



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Maria Siekkinen

# AKKUTEKNIIKAN KESKEISET PERIAATTEET JA KÄSITTEET

Akkukoulutuspäivän materiaalit

Tekniikka  
2024

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Maria Siekkinen
Opinnäytetyön nimi	Akkutekniikan keskeiset periaatteet ja käsitteet
Vuosi	2024
Kieli	suomi
Sivumäärä	78
Ohjaaja	Joel Songok

Tämä opinnäytetyö on tehty VAMIAN opettajille järjestettävää koulutuspäivää varten. Koulutuspäivä järjestetään akkusektorin kasvavan työvoimatarpeen takia. Tavoitteena on muodostaa koko akkuarvoketjun työntekijöille sopiva oppimateriaali, joka soveltuu kaikille, jotka ovat samalla koulutustasolla kuin VAMIAN opettajat.

Opinnäytteessä perehdytään ensimmäisenä akkusektoriin sekä akkuarvoketjuun. Tämän jälkeen tarkastellaan akkuarvoketjun eri vaiheiden työtehtäviä. Seuraavaksi kerrotaan mahdollisista koulutusmenetelmistä. Tämän jälkeen muodostetaan oppimateriaalit koulutuspäivää varten. Viimeisenä opinnäytetyössä on pohdintaa akkusektorista sekä oppimateriaalien muodostamisesta. Käytetyt tutkimusaineistot koostuvat erilaisista akkusektorista tehdyistä raporteista ja kirjallisuudesta.

Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että akkusektorin työvoiman tarve on huomattavassa kasvussa. Näin ollen tarve kouluttaa osaavaa työvoimaa on myös suuri. Akkuarvoketjun tarkastelu paljastaa litiumioniakkujen olevan pääasiallinen kaupallinen akkukemia tällä hetkellä. Tämän takia oppimateriaalit keskittyvät litiumioniakkuihin. Oppimateriaaleissa on otettu huomioon koulutuksen pituus, aiheajaus sekä aiempi osaaminen.

---

Avainsanat akkusektori, akkuarvoketju, oppimateriaalit

## ABSTRACT

Author	Maria Siekkinen
Title	Battery Technology's Key Principles and Concepts
Year	2024
Language	Finnish
Pages	78
Name of Supervisor	Joel Songok

---

This thesis has been done for the purpose of a training day that is organized for the teachers of VAMIA. The training day is organized due to the growing need for labor in the battery sector. The goal is to create teaching materials that are suitable for employees of the entire battery value chain and teachers with corresponding educational level as VAMIA's teachers.

The thesis first examines the battery sector and the battery value chain. After this, we will explore the jobs of the battery value chain. Next, possible training methods are discussed. After this, teaching materials are created for the training day. Finally, the thesis contains reflections on the battery sector and the creation of the teaching materials. The research materials used consist of various reports and literature of the battery sector.

Based on the research the need for labor in the battery sector is growing significantly. Therefore, the need to train a skilled workforce is also great. An examination of the battery value chain reveals that lithium-ion batteries are currently the main commercial battery chemistry. This is why the learning materials focus on lithium-ion batteries. The teaching materials take into account the length of the training, the limitations set on the subject and previous knowledge.

---

Keywords                      battery sector, battery value chain, teaching materials

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
2	TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT AKKUSEKTORILLA.....	9
3	LITIUMIONIAKKUJEN ARVOKETJU .....	11
3.1	Raakamateriaalit ja niiden prosessointi.....	12
3.2	Komponentit ja kennojen valmistus .....	14
3.2.1	Katodi .....	15
3.2.2	Anodi .....	16
3.2.3	Kennojen tuotanto .....	16
3.3	Akkumoduulien ja -pakettien valmistus .....	21
3.4	Akkujen integraatio.....	22
3.5	Toinen elämä.....	23
3.6	Kierrätys .....	24
3.6.1	Suorat ja epäsuorat kierrätysmenetelmät.....	25
3.6.2	Kierrätystekniikat .....	28
4	ARVOKETJUN TYÖTEHTÄVÄT.....	30
5	KOULUTUSSTRATEGIAT .....	32
5.1	Osaamisstrategia akkusektorille .....	32
6	OPPIMATERIAALIT .....	35
6.1	Tärkeät käsitteet .....	35
6.2	Akkutyypit .....	37
6.3	Komponentit .....	38
6.4	Toimintaperiaate.....	39
6.4.1	Litiumionien liike .....	42
6.4.2	Katodin ja anodin varaus.....	42
6.4.3	Jännite ja tehokkuus .....	43

6.5	Materiaalit.....	44
6.5.1	Katodi .....	44
6.5.2	Anodi .....	45
6.5.3	Elektrolyytti .....	49
6.6	Akkukemiat .....	50
6.6.1	Energia- ja tehotiheydet.....	51
6.6.2	Purkukäyrät .....	53
6.6.3	Sykli-ät .....	55
6.6.4	Käyttökohteet .....	56
6.6.5	Tulevaisuuden kemiat .....	58
6.7	Vikatilat .....	61
6.7.1	Oikosulku.....	62
6.7.2	SEI-kerros .....	64
6.7.3	Lämpötilan karkaaminen.....	67
6.8	Kennon ikääntyminen .....	68
6.8.1	Lämpötila.....	69
6.8.2	Impedanssi .....	70
6.8.3	Ylilataaminen ja ylipurkaminen.....	70
6.9	BMS-järjestelmä.....	72
7	POHDINTA.....	74
	LÄHTEET .....	75

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Kartta koboltti-, grafiitti- ja litiumesiintymistä pohjoismaissa vuonna 2022. (Business Finland ym., 2023)	14
<b>Kuva 2.</b> Sähköautojen akun hinta suhteutettuna koko hintaan. (Venditti, 2023)	18
<b>Kuva 3.</b> Kennojen koteloimisgeometriat: lieriö (a), prismaattinen (b), ja pussi (c). (Budde-Meiwes ym., 2013)	20
<b>Kuva 4.</b> Suurimmat sijoitukset Euroopan akkuteollisuuteen vuodelta 2020. (ALBATTs, 2020)	21
<b>Kuva 5.</b> Akkujen kierrätysmenetelmät jaoteltuna akkujen arvoketjussa. (Dai ym., 2021)	26
<b>Kuva 6.</b> Kustannukset ja ympäristövaikutukset, kun tuotetaan 1 kg NMC111-akkukemiaa. (Dai ym., 2021)	28
<b>Kuva 7.</b> ALBATTsin akkusektorin osaamisstrategia välivaiheineen. (ALBATTs, 2021)	33
<b>Kuva 8.</b> Litiumioniakun rakenne ja rajapinnat. (J. T. Warner, 2019)	39
<b>Kuva 9.</b> Lieriömäisen akun kokoamisjärjestys. (J. Warner, 2015)	39
<b>Kuva 10.</b> Akkukenno purkamisen aikana. (J. T. Warner, 2019)	41
<b>Kuva 11.</b> Akkukenno lataamisen aikana. (J. T. Warner, 2019)	41
<b>Kuva 12.</b> Katodimateriaalien rakenteet. (J. T. Warner, 2019)	45
<b>Kuva 13.</b> Litiumioniakkukemioiden ominaisuudet taulukoituna. (J. T. Warner, 2019)	51
<b>Kuva 14.</b> Litiumionikennojen gravimetriset energiatiheydet. (J. T. Warner, 2019)	52
<b>Kuva 15.</b> C-arvon vaikutus kennon suoriutumiseen. (J. T. Warner, 2019)	53
<b>Kuva 16.</b> Litiumioniakkukemioiden purukäyrät. (J. T. Warner, 2019)	54

<b>Kuva 17.</b> Litiumioniakkujen purkukäyrät käyttöjännitteissä. (J. T. Warner, 2019)	55
<b>Kuva 18.</b> Kennon sykli-ikä erilaisissa purkusyvyyksissä. (J. T. Warner, 2019)	56
<b>Kuva 19.</b> Litium-ilma-akun rakenne. (J. T. Warner, 2019)	59
<b>Kuva 20.</b> Litiummetallista muodostuneet dendriitit. (J. T. Warner, 2019)	63
<b>Kuva 21.</b> SEI-kerroksen sijainti kennossa. (J. T. Warner, 2019)	65
<b>Kuva 22.</b> Todenmukaisempi kuvaus SEI-kerroksesta. (J. T. Warner, 2019)	65
<b>Kuva 23.</b> Lämpötilan vaikutus kennon toimintaan. (J. T. Warner, 2019)	67
<b>Taulukko 1.</b> Akkujen arvoketjun työtehtävät. (ALBATTs, 2020).....	31
<b>Taulukko 2.</b> Tärkeät käsitteet. ....	36
<b>Taulukko 3.</b> Anodimateriaalien ominaiskapasiteetit suuruusjärjestyksessä. (J. T. Warner, 2019) .....	47
<b>Taulukko 4.</b> Tulevaisuuden kemioiden energiatiheydet ja sykli-iat. ....	61
<b>Taulukko 5.</b> Akkukemioiden minimi- ja maksimijännitteet. (J. T. Warner, 2019)	72

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on koota oppimateriaalit akkukoulutuspäivälle. Näitä oppimateriaaleja käytetään koulutuspäivässä, joka järjestetään VAMIAN opettajille, mutta ne pätevät kaikille saman koulutustason omaaville opettajille. Akkusektori on nopeasti kasvava tekniikan ala, josta halutaan myös Suomessa hyötyä. Vuonna 2021 julkaistu akkustrategia rajasi selkeät tavoitteet, miten saadaan lisättyä Suomen asemaa akkuteollisuudessa (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2021). Se teki selväksi Suomen halukkuuden olla osana akkusektorin kasvua. Varsinkin Vaasassa on kasvava tarve osaamiselle akkusektorilla johtuen uusista alan hankkeista. Vaasan isoimpia hankkeita tällä hetkellä on GigaVaasa-tehdasalue (Vaasan kaupunki, 2023). Tämän takia olisi tärkeää, että opettajilla olisivat paremmat valmiudet opettaa aiheesta. Oppimateriaaleissa tullessaan keskittymään litiumioniakkujen toimintaan sekä toimintaan liittyviin ominaisuuksiin ja ilmiöihin, koska se on tällä hetkellä maailmanlaajuisesti hallitseva akkutekniikka.



## 2 TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT AKKUSEKTORILLA

Maailmanlaajuisesti ollaan siirtymässä pois fossiilisten polttoaineiden käytöstä, minkä takia sähköistyminen on keskeisessä roolissa hiilidioksidipainotteisten sovellusten korvaamisessa (ANE, 2022). Varsinkin kuljetus- ja energiasektorilla vähennetään hiilidioksidipäästöjä akkujen avulla (Ahlbrecht ym., 2021). Sähköistymisen lisääntyessä on luontaisesti myös kasvanut tarve puhtaalle energialle. Sillä korvataan fossiilisia energialähteitä, jotta tulevaisuudessa ei olisi energiakapasiteetin vajetta. (ANE, 2022) Akut edesauttavat myös tarjoamalla laajalla mittakaavalla saatavilla olevan energiavaraston hajautetulle energialle (Ahlbrecht ym., 2021). Lisäksi laajempaan akkujen integroimiseen on rohkaissut hintojen laskeminen akkusektorilla (ANE, 2022), mikä on tehnyt akuista kilpailukykyisempiä.

EIT RawMaterials ja Fraunhofer julkaisivat vuonna 2021 raportin, jonka mukaan litiumioniakkujen kysyntä kasvoi maailmanlaajuisesti yli 20 GWh:sta 250 GWh:iin vuosien 2010 ja 2020 välillä. Tämän raportin mukaan kysynnän odotetaan kasvavan jopa 2,3 TWh vuoteen 2030 mennessä. Tällöin Euroopan kysynnän on ennakoitu olevan 400–1 000 GWh, joka on 20–30 % maailmanlaajuisesta kysynnästä. Kasvava kysyntä luo tarpeen sijoittaa suuren skaalan tuotantolaitoksiin Euroopassa, mikä taas luo tarpeen pätevälle työvoimalle. Kilpailukykyinen akkuteollisuus vaatii kokeneita asiantuntijoita, jotka sekä toimivat projektien johtajina että kouluttavat uutta asiantuntijoiden ja henkilökunnan sukupolvea. (Ahlbrecht ym., 2021) Tarpeellinen työvoima ei nimenomaan ole rajoittunut vain akkutuotanto-tehtaisiin vaan tutkimukset ovat osoittaneet, että ylävirran arvoketjussa työvoiman tarve on jopa 4–6 kertaa suurempi kuin itse akkujen tuotannossa. Varsinkin tehtaiden perustamisen alkuvaiheessa ydintiimi on tavanomaisesti koottu ulkomailta tuoduista asiantuntijoista, joilla on jo kokemusta akkutuotannosta. Nämä asiantuntijat ovat useimmiten Aasiasta, Euroopasta ja Yhdysvalloista. Määrällisesti suurin tarve kohdistuu kuitenkin tuotanto- ja prosessityöntekijöihin, vaikka suurin pula onkin pätevämmistä asiantuntijoista. Jotta voitaisiin vastata kasvavaan akun arvoketjun tarpeisiin, on arvioitu, että Euroopassa on koulutettava sekä uudelleen

koulutettava noin 800 000 työntekijää vuoteen 2025 mennessä. Pohjoismaissa esimerkiksi Suomen tarve työntekijöille on arvioitu olevan 4 000, Ruotsissa 8 000 ja Norjassa 7 000 vuoteen 2026 mennessä. (Business Finland ym., 2023)

Pohjoismaissa akkusektorin kasvaminen on nähtävissä erityisesti Suomessa, Ruotsissa sekä Norjassa. Suomea pidetään houkuttelevana vaihtoehtona raakamateriaalien, aktiivisten materiaalien sekä kierrätyksen suhteen. Myös Suomen Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisema akkustrategia vuodelta 2021 ennakoii Suomen akku- ja sähköistymissektorin olevan edelläkävijä taitojen, työpaikkojen, innovaatioiden ja kestävän talouskasvun suhteen vuoteen 2050 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2021). Ruotsissa Fossil Free Swedenin vuonna 2020 julkaisema strategia kestäväälle akkuarvoketjulle painottaa kunnianhimoa kehittää akkuteollisuutta muun muassa varmistamalla taitojen kehittämisen akkusektorilla, jotta siirtymä olisi tehokas (Fossil Free Sweden, 2020). Akkuyhtiö Northvolt on suurelta osin vastuussa tästä kunnianhimosta, koska sen tuotanto käsittää suuren osan akkujen arvoketjusta aina aktiivisten materiaalien tuotannosta, kennojen kokoamiseen ja kierrätykseen (ANE, 2022). Northvoltin mukaan yhtiön työntekijöiden määrä on kasvanut nopeasti perustamisvuoden 2016 jälkeen ja vuoden 2023 lokaussa työntekijöitä on ollut yli 5 500 (Northvolt, 2023). Norjan etuna on yhteisymmärrys, joka vallitsee koulutussektorin sekä julkisen ja yksityisen sektorin välillä, akkusektorin potentiaalin hyödyntämisestä. Lisäksi Norjassa on erinomaisesti toimijoita materiaaleissa, tuotannossa sekä käytössä. (ANE, 2022) Business Sweden arvioi Norjan arvoketjun tuottavan liikevaihtoa jopa 9 miljardia vuonna 2030 ja määrän tuplaantuvan vuoteen 2050 mennessä luoden 15 000 työtä sektorille (Business Sweden, 2021).

### 3 LITIUMIONIAKKUJEN ARVOKETJU

Litiumioniakkujen arvoketju koostuu seuraavista vaiheista: raakamateriaalit ja niiden prosessointi, komponentit ja kennojen valmistus, akkumoduulien ja -pakettien valmistus, akkujen integrointi, toiminta, korjaus ja huolto, toinen elämä sekä kierrätys (ALBATTIS, 2020). Näiden vaiheiden yksityiskohtaisempi tarkastelu on tärkeää selvittäessä, millaisia työpaikkoja akkujen arvoketju tarjoaa. Tarkastelusta selviää kyseisen arvoketjun vaiheen nykytilanne eli sen määrittävät tekijät ja ominaisuudet ja tulevaisuuden mahdolliset ongelmat. Akkujen toiminta, korjaus ja huolto on rajattu raportista pois, koska toiminta, korjaus ja huolto ovat jo ammattikouluissa opetettua sisältöä. Täten siihen ei keskitytä akkupäivän opetusmateriaaleissa. Tarkastelussa keskitytään litiumioniakkuihin, koska kyseessä on nykypäivän hallitseva akkukemia. Alla on perusteluja sille, miksi litiumioniakut ovat käytetyimpiä nykypäivänä.

Litiumioniakuista on tullut käytetyin akkuteknikka varsinkin, kun on kyse pienemmästä elektroniikasta. Tämä johtuu siitä, että sillä on huomattavasti korkeampi energiatiheys verrattaessa markkinoiden vertailukelpoisiin kennoihin. Näin ollen on mahdollista saada saman verran energiaa, vaikka akun koko olisi pienempi ja paino alhaisempi verrattaessa nikkeli- tai lyijypohjaisiin akkuihin. Kannettavissa laitteissa tämä on hyvin tärkeää, koska saadaan virtaa pidempään sekä elinikä on pidempi. Litiumioniakuilla on myös korkeampi jännite väliltä 3,2–3,8 V verrattaessa 1,2–1,5 V, joka on tavanomaisten nikkelpohjaisten kennojen jännite. Näin ollen tarvitaan vähemmän kennoja sarjaan, jotta saavutetaan haluttu jännite. Lisäksi litiumioniakut itsepurkautuvat hitaammin eli kapasiteetin tavanomainen lasku varastoinnissa on vähemmän kuin muilla akkukemioilla. Useimmat litiumionikemiat menettävät kapasiteettiaan vain 1–5 % kuukauden aikana. Viimeiseksi litiumionikemioilla on paljon korkeampi sykli-ikä verrattaessa muihin kemioihin. Litiumioniakuilla sykli-ikä on tuhansissa verrattuna lyijypohjaisen akun, PbA-akun, 300–500 sykliin. Eli tiivistäen litiumioniakuilla on korkeampi energiatiheys, jännite,

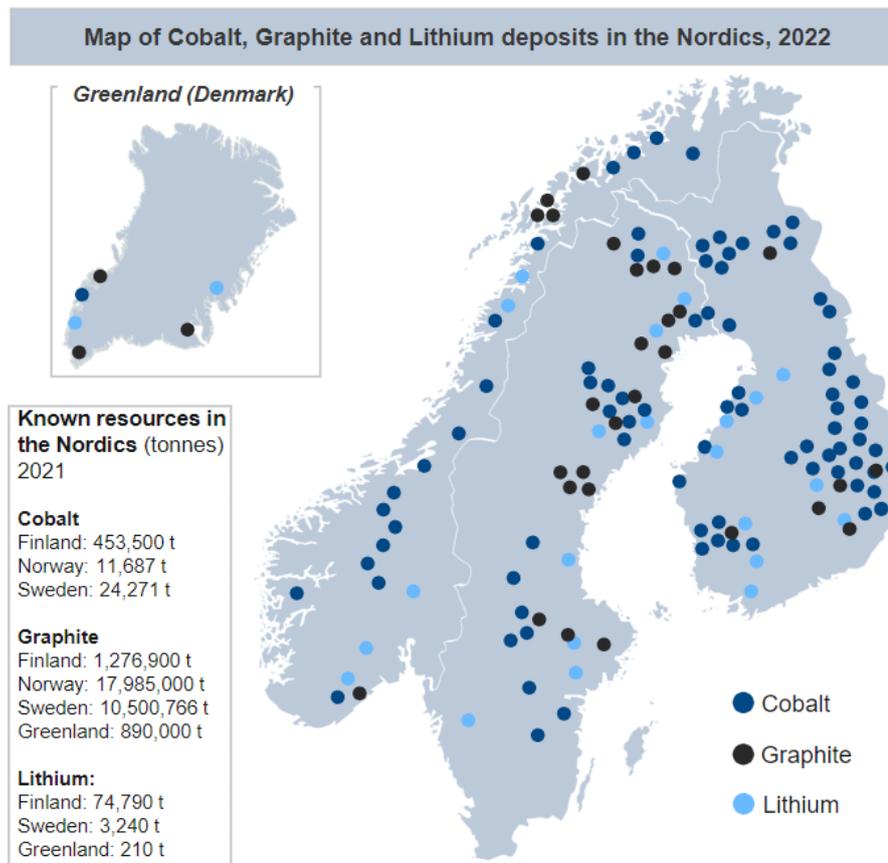
sykli-ikä sekä ne itsepurkautuvat hitaammin. (J. Warner, 2015) Nämä ominaisuudet selitetään paremmin auki kappaleessa 6, johon on koottu oppimateriaalit.

### **3.1 Raakamateriaalit ja niiden prosessointi**

Euroopan akkusektorilla litiumioniakkujen tuotannossa hallinnoivat kemialliset koostumukset kennoille ovat NCA, eli nikkelikobolttialumiini, sekä NMC, eli nikkelimanganikoboltti. Eurooppa on erittäin riippuvainen materiaalien tuonnista. Suurimmat riippuvuudet tärkeissä raakamateriaaleissa ovat litiumissa, luonnongrafiitissa, koboltissa sekä mangaanissa. Alhaisin riippuvuus on nikkeliissä, mutta sekin on jopa 59 %. (ALBATTIS, 2020) Materiaalit myös usein käyvät useammassa maassa ennen kuin päätyvät kennojen tuotantomaahan. Esimerkiksi louhinta ja väkevöittäminen, jalostus sekä kennojen tuotanto voivat kaikki tapahtua eri maissa. Tähän mennessä riippuvuutta Euroopan ulkoisista maista ei ole pidetty suurena ongelmana pienen tuotannon vuoksi ja on sen sijaan keskitytty alkuperämaiden säännöstelemättömään kaivostoimintaan sekä riippuvuuteen Kiinasta. (ALBATTIS, 2020) Vuonna 2022 Kiinaan sijoittui 55 % käytetystä akkukennotuotantokapasiteetista (Business Finland ym., 2023).

