



**TURUN  
YLIOPISTO**

# **Litiumioniakun nopea lataus**

Vaikutukset ja kehitys

Materiaalitekniikka  
Kandidaatintutkielma

Laatija:  
Jose Asela

16.5.2025  
Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

## Kandidaatintutkielma

**Oppiaine:** Materiaalitekniikka

**Tekijä:** Jose Asela

**Otsikko:** Litiumioniakun nopea lataus: vaikutukset ja kehitys

**Ohjaaja:** Jenna Hannonen

**Sivumäärä:** 31 sivua

**Päivämäärä:** 16.5.2025

Litiumioniakut ovat nykypäivänä yleisiä muun muassa pienelektronikassa, sähköautoissa, sähkökäyttöisissä työkaluissa sekä uusiutuvan energian varastoinnissa. Litiumioniakuilla on monia hyviä ominaisuuksia, kuten keveys, korkea ulostulojännite sekä korkeat energia- ja tehotehiheydet. Litiumioniakkuja on myös mahdollista ladata nopeasti, mikä on etenkin sähköautomarkkinoille tärkeää. Nopeaa latausta litiumioniakuissa tarvitsee kuitenkin vielä tutkia ja kehittää erilaisilla tavoilla akun toimintakyvyn säilymistä ja turvallisuutta varten.

Akun nopean latauksen analysoinnissa tarvitsee ottaa huomioon paljon erilaisia asioita liittyen sekä latausnopeuteen että sen turvallisuuteen. Tärkeimpiä turvalliseen nopeaan lataukseen vaikuttavia tekijöitä ovat akkukennon materiaalit, lataustekniikka sekä akunhallintajärjestelmä. Akkukennon materiaalit vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti litiumionit pystyvät kulkeutumaan elektrodien välillä. Tämä on suoraan latausnopeutta rajoittava tekijä. Lataustekniikka säätelee enimmäkseen laturista saatavaa sähkövirtaa ja jännitettä. Sen avulla pystytään vaikuttamaan saatavaan latausnopeuteen sekä akun kestävyys- ja turvallisuuteen. Akunhallintajärjestelmä hallinnoi kaikkea akun toimintaa. Se säättää laturista saadun tehon akulle sopivaksi, jos laturista saadaan liikaa tehoa. Tämä edesauttaa akun turvallista toimintaa ja pidentää sen elinikää.

Tutkielmassa todettiin nopean latauksen vaikuttavan akkuun negatiivisesti eri tavoilla. Se nopeuttaa akun normaalia kulumista, lisää akun latausvaiheen lämpenemistä sekä altistaa akkukennon mekaanisille vaurioille, kuten elektrodien halkeilulle. Näiden lisäksi nopea lataus aiheuttaa litiumin pinoutumista akkukennossa sekä vaaran lämpökarkaamiselle. Litiumin pinoutuminen on anodin pinnalle kertyvää metallista litiumia, mikä heikentää akun kapasiteettia ja toimintaa sekä aiheuttaa turvallisuusriskejä. Lämpökarkaaminen puolestaan on itsestään kiihtyvä reaktio, jossa lämpötila nousee hallitsemattomasti. Se voi johtaa tulipaloon tai räjähdykseen. Näiden negatiivisten vaikutuksien vuoksi nopeaa latausta litiumioniakuissa tarvitsee vielä kehittää erilaisilla tavoilla. Tutkielmassa keskityttiin elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalien, latausalgoritmien sekä jäähdysteknologioiden parantamiseen ja todettiin kokonaisuuden kehittämisen olevan ydinasia toimivan ja turvallisen nopean latauksen mahdollistamisessa.

**Avainsanat:** litiumioniakku, nopea lataus

# Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>5</b>
1.1	Johdatus nopeaan lataukseen	5
1.2	Tutkielman rakenne ja tavoitteet	6
<b>2</b>	<b>Akun toiminta ja lataus</b>	<b>7</b>
2.1	Akunhallintajärjestelmä	7
2.2	Lataustekniikka	8
2.3	Latausnopeus	9
<b>3</b>	<b>Litiumioniakun kennon rakenne ja toiminta</b>	<b>11</b>
3.1	Kennon toiminta	11
3.2	Anodi	12
3.3	Katodi	13
3.4	Elektrolyytti	13
3.5	Separaattori	13
3.6	Virrankerääjät	14
3.7	SEI-kerros	14
<b>4</b>	<b>Nopean latauksen vaikutukset akkuun</b>	<b>16</b>
4.1	Litiumin pinoutuminen	16
4.2	Lämpeneminen	17
4.3	Lämpökarkaaminen	17
4.4	Mekaaniset vauriot ja materiaalien kuluminen	18
<b>5</b>	<b>Nopean latauksen kehitys</b>	<b>20</b>
<b>5.1</b>	<b>Elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalit</b>	<b>20</b>
5.1.1	Anodimateriaalit	20
5.1.2	Katodimateriaalit	21
5.1.3	Elektrolyyttimateriaalit	23
<b>5.2</b>	<b>Latausalgoritmien optimointi</b>	<b>23</b>
5.2.1	MCC-lataus	24
5.2.2	Pulssilataus	25
5.2.3	Teholataus	25

<b>5.3</b>	<b>Jäähdytysteknologiat</b>	<b>26</b>
5.3.1	Aktiiviset jäähdytystekniikat	26
5.3.2	Passiiviset jäähdytystekniikat	27
<b>6</b>	<b>Yhteenveto ja johtopäätökset</b>	<b>28</b>
	<b>Lähteet</b>	<b>30</b>

# 1 Johdanto

Yhä useampi on päivittäin tekemisissä litiumioniakulla varustetun laitteen kanssa. Litiumioniakkuja käytetään muun muassa kannettavissa elektroniikan laitteissa, sähkökäyttöisissä työkaluissa, sähköajoneuvoissa sekä uusiutuvan energian varastoinnissa. Ensimmäiset litiumioniakut markkinoille toi Sony vuonna 1991. Siitä lähtien ne ovatkin olleet suuressa roolissa yhteiskunnassamme energian varastoimisessa. Litiumioniakut ovat pitkäikäisempiä, ympäristöystävällisempiä ja kevyempiä kuin muut yleisesti käytössä olevat akkutyyppit. Myös niiden vähäisen itsepurkautumisnopeuden, laajan toimintalämpötila-alueen, korkean ulostulojännitteen sekä suuren energia- ja tehotiheydensä ansiosta litiumioniakut ovat nykypäivänä lisääntyvin määrin käytössä laajalti erilaisissa käyttötarkoituksissa. [1]

## 1.1 Johdatus nopeaan lataukseen

Sähköautot ovat yksi litiumioniakkujen merkittävimmistä käyttökohteista. Sähköautomarkkinat ovat kasvaneet viime vuosina huomattavasti, mikä on osaltaan vaikuttanut myös litiumioniakkujen kasvavaan tarpeeseen. [2] Sähköautoilun esteeksi nousee kuitenkin usein kolme akkuun liittyvää syytä: liian lyhyt toimintamatka, liian hidas latausnopeus sekä huoli akun toiminnasta ja turvallisuudesta. Ongelmat voidaan kuitenkin yrittää tulevaisuudessa ratkaista litiumioniakkuteknologiaa kehittämällä. Erityistä huomiota pitää kiinnittää akun kapasiteettiin, käyttöikään sekä latausnopeuteen. [3]

Juuri sähköautomarkkinoiden kasvu on osaltaan kasvattanut entistä nopeamman latauksen tarvetta litiumioniakuissa. Sen lisäksi myös kuluttajaelektroniikkamarkkinat vaativat yhä nopeampaa latausta esimerkiksi älypuhelimiin. Päivittäin käytettävien laitteiden nopeampi lataus voi tuoda monen arkeen huolettomuutta. Tällöin ei tarvitse miettiä, milloin on hyvä hetki ladata laitteita. Nopean latauksen tutkimus onkin lähtenyt kuluttajien vaatimista syistä huomattavasti kasvuun viime vuosina. [2]

Nopealle lataukselle ei ole olemassa yhtä tiettyä määritelmää. Yleisesti voidaan sanoa, että se on akun lataamista nopeammin kuin aiemmin on totuttu. Muun muassa käyttökohde voi vaikuttaa siihen, mikä on nopeaa latausta ja mikä ei. USABC (United States Advanced Battery Consortium) on ehdottanut esimerkiksi sähköautojen nopean latauksen tavoitteeksi 80 % varausasteen saavuttamista 15 minuutissa. [2]

## 1.2 Tutkielman rakenne ja tavoitteet

Tämä tutkielma on kirjallisuuskatsaus, joka keskittyy litiumioniakun nopeaan lataukseen ja sen vaikutuksiin akkuun. Tutkielmassa keskitytään nimenomaan vain litiumioniakkuihin. Muihin akkutyyppeihin ei oteta juurikaan kantaa.

Ensimmäisenä tutkielmassa käsitellään akun toimintaa sähköteknisestä näkökulmasta. Luvussa käydään läpi akun ulkoisia ominaisuuksia sekä keskeisiä toimintoja. Akun toiminnasta luvussa keskitytään suurin osin lataukseen. Latauksesta syvennyttään erikseen myös lataustekniikkaan ja -nopeuteen.

Seuraavassa osiossa käydään läpi litiumioniakun rakennetta ja toimintaa sähkökemian näkökulmasta. Osio on pääosin litiumioniakun kennon toiminnan tarkastelua sekä sen eri osien toiminnan ja yleisimpien materiaalien läpi käymistä. Akun rakenteen ja toiminnan sekä materiaalien läpikäynti on olennaista nopean latauksen analysoinnin kannalta, koska usein akun komponenttien materiaalit ovat merkittäviä tekijöitä latauksen nopeuteen sekä turvallisuuteen.

Litiumioniakun rakenteen ja toiminnan jälkeen tutkielmassa käydään läpi nopean latauksen vaikutuksia akkuun. Tämä tutkielma keskittyy litiumin pinoutumiseen, akun lämpenemiseen ja lämpökarkaamiseen sekä mekaanisiin vaurioihin.

Viimeisenä tutkielmassa käydään läpi, miten nopeaa latausta voitaisiin parantaa tulevaisuudessa litiumioniakuissa viimeisimpien tutkimusten mukaan. Tutkielmassa keskitytään akun materiaalien ja lämmönhallinnan parantamiseen sekä latausalgoritmien optimointiin.

