

STN - konsortiohankkeen yhteiskunnallinen ja taloudellinen vaikuttavuus

## Litium-akut arvometallien kiertotalouden esimerkkikohteena

<p><b>Hankkeen nimi ja lyhenne:</b> Korkean jalostusarvon materiaalit suljetussa raaka-ainekierrossa (CloseLoop)</p>
<p><b>Konsortiojohtaja:</b> Prof. Maarit Karppinen</p>
<p><b>Mihin ohjelmakysymyksiin (A, B, C, D) vastataan?</b></p> <p><i>A) Miten voidaan tehostaa resurssien käyttöä ja tukea siirtymistä kiertotalouteen, joka tuo osaamisperustaista kasvua Suomeen ja vientiä?</i></p> <p>Hankkeessa tarkastellaan kokonaisvaltaisesti akkujen suunnittelua, käytettävyyttä, uusiokäyttöä sekä komponenttien ja materiaalien kierrätystä. Lisäksi pyritään korvaamaan kriittiset materiaalit edullisemmilla ja yleisemmillä materiaaleilla. Hankkeessa luodaan työkaluja elektroniikkatuotteiden elinkaari vaikutusten arvioimiseen sekä arvometallien talteen ottamiseksi alhaisen pitoisuuden jätevirroista. Nämä työkalut parantavat kotimaisten metallinjalostajien kilpailukykyä ja voivat tuoda alalle aivan uusia toimijoita.</p> <p><i>B) Mitkä ovat ilmastoneutraalin ja resurssiniukan yhteiskunnan edellytykset?</i></p> <p>Uusiutuvalla energialla ja sähköisellä liikenteellä katsotaan olevan keskeinen sija ilmastoneutraalissa yhteiskunnassa. Akkuteknologiaa tarvitaan molempien tavoitteiden saavuttamiseksi. Nykyisessä litium-akkuteknologiassa käytetään kuitenkin runsaasti arvometalleja, esim. Li ja Co, joita ei vielä kierrätetä tehokkaasti. Resurssiniukka yhteiskunta vaatii näiden metallien tehokasta kierrätystä tai korvaamista yleisemmillä raaka-aineilla, jotka nekin tulee kierrättää.</p> <p><i>C) Millä tavalla julkiset toimenpiteet parhaiten tukevat kokonaisvaltaista muutosprosessia siten, että muutos etenee hallitusti kohti ilmastoneutraalia ja resurssiniukkaa yhteiskuntaa?</i></p> <p>Uusiutuvaa energiaa ja sähköistä liikennettä voidaan edistää taloudellisin ohjauskeinoin. Päättäjille tulee kuitenkin olla ajankohtaista tietoa eri teknologiavaihtoehtojen raaka-ainetarpeista ja elinkaari vaikutuksista, jotta politiikkatoimet voidaan kohdistaa resurssitehokkaasti.</p> <p><i>D) Millä keinoilla huolehditaan siitä, että yrityksillä, työntekijöillä, julkisella sektorilla ja kuluttajilla on käytössään ne inhimilliset voimavarat ja osaaminen, jotka parhaiten edistävät ilmastomuutokseen sopeutumista ja siirtymistä kohti ilmastoneutraalia ja resurssiniukkaa yhteiskuntaa?</i></p> <p>Korkeatasoista tutkimusta, koulutusta ja kansainvälistä yhteistyötä tarvitaan viimeisimmän tietotaidon saamiseksi eri osapuolten käyttöön. Tutkimusyhteisön pitää olla aktiivisessa vuorovaikutuksessa ympäröivän yhteiskunnan kanssa. Tutkimustiedon viemiseksi käytäntöön tarvitaan yhteistyötä teollisuuden kanssa ja kotimaisia referenssikohteita uusille tuote- ja palvelukonsepteille.</p>
<p><b>1. Vaikuttavuustavoite</b></p> <p>Litium-akkuja tarvitaan kuluttajaelektronikassa, sähköisessä liikenteessä, tasaamaan tuuli- ja aurinkoenergian tuotantoa sekä sähköverkkojen stabilointiin. Akkujen tarpeen arvioidaan 10-kertaistuvan vuoteen 2025 mennessä, kun sähköautot ja sähköverkkoon kytketyt energiavarastot yleistyvät. Litium-akkujen valmistukseen tarvitaan kuitenkin metalleja kuten kuparia, alumiinia, rautaa, nikkeliä, mangaania, kobolttia, titaania ja litiumia. Näistä etenkin litiumin ja kobolttin resurssit ovat rajalliset, ja niiden tuotannosta menee jo 35-45 % akkuteollisuuden tarpeisiin<sup>12</sup>. Tästä huolimatta litiumin talteenotto käytetyistä akuista ei ole ollut taloudellisesti kannattavaa, ja sen kierrätysaste on alle prosentin. Kobolttin tuotanto on keskittynyt Kongoon ja sitä syntyy lähinnä nikkelin ja kuparin sivutuotteena.</p>

