G:n hyötysuhde. Hyötysuhde on parempi suuremmilla tehoilla, mutta se vaikuttaa yleensä myös akkuun negatiivisesti. (Chen ja Folly, 2023.)

Kun akun SOH-luku on alle 70 %, akku on yleensä vaihdettava. Monet autojen valmistajat käyttävät 70 % akun vaihdon rajana takuuehdoissaan. Kun akun varauskyky on huono, siirtyy akku kierrätykseen. Seuraavassa kappaleessa pohditaan akun uudelleenkäyttöä, joka on mahdollinen seuraava vaihe akulle.

4.2 Akun uudelleenkäyttö ja käyttö uudessa tarkoituksessa

Ennen varsinaista kierrätystä korkeajänniteakun kunto arvioidaan. Jos akku on vielä käyttökelpoinen, sitä voidaan uudelleen käyttää sähköautossa. Uudelleenkäyttö on valinnainen askel. Se tarkoittaa akun käyttöä uudelleen samassa tarkoituksessa eli sähköauton akkuna. Se voidaan toteuttaa yksinkertaisella tarkastuksella tai se voi vaatia kunnostustyötä esimerkiksi yhden moduulin vaihdon. Teoriassa tämä on parempi vaihtoehto kuin akun käyttö kokonaan uudessa tarkoituksessa. Akun käyttö uudessa tarkoituksessa tarkoittaa sen muuntamista

esimerkiksi uusiutuvan energialähteen varastoksi. Tällöin sen alkuperäinen tarkoitus muuttuu vaihtoehtoiseen tarkoitukseen. Akun muutos kuluttaa enemmän resursseja sekä energiaa. (Hill et al., 2019.)

Akun uudelleenkäyttö on hyödyllistä sekä ympäristön että talouden kannalta. On kuitenkin epävarmaa, kuinka akut kestävät uudessa ajoneuvossa. Uudelleenkäyttö olisi toimiva ratkaisu auton valmistajille. Jos auton valmistaja ottaisi akun takaisin itselleen, se voisi hyödyntää akun jäljellä olevaa kapasiteettia ja osia uusissa ajoneuvoissa. Tämä olisi valmistajille myös halvempaa. (Hill et al., 2019.)

Sähköauton akku on kallis investointi. Uusi akusto maksaa noin 151 \$ eli noin 138 € per kilowattitunti (Randall, 2022). Kuluttaja voisi pienentää hintaa myymällä vanhan akkupaketin valmistajalle. Uudelleenkäyttö on siis resurssitehokas, taloudellinen sekä ympäristöystävällinen ratkaisu. (Hill et al., 2019.)

Vaikka uudelleenkäytöllä on hyvät mahdollisuudet ja hyödyt, on sillä myös esteitä ja haasteita. Suurimmat esteet liittyvät turvallisuuteen ja terveyteen. Akku sisältää haitallisia kemiallisia aineita ja sillä on korkea jännite. Akun kunnostamisessa on suuri riski kokemattomalle työntekijälle. Kunnostaminen vaatii tarkkuutta sekä työhön soveltuvan koulutuksen. Akkuja ei ole standardoitu. Riittävä standardointi sekä akkujen asetukset helpottaisivat prosessia. (Hill et al., 2019.)

Ongelmana on myös akkujen kehitys. Jo aiemmin mainitut uudet akkuteknologiat voivat nousta vanhojen tilalle. Kun nykyiset litiumioniakkupaketit hajoavat ei niitä pystytä välttämättä samalla tavalla kunnostamaan ja käyttämään uudelleen. Jos akkuteknologia ja autojen elektroniikka kehittyvät akun elinkaaren aikana, ei akku sovellukaan uusiin autoihin. Tällöin akkua voitaisiin käyttää muussa tarkoituksessa. Mutta pitää muistaa, että voi mennä pitkään ennen kuin uudet teknologiat tulevat markkinoille. Vaikka akkua ei pystyttäisikään uuteen autoon kunnostaa, voidaan akku kunnostaa käytettäväksi samassa autossa. (Hill et al., 2019.)

Valmistajat eivät pysty hyödyntämään uudelleenkäyttöä kunnolla. Euroopassa on laki, joka käskää jokaisen, joka laittaa akun markkinoille olemaan myös vastuussa sen kierrättämisestä. Ongelmana on kuitenkin se, ettei kenenkään akun omistajan tarvitse lähettää akkua takaisin valmistajalle. Akku myydään yleensä siitä eniten tarjoavalle. Vain kun akku on vahingoittunut ja sen arvo on negatiivinen, palautuu akku yleensä valmistajalle. (Melin, 2019.)