Kasvavan kysynnän kanssa materiaalien rajallisuus korostuu ja kilpailu raakamateriaalien toimitussopimuksista lisääntyy. Nämä tekijät nostavat sopimusten hintoja. Joidenkin raakamateriaalien kysynnän on arvioitu kasvavan jopa 1 000 % vuoteen 2050 mennessä. (ALBATTIS, 2020) IEA, International Energy Agency, on arvioinut sähköautojen akkujen kysynnän vaativan 50 uutta litiumprojektia, 60 nikkelikäivosta ja 17 kobolttia lisäävää projektia vuoteen 2030 mennessä (Business Finland ym., 2023). Raakamateriaaleista pyritään jatkuvasti saamaan Eurooppa keskeisempiä sekä vähemmän kriittisiä, mutta tämä suhteen ollaan vasta tutkimusvaiheessa. (ALBATTIS, 2020) Raakamateriaalien puute tuleekin ajamaan innovaatiota eteenpäin (Business Finland ym., 2023). Vaikka Euroopassa saattaakin olla suuri osa tarpeellisista materiaaleista, niin kyse on useimmiten monimutkaisista sekä pienemmistä esiintymistä. Tulevaisuudessa on kuitenkin tärkeää hyödyntää myös nämä lähteet resursseina kysynnän ollessa suuressa kasvussa. (ALBATTIS, 2020)

Esimerkiksi Suomessa sijaitsee suuria mineraaliresursseja, josta on mahdollista saada keskeisiä akkumateriaaleja. Suomen etuna on vakiintunut metallijaloteollisuus, joka auttaisi saamaan kestäväen kehityksen tavoitteiden mukaisen saatavuuden raaka-aineisiin. Lisäksi Ruotsissa on potentiaalia jopa 22 kriittiselle mineraalille, kuten koboltti ja grafiitti, sekä vähemmän kriittisille metalleille, kuten kupari, mangaani ja nikkeli. Resursseista puhuttaessa on hyvä ottaa huomioon, että louhimisen aloittaminen vie tavanomaisesti 15 vuotta, joten olisi tärkeää alkaa toimia ajoissa. Vuonna 2022 Euroopassa oli aktiivisia kaivoksia yhteensä 67: Suomessa 41, Ruotsissa 16, Norjassa 8 ja Tanskassa 2. Suomessa sijaitsi vuonna 2021 Euroopan ainoa aktiivinen kobolttikaivos. Kuvassa 1 näkyy, miten koboltti-, grafiitti- ja litiumesiintymät jakautuivat pohjoismaissa vuonna 2022. Kokonaisuudessaan EU-maiden tuotanto on vielä vähäistä maailman tuotantoon verrattuna. Esimerkiksi koboltin tuotanto on 1,2 % maailmanlaajuisesta tuotannosta, grafiitin on 0,1 % ja litiumin on 0,4 %. (Business Finland ym., 2023) Raakamateriaalien suhteen on myös tärkeää optimoida kierrätys, jotta raakamateriaalia ei mene hukkaan. Esimerkiksi tällä hetkellä litiumin kierrätys ei ole taloudellisesti kannattavaa, vaikkakin mahdollista, luonnongrafiittia kierrätetään harvoin ja sen kierrätysmetodeja kehitetään edelleen sekä kierrätettyä nikkeliä ei aina saada palautettua alkuperäiseen laatuunsa. (ALBATTIS, 2020)



**Kuva 1.** Kartta koboltti-, grafiitti- ja litiumesiintymistä pohjoismaissa vuonna 2022. (Business Finland ym., 2023)

### 3.2 Komponentit ja kennojen valmistus

Lähivuosina akkujen kehitystä on ajanut pääosin autoteollisuuden halu siirtyä sähköautoihin niiden ollessa hyvä vaihtoehto tavanomaisille polttomoottoriajoneuvoille. ALBATTSin vuonna 2020 julkaiseman raportin mukaan Euroopassa valmistetuissa sähköajoneuvoissa litiumioniakut ovat tällä hetkellä ainoa sovellettu akkuteknologia. Ne sopivat ajoneuvosovelluksiin niiden korkean sähköaktiivisuuden vuoksi, joka mahdollistaa suuremmat jännite- ja tehovaatimukset. (ALBATTS, 2020) Maailmanlaajuisesti Euroopan osuus komponenttien tuotannosta on vielä erittäin pieni: 0,2 % katodituotannosta, 0 % anodituotannosta, 2 % elektrolyytti-

tuotannosta ja 4,5 % erotintuotannosta. Tuotantoa on haastavaa laajentaa nopeasti, koska suurin osa eurooppalaisista akkukennojen valmistajista toimii jo yli 95 % kapasiteetilla. (Business Finland ym., 2023)

### 3.2.1 Katodi

Yleisimmät käytössä olevat litiumioniakkukemiat ovat LFP, LMO, LTO, LCO, NCA ja NMC (J. Warner, 2015). Nämä kemiat käydään yksityiskohtaisemmin läpi kappaleessa 6 oppimateriaalien yhteydessä. Tässä kappaleessa keskitytään Euroopan käytetyimpiin katodikemioihin sekä niiden sovelluksiin, jotta saadaan käsitys Euroopan nykyisestä tilanteesta. Varsinkin ominaisuudet kuten energia- ja tehontiheys, jännite, sykli-ikä sekä käytön lämpötilat tullaan käymään tarkemmin läpi oppimateriaaleissa.

Korkeimman energiatihedyn akkukemiat, joissa käytetään litiumkobolttioksidia (LCO), litiumnikkelikobolttialumiinioksidia (NCA) ja nikkelimangaanikobolttia (NMC), hallitsevat sähköajoneuvojen teollisuutta. Niiden markkinaosuus oli vuonna 2019 lähes 96 %. Kaikki Euroopassa myydyt sähköiset henkilöajoneuvot käyttävät akkuja, joiden katodissa käytetään kobolttia. Katodimateriaali on tärkeä tekijä, koska katodi tavanomaisesti rajoittaa litiumioniakkujen toimintakykyä. Tämä johtuu siitä, että sillä on grafiittista anodia alhaisempi kapasiteetti. Myös litiumrautafoosfaatti (LFP) on laajasti käytetty koostumus. Akut, joissa käytetään LFP:tä tarjoavat enemmän syklejä lisäten käyttöikää, eivät sisällä myrkyllisiä komponentteja tai kobolttia, omaavat pienemmän riskin lämmön karkaamiselle, niiden sisäinen vastus on alhainen sekä ne voivat käsitellä suurempaa kuormaa. Kyseiset hyvät puolet selittävät sen miksi LFP-akkuja käytetään matkailuautoissa ja ajoneuvoissa, joilla on alhaiset suoritusvaatimukset sekä alhainen kantama. Esimerkkejä tämän kaltaisista ajoneuvoista ovat jäteautot ja sähköiset tienlakaisuautot. Voidaan siis jakaa litiumioniakut niiden katodien perusteella kahteen selkeästi erilaiseen ryhmään: NMC/NCA- ja LFP-akut. NMC/NCA-akut omaavat korkean energiatihedyn sekä jännitteen, mutta alhaisemman sykli-ian. Nämä akut ovat optimaalisia ajoneuvoihin, joilla on lyhyempi elinikä, koska ne tarjoavat korkean

kantaman alhaisemmalla painolla. LFP-akut taas omaavat pidemmän sykli-iän, mutta alhaisemman kapasiteetin ja jännitteen. Nämä ovat optimaalisempia paikallaan pysyviin sovelluksiin, joissa korkeampi paino ei ole ongelma ja halutaan pidempi aika akkujen korvaamisen välille. (ALBATTTS, 2020)

### **3.2.2 Anodi**

Pääosin kaupallisesti saatavilla olevat litiumioniakkujen sovellukset käyttävät grafiittia anodina, koska se on edelleenkin litiumionikatodin kanssa yhteensopivin vaihtoehto (ALBATTTS, 2020). Oppimateriaalien yhteydessä selitetään anodin suosituista piirteistä sekä siitä miksi grafiitti on suosittu anodimateriaali litiumioniakuissa. Anoditeknologia on ollut varsin vakaa grafiitin ollessa suotuisin vaihtoehto litiumioniakuille (ALBATTTS, 2020). Tutkimusta silti tehdään, koska anodin heikkeneminen vaikuttaa suuresti koko akun kennojen heikkenemiseen. Vaihtoehtoina pidetään hiiltä, litiummetallia, grafiittipiitä sekä päällystettyä grafiittia korvaamaan puhdas grafiitti. Piianodeissa kuitenkin esiintyy seuraavia ongelmia: alhainen sähkönjohtavuus, epävakaa SEI sekä tilavuuden suuri supistuminen tai laajeneminen purun tai latauksen aikana, joka johtaa mekaaniseen stressiin ja halkeamiin SEIn hajotessa ja muodostuessa uudelleen. (ALBATTTS, 2020)

Pohjoismaissa on jo suunnitteilla toimenpiteitä liittyen katodin ja anodin tuotantoon. Vuonna 2022 ilmoitettiin, että Ruotsiin on tekeillä katodimateriaalitehdas, jonka tuotannon on tarkoitus alkaa vuonna 2024. Lisäksi vuonna 2021 ja 2022 ilmoitettiin kahdesta katodiaktiivimateriaalituotantolaitoksesta, jotka sijoittuisivat Suomeen. Norjassakin rakennettiin vuonna 2021 pilottitehdas piitä sisältäville anodimateriaaleille litiumioniakkuja varten. (Business Finland ym., 2023)

### **3.2.3 Kennojen tuotanto**

ALBATTTS julkaisi vuonna 2020 raportin, jonka mukaan akut olivat jopa 50 % sähköisten ajoneuvojen kustannuksista vuonna 2019 (ALBATTTS, 2020). Statistan vuonna 2017 julkaiseman arvion mukaan akut tulevat olemaan suunnilleen 30 %



suurten sähköisten ajoneuvojen hinnoista vuonna 2024 (Placek, 2017). Lisäksi kuvassa 2 on uudempi arvio vuodelta 2023 akun hinnan osuudesta koko myyntihintaan perustuen Benchmark Minerals Intelligencen dataan (Venditti, 2023). Kuvassa olevat prosentuaaliset osuudet ovat autojen verottomista hinnoista. Suurin tekijä akun hinnassa on akkukemia (Venditti, 2023). ALBATSSin vuoden 2020 raportin mukaan litiumioniakkujen kustannuksista materiaalit olivatkin suurin osaluokka prosenttien jakaantuessa seuraavasti: elektrolyytti 1 %, erotin 3 %, virrankeuhkajat 3 %, anodimateriaalit 8 % ja katodimateriaalit 26 % (ALBATTSS, 2020). Näin ollen materiaaleista koostuu jo 41 % akun koko kustannuksista. Jotta tuotantoprosessi saataisiin halvemmaksi, tulisi eliminoida kalliit materiaalit kuten koboltti sekä kehittää itse tuotantoprosessia eteenpäin. (ALBATTSS, 2020)

E

# The Cost of an EV's Battery

The actual cost of an EV battery can vary depending on composition and metals used.

Most EV batteries last up to 200,000 miles and replacements can cost anywhere from \$5,000 to \$20,000.

**2025 CADILLAC Escalade IQ**



**\$22,540** Battery Cost Cells from LG Energy Solution

**17.3%** Total Cost of Vehicle **\$130,000\***

**Battery Type:** Nickel Cobalt Manganese Aluminum (NCMA)

**Battery Capacity:** **200 kWh**

**2023 TESLA Model S**



**\$12,030** Battery Cost Cells from Panasonic

**13.6%** Total Cost of Vehicle **\$88,490**

**Battery Type:** Nickel Cobalt Aluminum (NCA)

**Battery Capacity:** **100 kWh**

**2025 RAM 1500 REV Limited**



**\$25,853** Battery Cost Cells from LG Energy Solution

**31.92%** Total Cost of Vehicle **\$81,000\***

**Battery Type:** Nickel Cobalt Manganese (NCM)

**Battery Capacity:** **229 kWh**

**2022 RIVIAN Amazon Delivery Van**



**\$13,298** Battery Cost Cells from Gotion

**25.2%** Total Cost of Vehicle **\$52,690**

**Battery Type:** Lithium Iron Phosphate (LFP)

**Battery Capacity:** **135 kWh**

**2023 Ford Mustang Mach E Standard**



**\$6,895** Battery Cost Cells from CATL

**16.0%** Total Cost of Vehicle **\$43,179**

**Battery Type:** Lithium Iron Phosphate (LFP)

**Battery Capacity:** **70 kWh**

**2023 VW ID.4 Standard**



**\$8,730** Battery Cost Cells from CATL

**23.4%** Total Cost of Vehicle **\$37,250**

**Battery Type:** Nickel Cobalt Manganese (NCM622)

**Battery Capacity:** **62 kWh**

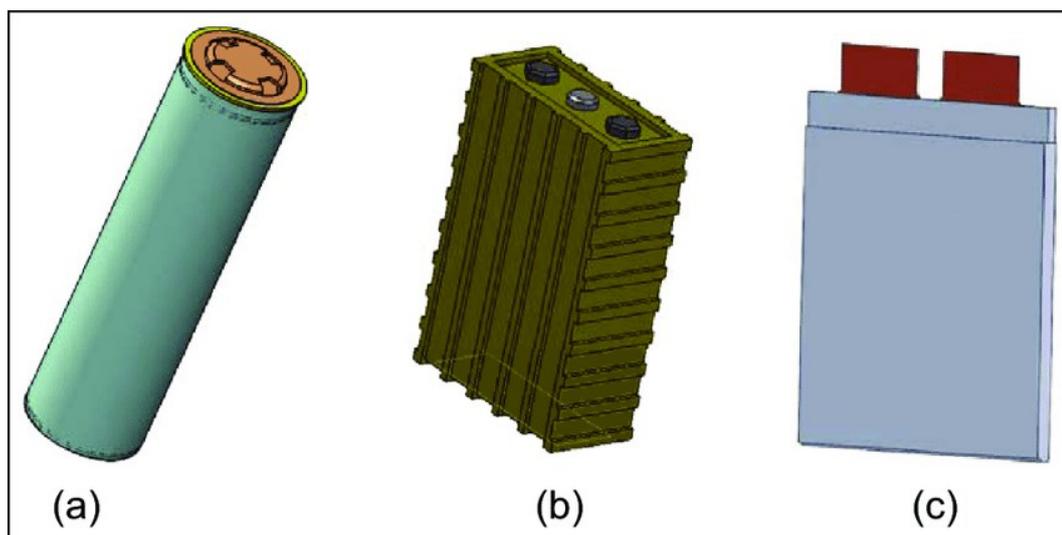
\*Estimated price  
Source: Benchmark Mineral Intelligence, Business Insider, Counterpoint, Car and Driver, CleanTechnica, InsideEVs

Kuva 2. Sähköautojen akun hinta suhteutettuna koko hintaan. (Venditti, 2023)

Akkukennojen valmistusta varten anodi ja katodi tavanomaisesti märkääpäällystetään virrankerääjillä, eristetään erottimella sekä kastellaan elektrolyyttiliuoksella. Varsinkin märkääpäällystys on saastuttava ja kallis prosessi. (ALBATTTS, 2020) Märkääpäällystys on kalliimpaa johtuen siitä, että siitä aiheutuvat jätevedet pitää käsitellä sekä päällystetyn materiaalin kuivamiseen kuluu aikaa (Amin ym., 2021). Katodien kuivapäällystämisen on mahdollinen ratkaisu tälle tulevaisuudessa ja lisäksi se saattaisi vähentää uunissa käytettyä aikaa vähentäen valmistuskustannuksia (ALBATTTS, 2020). Kuivapäällystämisen vaatii kuitenkin jossain määrin vielä optimointia, jotta se omaksuttaisiin uudeksi laaja-alaiseksi kapalliseksi prosessiksi. Ongelmana on se, että pinnoitteen homogeenisyyttä sekä paksuutta on haastavaa kontrolloida. (Amin ym., 2021) Toisaalta kuivapäällystämisen on jo käytössä Teslalla johtuen sen suurista energiasäästöistä (Tesla, 2020). Teslan vuonna 2020 julkaisemien arvioiden mukaan kuivapäällystämisen vähensi valmistusvaiheen energiakustannuksia ainakin 70 %. (Tesla, 2020)

Kennojen koteloimiseen voidaan käyttää lieriömäistä, prismaattista tai pussimaista geometriaa (ALBATTTS, 2020). Kuvassa 3 näkyvät nämä koteloimisgeometriat. Lieriömäisen kennon parhaita puolia ovat sen mekaaninen vakaus, minkä takia se pystyy kestävään hyvin sisäistä painetta ilman, että siihen tulee epämuodostumia. (Maiser, 2014) Ne ovat optimaalisia suurenergisille kennoille, mutta moduulisuunnittelussa pakkaustiheys kärsii (ALBATTTS, 2020). Prismaattiset kennot taas ovat muodoltaan laatikkomaisia, mikä mahdollistaa paremman pakkaustiheyden akkupaketissa (Maiser, 2014). Tämän takia ne ovat useimmiten käytössä sähköautoissa (ALBATTTS, 2020). Huonona puolena on se, että säiliö kestää huommin mekaanista rasitusta ja lämpötilojen hallinta on monimutkaisempaa kuin lieriömäisissä kennoissa. Pussimaisissa kennoissa materiaali on joustavampaa kuin lieriömäisissä ja prismaattisissa kennoissa. Ne on sinetöity joustavalla kalvolla, minkä takia niitä usein kutsutaan ”kahvipussikennoiksi”. Näillä kennoilla on paras pakkaustiheys sekä kevyin paino eli kennon energiatiheys on korkeampi. Niiden hyvän energiatheyden ja litteän muodon takia ne sopivat erinomaisesti pienii laitteisiin kuten tabletit. Ne ovat myös käytössä sähköautoissa, joissa halutaan suuri

teho ja energiatiheys. Ongelmana käytössä on, että lämpötilojen noustessa tai liian korkealla vastuksella kennot turpoavat. Näin ollen pussikennot vaativat tarkempaa lämpötilojen hallintaa kuin prismaattiset kennot. (Maiser, 2014) Kennojen valmistukseen liittyvät monimutkaisuudet vaihtelevatkin riippuen siitä, mitä kenno geometriaa käytetään (ALBATTIS, 2020).



**Kuva 3.** Kennojen koteloimisgeometriat: lieriö (a), prismaattinen (b), ja pussi (c). (Budde-Meiwes ym., 2013)

Euroopan akkukennojen tuotannossa merkittävä tekijä on Ruotsissa sijaitseva yhtiö Northvolt. Kyseessä on Euroopan ensimmäinen yhtiö, joka suunnitteli, kehitti ja kokosi akkukennon gigatehtaallaan vuonna 2021. Yhtiö julkaisi 2022 investoivansa kolmeen uuteen akkukennotehaaseen. Yksi näistä tehtaista on tarkoitettu nimenomaan suuren mittakaavan tuotantoon ja sen tuotannon on oletettu alkavan vuonna 2030. Myös muualla pohjoismaissa on suunnitteilla akkukennojen tuotantoa. Norjassa on jo aloitettu kahden akkukennotehaan rakentaminen ja on suunnitteilla aloittaa 2023 täysmittaisen akkutehtaan rakennus. Suomessa GigaVaasa alueelle on suunniteltu avattavan gigatehdas tulevaisuudessa. Itse Euroop-

paan on vuonna 2020 ollut yhteensä suunnitteilla noin 500 GWh edestä litiumioniakkukenennotuotantokapasiteettia. (Business Finland ym., 2023) Kuvassa 4 näkyvät suurimmat ilmoitetut sijoitukset Eurooppaan vuodelta 2020 (**Kuva 4**).



**Kuva 4.** Suurimmat sijoitukset Euroopan akkuteollisuuteen vuodelta 2020. (ALBATTs, 2020)

### 3.3 Akkumoduulien ja -pakettien valmistus

Akut kytketään rinnan ja sarjaan, jotta saadaan haluttu kapasiteetti sekä jännite. Rinnan kytkeminen vaikuttaa kapasiteettiin sekä sarjaan kytkeminen jännitteeseen. Kennojen määrä riippuu halutusta jännitteestä ja kapasiteetista. (J. Warner, 2015) Kaksi suurta haastetta, jotka esiintyvät litiumioniakuissa ovat energiakulutuksen hallinta ja niiden tulipaloalttius. Energiakulutuksen hallinnan haaste liittyy sovellusten suhteellisen korkeaan määrään kennoja. (ALBATTs, 2020) Tulipaloalttius taas aiheutuu siitä, että litiumioniakut sisältävät erittäin energisiä materiaa-

leja yhdistettynä helposti syttyvän elektrolyytin kanssa. Kaikenlaiset väärinkäytökset saattavat aiheuttaa reaktioita, jotka luovat lämpöä johtaen tulipaloon ja lopulta räjähdykseen. Väärinkäyttö voi tarkoittaa ylilataamista, ulkoista oikosulkuja tai akun murskaamista. (M. Chen ym., 2017) Kyseiset kaksi haastetta ovat johtaneet akunhallinta- sekä jäähdytysjärjestelmän käyttämiseen. Tällä on erityisen negatiivinen vaikutus akun energiatiheyteen ja komponenttien kokonaistilavuuteen. Itse kennojen pinoamiseen vaikuttavat seuraavat tekijät: mekaaniset liitokset, sähköinen eristys sekä jäähdytyksen optimointi. Kennojen geometria vaikuttaa siihen mitä valmistustekniikoita käytetään tekijöiden optimoimiseen. (ALBATT, 2020)

Pohjoismaissa on sekä aktiivisia tuotantolaitoksia että uudempia tehdashankkeita liittyen akkupaketteihin ja akkujen hallintajärjestelmiin. Ruotsissa avattiin vuonna 2022 teollisuuden ajoneuvojen akkujärjestelmiin keskittyvä tehdas sekä akkukoonpanotehtaan on odotettu aloittavan tuotanto vuonna 2023. Tehdas on tarkoitettu moduulituotantoon. Suomessa olisi tarkoitus laajentaa akkupaketteja valmistavan tehtaan toimintaa. Tähän liittyen vuonna 2022 julkaistiin aikomuksesta toimittaa miljoona akkua autoasiakkaille alle kolmessa vuodessa. (Business Finland ym., 2023)

### **3.4 Akkujen integraatio**

Akkujen integraatio on akkuketjun erittäin tärkeä osa ja kyseessä on viimeinen vaihe ennen itse käyttöä. Akut tulee asentaa vaadituilla järjestelmillä. Esimerkkinä kyseisiä järjestelmistä ovat lämmönhallinta- ja akunhallintajärjestelmät eli BTMS- ja BMS-järjestelmät. Käytössä on myös muita järjestelmiä, jotka takaavat turvallisuuden, kestävyden ja toimivuuden. ALBATTsin vuonna 2020 julkaiseman raportin mukaan nämä asennukset olivat 24 % akun kokonaiskustannuksista, jos ei laskea mukaan komponentteihin liittyviä työvoimakustannuksia. Yleisesti ottaen integraatioprosessi sisältää akkumoduulin kokoamisen, BMS-järjestelmän integroimisen moduuliin sekä integroimisen käyttötarkoitukseen. ALBATTsin vuonna 2020 julkaiseman raportin mukaan Eurooppa hallinnoi BMS-markkinoita vuonna 2018

johtuen Euroopassa sijaitsevista suurista autovalmistajista. Saman raportin mukaan BMS-järjestelmien maailmanlaajuisten markkinoiden kasvuodotusten on arvioitu olevan 12,6 miljardia vuoteen 2024 mennessä vuosittaisen kasvuprosentin ollessa 19,5 %. Kasvun odotetaan nousevan muun muassa energiajärjestelmien ja sähköisten ajoneuvojen yleistyessä. BMS-järjestelmän ollessa kriittisen tärkeä tekijä tulee selvittää entistä paremmin mitä taitoja ja työtehtäviä tällä arvoketjun osalla on tarjolla tulevaisuudessa. Varsinkin kun on kyse tarkoista sovelluksista järjestelmille. (ALBATTs, 2020)

### 3.5 Toinen elämä

Akkujen toisella elämällä viitataan niiden uudelleen käyttämiseen. Uudelleen käyttämistä tehdään, koska se mahdollistaa samalla sekä hiilidioksidipäästöjen vähentämisen että vähentää uusien paikallaan pysyvien akkujen tuotantoa. Näin ollen ympäristövaikutukset koko akun arvoketjua pitkin ovat pienemmät. Sähköistymisen yleistyy alati varsinkin liikennesektorin siirtyessä polttomoottoriajoneuvoista sähköisiin ajoneuvoihin. Sähköisistä ajoneuvoista poistetut akut tulee käsitellä oikein. Niiden akkuja on mahdollista käyttää liikkumattomissa sovelluksissa kuten uusiutuvan energian varastoiminen. (ALBATTs, 2020) Tohtori Na Jiaon mukaan sähköautojen akut tavanomaisesti kestävät käytössä 8–10 vuotta, minkä jälkeen niiden kapasiteetti ja teho eivät enää riitä pitkiin matkoihin. Vuonna 2019 IDTechEx julkaisi raportin, jossa arvioitiin, että yli 6 miljoonaa akkupakettia jäisi pois käytöstä vuoteen 2030 mennessä. (Jiao, 2019) Osa näistä akuista oletettavasti menee kierrätettäväksi, koska ne eivät vastaa uudelleen käytölle asetettuja vaatimuksia. ALBATTsin vuonna 2020 julkaistussa raportissa kuitenkin arvioidaan, että suurin osa voitaisiin uudelleen käyttää. Jos akkujen kapasiteetti on 80 % tai alle niiden alkuperäisestä kapasiteetista, ne ovat edelleen käyttökelpoisia, vaikka ne eivät sovellu enää niiden ensisijaiseen käyttöön ajoneuvoissa. (ALBATTs, 2020) Pohjoismaissa onkin käynnissä aloitteita, joissa vanhoja sähköautojen akkuja muunnetaan akkuvarastojärjestelmiksi (Business Finland ym., 2023).