Litium-akuissa metalleja käytetään positiivisen elektrodin (katodi) aktiivimateriaalina, virrankerääjinä ja elektrolyytin suolana. Katodimateriaali on yleensä oksidiseos (litium-kobolttioksidi, litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi jne.). Virrankerääjinä käytetään alumiini- ja kuparifolioita. Akut pakataan alumiini, teräs tai muovikuoriin<sup>1</sup>. Koska akun metallit esiintyvät alhaisina pitoisuuksina ja seoksina, on niiden kierrätys haastavaa. Kierrätysprosessien kehitystä vaikeuttaa lisäksi se, että eri akkuvalmistajat käyttävät eri yhdisteitä akuissaan. Nykyisin litium-akkuja kierrätetään joko akkujen kierrätykseen erikoistuneissa laitoksissa tai osana perusmetallien tuotantoa. Euroopan johtava kierrättäjä Umicore kierrättää vuosittain 7000 tonnia litium- ja metallihydridiakkujen sekajätettä. Nykyisessä pyrometallurgisessa prosessissa saadaan talteen kupari, koboltti ja nikkeli. Litium ja alumiini menetetään kuonaan.

Akkujen resurssitehokkaan käytön kannalta tulisi pyrkiä maksimoimaan akun käyttöikä. Sähköautokäytöstä poistettavia akkuja voidaan vielä uusiokäyttää kiinteissä käyttökohteissa, joissa ei vaadita yhtä suurta tehoa tai kapasiteettia. Uusiokäyttökohteena voi olla esim. sähköverkon stabilointi<sup>1</sup>. Akkujen turvallinen käyttö ja riittävä suorituskyky on kuitenkin kyettävä takaamaan myös näissä uusiokäyttökohteissa, joten akkujen kunto (SoH: state-of-health) olisi kyettävä arvioimaan ja mahdollisesti vioittuneet komponentit korvaamaan käyttökohteiden välillä.

Hankkeen tavoitteena on kehittää litium-akkujen kiertotalouteen kokonaisvaltainen lähestymistapa, joka yhdistää kiertotalouden mallit (kiertotaloussuunnittelu, liiketoimintamallit) teknisiin ratkaisuihin (uudet kierrätysprosessit, kriittisten raaka-aineiden korvaaminen). Kiertotalouden malleissa on tavoitteena kehittää uusia tuotekonsepteja, liiketalousmalleja ja ekosysteemejä litium-akkuja ja niissä tarvittavia raaka-aineita varten. Materiaalikiertojen tarkastelu vaatii entistä laaja-alaisempaa lähestymistapaa, jossa otetaan huomioon akkujen ja raaka-aineiden valmistus, uusiokäyttö ja kierrätys.

Teknisissä tarkasteluissa perehdytään litium-akkujen rakenteisiin, suorituskykyyn ja vanhenemiseen sekä akkujen ja komponenttien uusiokäyttöön ja kierrätykseen<sup>1,2,8-11</sup>. Tavoitteena on kehittää entistä kestävämpiä ja tehokkaampia ratkaisuja. Erityisesti pyritään mahdollistamaan sähköautojen akustojen turvallinen uusiokäyttö ja akkukomponenttien ja –materiaalien tehokas kierrätys uusiokäytön jälkeen. Akkumetallien kierrätystutkimuksessa keskitytään parantamaan mekaanisia sekä pyro- ja hydrometallurgisia prosesseja siten, että akuista saadaan taloudellisesti talteen kaikki metallit. Pitemmän aikavälin tavoitteena on korvata akuissa käytettävät arvometallit yleisemmillä raaka-aineilla, esimerkiksi orgaanisilla yhdisteillä<sup>3-7</sup>, jotka nekin kierrätettäisiin. Tällöin akkuteknologia ei olisi enää riippuvainen rajallisista luonnonvaroista, jos litium kyetään kierrättämään tehokkaasti.

