

**LITIUMIONIAKKUJEN VIKAANTUMINEN KULUTTAJA-  
ELEKTRONIKKALAITTEISSA**  
**Failures of lithium-ion batteries in consumer  
electronics**

Jani Perttilä

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT  
LUT School of Energy Systems  
Sähkötekniikka

Jani Perttilä

### **Litiumioniakkujen vikaantuminen kuluttajaelektronikalaitteissa**

2020

Kandidaatintyö.

Tarkastaja: Tommi Kärkkäinen

Litiumioniakut ovat nykyään hyvin yleisiä kuluttajaelektronikassa hyvän energiatiheyden, latausnopeuden ja muiden ominaisuuksien takia. Litiumioniakkuihin ja muihin energiavarastoihin liittyy aina riski vikaantua. Tässä kandidaatintyössä selvitetään kirjallisuustutkimuksella litiumioniakun yleiset vikaantumismekanismit ja vikaantumistekijät.

Litiumioniakut koostuvat kahdesta elektrodista: anodista ja katodista, sekä niiden välisestä separaattorista. Lisäksi akussa on elektrolyytti, SEI-kerros sekä virtakollektorit. SEI-kerros muodostuu litiumioniakun ensimmäisellä latauskerralla elektrolyytin ja anodin väliin, kun anodimateriaali pääsee reagoimaan elektrolyytin kanssa. Se on tärkeä komponentti akun vikaantumisen ja suorituskyvyn kannalta.

Litiumioniakku voi vikaantua useilla eri tavoilla. Tässä työssä perehdytään kahteen vikaantumiseen: lämpökarkaamiseen ja akun pullistumiseen. Lämpökarkaamisella tarkoitetaan reaktiota, jossa akun lämmöntuotto ja lämpötila kasvavat holtittomasti. Lämpötilan ja sisäisen paineen nousu voi lopulta johtaa akun palamiseen tai jopa räjähtämiseen. Yleisin syy lämpökarkaamiseen on akun korkea lämpötila, joka käynnistää lämpökarkaamisen reaktiot. Korkean lämpötilan usein aiheuttaa akun sisäinen oikosulku, joka voi syntyä, jos litiumioniakkua ylliladataan, lävistetään tai muuten käytetään väärin. Akun pullistumisen aiheuttaa akun sisälle muodostuneet kaasut. Ne voivat syntyä useista eri syistä, mutta yleisin syy on elektrolyytin hajoaminen ja siitä syntyvä kaasu. Litiumioniakuissa on turvaominaisuuksia, jotka pyrkivät estämään vikaantumiset ja pitämään litiumioniakkujen käytön turvallisena.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT  
LUT School of Energy Systems  
Electrical Engineering

Jani Perttilä

**Failures of lithium-ion batteries in consumer electronics**

2020

Bachelor's Thesis.

30 p.

Examiner: Tommi Kärkkäinen

Lithium-ion batteries are very common in consumer electronics today due to their good energy density, charging speed and other features. Lithium-ion batteries and other energy stores always have a risk of failure. The aim of this thesis is to determine failure mechanisms and failure factors of the lithium-ion battery.

The components of a lithium-ion battery are anode and cathode and between them is the separator. Also, the battery contains an electrolyte, SEI layer and current collectors. The SEI layer is formed on the first charge of the lithium-ion battery between electrolyte and anode when the anode material reacts with the electrolyte. It is an important component of battery as it affects the performance of the battery and can prevent it from failure.

In this thesis the focus is on thermal runaway and battery swelling. Thermal runaway is a reaction in which heat output and temperature of the battery increase uncontrollably. An increase temperature and internal pressure can eventually lead to the battery burning or exploding. The most common reason for thermal runaway is high temperature of the battery, which triggers a series of reactions that can lead to thermal runaway. High temperatures are often caused by an internal short circuit in the battery, which can occur if the lithium ion battery is overcharged, punctured or otherwise misused. Battery swelling is caused by gases formed inside the battery. They can occur for a variety of reasons, but the most common cause is electrolyte degradation. Lithium-ion batteries have safety features that try to prevent failures and keep batteries safe from malfunction.

## SISÄLLYSLUETTELO

### Käytetyt Lyhenteet

1. Johdanto.....	6
1.1 Työn tavoite ja rajaus .....	6
2. Menetelmät .....	7
3. Litiumioniakun rakenne ja toiminta .....	8
4. Litiumioniakun vikaantumistavat .....	11
4.1 Lämpökarkaaminen (thermal runaway) .....	11
4.2 Pullistuminen (swelling).....	12
4.3 Litiumioniakkujen turvaominaisuudet.....	13
5. Litiumioniakun vikaantumismekanismit .....	14
5.1 Ulkoinen oikosulku .....	14
5.2 Sisäinen oikosulku .....	15
5.3 Litiumioniakun syväpurkautuminen.....	15
5.4 Litiumioniakun virheellinen lataaminen.....	16
5.5 Muiden tekijöiden vaikutus litiumioniakun vikaantumiseen.....	17
6. Yhteenveto.....	18
Lähteet .....	19

**KÄYTETYT LYHENTEET**

BMS	Battery management system
CID	Current interrupt device
CMC	Karboksimetyyliselluloosa
ESC	External short circuit
ISC	Internal short circuit
LCO	Litiumkoolttioksidi
PTC	Positive temperature coefficient
PVDF	Polyvinylideenifluoridi
SBR	Styreenibutadieenikumi
SEI	Solid electrolyte intherphase
SOC	State of charge

## 1. JOHDANTO

Nikkelipohjaiset akut olivat hallitseva akkutyyppe kuluttajaelektronikassa 1990-luvulle asti (Buchmann 2016) kunnes Sony kaupallisti ensimmäisen Li-ion-akun vuonna 1991 (Buchmann 2018b), jolloin litiumioniakut alkoivat yleistyä. Nykyään lähes kaikissa puhelimissa ja kuluttajaelektronikan laiteissa käytetään litiumioniakkuja (Naha ym. 2019). Niiden käyttö on kasvanut parempien ominaisuuksien takia verrattuna nikkelipohjaisiin akkuihin (Choi ym. 2010). Parempia ominaisuuksia on esimerkiksi parempi latausnopeus, yksittäisten kennojen korkeampi jännite ja huoltovapaus. Lisäksi litiumioniakkujen hinnat ovat laskeneet ja kapasiteetit nousseet (Buchmann 2018b).

Akku halutaan toteuttaa niin, että sen energiatiheys on mahdollisimman suuri, koska akun korkea energiatiheys näkyy kuluttajille parempana akunkestona. Jokaisessa energiavarastossa on kuitenkin riski (Buchmann 2019a). Litiumioniakut, joissa on suuri energiatiheys, ovat alttiita vikaantumaa ja akku saattaa esimerkiksi räjähtää voimakkaasti vikaantuessaan (Naha ym. 2019). Litiumioniakkujen turvallisuus onkin saanut huomiota mediassa. Laadukkaat litiumioniakut ovat yleisesti turvallisia nykypäivänä tuotannon kattavan laaduntarkkailun ja akun turvaominaisuuksien takia. Arvioidaan, että laadukkaiden litiumioniakkujen vikaantumisaste on parempi kuin yksi miljoonasta (Buchmann 2019a). Vikaantuminen on kuitenkin mahdollinen ja tässä työssä tarkastellaan syitä, miten litiumioniakku voi vikaantua ja mitä siitä seuraa.