Nykypäivänä esiintyy edelleen merkittäviä haasteita liittyen käytöstä pois otettujen akkujen määrään. Nämä haasteet sisältävät esimerkiksi teknisiä esteitä sekä standardisoinnin puutteita. Toinen ongelma on, että ennen kuin voidaan integroida akut, tulee tehdä päätös siitä, meneekö akku suoraan uudelleenkäytettäväksi vai uudelleen kokoonpantavaksi. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa vaaditaan korkeamman tason työteho. Perinpohjainen arviointi tulisi mahdollistaa laajemmalla sertifiointilla, minkä avulla saataisiin paremmin selville akkuun jäljelle jäänyt kapasiteetti sen ensimmäisen elämän lopussa. Lopullisen integroinnin onnistuneessa toteuttamisessa voi olla ongelmia, koska tarvitaan kunnollinen infrastruktuuri. Sitä varten tarvitaan seuraavia työkaluja: ohjelmisto sekä laitteisto. Ohjelmistoista tärkeimpänä on protokolla, joka toimii kaikkien yleisten BMS-järjestelmien kanssa. Olisi myös mahdollista kehittää järjestelmäratkaisuja, joiden avulla voidaan hallinnoida monenlaisia toimintoihin liittyviä ilmiöitä, joita akku saattaa kohdata toisen elämänsä aikana. Tämänkaltaiset ratkaisut ovat esimerkiksi ympäristön lämpötilamittaus ja hallinnoiminen, tärinän valvominen, ydinnesteen lämmönhallinta sekä infrapunalämpöskannaus. (ALBATTIS, 2020)

### **3.6 Kierrätys**

Akkujen kierrätykselle on monia syitä kuten se, että takaisin kerätyillä materiaaleilla voitaisiin tehdä uusia akkuja, akkujen mineraalivarannot ovat rajallisia, valmistuskustannukset laskisivat ja materiaaleja menisi vähemmän kaatopaikoille. Valmistuskustannukset laskisivat sen takia, että materiaalit ovat suurin kustannus akkujen valmistuksesta ja kierrätyksen avulla materiaaleja olisi enemmän saatavilla. Lisäksi se, että materiaaleja menisi vähemmän kaatopaikoilla auttaisi sekä materiaalipulassa että olisi hyväksi ympäristölle. Akkujen metallit voisivat vuotaa koteloista ja mahdollisesti saastuttaa maaperää ja pohjavesiä. Tämä olisi uhka sekä ekosysteemeille että ihmisten terveydelle. (Jacoby, 2019)

Tarve Euroopan litiumioniakkujen kierrätyksen tarkasteluun johtuu sähköautojen kysynnän noususta, tiukemmista säännöstelyistä koskien elinkaaren lopussa ole-

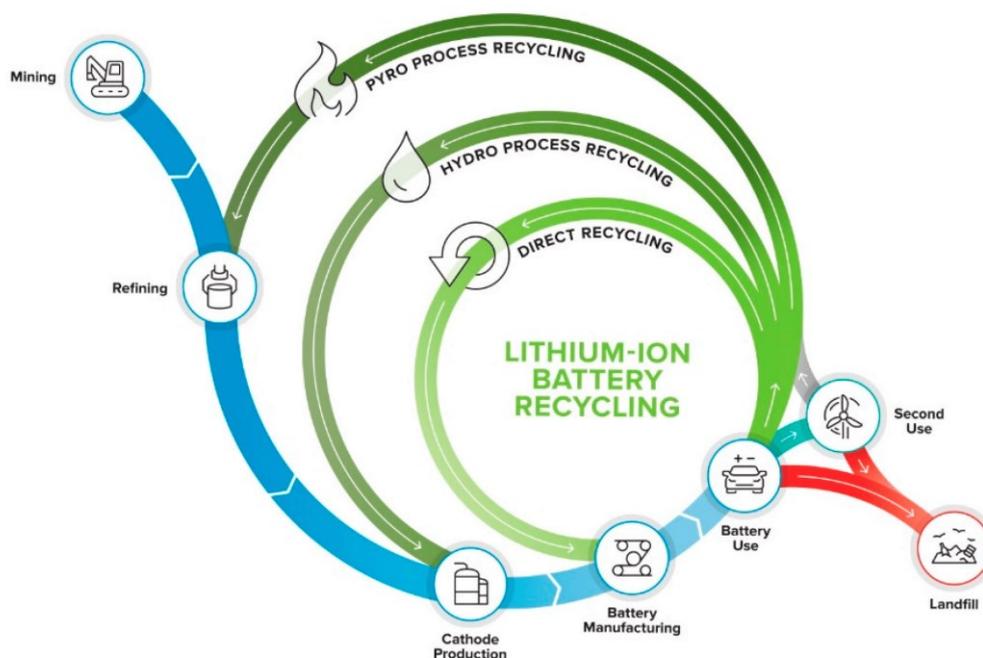


via akkuja sekä ympäristöön liittyvistä huolista. Ongelmia on ilmennyt myös laajasti käytössä olevien raaka-aineiden rajallisuudessa kuten koboltissa. Muun muassa seuraavat tekijät vaikeuttavat sujuvan kierrätyksen toteutusta: raaka-aineiden huonompi laatu kierrätyksen jälkeen, standardoinnin puuttuminen, sähköautojen omistajien riittämättömät arviot akkujen kunnosta ja viranomaisten rahallisen tuen puute. (ALBATTTS, 2020) Pohjoismaissa on sijoitettu kierrättämiseen ajoissa ja aktiivista toimintaa on jo Norjassa, Ruotsissa sekä Suomessa. Suomessa on myös ilmoitettu, että on suunnitelmassa aloittaa toiminta uudessa akkumateriaalien kierrätystehtaassa vuonna 2023. Ruotsissa sijaitseva gigakierrätystehdas on myös aloittamassa toimintansa samana vuonna. Sen on arvioitu tulevan kierrättämään 125 000 tonnia akkua vuodessa. (Business Finland ym., 2023)

### 3.6.1 Suorat ja epäsuorat kierrätysmenetelmät

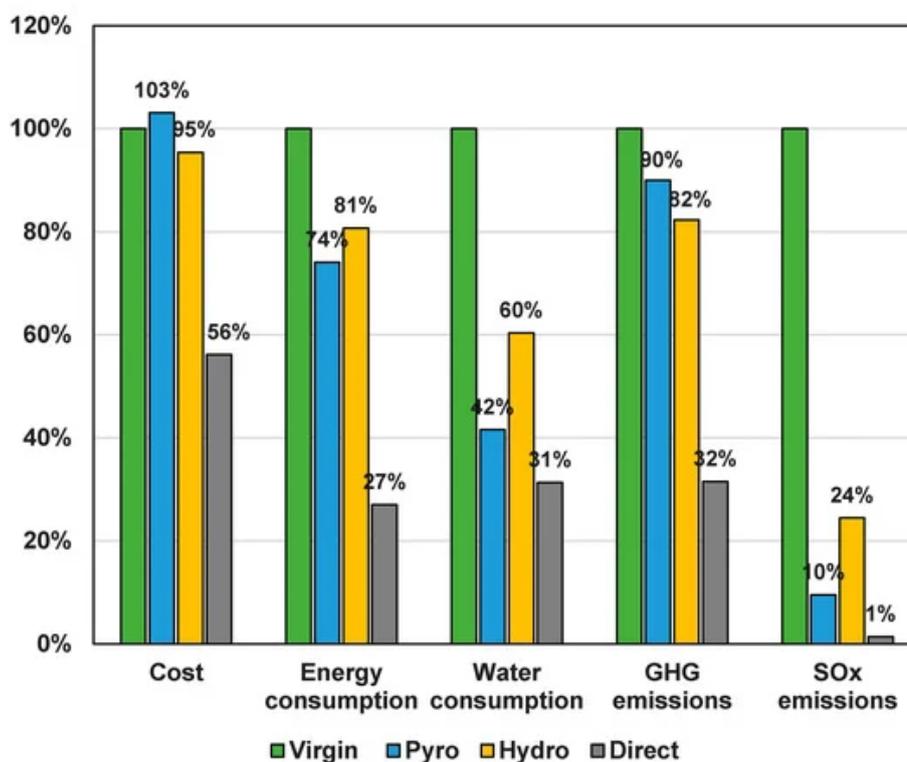
Nykypäivänä johtavissa litiumioniakkujen kierrätystekniikoissa on jo sekä tämän hetken huipputeknologiaa että tulevaisuuden vaihtoehtoja. Toisaalta tukea antavaa tutkimusta tarvitaan selvittämään parhaat mahdolliset tekniikat. Kierrätystekniikoiden pääjako voidaan tehdä seuraavanlaisesti: suorat ja epäsuorat menetelmät. Menetelmän valinnan määrittelee se, että onko katodin materiaali rikkoutumassa vai ei. Suorassa menetelmässä anodi- ja katodimateriaali poistetaan elektrodista. (ALBATTTS, 2020) Poisto tehdään niin, että katodin kemiallinen rakenne pysyy ehjänä (ALBATTTS, 2020; Dai ym., 2021). Suoraan menetelmään kuuluvia lähestymistapoja ovat muun muassa mekaaniset ja sähkökemialliset menetelmät sekä teknologiat, jotka korjaavat katodia (Allen ym., 2020). Kun katodi saadaan otettua talteen kokonaisena, niin voidaan välttää monta paljon energiaa vievää ja kallista prosessia (Dai ym., 2021). Alla olevassa kuvassa voidaankin nähdä, että suorassa kierrätyksessä katodimateriaali palautuu suoraan takaisin akkujen valmistusvaiheeseen akkujen arvoketjussa (**Kuva 5**). Epäsuorassa menetelmässä käytetään tavanomaisesti pyrometallurgisia ja hydrometallurgisia tekniikoita. Epäsuorilla menetelmillä kierrätetään koboltti, nikkeli ja mangaani sekä saostetaan litium. Lopul-

linen litiumtuote saavutetaan hydrometallurgisella kierrätysmenetelmällä. Pyrometallurgista menetelmää hyödynnetään laajalti koboltin ja nikkelin talteenotossa. Siinä käytetään useita erotusprosesseja, joiden lopputuloksena saadaan ”musta massa”. Se kuitenkin muodostaa myrkyllisiä kaasuja, mikä aiheuttaa negatiivisen ympäristöjalanjäljen. Hydrometallurgisessa menetelmässä vesiliuoksilla uutetaan halutut metallit katodimateriaalista, minkä jälkeen erilaisilla saostusreaktioilla otetaan metallit talteen. Huonona puolena on se, että todennäköisyys materiaalien ristisaastumiselle on varsin korkea. Näitä menetelmiä voidaan mahdollisesti täydentää bioliuotuksella, joka on erittäin hyödyllinen vaikeasti eroteltavien metallien kanssa. Siinä mikro-organismit liuottavat valikoidusti metalleja katodista. (ALBATTs, 2020) Epäsuora menetelmä vie taemmas arvoketjussa katodituotantoon ja jalostukseen asti, kuten alla olevasta kuvasta 5 voi huomata.



**Kuva 5.** Akkujen kierrätysmenetelmät jaoteltuna akkujen arvoketjussa. (Dai ym., 2021)

Suorat menetelmät ovat tavanomaisesti halvempia toteuttaa sekä kuluttavat vähemmän energiaa (ALBATTIS, 2020). Lisäksi vältetään materiaalijalostuksen ja -tuotannon aiheuttamat ympäristövaikutukset (Dai ym., 2021). Kuvassa 6 on nähtävissä kustannuserot, kun valmistetaan 1 kg NMC111-akkukemiaa materiaaleilla, jotka ovat uusia, kierrätetty käyttäen pyrometallurgisia ja hydrometallurgisia tekniikoita sekä kierrätetty käyttäen suoraa kierrätysmenetelmää. Suoralla kierrätysmenetelmällä voidaan vähentää kustannuksia kaikilla osa-alueilla. Toisaalta vaikka suora kierrätysmenetelmä voi olla energia- ja kustannustehokkaampi sekä kestävä kehityksen mukainen tapa kierrättää litiumioniakkuja, se on silti vielä varsin alkutekijöissä kehityksen suhteen (Z. Chen ym., 2023). Tällä hetkellä siinä esiintyy useita esteenä toimivia teknologisia esteitä. Näitä ovat muun muassa tehokas erottaminen, sideaineen poistaminen sekä elektrolyytin talteenotto. (Z. Chen ym., 2023)



**Kuva 6.** Kustannukset ja ympäristövaikutukset, kun tuotetaan 1 kg NMC111-akku-kemiaa. (Dai ym., 2021)

### 3.6.2 Kierrätystekniikat

Tällä hetkellä on käytössä neljä akkujen kierrätykseen integroitua kierrätystekniikkaa: Retriev-tekniikat, Recupyl Valibat, Akkuser sekä Umicore Valéas. Recupyl-tekniikalla on selkeä etu muihin tekniikoihin nähden, koska siinä hyödynnetään mekaanista käsittelyä yhdessä hydrometallurgisen menetelmän kanssa. Toimintaperiaatteet myös ovat lähimpänä kiertotalouden periaatteita. Esimerkiksi prosessissa otetaan talteen kuparia ja kobolttia sisältävä ylivuoto, joka muodostuu prosessin seurauksena. Recupyl-tekniikalla saadaan otettua talteen litiumia, grafiittia, metallioksidea sekä aiemmin mainittu ylivuoto, jossa on kuparia ja kobolttia. Umicore Valéas -tekniikassa hyödynnetään yhdistelmänä pyro- ja hydrometallurgisia

menetelmiä. Tämän vuoksi sillä on muita kierrätystekniikoita korkeampi talteenottokapasiteetti. Umicore Valéas -tekniikalla saadaan otettua talteen nikkeliä ja kobolttia. Akkuser-tekniikassa käytetään ainoastaan mekaanisia menetelmiä. Sen hyvinä puolina ovat sen korkea kierrätystehokkuus sekä alhainen energiankulutus. Huono puoli on, että koska prosessissa on ainoastaan mekaanisia menetelmiä, kolmas osapuoli hoitaa lopputulokseksi saadun ”mustan massan” käsittelyn. (ALBATTS, 2020)

Tulevaisuuden kierrätystekniikoiden tarkoituksena on korjata nykyisten tekniikoiden huonoja puolia. Halutaan muun muassa tehdä erottamisesta ekologisempaa sekä ottaa talteen grafiittia ja akkujen metallioksidikomponentteja tehokkaammin. ALBATTSin vuonna 2020 julkaistussa raportissa on nimetty seuraavat kierrätystekniikat mahdollisiksi tulevaisuuden tekniikoiksi: Accurec-tekniikka, ”closed loop”-tekniikka, Aalto yliopiston laboratorioprosessi sekä Fortumin tekniikka. Accurec-tekniikassa käytetään yhdistelmänä mekaanisia, pyrometallurgisia sekä hydrometallurgisia menetelmiä. Talteenottoprosentti katodin esiasteelle ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) on noin 90 %, mutta elektrolyyttiä ei saada otettua talteen tällä menetelmällä. Talteen saadaan myös metalliseosta, joka koostuu koboltista, nikkelistä ja mangaanista. ”Closed loop”-tekniikassa käytetään mekaanisia ja hydrometallurgisia tekniikoita. Sillä saadaan talteen litiumioniakkujen tuotantoon soveltuvia komponentteja. Sen huono puoli on se, että se kuluttaa useita kemiallisia reagensseja. Aalto yliopiston kehittämässä laboratorioprosessissa hyödynnetään yhdistelmänä mekaanisia esivalmisteluvaiheita sekä pyrometallurgisia ja hydrometallurgisia menetelmiä. Sen talteenottoprosentti on 99 % litiumioniakun materiaaleista, vaikkakin prosessi kuluttaa suuren määrän reagensseja ja energiaa sekä elementit vaativat jonkin verran jälkikäsittelyä. Fortumin tekniikka perustuu hydrometallurgiseen metallien talteenottoon. Se tarjoaa 80 % kierrätettävyyden litiumioniakuille. (ALBATTS, 2020)

## 4 ARVOKETJUN TYÖTEHTÄVÄT

Taulukossa 1 on listattuna arvoketjun vaiheiden työtehtävät. Raakamateriaalit ja niiden prosessointi vaativat johtajia toimitusketjulle, insinöörejä valmistukseen ja tuotantoon sekä insinöörejä, jotka ovat erikoistuneet valmistusmateriaaleihin. Kyseiset insinöörit tarvitsevat tietoa erityisesti katodin ja anodin materiaaleista. Komponenttien ja kennojen valmistuksessa on myös tarvetta insinööreillä kuten sähkö-, suunnittelu- ja tuotantoinsinööreille. Insinöörien lisäksi tarvitaan asiantuntijoita. Akkumoduulien ja pakettien valmistuksessa tarvittavat insinöörit ovat kennomoduuli-, paketti- ja suunnitteluinsinöörit, joiden erikoistuminen kohdistuu mekaniikkaan, simulointiin ja sähkölaitteistoon. Lisäksi suunnitteluinsinöörit vastaava akkumoduulien ja -pakettien suunnittelemisesta, kehittämisestä ja toimivuudesta. Akkujen integraatiossa tarvitaan insinöörejä akkuhallintajärjestelmille, lämpötekniikalle ja sisäänrakennetuille järjestelmille. Heidän tehtävänsä on erityisesti ohjelmiston ja integraation kehittäminen ja säätäminen. Myös konsultointi- ja testausinsinöörit ovat tärkeitä toiminnan tarkastamista varten. Arvoketjun ”toinen elämä”-vaiheessa on tarve tarkastus- ja huoltoteknikoille, vaatimusten mukaisuuden tarkastaville insinööreille sekä takuun päättymispäälliköille. Takuun päättymispäälliköt määrittelevät akuille parametrit, jotta niitä olisi mahdollista käyttää toisen iän akkuina. Akkujen kierrätyksessä tarvitaan purku- ja kierrätysinsinöörejä, takuupäällikköjä, kierrätystarkastajia, turvallisuuspäälliköitä ja asiantuntijoita. Turvallisuuspäälliköt ja asiantuntijat takaavat, että asetettuja kriteerejä seurataan. Kierrätyksessä on pakollista noudattaa standardeja ja tiukkoja sääntöjä. (ALBATT, 2020)

**Taulukko 1.** Akkujen arvoketjun työtehtävät. (ALBATTS, 2020)

Akkujen arvoketjun työtehtävät	
Raakamateriaalit ja niiden prosessointi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Toimitusketjun johtajat</li> <li>- Valmistusinsinöörit</li> <li>- Tuotantoinsinöörit</li> <li>- Valmistusmateriaaleihin erikoistuvat insinöörit</li> </ul>
Komponentit ja kennojen valmistus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asiantuntijat</li> <li>- Sähköinsinöörit</li> <li>- Suunnitteluinsinöörit</li> <li>- Tuotantoinsinöörit</li> </ul>
Akkumoduulien ja pakettien valmistus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kennomoduuli-insinöörit</li> <li>- Paketti-insinöörit</li> <li>- Suunnitteluinsinöörit</li> </ul>
Akkujen integraatio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Akunhallintajärjestelmän insinöörit</li> <li>- Lämpötekniikan insinöörit</li> <li>- Sisäänrakennettujen järjestelmien insinöörit</li> <li>- Konsultit ja testausinsinöörit</li> </ul>
Toinen elämä	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tarkastus- ja huoltoteknikot</li> <li>- Vaatimusten mukaisuuden tarkastavat insinöörit</li> <li>- Takuun päättymisen johtajat</li> </ul>
Kierrätys	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Purkuinsinöörit</li> <li>- Kierrätysinsinöörit</li> <li>- Takuupäälliköt</li> <li>- Kierrätystarkastajat</li> <li>- Turvallisuuspäälliköt ja asiantuntijat</li> </ul>

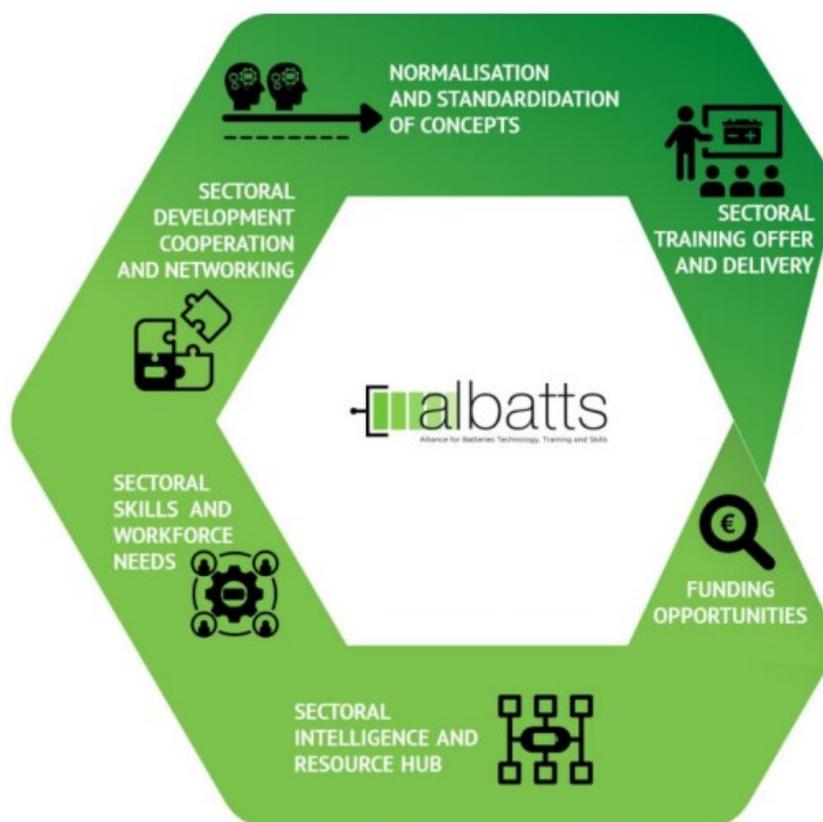
## 5 KOULUTUSSTRATEGIAT

Euroopan nykyinen koulutusjärjestelmä tarjoaa jo erittäin lahjakkaita asiantuntijoita liittyen akkuteollisuuteen. Kyseisiltä asiantuntijoilta löytyy koulutuksia seuraavan kaltaisissa aloissa: sähkökemiat, kehittynyt karakterisointi, akun valvominen, mallinnus, turvallisuus, simulointi ja niin edespäin. Näitä koulutuksia löytyy maisteri- sekä tohtoritasolla. Ammattimaisiin koulutuksiin, kuten teknikko- ja insinöörinkoulutukset, liittyy haasteita tulevaisuudessa, jotka ovat uudelleen koulutus sekä arvoketjun henkilöstön taitojen lisääminen. Tämä koskee varsinkin autoteollisuutta. Todennäköisesti erikoistuneet maksulliset koulutukset ovat hyödyllisimpiä, kun puhutaan suurien yhtiöiden tarpeesta uudelleen kouluttaa henkilöstöä. Johtuen siitä, että tavanomaiset verkkokoulutukset eivät ole tarpeeksi yksityiskohtaisia ja pysyvät varsin perustasolla. Ammattikoulutuksia, jotka liittyvät tuotannon työtehtäviin, löytyy edelleen hyvin rajoittuneissa määrissä ja useimmiten ne ovat erittäin paikallisia. Tämä voi johtua siitä, että teollisuudessa usein koulutus tapahtuu yhtiön sisäisesti. Tulevaisuudessa odotetaan ammattikoulutusten lisääntyvän työntekijöiden tarpeen kasvaessa. (Ahlbrecht ym., 2021) Jotta saataisiin vastattua lisääntyvään tarpeeseen tehokkaasti ja kohdennetusti, on tärkeää laatia strategioita uudelleen kouluttamiseen ja taitojen lisäämiseen.