Kehitetyt ratkaisut parantavat kotimaisten metallinjalostajien kilpailukykyä ja mahdollistavat uusien kiertotaloustoimijoiden syntymisen alalle.

## 2. Keinot

Kiertotalouden mallien tarkastelut on käynnistetty VTT:n poikkitieteellisessä "Modelling factory" mallinnusympäristössä, joka yhdistää ekodesignin, materiaalitietokannat, elinkaarianalyysit ja liiketoimintamallit sosiaalisten ja poliittisten vaikutusten kanssa. Energia-analyysihin perustuvia elinkaarianalyyskejä on lähdetty tarkentamaan kansainvälisenä yhteistyönä TU Bergakademie Freibergin kehittämällä eksergia-analyysillä, jotka ottavat huomioon materiaalien yhdistämisestä ja uudelleen erottamisesta aiheutuvat entropiamuutokset<sup>13,14</sup>.

Matemaattisten mallien avulla pyritään optimoimaan litium-akkujen purkamista sekä raaka-aineiden talteenottoa metallurgisin menetelmin siten, että niitä voidaan käyttää uusien akkujen valmistuksessa. Mallien tulokset varmennetaan kokeellisesti käyttäen kuluttajaelektronikkakäytössä syntynyttä akkujätettä. Koesarjoissa tutkitaan mekaanisia erotusprosesseja, hydrometallurgista liuotusta, uuttoa eri liuottimilla ja metallien talteenottoa. Kehitettyjen mallien avulla voidaan arvioida eri akkukomponenttien kierrätettävyyttä ja kierrätyksen taloudellisuutta. Talteenotetuista metalleista tullaan valmistamaan uusia

akkuja, ja niiden suorituskykyä verrataan neutraaleista raaka-aineista tehtyihin verrokkikomponentteihin.

Hankkeessa kehitetään kunnon arviointimenetelmiä tavoitteena turvallinen uusiokäyttö. Akkujen vanhenemisilmiöitä on tutkittu eri käyttökohteille ominaisilla kuormaprofiileilla<sup>2</sup>, ja tulosten pohjalta pyritään löytämään sähköautokäytöstä poistuville akuille kunnon arviointiin menetelmä, joka ei vaurioita itse akkua. Orgaanisiin raaka-aineisiin perustuvia akkuja on valmistettu atomi- ja molekyylikerroskasvatus-menetelmillä<sup>3-7</sup>. Tutkimuksen keskeiset tulokset pyritään suojaamaan patentein<sup>6,7</sup>.

Tutkimuksen edistymisestä on raportoitu säännöllisesti CloseLoop-projektin vuorovaikutusryhmälle, jossa ovat edustettuina alan teollisuus, kuntatason päättäjät sekä ministeriöiden ja kansalaisjärjestöjen edustajia. Ensimmäisessä sidosryhmätapaamisessa 28.09.2016 pidettiin työpaja, jossa kartoitettiin eri osapuolten odotukset akkututkimuksen suhteen. Toisessa sidosryhmätapaamisessa 27.3.2017 hankkeen kansainväliset yhteistyökumppanit kertoivat kiertotalousmalleista sekä älypuhelimien<sup>14</sup> ja nikkeli-metallihydridiakkujen<sup>15</sup> kierrätysratkaisuista.

Akkuteollisuuden kannalta keskeisessä Kokkolassa pidettiin työpaja 28.3.2017, missä tarkasteltiin kiertotalouden mahdollisuuksia alueellisessa arvonluonnissa käyttäen Cambridgen yliopistossa kehitettyjä työkaluja. Työpajayhteistyö jatkuu sekä Kokkolassa että muiden hankkeessa mukana olevien alueiden kanssa. Alueellinen yhteistyö tulee hyödyttämään myös kansallisen tason poliittista suunnittelua hankkeen edetessä.