### 1.1 Työn tavoite ja rajaus

Työn tavoitteena on selvittää mitä litiumioniakulle tapahtuu, kun se vikaantuu ja mitkä tekijät tyypillisesti saavat akun vikaantumaan. Työ rajataan niin, että tutkimus kohdistuu prismaattisien litiumkoolttioksidin eli LCO-pohjaisiin litiumioniakkuihin, niiden vikaantumisiin ja vikaantumistekijöihin. Rajaus tehdään, koska LCO-pohjaiset litiumioniakut ovat kaikkein yleisimpiä kuluttajaelektronikassa (Buchmann 2010). Kuluttajaelektronikalla tarkoitetaan tässä työssä kännyköitä, kannettavia tietokoneita sekä muita vastaavia laitteita. Vikaantumisella tarkoitetaan joko akun pullistumista (swelling) tai lämpökarkaamista (thermal runaway). Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mitä litiumioniakulle tapahtuu lämpökarkaamisessa?
- Mitä litiumioniakulle tapahtuu pullistumisessa?
- Mitkä tekijät voivat aiheuttaa yllämainitut vikaantumiset?

## 2. MENETELMÄT

Tutkimuksen tavoitteeseen ja tutkimuskysymyksiin vastattiin keräämällä aineistoa ja koostamalla niistä raportti eli tämä kandidaatintyö. Työ on pääosin kirjallisuustutkimus ja pohjatielona oli, että litiumioniakku voi vikaantua pullistumalla tai räjähtämällä. Lisäksi tiedettiin, että vikaantumiset liittyvät akun sisäiseen rakenteeseen ja siellä tapahtuviin reaktioihin. Aiheeseen perehdyttiin lisää etsimällä aineistoa litiumioniakkujen rakenteeseen, vikaantumismekanismeihin ja vikaantumisiin liittyen. Lähes kaikki työn lähteistä ovat saatavilla LUT-Finna-palvelun kautta löytyvistä tietokannoista, kuten IEEE Xplore Digital Librarysta ja Science Directistä. Pyrin ottamaan kaikki lähteet kyseisistä tietokannoista, koska siellä olevat materiaalit ovat lähtökohtaisesti luotettavia. Suurin osa työn lähteistä on tieteellisiä artikkeleita, mutta työssä on käytetty myös yhtä opinnäytetyötä ja litiumioniakkuihin liittyvää kirjaa. Lisäksi yleistajuista materiaalia litiumioniakkuihin liittyen, kuten akkuihin liittyvää historiaa ja kuvia, on haettu nettisivuilta esimerkiksi Battery Universityn sivuilta, jotka perustuvat Buchmannin kirjoittamaan kirjaa: Batteries in a Portable World. Litiumioniakun prismaattisen akkurakenteen ja pullistumisen havainnollistamiseksi, kuvattiin kaksi kannettavan tietokoneen akkua röntgenillä.

Ensimmäisessä asiakappaleessa käydään läpi litiumioniakun komponentit ja niiden tehtävät sekä akun prismaattinen rakenne. Työ aloitettiin tästä, koska siten vikaantumisia ja vikaantumismekanismia on helpompi ymmärtää ja selostaa. Kyseisessä luvussa keskitytään akun sisällä oleviin komponentteihin, koska ne ovat avainasemassa litiumioniakkujen vikaantumisien näkökulmasta. Seuraavassa asiakappaleessa perehdytään litiumioniakun käyttäytymiseen lämpökarkaamisessa ja pullistumisessa, koska tässä työssä keskitytään kyseisiin vikaantumisiin. Vikaantumismekanismia käsittelevässä luvussa keskitytään lähteiden mukaan yleisimpiin mekanismeihin, jotka voivat aiheuttaa litiumioniakun vikaantumisen. Luvussa käydään läpi myös mekanismeja, jotka omasta mielestäni ovat potentiaalisia tekijöitä vikaannuttamaan litiumioniakun normaalissa käytössä. Lopullinen rakenne muodostui siten, että lukijan on luontevaa ja helppoa seurata ja ymmärtää työtä. Johtopäätökset on muodostettu lukemalla useita aiheisiin liittyviä artikkeleita ja koostamalla niistä kokonaisuus, joka on kirjoitettu omin sanoin työhön. Jokaisessa luvussa on pyritty käyttämään useaa lähdetä, jotta asiasta saisi mahdollisimman paljon tietoa ja samalla tulisi tarkistettua lähteiden luotavuutta vertaamalla niiden asiaa keskenään.

### 3. LITIUMIONIAKUN RAKENNE JA TOIMINTA

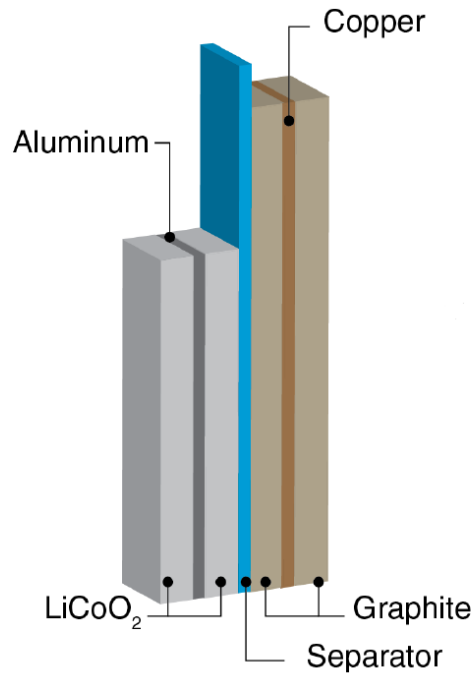
Litiumioniakkuja on olemassa useita erilaisia eri käyttötarkoituksiin. Näitä kaikkia kuitenkin yhdistää sama toimintaperiaate. Litiumioniakku koostuu yhdestä tai useammasta kennosta. Yhden litiumionikennon jännite on noin 3.6 V, joka on korkea verrattuna nikkelpohjaisiin kennoihin, joiden jännite on noin 1.2 V. Tästä syystä litiumioniakkuja voi käyttää yksittäisinä kennoina esimerkiksi puhelinten tehollälähteinä eikä kennoja tarvitse olla useampaa kytkettynä sarjaan (Buchmann 2018a).

Litiumionikeno koostuu kahdesta elektrodista: anodista ja katodista, sekä niiden välisestä separaattorista. Anodi on negatiivinen ja katodi positiivinen elektrodi (Buchmann 2018a). Litiumioniakun anodin tehtävä on vapauttaa elektroneja akkua purettaessa ja vastaanottaa niitä akkua ladatessa (Buchmann 2018b). Anodi on usein valmistettu hiilestä, joka on grafiittimuodossa. Grafiitti on hyvin yleinen materiaali anodissa, koska se on halpaa ja kestävä (Hakala 2018). Anodissa on myös virtakollektori, jonka kautta akun sähköenergian hyödyntäminen ja lataaminen on mahdollista. Anodin virtakollektori on yleensä kuparifolio, jonka molemmille puolille on kiinnitetty grafiitti sidosaineella kuvan 3.1 osoittamalla tavalla. Sidosaime on yleensä polyvinylideenifluoridia (PVDF), karboksimeyyiliselluloosaa (CMC) tai styreenibutadieenikumia (SBR) (Hakala 2018).