### 5.1 Osaamisstrategia akkusektorille

ALBATTS on luonut osaamisstrategian akkusektorille. Jokaista vaihetta tulisi seurata, jotta saataisiin kehitettyä osaamista, yhteistyötä, uudelleen koulutusta sekä taitojen lisäämistä. Kuvassa 7 näkyy strategian välivaiheet visualisoituna. Välivaiheet ovat seuraavat: rahoitusmahdollisuudet, keskitetty sektorin älykkyys ja resurssit, sektorin taidot ja tarve työvoimalle, yhteistyö sektorin kehittämiseksi ja verkostoituminen, normalisointi ja konseptien standardisointi sekä sektorin koulutustarjonta ja sen toimitus. Tätä tarkastelua varten tärkeimmät kohdat ovat sektorin taidot ja tarve työvoimalle sekä sektorin koulutustarjonta ja sen toimitus.





**Kuva 7.** ALBATTsin akkusektorin osaamisstrategia välivaiheeseen. (ALBATTs, 2021)

Välivaiheeseen sektorin taidot ja tarve työvoimalle liittyy jo moneen otteeseen mainittu taitojen ja työvoiman puute. Osaavan työvoiman puute tulisi ottaa huomioon kolmella eri tasolla, jotka ovat seuraavat: maantieteellinen, asiaankuuluva osaaminen sekä koko arvoketjun kattava pätevyys. Huomioitavat pätevyudet ovat pehmeät taidot (*soft skills*), monialaiset taidot, monialaiset erityistaidot, sektori- tai työkohtaiset taidot, vihreät taidot (*green skills*) sekä digitaaliset taidot. Sektorin ja työvoiman osaamista tulisi jatkuvasti tarkastella ja päivittää sen perusteella. Tulevaisuuden teknologiat, prosessit ja akkusovellukset tulevat mahdollisesti vaatimaan uudenlaista osaamista, joka tulisi tunnistaa. Uudelleen kouluttamiseen ja taitojen lisäämiseen tulisi myös kehittää strategia ja suunnitelma, joita päivitetään jatkuvasti. (ALBATTs, 2021)

Välivaiheeseen sektorin koulutustarjonta ja sen toimitus kuuluu itsessään monta välivaihetta. Pitäisi aloittaa siitä, että akkusektorin koulutustarjonta tulisi pitää ajan tasalla päivittämällä sitä jatkuvasti ottaen huomioon teollisuuden tarpeet. Akkuteollisuuden tarpeiden perusteella voitaisiin kehittää modulaarisia koulutuksia, joissa on valittavana itsenäisiä moduuleja ja yksiköitä sekä päivittää nykyisiä opintosuunnitelmia. Tämän lisäksi tulisi mukauttaa ja kehittää tarkat koulutusvaatimukset akkujen valmistukseen. Itse koulutusohjelmiin tulisi lisätä STEM-tekniikka, vihreät ja digitaaliset taidot. Olisi myös optimaalista standardisoida koulutusohjelmat. Työelämässä koulutusten välillä tulisi olla selkeät väylät työtehtävien välillä, jotta etenemismahdollisuudet ovat selkeät. Koulutusmenetelmiä on monenlaisia ja niistä valitseminen tulisi tapahtua kohderyhmän perusteella. Esimerkiksi onko kohderyhmänä tuotanto- vai toimistotyöntekijät tai onko kyseessä uudelleen koulutus tuotantoon vai muihin arvoketjun osiin. Työkalut taitojen lisäämiseen ovat seuraavanlaiset: työhön perustuva oppiminen, työperehdytys, innovatiiviset ajankohtaiset koulutusohjelmat, sisäisten tai ulkoisten asiantuntijoiden tarjoama koulutus, teollisuuden seminaarit, standardisoidut verkkokurssit, kouluttajien tarjoama koulutus, oppimisinfrastruktuuriin pk-yrityksille ja muille kohderyhmille, innovaation ja erinomaisuuden keskittymät, erikoistuneet koulutuskeskukset simuloituilla koulutusympäristöillä, aikuiskoulutukset ja -ohjelmat, koulutuksen koestusalueet, joustavat koulutusratkaisut sekä kaksoistutkinto-ohjelmat. (ALBATTI, 2021) Tämä tarkastelu tehdään akkukoulutuspäivää varten eli käytetty työkalu kouluttamiseen on asiantuntijan tarjoama koulutus. Kohderyhmänä ovat opettajat, joilla on jo edeltävä tekniikan alan ammatillinen koulutus, joten kyseessä on taitojen lisääminen. Oppimateriaaleissa on näin ollen huomioitu se, että koulutettavilla on jo ennestään taustaa tekniikan alalla. Näin ollen ei ole selitetty peruskäsitteitä kuten sähkövirta, jännite ja kapasiteetti.

## 6 OPPIMATERIAALIT

Nämä oppimateriaalit keskittyvät litiumioniakkuihin, niiden ollessa maailmanlaajuisesti hallitseva akkukemia. Näin ollen puhuttaessa akuissa voi olettaa, että aina tarkoitetaan litiumioniakkuja. On tärkeää opettaa miten akut toimivat, koska jokaisessa työvaiheessa on eduksi ymmärtää akun toiminta sekä syy- ja seuraussuhteita käyttöolosuhteiden, kemian ja lopputulosten välillä. Näin ollen nämä oppimateriaalit käyvät seuraavat asiat läpi: tärkeät käsitteet, akkutyypit, komponentit, toimintaperiaate, materiaalit, akkukemiat, vikatilat ja kennon ikääntymisen sekä BMS-järjestelmä. Kaikki listatut aihealueet vaikuttavat läheisesti käyttöön liittyviin ominaisuuksiin. Esimerkiksi akkujen valmistusmenetelmät liittyvät tarkemmin akkujen valmistukseen kuin koko arvoketjuun. Tämän takia ne ovat rajattu pois tarkastelusta. Sen sijaan taas akkujen materiaalit selittävät akun toimintaa sekä ominaisuuksia ja näin ollen liittyvät tarkasteluun. Riippumatta valmistusmenetelmästä lopputulos toiminnalle on sama, kun taas materiaalien erovaisuuksilla on seuraamuksia toiminnalle.

### 6.1 Tärkeät käsitteet

Akkuihin liittyy paljon käsitteitä, jotka olisi hyvä tietää. Nämä keskeiset käsitteet ovat lyhyesti avattuna taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Tärkeitä käsitteet.

Sykli-ikä	Kuvailee, kuinka monta kertaa akku voidaan ladata ja purkaa, kunnes se on "kuollut" (J. T. Warner, 2019).
Gravimetrinen energiatiheys	Energiamäärän suhde massaan. Yksikkö on Wh/kg. Voidaan kutsua myös akun ominaisenergiaksi. (J. T. Warner, 2019)
Volumetrinen energiatiheys	Energiamäärän suhde tilavuuteen. Yksikkö on Wh/L. (J. T. Warner, 2019)
C-arvo ( <i>C-rate</i> )	Kuvailee, kuinka paljon tehoa voidaan ladata tai purkaa akusta tietyn ajan sisällä. Esimerkiksi 1C tarkoittaa yhden tunnin purkamista/lataamista ja 2C tarkoittaa puolen tunnin. (J. T. Warner, 2019)
DOD ( <i>depth of discharge</i> )	Purkusyvyys eli kuinka tyhjäksi akku puretaan. Tavanomaisesti ei tyhjenetä kuin 80 % kapasiteetista. (J. T. Warner, 2019)
SOC ( <i>state of charge</i> )	Kuvailee, kuinka paljon energiaa kennossa on vapautettavana. Jos SOC on alhaisempi, niin siitä saadaan vähemmän energiaa ulos purkamisen aikana. Eli kuvaa, kuinka paljon laitteessa on akkua jäljellä. (J. T. Warner, 2019)

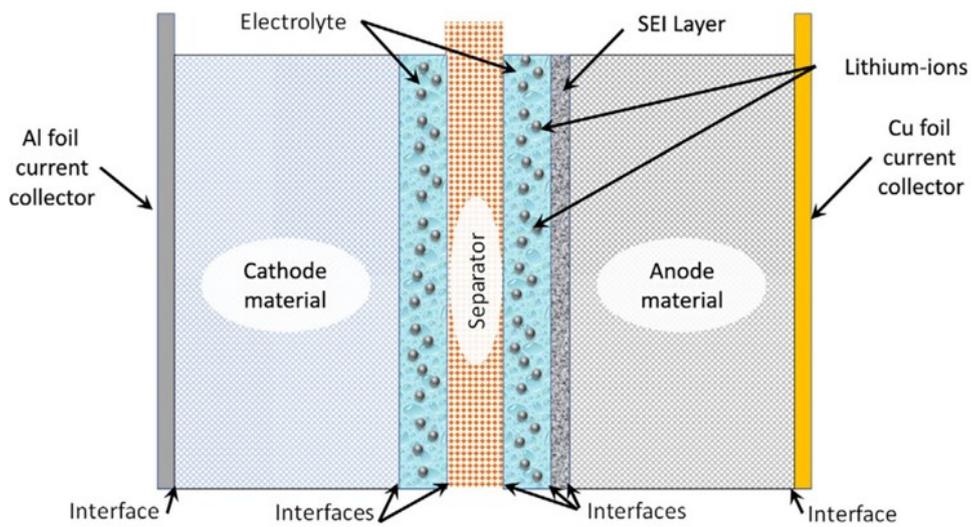
SOH (state of health)	Kuvailee akun sen hetkistä kuntoa verrattuna sen alkuperäiseen kuntoon. Määrittelee, kuinka kauan kestää ennen kuin akku saavuttaa elinkaaren loppun. (J. Warner, 2015)
EOL (end of life)	Akun elinkaaren loppu, joka saavutetaan, kun sen maksimiteho ja -energia ovat noin 80 % alkuperäisestä. (J. Warner, 2015)

## 6.2 Akkutyypit

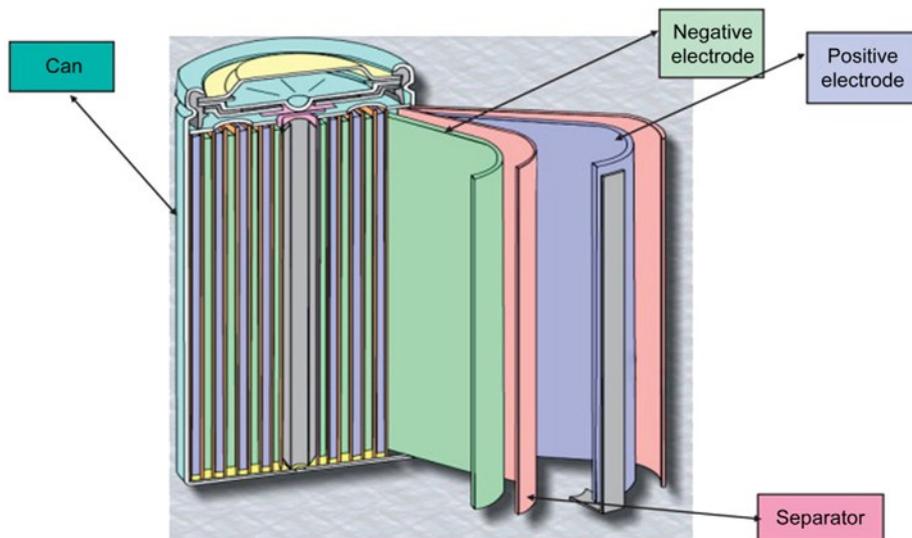
Akut jakautuvat ensisijaisiin ja toissijaisiin akkuihin. Ensisijaisten akkujen sähkökemialliset reaktiot ovat tavanomaisesti peruuttamattomia eli niitä ei ole mahdollista ladata uudestaan. On olemassa ladattavia ensisijaisia akkuja, mutta ne eivät lataudu hyvin. Kemiallisen energian muuntaminen sähköenergiaksi tapahtuu ulkoisen piirin kautta. (Wu, 2015) Hyvä esimerkki ensisijaisesta akusta on tavanomainen paristo (Andrea, 2020). Toissijaisilla akuilla sähkökemialliset reaktiot ovat palautuvia, minkä takia ne voidaan ladata ja purkaa toistuvasti. Purkamisen aikana sähköenergia siirtyy ulkoisen piirin kautta, kuten ensisijaisilla akuillakin. Lataamisen aikana taas ulkoisen lähteen sähköenergia muutetaan kemialliseksi energiaksi, joka varastoituu akkuun. Toissijaisen akun laadusta ja akkutyypistä riippuen prosessi on mahdollista toistaa tuhansia kertoja, minkä takia sillä on huomattavasti pidempi elinikä kuin ensisijaisella akulla. (Wu, 2015) Tässä tarkastelussa keskitytään toissijaisiin akkuihin, mutta on hyvä muistaa, että on kahdenlaisia akkuja.

### 6.3 Komponentit

Akku sisältää tavanomaisesti vähintään seuraavanlaiset komponentit: kenno, akunhallintajärjestelmä, liittimet, termistori sekä kotelo. Esimerkkejä kennoista ovat nappikennot ja akuista 9 voltin alkaliakku, jossa on neljä 1,5 voltin kennoa sarjassa. (Andrea, 2020) Itse akkukenno koostuu komponenteista, jotka jokainen akku tarvitsee toimiakseen (J. T. Warner, 2019). Akkukennossa on kaksi elektrodia, anodi ja katodi, joiden kautta sähkövirta kulkee. Anodi ja katodi koostuvat virrankerääjistä, johtavista sidosaineista sekä aktiivisista materiaaleista. Aktiiviset materiaalit ovat akun toiminnalle erittäin tärkeitä kemiallisia yhdisteitä. Niillä päällystetään virrankerääjät, joiden materiaalit ovat useimmiten kupari ja alumiini, koska niillä on hyvä sähkönjohtavuus. Kupari on anodin ja alumiini katodin puolella. Kun virrankerääjät ovat päällystetyt aktiivisilla yhdistemateriaaleilla, niitä voidaan kutsua elektrodeiksi. Jotta akku ei saa oikosulkua, nämä elektrodit tulee pitää erillä toisistaan. Tämä tapahtuu erottimen avulla. Tavanomaisesti erotin on polymeerinen tai keraaminen kalvo. Kuvassa 8 nähdään litiumioniakun rakenne sekä selkeät rajapinnat, jotka rakenteessa esiintyvät. Elektrodit kasataan tai kelataan lopulliseksi elektrodirakenteeksi. Kasattu elektrodi sijoitetaan suljettuun koteloon. Tämä kotelo voi olla esimerkiksi metallinen tai muovinen astia. Kuvassa 9 on nähtävissä, miten lieriömäinen litiumioniakku kasataan. Koteloon sijoittamisen jälkeen elektrolyytti lisätään. Elektrolyytti mahdollistaa litiumionien liikkumisen anodin ja katodin välillä. Lisäksi turvallisuuslaitteita lisätään, minkä jälkeen kotelo suljetaan. (J. T. Warner, 2019)



**Kuva 8.** Litiumioniakun rakenne ja rajapinnat. (J. T. Warner, 2019)



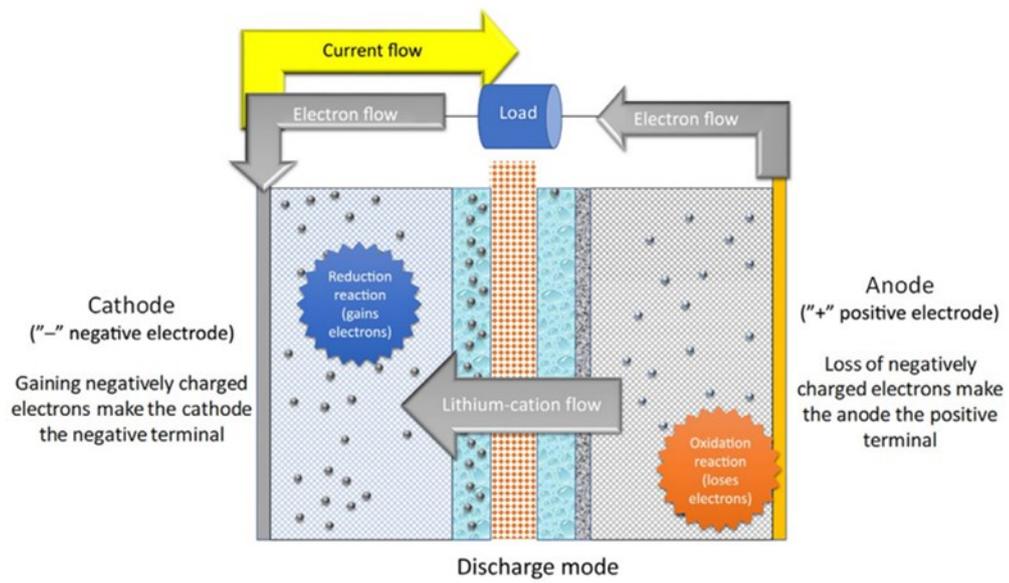
**Kuva 9.** Lieriömäisen akun kokoamisjärjestys. (J. Warner, 2015)

#### 6.4 Toimintaperiaate

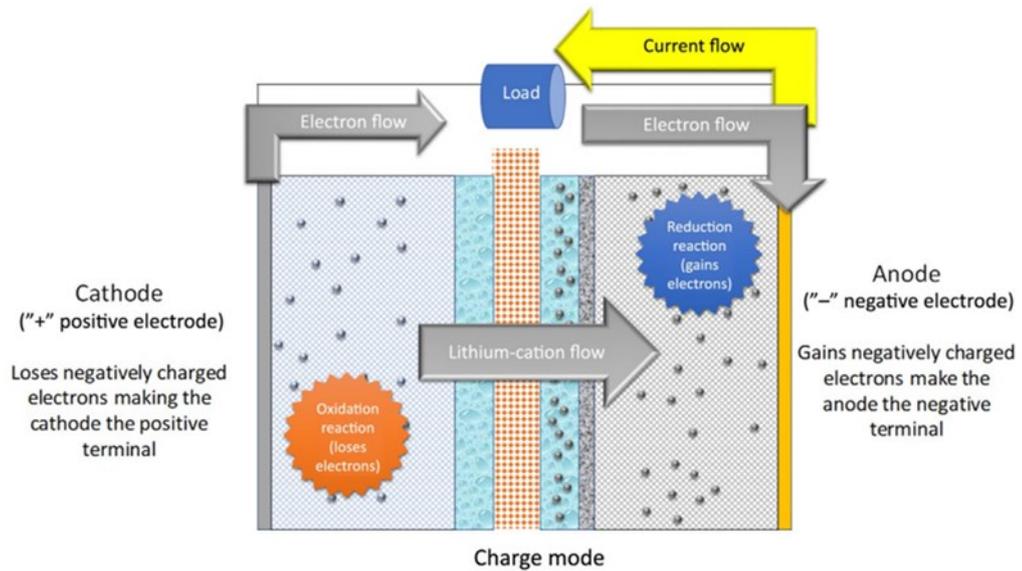
Akut muuttavat kemiallista energiaa sähköksi. Saadun sähkön mittakaava on suuri ja voi vaihdella nanowattitunneista megawattitunteihin (Wu, 2015). Akkukennon

toiminta perustuu siihen, että aktiiviset materiaalit, eli kemialliset yhdisteet anodilla ja katodilla, vastaanottavat ja luovuttavat litiumioneja sekä elektroneja. Vaikka suurin osa positiivisesti latautuneista litiumioneista, eli kationeista, on varastoituneena elektrolyyttiin, niitä sijaitsee myös anodimateriaalissa. Kun akkua puretaan, nämä litiumionit pakotetaan liikkumaan ulos anodista hapettumisreaktion avulla. Ne työnnetään elektrolyytin ja erottimen läpi, minkä jälkeen ne yhdistyvät katodin aktiivisen materiaalin kanssa. Litiumionien asettumista paikoilleen materiaalin tyhjiin koloihin kutsutaan interkalaatioksi. Liike katodin puolelle jatkuu, kunnes kaikki litiumionit ovat siirtyneet anodilta katodille. Tämä prosessi vapauttaa elektrodeja, jotka liikkuvat anodilta vastakkaiseen suuntaan kuin litiumionit. Näin ollen saadaan virta virtaamaan anodilta, virrankerääjille, sähkölaitteelle sekä katodille. Tämä prosessi jatkuu niin kauan kuin kaikkien litiumionien liikkuminen katodille kestää. Kennot ovat niin sanotusti puretussa tilassa, kun kaikki litiumionit ovat siirtyneet. Tiivistäen voidaan sanoa, että virta saadaan aikaiseksi akkukennossa vapauttamalla ja kuluttamalla elektroneja. Latauksen aikana toistetaan purun aikana tapahtunut prosessi, mutta tällä kertaa toiseen suuntaan. Lataamiseen tarvitaan erillinen energian lähde, kuten laturi, jotta saadaan aikaiseksi reaktion kulkeminen toiseen suuntaan. Tällöin elektronit lähtevät negatiivisesti varautuneesta katodista ja ne siirretään virrankerääjien ja kuparin läpi positiivisesti latautuneelle anodille. Ensisijaisissa akuissa, eli kertakäyttöisissä akuissa, myös reaktiot ovat kertakäyttöisiä. Tällöin tapahtuva prosessi kuluttaa aktiivisen materiaalin pysyvästi ja anodin tuhoutuu sen vapauttaessa ioneja. Näin ollen niitä ei ole mahdollista ladata uudelleen, vaan reaktio tapahtuu vain yhteen suuntaan. Edellä mainitut sähkökemialliset reaktiot käynnistyvät, kun virtapiiri suljetaan liittämällä sähkölaitte siihen. Tähän virtapiiriin kuuluvat positiivinen ja negatiivinen elektrodi sekä sähkölaitte. (J. T. Warner, 2019) Kuvassa 10 näkyvät litiumionien ja elektronien liikkeen suunnat purkamisen aikana sekä kuvassa 11 lataamisen aikana.