Akun käyttö uudessa tarkoituksessa saattaa olla sopiva vaihtoehto uudelleenkäytön ja lopullisen kierrättämisen välissä. Uudelleenkäyttö akulle ei ole aina mahdollista. Jos kuitenkin akussa on kapasiteettia ja sen kunto on riittävä, voidaan sitä edelleen hyödyntää muussa sovelluksessa. Akusto voidaan myös joutua kunnostamaan tätä varten. Akusto voi toimia esimerkiksi varavoimanlähteenä, sähkökatkon aikana. Esimerkiksi tehdas tai omakotitalo voi varastoidaan uusiutuvaa energiaa ja käyttää sitä sähkökatkon aikana. Tai omakotitalon asukas voisi vähentää omaa sähkölaskua lataamalla akustoja silloin kun sähkö on halpaa ja käyttämällä sen kalliina aikana esimerkiksi sähköauton lataukseen. Akustoja voidaan käyttää antamaan joustavuutta ja tasapainoa sähköntuotantoon ja kulutukseen. Niiden avulla voitaisiin tasoittaa kulutushuippuja. (Hill et al., 2019.)

Vaikka akuston uudelleenkäyttö uudessa käyttötarkoituksessa on korkeammalla kuin kierrätys jätehierarkiassa, on siinä esteitä ja haasteita, joista on päästävä ylitse. Osa ongelmista on samoja kuin jo aiemmin mainitussa uudelleenkäytössä. Akku joudutaan usein purkamaan ja muuttamaan, jotta se soveltuu uuteen käyttökohteeseen. Tähän liittyvät myös paloturvallisuuden sekä ympäristön riskit. Myös sääntelyt ja vastuun puute ovat hyvin tärkeitä kysymyksiä. Kuka on vastuussa, jos alun perin sähköauton valmistajan akku hajoaakin aivan toisessa käyttötarkoituksessa? (Hill et al., 2019.)

Voimme tulla johtopäätökseen, että vanhastakin sähköauton akusta saadaan kunnostamalla akku uudelleen käyttöön. Tämä säästää luontoa sekä raaka-aineita ja lisää akun elinikää. Akut toisivat hyvän varaston energiaverkoston. Se toisi joustavuutta ja säästöä pitkällä tähtäimellä. (Hill et al., 2019.) Mutta mitä tehdään, kun akku ei enää sovellu tähän tarkoitukseen? Sen jälkeen on akku kierrätettävä. Seuraavassa kappaleessa perehdytään akuston erilaisiin kierrätysmenetelmiin.

5 Akun kierrätysprosessi ja tilanne

Tässä luvussa keskitytään erilaisiin kierrätysmenetelmiin ja kierrätyksen näkymiin. Kun akku tulee kierrätykseen, on se voinut olla jo monessa eri käytössä. Kierrätys on akun elinkaaren viimeinen vaihe, kun akku ei enää sovellu uudelleenkäyttöön.

Akku pitää valmistella aluksi kierrätettäväksi. Akustot puretaan moduuleiksi, jonka jälkeen moduulit tehdään jännitteettömiksi. Kun moduulit on tehty jännitteettömiksi, voidaan ne erotella kennoiksi. Moduulien rungot sisältävät pääasiassa alumiinia, joten ne voidaan suoraan kierrättää. Tämän jälkeen kennot murskataan. Lopuksi materiaaleista erotellaan tarkasti eri raaka-aineet. Erottelumenetelmiä on useita. (Autio, 2020.) Eniten käytetyt menetelmät ovat pyrometallurgiset ja hydrometallurgiset prosessit (Melin, 2019).

5.1 Hydrometallurginen prosessi

Hydrometallurgisessa menetelmässä materiaalit erotetaan toisistaan kemiallisesti. Prosessissa tärkeä vaihe on uuttaminen. Sen avulla akusta saadaan arvokkaimmat raaka-aineet talteen. Uuttamisessa murskatut akun materiaalit käsitellään laimennetussa hapossa. Tällöin saadaan aikaan kemiallisia reaktioita sekä uusia yhdisteitä. Uuttamiseen voidaan käyttää montaa eri epäorgaanista happoa. (Petranikova.)

Uuttamisen jälkeen uuttamisliuos erotellaan. Yleisimmät erottelumenetelmät ovat liuotinuutto ja kemiallinen saostaminen. Yleensä käytetään montaa eri menetelmää. Prosessissa hyödynnetään puhtaita metallisuolia. (Petranikova.)

