

Opinnäytetyö (AMK)

Kemiantekniikka

2025

Ola-Betul Hassan

Nikkelipitoisuuden nostaminen litiumioniakkujen kierrätyksessä



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Kemiantekniikka

2025 | 29 sivua

Ola-Betul Hassan

Nikkelipitoisuuden nostaminen litiumioniakkujen kierrätyksessä

Tässä opinnäytetyössä tavoitteena on nostaa nikkelpitoisuutta vähintään kaksinkertaiseksi mustan massan liuotuksessa sekä poistaa siitä epäpuhtauksia määritetyn rajan alapuolelle. Viime vuosina sähköautojen valmistus ja käyttö ovat lisääntyneet, siksi niiden litiumioniakkujen kierrätys tulee olemaan kriittistä.

Työssä tutkittiin litiumioniakkujen mekaanisen käsittelyn ja murskauksen jälkeen syntynyttä mustaa massaa ja sen käsittelyä hydrometallurgisesti. Musta massa sisältää arvometalleja kuten nikkeli, koboltti, litium ja mangaani sekä epäpuhtauksia.

Ensimmäisenä tehtävänä oli löytää toimiva mustan massan liuotussuhde. Tämän jälkeen liuotuksen suodoksesta erotettiin epäpuhtaudet säästäten mahdollisimman paljon arvometalleja jatkokäsittelyä varten.

Tuloksena saatiin neljä eri vertailuliuosta, joissa nikkelpitoisuus oli jopa kaksinkertainen. Epäpuhtauksia ei saatu täydellisesti poistettua, mutta osassa liuotuksissa päästiin tavoitemäärään.

Asiasanat:

litiumioniakut, kierrätys, hydrometallurgia, liuotus, arvometallit, epäpuhtaudet

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Chemical Engineering

2025 | 29 pages

Ola-Betul Hassan

Increasing nickel content in lithium-ion battery recycling

The aim of this thesis was to at least double the nickel concentration in black mass leaching solution and to remove impurities to contents under the desired limits. Electric vehicle manufacturing and use have been on the increase in recent years and therefore, recycling their lithium-ion batteries is becoming more critical.

The black mass generated after the mechanical treatment and crushing of lithium-ion batteries and treatment using hydrometallurgical methods were studied. The black mass contains impurities such as aluminium and copper and valuable metals such as nickel, cobalt, lithium, and manganese.

The first task was to find a working black mass dissolution ratio. After that, the impurities were separated from the dissolution filtrate saving valuable metals as much as possible for further processing.

As a result, four different comparison solutions were obtained with a double nickel content. The impurities were not completely removed but in some dissolutions the target amounts were reached.

Keywords:

lithium-ion batteries, recycling, hydrometallurgy, dissolution, valuable metals, impurities

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	6
1 Johdanto	7
2 Yleisesti akusta	8
3 Kierrätys	10
3.1 Pyrometallurgia	10
3.2 Hydrometallurgia	12
4 Turvallisuus	14
4.1 Akunhallintajärjestelmä	15
4.2 Riskien välttäminen	16
5 Toteutus	17
6 Tulokset	19
7 Loppupohdinta	25
Lähteet	26

Kuvat

Kuva 1. Kennossa litiumionit ja elektronit liikkuvat anodin ja katodin välillä. Kennon latauksessa litiumionit siirtyvät katodista anodiin ja purkautumisessa anodista katodiin. (Oy Esco Ab n.d.)	9
Kuva 2. Pyrometallurgian prosessi (Toro ym. 2023)	11
Kuva 3. Hydrometallurgian prosessi. (Toro ym. 2023)	13
Kuva 4. Lämpöryntäyksen aiheuttajat sekä niiden seuraukset. (Firechief 2023)	14

Kuva 5. Työvaiheet.	17
Kuva 6. Pylväskuvaaja, jossa on yrityksen oman mustan massan liuotuksen saannot massaprosentteina.	20
Kuva 7. Pylväskuvaaja, jossa on ulkopuolisen yrityksen käytetyn mustan massan liuotuksen saannot massaprosentteina.	21
Kuva 8. Epäpuhtauden A saostuksen jälkeen saatiin tuote, jossa epäpuhtauden A tavoitemäärä on 20 mg/l.	22
Kuva 9. Epäpuhtauden B saostuksen jälkeen saatiin tuote, jossa epäpuhtauden B tavoitemäärä on 10 mg/l.	23
Kuva 10. Epäpuhtauden C saostuksen jälkeen saatiin tuote, jossa epäpuhtauden C tavoitemäärä on 50 mg/l.	23
Kuva 11. Epäpuhtauden D saostuksen jälkeen saatiin tuote, jossa epäpuhtauden D tavoitemäärä on 50 mg/l.	24

Taulukot

Taulukko 1. Vertailutaulukko nikkelpitoisuudesta (mg/l) eri liuotusten jälkeen. 21

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Ar	Argon
BMS	Battery Management System eli suomeksi akunhallintajärjestelmä (Liu 2023)
CO ₂	Hiilidioksidi
CO	Hiilimonoksidi
Co	Koboltti
Epäp.	Epäpuhtaudet/epäpuhtauksien
H ₂ SO ₄	Rikkihappo
Kts.	Katso
Li	Litium
Li ₂ CO ₃	Litiumkarbonaatti Dräger n.d. a)
LiCl	Litiumkloridi (Dräger n.d. b)
LiCoO ₂	Litiumkobolttioksidi (Ufine 2024)
m-%	Massaprosenttisuus
Mn	Mangaani
Ni	Nikkeli
Redox	Oxidation-reduction: suomeksi hapetus-pelkistys (Juraj 2023)
S:L	Lyhenne on tullut englannin kielisistä sanoista. S tarkoittaa "solid" eli suomeksi "kiinteä" ja L tarkoittaa "liquid" eli suomeksi "neste".
SO ₂	Rikkidioksidi
LiAlSi ₂ O ₆	Spodumeeni (Kashuba n.d.)
Vrt.	Vertaa (Kielikello 2009)

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä käsitellään tarkemmin mitä litiumioniakut ovat ja mihin niitä käytetään sekä litiumioniakkujen kierrätystä ja kierrätysmekanismeja. Litiumioniakut ovat hyvä valinta ilmastonmuutoksen kannalta, sillä niiden käyttö sähköautoissa on vähentänyt autoilun hiilijalanjälkeä. Litiumioniakkujen kierrätys takaa puhtaamman ja turvallisemman ympäristön sekä raaka-aineiden saatavuuden.

Työn toimeksiantaja on Fortum Battery Recycling Oy. Yrityksessä kierrätetään akkujätteitä hydrometallurgisella kierrätysmenetelmällä. Toimeksiantajan päätoimipaikka sijaitsee Harjavallassa. Espoossa sijaitsee yrityksen toimistoja ja Ikaalisen laitoksessa tehdään mekaanista käsittelyä. Lisäksi mekaanista käsittelyä tehdään Kirchartin laitoksessa, Sakassa. Harjavallan laitoksessa tehdään hydrokäsittelyä. Työ suoritettiin tutkimus- ja kehityslaboratoriossa Raisiossa. (Fortum 2023)

Työn tavoitteena on valmistaa resepti, millä saadaan nostettua arvometallien kuten nikkelin, koboltin, litiumin ja mangaanin pitoisuuksia. Lisäksi käsitellään epäpuhtauksia, joiden pitoisuus kasvaa arvometallien pitoisuuksien nostamisen myötä. Kierrätysmenetelmänä käytetään hydrometallurgiaa eli vesikemiaan perustuva kierrätysmenetelmä. Lopputulos perustuu kahteen mustan massan tyyppiin, joiden tuloksia vertailtiin.