Tutkielman tavoitteena on ottaa selvää seuraaviin kysymyksiin:

1. Mitkä tekijät vaikuttavat turvalliseen nopeaan lataukseen?
2. Miten nopea lataus vaikuttaa litiumioniakkuihin?
3. Miten nopeaa latausta voidaan parantaa litiumioniakuissa?

## 2 Akun toiminta ja lataus

Akun ja pariston toiminta on hyvin samankaltaista. Molempiin on varastoitunut sähkön avulla kemiallista energiaa. Tämä kemiallinen energia muutetaan takaisin sähköenergiaksi, kun sille on tarve. Akun erottaa paristosta kuitenkin siitä, että sen energiavarausta voidaan ladata. Akun toiminta onkin vuorottaista varauksen purkamista ja lataamista, jota akunhallintajärjestelmä hallitsee.

Akun energianvarastoinnin toiminta perustuu akkukennon sisällä tapahtuviin reaktioihin. Akku voi koostua yhdestä tai useammastakin kennosta. Yleisimpien älypuhelimien akut ovat yksikennoisia. Sähköautojen akut puolestaan koostuvat jopa sadoista tai tuhansista kennoista. Näin suurissa akuissa kennot ovat usein pakattuna vielä erikseen moduuleihin. Kokonaisuudessaan akku voi koostua yhdestä tai useammasta moduulista. Useista akkukennoista koostuvaa akkua voidaan kutsua akkupaketiksi. [4]

### 2.1 Akunhallintajärjestelmä

Niin yksikennoisten kuin suurien akkupakettienkin toimintaa hallitsee akunhallintajärjestelmä eli BMS (engl. Battery Management System). BMS on nimensä mukaisesti akun yhteyteen asennettu järjestelmä, joka hallinnoi kaikkea akun toimintaa. Sen tarkoitus on varmistaa akun turvallisuus sekä optimoida sen suorituskyky ja käyttöikä. [4]

BMS mittaa reaaliaikaisesti akun eri ominaisuuksia ja pitää näiden perusteella huolen akun toiminnasta ja turvallisuudesta. BMS:ään liitetyt anturit mittaavat muun muassa akun lämpötilaa, sähkövirtaa ja jännitettä. Näiden avulla se pystyy arvioimaan esimerkiksi akun varaus- ja terveydentilan. [4]

Varaustila kertoo prosentteina akkuun varastoituneen energian määrän suhteessa sen maksimikapasiteettiin. Akun terveydentila puolestaan kertoo, kuinka monta prosenttia akun täydestä kapasiteetista on vielä käytössä uuden akun täyteen kapasiteettiin verrattuna. Terveydentilan heikkeneminen on litiumioniakuille normaalia ajan myötä. Akkujen käyttöikää mitataan usein enemmän syklinkestolla kuin ajallisella kestolla. Yksi sykli on täyden kapasiteetin verran varaustilan purkamista ja saman määrän lataamista. Litiumioniakut voivat kestää jopa 1000 sykliä säilyttäen 80 % alkuperäisestä kapasiteetistaan. [5]

BMS on tärkeä osa akun latauksen ja purkauksen hallintaa. Se varmistaa, ettei akku ylilataudu tai -purkaudu. Ylilataus kuluttaa akkukennoa ja voi aiheuttaa turvallisuusriskejä. Akun

sisäinen jännite nousee varaustilan kasvaessa. Ylilataamisessa akun jännite siis nousee yli turvallisen rajan. BMS mittaa reaaliaikaisesti jännitettä ja huolehtii, että akun varaustila pysyy ennalta määrättyjen rajojen sisällä. Jänniterajoja voidaan kutsua katkaisujännitteiksi. Liian suuri tai pieni jännite voi aiheuttaa akkuun pysyviä vaurioita. [4]

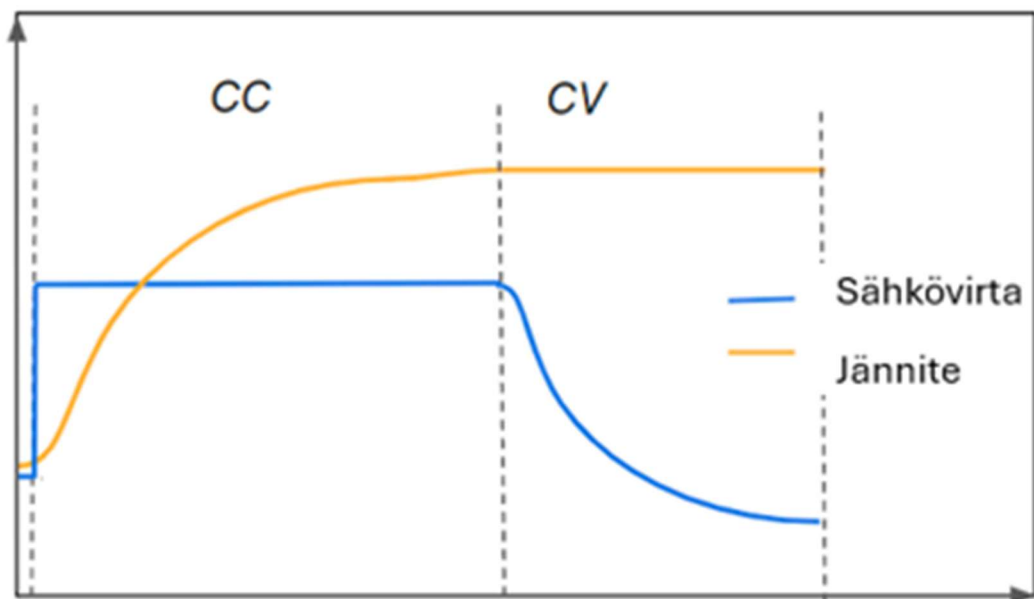
Latauksen sekä purkauksen aikana BMS huolehtii myös, ettei akku lämpene liikaa. BMS voi esimerkiksi kokonaan katkaista latauksen tai kehittyneemmät jopa optimoida erilaisen lataustavan havaitessaan liian suuren lämpötilan akussa. [4]

## 2.2 Lataustekniikka

Akun varauksen lataaminen on prosessi, jossa akkuun varastoidaan sähkön avulla kemiallista energiaa. Akun varauksen purkaminen vastaavasti on varastoituneen kemiallisen energian muuntamista takaisin sähköenergiaksi. Langallinen laturi on yleisin tapa ladata akkua, mutta esimerkiksi uusimpia älypuhelimia ja -kelloja voi ladata myös langattomasti sähkömagneettisen induktion avulla. Langaton lataus on kuitenkin yleensä hitaampi vaihtoehto perinteiseen langalliseen lataukseen. Siinä osa energiasta voi mennä hukkaan, mikä johtaa energiahäviöihin. Muun muassa näiden syiden takia langaton lataus ei ole saavuttanut vielä merkittävää asemaa lataustapana.

Akkuja voidaan ladata käyttäen useita eri latausalgoritmeja. Latausalgoritmit eroavat yleensä toisistaan siitä, miten akulle annetaan sähkövirtaa ja jännitettä. BMS kontrolloi arvoja sen mukaan, kuinka paljon kumpaakin laturista akkuun saadaan. [3]

Tavallisimmin litiumioniakun lataukseen käytetään kuvassa 1 esitettyä vakiovirta-vakiojännite- eli CC-CV-lataustekniikkaa. Tekniikka muodostuu kahdesta osasta. Ensimmäisessä osassa akulle annetaan vakiovirtaa (CC, engl. Constant Current). CC-latausvaiheella ladataan, kunnes jännite nousee akun katkaisujännitteeseen. Yleensä ensimmäinen vaihe lataa akun noin 80 % täydestä kapasiteetista. Katkaisujännitteen saavutettua laturi antaa akkuun virtaa vakiojännitteellä (CV, engl. Constant Voltage), jonka suuruus on katkaisujännitteen verran. CV-vaiheessa laturi vähentää jatkuvasti sähkövirran määrää, kunnes saavutetaan akun katkaisuvirta. Tämä tarkoittaa sitä, että akku on ladattu täyteen ja BMS lopettaa akun lataamisen katkaisemalla virran syötön. [3, 6]



Kuva 1. Esimerkki CC-CV-latauskuvaajasta. Kuva käytetty muokattuna luvalla lähteestä [6]. Tekijänoikeus 2022 T. G. T. A. Bandara, J. C. Viera, ja M. González.

## 2.3 Latausnopeus

Akun lataus- ja purkausnopeutta mitataan usein C-arvolla. C-arvo tarkoittaa sitä, kuinka kauan akun lataus kestää tyhjästä kapasiteetista täyteen tai vastaavasti purkaus täydestä tyhjiin. C-arvo on latausvirta jaettuna akun kapasiteetilla. C-arvon voi myös käytännössä saada jakamalla yksi tunti akun täyteen lataukseen kuluneella ajalla. Esimerkiksi 2C:n latausnopeus tarkoittaa 30 minuutin täyteen latausta. USABC:n sähköautojen nopean latauksen tavoite 80 % varausasteen saavuttaminen 15 minuutissa vastaa puolestaan noin 4C:n latausnopeutta. [2]

Yleensä nopeaa latausta suoritetaan vain 80 % asti. Tämä johtuu siitä, että CC-vaihe päättyy yleensä noin 80 % varausasteeseen. CV-vaiheella ladatessa akkuun menevä sähkövirta vain vähenee. Tällöin myös latausnopeus hidastuu verrattuna CC-vaiheeseen. [3]

Latauksen teho saadaan kertomalla sähkövirta jännitteellä. Lataustehoa akkuun saadaan siis lisättyä nostamalla siihen laitettavaa sähkövirtaa ja/tai jännitettä. Suurempi teho tarkoittaa suoraan nopeampaa latausta. BMS kuitenkin yleensä estää liian isolla teholla lataamisen akun turvallisuuden vuoksi [4].