Tutkimustulokset julkaistaan tieteellisissä<sup>3-5,8-11</sup>, ammatillisissa ja yleistajuisissa aikakauslehdissä, konferensseissa ja työpajoissa sekä projektin nettisivuilla ([www.closeloop.fi](http://www.closeloop.fi)) ja sosiaalisessa mediassa (Facebook: @CloseLoopTeam, Twitter: #CloseLoopTeam). Kiertotalouden edistämisestä lainsäädännön keinoin on keskusteltu työ- ja elinkeinoministeriön virkamiesten sekä pääministerin avustajien kanssa. Tutkimustuloksia hyödynnetään sekä Aalto-yliopiston että Helsingin yliopiston opetus-ohjelmissa<sup>1,2</sup>. Projektissa työskentelee 6 jatko-opiskelijaa ja 2 väitellyttä (PostDoc) tutkijaa. Tutkimusryhmän kahdella professorilla (Karppinen, Kallio) on kansainvälinen vierailuprofessuuri ja Helsingin yliopiston alaprojektin johtaja työskentelee Cambridgen yliopistossa, mikä takaa tiiviin kansainvälisen yhteistyön.

### 3. Vaikutukset

Litium-akkujen kriittisten raaka-aineiden tarpeelle on laadittu projektin sisäinen arvio<sup>13</sup>, jonka mukaan akkujen tuotanto 9-kertaistuisi, litiumin kulutus 3-kertaistuisi ja koboltin tarve kasvaisi 50 % vuoteen 2025 mennessä. Näistä arviosta on keskusteltu teollisuuden (Valmet Automotive, Freeport Cobalt) edustajien kanssa, ja ne vastaavat teollisuuden omia markkinaennusteita ja tukevat niitä.

Akkujen vanhenemis- ja käytettävyytutkimusta on tehty tiiviissä yhteistyössä teollisuuden kanssa ja metallien talteenottoa on tutkittu käyttäen teolliselta kierrätystoimijalta saatavaa jäteraaka-ainetta. Projektin osaamista on tarjottu Vaasan Gigafactory-hankkeen käyttöön Teslan akkutehtaan saamiseksi Pohjanmaalle. Orgaanisessa litium-akussa käytettävälle elektrolyytille on myönnetty taustatutkimukseen perustuva patentti<sup>6</sup>, ja sen rakenteesta on jätetty uusi patenttihakemus<sup>7</sup>.

Projektiryhmän jäsenet ovat toimineet työ- ja elinkeinoministeriön sekä pääministerin kabinetin asiantuntijoina metallien kiertotaloutta koskevissa kysymyksissä.

Tutkimuksesta on valmistunut kaksi<sup>1,2</sup> sekä valmistumassa kaksi diplomityötä ja kaksi väitöskirjaa. Projektiryhmän jäsenet ovat olleet kutsuttuina luennoitsijoina kansainvälisissä tieteellisissä tapaamisissa ja kotimaisissa suurelle yleisölle suunnatuissa tilaisuuksissa. Suomen tiedeseura on myöntänyt hankkeen johtaja Maarit Karppiselle ansioituneelle kemistille jaettavan Magnus Ehrnrothin säätiön palkinnon 2017.

#### 4. Tavoiteltu vaikuttavuus

Litium-akut valittiin arvometallien kiertotalouden esimerkkikohteeksi, koska nähtiin niiden merkityksen kasvavan, kun käyttö laajenee kulutuselektroniikasta sähköautoihin ja sähköverkkoon kytkettyihin energiavarastoihin, ja koska niissä olevia arvometalleja ei kierrätetä vielä tehokkaasti.

Ymmärrys akkuteollisuuden materiaalivirroista, kiertotalouteen tarvittavista teollisuusprosesseista sekä akkujen keräilyyn liittyvistä pullonkaloista on lisääntynyt merkittävästi. Kiertotalouteen liittyvät liiketoimintamallit vaihtelevat akkujen sovelluskohteiden mukaan ja vaativat jatkokehitystä.

Akkujen purkamisen sekä akkumateriaalien talteenotto-prosessien tekninen mallinnus sekä malleja tukevat laboratoriokokeet ovat edistyneet suunnitellusti, mutta vaativat vielä lisätyötä ennen kuin löydetään riittävän energiatehokkaita ja taloudellisesti kannattavia ratkaisuja ja päästään valmistamaan uusia akkuja kierrätysmateriaaleista. Akkujen vanhenemisilmiöiden ymmärrys on lisääntynyt ja yhteistyö teollisuuden kanssa on ollut tiivistä. Kriittisten materiaalien korvaamisessa orgaanisilla yhdisteillä on saavutettu merkittäviä tieteellisiä tuloksia<sup>5</sup>, joiden suojaamiseksi on myös jätetty patenttihakemus<sup>6</sup>.