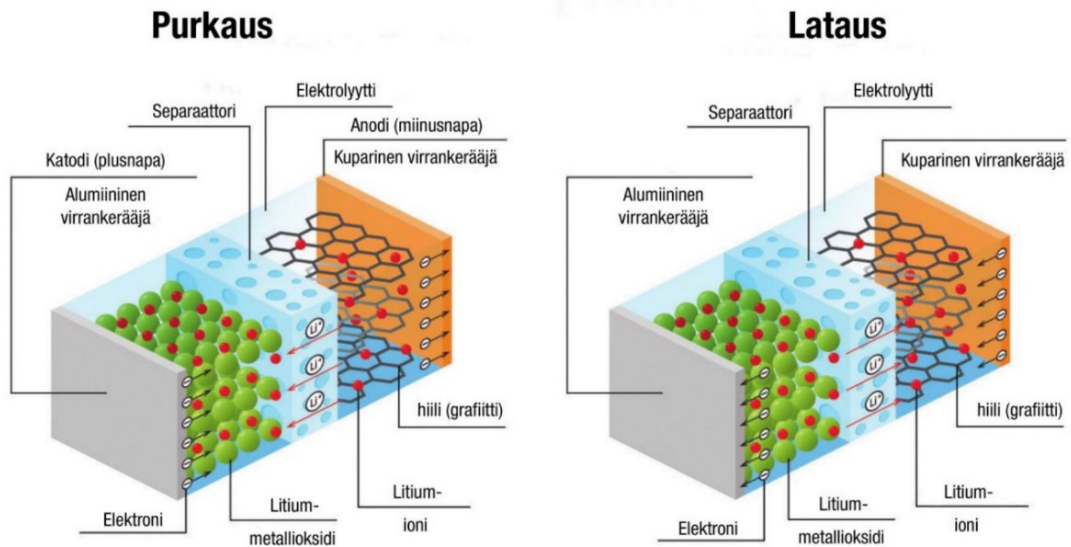
2 Yleisesti akusta

Akku on sähkökemiallinen kenno, jonka toiminta perustuu sähköpiiriin. Se voi koostua yhdestä tai useasta kennosta. Tarkemmin, akkuihin varastoituu kemiallista energiaa, joka muuttuu käytössä sähköenergiaksi. Sähköenergian aiheuttaa hapetus-pelkistysreaktio, jota kutsutaan myös nimellä redox. Redox sana tulee englanninkielisestä nimityksestä oxidation-reduction. (Linja-Aho 2022, 8 & 10; Juraj 2023)

Kennossa on kaksi elektrodia, anodi ja katodi. Anodin pinnalla tapahtuu hapettuminen ja katodin pinnalla tapahtuu pelkistyminen. Anodin tai katodin varaus riippuu siitä, että tapahtuuko akussa latautuminen vai purkautuminen. Akun purkautumisessa virta kulkee anodista katodiin, jolloin ionit ja elektronit siirtyvät mukana. Akun latauksessa ionit siirtyvät katodista takaisin anodiin. Anodin ja katodin välillä on separaattori, joka estää oikosulun tapahtumisen. Näitä ympäröi kotelo, joka sisältää myös elektrolyytin. Akku on kestävämpi ja tehokkaampi kuin paristo, koska paristoa ei voida ladata sen energian loputtua. (Linja-Aho 2022, 8; STIHL 2024)

Litiumioniakkujen toiminta perustuu litiumionien siirtymiseen anodin ja katodin välillä. Kennoissa on käytetty esimerkiksi anodina grafiittia ja katodina litiumkobolttioksidia (LiCoO_2). Vaikka litiumioniakut ovat kalliita, niiden tehokkuus, nopea latautuminen ja pitkäikäisyys ovat lisänneet niiden suosiota. Litiumioniakkuja on käytetty muun muassa sähköautoissa, matkapuhelimissa ja kameroissa, sähköisissä työkaluissa sekä teollisuudessa. (STIHL 2024; Ufine 2024; Tukes n.d. a)

Litiumioniakun kennorakenne



Kuva 1. Kennossa litiumionit ja elektronit liikkuvat anodin ja katodin välillä. Kennon latauksessa litiumionit siirtyvät katodista anodiin ja purkautumisessa anodista katodiin. (Oy Esco Ab n.d.)

Litiumin valmistus alkaa esimerkiksi louhimalla sitä maaperästä kuten litiumrikasta spodumeenia ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$). Spodumeeniä löytyy eniten Chilestä, Argentiinasta, Kiinasta, Australiasta ja Kanadasta. Lisäksi litiumia voidaan uuttaa suolavesistä. Suolavesi on vesilähde, jossa on korkea suolapitoisuus. Sitä löytyy maan alta tai sitä voi esiintyä myös maan pinnalla kuten suolatasangoilla. (Gopan 2024; Kashuba n.d.; MIT Climate Portal 2024)

Suolavedestä on aluksi saostettava epäpuhtaudet kuten kalsium ja magnesium. Tämän jälkeen suolavedestä haihdutetaan vesi pois, jolloin haihdutusaltaaseen jää litiumyhdisteitä kuten litiumkarbonaatti (Li_2CO_3) ja litiumkloridi (LiCl). Litiumia on helpompi uuttaa edellä mainituista litiumyhdisteistä. Eniten litiumia sisältävää suolavettä löytyy Kiinasta ja Keski-Andeilta. (Gopan 2024; Tukes n.d. a)

3 Kierrätys

Kierrätys on tärkeä osa akkujen elinkaarta. Sen avulla saadaan uusia akkuja sekä suojataan ympäristöä. Akkujen kierrätys alkaa niiden keräyksellä, jotta ne eivät joudu väärään paikkaan kuten ympäristöön. Tämän jälkeen akut kuljetetaan kierrätyskeskuksiin. Akuista erotetaan ja poistetaan materiaalit kuten muovi, akkuhappo sekä litiumionit. (Akkukierrätys Pb n.d.)