Yksi tapa parantaa akun latausnopeutta on esimerkiksi lisäämällä CC-latausvaiheen aikana annettavaa sähkövirran määrää. Myös kehittämällä kokonaan uusia latausalgoritmeja voidaan akkua ladata nopeasti ilman, että akun syklinkesto tai turvallisuus kärsii. [3]

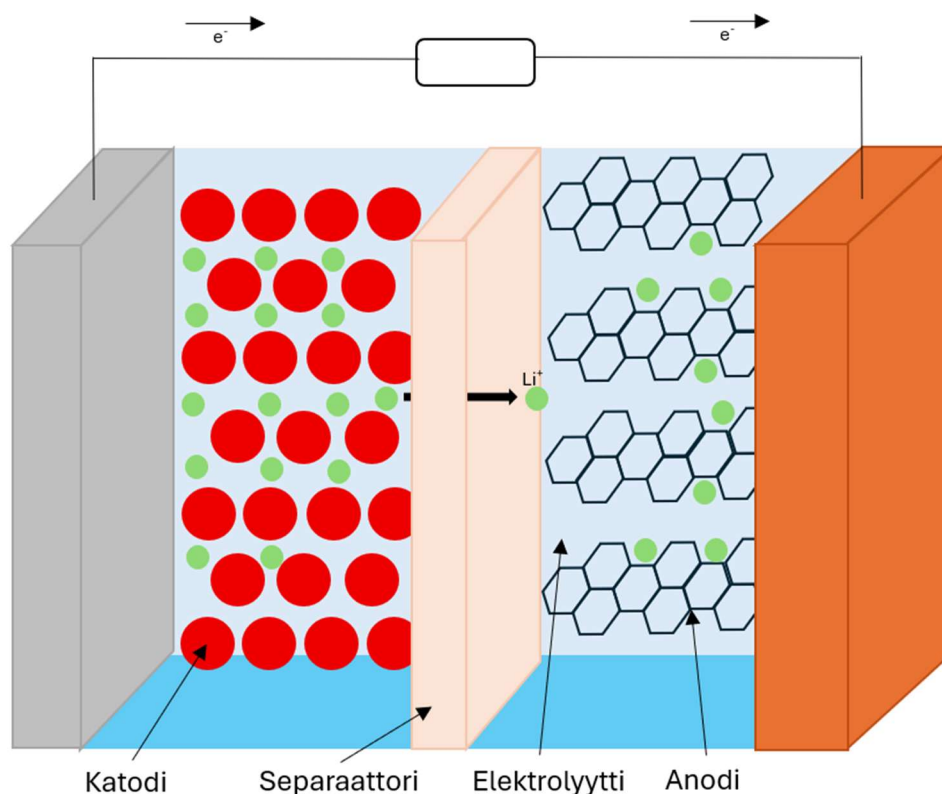
Latauksen tekniikan kehittäminen ei kuitenkaan yksin riitä nopean latauksen parantamiseen. Jotta latausnopeuden nostaminen olisi mahdollista turvallisesti, tarvitsee akun materiaalien olla yhteensopivia nopean latauksen tekniikkaan. Materiaalien kehittäminen onkin yksi avainasioista litiumioniakkujen nopeampaan lataukseen. Tätä varten tarvitsee ymmärtää, miten akun sisällä olevat komponentit toimivat latauksen ja purkauksen aikana.

### 3 Litiumioniakun kennon rakenne ja toiminta

Litiumioniakkuja on kehitelty useita erilaisia. Niitä on erimallisia ja -kokoisia ja niissä käytetään erilaisia materiaaleja. Kaikkien näiden toimintaperiaate on kuitenkin sama: litiumionit kulkeutuvat edestakaisin akkukennon elektrodien välillä. Toiminta perustuu vuorottaisiin hapetus- ja pelkistysreaktioihin akkukennon elektredeissa. [1]

#### 3.1 Kennon toiminta

Litiumioniakkujen kemialliset reaktiot tapahtuvat akkukennon sisällä. Litiumioniakun kennon rakenne on havainnollistettu kuvassa 2. Usein kennon rakenteesta voidaan puhua myös akun rakenteena. Kennon rakenteen pääkomponentit ovat kaksi elektrodia (negatiivinen anodi ja positiivinen katodi), huokoinen separaattori, nestemäinen elektrolyytti sekä virrankerääjät elektrodeilla. [5]



Kuva 2. Havainnekuva litiumioniakun kennosta latausvaiheessa. Kuva: Jose Asela.

Varausta ladattaessa kennon sisällä litiumionit kulkeutuvat katodilta anodille elektrolyytin avulla huokoisen separaattorin lävitse kuvan 2 tavoin. Samaan aikaan elektronit kulkeutuvat katodilta anodille ulkoista virtapiiriä pitkin virrankerääjien avulla kuvan 2 osoittamalla

tavalla. Kun akku on ladattu täyteen, anodi ei ota enää vastaan enempää litiumioneja. Akun purkautuessa tapahtuu vastakkainen reaktio lataamiseen nähden. Tällöin litiumionit luovuttavat elektroninsa anodia ja virrankerääjiä pitkin ulkoiseen virtapiiriin, josta elektronit kulkeutuvat katodille. Samaan aikaan litiumionit kulkeutuvat elektrolyytin avulla separaattorin lävitse anodilta katodille. [5]

### 3.2 Anodi

Anodi on akkukennon osa, johon litiumionit varastoituvat latauksen aikana. Litiumionien varastoitumista voidaan kutsua litioitumiseksi. Vastakkaista reaktiota voidaan puolestaan kutsua delitioitumiseksi. Litioitumistapoja voi olla erilaisia. Litiumionit voivat esimerkiksi muodostaa uusia seoksia anodimateriaalin kanssa tai muokata sen rakennetta. Nopeaan lataukseen parhaiten soveltuvat anodimateriaalit perustuvat kuitenkin usein interkalaatioon. Interkalaatiossa litiumionit kulkeutuvat anodimateriaalin rakenteen sisään niin, ettei anodin rakenne juurikaan muutu eikä litiumionit reagoi kemiallisesti anodin kanssa. Interkalaatiovaiheessa ainoastaan anodin tilavuus usein kasvaa. Tällöin vastaavasti anodin tilavuus pienenee deinterkalaatiossa eli litiumionien poistuessa rakenteesta. [6]

Litiumioniakuissa voidaan käyttää useita erilaisia materiaaleja anodina. Alun perin anodina käytettiin metallista litiumia. Sen kuitenkin huomattiin muodostavan pinnalleen helposti dendriittejä, jotka voivat puhkoa separaattorin ja aiheuttaa täten sisäisen oikosulun akkuun. [7] Yleisimmin käytettyjä anodimateriaaleja ovat grafiitti ( $C_6$ ), litiumtitanaatti (LTO) sekä piipohjaiset materiaalit [8].

Selvästi yleisin anodimateriaali kaupallisissa litiumioniakuissa on grafiitti sen monipuolisten ominaisuuksien ansiosta [9]. Grafiitilla on hyvä saatavuus, matala delitioitumisenergia, suhteellisen alhaiset kustannukset, hyvä sähkönjohtavuus sekä kohtalainen energiatiheys. Sen etuna on myös suhteellisen pieni tilavuuden muutos (10 %) litioitumis- ja delitioitumisvaiheessa. [10]

Grafiitti muodostuu päällekkäisistä  $sp^2$ -hybridisoituneista grafeenilevyistä, jotka ovat sidoksissa toisiinsa heikoilla van der Waals -voimilla delokalisoituneiden elektroniorbitaalien ansiosta. [11] Näiden levyjen väliin interkaloituu kuitenkin vain yksi litiumioni kuutta hiiliatomia vastaan. Tämä tekee sen tilavuudellisesta kapasiteetista optimaalista pienemmän sekä ominaiskapasiteetista (372 mAh/g) suhteellisen matalan uusimpiin anodimateriaaleihin, etenkin piipohjaisiin, verrattuna. [9]

### 3.3 Katodi

Katodi on akkukennon positiivinen elektrodi. Katodimateriaalin ominaisuudet vaikuttavat koko akun ominaisuuksiin. Se toimii kennossa käytössä olevien litiumionien lähteenä.

Latauksessa ja purkauksessa katodin toiminta on päinvastaista anodiin verrattuna. Latauksen aikana katodi siis delitioituu ja purkauksen aikana litioituu. Myös katodilla interkalaatioon perustuvat materiaalit ovat suosituimpia nopean latauksen sovelluksissa. [12]

Grafiitin ollessa litiumioniakkujen selvästi suosituin anodimateriaali, katodimateriaalivaihtoehtoja ei nouse yhtä selkeästi ylitse muiden. Katodimateriaalina käytetäänkin useita eri materiaaleja käyttötarkoituksesta riippuen. Kaupallisissa litiumioniakuissa katodina käytetään usein jotakin litiumsiirtymämetallioksidia  $\text{LiMO}_2$  ( $M=\text{Co, Ni, Mn}$ ) tai litiumrautafosfaattia  $\text{LiFePO}_4$  (LFP) [1].

Litiumkobolttioksidia  $\text{LiCoO}_2$  (LCO) käytettiin litiumioniakun katodimateriaalina ensimmäisissä markkinoille tulevissa litiumioniakuissa. Vielä tänäkin päivänä se on suosittu katodimateriaali etenkin pienelektroniikassa hyvän tilavuudellisen energiatihetyensä ansiosta. LCO on kuitenkin kallista ja myrkyllistä sen sisältämän koboltin takia. LCO ei juurikaan sovellu myöskään nopeaan lataukseen. Sen rakenne ei kestä hyvin korkeita lämpötiloja eikä jännitteitä. LCO:n ominaisuuksia voidaan kuitenkin parantaa esimerkiksi muokkaamalla tai pinnoittamalla sitä. [13]

### 3.4 Elektrolyytti

Litiumioniakuissa elektrolyyttinä käytetään usein joitakin litiumsuoloja kuten litiumheksafluorofosfaattia ( $\text{LiPF}_6$ ), johon on lisätty orgaanisia liuottimia ja mahdollisia lisäaineita. Elektrolyytin tehtävänä on kuljettaa litiumioneja elektrodien välillä sen rakenteessa olevien vastaionien avulla. Tämän lisäksi sen pitää pystyä kuljettamaan ionit elektrodien pintojen lävitse, mikä tuottaa usein latausnopeuden kanssa eniten ongelmia. Elektrolyytillä on myös vaikutusta akun muihin ominaisuuksiin kuten kapasiteettiin, sisäiseen resistanssiin, lämpötilaan sekä turvallisuuteen. [6]

