Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Kemian tekniikan kanditaattiohjelma

Litiumrautafosfaattiakkujen kierrätyksen lainsäädäntö

Jerika Hagberg

Kandidaatin tutkielma
2025

Copyright ©2025 Jerika Hagberg

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Tekijä Jerika Hagberg

Työn nimi Litiumrautafosfaattiakkujen kierrätyksen lainsäädäntö

Koulutusohjelma Kemian tekniikan kanditaattiohjelma

Pääaine CHEM3050 Kemian tekniikka ja prosessit

Valvoja TkT Jari Aromaa

Työn ohjaaja DI Jere Vänskä

Päivämäärä 18.12.2025 **Sivumäärä** 33 **Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan litiumrautafosfaattiakkujen kierrätyksen sääntelyä ja sen toteutusta Suomen, Euroopan unionin ja globaalin mittakaavan näkökulmista. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on selvittää, miten nykyiset politiikkainstrumentit ja standardit erityisesti EU:n akkuasetus (EU) 2023/1542, suomalainen paristo- ja akkusääntely sekä kansalliset akkustrategiat, huomioivat LFP-kemian suhteessa muihin litiumioniakkujen katodikemioihin, ja millaisia vaikutuksia tällä on kiertotalouden toteutumiseen, resurssitehokkuuteen ja teollisiin investointeihin. Menetelmänä käytetään kirjallisuuskatsausta, jossa yhdistetään tieteellisiä artikkeleita, virallisia säädösteksteja sekä kansainvälisten organisaatioiden ja viranomaisten raportteja. Vaikka LFP-akkujen markkinaosuus sähköajoneuvoissa kasvaa nopeasti, sääntely ja kierrätysvelvoitteet ovat edelleen pitkälti optimoitu muille katodimateriaaleille. Tämä voi johtaa raaka-aineiden, erityisesti raudan ja fosforin, suureen määrään jätevirroissa sekä LFP-akkujen jäämiseen kierrätysjärjestelmän harmaalle alueelle. Kirjallisuskatsauksessa tarkastellaan myös sitä, kuinka EU- ja kansallisella tasolla tulisi kehittää kemiaspesifisiä kierrätystavoitteita, tarkentaa tuottajavastuujärjestelmää sekä hyödyntää digitaalisia akkupasseja, jotta LFP-akkujen kiertotalous voisi toteutua yhtä täysipainoisesti muiden litiumioniakku tyyppien kanssa.

Avainsanat Litiumioniakku, LFP, akkujen kiertotalous, kierrätyksen lainsäädäntö

Aalto-yliopisto
Aalto-universitetet
Aalto University

Author Jerika hagberg

Title of thesis Lithium iron phosphate battery legislation

Programme Bachelor's Programme in Chemical Engineering

Major Chemical Engineering and Processes

Thesis supervisor Jari Aromaa, D.Sc. (Tech.)

Thesis advisor Jere Vänskä, M.Sc. (Tech.)

Date 18.12.2025 **Number of pages** 33 **Language** Finnish

Abstract

In this bachelor's thesis, the regulation of recycling for lithium iron phosphate (LFP) batteries and its implementation are examined from the perspectives of Finland, the European Union, and the global context. The aim of the literature review is to determine how current policy instruments and standards—particularly the EU Batteries Regulation (EU) 2023/1542, Finnish battery and accumulator legislation, and national battery strategies—take LFP chemistry into account in comparison with other lithium-ion battery cathode chemistries, and what implications this has for the realisation of the circular economy, resource efficiency, and industrial investments.The study is conducted as a literature review combining scientific articles, official legislative texts, and reports produced by international organisations and public authorities. Although the market share of LFP batteries in electric vehicles is increasing rapidly, regulation and recycling obligations are still largely optimised for other cathode materials. This may result in large quantities of raw materials—especially iron and phosphorus—ending up in waste streams, and in LFP batteries remaining in a "grey area" of the recycling system. The review also considers how, at both EU and national levels, chemistry-specific recycling targets should be developed, producer responsibility schemes refined, and digital battery passports leveraged so that the circular economy for LFP batteries can be implemented as fully as it is for other lithium-ion battery types.

Keywords Lithium-ion battery, LFP, circular economy of batteries, recycling legislation

Sisällys

Esipuhe 6
Symbolit ja lyhenteet 7
1 Johdanto 8
2 Litiumrautafosfaattiakut 10
2.1 Rakenne ja koostumus 10
2.2 Käyttökohteet ja ominaisuudet 12
2.3 LFP-akkujen tuotanto ja elinkaari 13
3 Akkujen kierrätyksen lainsäädäntö 16
3.1 Suomen lainsäädäntö 16
3.2 EU-tason lainsäädäntö 18
3.3 Kansainvälinen lainsäädäntö 21
4 Kehityssuunnat ja ratkaisumallit 25
5 Yhteenveto/Johtopäätökset 28
Lähteet 30

Esipuhe

Haluan kiittää ohjaajaani DI Jere Vänskää tuesta ja asiantuntevasta ohjauksesta syksyn kirjoitusprosessin aikana. Haluan myös kiittää ystäviäni korvaamattomasta vertaistuesta sekä perhettäni kannustuksesta ja tuesta syksyn aikana.

Otaniemessä 15.12.2025
Jerika Hagberg

Symbolit ja lyhenteet

BM	musta massa, engl. black mass
ERP	European Recycling Platform
EU	Euroopan unioni
EV	Electric vehicle
HF	Vetyfluoridi
IEA	International Energy Agency
LCO	Litium-kobolttioksidi
LFP	Litiumrautafosfaatti, engl. lithium iron phosphate
NCA	litiumnikkeli-kobolttialumiinioksidi
NMC	Nikkeli-mangaani-koboltti-litiumioni
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PVDF	Polyvinyylidifluoridi
SER	Sähkö- ja elektroniikkajäte

1 Johdanto

Akkujen rooli vihreässä siirtymässä kasvaa liikenteen sähköistyessä ja sähköjärjestelmien kehittyessä. IEA:n tuore katsaus osoittaa, että energia-alan akkukysyntä saavutti vuonna 2024 historiallisesti noin 1 TWh:n tason ja kasvaa vuoteen 2030 mennessä yli kolminkertaiseksi, mikä merkitsee väistämätöntä kierrätettävän akkumassan nopeaa lisääntymistä 2020-luvun lopulta alkaen. [1] Tässä kehityksessä litiumrautafosfaatti (engl. lithiumironphosphate, LFP) on noussut keskeiseksi akkukemiaksi ja sitä käytetään laajasti edullisemmissa sähköautoissa ja busseissa sekä yhä useammin myös stationäärisessä varastoinnissa, jossa turvallisuus ja kokonaiskustannus ratkaisevat [2]. Tutkimuskirjallisuus korostaa LFP:n pitkää syklinkestoa ja lämpöturvallisuutta sekä materiaalikustannusten etua nikkeli- ja kobolttipohjaisiin katodeihin verrattuna. Nämä ominaisuudet selittävät osaltaan LFP:n nopeaa yleistymistä etenkin kustannusherkissä segmenteissä. [3]

LFP:n suosio aiheuttaa kuitenkin kierrätyksen kannalta haasteita. Toisin kuin nikkeli-mangaani-koboltti-litiumioni (NMC) akuissa tai litiumnikkeli-kobolttialumiinioksidi (NCA) akuissa, LFP:ssä ei ole korkea-arvoisia metalleja kuten kobolttia ja nikkeliä, mikä heikentää kierrätyksen taloudellista kannattavuutta [4]. Prosesseja kuormittavat lisäksi sideaineiden, kuten polyvinyylidifluoridin (PVDF) liittyvät ympäristö- ja erotushaasteet, jotka voivat vaikuttaa litiumin talteenottoon ja hydrometallurgisten vaiheiden selektiivisyyteen [5]. Kustannus- ja ilmastovaikutusten hallinnassa on otettava huomioon HF-päästöjen riskit korkealämpöisessä esikäsittelyssä sekä litiumin hävikit ja sekundäärijätteet märkäprosesseissa [4]. Suora regenerointi tarjoaa reittejä, joilla LFP-aktiivimateriaalin suorituskyky voidaan palauttaa, kun epäpuhtauksien hallinta varmistetaan. Laboratoriosta teolliseen mittakaavaan siirtyminen sekä yhtenäisten standardien puute ovat kuitenkin yhä merkittäviä pullonkauloja [6]. Nämä kierrätyksen haasteet koskevat osittain myös muita litiumioniakkutyyppejä.

Vaikka litiumrautafosfaatin (LFP) käyttö on yleistynyt nopeasti, sääntely ei toistaiseksi ohjaa sen kierrätystä samassa määrin kuin muiden katodimateriaalien. EU:n akkua koskevissa vaatimuksissa kierrätetyn sisällön minimiosuudet on määritelty litiumille, nikkelille ja koboltille, mutta raudan ja fosforin osalta vastaavia velvoitteita ei ole, mikä käytännössä heikentää kannustimia nimenomaan LFP-kennojen suljettuun kiertoon [6]. Ohittamalla LFP-akkujen merkittävä materiaalivirta lainsäädännössä EU ei saavuta kiertotalous- ja ilmastohyötyjä LFP-volyymien kasvaessa ja investoinnit lukkiutuvat kemioihin, joissa sääntelyn kannusteet ovat valmiiksi vahvemmat.

Tässä kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan LFP-akkujen kierrätyksen sääntelyä ja sen toteutusta kansallisella, EU- ja globaalilla tasolla: miten

nykyiset politiikkainstrumentit, mittarit ja standardit kohtelevat LFP:tä suhteessa muihin katodikemioihin sekä mitä vaikutuksia tällä on ympäristöön, talouteen ja teollisiin investointeihin.

2 Litiumrautafosfaattiakut

Tässä luvussa tarkastellaan litiumrautafosfaattiakkuja ensin teknisestä näkökulmasta ja sen jälkeen kierrätyksen ja sääntelyn kannalta. Aluksi kuvataan litiumioniakun perusrakenne sekä LFP-akkujen erityispiirteet. Tämän jälkeen käsitellään LFP-akkujen tuotantoa, arvoketjun maantieteellistä keskittymistä erityisesti Kiinaan sekä elinkaaren aikaisia muutoksia, jotka vaikuttavat akun vanhenemiseen ja kierrätyspotentiaaliin. Luvussa esitellään myös keskeiset kierrätysmenetelmät sekä niiden soveltuvuus LFP:lle.