Katodin tehtävä on vastaanottaa elektroneja akkua purettaessa ja vapauttaa niitä akkua ladatessa (Buchmann 2018b). Katodi on kuluttajaelektronikan litiumioniakuissa valmistettu usein litiumkربولttioksidista ( $\text{LiCoO}_2$ , LCO). Myös katodi tarvitsee virtakollektorin, joka usein on alumiinifolio. Katodissa on saman tyyppinen rakenne kuin anodissa eli virtakollektorin molemmille puolille on kiinnitetty litiumkربولttioksidia sidosaineella, joka usein on polyvinylideenifluoridia (PVDF). Litiumionikربولttioksidi on yleisin katodimateriaali, koska sillä on suuri energiatiheys, hyvä syklikestävyys, vähäinen itsepurkautuminen ja korkea purkausjännite. Litiumionikربولttioksidin sisältämä koboltti on kuitenkin kallis alkuaine, sitä on rajallisesti saatavilla ja se ei ole termisesti stabiili materiaali. Näiden syiden takia on etsitty muita sopivia materiaaleja katodin valmistamiseen. (Hakala 2018)

Jotta ionien vapaa kulku anodin ja katodin välillä olisi mahdollista, tarvitaan elektrodien välille elektrolyytti (Buchmann 2018b). Elektrolyytti on orgaanista ja herkästi syttyvää liuotinta, jossa on erilaisia litiumsuoloja. Elektrolyytin koostumus vaihtelee eri valmistajien akuissa ja akkutyypeissä, mutta yleisesti käytetty elektrolyytti on litiumheksafluorofosfaattia ( $\text{LiPF}_6$ ) liuotettuna etyleeni- ja dietyylikarbonaatti seokseen (Hakala, 2018). Litiumioniakku tarvitsee elektrodien väliin myös separaattorin, joka estää fyysisen kontaktin anodin ja katodin välillä ja voi toimia myös viimeisenä varokeinona, jos akku ylikuumentuu. Elektrolyytti lisätään akun valmistuksessa separaattoriin ja se tunkeutuu sen mikrohuokosiin (Yoshio ym. 2009).

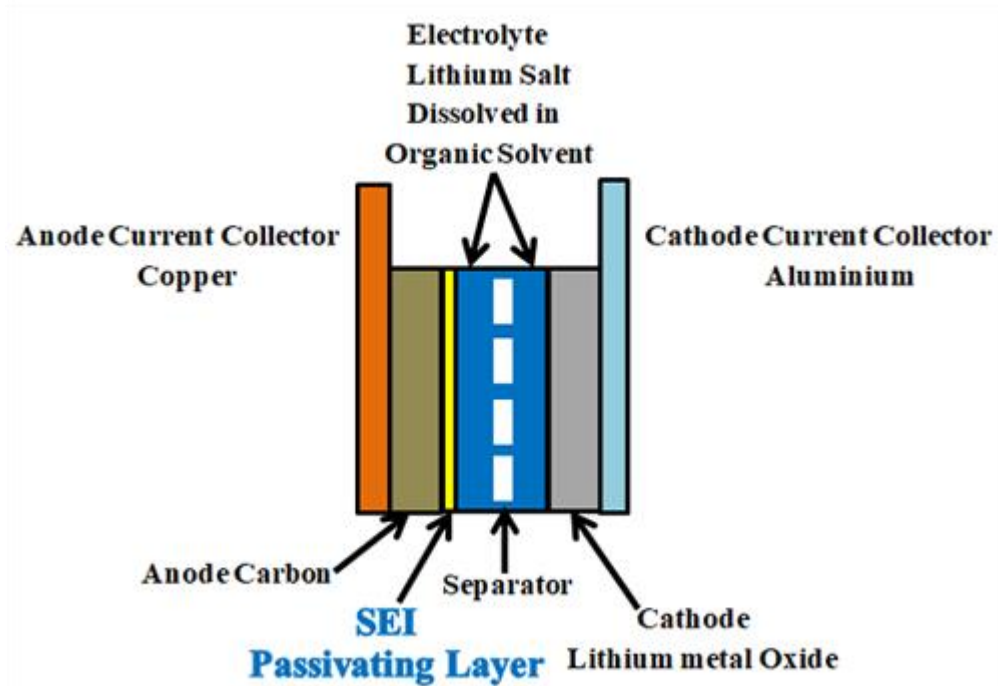




Kuva 3.1 Kuvassa näkyy katodi ja sen alumiininen virtakollektori (vasemmalla) ja anodi ja sen kuparinen virtakollektori (oikealla). Lisäksi elektrodien välissä on separaattori. (EXPONENT, 2017).

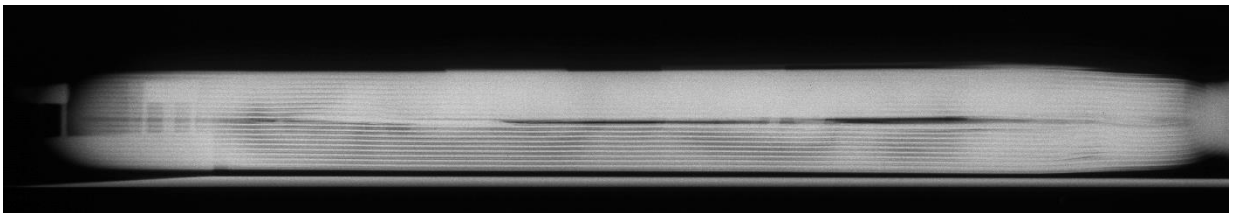
Litiumioniakut voidaan jakaa eri ryhmiin elektrolyyttimateriaalin mukaan. Elektrolyytti voi olla nestemäinen, geelimäinen tai kiinteä. Separattorin materiaali riippuu käytettävästä elektrolyytistä. Yleisesti litiumioniakussa, jossa on nestemäinen elektrolyytti, käytetään mikrohuokoista polymeeriä tai polypropeenaa, jonka paksuus on alle 30  $\mu\text{m}$ . Geelimäisessä elektrolyytissä voidaan käyttää samantyyppistä separaattorikalvoa kuin nestemäisissä elektrolyyteissä. Litiumioniakuissa, joissa on kiinteä elektrolyytti, toimii elektrolyytti samalla myös separaattorina. (Yoshio ym. 2009)

Elektrolyytin tehtävä on myös muodostaa kuvan 3.2 mukainen SEI (solid electrolyte interphase) -kerros. Ominaisuuksiltaan hyvä SEI-kerros ehkäisee kaasujen muodostumista akun sisään ja on siten tärkeä akun vikaantumisen, eliniän ja suorituskyvyn näkökulmasta (Zhi ym. 2018). SEI-kerros muodostuu litiumioniakun ensimmäisellä latauskerralla elektrolyytin ja anodin väliin, kun anodimateriaali pääsee reagoimaan elektrolyytin kanssa. Sen muodostumisesta syntyy kaasuja akun sisään, joten tuotannossa SEI-kerroksen muodostumisesta muodostuneet kaasut päästetään ulos akusta ennen sen sulkemista (Zhang, S 2014). SEI-kerros estää elektrodin suoran kosketuksen elektrolyytin kanssa ja toimii siis suojaavana kerroksena, koska elektrolyytin altistuminen elektrodiin voi johtaa akun vikaantumiseen. SEI-kerroksen paksuus uudessa akussa noin 0,5  $\mu\text{m}$ , mutta se alkaa kasvamaan akun käytön aikana (Balagopal ym. 2018).