**Kuva 10.** Akkukennon purkamisen aikana. (J. T. Warner, 2019)



**Kuva 11.** Akkukennon lataamisen aikana. (J. T. Warner, 2019)

### 6.4.1 Litiumionien liike

Litiumionien liike on mahdollista luokitella kolmeen kategoriaan: migraatio, diffuusio ja konvektio. Migraatiolla tarkoitetaan sähkökentän aiheuttamaa liikettä varautuneissa ioneissa. Diffuusio tarkoittaa ionien liikkumista korkeammasta konsentraatiosta alhaisempaan, eli väkevämmästä liuksesta laimeampaan liukseen. Konvektiolla tarkoitetaan välittävän aineen liikettä nestemäisessä muodossa. Kaikki nämä prosessit ovat erittäin tärkeitä litiumionikenoissa, koska ne mahdollistavat akkujen toiminnan. Ilman litiumionien liikettä reaktiot eivät tapahtuisi. Litiumioniakuissa liike elektrodien välillä tapahtuu tavanomaisesti diffuusion avulla. Hapetus-pelkistysreaktiot sekä elektronien liike saavat aikaan sähkökentän sekä virran virtauksen. (J. T. Warner, 2019)

### 6.4.2 Katodin ja anodin varaus

Toimintaan liittyen on hyvä muistaa, että katodi ei ole aina positiivinen eikä anodi negatiivinen, vaikka tämä ajatus onkin vakiintunut (J. T. Warner, 2019). Toissijaisissa akuissa tapahtuvat hapetus-pelkistysreaktiot määrittelevät katodin ja anodin puolen (Andrea, 2020). Katodilla tapahtuu aina pelkistysreaktio, kun taas anodilla hapetusreaktio. Hapettumisella tarkoitetaan sitä, että alkuaine luovuttaa yhden tai useamman elektronin ja pelkistymisellä sitä, että alkuaine vastaanottaa yhden tai useamman elektronin (J. T. Warner, 2019). Purkamisen aikana negatiivinen elektrodi luovuttaa elektroneja vastaanottavalle positiiviselle elektrodille eli tällöin anodi on negatiivinen ja katodi positiivinen. Kun taas lataamisen aikana positiivinen elektrodi luovuttaa ne takaisin negatiiviselle elektrodille eli tällä kertaa anodi on positiivinen ja katodi negatiivinen. Näin ollen nimet vaihtuvat elektrodien välillä sen mukaan kumpi reaktio siellä tapahtuu. (Wu, 2015) Tämä ei kuitenkaan päde ensisijaisille akuille, koska niissä reaktio kulkee vain toiseen suuntaan. Näin ollen niiden tapauksessa katodi on aina positiivinen ja anodi negatiivinen. (Andrea, 2020) Tästä tarkennuksesta huolimatta näissäkin oppimateriaaleissa viitataan positiiviseen elektrodiin katodina sekä negatiiviseen elektrodiin anodina yksinkertaisuuden vuoksi.

### 6.4.3 Jännite ja tehokkuus

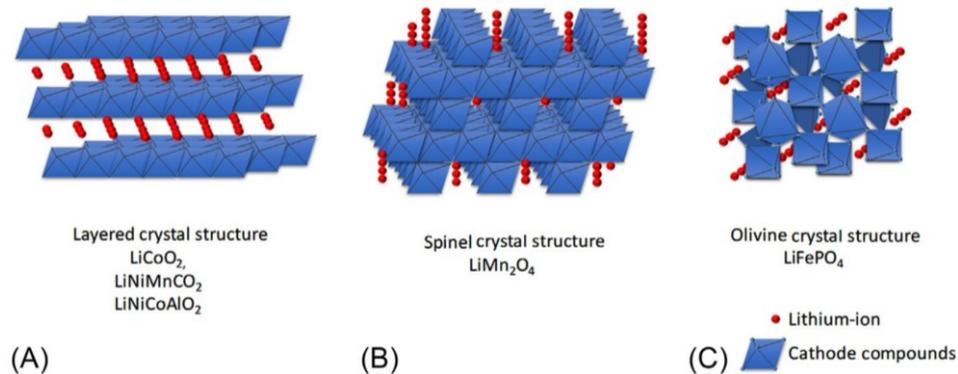
Sähkökemiallisen kennon jännite muodostuu kahden elektrodin potentiaalierosta. Se ilmaistaan voltteina. Näin ollen valittujen materiaalien potentiaaleilla muodostetaan kennon jännite. Elektrodien jännite-ero muodostuu rajapintajännitteistä sekä positiivisen ja negatiivisen navan välisestä jännitehäviöistä. Rajapintajännitteen ja jännitehäviöiden erotus muodostaa lopullisen jännitteen kennolle. Jännitehäviöt kutsutaan usein ohmiseksi häviöksi. Rajapintajännite viittaa eri rajapintoihin materiaalien ja elektrodien välillä ja niiden välillä ilmenevään jännitteeseen. Esimerkiksi litiumioniakussa rajapintoja olisi alumiini virrankerääjän ja aktiivisen anodimateriaalin välillä sekä aktiivisen anodimateriaalin ja elektrolyytin välillä. Sama pätee kuparisen virrankerääjän, katodimateriaalin ja elektrolyytin välillä. Kaikilla mainituilla alueilla on eroavat jännitteet, ja ne muodostavat osan napojen välisestä jännite-erosta. Napojen väliset jännitehäviöt aiheutuvat elektrolyytin resistanssista, elektrodien välisestä etäisyydestä sekä virran voimakkuudesta. Jännitehäviöt johtavassa tilavuudessa ovat aina verrannollinen virran voimakkuuteen. Lisäksi ladatessa ja purkaessa menetetään energiaa prosessin aikana muodostuvan lämpöenergian muodossa. Lämpö muodostuu sisäisen resistanssin, virran voimakkuuden sekä kuluneen ajan kautta. Näin ollen tuotetaan enemmän lämpöä, jos sisäinen resistanssi tai virran voimakkuus on korkea pidemmällä aikavälillä. Jotta lämpöä tuotettaisiin vähemmän, olisi siis parempi, että resistanssi olisi alhaisempi ja virran virtaus hitaampaa. Tiivistäen, sähkökemiallisella kennojen tehokkuudella ilmaistaan, kuinka paljon energiaa menetetään lämmön muodossa latauksen ja purkamisen aikana. On kuitenkin hyvä huomauttaa, että suurimmassa osassa litiumioniakkuja vaikutus tehokkuuteen on vain parin prosentin luokkaa. Saavutettu tehokkuus on näin ollen tavanomaisesti tasoa 98 %. (J. T. Warner, 2019)

## 6.5 Materiaalit

Kolme komponenttia, joiden materiaalit ovat erittäin tärkeitä akuissa ovat positiivinen ja negatiivinen elektrodi sekä elektrolyytti. Näille materiaalille esiintyy vaa-  
timuksia, jotka ovat tärkeitä toiminnan kannalta. Lisäksi on ihanteellisia piirteitä, joita kannattaa tavoitella, jotta toimintaa voi vielä entisestään optimoida. (Wu, 2015) Molempien elektrodien materiaalien tulisi olla huokoisia, koska tällä tavalla saadaan aikaiseksi suurempi pinta-ala. Tarttumispinta-ala suhteutettuna tilavuuteen voi olla jopa moninkertainen verrattuna sileään materiaaliin. Huokoisuus mahdollistaa sen, että elektrolyytti voi tunkeutua syvemmälle elektrodiin ja litiumionit kulkeutuvat tehokkaammin sen kautta vastakkaiselle elektrodille. Näin ollen varastoidaan myös enemmän energiaa. Tämä auttaa minimoimaan SEI-kerroksen aiheuttamat energiahäviöt. (J. T. Warner, 2019)

### 6.5.1 Katodi

Litiumionakuissa yleisesti käytettyjä aktiivisia materiaaleja positiiviselle elektrodille eli katodille ovat: NMC, NCA, LFP, LMO ja LCO. Rakenteet ovat tavanomaisesti kerroksittainen, spinelli ja oliviini. Kerroksittainen rakenne on yksinkertaisin rakenne näistä kolmesta. Siinä katodimateriaalit ovat asettuneet kerrokseen, joiden väliin litiumionit menevät. Katodimateriaaleista LCO- ja NMC-kemioilla on kerroksittainen rakenne. Spinellirakenteessa on kerroksia sekä sivusuunnassa että pystysuunnassa. Näiden väliin jää tunneleita, joiden väliin litiumionit menevät. Tämä rakenne on monimutkaisempi kuin kerroksittainen. Katodimateriaaleista LMO-kemialla on tämä rakenne. Oliivinirakenteessa on riviin asettuneita kuusikulmion muotoisia happiatomeja, joiden välillä rauta ja fosfori toimivat eräänlaisina siltoina yhdistäen happiatomit toisiinsa. Litiumionit menevät jäljelle jäävien kolojen väliin. Kyseinen rakenne monimutkaisin katodin rakenteista. Katodimateriaaleista LFP-kemialla on tämä rakenne. (J. T. Warner, 2019). Kuvassa 12 nämä rakenteet ovat nähtävissä. Kuvassa katodin aktiivinen materiaali on merkitty sinisellä ja litiumionit punaisella.



**Kuva 12.** Katodimateriaalien rakenteet. (J. T. Warner, 2019)

Seuraavanlaisia vaatimuksia esiintyy litiumioniakkujen katodimateriaalille. Sillä tulisi olla korkea hapetus-pelkistyspotentiaali, jotta voidaan saavuttaa korkea ulostulojännite. Jotta ulostulojännite pysyisi vakaana, tulisi myös hapetus-pelkistyspotentiaalin pysyä vakaana lataamisen ja purkamisen aikana. Korkea kapasiteetti taas voidaan saavuttaa mahdollisimman suurella määrällä aktiivisia litiumeja. Näiden määrä vaikuttaa huomattavasti myös sykli-ikään sekä pöörakenteen vakautteen. Kemiallista vakautta varten tärkeä ominaisuus on se, että materiaali ei reagoi elektrolyytin kanssa koko käytön aikaisella jännitealueella. Lisäksi materiaalilla tulisi olla hyvä elektroni- ja litiumionijohtavuus. Tämä vähentää polarisaatiota ja mahdollistaa lataamisen sekä purkamisen korkealla virran tiheydellä. Korkea virran tiheys tarkoittaa myös sitä, että litiumioneilla tulisi olla korkea diffuusiokerroin elektrodimateriaalissa. Näiden lisäksi on olemassa vaatimuksia materiaalin käytännöllisyydelle. Näihin lukeutuvat se, että materiaalin tulisi olla halpaa, myrkytöntä sekä ympäristöystävällistä. (Wu, 2015)

### 6.5.2 Anodi

Litiumioniakuissa aktiivisia anodimateriaaleja ovat tavanomaisesti grafiitti, pii tai titaani (J. T. Warner, 2019). Anodimateriaali luontaisesti jakaa vaatimuksia katodimateriaalin kanssa. Myös sillä tulisi olla hyvä elektroni- ja litiumionijohtavuus, ke-

miallinen vakaus koko käytön jännitealueelta sekä suhteellisen korkea diffuusiokerroin. Lisäksi käytännölliset vaatimukset ovat samat. Sille esiintyy myös anodille yksinomaisia ominaisuuksia. Pelkistys-hapetus potentiaalini tulisi olla mahdollisimman alhainen, koska mitä lähemmäksi päästään metallisen litiumin potentiaalia, sitä korkeampi ulostulojännite tulee olemaan. Hapetus-pelkistys reaktion tulisi olla mahdollisimman palautuva, joten suuren määrän litiumioneja tulisi pystyä asettumaan sekä poistumaan materiaalista. Jälkeen jäävät aktiiviset litiumionit vähentävät kapasiteettia. Interkalaation ja poistumisen tulisi olla palautuvaa, jotta syklin suorituskyky pysyy vakaana. Ionien määrän ei olisi suotavaa vaikuttaa huomattavasti materiaalin hapetus-pelkistyspotentiaaliin. Muuten akun jännite ei pysyisi vakaana ja näin ollen lataaminen ja purkaminenkaan eivät olisi vakaita. Lisäksi vakaan käytön kannalta hyvä pintarakenne on erittäin tärkeä ominaisuus, koska tämän avulla SEI muodostuu paremmin. (Wu, 2015) SEI-kerroksesta selitetään tarkemmin toisessa kappaleessa, koska se on liian iso aihe käsitellä anodin yhteydessä. Aiemmin mainituista materiaaleista, grafiitti, pii ja titaani, grafiitti on laajalaisimmin käytössä litiumioniakuissa (ALBATTIS, 2020). Tämä johtuu sen erinomaisista ominaisuuksista: litiumionimetalliin verrattavissa oleva kemiallinen potentiaali kennon ollessa täyteen ladattu, hyvä vakaus sähkökemiallisesti, turvallisempi tulipalojen sattuessa sekä maailmanlaajuisesti kattavat varastot. (ALBATTIS, 2020)

Vaihtoehtoisia anodimateriaaleja grafiitin tilalle käytetään ja kehitetään jatkuvasti. Hiilipohjaiset materiaalit kattavat luontaiset ja keinotekoiset grafiitit, grafeenit, kovan ja pehmeän hiilen. Näiden lisäksi mahdollisia materiaaleja ovat pii, titaani, litiummetalli, alumiini, tina, germanium ja antimoni. Osa näistä materiaaleista ovat vasta kehitysvaiheessa. Tärkeä kriteeri, jolla voi vertailla anodimateriaaleja on materiaalin ominaiskapasiteetti. (J. T. Warner, 2019) Tämä on nähtävissä taulukossa 3. Alkuaineet ovat ominaiskapasiteetiltaan suuruusjärjestyksessä. Ominaiskapasiteetti ei kuitenkaan ole ainoa kriteeri anodimateriaalia valittaessa, kuten voidaan huomata siitä, että grafiittien alapuolella ovat vain pehmeä hiili ja titaani.

**Taulukko 3.** Anodimateriaalien ominaiskapasiteetit suuruusjärjestyksessä. (J. T. Warner, 2019)

Alkuaine	Ominaiskapasiteetti (mAh/g)	Volumetrinen kapasiteetti (mAh/cm <sup>3</sup> )
Pii (Si)	4 191	9 765
Litium (Li)	3 860	2 061
Germanium (Ge)	1 528	8 626
Alumiini (Al)	993	2 681
Tina (Sn)	992	7 241
Grafeeni (C)	960	4 284
Antimoni (Sb)	660	4 402
Kova hiili (C)	480	553
Luontainen grafiitti (C)	372	837
Keinotekoinen grafiitti (C)	342	369
Pehmeä hiili (C)	255	293
Titaani (Ti)	175	613

Luontainen ja keinotekoinen grafiitti ovat laaja-alaisimmin käytössä johtuen niiden korkeista ominaiskapasiteeteista, jotka ovat 372 mAh/g ja 342 mAh/g. Grafiitteja

käytetään pehmeän hiilin sijaan, koska sillä on parempia ominaisuuksia suorituskykyyn liittyen. Pehmeitä hiiliä käytetään litiumioniakuissa sen sijaan johtavana lisäaineena sekä materiaalien päällystämässä. Esimerkiksi se on usein johtava lisäaine katodi- ja anodimateriaaleissa. Kovan hiilen ominaiskapasiteetti taas menettää etuasemansa grafiittiin, koska sen pysyvä kapasiteetin menetys on paljon korkeampi. Sillä on myös suorituskykyyn liittyviä ongelmia kuten kapasiteetin hiipuminen, litiumionien poistuminen anodimateriaalista vaatii korkeamman jännitteen ja sen sähkökemiallinen käyttäytyminen on erilaista kuin grafiitilla. Garafeenillä taas on varsin alhainen kolumbinen tehokkuus sekä alhainen syklivakaus, minkä takia sitä käytetään mieluummin yhdisteissä. Lisäksi sitä käytetään materiaalien päällystämiseen sekä johtavana lisäaineena kuten pehmeää hiiltäkin. (J. T. Warner, 2019)

Myös anodimateriaalit, jotka eivät ole hiilipohjaisia, ovat herättäneet kiinnostusta. Muun muassa piin korkea ominaiskapasiteetti on taannut sen, että sen kehittämiseen on eniten kiinnostusta. Sen ominaiskapasiteetti on 4 191 mAh/g, joka on 11-kertaa suurempi kuin grafiitin ominaiskapasiteetti. Piin sykli-ikä on kuitenkin vielä suuri haaste, koska sen tilavuus muuttuu 270 % litiumionien asettuessa ja poistuessa anodimateriaalista. Näin ollen piitä käytetään pääosin sekoitettuna hiilen ja grafiitin kanssa. Ongelmat tilavuuden muutosten kanssa ovat vastaavat myös germaniumilla ja tinalla. Germanium laajenee lähes 300 % ja tina 360 %. Myös litiummetallilla on hyvin suuri ominaiskapasiteetti, joka on 3 860 mAh/g. Sen käytössä kuitenkin esiintyy turvallisuusriskejä, koska litiummetalli on erittäin reaktiivinen sekä veden että hapen kanssa. Kiinteän olomuodon akkujen kehittäminen on herättänyt mielenkiinnon litiummetallia kohtaan uudestaan. Myös alumiinilla on korkea ominaiskapasiteetti, joka on 993 mAh/g, mutta sen suuri haaste on voimakas jauhautuminen syklien aikana. Tämä aiheuttaa ongelmia, jos syklejä on enemmän kuin muutama. Titaanin käytön kanssa ongelmana taas on sen suhteellisen alhainen ominaiskapasiteetti, joka on 175 mAh/g. Se on suunnilleen vain puolet grafiitin kapasiteetista. Lisäksi haasteena ovat alhainen ioninen johtavuus ja alhainen käyttöjännite. Lisäksi kiinnostus metallien, metalliseosten sekä yhdisteiden



käyttämiseen on kasvanut. Eniten huomiota herättäneet vaihtoehdot ovat olleet pii, tina, alumiini sekä germanium. Nämä alkuaineet ovat tällä hetkellä tutkimusten ja kehityksen keskipisteenä, koska ne ovat helposti saatavilla, halpoja sekä myrkyttömiä. Suurin ongelma on materiaalien tilavuuksien muutokset. Mahdollisia ratkaisuja kuitenkin löytyy kuten hiukkaskoon pienentäminen nanomittakaavaan. Se vähentäisi rasiutusta, joka liittyy tilavuuden suureen laajentumiseen. (J. T. Warner, 2019)

On tärkeä huomioida, että tavanomaisesti anodi ei ole rajoittava tekijä energiatiheydessä. Esimerkiksi jopa korkean nikkeliipitoisuuden omaavan NMC-katodin ominaisenergiatiheys on 200–220 mAh/g ja grafiitilla taas on 372 mAh/g. Näin olleen energiatiheyden lisääminen tapahtuu pääosin katodin kautta, mutta ei tule unohtaa, että anodipuolella tulee myös tehdä rinnakkaista edistystä. (J. T. Warner, 2019)

### 6.5.3 Elektrolyytti

Elektrolyyttejä on nestemäisiä, kiinteitä sekä geelimäisiä polymeerielektrolyyttejä (Wu, 2015). Tällä hetkellä laajassa käytössä ovat nestemäiset elektrolyytit (Wu, 2015), joten keskitymme niihin tässä kappaleessa. Nestemäiset elektrolyytit valmistetaan orgaanisista liuottimista ja litiumsuolista (Wu, 2015). Nestemäiselle elektrolyyttille tärkeimmät ominaisuudet ovat turvallisuus, pitkäaikainen vakaus sekä reaktionopeus. Kaupallisissa toteutuksissa myös kustannukset ja helppo valmistusmenetelmä ovat merkittäviä tekijöitä. (Wu, 2015)

Akun turvallisuutta, vakautta ja reaktionopeutta varten olisi tärkeää, että elektrolyytti pysyy nestemäisenä suurella lämpötila-alueella. Sen höyrystyminen tai kiinteytyminen aiheuttaisi ongelmia kaikilla osa-alueilla. Turvallisuutta varten elektrolyytin tulisi olla myrkytön sekä sillä tulisi olla alhainen höyrönpaine. Reaktionopeuteen taas vaikuttaa litiumionijohtavuus, minkä olisi ideaalista olla korkea laajalla lämpötila-alueella. Ionien tulisi myös liueta tehokkaasti elektrolyttiin. Kun taas puhutaan pitkäaikaisesta vakaudesta, niin terminen stabiilius käytön lämpötila-

alueella on tärkeää. Tämä on sen takia, ettei elektrolyytissä alkaisi tapahtua hajoamisreaktioita. Elektrolyytin tulisi myös olla kemiallisesti vakaa, joka tarkoittaa sitä, ettei se saisi reagoida muiden akkumateriaalien kanssa. Lisäksi elektrolyytti, joka tukee palautuvia hapetus-pelkistysreaktioita vaikuttaa positiivisesti pitkäaikaiseen käyttöön. (Wu, 2015)

## 6.6 Akkukemiat

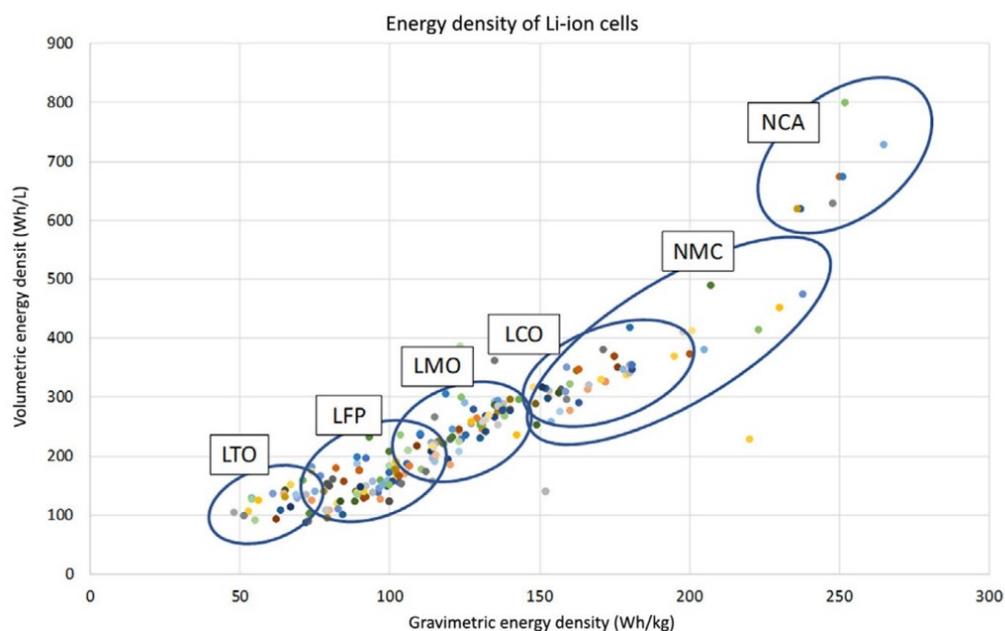
Litiumionien akkukemioista kuusi kemiaa on suuressa käytössä nykypäivänä ja ne ovat seuraavat: litiumrautafosfaatti (LFP), litiummangaanioksidi (LMO), litiumkoolttioksidi (LCO), litiumnikkelikobolttialumiini (NCA), litiumnikkelikobolttimangaani (NCM) sekä litiumtitaanioksidi (LTO). Kaikki materiaalit paitsi LTO ovat nimetty katodimateriaalin mukaan. Sen sijaan LTO on nimetty anodimateriaalin mukaan. Materiaaliyhdistelmät ovat valittu niiden sähköisen johtavuuden, lämpötilajohtavuuden sekä vakauden takia. (J. T. Warner, 2019) Kuvassa 13 näkyvät litiumioniakkukemioiden ominaisuudet taulukoituna. Näitä ominaisuuksia ovat kemioiden ominaistiheys, volumetrinen energiatiheys, ominaisteho sekä volumetrinen tehon tiheys, jännite, sykli-ikä, itsepurkautumisen määrä per kuukausi sekä toiminnan aikainen lämpötila-alue. Näistä ominaisuuksista selitetään lisää seuraavissa kappaleissa. Akkukemioista puhutaan pääosin suhteessa toisiinsa, jotta saa selkeän kuvan niiden eroavaisuuksista ja vahvuuksista.