2.1 Rakenne ja koostumus

Litiumioniakuissa sähkökemiallinenpari koostuu kahdesta elektrodista: positiivisesta katodista ja negatiivisesta anodista. Elektrodeja erottaa ioneja johtava elektrolyytti sekä mekaaninen erotinkalvo. Näiden ympärillä on muita osia suojaava kotelo. [3, 7, 8]

Katodi on akun positiivinen elektrodi, jolla akkua ladattaessa tapahtuu hapettuminen ja varausta purettaessa puolestaan pelkistyminen. Vastaavasti anodilla akkua ladattaessa tapahtuu pelkistyminen ja varausta purettaessa hapettuminen. Katodi koostuu usein alumiiniseesta virrankeräimestä, sitä päällystävästä katodiaktiivisesta matriaalista sekä sidosaineesta. [8, 9] LFP-kennoissa katodin aktiivimateriaalina on pääasiassa litiumrautafosfaatti. Yleisempiä litiumioniakkutyyppejä ovat litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi (NMC) litium-mangaanioksidi (LMO), litium-kobolttioksidi (LCO) sekä litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA) [8]. Yleisimpien akkukemioiden ominaisuuksia on vertailtu alla taulukossa (taulukko 1.). Negatiivinen elektrodi, anodi, puolestaan koostuu yleensä grafiitista, anodin aktiivisesta aineesta ja virrankeräimestä, joka yleensä on valmistettu kuparista [7]. Grafiitti-anodin seostaminen piillä on yleistä sen energatiheyden ja suorityskyvyn parantamiseksi [8]. Komponentit liitetään yhteen orgaanisella sidosaineella [10].

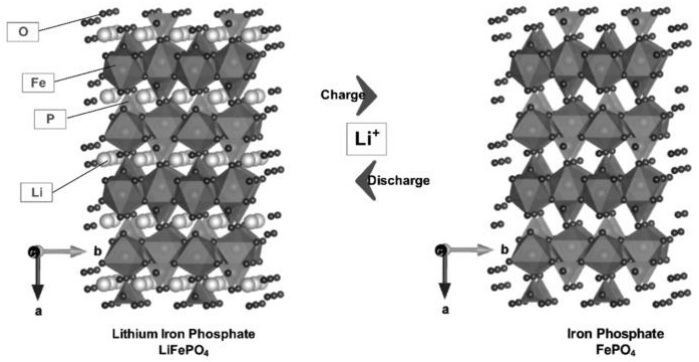
Taulukko 1. LFP-, NCA- ja NMC-akkujen ominaisuuksia

	LFP	NCA	NMC
Rakenne	Oliviini	Kerroksellinen	Kerroksellinen
Syklin kesto (sykliä)	2000–8000	1000–2000	1000–3000
Energiatiheys (Wh/kg)	90–160	180–260	150–250
Lähteet	[3, 11]	[5]	[5]

Mekaaninen erotin kalvo valmistetaan yleensä polymeeristä ja se estää katodin ja anodin kontaktin. [8] Huokoinen erotin estää systeemin oikosulun pitäen elektrodit erillään, kuitenkin päästäen litiumionit kulkemaan niiden välillä. [8, 12] Litiumionit kulkevat anodin ja katodin välillä akun latauessa sekä virran purkautuessa elektrolyyttiliuoksessa. Elektrolyytti koostuu liuottimesta sekä litium suolasta, jolla tehostetaan ionien siirtymistä [9]. Litiumioniakuissa tyypillisen geelimäiseen tai nestemäiseen elektrolyyttiin on lisätty toimintaa parantavia lisäaineita. [3, 7, 8, 11] Akun ympärillä oleva suojaava kotelo valmistetaan usein alumiinista tai terässekoitteista. [8, 12]

$$LiFePO_4 = FePO_4 + Li^+ + e^- \tag{1}$$

LFP-akun rakenne on pääosin sama kuin muissa yleisimmissä litiumioniakuissa. Litiumrautafosfaatti on polyanionikatodi, jolla on oliviinirakenne ($FePO_4$-kehikko ja 1D Li-kanavat). Yksiulotteinen ioniliikenne rajoittaa hetkellistä virrantiheyttä, mutta tekee rakenteesta erittäin mekaanisesti ja termisesti vakaan, koska fosfaatin ja hapen väliset sidokset rajoittavat hapen vapautumista myös ylikuormitustilanteissa. Sähkökemiallisesti LFP latautuu ja purkautuu kahden faasin reaktiona yhtälön (1) mukaisesti, mikä tuottaa tasaisen ~3,3 V jännitteen kennon napojen yli. Latautumis- ja purkautumisykli on esitetty myös kuvassa (kuva 1). Katodi pinnoitetaan yleensä hiilellä sähkönjohtavuuden parantamiseksi, sillä LFP on luontaisesti 6heikosti johtava materiaali muihin akkukemioihin verrattuna. Akkujen sideaineena käytetään PVDF:ää ja virrankerääjänä alumiinifoliota. Vastapuolena on grafiittianodi kuparifoliolla, polyolefiinierotin ja karbonaattipohjainen elektrolyytti. [5, 13]



Kuva 1. LFP-akun latautuminen ja purkautuminen. [13]

LFP:n teoreettinen kapasiteetti on noin 170 mAh/g ja nimellisjännite noin 3,3 V. käytännössä hiilipinnoitus ja partikkelikoostumus määräävät saavutettavan kapasiteetin ja teho-ominaisuudet. Taulukoidut vertailut osoittavat, että LFP:n keskimääräinen ominaisenergia jää kerrosrakenteisiin oksideihin (NMC/NCA) nähden alemmaksi, mutta

vakaus, kapasiteetin säilymä ja turvallisuus ovat niihin verrattuna erinomaisia. [5, 13]

Toisin kuin NMC/NCA, LFP ei sisällä nikkeliä tai kobolttia. Tämä alentaa materiaalikustannuksia ja pienentää toimitusketjuriskejä, mutta samalla rajoittaa energiatiheyttä. LFP:n alhaisempi potentiaali ja heikompi litiumin diffuuusionopeus yhden ulottuvuuden kanavissa selittävät, miksi kennot suunnitellaan tyypillisesti suuremmiksi kapasiteetin saavuttamiseksi. [5, 13]

2.2 Käyttökohteet ja ominaisuudet

LFP:n P–O-sidosten korkea sidosenergia tekee siitä termisesti vakaan, sillä katodi ei tarjoa runsaasti happea eksotermisiin reaktioihin, mikä alentaa lämpökarkaamisen riskiä. Käytännössä tämä näkyy parempana väärinkäytön sietona ja mahdollisuutena käyttää akkua sovelluksissa, joissa isku-, tärinä- ja lämpörasitukset ovat kovia. LFP-kennojen kapasiteettisäilymä monisyklisten testien yli on kirjallisuudessa tyypillisesti vahva, mikä tukee pitkää käyttöikää erityisesti stationäärisen varastoinnin kohteissa. [5]

Rauta ja fosfori ovat laajalti saatavilla ja edullisia, mikä tekee osaltaan LFP-akuista houkuttelevan vaihtoehdon muihin litiumioniakkuihin nähden. Koboltin ja nikkelin puuttuminen poistaa osan kriittisten raaka-aineiden riskistä. Raudan ja fosforin hinta, saatavuus ja vastuullisuus ovat muihin katodi materiaaleihin verrattuna paremmat. Tämä on ollut keskeinen syy LFP-markkinaosuuden kasvuun viime vuosina sekä sähköautoissa että energian varastointijärjestelmissä. [1, 14]

LFP:tä käytetään laajasti jo esimerkiksi sähköautoissa etenkin perusmalleissa, joissa kustannus, kestävyys ja turvallisuus merkitsevät energiatiheyttä enemmän. LFP:tä hyödynnetään myös stationäärisissä energian varastoinnoin kohteissa, joissa pitkä syklielinkaari ja vakaa lämpökäyttäytyminen ovat kriittisiä, teollisuuslaitteissa ja työkoneissa, joissa mekaaninen kestävyys ja terminen vakaus ovat ratkaisevia valintaperusteita sekä muissa kevyissä sähköajoneuvoissa. Kansainväliset markkina- ja materiaalivirta-katsaukset kuvaavat LFP:n vahvaa asemaa etenkin Kiinassa ja kasvavaa kysyntää autoteollisuudessa ja energian varastointi ratkaisuissa. [3, 14-16]

Sandvik ilmoitti 24.9.2024 ottaneensa LFP-tekniikan käyttöön akkusähköisissä maanalaisissa poralaitteissaan [16]. Kittilän kaivoksen kenttätesteissä raportoitiin 50% pidempi trammausetäisyys, 20% suurempi nopeus ylämäessä, 36% enemmän käytettävissä olevaa energiaa ja 55% lyhyempi latausaika verrattuna aiempaan akkutekniikkaan [6]. Vuonna 2025 yhtiö esitteli lisäksi maailman ensimmäisen akkukäyttöisen kaapelipulttauslaitteen DS422iE:n, jonka akkukemiana oli LFP. [15, 16]

2.3 LFP-akkujen tuotanto ja elinkaari

Litiumrautafosfaattia voidaan valmistaa eri litiumia, fosforia ja rautaa sisältävistä yhdisteistä. Litiumia voidaan valmistaa esimerkiksi litiumkarbonaatista, litiumfluoridista tai litiumhydroksidista. Fosfaatti-ioni on usein sitoutunut ammonium inoniin ja rauta puolestaan on yleensä rautaoksidin, -sulfidin, -sulfaatin tai fosfaatin muodossa. Erillistä fosfaatti-inonin lähdettä ei tarvita, mikäli valmistutksessa hyödynnetään litiumin tai raudan fosfaattisuoloja [5, 17, 18].