Kuva 3.2 Kuvassa näkyy yllä mainitut akun komponentit ja rakenne. Akun vikaantumisen näkökulmasta tärkeä SEI-kerros sijaitsee anodin ja elektrolyytin välissä. (CircuitDigest, 2019)

Litiumakkuja voidaan koteloida useilla eri tavoilla. Yleisiä pakkaustyypppejä ovat esimerkiksi prismaattinen ja sylinterimäinen kotelo. Kännyköissä ja kannettavissa tietokoneissa käytetään paljon prismaattisia akkuja, koska siten saadaan käytettyä akulle suunniteltu tila mahdollisimman tehokkaasti. Prismaattinen rakenne saadaan kierittämällä anodin, katodin ja separaattorin muodostama kokonaisuus kuvan 3.3 osoittamaan rakenteeseen. (Buchmann 2019b)



Kuva 3.3 Kuvassa on röntgenkuva erään kannettavan tietokoneen akun kennosta. Kuvasta näkee kerrosmaisesta rakenteesta. Kerrokset eivät ole täysin yhdensuuntaisia, koska akku on käytetty ja hieman pullistunut.

## 4. LITIUMIONIAKUN VIKAANTUMISTAVAT

Litiumioniakut joutuvat kestävämmän monenlaista käyttöä ja altistuvat näin muun muassa värinälle, puristukselle, lämmölle ja muille ulkoisille tekijöille. On mahdollista, että litiumioniakku vikaantuu ja vikaantumiseen johtavia syitä voi olla useampi. Tässä työssä perehdytään kahteen vikaantumiseen: lämpökarkaamiseen sekä akun pullistumiseen.

### 4.1 Lämpökarkaaminen (thermal runaway)

Litiumioniakun lämpökarkaamisella tarkoitetaan reaktiota, jossa lämmön tuotto ja akun lämpötila kasvavat holtittomasti. Lämpötilan ja sisäisen paineen nousu voi lopulta johtaa akun palamiseen tai jopa räjähtämiseen, kuten kuvassa 4.1. Yleisin syy lämpökarkaamiseen on korkea lämpötila (Guo, D ym. 2018). Tietyt tekijät voivat kasvattaa litiumioniakun sisäistä lämpötilaa siten, että lämpökarkaaminen syntyy. Tällaisia tekijöitä on esimerkiksi sisäinen oikosulku, ulkoinen oikosulku ja ylilataus. Jos litiumioniakun lämpötila alkaa kasvamaan, eikä akku pysty haihduttamaan lämpöä tarpeeksi tehokkaasti, syntyy akun sisällä kemiallisia reaktioita ja lämpökarkaaminen voi tapahtua.

Litiumioniakun SEI-kerros alkaa hajoamaan noin 90 - 120 °C tai jopa aiemmin riippuen akusta. Tämä reaktio on eksoterminen eli se vapauttaa lämpöä. Muodostunut lämpö kiihdyttää reaktiota entisestään. SEI-kerroksen haihduttua pääsee elektrolyytti reagoimaan suoraan anodin hiilen kanssa, josta syntyy lämpöä ja palavia kaasuja kuten metaania ja etaania. Myös elektrolyytti alkaa haihtumaan. Palavat kaasut eivät syty, vaikka lämpötila kasvaisi suuremmaksi kuin kaasujen syttymislämpötila, koska kennossa ei ole tarpeeksi happea. (Wang ym. 2012)

Jos litiumioniakun lämpötila jatkaa nousuaan, tapahtuu separaattorin shutdown-ilmiö, joka voi pysäyttää lämpökarkaamisen. Shutdown-ilmiössä separaattorin rakenne muuttuu korkean lämpötilan vaikutuksesta eristäväksi kerrokseksi (Yoshio ym. 2009). Jos kuitenkin litiumioniakun lämpötila jatkaa nousuaan, noin 130 °C, alkaa separaattori sulaa ja syntyy sisäinen oikosulku elektrodien välillä. Oikosulun takia lämpötila nousee entisestään ja korkea lämpötila aiheuttaa katodimateriaalin hajoamista, josta syntyy happea ja lämpöä. Syntynyt happi mahdollistaa palavien kaasujen ja elektrolyytin palamisen kennossa. Kennon sisälle syntynyt paine voi purkautua varoventtiilistä, joka päästää kaasut pois. Purkautuvat kaasut voivat syttyä ilmassa, koska ne saavat happea ja samalla kennon sisään pääsee happea, joka reagoi litiummetallien kanssa ja tapahtuu syttyminen, joka voi johtaa räjähdykseen. Yllä kuvatut reaktiot eivät kuitenkaan aina tapahdu täysin järjestyksessä vaan voivat tapahtua samaan aikaan, josta johtuu litiumioniakun epävakaata tilaa lämpötilan kohotessa. (Wang ym. 2012)



Kuva 4.1 Kuvassa litiumioniakun lämpökarkaamisesta johtuva reaktio. Kyseisessä kuvassa akusta on poistettu suojaava piiri ja sitä ylliladattiin. (Electronics 360, 2019)

#### 4.2 Pullistuminen (swelling)

Kuluttajaelektroniikassa käytetään paljon prismaattisia litiumionikenoja akkuina (Buchmann 2019b). Kyseisessä akkurakenteessa on mahdollista akun pullistuminen. Pullistumisella tarkoitetaan tässä työssä akun prismaattisen rakenteen muutosta tyynymäiseksi. Ilmiöön on monia eri syntymekanismeja, mutta yleisesti pullistuminen johtuu akun sisälle muodostuneista kaasuista. Suurin osa kaasuista syntyy elektrolyytin hajoamisesta. Tärkeä osa elektrolyytin keston kannalta on SEI-kerros, koska sen haihduttua, pääsee elektrolyytti reagoimaan suoraan anodin kanssa, josta muodostuu kaasuja ja lisää SEI-kerrosta. Reaktiosta muodostuu lämpöä, joka voi kasvattaa akun lämpötilaa ja edesauttaa kaasujen syntymistä ja jopa johtaa lämpökarkaamiseen (Zhang, S. 2014). Pullistuminen voi tapahtua litiumioniakulle myös lämpökarkaamisessa, kunnes kaasut purkautuvat akusta, mutta akku voi pullistua ilman lämpökarkaamista. Se mitä kaasuja akun sisälle muodostuu, riippuu akussa käytetyistä materiaaleista ja kemiallisista reaktioista, jota materiaalien välillä tapahtuu. Jotkut syntyneet kaasut voivat olla palavia, kuten metaani. Kun paine akun sisällä kasvaa suuremmaksi kuin ympäristön paine, akku voi pullistua kuvassa 4.2 näkyvällä tavalla. Pullistuminen näkyy myös akun sisäisessä rakenteessa siten, että kuvassa 3.3 näkyvät kerrokset eivät ole täysin yhdensuuntaisia.