### 3.5 Separaattori

Separaattori sijaitsee anodin ja katodin välissä. Separaattorin käyttötarkoituksena on päästää litiumionit kulkemaan anodin ja katodin välillä niin, etteivät elektrodit joudu kosketuksiin toistensa kanssa. Tämä on akun turvallisuuden kannalta tärkeää, sillä elektrodien kosketus voi

aiheuttaa akkuun sisäisen oikosulun. Se voi johtaa akun ylikuumentumiseen, mikä taas voi johtaa pahimmillaan siihen, että akku syttyy palamaan. Separaattorin rakenteen tarvitsee siis olla sähköä eristävä, mutta ioneja johtava. [14]

Separaattorina käytetään yleisesti jotakin polyolefiiniä kuten polyeteeniä (PE), polypropeenia (PP) tai niiden yhdistelmiä. Ne kestävät kohtuullisen hyvin mekaanista rasitusta sekä ovat joustavia ja halpoja materiaaleja. Polyolefiinien matala sulamispiste kuitenkin voi aiheuttaa ongelmia akun turvallisuuteen korkeissa lämpötiloissa. Tätä estää jonkin verran se, että polyolefiinien huokokset tukkeutuvat lämpötilan noustessa liian kuumaksi. Tällöin litiumionit eivät pääse liikkumaan separaattorin lävitse ja akun toiminta lakkaa, mikä osaltaan estää lisäkuumentumisen. [14]

### **3.6 Virrankerääjät**

Virrankerääjien tehtävänä on mahdollistaa elektronien kulku elektrodien ja kennon ulkoisen virtapiirin välillä. Ne eivät osallistu kennon reaktioihin, mutta ovat tärkeitä akun ominaisuuksien kannalta. Virrankerääjien tilavuus ja massa vaikuttavat koko akun energiatiheyteen, sähköjohtavuus lataus- ja purkutehoon, sekä mekaaninen ja kemiallinen kestävyys akun käyttöikänsä. Kaupallisten litiumioniakkujen virrankerääjinä käytetään yleensä alumiinia katodilla ja kuparia anodilla. [15]

### **3.7 SEI-kerros**

Akun kokoonpanon jälkeen ensimmäisten lataus-purkaussykliden aikana anodin ja elektrolyytin rajapintaan muodostuu SEI-kerros (engl. Solid Electrolyte Interphase). SEI on kiinteä kerros, joka koostuu elektrolyytin hajoamisen tuotteista anodin pinnalla. Myös katodille voi muodostua samantyylinen kerros, jota kutsutaan CEI-kerrokseksi (engl. cathode electrolyte interphase). Niiden tarkempaan rakenteeseen ja muodostumiseen vaikuttavat muun muassa akun materiaalit sekä käyttö. [16]

SEI-kerroksen muodostuminen on tärkeä ilmiö akun toiminnan ja suorituskyvyn kannalta. SEI-kerros päästää ionit lävitseen, mutta estää elektronien pääsyn elektrolyyttiin. Tämä suojaa epätoivotuilta reaktioilta. SEI-kerros suojaa myös anodia elektrolyyttimolekyylien epätoivotuilta interkalaatioilta. Tämä tarkoittaa sitä, että vain litiumionit pääsevät kerroksen lävitse anodille. SEI-kerroksen muodostuminen kuitenkin kuluttaa akun käytössä olevaa litiumia ja elektrolyyttiä sekä vaikeuttaa ionien kulkua anodille. Nämä tekijät heikentävät

akun suorituskykyä vähentämällä akun alkukapasiteettia sekä kasvattamalla akun sisäistä resistanssia. SEI saattaa siis vaikeuttaa akun nopeaa lataamista, mikäli se vaikeuttaa ionien kulkua. [16]

Optimaalisen SEI-kerroksen pitäisi olla täysin kemiallisesti stabiili, päästää litiumionit helposti lävitseen anodille, eristää elektronit täydellisesti sekä estää täysin kaikki epätoivotut sivureaktiot anodin ja elektrolyytin välillä. Kaiken kaikkiaan SEI-kerroksella on iso merkitys litiumioniakun käyttöön, tehokapasiteetin, turvallisuuden sekä latausnopeuden kannalta. [2]

## 4 Nopean latauksen vaikutukset akkuun

Täydellinen litiumioniakku voisi kestää lataus-purkaussyklejä loputtomasti menettämättä kapasiteettiaan tai muitakaan ominaisuuksiaan. Todellisuudessa litiumioniakut kuitenkin kuluvat ja menettävät muun muassa tehoa ja kapasiteettia ajan myötä käytössä. Monesti nopea lataaminen vain nopeuttaa tällaista akun kulumista. Nopea lataus voi myös tuoda litiumioniakun käyttöön erilaisia turvallisuusriskejä. [8]

### 4.1 Litiumin pinoutuminen

Yksi merkittävimpiä tekijöitä litiumioniakun suorituskyvyn ja turvallisuuden heikkenemiseen on litiumin pinoutuminen (engl. lithium plating). Litiumin pinoutuminen tarkoittaa metallisen litiumin kertymistä anodin pinnalle. Nopea lataus on yksi tekijä, joka aiheuttaa litiumin pinoutumista litiumioniakuissa. Muita tekijöitä sen syntyyn on muun muassa alhainen lämpötila ja korkea varaustila. [17]

Kaikki litiumin pinoutumiseen johtavat tekijät liittyvät yhteen syyhyn: litiumionit eivät ehdi interkaloitumaan anodin rakenteeseen riittävän nopeasti. Nopeassa latauksessa litiumionit kulkeutuvat anodin pinnalle nopeammin kuin ne pystyvät interkaloitumaan anodimateriaalin kerroksien väliin. Tällöin anodin pinnan ja SEI-kerroksen väliin kasautuu ylimäärä litiumioneja. [17]

Myös alhaisessa lämpötilassa sekä korkeassa varaustilassa ylimäärä litiumioneja kasautuu anodin ja SEI-kerroksen väliin. Tällöin tilanne kuitenkin syntyy eri syystä kuin korkean latausnopeuden aikana. Alhaisessa lämpötilassa sekä korkean varaustilan aikana litiumionien interkalaationopeus anodilla hidastuu. Tämä aiheuttaa saman tilanteen kuin nopean latauksen yhteydessä litiumionien kulkeutumisenopeuden kasvaminenkin aiheuttaa. [17]

Ylimäärä litiumioneja anodin pinnalla ei vielä yksin riitä litiumin pinoutumiseen. Sen tapahtumiseen tarvitaan myös alhainen anodin toimintapotentiaali. Litiumin pinoutuminen tapahtuu, kun anodin potentiaali laskee paikallisesti alle 0 V. Suositumman anodimateriaalin, grafeenin, matala toimintapotentiaali (0.1 V vs. Li/Li<sup>+</sup>) mahdollistaakin litiumin pinoutumisen esimerkiksi korkean varaustilan, nopean latausnopeuden tai alhaisen lämpötilan vaikutuksesta. [17]

Litiumin pinoutumisesta voi seurata kennon sisälle joko palautuvaa tai palautumatonta litiumia. Palautuva litium voi nimensä mukaisesti vielä palautua uudelleen käytettäväksi

interkalaatioreaktioihin. Vastaavasti palautumaton litium ei enää palaudu kennon käytettäväksi. Näistä palautumaton aiheuttaa ongelmia akun toiminnalle. [17]

Litiumin pinoutumisesta seurannut palautumaton litium voi olla joko niin sanottua kuollutta litiumia tai anodin pintaan muodostunutta toissijaista SEI-kerrosta. Kuollut litium on kennoon kerrostunutta metallista litiumia, joka ei enää pysty interkaloitumaan uudelleen. Tämä kuluttaa aktiivista litiumia ja täten heikentää akun kapasiteettia. Kuollut litium heikentää kapasiteettia mahdollisesti myös estämällä interkalaatioväyliä käytössä olevilta litiumioneilta. Toissijainen SEI-kerros on toinen litiumin pinoutumisesta aiheutuva muoto, joka kuluttaa aktiivista litiumia. Se muodostuu anodin ja alkuperäisen/ensisijaisen SEI-kerroksen väliin muodostuneen litiumin reagoidessa elektrolyytin kanssa. [17]

Kerrostunut litium voi muodostua erimuotoisiksi partikkeleiksi. Vaarallisimpia näistä ovat neulamaiset, niin kutsutut dendriittiset, rakenteet. Ne muodostuvat erityisesti suurilla virranvoimakkuuksilla nopean latauksen yhteydessä. Pahimmillaan ne voivat puhkoa separaattorin ja aiheuttaa täten oikosulun sähköön päästessä virtaamaan suoraan anodin ja katodin välillä. [17]

## 4.2 Lämpeneminen

Akun lämpeneminen latauksen ja purkauksen aikana on normaalia. Liiallinen lämpeneminen kuitenkin nopeuttaa akun kulumista ja näin vähentää sen käyttöikää. Käyttöiän lisäksi liiallinen lämpeneminen voi vaikuttaa negatiivisesti myös akun turvallisuuteen. Pahimmillaan liiallisen lämpenemisen seurauksena akku voi syttyä tuleen tai räjähtää. [2, 8]

Resistiivinen lämpeneminen muuttaa osan akun läpi kulkevan sähkövirran lämmöksi. Tähän vaikuttaa muun muassa akun lämmönjohtavuus, sisäinen resistanssi sekä akun läpi kulkevan sähkövirran määrä. Lämmön määrä kasvaa jopa eksponentiaalisesti sähkövirran kasvaessa. Resistiivinen lämpeneminen onkin yksi merkittävimmistä akun lämpenemistä aiheuttavista tekijöistä etenkin nopean latauksen yhteydessä. Nopeassa latauksessa sähkövirran määrä on yleensä suuri. Tällöin resistiivisen lämpenemisen vuoksi sähköenergiasta muutettu lämpöenergian määrä on myös suuri. [7]

## 4.3 Lämpökarkaaminen

Akun liiallinen lämpeneminen voi johtaa niin kutsuttuun lämpökarkaamiseen (engl. Thermal Runaway). Lämpökarkaaminen on merkittävä turvallisuusriski litiumioniakuille. Siinä akun

lämpötila nousee hallitsemattomasti itsestään kiihtyvänä reaktiona. Lämpökarkaamiseen johtava liiallinen lämpötila voi johtua muistakin syistä kuin nopeasta latauksesta. Esimerkiksi oikosulun aiheuttava mekaaninen vaurio tai ulkoinen lämpö voivat myös aiheuttaa sen. Lopputuloksena kaikilla lämpökarkaamiseen johtavilla syillä kuitenkin on akkukennon liiallinen lämpeneminen. [18]