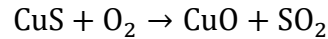
Litiumioniakut on sisältävät monia raskasmetalleja kuten koboltti, nikkeli ja mangaani. Nämä raskasmetallit ovat haitallisia ympäristölle, siksi niiden kierrättäminen on kriittistä. Kierrättämistä vaikeuttaa kuitenkin akkujen erilaiset komponentit. Viime vuosina on kehitetty menetelmiä, joilla on saatu kierrätettyä litiumioniakkuja mahdollisimman tehokkaasti säästäten arvometalleja niiden uudelleen käytettäväksi. Yleisimmät litiumioniakkujen kierrätysmenetelmät ovat hydrometallurgia ja pyrometallurgia. (Large Power 2025)

3.1 Pyrometallurgia

Pyrometallurgia on metallien erotusmenetelmä, joka perustuu metallien sulamislämpötilaeroihin. Siinä käytetty lämpötila on yleensä 200-2000 °C. Pyrometallurgian avulla saadaan puhtaita metalleja kuten rautaa, kuparia ja mangaania. Pyrometallurgian kolme päävaihetta ovat paahtaminen, sulatus ja jalostus. (Sharma 2023b; SK tes 2023)

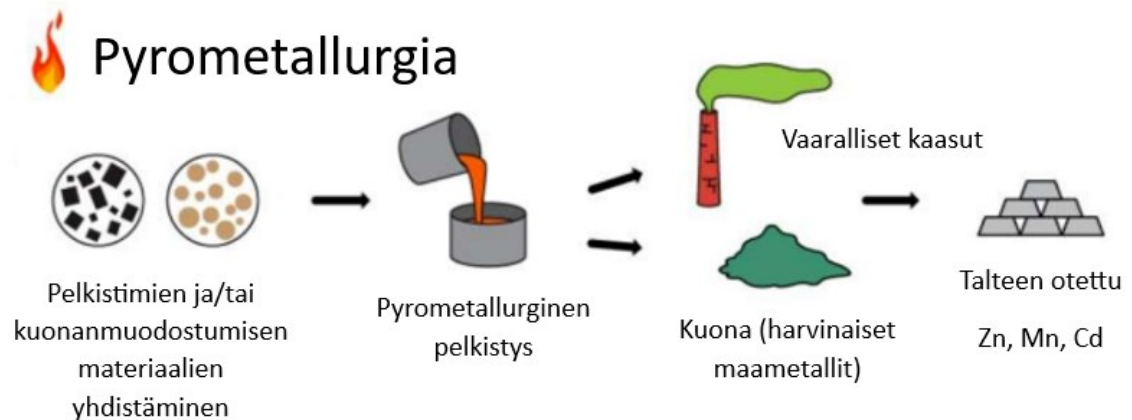
Paahtamisessa kaasu vaikuttaa malmiin ja reaktiossa vapautuu lämpöä. Enemmän sulfidia sisältävät malmit muuttuvat kuumennettaessa oksideiksi, jolloin syntyy rikkidioksidikaasua (SO₂). Kalsinointivaiheessa malmi kuumennetaan, jolloin se hajoaa ja siitä poistuu kaikki haihtuvat tuotteet, kuten hiilidioksidi (CO₂). (Sharma 2023b)

Esimerkiksi, kun kuparisulfaattiin lisätään happea, saadaan tuotteeksi kuparioksidia ja rikkidioksidia:



(Sharma 2023b)

Sulatuksessa metalli erottuu malmista. Prosessissa metalli pelkistyy eli se vastaanottaa elektroneja. Reaktiossa syntyy usein hiilidioksidia (CO_2) ja hiilimonoksidia (CO), koska siinä käytetään hiiltä pelkistimenä. Sulatuksen jälkeen tehdään sintraus. Sintrauksen tavoitteena on muodostaa sulaneesta massasta yhtenäinen kappale lämmön ja paineen avulla. Lopuksi, jalostuksessa puhdistetaan metalli. (Sharma 2023b; SK tes 2023)



Kuva 2. Pyrometallurgian prosessi (Toro ym. 2023)

Pyrometallurgia on korkean lämpötilan ansiosta nopea prosessi ja sen avulla saadaan paljon metalleja talteen. Lisäksi prosessin aikana käytetään vähemmän kemikaaleja. Pyrometallurgian ongelmina ovat kuitenkin suuri energian tarve sekä haitallisten aineiden kuten CO_2 ja CO päästöt. Lisäksi korkeiden lämpötilojen käsittely työssä lisää turvallisuusriskejä. (Sharma 2023b)

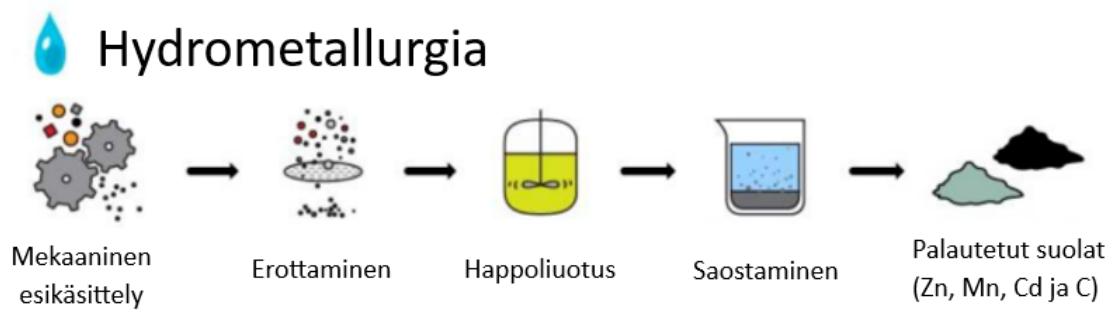
3.2 Hydrometallurgia

Hydrometallurgia on erotusmenetelmä, jossa hyödynnetään vesikemiaa. Ympäristön kannalta se on kannattavampaa kuin pyrometallurgia. Alkujaan hydrometallurgiaa hyödynnettiin kullin louhinnassa. Hydrometallurgia on suositumpi kierrätysmenetelmä kuin pyrometallurgia, sillä se on ympäristöystävällisempi. (SK tes 2023)

Litiumioniakkujen kierrätyksen alkuvaiheessa akut purataan ja niiden osat murskataan. Murskatuista osista saadaan mustaa massaa. Musta massa on tummanvärinen muun muassa grafiitista ja metalleista koostuva seos. Mustan massan liuotuksessa liukenee arvometalleja ja epäpuhtauksia. Litiumioniakuista saatu musta massa sisältää esimerkiksi litiumia, kobolttia, nikkeliä, alumiinia, kuparia ja mangaania. (Sensmet n.d.)

Arvometallien liuotuksessa kemikaalina käytetään usein rikkihappoa (H_2SO_4), joka lisätään liuotusveden sekaan. Musta massa liukenee paremmin, kun se on hienojakoista. Osa arvometalleista tarvitsee myös hapettavan reagenssin liuotukseen. Metallien liuotukseen vaikuttaa moni parametri kuten pH, lämpötila, sekoitusnopeus, reaktion nopeus ja käytettyjen liuotusreagenssien tehokkuus. (Britannica n.d.; Sharma 2023a)

Saostusvaiheessa liuotuksen suodoksesta erotettiin mangaani sekä epäpuhtaudet. Saostuksessa erotetaan haluttu komponentti pH:ta ja lämpötilaa säätämällä. Liuotuksen lopuksi liuotetut metallit ja epäpuhtaudet erotetaan liukenemattomista komponenteista suodattamalla. (Sharma 2023a)