	Lithium iron phosphate	Lithium manganese oxide	Lithium titanium oxide	Lithium cobalt oxide	Lithium nickel cobalt aluminum	Lithium nickel manganese cobalt
Chemistry descriptor	LFP	LMO	LTO	LCO	NCA	NMC
Specific energy (Wh/kg)	90–120	100–150	60–80	150–200	200–300	150–280
Energy density (Wh/L)	190–300	250–360	170–230	400–600	490–675	325
Specific power (W/kg)	4000	4000	1000	1000	1000	1000–4000
Power density (W/L)	10,000	10,000	2000	2000	2000	2000–10,000
Volts (per cell)	3.3V	3.7V	2.3V	3.6V	3.6V	3.7V
Cycle life	5000–6000	300–700	>15,000+	500–1000	500	3000–4000
Self-discharge (% per month)	< 1%	5%	2–10%	1–5%	2–10%	1%
Operating temperature range	–20°C to +60°C	–20°C to +60°C	–30°C to +75°C	–20°C to +60°C	–20°C to +60°C	–20°C to +55°C

**Kuva 13.** Litiumioniakkukemioiden ominaisuudet taulukoituna. (J. T. Warner, 2019)

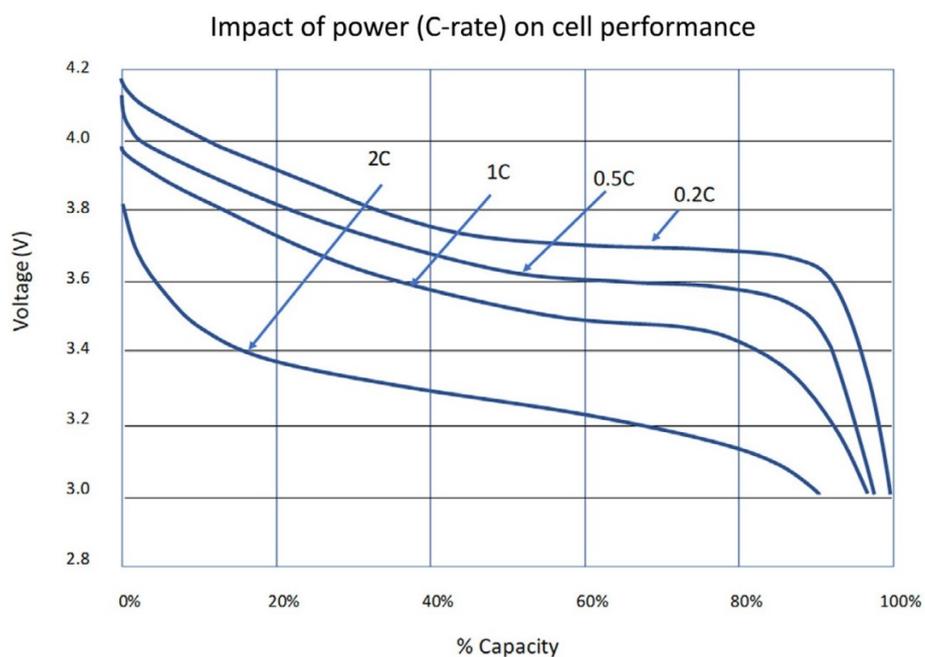
### 6.6.1 Energia- ja tehotiheydet

Tavanomaisesti energiatiheyksien vertailussa käytetään gravimetristä energiatiheyttä eli ominaisenergiaa, mutta poikkeuksia löytyy, riippuen käyttökohteen vaatimuksista. Esimerkiksi ajoneuvoissa volumetrinen energiatiheys saattaa olla tärkeämpi, koska se kuvailee, kuinka paljon energiaa saadaan laitettua saatavilla olevaan tilaan. Tästä huolimatta ominaisenergian avulla vertailu onnistuu parhaiten, koska otetaan huomioon ainoastaan energia ja paino. Kuvassa 14 näkyvät sekä litiumionikemien gravimetriset että volumetriset energiatiheydet. NCA omaa korkeimman gravimetrisen energiatiheyden, joka on suunnilleen 250 Wh/kg paikkeilla, kun taas LTO alhaisimman, joka on noin 50 Wh/kg paikkeilla. Muut akkukemiat sijoittuvat näiden välille. Hyvä sivuhuomio energiatiheyksistä on, että litiumionikemien eivät ole vielä lähelläkään nestemäisiä polttoaineita. Vuonna 2019 korkein kaupallinen energiatiheys litiumionikemille oli 285 Wh/kg, kun taas dieselpolttoaineen oli yli 10 000 Wh/kg. Eli litiumioniakkujen energiatiheyksissä on vielä paljon kehittämisen varaa. (J. T. Warner, 2019)



**Kuva 14.** Litiumionikenojen gravimetriset energiatiheydet. (J. T. Warner, 2019)

Tehotiheydellä voi olla enemmän merkitystä, kun vertaillaan paikallaan pysyviä sovelluksia tai sovellusta, joka vaatii paljon tehoa. Tällöin korostuu se, kuinka paljon ja nopeasti tehoa saadaan purettua. Tätä voidaan ilmaista C-arvoilla, koska ne vaikuttavat kennojen suorituskykyyn ja sykli-ikään. Litiumionikenoissa tavanomaisesti korkeammat C-arvot, eli korkeammat purkamisnopeudet, laskevat saatavaa kapasiteettia sekä sykli-ikää. Kuvassa 15 C-arvojen vaikutus litiumionikenoihin ilmaistaan hyvin. Purkaminen tapahtuu välillä 0,2 –2C, eli 5–0,5 h välillä. Purkunopeus 0,2C on huomattavasti ideaalisempi kuin 2C. Poikkeuksia ovat kemmiat kuten LTO ja LFP. (J. T. Warner, 2019)

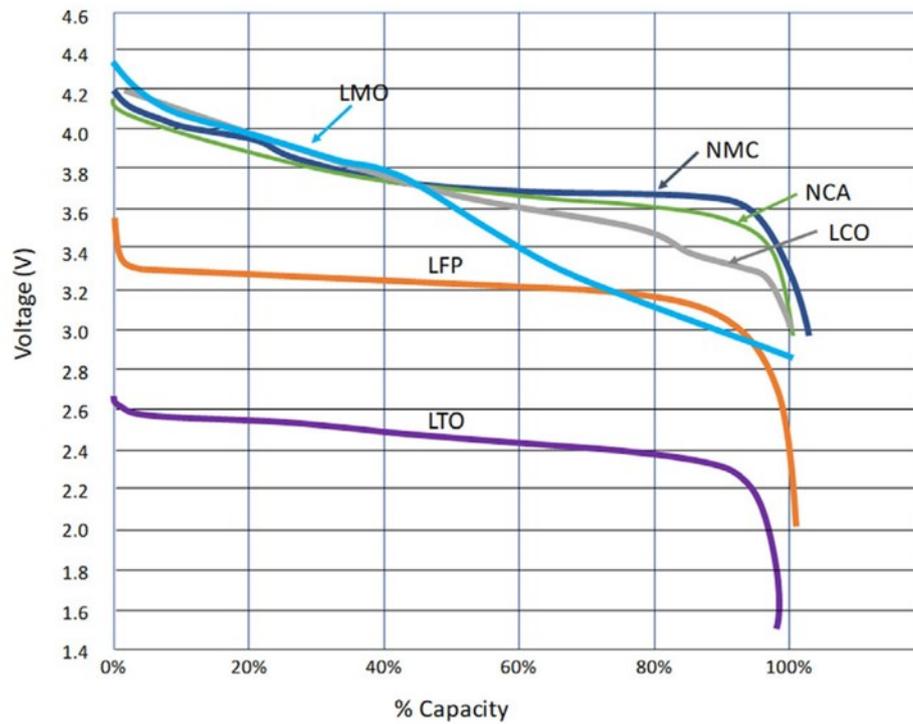


**Kuva 15.** C-arvon vaikutus kennon suoriutumiseen. (J. T. Warner, 2019)

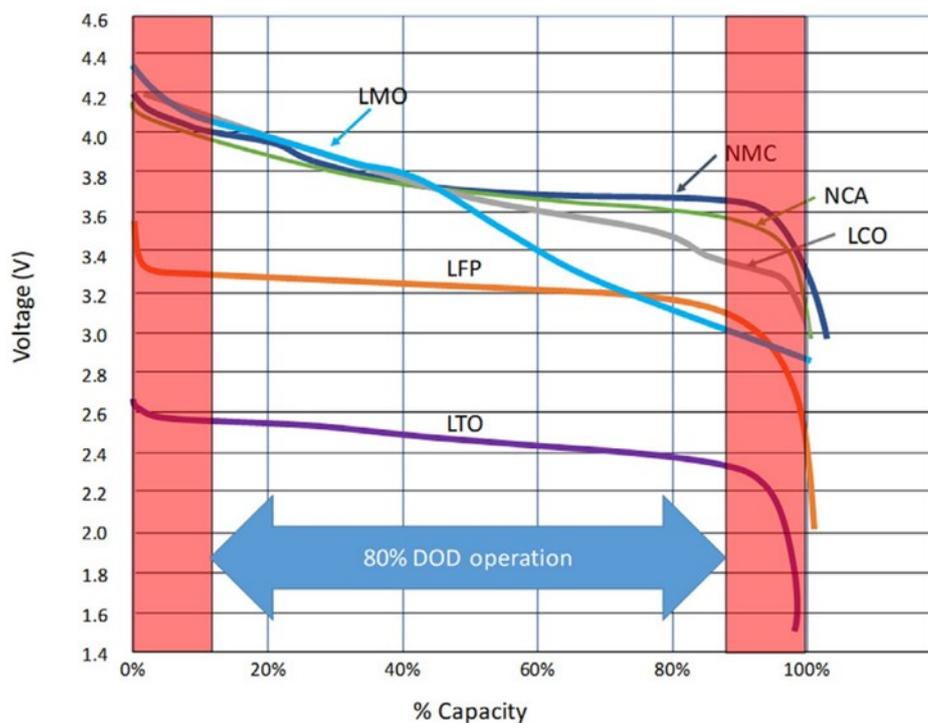
### 6.6.2 Purkukäyrät

Näillä akkukemioilla ovat myös ominaiset purkukäyrät, jotka näkyvät kuvassa 16. LMO, LCO, NMC sekä NCA omaavat aluksi suhteellisen korkean jännitteen väliltä 4,1–4,4 V ja niiden jännite laskee suhteellisen vakaasti purkamisen aikana suunnilleen 3,0 V asti. LMO:lla on suhteellisen vakaa purkukäyrä, kun taas LCO, NMC sekä NCA laskevat lopussa äkillisesti. LFP sekä LTO taas aloittavat alhaisilla jännitteillä ja pysyvät vakaina, kunnes ne saavuttavat minimijännitteensä ja laskevat äkillisesti. Käytön suhteen tasaisen käyrän kemioissa on haastavaa määrittellä niiden SOC-arvo (*state of charge*), koska käyrä on koko ajan tasainen. Kemioissa, joissa on enemmän muutosta, sen määrittely on helpompaa. On tarpeellista huomioida, että litiumioniakkujen sallitut käyttöjännitteet rajoittavat purku- ja latauskäyriä. Eli noin 80 % käyrästä jää käytettäväksi, kun poistetaan jännitealueen alin ja ylin 10%. Kuvassa 17 näkyvät nämä jäljelle jäävät alueet käyristä. Ne edustavat akun kaikkea käytettävää energiaa. Tätä 80 % purkusyvyyttä eli DOD-aluetta pidetään

varsin tarkkana arviona suurimmille osista kemoista. Joissain kemoissa jänniterajat laitetaan 90–95 % välille, mutta yhtään suuremmat jänniterajat ovat turvallisuusriski johtuen syntyvistä kemiallisista reaktioista. (J. T. Warner, 2019)



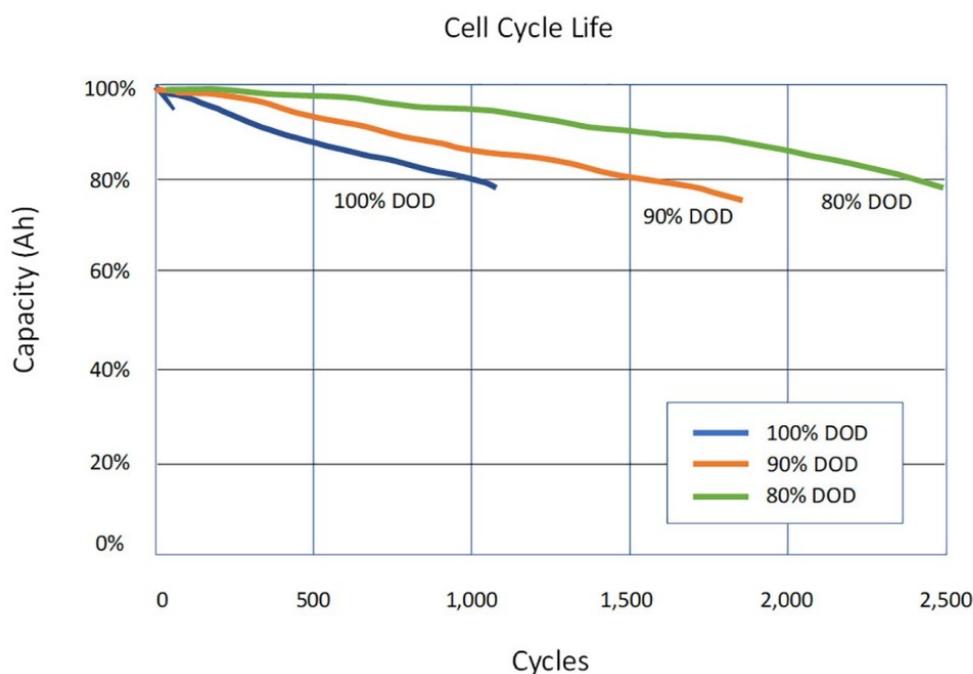
**Kuva 16.** Litiumioniakkukemioiden purukäyrät. (J. T. Warner, 2019)



**Kuva 17.** Litiumioniakkujen purkukäyrät käyttöjännitteissä. (J. T. Warner, 2019)

### 6.6.3 Sykli-iat

Myös sykli-ialla vertaillaan akkukemioiden suorituskykyä. Testien olosuhteet vaikuttavat paljon siihen millaisia mittaustuloksia saadaan. Tämän takia olisi tärkeää nähdä useita mittaustuloksia erilaisissa lämpötiloissa ja C-arvoissa. Lisäksi, vaikka olosuhteet olisivat identtiset, niin mittauslaitteisto vaikuttaa tuloksiin. Myös sykli-ikä mittauksissa huomioidaan jännitteen raja-alueet eli DOD-alueet. Ne vaikuttavat paljon kennon sykli-ikään. Kuvassa 18 näkyy kennon sykli-ikä erilaisissa DOD-alueissa. Jos kennon DOD-alue on 80 %, niin sykli-ikä on huomattavasti pidempi. (J. T. Warner, 2019)



**Kuva 18.** Kennon sykli-ikä erilaisissa purkusyvyyksissä. (J. T. Warner, 2019)

#### 6.6.4 Käyttökohteet

Kaikilla aiemmin mainituista litiumioniakkujen kemioista on selkeästi erottuvia ja erilaisia ominaisuuksia liittyen suorituskykyyn. Näin ollen ne soveltuvat erilaisiin käyttökohteisiin. Jännite on erittäin tärkeä tekijä, kun suunnitellaan suurta järjestelmää. Tämä johtuu siitä, että alhaisemman jännitteen omaavia kennoja tarvitaan enemmän akkupakettiin, jos halutaan saada aikaan suuria jännitteitä. Tällaisia kemioita ovat LTO ja LFP. Useimmiten suuremmissa järjestelmissä, jotka ovat täysin sähköisille käyttökohteille, käytetään mieluummin korkeamman jännitteen akkukemioita. Kääntöpuolena korkealla käyttöjännitteelle on se, että se lyhentää kennojen sykli-ikää, minkä takia joissain sovelluksissa alhaisempi jännite saattaa olla suotavampi. Myös jännitteen suhteen tarkastellaan purkukäyriä, koska ne vaikuttavat käytön aikaiseen jännitteeseen. Sykli-ikä arvioidaan käyttäen 100 % pur-



kusyvyyden tuloksia, minkä jälkeen tehdään tarkempi arvio käyttäen 80 % purkusyvyyttä. Se antaa paremman kuvan siitä, miten kenno suoriutuu käytössä. (J. T. Warner, 2019)

Hybridi- ja sähköajoneuvojen akuilla ovat erilaiset tarpeet ominaisuuksille. Hybridiajoneuvoissa tärkeää olisi, että tehoa on saatavilla. Tämä johtuu siitä, että nämä sovellukset syövät paljon tehoa ja käytössä on paljon pienempi akku. Akkukemiat, kuten LTO ja LFP suoriutuvat hyvin korkeissa purku- ja latausnopeuksissa. Näiden kemioiden tehontiheys on energiatihelyttä parempi, minkä takia ne soveltuvatkin hyvin hybridiajoneuvoihin, jotka eivät vaadi energiatihelyttä samalla tavalla kuin perinteiset sähköajoneuvot. Vaikka näitä kemioita purettaisiin ja ladattaisiin korkeilla nopeuksilla, niiden sykli-ikä on silti erinomainen. Varsinkin LTO soveltuu erittäin hyvin sähköbussseihin, koska sen sykli-ikä on tasaisesti yli 10 000 luokkaa. Sähköbussseissa on käytössä pienempi akku, joka pikaladataan kerran tunnissa. Tämän takia erittäin korkea sykli-ikä on osoittautunut hyödylliseksi. NMC taas soveltuu hyvin sähköajoneuvoihin, koska sillä on korkea energiatihelys sekä suhteellisen korkea sykli-ikä. NMC:n käyttö on yleistymässä johtuen sen energiatihelydestä, suhteellisen alhaisesta hinnasta ja korkeasta jännitteestä. Vaikkakin, sen ominaisuudet eroavat riippuen siitä, missä suhteissa nikkeliä, mangaania ja kobolttia käytetään. Tämän hetken sähköautoissa NCA on yleinen akkukemia, koska se on käytössä Teslan sähköisissä ajoneuvoissa. Kyseessä on hyvin kallis akkukemia, vaikka Tesla onkin onnistunut pitämään hinnat alhaisina. Sen suurin etu on korkea energiatihelys. Sillä on kuitenkin suuria haasteita käytössä: kapasiteetti vähenee erittäin nopeasti korkeissa lämpötiloissa, turvallisuuden lämpötilaraja on alhaisempi sekä sykli-ikä on alhainen. Kuorman hallinta on näin ollen ratkaiseva tekijä NCA-kennoille. Sen ominaisuudet saattavat vaihdella riippuen nikkeli, kobolttin ja alumiinin suhteesta toisiinsa. (J. T. Warner, 2019)

Kun on kyse pienemmistä ja kannettavista sovelluksista, LCO on käytetyin akkukemia tänä päivänä. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi älypuhelimet, kannettavat

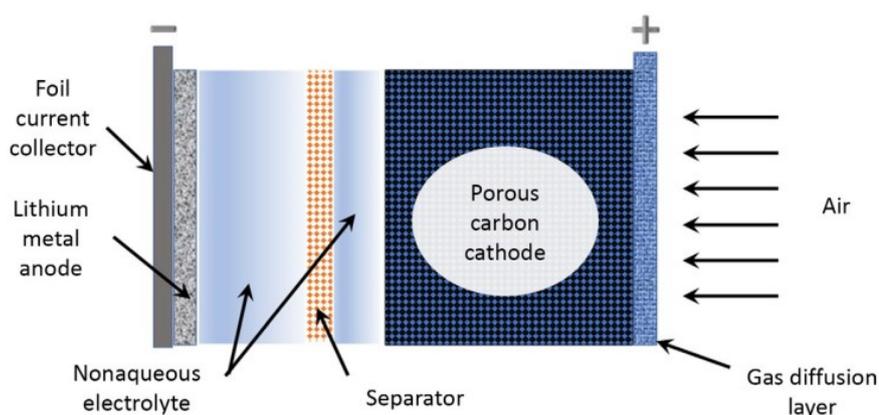
tietokoneet ja tabletit. Se soveltuu niihin erinomaisesti sen korkean energiatiheden, korkean jännitteen ja hyvän sykli-ikänsä takia. LCO ei ole käytössä suuremmissa kohteissa seuraavien syiden takia: se on kallis katodimateriaali, se ei kestä korkeita lämpötiloja sekä sillä on alhaisempi sykli-ikä kuin muilla litiumionikemioilla. Tämä johtuu sen rakenteen epävakaaammasta luonteesta. LMO on käytössä sovelluksissa, joissa kustannukset ja vakaus ovat tärkeimmät tekijät suorituskyvyn suhteen. Mangaanin etu on se, että se on halvempi raakamateriaali sekä ei yhtä myrkyllinen kuin vaihtoehtoiset koboltti ja nikkeli. Sillä on myös korkeampi nimelliskapasiteetti. Haasteita LMO:n käytössä ovat muun muassa seuraavat: alhaisempi kapasiteetti, korkeampi kapasiteetin menetys varastoinnissa ja syklaamisessa sekä huono suorituskyky korkeissa lämpötiloissa. Sen huonojen puolien takia LMO:ta käytetään usein sekaisin muiden kemioiden kanssa. (J. T. Warner, 2019)

#### **6.6.5 Tulevaisuuden kemiat**

Tämän hetken teknologialla tulee olemaan mahdotonta tyydyttää tulevaisuuden tarpeita. Uudet ratkaisut ovat näin ollen tarpeellisia, jotta löydetään paremmat materiaalit, rakennetaan itseohjaavia ja luotettavampia akkujärjestelmiä sekä otetaan huomioon kierrätys jo akkujen kehitysvaiheessa. Tämän hetken trendejä akkukehityksessä ovat seuraavat: kriittisten alkuaineiden korvaaminen ympäristöä säästävillä ja laaja-alaisesti saatavilla olevilla alkuaineilla, anodin kehittäminen muille kuin litiumioniakuille, konversiopohjaiset järjestelmät sekä kiinteän olomuodon akut. (Fichtner ym., 2022)

Myös elektrolyyttejä kehitetään muille kuin litiumioniakuille. Näistä esimerkkejä ovat litium-ilma, litium-rikki sekä kiinteän olomuodon akut. Litium-ilma akulle on kiinnostusta johtuen sen potentiaalisesti erittäin korkeasta energiatihedestä, joka on materiaalitasolla 11 452 Wh/kg. Tämä on hyvin lähellä nestemäisiä polttoaineita kuten bensiini, jonka energiatiheys on 11 860 Wh/kg. (J. T. Warner, 2019) Kennotasolla energiatiheys on luokkaa 500–900 Wh/kg (Alhachami ym., ei pvm.).