Lämpökarkaaminen alkaa kennon lämpötilan ylittäessä itsestään kuumenemislämpötilan (noin 70–90 °C). Tällöin kennossa alkaa tapahtumaan komponenttien välisiä eksotermisiä sivureaktiota. Itsestään kuumenemislämpötilassa tavallisimmin ensimmäisenä reaktiona anodin SEI-kerros alkaa hajoamaan. Siitä seuraa lisää lämpöä kennoon, mikä mahdollistaa anodin ja elektrolyytin välisiä reaktioita. [19]

Noin 120–140 °C:ssa litioitunut grafiittianodi alkaa reagoimaan elektrolyytin kanssa. Tämä nostaa kennon lämpötilaa entisestään ja eksotermiset reaktiot lisääntyvät. Riippuen materiaaleista, noin 150–300 °C:ssa myös katodi ja elektrolyytti hajoavat vapauttaen lämpöä ja kaasuja kennoon. Näin akkuun syntyy itsestään kiihtyvästi lämpenevä tila eli lämpökarkaaminen. [19–20]

Syttymisvaaraa lämpökarkaamisessa tuottaa erityisesti reaktioiden yhteydessä syntyvät kaasut. Esimerkiksi interkaloituneen litiumin ja elektrolyytin välisistä reaktioista voi syntyä syttyviä hiilivetykaasuja sekä katodin hajotessa happikaasua. [19–20]

#### **4.4 Mekaaniset vauriot ja materiaalien kuluminen**

Akkukennon materiaalit kokevat toistuvasti mekaanista räsitusta normaalissa käytössä. Akku kuluukin mekaanisesti ajan myötä väistämättäkin. Latausnopeuden suurentaminen vain nopeuttaa tällaista kulumista ja voimistaa akun kokemaa mekaanista räsitusta. [7]

Mekaanista räsitusta kokevat erityisesti akkukennon elektrodit. Ne joutuvat toistuvaan räsitukseen latauksen ja purkauksen aikana. Elektrodimateriaaleihin interkaloituvat litiumionit aiheuttavat useimpiin elektrodeihin tilavuuden muutosta. Esimerkiksi litioituneen grafiitin tilavuus on noin 10 % suurempi kuin litioitumattoman. Vastaavasti piipohjaisten anodimateriaalien tilavuuden muutos on jopa 300 %. Toistuva tilavuuden muutos voi aiheuttaa elektrodeihin materiaalin väsymistä. Vauriot voivat olla esimerkiksi halkeilua ja hajoamista. [20]

Nopea lataus aiheuttaa elektrodien tilavuuteen nopeita muutoksia. Tämä altistaa rakenteen rasitukseen ja väsymiseen tavallista enemmän. Nopea lataus myös voimistaa mekaanista jännitysepätasapainoa. Epätasaista mekaanista jännitystä syntyy, kun litium kertyy elektrodimateriaaliin epätasaisesti. Nopeassa latauksessa litiumionien liike on nopeaa, eikä niillä ole aikaa interkaloitua tasaisesti. Tästä syntyy elektrodimateriaalin rakenteeseen mekaanista jännitystä, jonka seurauksena rakenne voi halkeilla tai hajota. [21]

## 5 Nopean latauksen kehitys

Litiumioniakkujen nopea lataus vaatii vielä kehittämistä. Etenkin sähköauto- ja kuluttajaelektroniikkamarkkinat vaativat entistä nopeampaa latausta laitteisiin. Nopeasti lataavien litiumioniakkujen kehitys vaatii yhteensopivia materiaaleja, optimoituja latausalgoritmeja sekä mahdollisesti uusia jäähdytysteknologioita. Yksittäisen materiaalin yhteensopivuutta tärkeämpää onkin, että akkukokonaisuus tukee ja kestää nopeaa latausta. [2, 8]

### 5.1 Elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalit

Nopeassa latauksessa käytetään usein suuria sähkövirtoja. Nopeaa latausta tukevien litiumioniakkumateriaalien tarvitsekin kestää näitä poikkeuksellisen suuria sähkövirtoja. Tämä ei kuitenkaan vielä yksin riitä. Latausnopeus on hyvin paljon riippuvainen siitä, miten nopeasti litiumionit ja elektronit kulkeutuvat katodilta anodille. Hyvä ionien sekä elektronien liikkuvuus kennon sisällä on tämän vuoksi myös tärkeää. Latausvaiheessa on monta eri reaktiota, joiden tarvitsee kaikkien tapahtua nopeasti nopeaa latausta varten. Näitä ovat muun muassa katodin delitioituminen, elektronien johtuminen elektrodimateriaaleissa, ionien johtuminen elektrolyytissä, ionien kulku separaattorin ja SEI-kerroksen lävitse sekä anodin litioituminen. Usein ionien liike on rajoittavampi tekijä latausnopeuden kannalta kuin elektronien. Elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalit nopeaa latausta tukevaan litiumioniakkuun tarvitsee valita erityisesti edellä mainitut tekijät huomioon ottaen. [6]

#### 5.1.1 Anodimateriaalit

Yleisimmän anodimateriaalin, grafiitin, ominaisuudet nopeaan lataukseen eivät ole optimaaliset. Esimerkiksi alhainen toimintapotentiaali ja hidas interkalaationopeus altistavat litiumin pinoutumiselle nopean latauksen aikana. Hidas interkalaationopeus vaikuttaa suoraan myös negatiivisesti latausnopeuteen. Litiumioniakkujen anodimateriaaleiksi onkin tutkittu grafiitin tilalle paljon erilaisia materiaaleja ja niiden eri versioita. [6]

Litiumtitanaatti  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  (LTO) on yksi lupaavimmista vaihtoehdoista litiumioniakun anodimateriaaliksi grafiitin tilalle. Se on turvallisempi ja pitkäikäisempi kuin muut anodimateriaalit sekä se kestää hyvinkin suuria latausnopeuksia. Litioitumisen ja delitioitumisen aikana LTO:n tilavuus ei juurikaan muutu (vain noin 0.3 %), mikä tekee siitä pitkäikäisemmän vaihtoehdon anodimateriaaliksi kuin muut. LTO toimii korkealla

anodipotentiaalilla (1.55 V vs. Li/Li<sup>+</sup>). Tämä mahdollistaa sen, ettei litium pinoudu sen pintaan juuri ollenkaan. Näin anodille ei pääse muodostumaan separaattoria puhkavia dendriittejä, mikä lisää akun turvallisuutta. Myöskään SEI-kerrosta ei muodostu LTO-anodille, joten litiumionien on helpompaa kulkea elektrodilta toiselle. Tämä lisää nopean latauksen yhteensopivuutta. LTO-anodien heikkoutena on kuitenkin muita yleisiä anodimateriaaleja pienempi energiatiheys sekä korkean anodipotentiaalın vuoksi matalampi ulostulojännite. [23–24]

Grafiitin ja LTO:n korvaajaksi on tutkittu niobiumoksidimateriaaleja. Etenkin niobiumpentoksidilla (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) on hyvät kineettiset ominaisuudet. Toimintapotentiaali on myös sen verran korkea, ettei niobiumoksidien pintaan synny litiumin pinoutumista. Ominaiskapasiteetti on kuitenkin LTO:ta suurempi, joten siihenkin verrattuna niobiumoksidit ovat lupaavampia anodimateriaaleja. [24]

Niobiumoksidien selvänä heikkoutena on kuitenkin huono sähkönjohtavuus sekä niobiumin korkea hinta. Sähkönjohtavuutta voidaan kuitenkin parantaa esimerkiksi douppaamalla tai pinnoittamalla. Korkea hinta kuitenkin estää näiden kaupallistumisen. [24]

Piipohjaiset materiaalit ovat myös lupaavia korvaajia grafiittianodille. Piipohjaisten anodimateriaalien ominaiskapasiteetti (jopa 4200 mAh/g) on jopa yli kymmenkertainen grafiittiin verrattuna. Tämä johtuu siitä, että pii pystyy sitomaan itseensä useita litiumioneja. Parhaimmillaan interkalaation jälkeen muodostuu (Li<sub>22</sub>Si<sub>5</sub>), jossa on jopa 4.4 litiumionia sitoutunut yhtä piiatomia kohden. [6]

Varjopuolena piipohjaisissa materiaaleissa on kuitenkin se, että interkalaation yhteydessä materiaalin tilavuus muuttuu huomattavasti (jopa 300 %). Tilavuuden muutos aiheuttaa helposti anodin halkeilua. Myös SEI-kerrosta muodostuu enemmän piipohjaisiin anodimateriaaleihin tilavuuden muutosten myötä, mikä kuluttaa käytössä olevia litiumioneja. Tämä johtaa akun kapasiteetin sekä coulombisen hyötysuhteen pienenemiseen. [25]

### 5.1.2 Katodimateriaalit

Nopeaa latausta kestävä katodimateriaalin tarvitsee olla mekaanisesti kestävä sekä omata hyvä ioni- ja sähkönjohtavuus. Katodimateriaaleja onkin kehitetty useita erilaisia ja ne voidaan jakaa kiderakenteen perustella oliviini-, spinelli-, tavoriitti- ja kerrostuneisiin rakenteisiin. Kaikkien toiminta perustuu interkalaatioon. Materiaalien ominaisuuksia voidaan myös

parantaa erilaisilla tavoilla, kuten douppaamalla, pinnoittamalla, muokkaamalla pinnan muotoja tai lisäämällä johtavia materiaaleja. [12]

Kerrostunut kiderakenne koostuu päällekkäisistä litiumkerroksista, joiden välissä muut materiaalit sijaitsevat. Siinä ionit pääsevät liikkumaan kahdessa ulottuvuudessa, joten ionien liike on suhteellisen hyvää. Esimerkiksi pienelektronikassa yleisimmin käytetyn materiaalin, LCO:n, kiderakenne on kerrostunut. Sen mekaanisen kestävyuden ei kuitenkaan ajatella olevan riittävän hyvä nopeaan lataukseen. Muita materiaaleja onkin syytä tutkia sen tilalle. Esimerkiksi litiumnikkelimangaanikobolttioksidi  $\text{LiNiMnCoO}_2$  (NMC) on yksi kerrosrakenteinen katodimateriaali, jonka ominaisuudet ovat lupaavia. Siinä osa LCO:n koboltista on korvattu nikkellillä ja mangaanilla parantamaan kapasiteettia ja kestävyyttä. [12]