Kuva 4.2 Kuvassa pullistunut litiumioniakku (vasemmalla) ja normaali litiumioniakku(oikealla). (Epec, 2019)

### 4.3 Litiumioniakkujen turvaominaisuudet

Litiumioniakkujen turvallisuutta on pyritty parantamaan turvaominaisuuksilla, jotka rajoittavat muun muassa litiumioniakun lämpötilan liiallista nousua. Turvaominaisuuksia on olemassa useita erilaisia, mutta kaikissa akuissa ei niitä ole ja ne eivät estä akun vikaantumista kaikissa olosuhteissa. Yleisiä turvaominaisuuksia on esitetty alla olevassa taulukossa 4.1:

Taulukko 4.1 Yleisiä litiumioniakun turvaominaisuuksia taulukoituna. Perustuu lähteisiin: (Wang ym. 2012) ja (Yoshio ym. 2009)

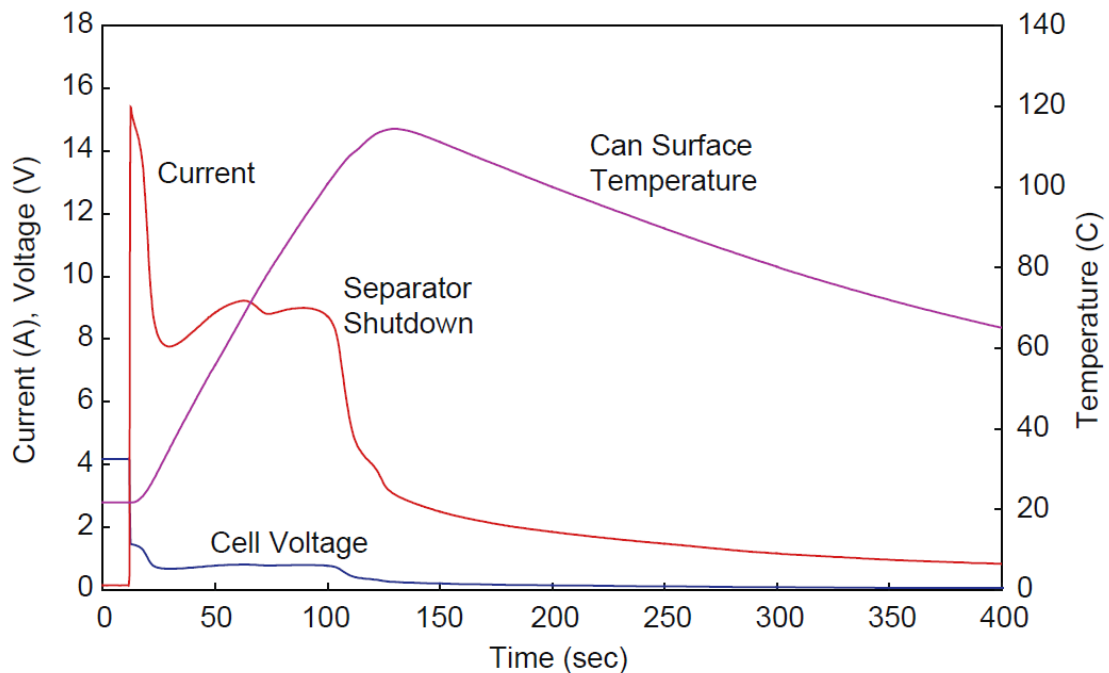
Turvaominaisuus	Toiminta
Varoventtiili	Päästää akun sisälle kertyneen korkean paineen pois (Wang ym. 2012).
Lämpösulake	Johdin, joka sulaa ja lopettaa kennon toiminnan pysyvästi, kun kennon lämpötila nousee noin 30-50°C yli akun maksimikäyttölämpötilan (Wang ym. 2012).
PTC (positive temperature coefficient)	Elementti, jonka resistanssi kasvaa huomattavasti lämpötilan noustessa noin 100-130-asteeseen. Resistanssi rajoittaa virtaa ja näin ollen lämmöntuottoa (Wang ym. 2012).
Shutdown	Shutdown-ilmiössä separaattorin huokoinen ionoita läpäisevä rakenne muuttuu korkean lämpötilan vaikutuksesta ei-huokoiseksi eristäväksi kerrokseksi. Tällöin akun sisäinen impedanssi kasvaa niin suureksi, että oikosulku estyy, koska virta ei pääse kulkemaan anodin ja katodin välillä. Tämä estää kennon toiminnan pysyvästi. (Yoshio ym. 2009)
BMS (battery management system)	Piiri, joka tarkkailee ja säätelee useampikennoisen akun kennojen ominaisuuksia kuten jännitettä ja lämpötilaa (Wang ym. 2012).
CID (current interrupt device)	Kun sisäinen paine kasvaa riittävän suureksi, erottaa CID akun navat elektrodeista ja näin estää virran kulkemisen (Yoshio ym. 2009).
Suojapiiri	Estää akun yllilataamisen ja liiallisen purkamisen rajoittamalla akun jännitettä esimerkiksi pitämällä matalimman jännitteen 3V ja suurimman jännitteen 4.35V. Lisäksi se estää liian suuren virran kulkemisen purku tai lataustilanteessa (Yoshio ym. 2009)

## 5. LITIUMIONIAKUN VIKAANTUMISMEKANISMIT

Ylläkuvatut vikaantumiset voivat johtua useista eri tekijöistä. Eräs vikaantumisen aiheuttava tekijä on oikosulku. Se on yksi suurimmista turvallisuusriskistä litiumioniakuissa (Moeini ja Wang 2018.). Akkujen oikosulut voidaan jakaa kahteen ryhmään: sisäiseen oikosulkuun (ISC) ja ulkoiseen oikosulkuun (ESC) joista molemmat voivat aiheuttaa akun vikaantumisen. Oikosulut voivat tapahtua, jos litiumioniakkua käyttää väärin. Useat eri vikaantumismekanismit, kuten akun ylilataus ja syväpurkautuminen, voivat johtaa sisäiseen oikosulkuun ja lopulta akun vikaantumiseen.

### 5.1 Ulkoinen oikosulku

Ulkoinen oikosulku syntyy, kun litiumioniakun navat kytetään toisiinsa pienellä impedanssilla. Ulkoisesta oikosulusta syntyy lämpöä lyhyessä ajassa. Litiumioniakun käyttäytyminen ulkoisessa oikosulutilanteessa riippuu akkuyksilöstä. Käyttäytymiseen vaikuttaa akussa olevat turvaominaisuudet ja akun kyky haihduttaa lämpöä. Lämmön syntymiseen vaikuttaa akun sisäinen resistanssi ja akun varaustila (SOC). Mitä pienempi akun sisäinen resistanssi on, sitä suuremmaksi oikosulkuvirta kasvaa ja akun lämpötila nousee. Akun varaustila vaikuttaa siten, että mitä suurempi varaustila, sitä korkeammaksi lämpötila nousee vikaantumisessa. Kun oikosulku muodostuu, alkaa litiumioniakun lämpötila nousemaan kuvan 5.1 mukaisesti. Myös akun sisäinen paine alkaa kasvamaan oikosulun alkuhetkillä. (Xia ym. 2014)



Kuva 5.1 Sylinterimäisen litiumioniakun oikosulkukäyttäytyminen. Kyseisessä akussa ei ollut muita turvaominaisuuksia kuin separaattorin shutdown ja CID. (Yoshio ym. 2009)