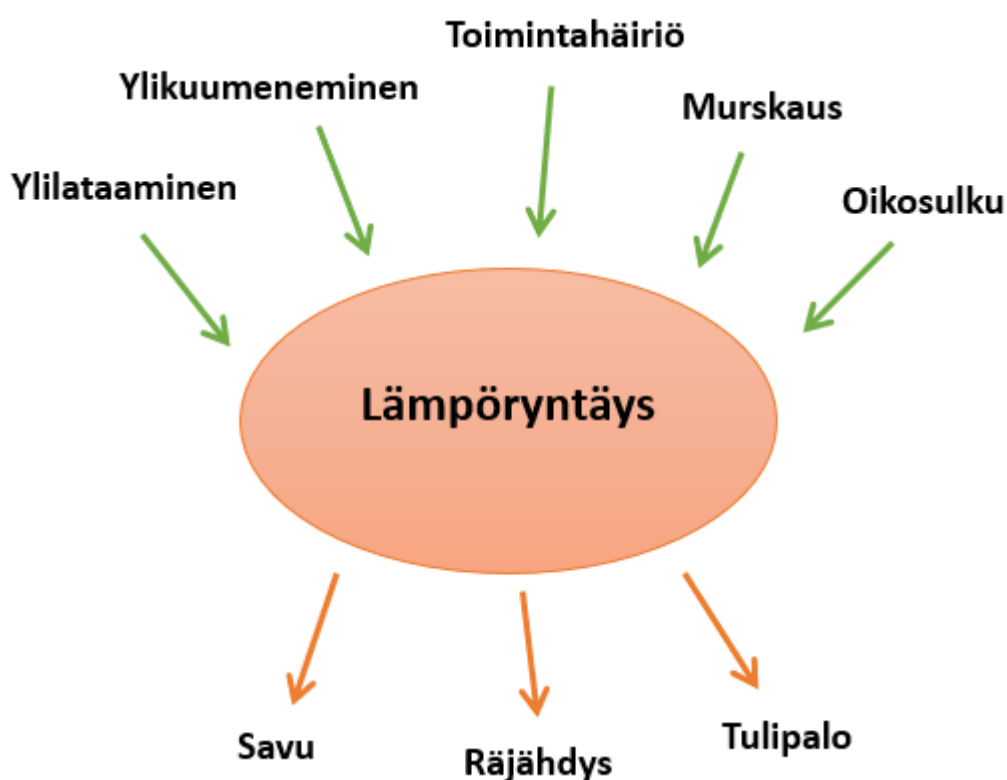
Kuva 3. Hydrometallurgian prosessi. (Toro ym. 2023)

Hydrometallurgian etuja ovat kaikkien arvometallien talteenotto, kohtuullinen energian kulutus ja kohtuulliset reaktio-olosuhteet. Lisäksi hydrometallurgisilla menetelmillä, josta saadaan suurilla saannoilla arvokkaita metalleja talteen uudelleen käytettäväksi. (Sharma 2023a; VVT n.d.)

4 Turvallisuus

Litiumioniakut ovat aiheuttaneet useasti tulipaloja varsinkin matkapuhelimissa ja tietokoneissa. Siksi niiden turvallisuutta on alettu tutkimaan. Litiumioniakut ovat herkkiä niin sanotulle lämpöryntäykselle eli lämpökarkaamiselle, jolloin akun lämpötila alkaa nousta tavallista nopeammin. Litiumioniakun rakenteessa alkaa tapahtumaan hajoamista jo 80 °C:een lämpötilassa. (Linja-Aho 2022, 75-76)

Yleisimmät akkujen aiheuttamat tapaturmat kuten räjähdykset tai tulipalot etenkin lämpöryntäyksen takia, johtuvat oikosulusta, joka tapahtuu elektrodien välillä. Lisäksi lämpöryntäyksen voi aiheuttaa akun liiallinen lataaminen tai kova purkautuminen, jolloin jännite on hyvin korkea. (Linja-Aho 2022, 77)



Kuva 4. Lämpöryntäyksen aiheuttajat sekä niiden seuraukset. (Firechief 2023)

Perinteisen tulipalon sammutusvälineet kuten sammutuspeite tai jauhesammutin eivät sovi litiumioniakkujen sammuttamiseen, sillä palamisessa muodostuu myös happea. Tällöin litiumioniakku on vain jäähdytettävä, esimerkiksi kaatamalla kylmää vettä päälle. (Linja-Aho 2022, 76; Tukes n.d. b)

4.1 Akunhallintajärjestelmä

Акунhallintajärjestelmä (Battery Management System) on akun valvontajärjestelmä, joka valvoo akkua esimerkiksi latautumisen, lämpötilan nousun ja purkautumisen aikana. Akun kennojen ja tietokoneen välillä on antureita, joista kulkee signaalit tietokoneeseen. Järjestelmää on mahdollista käyttää myös langattomana. (Liu 2023)

Акунhallintajärjestelmän käyttökohteita ovat muun muassa sähköajoneuvot, mobiililaitteet, energianlähteet sekä eri teollisuuden aloilla. BMS-tyypin valinta perustuu sen käyttökohteen mukaan. Lisäksi BMS-tyypin ja tehokkuuden valintaan vaikuttaa esimerkiksi akkutyypin, akun koko sekä akun kennojen lukumäärä. (Chilwee 2023; Liu 2023)

Järjestelmään tallentuu kaikki, mitä se havaitsee sekä niiden lukemat. Lisäksi järjestelmä kykenee korjaamaan mahdolliset riskejä aiheuttavat tekijät, kuten lämpötilan säätämistä sopivaksi, jos se alkaa nousemaan. BMS suojaa akkua sekä akun käyttäjää vaaratekijöiltä. (Liu 2023)

Viime vuosina akunhallintajärjestelmä suosio on noussut. Seuraavan 10 vuoden aikana akunhallintajärjestelmien määrä arvioidaan nousevan noin 7-kertaiseksi markkinoilla. (Liu 2023)

4.2 Riskien välttäminen

Litiumioniakkujen ostovaiheessa on hyvä varmistaa niiden valmistaja. Hyvä valmistaja takaa laadukkaat tuotteet. Ne saattavat olla usein hintavampia kuin muut akkutuotteet, mutta ne ovat turvallisempia. Etenkin Euroopan unionin maat noudattavat sen määäämiä asetuksia.

Litiumioniakkujen oikea käyttö ja varastointi tekevät niiden käytöstä turvallisen. Akku täytyy pitää kaukana helposti syttyivistä tavaroista sekä valvoa sitä esimerkiksi latauksen aikana ja kytkeä laturista, kun se on jo latautunut. Akkujen lataaminen oikein muun muassa sopivilla välineillä pidentää niiden elinikää sekä ehkäisee turvallisuusriskejä. (Perttula 2023; Tukes n.d. b)

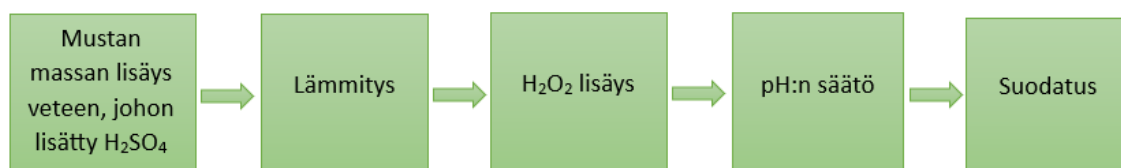
Litiumioniakun käyttö on lopetettava välittömästi, mikäli siinä alkaa näkymään omituisia piirteitä. Tässä tilanteessa akku saattaa alkaa haisemaan, vuotamaan tai päästämään ääniä. (Tukes n.d. b)

5 Toteutus

Mustan massan prosessoinnissa käytettiin hydrometallurgisia kierrätysmenetelmiä. Tavoitteena oli löytää sopiva mustan massan ja veden liuotussuhde (S:L) eli kiinteän aineen suhde nesteeseen. Tämän avulla saadaan nostettua arvometallien kuten litiumin, koboltin, mangaanin ja nikkelin pitoisuutta. Liuotustestejä toistettiin kunnes päästiin liuotussuhteeseen, joka nosti nikkelpitoisuutta merkittävästi.