Litiummangaanioksidi  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO) on yksi tunnettu spinellirakenteinen katodimateriaali. Spinellirakenteessa litiumionit pääsevät liikkumaan kolmiulotteisesti, mikä lisää ionijohtavuutta. Myös sähkönjohtavuus on hyvä. Nämä ominaisuudet tukevat hyvin nopeaa latausta. Toinen suosittu spinellirakenteinen materiaali on litiumnikkelimangaanioksidi  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$  (LNMO). Sillä on parempi rakenteellinen kestävyys kuin LMO:lla. LNMO kuitenkin toimii niin korkealla potentiaalilla, etteivät tavallisesti käytetyt elektrolyytit välttämättä sovellu sen kanssa. Liian korkea katodin toimintapotentiaali voi hajottaa elektrolyyttiä, mikä puolestaan voi johtaa CEI-kerroksen muodostumiseen. Tämä heikentäisi ionien liikkuvuutta sekä vähentäisi kennon kapasiteettia. [12]

Oliviinirakenteinen litiumrautaofosfaatti  $\text{LiFePO}_4$  (LFP) on turvallinen ja edullinen vaihtoehto litiumioniakun katodimateriaaliksi. Se on myös hyvin pitkäikäinen ja ympäristöystävällisempi vaihtoehto muihin yleisesti käytettyihin katodimateriaaleihin verrattuna. LFP:llä on kuitenkin heikko ioni- ja sähkönjohtavuus, mikä osaltaan estää nopeaa latausta. Heikko ionijohtavuus johtuu osin siitä, että ionit pääsevät kulkemaan rakenteessa vain yksiulotteisesti. Kuitenkin pinnoittamalla tai douppaamalla LFP:tä voidaan muokata sen johtavuusominaisuuksia paremmiksi. [7, 27]

Spinellirakenteen lisäksi tavoriittirakenteisen, kuten litiumvanadiumfluorofosfaatti  $\text{LiVPO}_4\text{F}$  (LVPF), materiaalin rakenteessa litiumionit pääsevät liikkumaan kolmiulotteisesti. Niillä on siis hyvä ionijohtavuus, mutta sähkönjohtavuus on usein hyvinkin heikko. Sähkönjohtavuus jää kuitenkin tavoriittirakenteen ainoaksi selväksi heikkoudeksi. Sen parantaminen esimerkiksi douppaamalla tai pinnoittamalla voisi tehdä siitä sopivan rakenteen nopean latauksen katodimateriaaliksi. [12]

### 5.1.3 Elektrolyyttimateriaalit

Elektrolyytillä on suuri rooli ionien kuljettamisessa akkukennon sisällä. Ionien liike vaikuttaa suoraan latausnopeuteen, joten se halutaan mahdollisimman nopeaksi. Nopean latauksen elektrolyyttimateriaalilta vaaditaan siis hyvää ionijohtavuutta. Tätä tärkeämpää nopean latauksen kannalta on kuitenkin ionien nopea kuljetus elektrodin ja elektrolyytin rajapinnalla. Tätä ominaisuutta on yritetty parantaa muun muassa lisäaineilla. Esimerkiksi fluorietyleenikarbonaattia (FEC) ja vinyleenikarbonaattia (VC) lisäämällä saadaan aikaan vakaampi SEI-kerroksen muodostus. Vakaampi SEI-kerros lisää ionien liikkumisnopeutta elektrodin ja elektrolyytin rajapinnalla, jolloin nopeampi lataus saavutetaan helpommin. [2]

Kaupallisissa litiumioniakuissa käytetty elektrolyytti on nestemäistä, mutta tällä hetkellä kiinteät elektrolyytit ovat nousemassa yhä enemmän ja enemmän esille etenkin sähköautomarkkinoilla. Akkuja, joissa on kiinteä elektrolyytti, kutsutaan kiinteän olomuodon akuiksi (engl. Solid State Batteries). Kiinteän olomuodon akut tarjoavat perinteisiin verrattuna parempaa energiatiheyttä sekä turvallisuutta. [27]

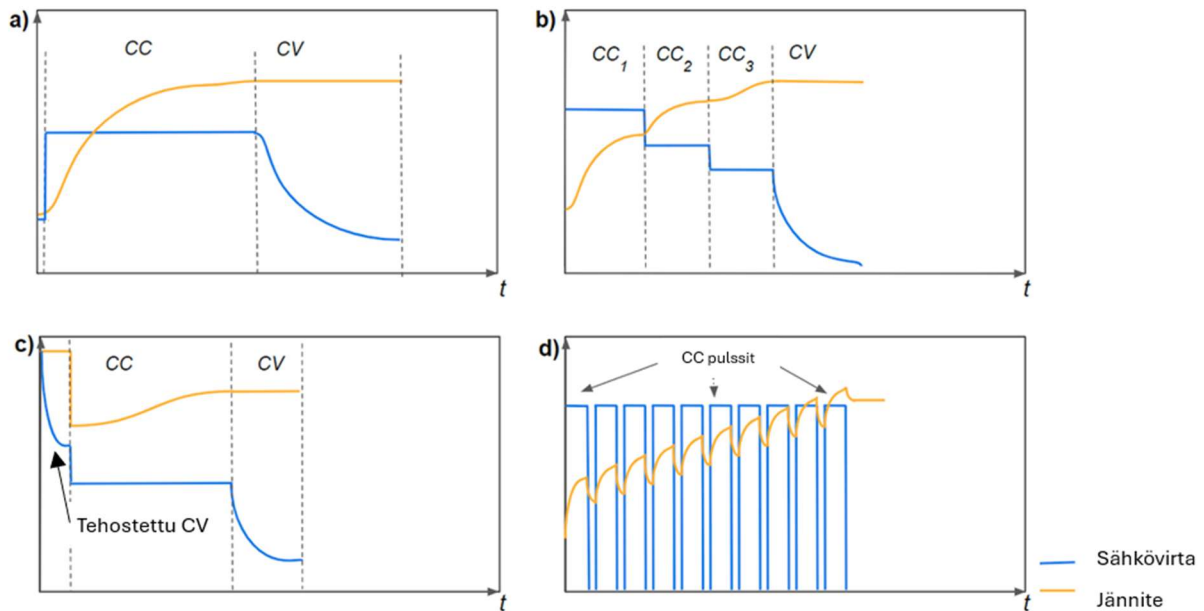
Kiinteiden elektrolyyttien nopean latauksen sopivuus voi olla kuitenkin vielä epäselvää. Uusimpien kiinteiden elektrolyyttien odotetaan kuitenkin pystyvän kilpailemaan ionijohtavuudessa nestemäisten kanssa. Nopeampi lataus saattaa olla jopa saavutettavissa kiinteän olomuodon akuissa. Niissä litiumioni on ainoa liikkuva ioni, kun nestemäisissä litiumionin lisäksi tarvitaan sille jokin vastaioni. Vastaionin puuttuminen johtaa parempaan latausnopeuteen ja -tehoon. [27]

## 5.2 Latausalgoritmien optimointi

Materiaalien yhteensopivuus nopeaan lataukseen ei yksin riitä. Litiumionien nopea kinetiikka olisi turhaa ilman nopeaa latausta tukevaa tekniikkaa myös akkukennon ulkopuolella. Lataustekniikkaa voidaankin yrittää kehittää optimoimalla latausalgoritmeja. Optimoinnissa pyritään ottamaan latausnopeuden lisäksi huomioon myös akun elinikää sekä turvallisuutta. [2]

Litiumioniakun tavallisin latausmetodi on CC-CV. Se on yksi toimiva ratkaisu nopeaankin lataukseen. CC-vaiheen sähkövirran määrää kasvattamalla saadaan suhteellisen helposti lisättyä latausnopeutta. CC-CV-latauksessa ei kuitenkaan oteta huomioon ollenkaan akun lämpötilan nousua. Tällöin akku voi helposti altistua liialle lämpenemiselle etenkin, jos CC-

vaiheessa käytetään suuria määriä sähkövirtaa. Sähkövirran määrää ei voi myöskään kasvattaa liikaa sen takia, että tietyn rajan jälkeen kokonaislatausnopeus ei välttämättä nopeudu. CC-vaiheen lyhentyessä hidas CV-vaihe pitenee, mikä saattaa jopa pidentää kokonaislatausaikaa. [2]



Kuva 3. Havainnekuva a) CC-CV-latauskuvaajasta b) MCC-latauskuvaajasta c) Teholatauskuvaajasta d) Pulssilatauskuvaajasta. Kuva käytetty muokattuna luvalla lähteestä [6]. Tekijänoikeus 2022 T. G. T. A. Bandara, J. C. Viera, ja M. González.