Jos oikosulku jatkuu, voi tapahtua lämpökarkaaminen. Turvaominaisuudet usein toimivat ja estävät lämpökarkaamisen ennen kuin lämpötila nousee noin 130 °C. Tässä lämpötilassa separaattorin shutdown-ilmiö lähtee käyntiin, jolloin virta lähtee laskemaan kuvan 5.1 mukaisesti. (Xia ym. 2014)

## 5.2 Sisäinen oikosulku

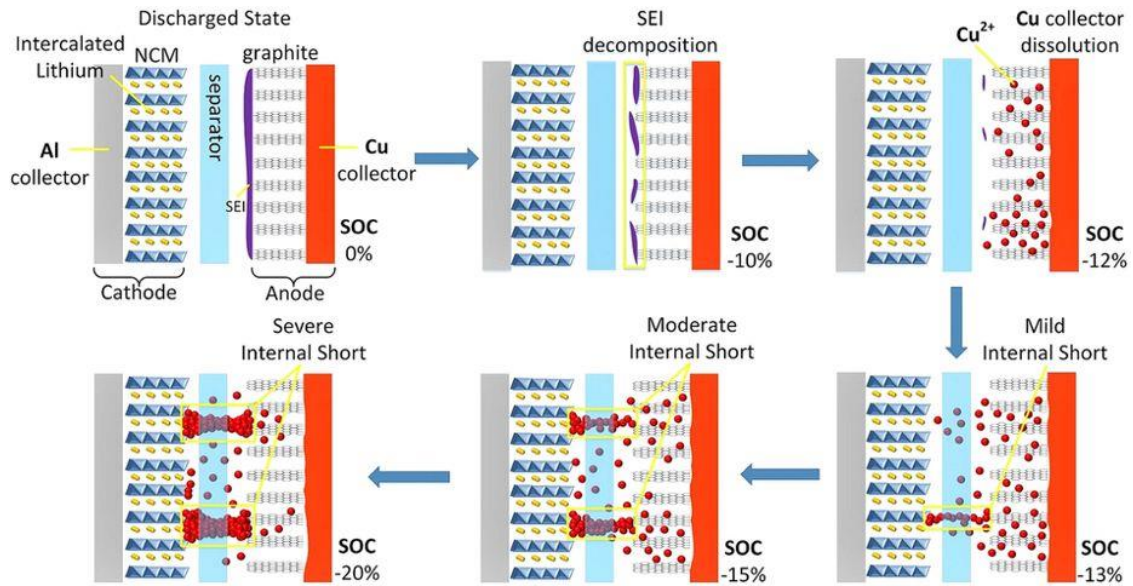
Sisäisellä oikosululla tarkoitetaan sitä, että akun sisällä olevien anodin ja katodin välille muodostuu oikosulku. Oikosulku voi syntyä joko virtakollektoriin tai varsinaiseen elektrodiin eli sisäisiä oikosulkuja on neljä erilaista, joista yleisin on anodielektrodin ja katodin virtakollektorin välinen oikosulku (Moeini ja Wang 2018). Sisäinen oikosulku on aiheuttanut useita vaaratilanteita esimerkiksi Samsung Galaxy Note 7 puhelimen vikaantumisia. Kyseisessä tapauksessa useiden Note 7-puhelimien litiumioniakut syttyivät palamaan. Eräs vikaantumiseen johtava tekijä oli litiumioniakun valmistuksessa syntyneet terävät hitsauspisteiden kohoumat akun navoissa. Kohoumien kautta sisäinen oikosulku oli mahdollinen, kun akku laajenee ja kutistuu normaalissa käytössä (EXPONENT, 2017).

Kun sisäinen oikosulku on syntynyt, alkaa akun lämpötila nousta nopeasti oikosulkukohdassa. Lämpötilan nousu aiheuttaa useita kemiallisia reaktioita, kuten SEI-kerroksen hajoamista, elektrolyytin ja elektrodien välisiä reaktioita ja elektrolyytin haihtumista eli samoja reaktioita mitä lämpökarkaamisessa (Guo, D ym. 2018). Lämpötilan kasvua rajoittaa resistanssi oikosulkukohdassa eli sisäisestä oikosulusta ei aina seuraa nopeaa lämpökarkaamista. Lämpökarkaaminen tai akun pullistuminen on kuitenkin mahdollista ja suurin osa litiumioniakkujen lämpökarkaamisista on johtunut juuri sisäisestä oikosulusta (Seo ym. 2019).

## 5.3 Litiumioniakun syväpurkautuminen

Syväpurkautumisella tarkoitetaan akun jännitteen laskemista alle minimijännitteen. Syväpurkautuminen pitää ottaa huomioon akkua käytettäessä ja varastoidessa, koska litiumioniakun syväpurkautuminen voi aiheuttaa akun vikaantumisen ja ominaisuuksien heikkenemisen. Syväpurkauksesta johtuvien vaikutusten suuruus riippuu siitä, kuinka alhaiseksi akun jännite laskee. Myös akun anodin ja katodin materiaalit vaikuttavat akun käyttäytymiseen syväpurkauksessa. Kuitenkin LCO-pohjaisissa akuissa syväpurkautuminen johtaa akun ominaisuuksien heikkenemiseen ja vikaantumiseen. (Li ym. 2008)

Kun akun jännite putoaa alle litiumioniakun salliman rajan, sen SEI-kerros alkaa hajoamaan. Hajoamisesta vapautuu kaasuja kuten hiilidioksidia, joka johtaa akun pullistumiseen. Samaan aikaan akun anodin kupariselle kollektorille tapahtuu sähkökemiallinen reaktio, jossa kupari hapettuu. Kupari-ionit liukenevat elektrolyyttiin ja voivat läpäistä separaattorin ja kiinnittyä katodiin. Kyseinen sähkökemiallinen reaktio vähentää akun kapasiteettia merkittävästi. Jos akkua ei ladata ja kyseinen reaktio toistuu tarpeeksi kauan, voi akun sisälle syntyä sisäisiä oikosulkuja, kuten kuvassa 5.2 näkyy. (Guo, R. 2016)



Kuva 5.2 Kuvassa näkyy kuinka varauksen laskiessa alkaa SEI-kerros hajoamaan ja kuparivirtakollektori hapettumaan. Kuparin hapettumisesta syntyvät ionit voivat kulkea separaattorin läpi ja aiheuttaa sisäisiä oikosulkuja. (Guo, R ym. 2016)

Jos syväpurkautunut akku ladataan, haihtunut SEI-kerros muodostuu uudestaan. Tämä uusi kerros kasvattaa akun sisäistä impedanssia ja sen muodostumisesta muodostuu kaasuja akun sisälle. Kuitenkin kun akun lataa syväpurkautumisen jälkeen, saattaa pullistuminen hieman vähentyä, koska uuden SEI-kerroksen muodostuminen kuluttaa akun sisällä olevaa kaasua. Katodiin kiinnittyneet kupari-ionit muodostavan katodin pinnalle pinnoitteen, kun akku ladataan ja tämä reaktio huonontaa akun ominaisuuksia (Li ym. 2008). Pinnoitteeseen saattaa syntyä kohoumia, jotka voivat lävistää separaattorin ja aiheuttaa sisäisiä oikosulkuja (Zhang, L. 2015).