LFP-akkujen valmistus on vahvasti keskittynyt Kiinaan ja arviolta noin 90% LFP-akuista tuotetaan kiinalaisilla valmistajilla, kuten BYD ja CATL. Samalla useat länsimaiset autonvalmistajat, kuten Ford ja Tesla ovat ilmoittaneet siirtyvänsä LFP-kemiaan osassa malleistaan, usein juuri kiinalaisten toimittajien kautta. Tämä vahvistaa Kiinan asemaa sekä kenno- että koko akkuarvoketjussa. [19, 20]

Kiinan LFP-teollisuuden etumatkaa selittää osin se, että keskeisiä LFP:ään liittyviä patentteja lisensoitiin Kiinan ulkopuolella, mikä muodosti markkinoillepääsyn esteitä muille toimijoille. Nämä rajoitteet heikkenivät, kun keskeiset patentit umpeutuivat Euroopassa 2021 ja Yhdysvalloissa 2022. [21] Kiinan vallitsevaa asemaa selittävät myös mittakaavaetu, nopea tuotantokyvyn kasvatus ja LFP-teknologian innovaatiot, jotka ovat pienentäneet kustannuksia (kennotaso noin 95 $/kWh vuonna 2023) ja tehneet LFP:stä kilpailukykyisen vaihtoehdon erityisesti kustannus- ja turvallisuuskriittisissä ajoneuvoissa ja varastointisovelluksissa. [22]

Euroopalle tämä keskittyminen tuo toimitusketju- ja strategisia haasteita. Vaikka LFP:n käyttö kasvaa, Euroopasta puuttuu toistaiseksi teollisen mittakaavan LFP-kierrätyskapasiteetti, mikä lisää riippuvuutta tuonnista sekä primääri- että sekundääriraaka-aineissa (Li, P, Fe). Kiinan asema korostaa EU-tason sääntelyn ja investointien tarvetta omaan kiertotalous- ja tuotantoinfrastruktuuriin. [19, 22]

Ajan myötä, elektrodien rakenne alkaa hajoamaan sekä elektrodien pinnalle muodostuu erinäisiä litiumia sisältäviä yhdisteitä. Näiden seurauksena akun kapasiteetti heikkenee. Epäedullisissa oloissa voi muodostua myös dendriittejä. Akun kapasiteetti hekkenee myös, kun osa rautaioneista siirtyy litiumille varatuille paikoille ja tukkii litiumin kulkureittejä. Kierrätyksen kannalta tärkeää on, että elektrodin perusrakenne säilyy ehjänä. Silloin materiaali voidaan suora kierrättää täydentämällä puuttuva litium ja korjaamalla rakennetta lämpökäsittelyllä, ilman, että materiaali täytyy ensin hajottaa kokonaan kemiallisesti. [3, 7, 11]

Kun akku poistetaan käytöstä, sen varaus puretaan, kenno tai moduuli avataan ja osat murskataan hallitusti. Murskauksesta muodostuva materiaali erotellaan aktiivimateriaaleihin ja hiileen, metallifolioihin

(alumiini katodilta, kupari anodilta) ja erottimen matriaaleihin (polymeeri). Tämän **e**sikäsittelyn tavoite on tuottaa tasalaatuinen syöte jatkoprosessiin, jota kutsutaan teollisuudessa mustaksi massaksi (engl. black mass, BM). Eri kierrätystavat voidaan lajitella seuraavanlaisesti: hydrometallurginen, pyrometallurginen, ja suora kierrätys. [3, 5, 7, 11]

Pyrometallurginen kierrätys menetelmä toimii hyvin sekalaisille Li-ioniakkujakeille, mutta ei ole LFP-akuille yleensä erityisen kannattava vaihtoehto, koska ne eivät sisällä nikkeliä tai kobolttia, jotka ovat pyrometallurgisten prosessien tyypillisesti tärkeimmät metallit etenkin taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta. Sulatuksessa syntyy paljon kuonaa mutta vain vähän metalliseosta jatkoraffinointiin, mikä heikentää sekä materiaalisaantoja että prosessin taloudellista logiikkaa. [23]

Lisäksi LFP:n sulatus vaatii usein ulkopuolista energiaa, koska kuonamäärä on suuri ja prosessi ei ole itselämpeävä kuten nikkeli–kobolttipitoisilla NMC-syötteillä. Tutkimuksessa LFP-skenaarioissa tarvittiin lisälämpöä juuri korkean kuonamäärän takia. LFP:n kohdalla korostuu myös fosforipitoinen kuona sekä tarve käyttää enemmän kuona-aineita ja mallinnuksessa LFP:n käsittelyyn liittyi lisäksi merkittävä koksiin ja energiaan liittyvä kuormitus. Kuonan ja tarvittavan energia määrä tekevät siitä myös kannattamattoman vaihtoehdon. [23]

Hydrometallurgisilla Liuotus- ja erotusmenetelmillä (mineraali- tai orgaaniset hapot, selektiivinen saostus, ioninvaihto) litium voidaan ottaa talteen mustasta massasta. Menetelmän kohdalla haaste on hallita kemiallista prosessia sekä kemikaalikulut. [5]

Suorakierrätyksessä LFP rakenne korjataan. Katodiin täydennetään puuttuva litium ja tehdään lämpö- tai hydroterminen käsittely. LFP:lle tämä ei ole vielä teknisesti toimivin kierrätysmenetelmä. [3]

LFP-kierrätyksen kehittämisen hitaus on johtunut useista toisiinsa liittyvistä syistä. Katodissa ei ole arvokkaita metalleja kuten kobolttia tai nikkeliä, joten perinteinen kierrätys ei tuota riittävästi arvoa. Myös litiumin irrottaminen LFP-matriisista selektiivisesti ja kohtuullisin kemikaalikuluin on kemiallisesti hankalaa. LFP-jätevirrat olivat pitkään pieniä ja huonosti lajiteltuja, mikä heikensi prosessien mittakaavaetuja. Prosesseja on myös pitänyt säätää nimenomaan LFP:lle, jotta prosesseissa pystytään hallitsemaan fosfaatti- ja rautakemiaa, PVDF-sideainetta ja elektrolyytin hajoamistuotteita. LFP:n nopea yleistyminen sähköautoissa ja stationäärisessä varastoinnissa kasvattaa volyymeja ja parantaa taloudellisia edellytyksiä, mikä siirtää painopistettä hydrometallurgisiin ratkaisuihin ja etenkin suoraan regenerointiin. [11, 14]

Laboratorioissa mallinnetuissa kierrätysprosesseissa on kusitenkin jo näytetty toimiviksi useita ratkaisuja. Selektiivisissä redox-liuotuksissa litium voidaan irrottaa LFP aktiivimateriaali ja hiili massasta siten, että $FePO_4$ jää hyvin puhtaaksi. Lisäksi on kehitetty sähkökemiallisia regenerointimenetelmiä, joissa käytetyn LFP:n litiumvajetta täydennetään suoraan kennossa. Nämä lähestymistavat vähentävät kemikaalien kulutusta ja jätevirtoja. Nykyisten arvioiden mukaan suora regenerointi palauttaa katodin suorituskyvyn lähelle alkuperäistä tasoa ja tekee sen pienemmällä energia- ja päästökuormalla kuin perinteiset pyro- ja hydrometallurgiset reitit. [3, 11]

EU:n akkuregulaatio (EU) 2023/1542 kiristää turvallisuus- ja tietovaatimuksia, koskien esimerkiksi akkujen merkintöjä ja kriittiset raaka-aineita, mikä korostaa LFP-järjestelmien jo lähtökohtaisesti vahvaa turvallisuusprofiilia, mutta myös asettaa yhtenäisiä testejä (ylipurkaus, lämpö-/mekaaniset rasitukset, kaasupäästöt), joihin kaikkien LIB-kemioiden on vastattava. LFP akut ovat kuitenkin jäämässä kierrätys lainsäädännön ulkopuolelle. Tämän seurauksia tarkastellaan myöhemmissä luvuissa kansallisella, EU:n ja globaalilla tasolla. [24, 25]

3 Akkujen kierrätyksen lainsäädäntö

Tässä luvussa tarkastellaan litiumrautafosfaattiakkujen kierrätyksen sääntelyä Suomessa, EU:ssa ja kansainvälisesti. Ensin kuvataan, miten EU:n akkuasetus ja sitä täydentävä kansallinen lainsäädäntö ohjaavat LFP-akkujen keräystä, kierrätystä ja tuottajavastuuta Suomessa sekä missä määrin LFP:n erityispiirteet jäävät kemianeutraalin sääntelyn ulkopuolelle. Tämän jälkeen analysoidaan EU-tasoista sääntelykehikkoa, joka määrittelee keräys- ja kierrätystavoitteet sekä materiaalien talteenoton, mutta jonka käytännön kannusteet painottuvat yhä NMC- ja NCA-kemioihin raudan ja fosforin jäädessä velvoitteiden ulkopuolelle. Lopuksi tarkastellaan kansainvälistä sääntelyä, kuten Kiinan LFP-painotteista tuottajavastuujärjestelmää sekä Baselin yleissopimusta ja tarkastellaan miten nämä kehykset vaikuttavat LFP-kierrätyksen kehitykseen ja mahdollisuuksiin rakentaa korkeatasoisia, LFP-kemialle soveltuvia kierrätysratkaisuja.

3.1 Suomen lainsäädäntö

Suomessa LFP-akkujen kierrätystä ohjaavat samat säädökset kuin muita litiumioniakkuja. Keskeisin EU-tason säädös on akkuasetus (EU) 2023/1542, joka korvaa vanhan paristo- ja akkudirektiivin (2006/66/EY) ja asettaa koko akkujen elinkaarta koskevan sääntelykehyksen. Asetuksen tavoitteena on varmistaa, että EU-markkinoille saatetut akut ovat kestävällä tavalla valmistettuja, turvallisia, resurssitehokkaita ja hyvin kierrätettäviä. Asetus kattaa kaikki akkutyypit riippumatta kemiallisesta koostumuksesta, joten myös LFP-akut kuuluvat sen soveltamisalaan. Akkuasetuksessa vahvistetaan erityisesti kestävyyttä, turvallisuutta ja suorituskykyä koskevia vaatimuksia. Asetuksessa taataan hiilijalanjäljen ilmoitus- ja mahdolliset raja-arvovaatimukset tietyille akkulajeille kierrätysasteet sekä kierrätysmateriaalin vähimmäisosuudet koboltille, nikkelille, lyijylle sekä litiumille tietyissä akkuluokissa. Asetuksella on myös laajennettu tuottajavastuuta sekä vaatimuksia jäteakkujen keräykselle ja käsittelylle. Asetus kytkee akut myös yleiseen EU:n jäte- ja tuottajavastuujärjestelmään. Direktiiviä 2008/98/EY muutetaan niin, että akkujen tuottajavastuujärjestelmien on oltava asetuksen mukaisia viimeistään 18.8.2025. [24, 25]

Suomessa akkuasetusta täydentää valtioneuvoston asetus paristoista ja akuista (520/2014), jonka tavoitteena on vähentää paristojen ja akkujen haitallisuutta sekä edistää käytöstä poistettujen paristojen ja akkujen keräystä ja kierrätystä. Valtioneuvoston asetus paristoista ja akuista ei erottele NMC- ja LFP-kemioita, vaan luokittelee akut käyttötarkoituksen mukaan. Näin myös LFP-ajovoima-akut ja LFP-pohjaiset energiavarastot kuuluvat samoihin keräys- ja kierrätysvelvoitteisiin kuin NMC-akut. [26]Sähkö- ja elektroniikkaromuun liittyvä valtioneuvoston asetus sähkö- ja

elektroniikkalaiteromusta (519/2014) toimeenpanee WEEE-direktiiviä (2012/19/EU) ja pyrkii vähentämään SER-romun määrää ja haitallisuutta sekä parantamaan keräystä ja kierrätystä. LFP-akkujen kannalta tämä koskee erityisesti akustoon liittyviä laitteita, kuten laurit, jotka luokitellaan SER-jätteeksi. [27]

WEEE-direktiivin ja sitä täydentävien toimeenpanosääntöjen yksi keskeinen tavoite on ehkäistä SER-jätteen laitonta vientiä maihin, joissa käsittelyolosuhteet ovat heikot. EU:n tasolla tätä täsmennetään jätteen siirtoasetuksella (Waste Shipments Regulation, WSR) ja sen uusilla muutoksilla, joissa elektroniikka jätteen vienti EU:n jäsenvaltioista maihin, jotka eivät kuulu OECD:hen (the Organisation for Economic Co-operation and Development), kielletään ja vienti OECD-maihin tehdään tiukan ennakkosuostumusmenettelyn alaiseksi. [28] Tämä koskee myös LFP-akkuihin integroitua elektroniikkaa ja akkuja silloin, kun ne luokitellaan jätteeksi [27, 28]. Käytännössä tämä tarkoittaa, että käytöstä poistetut LFP-ajovoima-akut ja LFP-pohjaiset energian varastointijärjestelmät on käsiteltävä EU:ssa hyväksytyissä laitoksissa, mikä nostaa erityisesti matala-arvoisten LFP-jätevirtojen käsittelykustannuksia mutta vähentää ympäristön kannalta ongelmallista vientiä [27, 28].