Prosessia hyödynnetään eniten Kiinassa, mutta myös Euroopassa on yrityksiä, jotka käyttävät kyseistä menetelmää. Suomessa Fortum hyödyntää Harjavallan tehtaalla hydrometallurgista menetelmää. Tulevan akkulainsäädännön ja korkeamman materiaalin keräysasteen vuoksi hydrometallurgia on lupaava menetelmä täyttää vaatimukset sekä luoda polku kiertotalouteen akkumarkkinoilla. (Petranikova.)

5.2 Pyrometallurginen prosessi

Pyrometallurgisen prosessin avulla metallit ja muut yhdisteet erotetaan toisistaan käyttäen hyödyksi korkeaa lämpötilaa. Tällä menetelmällä ei ole paljoa vaatimuksia sekä se tuottaa mahdollisimman vähän jätenestettä. Prosessi on muita halvempi ja vakiintuneempi. Pyrometallurginen prosessi on yleinen ja vanha prosessi. Sitä käyttävät monet suuret kierrätykseen erikoistuneet yritykset. (Zhou, et al., 2021.)

Prosessissa murskatut akkukennot syötetään uuniin. Aluksi on esilämmitysvaihe eli uuni on noin 300 °C. Näin saadaan elektrolyytti haihdutettua. Tämän jälkeen uunia lämmitetään korkeampaan lämpötilaan noin 700 °C. Tämä poistaa muovin akusta. Tämän jälkeen alkaa sulatusvaihe. Sulatusalueella aineet sulatetaan kuparin, koboltin, nikkelin ja raudan metalliseoksiksi ja kuonaksi. Sulatetun materiaalin annetaan jäähtyä sekä kuona ja metallit erotetaan. Tämä menetelmä toimii parhaiten kuparin, koboltin ja nikkelin takaisin saamiseksi. (Zhou et al., 2020.)

5.3 Kierrätyksen tilanne maailmalla

Vaikka pyrometallurginen prosessi on tehokas tapa saada talteen kobolttia ja nikkeliä, jää siinä monia metalleja talteenottamatta (T&E, 2022). Pyrometallurgisella prosessilla ei saada litiumia kerättyä. Se toimii parhaiten koboltin talteenottoon. Prosessi voidaan kuitenkin yhdistää hydrometallurgiseen prosessiin, jolloin saadaan parannettua raaka-aineiden palautumistehokkuutta. Näin saadaan myös litiumia paremmin talteen. (Zhou et al., 2020.)

Hydrometallurgisella prosessilla materiaalin talteenottoprosentti on korkeampi kuin pyrometallurgisella prosessilla. Pohjois-Amerikassa ja Kiinassa sijaitsee useampi yritys, jotka pystyvät ottamaan kierrätyksessä akusta litiumia talteen yli 90 %. Pohjois-Amerikasta LiCycle on raportoitu prosentin olevan jopa 95 % ja enemmän. Redwood Materials sen sijaan on raportoinut 95 % myös nikkelin, koboltin ja kuparin osalta. (T&E, 2022.)

Kiinassa tilanne on toisin. Kiinan viranomaisten virallisessa ohjeistuksessa virallinen talteenottoaste on koboltin ja nikkelin osalta jo 98 %. Litiumin osalta se on 85 %. Kiinalaiset yritykset, jotka saavuttavat nämä talteenottoasteet voivat hakea tukea valtiolta. Listalla oli vuonna 2022 jo 47 yritystä. (T&E, 2022.)

Ruotsalainen Northvolt on valmistanut vuonna 2021 ensimmäisen akkukennon kokonaan kierrätetystä koboltista, mangaanista ja nikkelistä. Northvoltin ympäristöpäällikön Emma Nehrenheimin mukaan se on osoitus siitä, että on olemassa kestävä, ympäristöystävällinen vaihtoehto perinteiselle kaivostoiminnalle. Hänen mukaansa kierrätysprosessi pystyy talteenottamaan 95 % akun materiaaleista. (Northvolt, 2021.)

6 Johtopäätökset

Työssä tutustuttiin sähköautoakkujen raaka-aineisiin sekä kierrätykseen. Aluksi perehdyttiin akustojen rakenteeseen ja tulevaisuuden akkututkimuksiin. Todettiin uudenlaisten akkujen olevan kehitteillä.