### 5.2.1 MCC-lataus

Yksi ensimmäisiä nimenomaan nopeaan lataukseen kehitettyjä latausalgoritmeista on kuvassa 3 b) esitetty MCC-lataus (engl. Multistage Constant Current) [2]. Se on samantyylinen lataustekniikka kuin CC-CV. Erona MCC:ssä on kuitenkin se, että se koostuu kahdesta tai useammasta CC-vaiheesta yhden sijaan. CC-vaiheen jakaminen osiin auttaa ehkäisemään akun liiallista lämpenemistä, litiumin pinoutumista sekä mekaanisia vaurioita. [7]

MCC-lataus alkaa usein syöttämällä akkuun korkeaa vakiovirtaa. Ensimmäinen CC-vaihe loppuu, kun jännite nousee ennalta määrättyyn katkaisujännitteeseen. Seuraavat vaiheet jatkuvat samanlaisesti asteittain pienenevällä vakiovirralla. MCC-lataus päätetään usein CV-vaiheeseen. CC-vaiheiden vaihtumiseen voidaan käyttää katkaisujännitteiden tilalla myös esimerkiksi ennalta määrättyjä varausasteita. [2, 8]

MCC-latauksessa CC-vaiheiden väliset latausvirtojen määrät voivat olla latauksen edetessä myös asteittain kasvavia. Alhaisella latausvirralla aloittaminen auttaa vähentämään akun sisäistä resistanssia ja parantamaan ionijohtavuutta. Tällöin akun on huomattu kestävän paremmin suuria latausvirtoja korkeillakin varausasteilla. [2, 8]

### 5.2.2 Pulssilataus

Pulssilataus on myös yksi nopeaan lataukseen soveltuva lataustekniikka. Siinä akulle annetaan vakiovirtaa lyhyinä pulsseina, kuten kuvassa 3 d) on esitetty. Pulssien välissä on aina lyhyt tauko. Pulssien ja taukojen pituuksia voidaan optimoida akun ominaisuuksien mukaan. Lataus suoritetaan loppuun asti vuorottelemalla pulsseja ja taukoja. Ideana pulssilatauksessa on, että litiumionit saavat taukojen aikana interkaloitua ilman kasaantumista anodin pinnalle. [7]

Taukojen ansiosta ionit pystyvät jakautumaan tasaisesti anodiin. Tämä ehkäisee mekaanisen stressin, ja sitä kautta myös mekaanisten vaurioiden, syntymistä rakenteeseen. Tasainen ionijakauma elektrodissa ehkäisee myös litiumin pinoutumista. Silloin anodille ei kasaannu litiumioneja eikä sinne synny paikallisia negatiivisia anodipotentiaaleja, mitkä mahdollistaisivat litiumin pinoutumisen. [3]

Pulssilataus mahdollistaa akun nopean latauksen pidemmällä syklinkestolla kuin tavallisesti käytetty CC-CV-lataus. Sen on myös todettu parantavan lataustehokkuutta. Pulssilatauksen haasteena voi kuitenkin olla oikeanlaisten pulssi-tauko-sykliden löytäminen kaikille akuille. Kaiken kaikkiaan pulssilataus on lupaava vaihtoehto tulevaisuuden nopeaan lataukseen. [3, 8]

### 5.2.3 Teholataus

Teholataus (engl. Boost Charging) on yksi nopeaan lataukseen, yleensä CC-CV-latauksen yhteydessä, käytetty latausmuoto. Teholatauksessa ladataan hyvin suurella teholla latauksen alussa, kun akun varaustaso on vielä alhainen, ja siinä hyödynnetään akun pienempää sisäistä resistanssia alhaisessa varaustasossa. [28]

Teholataukseen voidaan käyttää erilaisia tapoja. Yhteistä tavoilla kuitenkin on se, että niissä ladataan selvästi normaalia suuremmalla latausvirralla tai korkeammalla jännitteellä.

Teholataus voi olla latausta hyvin suurella vakiovirralla tai maksimijännitteellä alkuun, kuten kuvassa 3 c), ja loppuun normaalilla CC-CV-latauksella. Teholataus voi olla myös latauksen

aloittamista normaalia tehokkaammalla CC-CV-vaiheella, jota seuraa hillitympi CC-CV-vaihe latauksen loppuun. [7]

Teholataus on hyvä keino, jos tyhjän akun varaustaso tarvitsee saada ladattua edes jonkin verran hyvin nopeasti. Se myös nopeuttaa täyden kapasiteetin lataamisen kokonaisuutta. Ylisuurten latausvirtojen sekä -jännitteiden negatiivisia vaikutuksia akkuun tarvitsee kuitenkin vielä tutkia. Teholataus saattaa johtaa ainakin ylikuumenemiseen ja litiumin pinoutumiseen. [6, 8]

### 5.3 Jäähdytysteknologiat

Litiumioniakkujen yksi haasteista, etenkin nopeilla lataus- ja purkausnopeuksilla, on liiallinen lämpeneminen [7]. Etenkin sähköautojen suuret akut voivat kärsiä lämpenemisestä ilman kunnollista jäähdytystä. Akun jäähdytystä hallinnoi akun lämmönhallintajärjestelmä (BTMS, engl. Battery Thermal Management System). Jäähdytystekniikoita on kehitetty useita erilaisia. Nämä voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin jäähdytystekniikoihin. [29]

#### 5.3.1 Aktiiviset jäähdytystekniikat

Aktiivisten jäähdytystekniikoiden jäähdytys perustuu johonkin ulkoisesti toimivaan jäähdytykseen. Aktiivisia tekniikoita ovat esimerkiksi tuulettimella toimiva ilmajäähdytys tai pumpulla toimiva nestejäähdytys. Niiden heikkoutena on ylimääräisen energian käyttö sekä mahdollisesti järjestelmän monimutkaisuus. [29]

Ilmajäähdytys on toiminnaltaan hyvinkin yksinkertainen lämmönhallintaratkaisu. Tällaisessa ilmaa puhalletaan tuulettimien avulla suoraan akkukennon tai moduulin pinnoille.

Vahvuutena ilmajäähdytyksessä on järjestelmän yksinkertaisuus ja keveys. Ilmajäähdytys on kuitenkin varsin tehoton verrattuna muihin olemassa oleviin jäähdytysratkaisuihin. [29]

Nopea lataus vaatii nopeaa ja tehokasta jäähdytystä. Ilmajäähdytyksellä tällaista on vaikea saavuttaa. Ilmajäähdytystä tehokkaampaa lämmönhallintaa voidaan saavuttaa nestemäisellä jäähdytyksellä. Nestejäähdytyksessä on selvästi suurempi lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti. Tällöin lämmönhallinta sujuu huomattavasti paremmin kuin ilmajäähdytyksessä. [29]

Nestejäähdytystä on kahta erilaista: välitöntä ja välillistä. Välittömässä akkukennon on upotettu suoraan jäähdyttävään nesteeseen. Välillisessä taas akkukennojen lähellä olevissa

putkissa kiertää jäähdytinnestettä, joka kerää akun lämmön itseensä. Neste jäähdytetään ja lämpö siirtyy ympäristöön. Välillinen jäähdytys on usein turvallisempi ja sen takia suosituimpi vaihtoehto. [29]

Jäähdytinnesteet koostuvat yleensä vedestä, öljystä, nestemäisestä metallista tai nanofluideista. Etenkin nanofluidien on huomattu olevan tehokkaita jäähdyttämään akkua. Ne koostuvat jäähdytinnesteestä, johon on lisätty nanopartikkeleita. Partikkelit voivat olla muun muassa metalleja, metallioksideja sekä hiilijohdannaisia. [29]

Jäähdytysnesteeseen lisätyt nanopartikkelit törmäilevät toisiinsa, seinämiin sekä nesteen molekyyliin. Tämä edistää lämmönjohtumista aineessa. Nanopartikkelien satunnainen pyöriminen aiheuttaa mikrovirtauksia niiden ympärille, mikä osaltaan myös parantaa nesteen lämmönsiirtoa. [29] Nopean latauksen aiheuttamaan lämpenemiseen tarvitaankin hyvää lämmönjohtavuutta, koska siinä lämpötilan nousu voi olla nopeaa [7].

### 5.3.2 Passiiviset jäähdytystekniikat

Passiiviset jäähdytystekniikat perustuvat luonnollisesti tapahtuvaan konvektioon. Siinä ei siis jäähdytetä minkään ulkoisen voiman tai laitteen avulla. Passiivisia jäähdytystekniikoita ovat esimerkiksi lämpöä johtavat metallit sekä faasimuutosmateriaalit (PCM, engl. Phase Change Material). [29] Ilman tuuletinta toimiva ilmajäähdytys on käytännössä myös passiivista jäähdytystä.

Passiivisista jäähdytystekniikoista PCM-jäähdytys on saanut viime vuosina enemmän huomiota hyvien ominaisuuksiensa takia. PCM:t voisivat olla hyviä juuri nopean latauksen aiheuttamaan hetkelliseen akun lämpenemiseen. Kyseisen tekniikan jäähdyttävä toiminta perustuu PCM:ien kykyyn sitoa suuria määriä energiaa sulassa. Akun lämpöenergian noustessa PCM:n sulamislämpötilaan, alkaa PCM sulaa ja sitouttaa lämpöenergian itseensä. Tämä reaktio estää lämpötilan nousun, kunnes PCM on sulanut kokonaan. [29]

PCM:ien etuna on, että niillä voidaan helpommin jäähdyttää akkua tasaisemmin joka puolelta kuin esimerkiksi putkessa kulkevalla jäähdytysnesteellä. PCM:ien kohdalla tarvitsee kuitenkin ottaa huomioon niiden käytön turvallisuus esimerkiksi syttyvyyden kannalta. Yksi suosituin PCM on n-parafiini sen hyvän sitoutumislämpökapasiteetin ja alhaisen hinnan vuoksi. Sen ja muidenkin orgaanisten PCM:ien heikkoutena on kuitenkin heikko lämmönjohtavuus. Niihin onkin tutkittu lisättävän muun muassa johtavia materiaaleja tai nanopartikkeleita. [29]

## 6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Etenkin sähköautomarkkinoilla vaaditaan entistä nopeamman latauksen mahdollisuutta.

Nopean latauksen yhteydessä kohdataan kuitenkin vielä joitakin haasteita. Riittävän nopean latauksen saavuttamisen esteenä on monesti akun kestävyys ja turvallisuus. Kestävyyteen ja turvallisuuteen vaikuttavat merkittävimmät tekijät ovat akkukennon materiaalit sekä käytetty lataustekniikka. Materiaaleista erityisesti elektrodi- ja elektrolyyttimateriaalit ovat tärkeimpiä komponentteja nopean latauksen onnistumisessa. Nopean latauksen turvallisuuden kannalta myös BMS:n rooli on tärkeä. Sen tarvitsee olla tarpeeksi kehittynyt, jotta akkua voidaan ladata nopeasti monimutkaisillakin lataustekniikoilla.

Voidaan todeta, että nopea lataus vaikuttaa akkuun negatiivisesti eri tavoilla. Nopeaa latausta ei siis ole suotavaa käyttää turhaan akun latauksessa. Nopea lataus voimistaa ja nopeuttaa akun normaalia kulumista ajan myötä. Tällaista on esimerkiksi elektrodien halkeilu ja kuluminen. Sen lisäksi nopea lataus aiheuttaa litiumin pinoutumista joidenkin anodien pinnalle, mikä pilaa akun toimintakykyä.