Vaikka akkuasetus on muodollisesti kemianeutraali, sen säätely rakentuu suurelta osin kalliiden ja kriittisten raaka-aineiden (Co, Ni, Li, grafiitti) ympärille ja kierrärtyksen taloudelliset kannusteet kohdistuvat NMC/NCA-kemioihin jättäen LFP:n lainsäädännön ohjausvaikutuksen ulkokehälle. Kierrätysmateriaalin vähimmäisosuudet sekä kierrätysasteet on määritelty erityisesti koboltille, nikkelille, lyijylle ja litiumille. LFP ei sisällä kobolttia tai nikkeliä, joten LFP:n akkujen kannalta jäljelle jäävät litium ja grafiitti. [24] Tämä heikentää taloudellista kannustinta kehittää LFP:lle spesifisiä korkean jalostusasteen kierrätysmenetelmiä, vaikka tutkimuksessa keskitytään kestäviin ratkaisuihin LFP:n kierrätyksen suhteen.
Asetus ei myöskään aseta suoria tavoitteita raudan tai fosforin korkeatasoiselle kierrätykselle, vaikka juuri rauta-fosfaattirunko on LFP:n keskeinen osa [24]. LFP-katodimateriaalin palauttaminen suoraan uudeksi $FePO_4$-katodiksi jää tällöin pitkälti markkinavoimien ja tutkimusrahoituksen varaan [24].
Tuottajavastuun toteutusta seurataan pääosin akkulajien tasolla, ei kemioiden tasolla [26, 29]. Näin LFP:n kasvava markkinaosuus esimerkiksi sähköbusseissa ja stationaarisissa varastoissa ei näy sääntelyn mittareissa, vaikka sen kierrätysprofiili poikkeaa selvästi NMC:stä. Tämä vaikeuttaa myös LFP-spesifisten ohjauskeinojen suunnittelua [29].

Sekä akkuasetus että kansallinen sääntely rakentuvat laajennetun tuottajavastuun varaan. Markkinoille saattaja (valmistaja, maahantuoja tai omaa tuotemerkkiä käyttävä myyjä) vastaa tuotteidensa jätehuollon järjestämisestä ja kustannuksista [24, 26, 27]. Tuottaja voi täyttää velvoitteensa liittymällä hyväksyttyyn tuottajayhteisöön [29-31]. Jätelain ja

sitä täsmentävien asetusten mukaan tuottajavastuu koskee lähtökohtaisesti kaikkia paristoja ja akkuja, myös laitteisiin ja ajoneuvoihin sisältyviä, lukuun ottamatta avaruus- ja puolustusteknologiaa [26, 29]. LFP-akkujen osalta käytännön toimijoita ovat esimerkiksi Recser Oy, joka hoitaa kannettavien paristojen ja akkujen tuottajavastuuta useiden yritysten puolesta. ERP Finland on puolestaan kansainväliseen ERP-verkostoon kuuluva tuottajayhteisö, joka vastaa sekä paristoista ja akuista että SER-laitteista. Suomen Autokierrätys Oy vastaa romuajoneuvojärjestelmästä, johon sisältyy myös sähköajoneuvojen ajovoima-akkujen käsittelyn, joka kattaa sekä NMC- että LFP-pohjaiset ajovoima-akut. SER-tuottajayhteisöt (esim. SERTY) vastaavat sähkö- ja elektroniikkalaitteiden tuottajavastuusta, mikä koskee myös LFP-järjestelmiin liittyviä laitteita, kuten latureita. [30, 31] LFP-akuilla ei ole omaa erillistä tuottajayhteisöä tai raportointiluokkaa, vaan ne sisältyvät samoihin luokkiin muiden litiumioniakkujen kanssa. Tämä on hallinnollisesti selkeää, mutta samalla LFP:n erityiset kierrätystarpeet voivat jäädä huomiotta. [29-31]

Kansallinen akkustrategia 2025 asettaa Suomelle tavoitteen kasvaa kansainvälisesti merkittäväksi toimijaksi akkualalla ja sähköistymisessä. Strategian tavoitteisiin kuuluvat esimerkiksi akku- ja sähköistymisklusterin kasvu, investointien lisääminen, kilpailukyvyn vahvistaminen sekä kiertotalouden ja digitaalisten ratkaisujen edistäminen. Strategiassa korostetaan myös lainsäädännön, sääntelyn ja standardisoinnin merkitystä ennustettavan toimintaympäristön luomisessa. [32]

LFP-akut vastaavat hyvin akkustrategian tavoitteita, koska ne ovat turvallisia, pitkäikäisiä eivätkä sisällä kobolttia [33]. Silti EU-sääntely ohjaa taloudelliset kannustimet ennen kaikkea koboltti- ja nikkelipitoisten akkujen kierrätykseen [32]. Siksi Suomessa olisi tarve tarkentaa ohjauskeinoja niin, että ne huomioivat paremmin myös LFP-akut [33].

TEM:n Selvitys akkuklusterin tutkimusinfrastruktuureista (2022:25) toteuttaa akkustrategian toimeenpanoa kartoittamalla akkuarvoketjun tutkimusinfrastruktuurit ja tunnistamalla puutteet esimerkiksi kierrätysteknologioissa, testialustoissa ja data-alustoissa [33]. Raportissa korostetaan tarvetta kehittää kierrätysteknologioita ja -ratkaisuja osana ”kestävät akkumateriaalit” -kokonaisuutta, verkottuneita testialustoja ja tutkimusympäristöjä sekä yhteisiä data- ja tietohallintaratkaisuja, joihin tutkimus- ja teolliset hankkeet voivat tallentaa tulosaineistoa jatkokäyttöä varten [32]. Nämä ovat tärkeitä eirtyisesti LFP-akkujen kierrätyksen kannattavuuden kannalta. Kierrätys paranee, jos saadaan kehitettyä LFP:lle omia kierrätysenetelmiä ja jos dataa, kuten tulevia digitaalisia akkupasseja, voidaan käyttää siihen, että akkujen kemia tunnistetaan ja jokainen jätevirta ohjataan oikeaan kierrätysprosessiin [24, 32, 33].

3.2 EU-tason lainsäädäntö

EU:n akkua koskeva asetus luo koko akkuarvoketjun kattavan kehyksen, jonka tavoitteena on pienentää akkujen ympäristö- ja ilmastovaikutuksia, edistää kiertotaloutta ja vahvistaa materiaaliturvaa. Asetus määrittelee vaatimuksia keräysasteille, kierrätyshyötysuhteelle, materiaalien talteenottoprosenteille, hiilijalanjäljen raportoinnille ja tuottajavastuulle. Asetus on kirjoitettu kemianeutraaliksi koskemaan kaikkia litiumioniakkuja. [24, 34]

LFP ja NMC ovat globaalin sähköautoteollisuuden pääkemiat, ja esimerkiksi Kiinassa LFP:n asennettu kapasiteetti ylitti NMC:n jo vuonna 2021 [35]. Samalla Global material flows of lithium -tutkimus osoittaa, että merkittävä osa litiumvirroista sitoutuu nimenomaan LFP-katodeihin, ja korostaa tarvetta seurata materiaalivirtoja aina käyttöön ja elinkaaren loppuun asti, jotta resurssien käyttö pysyy kestävänä. [14]

Vaikka asetus on kemianeutraali, sen käytännön toimeenpano ja taloudelliset kannusteet ovat pitkälti rakentuneet NMC-tyyppisten, korkean koboltti- ja nikkelipitoisuuden akkujen ympärille. Hydrometallurgiset prosessit, joita EU-tason sääntely käytännössä ohjaa, on optimoitu Co- ja Ni-rikkaiden akkujen kierrätykseen. Menetelmän taloudellinen kannattavuus heikkenee, kun kierrätetään akkuja, joiden koboltti- ja nikkelipitoisuus on matala, kuten LFP-akuissa. Tällöin litium voidaan ottaa talteen, mutta pääosa massasta ($FePO_4$, hiili, elektrolyytti) ei tuo riittävästi arvoa kattamaan prosessin kustannuksia. [34]

“Urgent Call to Mandate Recycling of LFP Batteries” -kirjeessä ympäristöjärjestöt ja kierrätysalan yritykset nostavat esiin, että luonnos sallisi hapen, hiilen, raudan, fosforin, kloorin ja rikin jättämisen kierrätyshyötysuhteen laskennan ulkopuolelle. Koska LFP-akuissa juuri rauta ja fosfori muodostavat suuren osan kennon massasta, LFP:n varsinainen aktiivimateriaali voidaan täyttää muodolliset prosenttitavoitteet kierrättämättä, kun pelkkä kuori, alumiini ja kupari käsitellään. [36] Kirje muistuttaa, että LFP ei ole vain marginaalinen kemia, vaan jo EV-markkinoiden valtavirtaa. Vuonna 2023 noin 15% Euroopassa myydyistä sähköautoista sisälsi LFP-akkuja, osuuden ennustetaan kasvavan 27%:iin (2024) ja 38%:iin (2025), ja vuoteen 2030 mennessä LFP:n arvioidaan kattavan jo noin 57% EV-myynnistä. Raudan ja fosforin jättäminen pois mahdollistaa suuren osan LFP-akun massasta loppusijoittavaksi, vaikka sääntelyn kierrätysvelvoitteet näennäisesti täyttyvät. [1, 36]

Nykyinen EU-sääntely asettaa kaikille markkinoille saatettaville akuille sitovat keräys- ja kierrätystavoitteet, jotka kiristyvät portaittain 2020- ja 2030-luvuilla [24, 34]. Kannettaville akuille ja kevyiden liikkumissovellusten akuille on määritelty nousevat keräysasteet ja ajoneuvo- sekä teollisuusakkujen osalta tuottajilla on velvollisuus järjestää

järjestelmällinen keräys ja käsittely myös silloin, kun kyse on edullisemmista LFP-akuista eikä vain arvometallipitoisista NMC-järjestelmistä [24, 34]. Samaan aikaan sähkö- ja elektroniikkaromua koskeva sääntely rajoittaa romun vientiä EU:n ulkopuolelle, mikä käytännössä tarkoittaa, että myös käytöstä poistetut LFP-akut on käsiteltävä pääosin unionin sisällä eivätkä ne voi poistua järjestelmästä hallitsemattomina jätevirtoina [34].