Korkea energiatiheys johtuu siitä, että käytetään ilmakehän ilmaa katodina eli anodi on rajoittava tekijä toisin kuin useimmissa akkujärjestelmissä. Se on myös pidempi ikäisempi, omaa tasaisen jännitekäyrän ja on ympäristöystävällisempi kuin osa akkukemioista on. Litium-ilma-akuissa käytetään anodimateriaalina litiummetallia, joka on yhdistetty ilman kanssa käyttäen keraamista komposiittikatodia ja polymeerielektrolyyttiä. Kuvassa 19 on rakennekuva litium-ilma-akusta. Vaikka anodi ja katodi ovat erilaiset kuin litiumioniakuissa tavanomaisesti niin akussa tapahtuu sama pelkistyshapetusreaktio eli se on toiminnallisesti samanlainen. Haasteina käytölle ovat ilmanlaatu, hapen alhainen pitoisuus suurissa korkeuksissa, tehontiheys on suhteellisen alhainen verrattuna litiumioniakkuihin sekä sykli-ikä on vain 50 sykliä. Lisäksi litiummetallin käyttöön liittyvät turvallisuuskysymykset pätevät tässäkin sovelluksessa. (J. T. Warner, 2019)



**Kuva 19.** Litium-ilma-akun rakenne. (J. T. Warner, 2019)

Toinen kiinnostusta herättänyt kohde on litium-rikkiakut johtuen sen mahdollisuudesta lisätä energiatheyttä sekä rikin edullisuudesta ja laaja-alaisesta saatavuudesta. Litium-rikkiakulla on mahdollisesti korkea energiatiheys, joka on 2 500 Wh/kg materiaalitasolla. Kennotasolla energiatiheys on alhaisempi sen ollessa noin 400–600 Wh/kg. Sykli-ikä on myös tutkimuksissa ollut yli 1 500 sykliä. Litium-

rikkiakuissa käytetään anodimateriaalina litiummetallia, katodimateriaalina rikkiyhdistelmää sekä elektrolyytinä orgaanista litiumsulfidielektrolyyttiä. Katodissa tavanomaisesti yhdistetään rikin kanssa grafiitti tai grafeeni. Satunnaisesti voidaan käyttää myös piitä. Litiumionien liike ei ole samanlainen kuin tavanomainen hapeuspelkistysreaktio. Sen sijaan litium-rikki käy läpi monivaiheisen pelkistysprosessin eli se on monimutkaisempi. Haasteita litium-rikkiakuille ovat seuraavat: litium-rikki laajenee toiminnan aikana jopa 80 %, monivaiheinen reaktioprosessi myös aiheuttaa elektrolyytissä epäsuotavia sivureaktioita, kapasiteetin huomattava väheneminen, huono volumetrinen energiatiheys, alhainen johtavuus sekä epävakaus korkeissa lämpötiloissa. (J. T. Warner, 2019)

Kiinteän olomuodon akku tarjoaa tällä hetkellä parhaimman mahdollisuuden kaupallistaa litiumionia sisältämätön akku. Siinä tavanomainen nestemäinen elektrolyytti on korvattu kiinteällä, geelimäisellä materiaalilla tai kiinteägeelilyhdistelmä-materiaalilla. Loput komponentit ovat samankaltaiset kuin muissakin akuissa: anodi, katodi, virrankerääjät ja kotelo. Erottimelle ei ole tarvetta kiinteän elektrolyytin hoitaessa sen tehtävän. Kiinteän olomuodon akulla on seuraavanlaisia hyviä puolia: hyvä energiatiheys, kiinteä elektrolyytti on nestemäistä turvallisempi ja anodimateriaalina on mahdollista käyttää litiummetallia. Energiatiheys on kennotasolla yli 400 Wh/kg (Batteries European Partnership, 2022). Toimintaan liittyen diffuusio tapahtuu erilaisella tavalla kuin nestemäisissä elektrolyyteissä. Litiumionit voivat kulkea kahdella diffuusiomenetelmällä kiinteän elektrolyytin läpi. Toinen on avoin diffuusio, joka tapahtuu litiumionien liikkuessa alkuperäisestä paikasta lähellä olevaan avoimeen sijaintiin. Tämän jälkeen sen alkuperäinen paikka on avoin ja toinen litiumioni siirtyy siihen. Toinen diffuusiomenetelmä on välidiffuusio, jossa litiumionit liikkuvat kristallirakenteen välissä olevaan tyhjään tilaan. Tämän jälkeen diffuusio jatkuu pääosin samalla tavalla kuin avoin diffuusio. Haasteet liittyvät pääosin suuren mittakaavan toteutuksiin. Esimerkiksi se käyttää höyrytysprosessia minkä takia materiaalikerrokset ovat erittäin ohuita. Nämä ohuet kennot eivät myöskään kestäisi minkäänlaista voimaa, vaan tuhoutuisivat. Toinen

mahdollinen haaste on syklaamisen aikana tapahtuva materiaalin tilavuuden laajeneminen. Varsinkin kiinteän olomuodon akuissa tällä voi olla tuhoisia vaikutuksia, ellei materiaalin laajenemista huomioida kennosuunnittelussa. (J. T. Warner, 2019) Kaikkien mainittujen akkukemioiden eli litium-ilma, litium-rikin ja kiinteän olomuodon akun energiatiheddet ja sykli-ikä ovat koottuna taulukossa 4.

**Taulukko 4.** Tulevaisuuden kemioiden energiatiheddet ja sykli-ikä.

Akkukemia	Energiatiheys kennotasolla (Wh/kg)	Sykli-ikä
Litium-ilma	500–900 (Alhachami ym., ei pvm.)	50 (J. T. Warner, 2019)
Litium-rikki	400–600 (J. T. Warner, 2019)	1 500 (J. T. Warner, 2019)
Kiinteän olomuodon akku	400+ (Batteries European Partnership, 2022)	3 000 (Batteries European Partnership, 2022)

## 6.7 Vikatilat

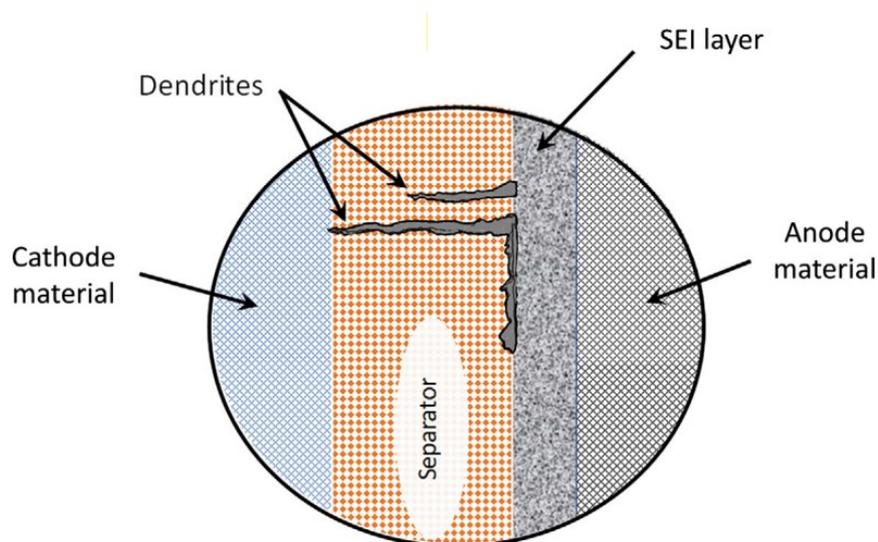
Kolme yleisintä vikatilaa akkukennolle ovat oikosulku, kaasujen muodostuminen tai kasvava impedanssi (J. T. Warner, 2019). Näihin vikoihin voivat johtaa sisäinen tai ulkoinen oikosulku, aktiivisen materiaalin liukeneminen, litiumin pinnoittuminen anodille sekä SEIn kasvaminen. On hyvä huomioida, että vikojen kasaantuminen on yleistä eli ne usein ilmenevät samaan aikaan.

### 6.7.1 Oikosulku

Oikosulkujen suhteen keskitymme pääosin sisäisiin oikosulkuihin, koska nämä liittyvät läheisemmin akkujen kemialliseen toimintaan. On kuitenkin hyvä ymmärtää, että pohjimmiltaan oikosululle on sama syy sekä sisäisissä, että ulkoisissa oikosuluissa. Ne johtuvat siitä, että elektrodit pääsevät kontaktiin toisensa kanssa. Ulkoisessa oikosulussa kontakti tapahtuu johtavan materiaalin yhdistäessä ulkoiset plus- ja miinusnavat toisiinsa. Vaihtoehtoisesti johtava materiaali sijoitettuna kennon sisälle aiheuttaisi myös ulkoisen oikosulun, koska anodi ja katodi voisivat muodostaa sähköisen yhteyden. (J. T. Warner, 2019)

Myös sisäinen oikosulku voi tapahtua monella tavalla. keskitymme kolmeen yleisimpään, jotka ovat seuraavanlaiset: liian korkea lämpötila, litiumin pinnoittuminen anodille sekä epäpuhtaudet kennossa. Lämpötilasta aiheutuva oikosulku liittyy kennojen erottimiin. Tavanomaisesti erottimet ovat valmistettu polyeteelyynistä tai polypropyleenistä taikka näiden yhdistelmästä. Kun kenno saavuttaa 90°C lämpötilan, erottimen huokokset alkavat sulkeutua. Kun saavutetaan 120–130°C, niin erotin alkaa sulaa. Tällöin erottimen kutistuminen aiheuttaa anodin ja katodin kontaktin ja näin ollen oikosulun. Litiumdendriittejä taas voi muodostua syklaamisen aikana eli purkaessa ja ladatessa. Ne muodostuvat, kun anodin päälle alkaa muodostua litiummetallia. Kasvu saattaa johtua siitä, että anodin läheisyydessä voi olla kohtia, joissa ei ole elektrolyyttien suolaa. Nämä kohdat ovat lataukseltaan positiivisempia ja lähellä anodin pintaa. Tämän takia anodin pinnalla olevat töyssyt ja epätäydellisyydet ovat potentiaalinen paikka litiumin pinnoittumiselle. Kasvun jatkuessa se muodostuu eräänlaiseksi pylvääksi anodin ja katodin välille. Se saattaa jopa läpäistä erottimen muodostaen näin yhteyden anodin ja katodin välille. (J. T. Warner, 2019) Kuvassa 20 dendriittien muoto ja sijainti näkyy hyvin (**Kuva 20**). Dendriittien tapauksessa kaikki kennon energia kulkee tämän pienen pisteen kautta aiheuttaen kennon vikatilaa, tuottaen lämpöä sekä mahdollisesti sytyttäen elektrolyytin palamaan. (J. T. Warner, 2019) Litiumin pinnoittumiseen

liittyvät oikosulut ilmenevät usein, kun kennoa ladataan korkealla virralla. (J. T. Warner, 2019)



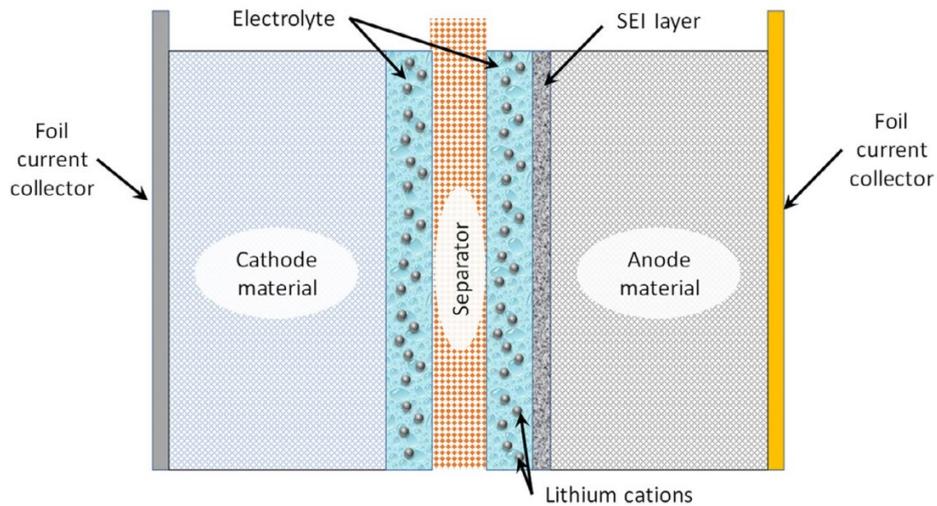
**Kuva 20.** Litiummetallista muodostuneet dendriitit. (J. T. Warner, 2019)

Epäpuhtauksia kennoon saattaa päätyä valmistusprosessin aikana. Esimerkiksi vuonna 2006 Sony Corporationien kannettavissa tietokoneissa ilmeni ongelmia johtuen nikkelistä kennoissa. Kennoissa käytettiin nikkeli-päällysteistä koteloa, josta irtosi nikkeliä kannen kiinnityksen aikana. Kansi kiinnitettiin puristamalla, mikä aiheutti pienten nikkeli-partikkelien irtoamisen kennojen sisälle. Tavanomaisesti kennojen valmistajat ovat erittäin tarkkoja siitä, että kennot kootaan puhtaissa ja kuivissa sisätiloissa. Lisäksi kosteutta, partikkelikokoa ja -määrää tarkkaillaan läheisesti. Käytettävät huoneet saavat puhtaudelle luokituksen sen perusteella, kuinka paljon eri kokoisia hiukkasia on per kuutiometri. Jos elektrodit kasataan kennoihin puhtaissa huoneissa, riski epäpuhtauksille vähenee huomattavasti. (J. T. Warner, 2019)

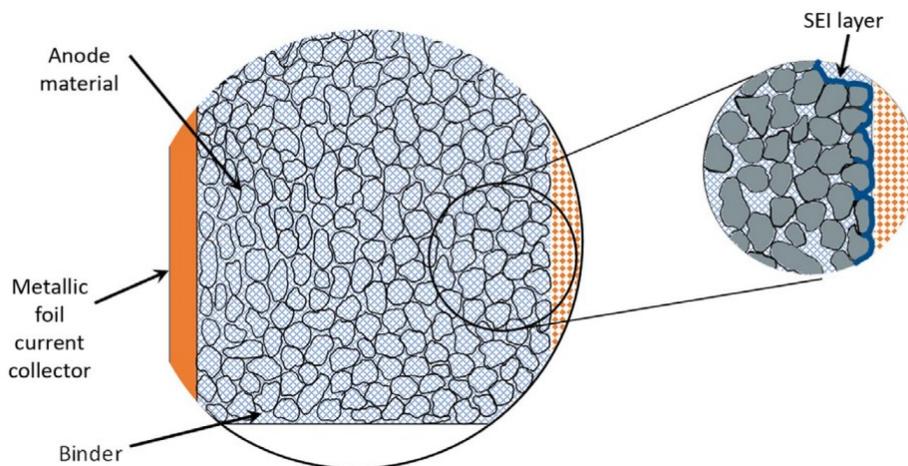
### 6.7.2 SEI-kerros

SEI-kerros tarkoittaa kiinteää kerrosta, joka muodostuu anodin pinnalle. Se muodostuu ensimmäisen lataus- ja purkamisjakson aikana. Tätä kutsutaan muodostumisprosessiksi. Kuvassa 21 voidaan nähdä muodostuneen SEI-kerroksen sijainti kennossa. Kuvassa 22 on todenmukaisempi kuvaus SEI-kerroksen rakenteesta anodimateriaalin päällä. SEI on todellisuudessa varsin ohut kerros elektrolyytin ja anodin molekyylin välillä. Muodostuva kerros koostuu pääosin litiumioneista, jotka muodostavat pysyviä sidoksia anodin molekyylin kanssa. Tarkemmin sanottuna SEI-kerroksessa on kuitenkin yhdistelmä materiaaleja. Esimerkkinä näistä ovat elektrolyytissä olevat epäpuhtaudet, elektrolyytin suolat sekä elektrolyytin liuottimet, jotka ovat pelkistyneet tai hajonneet. SEI-kerrokseen sitoutuvat litiumionit eivät ole enää käytettävissä aktiivisena litiumina eli ensimmäisten syklien aikana menetetään kapasiteettia pysyvästi. Kapasiteettia saatetaan menettää jopa 10 % alkuperäisestä. Se myös hankaloittaa aktiivisten litiumionien virtausta elektrodien välillä. SEI-kerroksen paksuuden määrittelee se, kuinka kauan kennot ovat muodostumisprosessissa. Luontaisesti paksumpi kerros hankaloittaa entisestään litiumionien virtausta ja näin ollen lyhentää kennon käyttöikä. (J. T. Warner, 2019)





**Kuva 21.** SEI-kerroksen sijainti kennossa. (J. T. Warner, 2019)



**Kuva 22.** Todenmukaisempi kuvaus SEI-kerroksesta. (J. T. Warner, 2019)

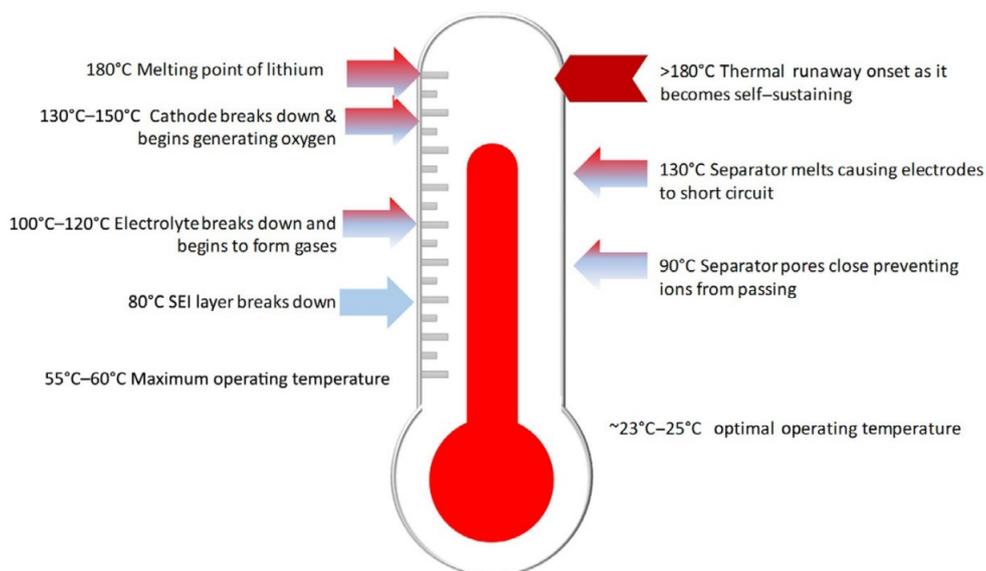
SEI-kerroksen kehittäminen on tarkasti valvottua sekä usein kennovalmistajien tarkasti varjeltu salaisuus. Tavoitteena on saada aikaseksi mahdollisimman vakaa SEI. Kennovalmistajilla on usein eriävät varausvirrat johtuen kemioiden eroavaisuuksista. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että muodostumisprosessin lataus ja

purku toteutetaan erittäin hitaasti tai erittäin alhaisella C-arvolla. SEI-kerroksen muodostumisnopeudella voidaan määritellä sen paksuus. Tavanomaisesti latausvirta väliltä 0,05C–0,2C saa aikaseksi suotuisamman SEI-kerroksen. Korkeammat C-arvot muodostavat vähemmän vakaan SEI-kerroksen sekä vähentävät kapasiteettia. Epävakaas johtuu siitä, että kerros olisi liian ohut ja näin ollen alttiimpi halkeilulle. Halkeamat tulisi täyttää uudella SEI-kerroksella, joka vähentäisi entistään kapasiteettia, koska se käyttäisi lisää aktiivista litiumia. Vaikka muodostumisprosessi onkin pääasiallinen tekijä SEIn muodostumisessa, niin useimmiten se jatkaa muodostumistaan seuraavissakin sykleissä, kunnes se pääosin pysyvä. Näissä sykleissä lataus- ja purkunopeudet sekä lämpötilat ovat eroavia ensimmäisestä syklistä. Tämän takia useat valmistajat toteuttavat kaksi muodostumisprosessia. Ensimmäisellä luodaan SEI-kerros ja toisella edesautetaan lopullisen paksuuden asettamista sekä kapasiteetin, jännitteen ja impedanssin määrittelyä. Ensimmäisen ja toisen muodostumisprosessin välissä tehdään kaasunpoisto litiumionikennoon, koska SEIn muodostuminen tuottaa jonkin verran kaasuja kemiallisten reaktioiden sivutuotteena. Sama kaasunpoistoprosessi tehdään myös ennen kennojen sinetöintiä, jotta sivureaktiot eivät lyhennä kennojen elinikää. (J. T. Warner, 2019)

SEI-kerros on mielenkiintoinen ominaisuuksiltaan, koska se on sähköä eristävä, mutta ioneja johtava. Toisin sanoen se sallii litiumionien kulkea sen läpi, mutta estää elektronien liikkumisen sen läpi. Näin ollen se jopa suojaa akkua oikosululta pitäen toimintaa samalla yllä. Tämä on mahdollista, koska se eristää anodin kokonaan katodilta ja elektrolyyttiltä, mutta sallii litiumionien liikkeen edestakaisin, jotta sähkövirta saadaan aikaiseksi. Suositeltavia ominaisuuksia SEI-kerrokselle ovat myös sopiva paksuus, suuri lujuus, tilavuuden muutoksien kestäminen, liukenemattomuus elektrolyyttiin muodostumisprosessin jälkeen sekä vakaus laajalla lämpötila- ja jännitealueella. Sen tulee myös peittää koko alue anodimateriaalin ja elektrolyytin välillä. Muuten aktiivista litiumia menetetään käytön aikana lisää ja kaasuja saattaa alkaa muodostua sivutuotteena. Molemmilla saataisiin akku käyttökelpottomaksi normaalia nopeammin. (J. T. Warner, 2019)

### 6.7.3 Lämpötilan karkaaminen

Lämpötilan karkaaminen on erittäin vaarallinen vikatila, joka voi ilmetä akuissa. Tällöin kennossa on saavutettu tarpeeksi korkea lämpötila, että sen kasvu jatkuu itsestään. (J. T. Warner, 2019) Kuvassa 23 on nähtävissä lämpötilan nousun vaikutus kennoon. On hyvä huomioida, että nämä lämpötilat ovat vain arvioita, koska ne ovat riippuvaisia sekä kennon kemiasta että suunnittelusta (J. T. Warner, 2019). On siis mahdollista, että lämpötilan karkaaminen alkaa tapahtua alhaisemmissa tai korkeammassa lämpötiloissa. (J. T. Warner, 2019)



**Kuva 23.** Lämpötilan vaikutus kennon toimintaan. (J. T. Warner, 2019)

Toiminnan optimaalinen lämpötila on 23–25°C luokkaa ja maksimilämpötila käytölle on 55–60°C. Tästä eteenpäin lämpötilat ovat liian korkeita. Lämpötilan ollessa 80°C, SEI-kerros alkaa hajota ja tämä reaktio tuottaa lisää lämpöä. Kun saavutetaan 100–200°C, niin myös elektrolyytti alkaa hajota lämpöä vapauttavana reaktiona. Tämä tuottaa sivutuotteena erilaisia kaasuja kennon sisälle. Kaasut vaihtelevat riippuen kennon kemiasta. Tavanomaisesti näitä kaasuja ovat hiilimonoksidi,

hiilidioksidi, etaani, metaani, etyleeni sekä vety. Kun lämpötila saavuttaa 120–130°C välin, niin erotin sulaa ja tällöin anodi ja katodi pääsevät kontaktiin toistensa kanssa. Tämä aiheuttaa sisäisen oikosulun ja muodostaa vielä ennestään lisää lämpöä. Lämpötilavälillä 130–150°C katodi alkaa hajota vapauttaen lisää lämpöä. Kyseessä on erittäin paljon lämpöä vapauttava reaktio, joka myös tuottaa happea sivutuotteena. Happi saa kennon palamaan ja syttymään tuleen yhdessä elektrolyytin kanssa. Lämpötiloissa 150–180°C tämä reaktio alkaa ylläpitää itseään, ellei kennon lämmön tuottoa saada lopetettua. Tässä kohtaa on saavutettu lämpötilan karkaaminen, koska hapen tuotanto tekee palamisesta itseään ylläpitävän. Lisäksi kaasujen muodostuminen saattaa aiheuttaa sen, että kenno murtuu taikka purkaa ulos syttyvät kaasut ja elektrolyytit. Jopa räjähdys on mahdollinen, jos elektrolyyttiin ja kaasuille syötettäisiin kipinä. Toisaalta, jos paineen kasvu jatkuu, niin kenno voi myös haljeta ja tulla ulos kotelosta. (J. T. Warner, 2019)