#### 5.4 Litiumioniakun virheellinen lataaminen

Litiumioniakku voi vikaantua, jos sitä ylliladataan tai sitä ladataan liian suurella virralla. Litiumioniakuissa on usein suojaava piiri, joka estää yllilatauksen esimerkiksi yli 4.35V ja rajoittamalla latausvirran alle 1C. Litiumioniakku voi silti yllilatautua, jos laturi tai suojapiiri havaitsee kennon jännitteen väärin tai laturi tai suojapiiri on muuten viallinen (Yoshio ym. 2009). Yllilatauksella tarkoitetaan sitä, että akun jännite ladataan määritettyä jännitettä suuremmaksi.

Litiumioniakun ollessa yllilataustilassa, tapahtuu anodissa ja katodissa rakenteellisia muutoksia. Ylimääräisiä litiumioneja siirtyy anodille ja ne muodostavat kerroksen anodin pinnalle ja elektrodeista tulee termisesti epävakaita. Ylimääräinen energia muuttuu lämmöksi ja voi johtaa lämpökarkaamiseen. Lisäksi anodin pinnalle muodostuneeseen kerrokseen voi syntyä kohoumia, jotka voivat lävistää separaattorin ja aiheuttaa sisäisen oikosulun (Yoshio ym. 2009). Akun lataamisesta alhaisessa lämpötilassa voi myös syntyä kohoumia anodiin ja aiheuttaa sisäisen oikosulun (Hendricks ym. 2015). Kohoumien muodostuminen on yksi pää syy litiumioniakkujen sisäisiin oikosulkuihin (Guo, D ym. 2018).

Litiumioniakun lataus liian suurella virralla voi aiheuttaa elektrodien murtumisia. Murtumakohdissa elektrodien materiaali pääsee reagoimaan uudestaan elektrolyytin kanssa ja syntyy SEI-kerrosta. Tästä reaktiosta vapautuu lämpöä ja kaasua akun sisään ja akku voi vikaantua



(Hendricks ym. 2015). Litiumioniakun latauksessa akun lämpötila kasvaa neliöllisesti virtaan nähden, joten myös korkea lämpötila voi käynnistää lämpökarkaamisen (Yoshio ym. 2009).

### 5.5 Muiden tekijöiden vaikutus litiumioniakun vikaantumiseen

Litiumioniakun fyysisen rakenteen rikkoutumisesta, esimerkiksi puristumalla tai lävistymällä, voi seurata sisäinen oikosulku ja se voi myös johtaa akun vikaantumiseen. Jos litiumioniakun lävistää esimerkiksi naulalla, akun anodi ja katodi menevät oikosulkuun. Samoin jos akkua puristaa kasaan, voi elektrodit mennä oikosulkuun. Litiumioniakkujen sisäisiä oikosulkuja on tutkittu muun muassa naulatestillä, jossa akun läpi painetaan naula tai puristustestillä, jossa akkua puristetaan kasaan. (Loud ym. 2002)

Litiumioniakun ikääntyminen voi myös vikaannuttaa akun. Litiumioniakku voi vikaantua riippumatta siitä käyttäkö sitä vai ei ajan kuluessa. Kun akku on käytössä eli sitä ladataan ja puretaan sykleissä, elektrodien jatkuva laajentuminen ja kutistuminen altistaa elektrodin elektrolyyttiin, josta syntyy uutta SEI-kerrosta. Muodostunut SEI-kerros heikentää akun kapasiteettia ja akku lämpenee enemmän ladattaessa ja purettaessa, koska sisäinen impedanssi kasvaa. Lisäksi syntymisreaktiosta muodostuu kaasua akun sisään, joka voi näkyä akun pullistumisena. Muodostuneen kaasun määrä on kuitenkin pientä normaalissa käytössä (Wu ym. 2016.). Akun ikääntyminen, siten että sitä ei käytetä, voi myös johtaa vikaantumiseen. Tästäkin tapauksessa akun SEI-kerros kasvaa, koska elektrolyytin yli oleva potentiaaliero saa litiumioneja liikkumaan hitaasti elektrodista elektrolyyttiin. Litiumionit ja elektrolyytti reagoivat keskenään, josta syntyy SEI-kerrosta ja kaasuja, joka voi saada akun pullistumaan. Ikääntyminen on voimakkaampaa, jos akkua säilytetään lähellä 0% tai 100% varauksessa, koska silloin potentiaaliero on suurimmillaan (Balagopal ym. 2018).

Liian korkea tai matala ulkoinen lämpötila voi myös vikaannuttaa akun. Lämpötilarajat, jossa akku vikaantuu, riippuvat akun ominaisuuksista kuten kyvystä haihduttaa lämpöä. Korkea ulkoinen lämpötila voi aiheuttaa SEI-kerroksen hajoamista ja johtaa reaktioiden sarjaan, josta seuraa lopulta lämpökarkaaminen. Jos akkua käytetään suositeltua korkeammassa lämpötilassa, mutta ei kuitenkaan niin korkeassa, että syntyy lämpökarkaaminen, akun SEI-kerros kasvaa. Lämpöenergia saa litiumionit reagoimaan elektrolyytin kanssa, josta seuraa uutta SEI-kerrosta. Tästä reaktiosta syntyy kaasuja akun sisään, joista osa ovat palavia. Muodostunut paine voi saada anodin ja katodin halkeilemaan, josta seuraa jälleen uuden SEI-kerroksen muodostumista (Balagopal ym. 2018). Reaktiosta muodostuneet kaasut voivat saada akun pullistumaan. Myös liian matalassa lämpötilassa litiumioniakku voi vikaantua. Akun katodiin syntyy kohoumia, kun lämpötila on tarpeeksi alhainen. Kohoumat usein syntyvät sivureaktiona, kun akkua ladataan. Kohoumat voivat läpäistä separaattorin ja oikosulkea anodin ja katodin ja näin johtaa akun vikaantumiseen (Wu ym. 2016.).

## 6. YHTEENVETO

Litiumioniakut koostuvat kahdesta elektrodista: anodista ja katodista, sekä niiden välisestä separaattorista. Lisäksi akussa on elektrolyytti, SEI-kerros sekä virtakollektorit. SEI-kerros on tärkeä komponentti akun vikaantumisen ja suorituskyvyn näkökulmasta. Litiumioniakut voivat vikaantua useilla eri tavoilla. Kaksi yleistä tapaa, miten litiumioniakku voi vikaantua, on lämpökarkaaminen ja pullistuminen. Lämpökarkaamisessa litiumioniakun lämpötila alkaa nousemaan holtittomasti ja voi johtaa akun räjähtämiseen. Litiumioniakun pullistumisella tarkoitetaan akun prismaattisen rakenteen muutosta tyynymäiseksi. Akun pullistumisen aiheuttaa akun sisälle muodostuneet kaasut. Ne voivat syntyä useista eri syistä, mutta yleisin syy kaasun syntymiseen on elektrolyytin hajoaminen ja siitä syntyvä kaasu.

Tekijöitä, jotka voivat aiheuttaa nämä vikaantumiset on useita. Suurin osa litiumioniakkujen lämpökarkaamisista johtuvat sisäisistä oikosuluista. Sisäisen oikosulun voi aiheuttaa esimerkiksi litiumioniakun ylilataus, syväpurkautuminen, lävistyminen, puristuminen tai liian korkea tai matala käyttölämpötila. Sisäisestä oikosulusta voi seurata akun pullistuminen tai lämpökarkaaminen, riippuen muun muassa resistanssista oikosulkukohdassa. Myös ulkoinen oikosulku voi aiheuttaa litiumioniakun vikaantumisen. Litiumioniakuissa on yleensä turvaominaisuuksia, jotka pyrkivät estämään vikaantumisen. Turvaominaisuuksia ovat esimerkiksi suojaava piiri ja separaattorin shutdown-ilmiö.