Kierrätyspuolella on määritelty sekä kokonaiskierrätyshyötysuhteen vähimmäistasot litiumioniakuille että materiaalikohtaiset talteenottotavoitteet koboltille, kuparille, lyijylle, nikkelille ja litiumille, joiden on noustava asteittain kohti 2030-lukua [24, 34]. Uusille akuille asetetut velvoitteet käyttää tietty vähimmäisosuus kierrätettyä metallia vahvistavat suuntaa jäteakkujen tehokkaammasta uudelleenkäytöstä, mukaan lukien LFP-kemia [24].

Vallitsevat hydrometallurgiset ja pyrometallurgiset prosessit on pitkälti optimoitu arvometallien talteenottoon, ja taloudellinen kannattavuus heikkenee, kun siirrytään akkuihin, joiden koboltti- ja nikkelipitoisuus on matala, kuten LFP-kennoihin [11, 19, 34].

Kestävyys, toimiva kiertotalous, resurssien tehokas käyttö ja kohtuullinen kustannustaso ovat LFP:n näkökulmasta hyvin LFP:n ominaisuuksia tukevia [24, 34]. Aiemmin mainittujen ominaisuuksien lisäksi on mahdollista toissijaiseen käyttöön, mikä tukee pyrkimystä pidentää akkujen elinkaarta ennen varsinaista kierrätystä [11, 37]. Materiaalivirta-analyysit osoittavat, että litiumvirtoja on tarkasteltava koko ketjun läpi, myös silloin kun litium on sidottu LFP-katodeihin [14]. Ilman tätä LFP-akkuihin sitoutuva litiumvaranto ja siihen liittyvät rauta- ja fosforivirrat voivat jäädä huomiotta, mikä vaikeuttaa kiertotalous- ja resurssitehokkuustavoitteiden saavuttamista [14, 38].

Lisäksi LFP:n koboltiton ja nikkelivapaa koostumus vähentää riippuvuutta niukoista ja geopoliittisesti herkistä raaka-aineista ja tukee näin EU:n strategisia tavoitteita materiaalihuollon riskien pienentämiseksi [24, 34, 37]. Alhaisempi materiaalikustannus mahdollistaa laajemman sähköistymisen ilman, että tuotantoketju on yhtä tiukasti sidottu kriittisiksi määriteltyihin metalleihin [1, 37].

Digitaalisen akkupassin ja elinkaaritiedon kautta syntyy mahdollisuus hienosäätää ohjauskeinoja siten, että eri kemiat voidaan ottaa huomioon erilaisten materiaaliprofiilien ja kierrätysmahdollisuuksien mukaisesti [38, 39]. Kun tietoa kertyy siitä, millaisia määriä LFP- ja NMC-akkuja on missäkin vaiheessa elinkaarta, voidaan tulevissa tarkistuksissa suunnitella kemiasidonnaisia kierrätysvelvoitteita ja taloudellisia kannusteita nykyistä täsmällisemmin [24, 39].

Ongelmakohtiin on jo reagoitu sekä poliittisella tasolla että tutkimus- ja innovaatiorintamalla. Poliittisessa keskustelussa on korostettu tarvetta varmistaa, että kierrätyshyötysuhdetta koskevat laskentatavat todella kattavat kaikki litiumioniakut eivätkä johda siihen, että LFP-virtojen keskeiset materiaalit voitaisiin sivuuttaa [24, 36]. Esillä on ollut vaatimus siitä, että nykyiset prosenttitavoitteet tulisi tulkita niin, että myös rauta ja fosfori kuuluvat niiden piiriin, kun kyse on LFP-jätteestä [36].

Tutkimuksessa on kehitetty LFP:lle soveltuvia kierrätysratkaisuja, jotka pyrkivät ohittamaan perinteisten, NMC-optimoitujen prosessien rajoitteita [19, 37, 38]. Kirjallisuudessa kuvataan esimerkiksi selektiivisestä liuotuksesta ja suorasta regeneroinnista koostuvia prosessiketjuja, joissa litium otetaan talteen ja $FePO_4$-matriisi pyritään säilyttämään tai palauttamaan uudelleenkäyttöön [3, 11]. Tällaiset menetelmät voivat vähentää energian ja kemikaalien kulutusta sekä jätevirtoja verrattuna vahvasti metalliarvoon nojaaviin reitteihin [11, 19, 37].

Samanaikaisesti akkupassia ja muuta elinkaaritiedon hallintaa koskevat avaukset tarjoavat välineitä sille, että LFP:n asemaa voidaan jatkossa tarkastella erikseen ja tarvittaessa säätää ohjauskeinoja, kuten tuottajavastuuta ja talteenottotavoitteita, kemiasidonnaisesti [34, 39]. Näin EU-tason sääntely voi ajan myötä siirtyä NMC-painotteisesta tulkinnasta kohti aidosti kemianeutraalia ja materiaalivirrat kattavaa järjestelmää, jossa LFP-akkuihin sitoutuvat resurssit hyödynnetään täysimääräisesti [14, 24, 39].

3.3 Kansainvälinen lainsäädäntö

Kiinassa on rakennettu kattava akkujen tuottajavastuu- ja lupajärjestelmä, jossa akkuvalmistajilla ja ajoneuvovalmistajilla on velvollisuus huolehtia akkujen takaisinotosta ja toimittamisesta valtuutetuille kierrättäjille. Tähän kytkeytyvät tekniset standardit ja rekisterit, jotka edellyttävät jäljitettävyyttä sekä vähimmäissuorituskykyä litiumin ja muiden komponenttien talteenotossa. [11] [5] Koska Kiinan sähköautomarkkina painottuu voimakkaasti LFP-kemiaan, sääntely ja markkinakoko ovat yhdessä vauhdittaneet erityisesti LFP-spesifisten hydrometallurgisten ja suoran regeneroinnin prosessien kaupallistamista. Käytetystä LFP-katodista tuotetaan suoraan uudelleenkäytettävää $LiFePO_4$-materiaalia ilman täydellistä metalliseosten purkua. [3, 11] Näin sääntely ei ainoastaan velvoita kierrättämään, vaan luo mittakaavaedut ja ennustettavuuden, jotka ovat mahdollistaneet LFP-kohdennettujen kierrätyslaitosten syntymisen. [3, 11, 34, 39]

EU-alueen ulkopuolella monet maat, kuten Yhdysvallat, Kanada, osa Aasian valtioista, nojaavat yhdistelmään vaarallisen jätteen sääntelyä, akku- tai sähkö- ja elektroniikkajätelakeja ja tuottajavastuuta. Nämä puitteet koskevat periaatteessa kaikkia litiumioniakkuja, myös LFP-kemiaa, mutta

käytännön toimeenpanossa painopiste on usein kriittisten ja arvokkaiden metallien talteenotossa NMC- ja NCA-akuista. [34] Taloudelliset kannustimet (esim. kierrätyslaitosten tukiohjelmat ja tutkimuspanostukset) suuntautuvat tällöin prosesseihin, jotka purkavat katodimateriaalin metalli-ioneiksi, eivätkä suorana regenerointina tai fosforin ja raudan korkean kierrätysasteen varmistamisena. LFP-akut sisältyvät sääntelyn piiriin, mutta ne eivät usein ole erityisen tarkastelun kohteena tai omana kemiallisena luokkanaan, mikä voi johtaa siihen, että niiden keräystä ja jatkokäsittelyä ei optimoida. [3, 11, 34, 39]

Kansainvälisellä tasolla akkujen ja akkumurskeen rajat ylittävä liikkuminen on sidottu Baselin yleissopimukseen, joka säätelee vaarallisten ja muiden jätteiden siirtoja sekä edellyttää, että jätteet käsitellään mahdollisimman lähellä niiden syntypaikkaa ympäristön kannalta asianmukaisella tavalla. Sopimuksen periaatteena on, että vaarallisten jätteiden vienti toisiin maihin sallitaan vain poikkeustapauksissa ja tiukoin ennakkoilmoitus- ja suostumusmenettelyin. Lisäksi Baselin sopimuksen Ban Amendment -lisäys kieltää vaarallisten jätteiden viennin OECD-/EU-maista maihin, jotka eivät kuulu tähän ryhmään. [40, 41]

Sopimuksen liitteissä määritellään, milloin jäte luokitellaan vaaralliseksi (Annex VIII, ”List A”) ja milloin ei (Annex IX, ”List B”). Sekalaiset tai vaarallisia aineita sisältävät akku- ja elektroniikkajätteet kuuluvat yleensä vaarallisten jätteiden luokkiin, esimerkiksi A1160 ja A1170, kun taas tietyt ”määriteltyä spesifikaatiota vastaavat jäteakut” voidaan listata ei-vaarallisina (B1090), jos ne eivät sisällä esimerkiksi lyijyä, kadmiumia tai elohopeaa ja täyttävät tietyt puhtaus- ja käsittelyvaatimukset. LFP-akut eivät sisällä raskasmetalleja, minkä vuoksi niitä voisi periaatteessa käsitellä tietyissä tilanteissa vähemmän vaarallisina. Käytännössä kuitenkin monet valtiot luokittelevat sekalaiset litiumioniakkujätteet varmuuden vuoksi vaaralliseksi jätteeksi, mikä rajoittaa niiden vientiä ja ohjaa rakentamaan kierrätyskapasiteettia omille markkinoille. [40, 41]