## 6.8 Kennon ikääntyminen

Akun ikääntymiseen vaikuttaa monta tekijää eli on vaikea määritellä akulle tarkkaa lopullista ikää. Litiumioniakut voidaan jakaa kahdentyyppiseen ikääntymiseen: sykli-ikä sekä kalenteri-ikä. Sykli-ikä voidaan määritellä lataus- ja purku syklien määrällä. Sykli-ikään vaikuttavat erilaiset purkaussyvyyydet, eli kuinka paljon akku tyhjennetään kerralla sekä toiminnan aikainen lämpötila. Näin ollen sykli-ikä vaihtelee erittäin paljon riippuen purku- ja latausprofiilista. Kalenteri-ikä määritellään tarkastelemalla akun kapasiteetin suhdetta alkuperäiseen kapasiteettiin. Kennon annetaan olla käyttämättömänä kuukausista vuosiin tasaisessa lämpötilassa. Kapasiteetti mitataan ennen ja jälkeen säilytyksen. Yleisesti ottaen sykli-ikää pidetään tärkeämpänä määrittelijänä kennon iälle, mutta kuten mainittu, se on erittäin riippuvainen käytöstä, lämpötilasta, lataamisen ja purkamisen nopeudesta sekä purkussyvyydestä. Myös muut tekijät vaikuttavat sykli-ikään, mutta edellä mainitut ovat tärkeimpiä. Kennon sisäisistä tekijöistä suurin vaikutus on SEI-kerroksella. Muita sisäisiä tekijöitä ovat katodin ja anodin rakenteen muutokset, elektrolyytin

hajoaminen sekä aktiivisen materiaalin liukeneminen elektrolyyttiin. Lämpötila nopeuttaa suuresti kaikkia ikääntymismekanismeja. (J. T. Warner, 2019)

### 6.8.1 Lämpötila

Iso tekijä akun ikääntymiselle on lämpötila. Se vaikuttaa myös akun suorituskykyyn huomattavasti. Esimerkiksi yksi korkean lämpötilan vaikutus on, että katodin rakenne sekä olomuoto alkaa muuttua. Tämä vaikuttaa negatiivisesti ionien interkalatioon syklien aikana, koska katodin rakenne voi muuttua kerrosmaisesta spinelliiksi. Eli kerrokset romahtavat ja rakenne alkaa muistuttaa enemmän spinelliä. Tämä vähentää latausnopeutta sekä lyhentää sykli-ikää. Lisäksi on myös vakavampia seuraamuksia, kuten aiemmin mainittu lämpötilan karkaaminen. Alhaiset lämpötilat saavat aikaan sen, että elektrolyytin ioninen johtavuus laskee, minkä takia ionien on vaikeampaa liikkua anodin ja katodin välillä. Voidaan sanoa, että mitä alhaisempi lämpötila sen alhaisempi johtavuus. Kun lämpötila on 0°C, niin purku ja lataus alkaa olla vaikeampaa. Lämpötilan ollessa -10°C lataus tulee keskeyttää ja purun nopeutta vähentää. Kun lämpötila on -20°C, niin lataus tulee lopettaa eikä purkaminen välttämättä ole mahdollista. Tämä johtuu ionisen johtavuuden liiallisesta laskusta. Alhaisissa lämpötiloissa ilmenee myös ongelma litiumin pinnoittamisen kanssa. Lämpötilan lasku aiheuttaa sen, että litium ei pysty menemään anodin sisälle kunnolla. Sen sijaan se pinnoittuu anodin pinnalle. Tällöin kapasiteetti laskee ja muodostuneet litiumdendriitit ovat riski oikosululle. Liiallinen lämpötilan nousu taas aiheuttaa jo aiemmissa kappaleissa mainittujen komponenttien, kuten SEI-kerroksen, erottimen ja katodin hajoamisen sekä lämpötilan karkaamisen. Tässä kohtaa on hyvä huomioida, että maksimilämpötiloissakin toiminta on haitallista kennoille, vaikka oltaisiinkin turvallisuusrajan alapuolella. Kennon jatkuva toiminta 45–50°C välillä aiheuttaa myös katodin hajoamisen ja kennon kaasuuntumisen, mutta huomattavasti hitaammin. Kennon sykli-ikä laskee erittäin paljon maksimikäyttölämpötiloissa. Vaikka optimaalista korkeampi lämpötila voi hetkellisesti lisätä kapasiteettia, niin kyse on aina lyhytaikaisesta vaikutuksesta. Enemmän tai

myöhemmin kenno päätyy vikatilaan liian korkeissa lämpötiloissa. (J. T. Warner, 2019)

### **6.8.2 Impedanssi**

Kennolle kehittyy pikkuhiljaa sisäinen impedanssi sen elinkaaren aikana. Impedanssi tarkoittaa ionien, elektronien ja virran resistanssia. Käytännössä mitä korkeampi impedanssi on, sitä vaikeampaa litiumionien liikkuminen on. Se voidaan jakaa kolmeen osatekijään: elektrolyytin ioninen resistiivisyys, aktiivisten materiaalien sähköinen resistanssi sekä kosketinresistanssi aktiivisten materiaalin ja virrankerääjien välillä. Nämä kolme osatekijää yhdistyvät kennon sisäiseksi impedanssiksi. Impedanssin vaikutus akun toimintaan voidaan nähdä alhaisempana jännitteenä. Tämä johtuu siitä, että korkean impedanssin kanssa litiumionien liike syö enemmän energiaa lämmön muodossa. Impedanssin kasvamisen voi aiheuttaa akun toiminta liian korkeissa tai alhaisissa lämpötiloissa ja/tai SEI-kerroksen kasvaminen. Sen vaikutus nähdään erityisesti alhaisissa lämpötiloissa, koska tällöin elektrolyytin ioninen johtavuus on muutenkin alhaisempaa. Lisäksi SEI-kerroksen kasvaminen syö aktiivista litiumia, joka pinnoittuu anodin SEI-kerroksen päälle. Tämä vähentää hapetuspelkistysreaktioiden pinta-alaa sekä kapasiteettia. Näin ollen akku kestää pikkuhiljaa vähemmän ja vähemmän latausten jälkeen. Tämä ilmiö johtuu nimenomaan impedanssin kasvamisesta. Sen vaikutus on kennon elinikään, eikä johda kennon katastrofisiin kennon vikatilanteisiin. (J. T. Warner, 2019)

### **6.8.3 Ylilataaminen ja ylipurkaminen**

Akun purkaminen on sille luontainen tila, minkä takia lataamiseen tarvitaan ulkoinen virtalähde. Syitä ylilataamiselle voivat olla latausjärjestelmän vikatila tai huonosti suunniteltu akun hallintajärjestelmä. Mahdollinen syy on myös se, että sarjaan kytketyistä kennoista yhdellä on suurempi tai pienempi sisäinen resistanssi. Syynä voi olla esimerkiksi kennon sijainti akkupaketissa tai marginaaliset erot tuo-

tannossa. Tällöin tämä yksittäinen kenno saattaa ylilatautua verrattuna ympäröiviin kennoihin, mikä aiheuttaa vikatilan ja mahdollisen lämpötilan karkaamisen. Kennon kemialla on suuri vaikutus siihen, missä jännitteessä kenno ylilatautuu. Ylilataus alkaa, jos ylitetään ohjeistetut käyttöjännitteet. Seuraavien kemioiden käyttöjännite on 4,2 V: NMC, NCA, LCO ja LMO. LFP-kennoilla maksimijännite on taas 3,6 V sekä LTO-kennoilla 2,8 V. Ylilataamisen seuraamukset liittyvät suoraan siihen, kuinka kauan kennoa on yliladattu sekä kuinka pitkään ylilataaminen on kestänyt. Suurin osa kennoista kestää ylilatausta silloin tällöin pienissä määrissä. Tällöin vaikutus kennon sykli-ikään ja suoritukseen on minimaalinen. (J. T. Warner, 2019) Ensimmäisiä merkkejä ylilataamisesta on anodin ja katodin epätasainen kapasiteetti. Ladatessa katodilta siirretään litiumionit anodille eli ylilataamisessa tyhjennetään katodia liikaa. Tämä johtaa katodimateriaalin hajoamiseen, koska sen rakenne sortuu ollessaan liian tyhjä litiumioneista. (Wu, 2015) Jos kennoa jatkuvasti yliladataan, niin päädytään lopulta lämpötilan karkaamiseen (J. T. Warner, 2019).

Myös kennon huomattavalla ylipurkamisella on negatiivisia vaikutuksia kennon sykli-ikään, suorituskyykyyn sekä turvallisuuteen. Syitä ylipurkamiselle on monta. Esimerkiksi kenno voi jatkaa purkautumista riittämättömän jännitteen säädön tai väärän alajännitteen takia sekä pitkäaikaisessa varastoinnissa itsepurkautuminen voi johtaa ylipurkautumiseen. Kennon kemia jälleen vaikuttaa siihen, kuinka altis se on ylipurkautumiselle. NMC-kennon toimintajännite on 2,5–4,2 välillä. Tämä tarkoittaa sitä, että vasta kun alitetaan 2,5 V, niin puhutaan ylipurkamisesta. Kun taas esimerkiksi LTO-kennossa ylipurkaminen alkaa vasta 1,5 V kohdalla. Ylipurkautuminen aiheuttaa kapasiteetin pysyvän laskemisen sekä mahdollisen sisäisen oikosulun. (J. T. Warner, 2019) Taulukossa 5 on nähtävissä litiumioniakkukemioiden minimi- ja maksimijännitteet.

**Taulukko 5.** Akkukemioiden minimi- ja maksimijännitteet. (J. T. Warner, 2019)

Akkukemia	Minimijännite	Maksimijännite
LCO	3,0	4,2
LFP	2,5	3,6
LMO	2,5	4,2
LTO	1,5	2,8
NCA	3,0	4,2
NMC	2,5	4,2

## 6.9 BMS-järjestelmä

Litiumioniakut ovat käytössä suhteellisen hauraita, kun niitä verrataan esimerkiksi lyijyakkuihin (Braun ym., 2018). Niiden korkea energiatiheys tekee niistä epävaakaampia lämpötilojen suhteen (Li ym., 2020). Suurimmat tekijät turvallisuushuolille ovat lämpötila, jännite, virta, mekaaninen vahingoittuminen ja saastuminen valmistuksen aikana (Cortajarena ym., 2021). Varsinkin sähköautoissa akkujen vaurioitumista on haastavaa välttää, koska aina on esimerkiksi kolarin uhka, mikä vaurioittaisi akkua (Li ym., 2020). Näin ollen edistynyt valvonta on tarpeen, jotta käyttö olisi turvallista. Tämän vuoksi akuissa on käytössä akunhallintajärjestelmä eli BMS-järjestelmä (Braun ym., 2018). Kyseessä on sähköinen hallintajärjestelmä, joka valvoo ja suojelee akkua sen toiminnan aikana. Näin vältytään sähköllisiltä ja lämpötilallisilta väärinkäytöiltä. Jos käyttöön liittyy turvallisuusriskejä, niin BMS-järjestelmä katkaisee akun virran. BMS-järjestelmä koostuu BMS-orjayksiköistä jokaisessa moduulissa, BMS-mestariyksiköstä sekä tehon valvonta- ja katkaisuyksiköstä eli PMDU-yksiköstä. BMS-orjat lähettävät tietoa moduuleista BMS-mesta-



rille, joka prosessoi datan ja kontrolloi BMS-orjia tekemään tarvittavat toimenpiteet. BMS-mestari kontrolloi myös PMDU-yksikköä, jossa sijaitsee kontaktori, joka yhdistää tai katkaisee yhteyden akkua käyttävään sovellukseen, sekä sulakkeet ja esilatauspiiri. (Cortajarena ym., 2021) BMS-järjestelmän monimutkaisuus riippuu täysin missä sovelluksessa akkua käytetään. Esimerkiksi puhelimen akuissa se mittaa jännitteen suuruutta, lämpötilaa ja virtaa. Se käyttää yksinkertaisia menetelmiä arvioimaan näitä tekijöitä. Sähköautoissa taas näiden perusominaisuuksien lisäksi pitää pystyä arvioimaan kuinka paljon toimintamatkaa jäljellä olevasta energiasta saadaan irti. (Braun ym., 2018)

Jotta BMS-järjestelmä takaa akun turvallisuuden, se mittaa jatkuvasti jännitettä, virtaa ja lämpötilaa (Abdussami ym., 2021). Näiden arvojen ylittäessä turvarajat se katkaisee akun virran (Braun ym., 2018). Näin voidaan säästyä katastrofaalisilta vikatiloilta kuten oikosulku, joka usein liittyy läheisesti suuriin lämpötilamuutoksiin (Cortajarena ym., 2021). BMS-järjestelmä myös parantaa akun suoriutumiskykyä samalla kun se huomioi turvallisuusriskit (Abdussami ym., 2021). Esimerkiksi BMS-orjat tasapainottavat kennojen epätasapainoja niiden kennojen tasapainotusvirtapiireillä. Epätasapainoja esiintyy muun muassa, jos akun kennot eivät ole tasaisesti ladattuja tai niiden maksimikapasiteetit eroavat toisistaan. Kennojen epätasapaino aiheuttaa yli- ja alilataamista sekä estävät akun koko kapasiteetin hyödyntämisen. Näin ollen BMS-järjestelmässä sijaitsee kennojen tasapainotusvirtapiirejä ja tasapainotusalgoritmi. (Cortajarena ym., 2021)

## 7 POHDINTA

Akkusektori on erittäin nopeasti kasvava tekniikan ala ja näin ollen vaatii myös kasvavissa määrin osaavia työntekijöitä. Työntekijöiden tarve ulottuu sekä päteviin asiantuntijoihin että tuotannon työntekijöihin. Suomessa sektorin kasvu on nähtävissä varsinkin Vaasassa ja suunnitellussa GigaVaasa-hankkeessa. Työntekijöiden tarve luo tarpeen myös koulutusohjelmille ja nämä koulutusohjelmat vaativat opettajia, jotka ymmärtävät vähintään akkujen perusteet. Tämän takia juuri VAMIAssa tullaan järjestämään koulutuspäivä opettajille, joilla on jo edeltävät koulutukset tekniikan alalta. Samankaltaisia koulutusmenetelmiä tullaan varmasti näkemään enemmänkin tulevaisuudessa. Varsinkin työvoiman uudelleen koulutus sekä taitojen lisääminen tulevat olemana etualalla. Esimerkiksi ajoneuvosektorin työntekijöitä olisi mahdollista uudelleen kouluttaa sähköisten ajoneuvojen sektorille. Ohjelmien räätälöinti riippuu työvoiman aiemmasta koulutuksesta ja on näin ollen erityisen tärkeää. Aiempi osaaminen vaikuttaa paljon siihen, kuinka yksityiskohtiin voidaan mennä koulutuksen aikana. Tässä koulutuspäivässä tavoitteena on ollut koko akkujen arvoketjulle tarpeellinen tieto. Nämä tiedot kiteytyvät akkujen toiminnan ja ominaisuuksien ymmärtämiseen. Erityisesti litiumioniakkujen sen ollessa hallitseva akkukemia maailmalla. Yleisesti ottaen oppimateriaaleja laatiessa olisi siis ensisijaisen tärkeää huomioida seuraavat tekijät: koulutettavien aiempi osaaminen, pidettävän koulutuksen laajuus sekä aihealueen selkeä rajaus.

## LÄHTEET

- Abdussami, M. R., Gabbar, H. A., & Othman, A. M. (2021). Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards. *Technologies*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/technologies9020028>
- Ahlbrecht, K., Ebert, S., Hettesheimer, T., Neef, C., & Thielmann, A. (2021). *Future expert needs in the battery sector*. <https://eitrawmaterials.eu/wp-content/uploads/2021/03/EIT-RawMaterials-Fraunhofer-Report-Battery-Expert-Needs-March-2021.pdf>
- ALBATTs. (2020). *Intelligence in Battery Sector*. [https://www.project-albatts.eu/Media/Publications/9/Publications\\_9\\_20201211\\_85443.pdf](https://www.project-albatts.eu/Media/Publications/9/Publications_9_20201211_85443.pdf)
- ALBATTs. (2021). *Sectoral Skills Intelligence and Strategy*. [https://www.project-albatts.eu/Media/Publications/35/Publications\\_35\\_20211203\\_10553.pdf](https://www.project-albatts.eu/Media/Publications/35/Publications_35_20211203_10553.pdf)
- Alhachami, F. R., Altimari, U. S., Kadhim, M. M., Kianfar, E., Mahmoud, Z. H., Mustafa, Y. F., Raya, I., Suryatna, A., & Thangavelu, L. (ei pvm.). A Review of High-Energy Density Lithium-Air Battery Technology: Investigating the Effect of Oxides and Nanocatalysts. *Journal of Chemistry*, 2022(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/2762647>
- Allen, M., Crandon, L., Gaines, L., Koetje, K., Lerner, M., Reed, L., Sirisaksoontorn, W., & Sloop, S. (2020). A direct recycling case study from a lithium-ion battery recall. *Sustainable Materials and Technologies*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00152>
- Amin, R., Belharouak, I., Essehli, R., Muralidharan, N., & Nisar, U. (2021). Valuation of Surface Coatings in High-Energy Density Lithium-ion Battery Cathode Materials. *Energy Storage Materials*, 38, 309–328. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.03.015>

- Andrea, D. (2020). *Lithium-Ion Batteries and Applications : A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, from Toys to Towns* (1. p., Vsk. 1). Artech House.
- ANE. (2022). *Competences for a sustainable future*. [https://www.vfi.is/media/utgafa/ANE-Report\\_Competerences-for-a-Sustainable-Future\\_online.pdf](https://www.vfi.is/media/utgafa/ANE-Report_Competerences-for-a-Sustainable-Future_online.pdf)
- Batteries European Partnership. (2022, lokakuuta 28). *The case for solid-state batteries*. <https://bepassociation.eu/the-case-for-solid-state-batteries/>
- Braun, T., Knips, M., Lelie, M., Nordmann, H., Ringbeck, F., Sauer, D. U., & Zappen, H. (2018). Battery Management System Hardware Concepts: An Overview. *Applied Sciences*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/app8040534>
- Budde-Meiwes, H., Drillkens, J., Kowal, J., Lunz, B., Muennix, J., Rothgang, S., & Sauer, D. U. (2013). A review of current automotive battery technology and future prospects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227, 761–776. <https://doi.org/10.1177/0954407013485567>
- Business Finland, Business Sweden, & Innovation Norway. (2023). *The Nordic Battery Value Chain*. <https://www.eba250.com/wp-content/uploads/2023/02/NordicBatteryReport.pdf>
- Business Sweden. (2021). *Den nordiska batterivärdekedjan*. [https://www.energi-myndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/affu/dokument/energi-myndigheten\\_den-nordiska-batteriervardekedjan\\_del-1\\_final-rapport\\_2021-02-24.pdf](https://www.energi-myndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/affu/dokument/energi-myndigheten_den-nordiska-batteriervardekedjan_del-1_final-rapport_2021-02-24.pdf)
- Chen, M., He, Y., Liu, J., Wang, J., & Yuen, R. (2017). Study of the fire hazards of lithium-ion batteries at different pressures. *Applied Thermal Engineering*, 125, 1061–1074. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.131>

- Chen, Z., Gao, H., Jiao, B., Tan, D. H. S., Yu, X., & Xu, P. (2023). A Materials Perspective on Direct Recycling of Lithium-Ion Batteries: Principles, Challenges and Opportunities. *Advanced Functional Materials*, 33(14). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adfm.202213168>
- Cortajarena, J. A., Crego, J., Garmendia, M., & Marcos, D. (2021). Functional Safety BMS Design Methodology for Automotive Lithium-Based Batteries. *Energies*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/en14216942>
- Dai, Q., Gaines, L., Gillard, S., & Vaughey, J. T. (2021). Direct recycling R&D at the recell center. *Recycling*, 6(2). <https://doi.org/10.3390/recycling6020031>
- Fichtner, M., Edström, K., Ayerbe, E., Berecibar, M., Bhowmik, A., Castelli, I. E., Clark, S., Dominko, R., Erakca, M., Franco, A. A., Grimaud, A., Horstmann, B., Latz, A., Lormann, H., Meeus, M., Narayan, R., Pammer, F., Ruhland, J., Stein, H., ... Weil, M. (2022). Rechargeable Batteries of the Future—The State of the Art from a BATTERY 2030+ Perspective. *Advanced Energy Materials*, 12(17). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aenm.202102904>
- Fossil Free Sweden. (2020). *Startegy for fossil free competitiveness*. [https://fossil-frittsverige.se/wp-content/uploads/2021/11/Biostrategi\\_ENG.pdf](https://fossil-frittsverige.se/wp-content/uploads/2021/11/Biostrategi_ENG.pdf)
- Jacoby, M. (2019, heinäkuuta 14). *It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries*. C&EN. <https://cendev.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>
- Jiao, N. (2019, syyskuuta 13). *Post-Vehicle Value of Retired Electric Vehicle Batteries*. IDTechEx. <https://www.idtechex.com/en/research-article/post-vehicle-value-of-retired-electric-vehicle-batteries/18058>
- Li, H., Li, J., Ma, S., Sun, F., & Xiong, R. (2020). Toward a Safer Battery Management System: A Critical Review on Diagnosis and Prognosis of Battery Short Circuit. *iScience*, 23(4). <https://doi.org/10.1016/j.isci>

- Maiser, E. (2014). Battery packaging - Technology review. *AIP Conference Proceedings*, 1597, 204–218. <https://doi.org/10.1063/1.4878489>
- Northvolt. (2023, lokakuuta 19). *Career*. Northvolt. <https://northvolt.com/career/>
- Placek, M. (2017, huhtikuuta). *Projected battery costs as a share of large battery electric vehicle costs from 2016 to 2030*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/797638/battery-share-of-large-electric-vehicle-cost/>
- Tesla. (2020). *Impact Report 2020*. [https://www.tesla.com/ns\\_videos/2020-tesla-impact-report.pdf](https://www.tesla.com/ns_videos/2020-tesla-impact-report.pdf)
- Työ- ja elinkeinoministeriö. (2021). *Kansallinen akkustrategia 2025*. Työ- ja elinkeinoministeriö. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162684/TEM\\_2021\\_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162684/TEM_2021_2.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Vaasan kaupunki. (2023, syyskuuta 19). *GigaVaasa*. Vaasa. <https://www.vaasa.fi/vaasan-seutu-yrityksille/sijoitu-vaasan-seudulle/giga-vaasa/>
- Venditti, B. (2023, lokakuuta 15). *Visualized: How Much Do EV Batteries Cost?* Visual Capitalist. <https://www.visualcapitalist.com/visualized-how-much-do-ev-batteries-cost/>
- Warner, J. (2015). *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design* (1. p.). Elsevier.
- Warner, J. T. (2019). *Lithium-Ion Battery Chemistries* (1. p.). Elsevier.
- Wu, Y. (2015). *Lithium-ion batteries : fundamentals and applications* (J. Zhang, Toim.; 1. p.). CRC Press.