Merkittävä nopean latauksen vaikutus on myös lämpeneminen ja lämpökarkaaminen. Lämpeneminen vauhdittaa muuta kulumista ja voi aiheuttaa lämpökarkaamista, mikä taas voi johtaa akun palamiseen tai räjähtämiseen. Nopean latauksen vaikutuksien ymmärtäminen on tärkeää tietääkseen, miten nopeaa latausta voidaan kehittää.

Kehitystä tarvitaan, jotta akun materiaalit kestävät nopean latauksen ilman akun toiminnan tai turvallisuuden heikkenemistä. Myös ympäristön kannalta litiumioniakkuteknologian kehitys on suotavaa. Voidaan ajatella nopean latauksen kuormittavan ympäristöä normaalia enemmän, jos akut kuluvat nopeammin. Tällöin joudutaan valmistamaan enemmän akkuja, mikä vie energiaa ja materiaaleja.

Litiumioniakkuteknologiaa voidaan kehittää usealla eri tavalla. Nopean latauksen kannalta tärkeitä asioita ovat ainakin materiaalit, latausalgoritmit sekä jäähdytysteknologiat. Näiden kehittämisessä tarvitsee huomioida, että koko systeemi tukee nopean latauksen ominaisuuksia. Esimerkiksi nopean kinetiikan elektrodimateriaaleja käytetään turhaan, jos niitä ei pystytä hyödyntämään nopealla lataustekniikalla.

Akkumateriaaleja on tutkittu ja tutkitaan paljon erilaisia. Uusissa lupaavissa materiaaleissa on kuitenkin usein jokin varjopuoli, mikä haittaa sen kaupallistamista. Liian korkea hinta,

massavalmistuksen vaikeudet tai lyhyt tutkimusaika ovat varmasti merkittäviä tekijöitä uusien akkumateriaalien kaupallistamisen estämiseksi.

Erilaisia lataustekniikkoja on testattu nopeamman latauksen saavuttamiseksi. Joissain on mietitty latausnopeuden lisäksi myös akun kestävyyttä ja turvallisuutta. Se on tärkeää etenkin silloin, kun materiaalit eivät vielä sovellu pelkästään siihen, että voitaisiin ainoastaan ladata suurella latausvirralla. Latausalgoritmien optimointi olisi hyvä tehdä akkukohtaisesti. Esimerkiksi tekoälyn hyödyntäminen latauksen optimoinnissa voisi olla askel kohti turvallista nopeaa latausta.

Akun jäähdystä tarvitaan etenkin sähköautojen suurissa akkupaketeissa. Jäähdystä olisi hyvä olla sopiva sekä nopeasti syntyvään lyhytaikaiseen että hitaasti syntyvään pitkäkestoiseen lämpenemiseen. Aktiiviset jäähdystekniikat ovat passiivisia tehokkaampia. Ne kuitenkin kuluttavat energiaa toisin kuin passiiviset. Passiivisten jäähdystekniikoiden kehittämisellä tai aktiivisten ja passiivisten jäähdystekniikoiden yhdistämisellä eli hybridijäähdystyksellä voitaisiin saada optimaalista jäähdystä akkuun.

## Lähteet

- [1] H. Sharma, S. Sharma, ja P. K. Mishra, ”A critical review of recent progress on lithium ion batteries: Challenges, applications, and future prospects”, *Microchemical Journal*, vsk. 212, s. 113494, touko 2025, doi: 10.1016/j.microc.2025.113494.
- [2] H. Xiao *ym.*, ”Recent advances in fast-charging lithium-ion batteries: Mechanism, materials, and future opportunities”, *Chemical Engineering Journal*, vsk. 506, s. 159927, tammi 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.159927.
- [3] G. Ji, L. He, T. Wu, ja G. Cui, ”The design of fast charging strategy for lithium-ion batteries and intelligent application: A comprehensive review”, *Applied Energy*, vsk. 377, s. 124538, tammi 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124538.
- [4] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, ja M. Ouyang, ”A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles”, *Journal of Power Sources*, vsk. 226, ss. 272–288, maaliskuu 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.10.060.
- [5] M. M. Hasan *ym.*, ”Advancing energy storage: The future trajectory of lithium-ion battery technologies”, *Journal of Energy Storage*, vsk. 120, s. 116511, kesä 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.116511.
- [6] J. He, J. Meng, ja Y. Huang, ”Challenges and recent progress in fast-charging lithium-ion battery materials”, *Journal of Power Sources*, vsk. 570, s. 232965, kesä 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232965.
- [7] A. Tomaszewska *ym.*, ”Lithium-ion battery fast charging: A review”, *eTransportation*, vsk. 1, s. 100011, elo 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100011.
- [8] X. Han *ym.*, ”A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle”, *eTransportation*, vsk. 1, s. 100005, elo 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100005.
- [9] L. He *ym.*, ”Research progress on high-rate graphite anode materials for lithium-ion batteries”, *Journal of Energy Storage*, vsk. 111, s. 115426, maaliskuu 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.115426.
- [10] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, ja G. Yushin, ”Li-ion battery materials: present and future”, *Materials Today*, vsk. 18, nro 5, ss. 252–264, kesä 2015, doi: 10.1016/j.mattod.2014.10.040.
- [11] H. Zhang, Y. Yang, D. Ren, L. Wang, ja X. He, ”Graphite as anode materials: Fundamental mechanism, recent progress and advances”, *Energy Storage Materials*, vsk. 36, ss. 147–170, huhti 2021, doi: 10.1016/j.ensm.2020.12.027.
- [12] P. N. Suryadi, J. Karunawan, O. Floweri, ja F. Iskandar, ”Toward high-rate capability of intercalation cathodes Li-ion batteries, potency for fast-charging application: A materials perspective”, *Journal of Energy Storage*, vsk. 68, s. 107634, syyskuu 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.107634.
- [13] Monika, A. K. Mishra, ja B. S. Patial, ”Recent advances in cathode materials for sustainability in lithium-ion batteries”, *Sustainable Chemistry One World*, vsk. 5, s. 100042, maaliskuu 2025, doi: 10.1016/j.scowo.2024.100042.
- [14] P. Zhai, K. Liu, Z. Wang, L. Shi, ja S. Yuan, ”Multifunctional separators for high-performance lithium ion batteries”, *Journal of Power Sources*, vsk. 499, s. 229973, heinäkuu 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.229973.
- [15] P. Zhu, D. Gastol, J. Marshall, R. Sommerville, V. Goodship, ja E. Kendrick, ”A review of current collectors for lithium-ion batteries”, *Journal of Power Sources*, vsk. 485, s. 229321, helmikuu 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.229321.

- [16] Y. Chu *ym.*, "Advanced Characterizations of Solid Electrolyte Interphases in Lithium-Ion Batteries", *Electrochem. Energ. Rev.*, vsk. 3, nro 1, ss. 187–219, maaliskuu 2020, doi: 10.1007/s41918-019-00058-y.
- [17] X. Lin, K. Khosravinia, X. Hu, J. Li, ja W. Lu, "Lithium Plating Mechanism, Detection, and Mitigation in Lithium-Ion Batteries", *Progress in Energy and Combustion Science*, vsk. 87, s. 100953, marraskuu 2021, doi: 10.1016/j.pecs.2021.100953.
- [18] Y. Dai ja A. Panahi, "Thermal runaway process in lithium-ion batteries: A review", *Next Energy*, vsk. 6, s. 100186, tammi 2025, doi: 10.1016/j.nxener.2024.100186.
- [19] D. Ren *ym.*, "A comparative investigation of aging effects on thermal runaway behavior of lithium-ion batteries", *eTransportation*, vsk. 2, s. 100034, marraskuu 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100034.
- [20] A. Mukhopadhyay ja B. W. Sheldon, "Deformation and stress in electrode materials for Li-ion batteries", *Progress in Materials Science*, vsk. 63, ss. 58–116, kesäkuu 2014, doi: 10.1016/j.pmatsci.2014.02.001.
- [21] B. Bose, A. Garg, B. K. Panigrahi, ja J. Kim, "Study on Li-ion battery fast charging strategies: Review, challenges and proposed charging framework", *Journal of Energy Storage*, vsk. 55, s. 105507, marraskuu 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105507.
- [22] H. Yan, D. Zhang, Qilu, X. Duo, ja X. Sheng, "A review of spinel lithium titanate (Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) as electrode material for advanced energy storage devices", *Ceramics International*, vsk. 47, nro 5, ss. 5870–5895, maaliskuu 2021, doi: 10.1016/j.ceramint.2020.10.241.
- [23] A. Kazemi *ym.*, "Enhancing high rate performance of Lithium Titanium Oxide (LTO) anodes: A comprehensive review", *Journal of Power Sources*, vsk. 630, s. 236051, helmikuu 2025, doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.236051.
- [24] F. Xie *ym.*, "Progress in niobium-based oxides as anode for fast-charging Li-ion batteries", *Energy Reviews*, vsk. 2, nro 2, s. 100027, kesäkuu 2023, doi: 10.1016/j.enrev.2023.100027.
- [25] G. F. I. Toki, M. K. Hossain, W. U. Rehman, R. Z. A. Manj, L. Wang, ja J. Yang, "Recent progress and challenges in silicon-based anode materials for lithium-ion batteries", *Ind. Chem. Mater.*, vsk. 2, nro 2, ss. 226–269, 2024, doi: 10.1039/D3IM00115F.
- [26] H. Zhou *ym.*, "Effect of fast charging on degradation and safety characteristics of lithium-ion batteries with LiFePO<sub>4</sub> cathodes", *Applied Energy*, vsk. 377, s. 124465, tammi 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.124465.
- [27] Y. Ma, R. Shang, Y. Liu, R. Lake, M. Ozkan, ja C. S. Ozkan, "Enabling fast-charging capability for all-solid-state lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, vsk. 559, s. 232647, maaliskuu 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.232647.
- [28] T. G. T. A. Bandara, J. C. Viera, ja M. González, "The next generation of fast charging methods for Lithium-ion batteries: The natural current-absorption methods", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vsk. 162, s. 112338, heinäkuu 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112338.
- [29] Z. Haddad *ym.*, "Advancements and comprehensive overview of thermal management systems for lithium-ion batteries: Nanofluids and phase change materials approaches", *Journal of Power Sources*, vsk. 603, s. 234382, toukokuu 2024, doi: 10.1016/j.jpowsour.2024.234382.