Työn tavoitteena oli selvittää litiumioniakun rakenne, mitä litiumioniakulle tapahtuu, kun se vikaantuu ja miten vikaantuminen voi tapahtua. Työtä rajattiin käsittämään kuluttajaelektronikassa yleisesti käytettyihin LCO-pohjaisiin prismaattisiin litiumioniakkuihin ja niiden yleisiin vikaantumisiin. Työ antaa hyvän yleiskuvan litiumioniakuista ja niiden vikaantumisista, vaikka aiempaa pohjatietoa ei olisi. Työn tavoitteeseen päästiin ja tutkimuskysymyksiin vastattiin. Jatkotutkimusta voisi tehdä vielä perehtymällä tarkemmin kemiallisiin reaktioihin akun sisällä vikaantumisissa ja selvittää tarkemmin minkälaisia vikaantumisia ja vikaantumistekijöitä on eri materiaaleista valmistetuilla litiumioniakuilla. Jatkotutkimusta voisi tehdä myös vikaantumisten vaikutuksesta turvallisuuteen varsinkin, kun jatkuvasti kehitetään suuremman energiatiheyden omaavia akkuja, joissa on enemmän potentiaalia esimerkiksi akun räjähtämiseen.

## LÄHTEET

Balagopal, B., Huang, C. S. & Chow, M. 2018. Effect of calendar ageing on SEI growth and its impact on electrical circuit model parameters in Lithium ion batteries.

Buchmann, I., 2019a. Safety Concerns with Li-ion [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.10.2019]. Saatavissa: [https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/safety\\_concerns\\_with\\_li\\_ion](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/safety_concerns_with_li_ion)

Buchmann, I., 2019b. Types of Battery Cells [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.11.2019]. Saatavissa: [https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_battery\\_cells](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells)

Buchmann, I., 2018a. How do Lithium Batteries Work? [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.10.2019]. Saatavissa: [https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries)

Buchmann, I., 2018b. Battery Building Blocks [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.11.2019]. Saatavissa: [https://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_104b\\_building\\_blocks\\_of\\_a\\_battery](https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_104b_building_blocks_of_a_battery)

Buchmann, I., 2016. Introduction [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.10.2019]. Saatavissa: [https://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_002\\_introduction](https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_002_introduction)

Buchmann, I., 2010. Lithium-ion Safety Concerns [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.10.2019]. Saatavissa: [https://batteryuniversity.com/learn/archive/lithium\\_ion\\_safety\\_concerns](https://batteryuniversity.com/learn/archive/lithium_ion_safety_concerns)

Choi, J., Kim, S. H. & Kim, D. 2010. Enhancement of thermal stability and cycling performance in lithium-ion cells through the use of ceramic-coated separators. Journal of Power Sources, 195(18), pp. 6192-6196. doi:10.1016/j.jpowsour.2009.11.020

CircuitDigest, 2019. Understanding Solid Electrolyte Interface (SEI) to Improve Lithium Ion Battery Performance. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: <https://circuitdigest.com/article/what-is-solid-electrolyte-interface-sei-to-improve-lithium-ion-battery-performance>

Electronics 360, 2019. Learn Why Lithium-ion Batteries Explode. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: <https://electronics360.globalspec.com/article/7868/video-learn-why-lithium-ion-batteries-explode>

Epec, 2019. Prismatic & pouch battery packs. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.12.2019]. Saatavissa: <https://www.epectec.com/batteries/prismatic-pouch-packs.html>

EXPONENT, 2017. Samsung Recall Support Note7 Investigation Root Cause Analysis. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.10.2019]. Saatavissa: [https://news.samsung.com/global/wp-content/themes/btr\\_newsroom/download.php?id=RujopxFF95b70oqw2SSQn3cIe2h9FIPFzKNa3EsW0Ao%3D](https://news.samsung.com/global/wp-content/themes/btr_newsroom/download.php?id=RujopxFF95b70oqw2SSQn3cIe2h9FIPFzKNa3EsW0Ao%3D)

- Guo, D., Sun, L., Zhang, X., Xiao, P., Liu, Y. & Tao, F. 2018. The Causes of Fire and Explosion of Lithium Ion Battery for Energy Storage.
- Guo, R., Lu, L., Ouyang, M. & Feng, X. 2016. Mechanism of the entire overdischarge process and overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries. *Scientific Reports*, 6(1), . doi:10.1038/srep30248
- Hakala, J. 2018. Metallien talteenotto litiumioniakuista. Jyväskylän yliopisto. Pro gradu-tutkielma.
- Hendricks, C., Williard, N., Mathew, S. & Pecht, M. 2015. A failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA) of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 297, pp. 113-120. doi:10.1016/j.jpowsour.2015.07.100
- Li, H., Gao, J. & Zhang, S. 2008. Effect of Overdischarge on Swelling and Recharge Performance of Lithium Ion Cells. *Chinese Journal of Chemistry*, 26(9), pp. 1585-1588. doi:10.1002/cjoc.200890286
- Loud, J., Nilsson, S. & Du, Y. 2002. On the testing methods of simulating a cell internal short circuit for lithium ion batteries.
- Moeini, A. & Wang, S. 2018. Fast and Precise Detection of Internal Short Circuit on Li-Ion Battery.
- Naha, A., Khandelwal, A., Hariharan, K. S., Kaushik, A., Yadu, A. & Kolake, S. M. 2019. On-Board Short-Circuit Detection of Li-ion Batteries Undergoing Fixed Charging Profile as in Smartphone Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(11), pp. 8782-8791. doi:10.1109/TIE.2018.2889623
- Seo, M., Park, M., Song, Y. & Kim, S. W. 2019. Model-based internal short circuit detection of lithium-ion batteries using standard charge profiles.
- Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J. & Chen, C. 2012. Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery. *Journal of Power Sources*, 208(C), pp. 210-224. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.02.038
- Zhi, J., Hiroshi, N., Chan, Y.C. 2018. Failure analysis on Mobile Phone Batteries and Accessories. *Conf. Rec 2018 IEEE 20th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*. S.710-711.
- Zhang, L. 2015. Capacity fading mechanism during long-term cycling of over-discharged LiCoO<sub>2</sub>/mesocarbon microbeads battery. *Journal of Power Sources*, 293, pp. 1006-1015. doi:10.1016/j.jpowsour.2015.06.040
- Zhang, S. 2014. Insight into the gassing problem of Li-ion battery. *Frontiers in Energy Research*, 2, p. <xocs:firstpage xmlns:xocs=""/>. doi:10.3389/fenrg.2014.00059

Wu, A., Wu, D. & Wang, C. 2016. Failure mechanism due to aging effects in lithium-ion batteries. INTELEC, International Telecommunications Energy Conference (Proceedings), 2016-, . doi:10.1109/INTLEC.2015.7572369

Xia, B., Chen, Z., Mi, C. & Robert, B. 2014. External short circuit fault diagnosis for lithium-ion batteries.

Yoshio, M., Brodd, R. J. & Kozawa, A. 2009. Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies. New York, NY: Springer New York.