Yhteistyö vuoro-vaikutusyhteisön kanssa on ollut hedelmällistä, mutta hankkeen nettisivujen ja sosiaalisen median käyttö on aktivoitunut hitaasti. Tähän on laadittu suunnitelma korjaaviksi toimenpiteiksi.

Virkamiestapaamisia on ollut säännöllisesti, mutta politiikkatoimenpidesuosituksia ei ole vielä tehty.

#### 5. Tahattomat vaikutukset

Hankkeen vuorovaikutusryhmä on laajentunut kahdella yrityksellä (Crisolteq Oy ja Clic Innovation Oy) sekä yhdellä kaupunkiseudulla (Lappeenranta) ja teollisuusjärjestöllä (Kemianteollisuus ry).

Hankkeen edustajia (Kallio, Kauranen) on kutsuttu Kokkolassa marraskuussa pidettävän Nordbatt2017-akkukonferenssin tieteellisiksi neuvonantajiksi.

#### 6. Taustalla oleva tutkimus

1. Markus Markkanen, *Sähköautojen akkujen kiertotalous*, Diplomityö, Aalto yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, 2016.
2. Katja Lahtinen, *Lithium cobalt oxide particles as positive electrode materials in Li ion batteries*, Diplomityö, Aalto yliopisto, Kemian tekniikan korkeakoulu, 2017.
3. M. Nisula, Y. Shindo, H. Koga & M. Karppinen, *Atomic layer deposition of lithium phosphorous oxynitride*, Chem. Mater. 27, 6987 (2015).
4. M. Nisula & M. Karppinen, *Atomic/molecular layer deposition of lithium terephthalate thin films as high rate capability Li-ion battery anodes*, Nano Lett. 16, 1276 (2016).
5. M. Nisula, J. Linnera, A.J. Karttunen, M. Karppinen, *Lithium aryloxide thin films with guest-induced structural transformation by ALD/MLD*, Chem. Eur. J. 23, 2988 (2017).
6. Y. Shindo, T. Shiotsuki, H. Koga, M. Karppinen & M. Nisula; *Method for producing lithium phosphorus oxynitride layer*, US Patent 2017067161 (A1).
7. M. Nisula, M. Karppinen; *Transparent and Flexible Li-Organic 3D Thin-Film Microbattery*; Patent application FI 20175365.
8. Elina Pohjalainen, Taina Rauhala, Markus Valkeapää, Jani Kallioinen, Tanja Kallio, *Effect of Li4Ti5O12 particle size on the performance of lithium ion battery electrodes at high C-rates and low temperatures*, The Journal of Physical Chemistry C, 119 (2015) 2277-2283.
9. Elina Pohjalainen, Jani Kallioinen, Tanja Kallio, *Comparative study of carbon free and carbon containing Li4Ti5O12 electrodes*, Journal of Power Sources, 279 (2015) 481-486.

10. Elina Pohjalainen, Olli Sorsa, Jouni Juurikivi, Tanja Kallio, *Water-soluble acrylate binder for graphite electrodes in lithium-ion batteries*, Energy Technology 4 (2016) 470-472.
11. Elina Pohjalainen, Samuli Räsänen, Miikka Jokinen, Kirsi Yliniemi, David A. Worsley, Juha Kuusivaara, Jouni Juurikivi, Risto Ekqvist, Tanja Kallio, Maarit Karppinen, *Water soluble binder for fabrication of Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> electrodes*, Journal of Power Sources 226 (2013) 134-139.
12. Kauranen, Pertti. *Raw material needs by the Li-ion battery industry*. CloseLoop project report, Aalto University 2017.
13. Reuter, Markus A. *Digitalizing the circular economy: circular economy defined by the metallurgical internet of things*. Metallurgical and Material Transactions B 2016.
14. Reuter, Markus A. *Digitalizing the Circular Economy, Opportunities and Limits*. 2nd CloseLoop Stakeholders Meeting 27 March 2017. Espoo.
15. Ekberg, C. (2017). *Hydrochemical Routes to Recycle NiMH Batteries and Fluorescent Lamps*. 2nd CloseLoop Stakeholders Meeting 27 March 2017. Espoo.