Liuotus aloitettiin lisäämällä musta massa veteen, johon on lisätty rikkihappoa (H_2SO_4). Seos annettiin lämmitä tiettyyn lämpötilaan, jonka jälkeen siihen lisättiin vetyperoksidia (H_2O_2). Vetyperoksidin lisäyksen jälkeen säädettiin pH:ta sopivaksi. Lopuksi erotettiin kiinteä aine nesteestä alipainesuodatuksella.

Liuos suodatettiin alipainesuodatuksella, jolloin kiinteä aine eli sakka jää Büchner- suppilon päälle eikä kulkeudu liuoksen mukana suodatinpulloon. Suodatuksessa tulee kuitenkin liuoksen tai sakan hävikkiä. Osa liuoksesta ja sakasta jää suodatinvälineisiin tai sakasta kulkeutuu hiukkasia liuoksen mukana. Toisaalta, liuoksesta jää myös nestettä sakkaan. (Greelane 2020; Watson 2023)



Kuva 5. Työvaiheet.

Vertailukohteina käytettiin kahta musta massa -tyyppiä. Ensimmäinen musta massa on yrityksen oma, joka on murskattu akuista heidän laitoksessaan

Ikaalisissa ja pesty vedellä. Toinen musta massa on ulkopuolisen yrityksen, joka on saatu akkujen murskauksesta esimerkiksi alipaineessa.

Seuraavaksi suodoksesta erotettiin mangaani ja saostettiin epäpuhtauksia. Liuotuksen suodoksesta ja sakasta otettiin näytteet, jotka analysoitiin. Tärkeimmät alkuaineet, joiden pitoisuuksien vaihtelua seurattiin olivat muun muassa nikkeli, litium, koboltti, alumiini ja mangaani sekä epäpuhtaudet.

Ennen alkuaineanalyysiä sakka märkämpöletettiin korkeassa lämpötilassa ja paineessa mikroaaltouunissa metalli-ionien uuttamiseksi. Analyysissa käytettiin menetelmää ICP-OES eli Induktiivisesti kytketty plasma – optinen emissio-spektrometria (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy), jonka avulla pystytään määrittämään alkuaineiden pitoisuudet. Analyysilaitte muuttaa liuokset aerosoliksi eli kaasu-nesteseokseksi. (Aeroff 2024; Measurlabs n.d.; Thermo Fisher Scientific n.d.)

Plasma on on korkeaenerginen kaasu, kuten argon (Ar). Aerosoli kulkeutuu plasman läpi, jolloin se hajoaa atomeiksi. Alkuaineita ja niiden pitoisuuksia pystytään tällöin tutkimaan spektrometrillä eri aallonpituuksien avulla, mitä hajonneet atomit säteilevät. (Measurlabs n.d.)

6 Tulokset

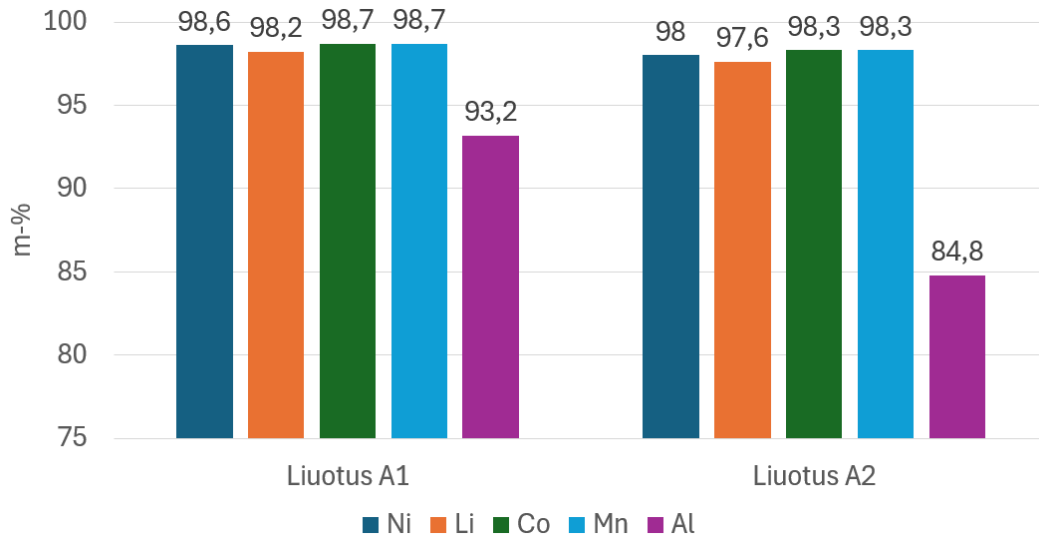
Työn tuloksena saatiin neljä erilaista liuotusta. Tarkasteltavia liuotuksia on nimetty symboleilla A1, A2, B1 ja B2. Liuotukset A2 ja B2 eroavat kahdesta muusta liuotuksesta muun muassa niin, että niihin on lisätty kemikaalia, joka parantaa epäpuhtauksien poistoa prosessin myöhemmissä vaiheissa.

Liuotusten saannot on laskettu massaprosentteina seuraavasti:

$$m - \% = \frac{\text{Metallin massa suodoksessa (mg)}}{\text{Metallin massa suodoksessa ja sakassa (mg)}} \cdot 100\%$$

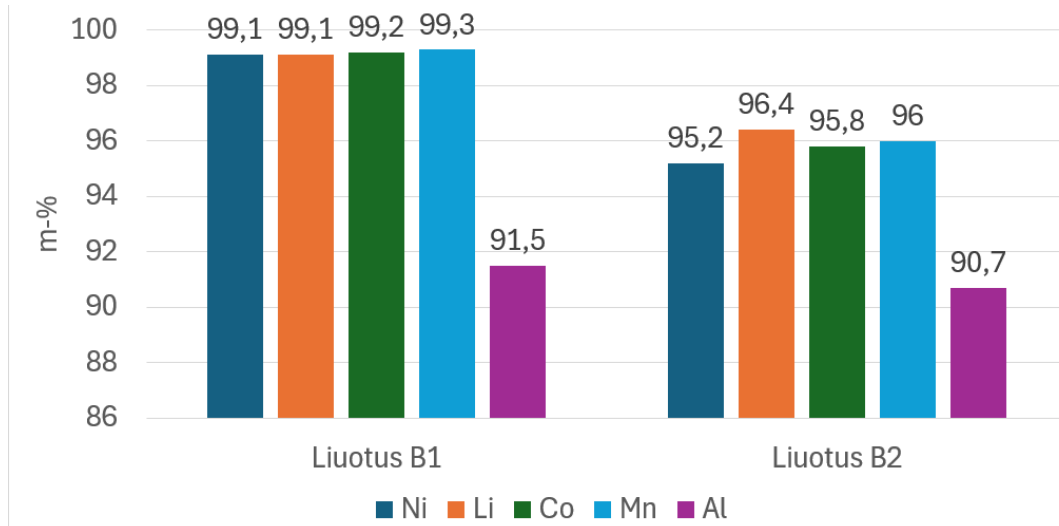
Pylväskuvaajassa (kuva 6) liuotus A kuvaa liuotusta, jossa on käytetty yrityksen omaa mustaa massaa. A1 kuvaa liuotusta, joka on tehty yrityksen alkuperäisen liuotusreseptin mukaisesti ja A2 kuvaa liuotusta, joka on tehty muokatun liuotusreseptin mukaisesti.