Vaikka LFP-akut eivät sisällä suuria määriä raskametalleja EU:n vaarallisuusluokittelussa keskeistä on jäteluettelon mukainen jätekoodi sekä jätteen vaarallisuusominaisuudet, joista litiumperusteisissa akuissa korostuvat erityisesti paloon ja lämpökarkaamiseen liittyvät riskit. Tämän vuoksi komissio on päivittänyt jäteluetteloa siten, että litiumperusteiset akut, mukaan lukien LFP, kuuluvat vaarallisen jätteen koodin piiriin: “waste lithium-based batteries” on merkitty vaaralliseksi jätteeksi (16 06 07*), ja myös yhdyskuntajätteessä erikseen kerätyt litiumperusteiset akut luokitellaan vastaavasti (20 01 43*). Lisäksi akkujen mekaanisessa ja termisessä esikäsittelyssä syntyvä musta massa on erikseen osoitettu vaaralliseksi jätteeksi litiumperusteisten akkujen osalta (19 14 02*). Näin ollen LFP-akkujen käsittely vähemmän vaarallisina on jatkossa lähtökohtaisesti vaikeaa jätekooditason luokittelussa, vaikka niiden katodimateriaali ei sisällä samoja toksisiksi metalleja kuin monet NMC-

kemiat. Huomion arvoista on, että päätöstä aletaan soveltaa 9.12.2026 alkaen. [42]

EU:ssa ”sallitut raskasmetallipitoisuudet” tarkoittavat eri asioita riippuen siitä, tarkastellaanko akkua tuotteena vai käsittelyssä syntyvää mustaa massaa jätteenä. Akkuasetuksessa (EU) 2023/1542 on akuille tuotteena asetetut pitoisuusrajat elohopealle (0,0005 wt-%) sekä kannettaville akuille kadmiumille (0,002 wt-%) ja lyijylle (0,01 wt-% 18.8.2024 alkaen), ja lisäksi Cd- ja Pb-pitoisuuksiin sidotut merkintärajat. Sen sijaan mustalle massalle ei ole EU:ssa yhtä yleistä “sallittua wt-%”-rajaa, jolla se muuttuisi automaattisesti vähemmän vaaralliseksi; arviointi kytkeytyy jäteluokitukseen ja käytännön käsittelyvaihtoehtoihin. Jos mustaa massaa joudutaan sijoittamaan kaatopaikalle, soveltuvuutta ohjataan tyypillisesti liukoisuustesteillä (esim. L/S 10 l/kg), joissa raja-arvot metalleille (kuten Cu, Pb, Ni, Zn, Cd, Hg) ovat hyvin matalia etenkin inertin jätteen luokassa. [42-45]

Taulukko 2. LFP-akkujen raskasmetallirajat EU-markkinoilla (pitoisuus akussa, wt-%). [43]

Metalli	Raja-arvo (wt-%)	Vastaava (mg/kg)	Soveltuvuus
Elohopea (Hg)	≤ 0,0005	≤ 5	Kaikki akut
Kadmium (Cd)	≤ 0,002	≤ 20	kannettavat akut
Lyijy (Pb)	≤ 0,01	≤ 100	kannettavat akut

Taulukko 3. Mustan massan raskasmetallien liukoisuusrajat (mg/kg kuiva aine, L/S = 10 l/kg). Testissä käytetään 10 litraa uuttoliuosta per 1 kg kuivaa kiintoainetta. [42]

Metalli	Inertti jäte	Vaaraton jäte	Vaarallinen jäte
Kadmium (Cd)	0,04	1	5
Kromi (Cr)	0,5	10	70
Kupari (Cu)	2	50	100
Elohopea (Hg)	0,01	0,2	2
Nikkeli (Ni)	0,4	10	40
Lyijy (Pb)	0,5	10	50
Sinkki (Zn)	4	50	200

Luokittelu vaikeuttaa akkujätteen viemistä esimerkiksi Aasiaan pelkän halvemman käsittelyn vuoksi ja vähentää riskiä, että LFP-akut päätyvät heikosti valvottuihin käsittelyolosuhteisiin. Toisaalta se voi hidastaa LFP-spesifisten kierrätysteknologioiden skaalautumista, jos tehokkain ja kehittynein LFP-kierrätyskapasiteetti sijaitsee maissa, joihin vienti on rajoitettua. Käytännössä osa akkumurskeesta ja akkuromusta on edelleen

liikkunut kansainvälisesti, mutta hallitumpien reittien kautta ja yhä tiukemman valvonnan alaisena.

Kiina on LFP-kierrätyksen teknologinen edelläkävijä, koska sen LFP-painotteinen ajoneuvokanta ja laaja stationäärinen varastointi sekä poliittinen ohjaus, kuten tuottajavastuu, standardit, kierrätysinvestointien tuki ovat pakottaneet teollisuuden kehittämään LFP-kemialle sopivia hydrometallurgisia ja suoran regeneroinnin prosesseja. [10, 11] Euroopassa ja monissa muissa talouksissa sääntely on ollut suurilta osin metallien arvosta riippuvaista, jolloin NMC-prosessit ovat kehittyneet nopeammin ja LFP-spesifiset ratkaisut ovat jääneet jälkeen. Toisaalta tiukentuvat keräys- ja kierrätysvelvoitteet, digitaalisten akkupassien käyttöönotto sekä kansainvälisesti yhtenäistyvät standardit luovat nyt painetta ottaa myös LFP-kemia paremmin huomioon esimerkiksi laajentamalla kierrätysteho- ja materiaalintalteenottotavoitteita litiumin lisäksi fosforiin ja rautaan sekä panostamalla suoran regeneroinnin kehittämiseen. [10, 34, 39]

Myös kansainvälisesti akkujen kierrätyssääntely on edennyt selvästi nopeammin kuin LFP-kohtaiset linjaukset. Lainsäädännön yleiset tavoitteet, kuten turvallisuus, ympäristönsuojelu, kiertotalous ja raaka-aineomavaraisuus soveltuvat sinänsä hyvin myös LFP-kemiaan, mutta käytännön toimeenpano ja taloudelliset kannustimet on suunniteltu pitkälti NMC-akuille. Tämä luo riskin, että LFP-akkujen kasvava jätevirta jää osittain keräämättä tai päätyy alhaisen lisäarvon käsittelyyn, vaikka litium ja fosfori olisivat strategisesti tärkeitä. Samalla Baselin yleissopimuksen rajoitukset vaarallisen jätteen viennille, sekä Kiinan ja muiden edelläkävijöiden omat tiukat järjestelmät, rajaavat ulos halvan ja valvonnaltaan heikon kierrätyksen. [3, 11, 34, 39]

4 Kehityssuunnat ja ratkaisumallit

Mahdollisia kehityssuuntia ja ratkaisumalleja LFP-akkujen kierrätyksen lainsäädännön vahvistamiseksi voidaan hahmotella neljään toisiinsa linkittyvään kokonaisuuteen: digitaalinen akkupassi, LFP-kemialle soveltuvat kierrätysmenetelmät, poliittistaloudellinen ohjaus sekä tutkimus- ja innovaatiopanostukset kansallisella ja EU-tasolla.

EU:n akkuregulaatio (EU) 2023/1542 velvoittaa, että suurikapasiteettiset teollisuus- ja sähköajoneuvoakut varustetaan digitaalisella akkupassilla noin 3,5 vuoden siirtymäajan jälkeen asetuksen voimaantulosta. [24] Passin tavoitteena on seurata akun koko elinkaarta ja tarjota luotettavaa tietoa materiaalisisällöstä, hiilijalanjäljestä, turvallisuudesta ja kierrätettävyydestä. Tutkimus digitaalisista akkupasseista korostaa, että standardoitu tietomalli ja yhteinen dataspace-arkkitehtuuri ovat edellytys sille, että passi todella tukee kiertotaloutta, eikä jää pelkäksi raportointityökaluksi. [10, 39]

LFP-akkuihin liittyen akkupassin keskeinen kehityssuunta on kemian ja materiaalivirtojen riittävän tarkka kuvaus. Passi voisi sisältää esimerkiksi katodin tyypin (LFP/LMFP), litium-, rauta- ja fosforipitoisuudet, tuotantoprosessin ja aiemmat käsittelyvaiheet. Tällöin sääntelyviranomaiset ja tuottajavastuuyhteisöt pystyvät erottamaan LFP-virrat muista litiumioniakuista ja seuraamaan, mihin niiden materiaalit todella päätyvät. Tämä olisi suora vastaus huoleen, että kierrätyksen tehokkuuden laskentamenetelmä rajaisi raudan ja fosforin ulos ja jättäisi LFP-akut käytännössä kierrätysvelvoitteiden ulkopuolelle. [36] Lisäksi akkupassi voi helpottaa LFP-akkuihin soveltuvien prosessien, kuten suoran regeneroinnin ja selektiivisen hydrometallurgian, todentamista. Jos passi sisältää tiedon kennokohtaisesta kemiasta, käyttöprofiilista ja kunnosta, voitaisiin valita tarkemmin menetelmä akun uusiokäytön toteuttamiseksi.

Viime vuosien tutkimus esittää kuitenkin LFP:lle spesifejä ratkaisuja: selektiiviset hydrometallurgiset liuotusprosessit, joissa litium liuotetaan, mutta $FePO_4$ säilytetään korkealla puhtaudella; liuotus, jolla saadaan vakaa liuotusprosessi, joka kestää erilaisia syötteitä; suorakierrätys, jossa käytetty katodi ladataan uudelleen litiumilla ja palautetaan takaisin akkulaatuun; sekä prosessikonseptit, joissa mekaaninen esikäsittely, lämpökäsittely ja kemiallinen kierrätys yhdistetään niin, että myös rauta ja fosfori päätyvät tuotteiksi (esim. uusiksi katodimateriaaleiksi tai kemianteollisuuden raaka-aineiksi). [5, 11, 24]

Lainsäädännön kannalta keskeinen kehityssuunta onkin se, että säädöksissä määritellään kierrätyksen tehokkuus ja materiaalien talteenotto niin, että myös Fe ja P lasketaan mukaan LFP-akkujen kohdalla. [36] EU:n akkuregulaatio rakentaa laajan tuottajavastuujärjestelmän, jossa markkinoille saattajat vastaavat akkujen keräys- ja

jätehuoltokustannuksista koko unionin alueella, joko itse tai tuottajavastuujärjestöjen kautta. [24]

Koska LFP:n romuarvo on alhainen, markkina ei välttämättä investoi edistyneisiin LFP-prosesseihin ilman lisäohjausta. Mahdollisia ratkaisumalleja ovat esimerkiksi erilliset LFP-kohtaiset kierrätystavoitteet, kun LFP-osuus ajoneuvo- ja varastoakuissa kasvaa tietyn kynnysarvon yli. Tavoitteet voisivat koskea sekä litiumia että raudan ja fosforin hyödyntämistä. [36, 39] Vaihtoehtona on myös ekosäädellyt tuottajavastuumaksut, joissa LFP-akkujen maksuja pienennetään, jos ne ovat suunniteltu helppoon purkamiseen ja prosesseihin, joissa Fe ja P päätyvät tuotteisiin, mutta vaihtoehtoisesti nostetaan, jos akkuja käsitellään massapoltossa tai prosesseissa, joissa suuri osa massasta päätyy jätteeksi. [24] Myös kierrätyspalkkiot tai panttimallit LFP-akuista, jotka tuodaan takaisin virallisiin keräyskanaviin, voisivat tarjota ratkaisun kannustin ongelmaan. Etenkin EV-akkujen kierrätyksessä vaihtoehtoja voi löytyä eirtyisesti Kiinan mallista, jossa tiukka tuottajavastuu, akkurekisterit ja valvotut kierrätyslaitokset on yhdistetty kannustimiin ja standardoituihin prosesseihin, ja jossa hydrometallurgia ja suora kierrätys ovat jo keskeisessä roolissa EV-akkujen käsittelyssä. [1] Tällainen poliittinen ja taloudellinen ohjaus voisi tasapainottaa tilannetta, jossa LFP valitaan usein turvallisuuden ja hinnan takia, mutta romuvaiheessa markkina ei yksin riitä varmistamaan korkeaa kierrätysastetta.