Seuraavaksi tutustuttiin akun koostumukseen sekä siihen mistä raaka-aineita louhitaan. Tässä hyvänä lähteenä oli Euroopan komission raportti. Seuraavaksi tutkittiin akkujen kierrättämistä ja mitä eri vaiheita se sisältää. Todettiin että ennen varinaista materiaalien erotte-
lua voidaan akkua hyödyntää muussa tarkoituksessa. Lopuksi esitettiin tarkemmin varsinaisia menetelmiä, millä saamme akusta mahdollisimman hyvin materiaaleja eroteltua uuteen käyttöön.

Kandidaatintyö vastasi tutkimuskysymykseen. Tavoitteena oli tehdä katsaus nykyiseen akkujen tilanteeseen. Sähköautot yleistyvät jatkuvasti ja akkujen kierrätys tulee olemaan tulevaisuudessa ajankohtaisempi. Aiheesta tehdään jatkuvasti tutkimusta. Uusia akkuja on tulossa ja näille ei välttämättä päde nykyiset kierrätystavat. Aiheesta on paljon tutkimustietoa. Akkutekniikka kehittyy jatkuvasti ja siten täytyy myös kierrätyksen. Aiheesta on olennaista tehdä jatkotutkimuksia.

Lähteet

Argue, C. 2020. What 6,000 EV batteries tell us about EV battery health. Saatavissa <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/>

Autio, M. (2020). Näin sähköautojen akkuja kierrätetään – hyötykäyttöön saadaan jo 80 prosenttia. Saatavissa <https://teknavi.fi/autot/uutinen-autot/nain-sahkoautojen-akkuja-kierratetaan-hyotykayttoon-saadaan-jo-80-prosenttia/>

Azhari L., Bong S., Ma X. ja Wang Y. (2020) Recycling for All Solid-State Lithium-Ion Batteries. Matter 3(6): 1845-1861. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.10.027>

Bernard, P. (2017) *Three Battery Technologies that could Power the Future*. Viitattu [Mar 25,] Available at: <https://www.saft.com/media-resources/our-stories/three-battery-technologies-could-power-future>.

Cavallo, C. How Are EV Batteries Made? Thomasnet.com. Luettu 27.3.2023. Saatavissa <https://www.thomasnet.com/articles/electrical-power-generation/how-are-ev-batteries-made/>

Chen Q. ja Folly KA. (2023) Application of Artificial Intelligence for EV Charging and Discharging Scheduling and Dynamic Pricing: A Review. Energies 16(1). Saatavilla: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/1/146>

Diekmann, J., Hanisch, C., Froböse, L., Schällicke, G., Loellhoeffel, T., Fölster, A. & Kwade1, A. 2017. Ecological Recycling of Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles

with Focus on Mechanical Processes. Journal of The Electrochemical Society. Soc. 164 A6184. Saatavissa <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/2.0271701jes>

EU. 2021. Kriittiset raaka-aineet ja niiden merkitys Euroopan tulevaisuuden kannalta. Luettu 27.3.2023. Saatavissa <https://cor.europa.eu/fi/news/Pages/critical-raw-materials-role-future-of-europe.aspx>

Euroopan ympäristökeskus. (2019). Autojen hiilidioksidipäästöt: tietoa ja tilastoja. Saatavissa https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190313STO31218/autojen-hiilidioksidipaastot-tietoa-ja-tilastoja?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TR_G&at_audience=&at_topic=Emissions&gclid=Cj0KCQjw0tKiBhC6ARIsAAOXutkLrwZw3eE-vaR3uGPodF_M3oNHTHwAu7WZU8JapFsyfwLvBxygN7s0aAhAhEALw_wcB

Euroopan parlamentti. (2018). Uudet päästötavoitteet henkilö- ja pakettiautoille. Saatavissa <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/priorities/ilmastonmuutos/20180920STO14027/uudet-paastotavoitteet-henkilo-ja-pakettiautoille>

Euroopan parlamentti. (2018). Hiilidioksidipäästöjä vähentämässä: EU:n tavoitteet ja toimet. Saatavissa <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180305STO99003/hiilidioksidipaastoja-vahentamassa-eu-n-tavoitteet-ja-toimet>

European Commission. 2023. Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. Saatavissa https://single-market-economy.ec.europa.eu/document/download/04f72016-032f-4dc1-92cd-1ada791b5540_en?filename=Study%202023%20CRM%20Assessment.pdf

HILL N., CLARKE D., BLAIR L., MENADUE H., Circular Economy Perspectives for the Management of Batteries used in Electric Vehicles, Final Project Report by Ricardo Energy & Environment for the JRC. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-10937-2, doi:10.2760/537140. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/537140>

IEA, Share of top producing countries in extraction of selected minerals and fossil fuels, 2019, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-top-producing-countries-in-extraction-of-selected-minerals-and-fossil-fuels-2019>, Licence: CC BY 4.0