Kuvassa 6 näkyvien saantojen perusteella havaitaan, että saannot ovat lähekkäisiä molempien liuotusten kesken. Erityisesti poikkeamaa on alumiinisaannossa, jossa A2 alumiinisaanto on pienempi kuin A1 alumiinisaanto 8,4 massaprosentilla.



Kuva 6. Pylväskuvaaja, jossa on yrityksen oman mustan massan liuotuksen saannot massaprosentteina.

Kuvassa 7 näkyy ulkopuolisen yrityksen käytettyn mustan massan liuotuksen saannot. Liuotukset tehtiin kuitenkin samoilla resepteillä mitä A liuotuksissa (vrt. A1 ja B1 sekä A2 ja B2). B liuotusten saannoissa on enemmän tulospoikkeamia kuin A liuotuksissa. Tähän on saattanut vaikuttaa musta massojen erilainen partikkelikoko, erilaiset komponentit sekä mekaaninen esikäsittely. Tästä syystä ne liukenevat eri tavalla.



Kuva 7. Pylväskuvaaja, jossa on ulkopuolisen yrityksen käytetyn mustan massan liuotuksen saannot massaprosentteina.

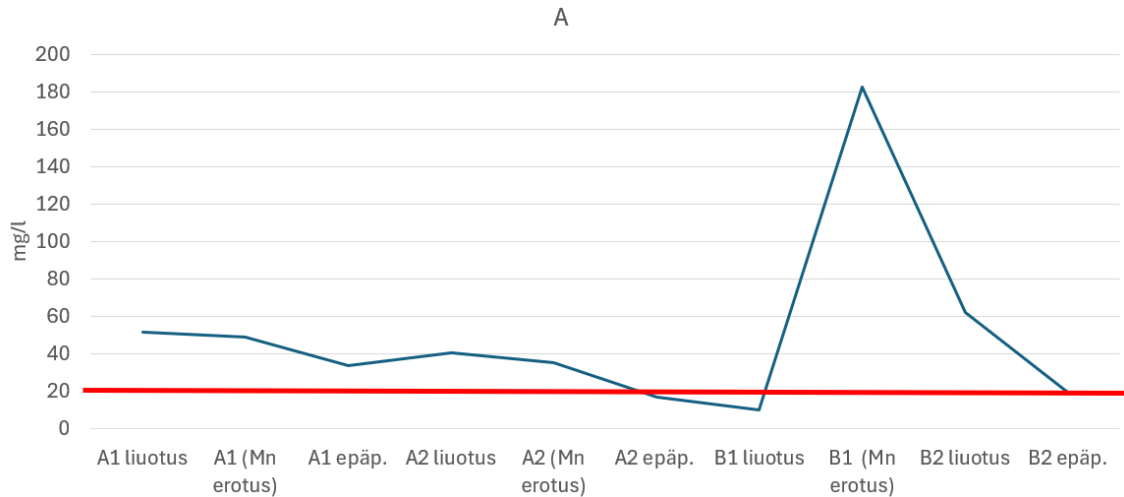
Aikaisemmin nikkelpitoisuus litiumioniakkujen kierrätyksessä oli 8000-15000 mg/l. Tavoitteena oli nostaa nikkelpitoisuutta ainakin kaksinkertaiseksi. Nikkelpitoisuutta saatiin nostettua jopa yli kolminkertaiseksi.

Taulukko 1. Vertailutaulukko nikkelpitoisuudesta (mg/l) eri liuotusten jälkeen.

Nikkelpitoisuus (mg/l)			
A1	A2	B1	B2
23860	47710	29280	58490

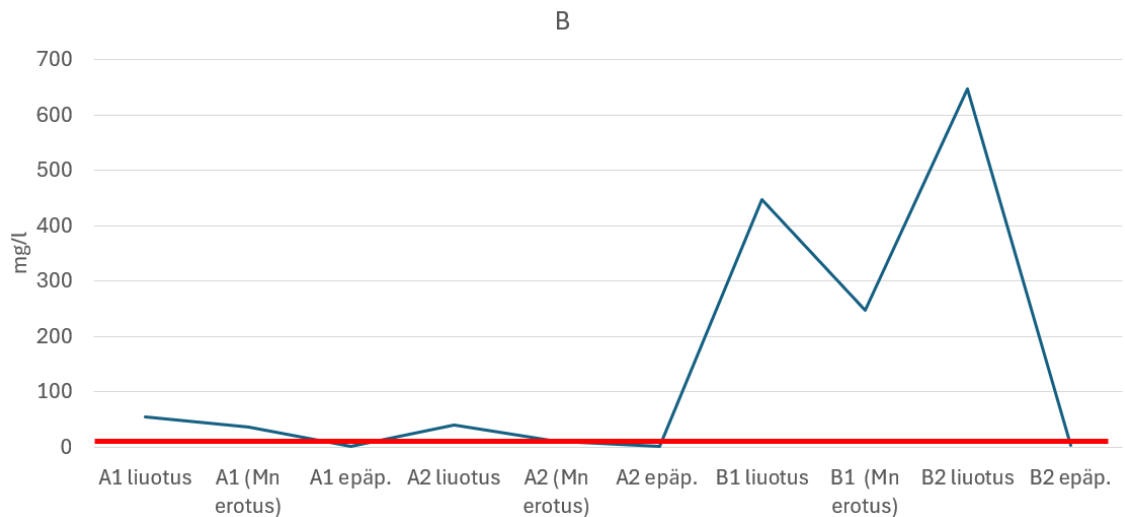
Kuvissa 8-11 on epäpuhtauksien pitoisuudet (mg/l) liuotusten jälkeen, mangaanin (Mn) erotuksen jälkeen sekä epäpuhtauksien poiston jälkeen. Epäpuhtauksien poisto näkyy kuvaajassa lyhenteellä ”epäp.”. Kuvaajassa näkyvä paksu jana tarkoittaa epäpuhtauden tavoitemäärää, joka on A:lla 20 mg/l, B:llä 10 mg/l sekä C:llä ja D:llä 50 mg/l.

A2 epäpuhtauksien poiston ja B1 liuotuksen kohdalla päästiin epäpuhtauden A tavoitemäärän alapuolelle. B2 epäpuhtauksien poiston kohdalla epäpuhtaus A jäi hieman tavoitemäärän yläpuolelle.