LFP:hen sopivat kierrätysmenetelmät ja digitaalinen akkupassi eivät toteudu ilman pitkäjänteistä tutkimus- ja innovaatiorahoitusta. EU-tasolla akkujen kiertotalous, digitaalinen akkupassi ja kierrätysteknologiat ovat jo osa tutkimusohjelmia ja pilottihankkeita, joissa kehitetään esimerkiksi passisisältöä sekä vähähiilisiä tuotanto- ja kierrätysratkaisuja. [10]

Suomessa kansallinen akkustrategia 2025 korostaa kiertotaloutta, vastuullisuutta ja digitaalisten ratkaisujen hyödyntämistä osana kilpailukykyistä akkuekosysteemiä sekä esittää tutkimus- ja infrastruktuuripanostuksia koko arvoketjuun mukaan lukien kierrätys. [32] Akkuklusterin tutkimusinfrastruktuureja kartoittava selvitys nostaa esiin tarpeen esimerkiksi akkujen turvallisuustestauslaboratoriolle, mekaanisen esikäsittelyn ja kierrätyksen kehittämiselle sekä yhteiselle data-alustalle. [33] Nämä ovat suoraan relevantteja LFP:n kannalta, koska LFP-virtojen käsittely edellyttää sekä uusia prosessikonsepteja että luotettavaa dataa materiaalivirroista.

Lainsäädännöllisesti tulevaisuuden kehityssuuntia voivat olla esimerkiksi EU- ja kansallisten tukiohjelmien kytkeminen nimenomaan LFP-kohdennettuun kierrätysinfrastruktuuriin, kuten pilot- ja demonstraatiolaitokset hydrometallurgiaan ja suoraan regenerointiin. Mahdollinen vaihtoehto on myös akkupassia koskevien teknisten säädösten käyttäminen tutkimusinfrastruktuurien testauksessa, jossa uudet

prosessit validoidaan akkupassidatan avulla, ja hyväksytyt käytännöt skaalataan markkinalle. [33] Tulevaisuudessa vaaditaan mahdollisesti eri ratkaisujen yhdistelmiä, jotta myös nopeasti yleistyvien LFP-akkujen säädäntö tukee täysimääräisesti EU:n kiertotalous- ja ilmastotavoitteita.

5 Yhteenveto

LFP-akkujen nopea yleistyminen sähköajoneuvoissa, työkoneissa ja stationäärisessä varastoinnissa osoittaa, että kyse ei ole enää marginaalisesta kemiallisesta erityistapauksesta, vaan yhdestä vihreän siirtymän keskeisestä teknologisesta ratkaisusta. Kun merkittävä osa kierrätykseen tulevista akuista kuuluu LFP-kemiaan, lainsäädäntö ei voi kohdella niitä NMC- tai NCA-akkuihin verrattavana sivujuonteena, vaan LFP on tunnistettava omana materiaaliprofiilinaan sekä sääntelyssä että kierrätyksen taloudellisissa kannustimissa. Muuten syntyy tilanne, jossa käyttö perustuu LFP:n etuihin, kuten turvallisuus, pitkä elinkaari, alhaiset materiaalikustannukset, mutta elinkaaren loppupää jää sääntelyn näkökulmasta vajaasti ohjatuksi.

Nykyiset akkusäädökset ovat muodollisesti kemianeutraaleja, mutta käytännössä osin epäyhdenvertaisia eri akkukemioille. Kierrätysasteiden ja kierrätysmateriaalin vähimmäisosuuksien mitoitus on rakennettu pitkälti koboltti- ja nikkelipitoisten katodien logiikalle. Tämä ohjaa investointeja NMC/NCA-optimoituihin pyro- ja hydrometallurgisiin prosesseihin, joiden liiketoimintamalli perustuu arvometallien talteenottoon. LFP:n kohdalla tällainen ohjaus ei toimi samalla tavalla, kun kobolttia ja nikkeliä ei ole, kierrätyksen taloudellinen on heikko, vaikka LFP-virrat määrällisesti kasvavat. Tällöin on riskinä, että LFP-jätevirta käsitellään alhaisen lisäarvon reiteissä tai jää osin kokonaan järjestelmän ulkopuolelle, vaikka litium ja fosfaattirunko olisivat strategisesti tärkeitä resursseja.

EU:n kiertotalous- ja ilmastotavoitteiden kannalta on keskeistä, että rauta ja fosfori on sisällytettävä täysimääräisesti kierrätys- ja talteenottovaatimuksiin silloin, kun kyse on LFP-akuista. Mikäli kierrätyshyötysuhde ja materiaalikohtaiset tavoitteet määritellään jatkossakin vain litiumin ja arvometallien kautta, suuri osa LFP-akkujen massasta voi päätyä jätteeksi muodollisesti vaatimukset täyttävissä prosesseissa. Tämä on ristiriidassa sekä resurssitehokkuuden että ilmastotavoitteiden kanssa, sillä sekä litium että fosfaatti edellyttävät energiavaltaista primäärituotantoa. Lainsäädännön tulevissa tarkistuksissa tulisi siten arvioida, miten rauta ja fosfaatti voidaan ottaa eksplisiittisesti mukaan ainakin LFP-jätteelle asetettuihin tavoitteisiin ja laskentamalleihin.

LFP-kierrätyksen kehittäminen edellyttää myös teknologisten ratkaisujen kehittämistä ja tukemista. Perinteisten pyrometallurgisten prosessien varaan rakentuva malli ei tarjoa riittävää vastetta LFP:n erityispiirteisiin, vaan tarvitaan LFP-kemialle soveltuvia hydrometallurgisia ja suoran kierrätyksen reittejä, joissa hyödynnetään rauta-fosfaattirungon säilyvyyttä. Näiden menetelmien skaalaaminen laboratoriosta teolliseen mittakaavaan ei tapahdu pelkästään markkinavoimien ohjaamana, vaan edellyttää selkeämpää sääntelyä ja demonstraatiohankkeita. Lainsäädäntö voi tukea tätä esimerkiksi tarkentamalla kierrätystehon määritelmiä ja

litiumrautafosfaatti-tuotteita tuottavat prosessit hyväksyttävinä kierrätysreitteinä sekä ohjaamalla tuottajavastuujärjestelmän maksuja suosimaan LFP:lle soveltuvia ratkaisuja.

Kansallinen akkustrategia ja akkuklusterin tutkimusinfrastruktuuriselvitykset osoittavat, että Suomi tavoittelee asemaa vastuullisen ja kilpailukykyisen akkuekosysteemin rakentajana. Koboltti- ja nikkelivapaa kemia, pitkä käyttöikä ja turvallisuus tukevat sekä ympäristötavoitteita että vihreän teollisuuden kilpailukykyä. Suomi voi toimia suunnannäyttäjänä ohjaamalla tutkimus- ja infrastruktuuripanostuksia nimenomaan LFP-kemialle soveltuviin kierrätysmenetelmiin, mekaanisen esikäsittelyn ja suorakierrätysprosessien pilotointiin sekä digitaalisiin ratkaisuihin, kuten akkupassidataan perustuviin lajittelu- ja ohjausjärjestelmiin.

Käytännössä tämä tarkoittaa, että kansallisessa toimeenpanossa ja politiikassa LFP tulisi nostaa näkyvästi esiin omana tarkastelukohteenaan. Tuottajayhteisöjen raportointia voitaisiin kehittää niin, että LFP-virrat erottuvat selkeämmin muista litiumioniakuista. Samalla kierrätys- ja testausinfrastruktuureja rakennettaessa olisi syytä varmistaa, jotta niissä voidaan tutkia ja demonstroida LFP-spesifisiä prosesseja, ei ainoastaan NMC-profiilille optimoituja ratkaisuja. Näin Suomen sääntely, tutkimus ja teolliset investoinnit voisivat yhdessä luoda mallin siitä, miten LFP-akkujen kasvava rooli voidaan sovittaa yhteen kiertotalous- ja ilmastotavoitteiden kanssa.

LFP-akkujen kierrätyksen lainsäädäntö on tällä hetkellä vähemmän kehittyneempi kuin itse teknologian käyttöönotto. LFP:n markkinaosuus ja strateginen merkitys ovat nousseet nopeasti, mutta sääntely ja taloudelliset ohjauskeinot nojaavat yhä NMC-keskeiseen ajattelutapaan. Jotta akkujen kiertotalous toteutuu aidosti kemianeutraalisti, on sekä EU-tason että kansallisen sääntelyn päivitettävä lähtökohtansa siten, että LFP:tä käsitellään täysimääräistä kiertoa edellyttävänä kemiallisena luokkanaan.

Lähteet

[1] A. International Energy, "Global EV Outlook 2025: Expanding sales in diverse markets," International Energy Agency, Paris, 2025.

[2] H. Berg and M. Zackrisson, "Perspectives on environmental and cost assessment of lithium metal negative electrodes in electric vehicle traction batteries," *Journal of Power Sources,* vol. 415, pp. 83–90, 2019/03/01/ 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01.047.

[3] J. Yan, J. Qian, Y. Li, L. Li, F. Wu, and R. Chen, "Toward Sustainable Lithium Iron Phosphate in Lithium-Ion Batteries: Regeneration Strategies and Their Challenges," *Advanced Functional Materials,* vol. 34, no. 44, p. 2405055, 2024/10/01 2024, doi: https://doi.org/10.1002/adfm.202405055.