IEA (2022), Global Supply Chains of EV Batteries, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>, License: CC BY 4.0

Infinitev. (2023). Saatavissa <https://infinitev.au/blogs/news/electric-vehicle-battery-life-warranties>

Kim JG., Son B., Mukherjee S., Schuppert N., Bates A., Kwon O., Choi MJ., Chung HY. ja Park S. (2015) A review of lithium and non-lithium based solid state batteries. *Journal of Power Sources* 282: 299-322. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.02.054>

Kostopoulos ED., Spyropoulos GC. ja Kaldellis JK. (2020) Real-world study for the optimal charging of electric vehicles. *Energy Reports* 6: 418-426. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.12.008>

Lesonen, P. 2021. BLOGI: SÄHKÖAUTON AKUN KESTO - TURHA HUOLENAIHE? Saatavissa <https://liikkeessa.autokeskus.fi/s%C3%A4hk%C3%B6auton-akun-kestosta>

Mahmud S., Rahman M., Kamruzzaman M., Ali MO., Emon MSA., Khatun H. ja Ali MR. (2022) Recent advances in lithium-ion battery materials for improved electrochemical performance: A review. *Results in Engineering* 15: 100472.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100472>

Man, H., (2023). What are LFP, NMC, NCA Batteries in Electric Cars? Saatavissa

<https://zecar.com/resources/what-are-lfp-nmc-nca-batteries-in-electric-cars#NMC%20batteries>

Moottori. (2019). Tiedätkö miten sähköauton akut toimivat? Volkswagen kertoo. Saatavissa

<https://moottori.fi/ajoneuvot/jutut/tiedatko-miten-sahkoauton-akut-toimivat-volkswagen-kertoo/>

Mori R. (2023) Cathode materials for lithium-sulfur battery: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry* 27(4): 813-839. <https://doi.org/10.1007/s10008-023-05387-z>

Nature. 596, 336-339. (2021). doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02222-1>

Nordic plug. (2022). SÄHKÖAUTON AKKU JA AKUN KIERRÄTYS. Saatavissa

<https://nordicplug.fi/blogs/sahkoautot-ja-lataaminen-blogi/sahkoauton-akku-ja-akun-kierratys>

Northvolt AB. 2021. Northvolt produces first fully recycled battery cell – looks towards establishing 125,000 ton/year giga recycling plant. Saatavissa <https://northvolt.com/articles/recycled-battery/>

Petranikova, M. Hydrometallurgical processing of Li-ion batteries. Saatavissa <https://www.futurelearn.com/info/courses/ewaste-and-battery-recycling-technology-design-challenges/0/steps/292427>

Peugeot. SÄHKÖAJONEUVOJEN AKKUTAKUU. Saatavissa <https://www.peugeot.fi/omistajan-palvelut/tiepalvelu/akuston-takuu.html>

Plugit. Sähköauton lataustavat. Saatavissa <https://plugit.fi/artikkelit/sahkoauton-lataustavat/>

Randall, C., (2022). Battery prices rise for the first time since 2010. Saatavissa <https://www.electrive.com/2022/12/08/battery-prices-rise-for-the-first-time-since-2010/>

Samsung SDI. What is a Solid-state Battery? Saatavissa <https://www.samsungsdi.com/column/technology/detail/56462.html?listType=gallery>

Smishad, T., (2020). Automotive ECU: An Inevitable Part of the Automobiles. Saatavissa <https://www.einfochips.com/blog/automotive-ecu-an-inevitable-part-of-the-automobiles/>

Tesla. Tesla Motors Begins Regular Production of 2008 Tesla Roadster. Saatavissa https://www.tesla.com/fi_fi/blog/tesla-motors-begins-regular-production-2008-tesla-roadster

Toyota. Toyota has Lots of New Innovations Coming Down the Line. Viitattu [Mar 26,] Available at: <https://www.toyota.ie/company/news/2021/solid-state-batteries>.

Transport & Environment, (T&E). 2022. Lithium recycling in the Battery

Regulation. Saatavissa https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/10/2022_10_Lithium_recycling_factsheet.pdf

Volkswagen. S is for Solid-State Battery. Viitattu [Mar 26,] Available at: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/s-is-for-solid-state-battery-4954>.

Zhou L-F., Yang D., Du T., Gong H. ja Luo W-B. (2020) The Current Process for the Recycling of Spent Lithium Ion Batteries. Front. Chem. 8:578044.
<https://doi.org/10.3389/fchem.2020.578044>