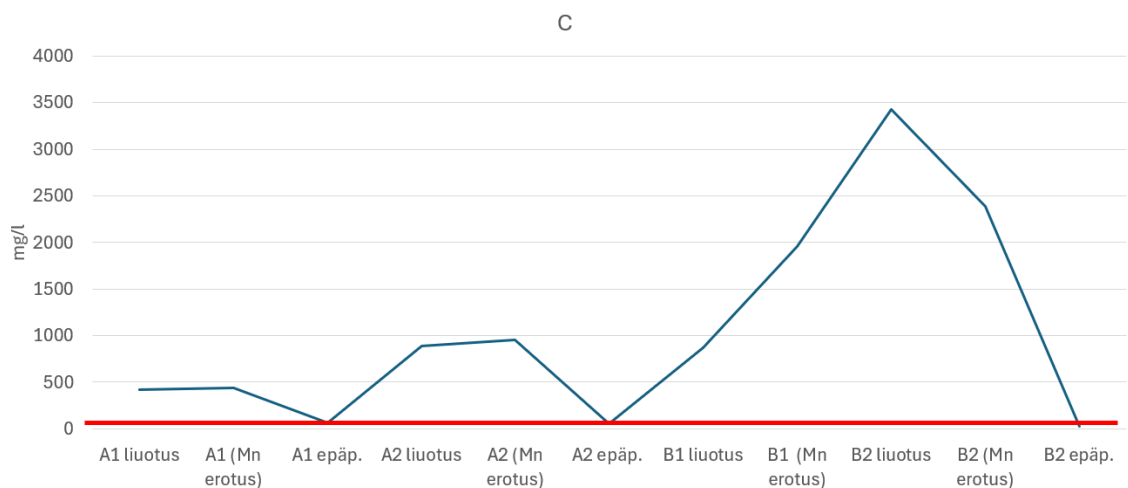
Kuva 8. Epäpuhtauden A saostuksen jälkeen saatiin tuote, jossa epäpuhtauden A tavoitemäärä on 20 mg/l.

Epäpuhtauden B tavoitemäärä saavutettiin A1 epäpuhtauksien poistossa, A2 mangaanin erotuksessa, A2 epäpuhtauksien poistossa sekä B2 epäpuhtauksien poistossa.



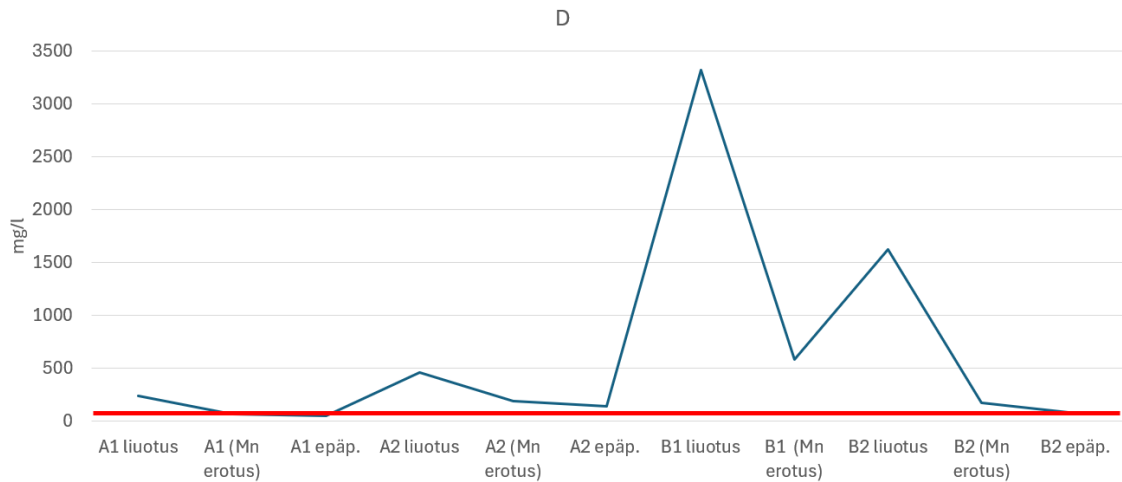
Kuva 9. Epäpuhtauden B saostuksen jälkeen saatiin tuote, jossa epäpuhtauden B tavoitemäärä on 10 mg/l.

Epäpuhtauden C tavoitemäärään päästiin A2 epäpuhtauksien poistossa sekä B2 epäpuhtauksien poistossa. Kaikissa muissa vaiheissa epäpuhtaus C jäi tavoitemäärän yläpuolelle.



Kuva 10. Epäpuhtauden C saostuksen jälkeen saatiin tuote, jossa epäpuhtauden C tavoitemäärä on 50 mg/l.

Epäpuhtauden D tavoitemäärään päästiin ainoastaan A1 epäpuhtauksien poistossa. Muissa vaiheissa epäpuhtauden D määrä jäi tavoitemäärän yläpuolelle.



Kuva 11. Epäpuhtauden D saostuksen jälkeen saatiin tuote, jossa epäpuhtauden D tavoitemäärä on 50 mg/l.

Kuvaajista puuttuu B1 epäpuhtauksien poiston tulokset. Sitä ei ollut mahdollista jatkaa, sillä sitä edeltävässä prosessin vaiheessa tapahtui ongelmia. Lisäksi epäpuhtauksien A ja B kuvaajista puuttuu B2 epäpuhtauksien poiston tulokset, sillä testistä saatiin tiedoksi ainoastaan epäpuhtauksien C ja D pitoisuudet.

7 Loppupohdinta

Työn päätavoitteeseen päästiin ja nikkelpitoisuutta saatiin nostettua muokkaamalla S:L suhdetta. Liuotusvaiheessa nikkelpitoisuutta onnistuttiin nostamaan kaksinkertaiseksi. Aikaisemmin nikkelpitoisuudeksi saatiin 8000-15000 mg/l kun taas tässä työssä nikkelpitoisuutta nostettiin 23000-59000 mg/l välille. Pitoisuus vaihtelee muun muassa sitä mukaan minkä tyyppistä mustaa massaa on liuotettu. Lisäksi työssä selvisi eri S:L suhteiden sekä eri reagenssien käyttäytyminen liuotuksissa.

Täydelliseen epäpuhtauksien saostamiseen ei kuitenkaan päästy. Epäpuhtauden A tavoitemäärän alapuolelle päästiin A2 epäpuhtauksien poistossa sekä B1 liuotuksessa. Epäpuhtautta B saatiin poistettua A1 epäpuhtauksien poistossa, A2 mangaanin erotuksessa, A2 epäpuhtauksien poistossa sekä B2 epäpuhtauksien poistossa. Epäpuhtauden C tavoitemäärän alapuolelle päästiin A2 epäpuhtauksien poistossa ja B2 epäpuhtauksien poistossa. Epäpuhtauden D tavoitemäärän alapuolelle päästiin ainoastaan A1 epäpuhtauksien poistossa.

Työ on jatkuvatoiminen. Se vaatii monia kokeiluja ja testejä, siksi sitä voidaan jatkaa ainakin epäpuhtauksien poiston kannalta. Työtä voi jatkaa esimerkiksi kehittämällä resepti, mikä estää arvometallien korkean pitoisuuden aiheuttamaan ongelmia jatkoprosessissa.