[4] T. Elwert, Q. S. Hua, and K. Schneider, "Recycling of Lithium Iron Phosphate Batteries: Future Prospects and Research Needs," *Materials Science Forum,* vol. 959, pp. 49–68, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.959.49.

[5] F. Larouche *et al.*, "Progress and Status of Hydrometallurgical and Direct Recycling of Li-Ion Batteries and Beyond," *Materials*, vol. 13, no. 3, doi: 10.3390/ma13030801.

[6] L. Kurz, S. Forster, R. Wörner, and F. Reichert, "Environmental Impacts of Specific Recyclates in European Battery Regulatory-Compliant Lithium-Ion Cell Manufacturing," (in English), *Sustainability,* vol. 15, no. 1, p. 103, 20232025–05–01 2023, doi: https://doi.org/10.3390/su15010103.

[7] M. R. Palacin, "Battery Materials Design Essentials," *Accounts of Materials Research,* vol. 2, no. 5, pp. 319–326, 2021/05/28 2021, doi: 10.1021/accountsmr.1c00026.

[8] J. T. Warner, *Lithium-ion battery chemistries: A primer* (Lithium-Ion Battery Chemistries: A Primer). 2019, pp. 1–353.

[9] H. Deng *et al.*, "A comprehensive review of whole process typical hydrometallurgical technologies for recycling waste lithium-ion batteries," *Separation and Purification Technology,* Review vol. 363, 2025, Art no. 132234, doi: 10.1016/j.seppur.2025.132234.

[10] A. Al-Akrawi and M. Zackrisson, "Building a Sustainable Battery Supply Chain with Digital Battery Passports," presented at the IDIMT 2023: New Challenges for ICT and Management - 31st Interdisciplinary Information Management Talks, Linz, 2023/09/07, 2023, Conference Proceedings with Oral Presentation. [Online]. Available: https://www.scopus.com/pages/publications/85172011005.

[11] M. Wang *et al.*, "Recycling of lithium iron phosphate batteries: Status, technologies, challenges, and prospects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 163, p. 112515, 2022/07/01/ 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112515.

[12] O. Velázquez-Martínez, J. Valio, A. Santasalo-Aarnio, M. Reuter, and R. Serna-Guerrero, "A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective," *Batteries*, vol. 5, no. 4, doi: 10.3390/batteries5040068.
[13] S. Kumawat, D. Singh, and A. Saini, "Recycling of spent lithium-iron phosphate batteries: toward closing the loop," (in eng), *Materials & Manufacturing Processes,* vol. 38, no. 2, pp. 135–150, 2023, doi: 10.1080/10426914.2022.2136387.
[14] E. Petavratzi and P. Josso, "Global material flows of lithium for the lithium-ion and lithium iron phosphate battery markets," in "British Geological Survey Open Report," British Geological Survey, 2021. [Online]. Available: https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/531362/9/Main%20report.pdf
[15] Sandvik, "Sandvik introduces world's first battery-powered cable bolter," *Sandvik – News and media,* 2025. [Online]. Available: https://www.mining.sandvik/en/news-and-media/news-archive/2025/11/sandvik-introduces-worlds-first-battery-powered-cable-bolter/.
[16] M. Sandvik and S. Rock, "Sandvik introduces LFP battery technology for its BEV underground drills at MINExpo INTERNATIONAL® 2024," in *Sandvik News & Media — News archive*, ed. Las Vegas, Nevada, USA: Sandvik AB, 2024.
[17] T. Chen, M. Li, and J. Bae, "Recent Advances in Lithium Iron Phosphate Battery Technology: A Comprehensive Review," *Batteries*, vol. 10, no. 12, doi: 10.3390/batteries10120424.
[18] C. Li *et al.*, "Sustainable closed-loop recycling of spent LiFePO4 cathode materials: technological advances, environmental-economic assessment, and future perspectives," *Separation and Purification Technology,* Review vol. 382, 2026, Art no. 135717, doi: 10.1016/j.seppur.2025.135717.
[19] A. Ali, M. Al Bahrani, S. Ahmed, M. T. Islam, S. A. Qadir, and M. Shahid, "Sustainable Recycling of End-of-Life Electric Vehicle Batteries: EV Battery Recycling Frameworks in China and the USA," (in English), *Recycling,* vol. 10, p. 68, 2025/04/10 2025, doi: 10.3390/recycling10020068.
[20] M. Liu *et al.*, "Analysis of the potential resource, environmental and economic impacts of EU battery and waste battery regulations on China's lithium-ion battery industry," *Resources, Conservation and Recycling,* vol. 219, p. 108314, 2025/06/01/ 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108314.
[21] H. Walvekar, H. Beltran, S. Sripad, and M. Pecht, "Implications of the Electric Vehicle Manufacturers' Decision to Mass Adopt Lithium-Iron Phosphate Batteries," *IEEE Access,* vol. 10, pp. 63834–63843, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182726.
[22] X. Tian, Q. Ma, J. Xie, Z. Xia, and Y. Liu, "Environmental impact and economic assessment of recycling lithium iron phosphate battery cathodes: Comparison of major processes in China," *Resources,*

Conservation and Recycling, vol. 203, p. 107449, 2024/04/01/ 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107449.
[23] M. Rinne, H. Lappalainen, and M. Lundström, "Evaluating the possibilities and limitations of the pyrometallurgical recycling of waste Li-ion batteries using simulation and life cycle assessment," *Green Chemistry,* vol. 27, pp. 2522–2537, 2025/03/07 2025, doi: 10.1039/d4gc05409a.
[24] "Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC," in *Official Journal of the European Union, L 191*, ed: Publications Office of the European Union, 2023.
[25] *Regulation (EU) 2023/1542 … concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC.,* E. P. a. C. o. t. E. Union. Regulation (EU) 2023/1542, 2023.
[26] "Valtioneuvoston asetus paristoista ja akuista (520/2014)," in *Suomen säädöskokoelma*, ed, 2014.
[27] "Valtioneuvoston asetus sähkö- ja elektroniikkalaiteromusta (519/2014)," in *Suomen säädöskokoelma*, ed, 2014.
[28] C.-o. Organisation for Economic and Development, "Information about controls for transboundary movements of electrical and electronic waste (e-waste)," OECD, 2025/01/23 2025. Accessed: 2025/11/16. [Online]. Available: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/data/tools/transboundary/25-03-20-reporting-of-controls-e-waste.pdf
[29] l.-j. y. Pirkanmaan elinkeino, "Lainsäädäntö – Tuottajavastuu," (in fi), *Tuottajavastuu*. [Online]. Available: https://www.ely-keskus.fi/web/tuottajavastuu/lainsaadanto.
[30] P. European Recycling, "Tietoa tuottajavastuusta," (in fi), *ERP Finland,* 2023/01/05 2023. [Online]. Available: https://erp-recycling.org/fi-fi/tuottajille/tietoa-tuottajavastuusta/.
[31] S. E.-t. ry, "Kierrätys perustuu lainsäädäntöön," (in fi), *SERTY | SER-tuottajayhteisö*. [Online]. Available: https://serty.fi/toiminta/lainsaadanto/.
[32] (2021). *Kansallinen akkustrategia 2025*. [Online] Available: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/162684
[33] T. Fabritius *et al.*, "Selvitys akkuklusterin tutkimusinfrastruktuureista," Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki, 978-952-327-674-1, 2022–03–23 2022. [Online]. Available: https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-674-1
[34] D. Su, Y. Mei, T. Liu, and K. Amine, "Global Regulations for Sustainable Battery Recycling: Challenges and Opportunities," (in English), *Sustainability,* vol. 17, p. 3045, 2025/03/29 2025, doi: 10.3390/su17073045.

[35] P. Li, Y. Li, Y. Qiao, J. Wang, D. Zhao, and R. Yu, "Can Chinese Electric Vehicles Meet EU Batteries Regulation Targets? A Dynamic Approach to Assess the Potential for Recycled Materials Use in Chinese EV Batteries," *World Electric Vehicle Journal,* Article vol. 16, no. 7, 2025, Art no. 342, doi: 10.3390/wevj16070342.

[36] A. R. GmbH *et al.*, "Urgent Call to Mandate Recycling of LFP Batteries," Brussels, 2024–10–18 2024.

[37] E. H. Driscoll *et al.*, "Grave to Cradle: A Direct Recycling Approach for Over-Discharged LiFePO4 Electric Vehicle Cells," *Advanced Energy and Sustainability Research,* vol. n/a, no. n/a, p. 2500174, 2025/08/31 2025, doi: https://doi.org/10.1002/aesr.202500174.

[38] S. Daneshgar, A. Callegari, A. G. Capodaglio, and D. Vaccari, "The Potential Phosphorus Crisis: Resource Conservation and Possible Escape Technologies: A Review," *Resources*, vol. 7, no. 2, doi: 10.3390/resources7020037.

[39] V. Rizos and P. Urban, "Implementing the EU Digital Battery Passport: Opportunities and challenges for battery circularity," CEPS (Centre for European Policy Studies), Brussels, 2024.

[40] C. Secretariat of the Basel, "Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal: Texts and Annexes (revised in 2023)," Secretariat of the Basel Convention (SBC), Geneva, UNEP/BRS/2023/10, 2023 2023. [Online]. Available: https://www.basel.int

[41] C. Secretariat of the Basel, "Ban Amendment - Overview," (in English), 2019. [Online]. Available: https://www.basel.int/Implementation/LegalMatters/BanAmendment/Overview/tabid/1484/Default.aspx.

[42] (2003). *2003/33/EC: Council Decision of 19 December 2002 establishing criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills pursuant to Article 16 of and Annex II to Directive 1999/31/EC*. [Online] Available: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec/2003/33(1)/oj/eng

[43] "Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance)," *Official Journal of the European Union,* vol. L 191, p. 1, 2023/07/12 2023. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj/eng.

[44] (2025). *Commission Delegated Decision (EU) 2025/934 of 5 March 2025 amending Decision 2000/532/EC as regards an update of the list of waste in relation to battery-related waste*. [Online] Available: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_del/2025/934/oj/eng

[45] (2025). *Corrigendum to Commission Delegated Decision (EU) 2025/934 of 5 March 2025 amending Decision 2000/532/EC as regards an update of the list of waste in relation to battery-related waste (OJ L, 2025/934, 20.5.2025)*. [Online] Available: https://eur-

lex.europa.eu/eli/dec_del/2025/934/corrigendum/2025-08-19/oj/eng