Lähteet

Aeroff 2024. Mikä on aerosoli? Viitattu 21.4.2025. <https://www.aeroff.fi/mika-on-aerosoli/>

Akkukierrätys Pb n.d. Akkujen kierrätys. Viitattu 19.3.2025
<https://akkukierratyspb.fi/akkujen-kierratys/>

Britannica n.d. Hydrometallurgy. Viitattu 17.3.2025
<https://www.britannica.com/technology/hydrometallurgy>

Chilwee 2023. Mitkä ovat eri BMS-tyypit. Viitattu 26.3.2025
<https://fi.chilweebattery.com/news/what-are-the-different-types-of-bms-72845997.html>

Dräger n.d. a. Litiumkarbonaatti Li_2CO_3 . Viitattu 28.5.2025
https://www.draeger.com/fi_fi/Substances/1502

Dräger n.d. b. Litiumkloridi LiCl . Viitattu 28.5.2025
https://www.draeger.com/fi_fi/Substances/1503

MIT Climate Portal 2024. How is lithium mined? Viitattu 23.5.2025
<https://climate.mit.edu/ask-mit/how-lithium-mined>

Firechief 2023. What causes Lithium-ion battery fires? Viitattu 25.3.2025
<https://batteryfiresafety.co.uk/what-causes-lithium-ion-battery-fires/>

Fortum 2023. Fortum Battery Recycling avaa Euroopan suurimman suljetun kierron hydrometallurgisen akkumateriaalien kierrätyslaitoksen Harjavaltaan. Viitattu 22.5.2025 <https://www.fortum.fi/media/2023/04/fortum-battery-recycling-avaa-euroopan-suurimman-suljetun-kierron-hydrometallurgisen-akkumateriaalien-kierratyslaitoksen-harjavaltaan>

Gopan ym. 2024. A comprehensive review of lithium extraction: From historical perspectives to emerging technologies, storage, and environmental considerations. Science Direct. Viitattu 24.5.2025
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790824000296>

Greelane 2020. Suodatuksen määritelmä ja prosessit (kemia) – Suodatus: mitä se on ja miten se tehdään. Viitattu 18.3.2025

<https://www.greelane.com/fi/science-tech-matematiikka/tiede/filtration-definition-4144961/>

Juraj, S. 2023. Tutustuminen redox-reaktioihin kemian tukiopettajan kanssa. Meet'n'learn. <https://www.meetnlearn.fi/opetusblogi/1270-redox-reaktioiden>

Kashuba, J. n.d. Spodumene. Mindat.org. Viitattu 5.6.2025

<https://www.mindat.org/min-3733.html>

Kielikello 2009. Lyhenneluettelo. Viitattu 13.4.2025

<https://kielikello.fi/lyhenneluettelo/>

Lango, L. 2021. The Forever Battery That Promises to Change the EV Industry. InvestorPlace. Viitattu 6.4.2025

<https://investorplace.com/hypergrowthinvesting/2021/11/the-forever-battery-that-promises-to-change-the-ev-industry/>

Large Power 2025. Environmental Challenges in Lithium-Ion Battery Recycling Processes. Viitattu 23.5.2025. <https://www.large-battery.com/2025/04/lithium-ion-battery-scrapping-challenges.html>

Linja-Aho, V. 2022. Litiumioniakkutekniikka: rakenne – ominaisuudet – turvallisuus. 1. painos. Helsinki: Suomen Autoteknillinen Liitto ry.

Liu, J. 2023. What is BMS Battery Management System?. MOKOEnergy. Viitattu 23.3.2025 <https://www.mokoenergy.com/what-is-bms-battery-management-system/>

Measurlabs n.d. ICP-OES-analyysi. Viitattu 21.4.2025

<https://measurlabs.com/fi/menetelmat/icp-oes-analyysi/>

Oy Esco Ab n.d. Litiumakkujen tekniikka ja paloturvallisuus. Blogi. Viitattu 22.5.2025 <https://www.esconet.fi/blog/ajankohtaista-14/litiumakkujen-tekniikka-ja-paloturvallisuus-42>

Perttula, P. 2023. Litiumioniakkuja on kaikkialla työpaikoilla, mutta turvallisuusriskeihin ei olla varauduttu tarpeeksi. Työterveyslaitos. Viitattu 25.3.2025 <https://www.ttl.fi/ajankohtaista/tiedote/litiumioniakkuja-on-kaikilla-tyopaikoilla-mutta-turvallisuusriskeihin-ei-olla-varauduttu-tarpeeksi>

Sensmet n.d. Black Mass Recycling of Li-Ion Batteries. Viitattu 28.5.2025
<https://www.sensmet.com/black-mass-recycling-of-li-ion-batteries/>

Sesko ry n.d. Sähkötekniikan peruskäsitteet. Osa 1. Jännite. https://sesko.fi/wp-content/uploads/2021/12/Peruskasitteet_osa1_jannitteet_2020.pdf

Sharma, K. 2023a. Hydrometallurgy: Principles, Processes, Advantages, Disadvantages. Viitattu 17.3.2025 <https://scienceinfo.com/hydrometallurgy-processes-advantages/>

Sharma, K. 2023b. Pyrometallurgy: Definition, Processes, Advantages, Disadvantages. Viitattu 18.3.2025 <https://scienceinfo.com/pyrometallurgy-advantages-disadvantages/>

SK tes 2023. Hydrometallurgy vs Pyrometallurgy: Best Methods for Battery Recycling. Viitattu 19.3.2023 <https://www.sktes.com/news/the-difference-between-hydrometallurgy-and-pyrometallurgy>

STIHL 2024. Litiumioniakut – Perusteet. Viitattu 27.3.2025
<https://www.stihl.fi/fi/teknologia/akku-teknologia/litiumioniakut-perustietoa>

Thermo Fisher Scientific n.d. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) Information. Viitattu 21.4.2025.
<https://www.thermofisher.com/fi/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/trace-elemental-analysis-tea-information/icp-oes-information.html>

Toro ym. 2023. A Systematic Review of Battery Recycling Technologies: Advances, Challenges, and Future Prospects. Viitattu 17.3.2025
<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/18/6571>

Tukes n.d. a. Litiumioniakkujen elinkaari. Viitattu 18.3.2025
<https://tukes.fi/litiumioniakkujen-elinkaari>

Tukes n.d. b. Litiumioniakkujen elinkaari hankinnasta hävittämiseen. Viitattu 25.3.2025 <https://tukes.fi/litiumioniakkujen-turvallinen-kayttaminen>

Ufine 2024. How Does a Lithium Ion Battery Work? Blogi. Viitattu 27.3.2025
<https://www.ufinebattery.com/blog/how-does-a-lithium-ion-battery-work/>

VTT n.d. Hydrometallurgia ja mekaaninen käsittely. Viitattu 18.3.2025

<https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/hydrometallurgia-ja-mekaaninen-kasittely>

Watson, D. 2023. What Is Gravity Filtration? Water System Expert. Blogi.

Viitattu 27.5.2025 <https://www.watersystemexpert.com/what-is-gravity-filtration/>