

Väinö Kajonen

SÄHKÖAUTOJEN AKKUTEKNOLOGIA KYLMISSÄ OLOSUHTEISSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Asko Ellman
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Väinö Kajonen: Sähköautojen akkuteknologia kylmissä olosuhteissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Huhtikuu 2024

Sähköautot ovat tärkeässä roolissa liikenteen päästöjen vähentämisessä. Tämä kirjallisuuskatsauksena toteutettu tutkimus tarkastelee sähköautoja ja niiden akkuteknologioiden käyttöä kylmissä olosuhteissa. Aluksi tutustutaan sähköautojen tekniikkaan ja akkuteknologioihin, minkä jälkeen käsitellään kylmiin olosuhteisiin liittyviä haasteita. Lopuksi esitellään kylmiin olosuhteisiin kehitettyjä ratkaisuja, kuten akun lämmitysteknologioita sekä uusia kehitteillä olevia akkuteknologioita.

Tutkimuksessa havaittiin, että sähköautojen käyttöön kylmissä olosuhteissa liittyy monia haasteita ja vaikeuksia. Nykyisten akkuteknologioiden nestemäinen elektrolyytti ei toimi riittävän hyvin alhaisissa lämpötiloissa. Alhaisissa lämpötiloissa akun käyttöikä heikkenee ja kapasiteetti, sekä suorituskyky saattavat heikentyä peruuttamattomasti. Sähköauton akut eivät myöskään tuota riittävästi hukkalämpöä, jolloin auton matkustamoa ja akkukennostoa täytyy lämmittää akun energialla, mikä lisää huomattavasti energian kulutusta. Lisäksi lataava jarrutus ei lataa akkua, jos akun lämpötila on liian alhainen. Sähköauton kantama voi laskea jopa 50 % kylmissä olosuhteissa näiden syiden vuoksi.

Kylmiin olosuhteisiin on kehitetty monia ratkaisuja ja tällä hetkellä yhtenä tehokkaimmista ratkaisuista pidetään akkujen lämmitystä. Sen ansiosta sähköautojen kantama ja turvallisuus paranevat huomattavasti kylmissä olosuhteissa. Lämmitys voi tapahtua esimerkiksi ilmalämmityksellä, nestelämmityksellä, faasimuutoslämmityksellä tai vaihtovirtalämmityksellä. Lämmityksen tulee tapahtua riittävän tasaisesti, jotta akkukennoon ei synny suuria lämpötilaeroja, jotka saattavat vahingoittaa akkua.

Tällä hetkellä on kehitteillä useita uusia akkuteknologioita, jotka mahdollistavat huomattavasti korkeamman kantaman ja parantavat sähköautojen toimintaa kylmissä olosuhteissa. Litiumioniakuille vaihtoehtoisia akkuteknologioita on monia, mutta erilaiset metalli-ilma-akustot ja kiinteän tilan akut vaikuttavat lupaavimmilta vaihtoehdoilta. Nämä teknologiat mahdollistavat korkean energiatiheuden ja tehokkaan toiminnan kylmissä olosuhteissa.

Avainsanat: sähköauto, litiumioniakku, arktinen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|---|----|
| 1. JOHDANTO | 1 |
| 2. SÄHKÖAUTOJEN TEKNIikka | 2 |
| 2.1 Teknologia | 2 |
| 2.2 Akut ja akun rakenne..... | 2 |
| 2.3 Nykyiset akkuteknologiat..... | 3 |
| 3. SÄHKÖAUTOILUN HAASTEET KYLMISSÄ OLOSUhteissa..... | 6 |
| 3.1 Energian kulutuksen kasvu..... | 6 |
| 3.2 Akkuteknologian haasteet | 6 |
| 3.3 Akun vanheneminen | 8 |
| 4. AKUN TOIMINNAN PARANTAMINEN KYLMISSÄ OLOSUhteissa..... | 9 |
| 4.1 Akun lämmitysjärjestelmät..... | 9 |
| 4.2 Uudet akkuteknologiat..... | 10 |
| 5. JOHTOPÄÄTÖKSET | 14 |
| LÄHTEET | 15 |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|------|---|
| LCO | litiumkobolttioksidi |
| LFP | litiumrautafosfaatti |
| NCM | litiumnikkelimangaanikobolttioksidi |
| NCA | litiumnikkelikobolttialumiinioksidi |
| LMO | spinaalinen litiummangaanioksidi |
| LNMO | spinaalinen litiumnikkelimangaanioksidi |

1. JOHDANTO

Suomi on sitoutunut alentamaan kotimaan liikenteen kasvihuonepäästöjä puolella vuoteen 2030 mennessä vuoden 2005 tasosta (Tieto.traficom 2021). Sähköautojen ansiosta tämän tavoitteen saavuttaminen on mahdollista ja niillä on tärkeä rooli sen saavuttamiseksi. Aihe on ajankohtainen, sillä monet autonvalmistajat ovat sähköistäneet automallistoaan viime vuosina.

Sähköautoilun suosio on kasvanut viime vuosina räjähdysmäisesti. Energian varastointitekniologioiden kehitys on kiihdyttänyt akkukäyttöisten ajoneuvojen kehitystä ja kasvua ajoneuvoteollisuudessa. Sähköautoissa on kolme keskeistä osaa: akku, moottori ja elektroninen ohjausjärjestelmä. (Zhang et al. 2022) Sähköautojen toiminta ei yllä vielä polttomoottoriautojen tasolle, sillä erityisesti kylmissä olosuhteissa sähköautojen kantama on heikolla tasolla ja latausajat ovat pitkiä.

On olemassa neljä erilaista päätyyppiä sähköisille autoille: hybridautot, täyssähköautot, polttokennoautot ja muut uusiutuvan energian sähköautot (Zhang et al. 2022). Tutkielmassa käsitellään vain täyssähköisiä autoja. Tutkielman tavoitteena on saada tietoa sähköautoissa käytetyistä nykyisistä teknologioista ja vastata tutkimuskysymykseen: millaisia teknologisia innovaatioita on kehitetty parantamaan sähköautojen toimintaa ja suorituskykyä kylmissä olosuhteissa. Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja lähteiksi valittiin vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita. Aineistoa etsittiin Tampereen yliopiston hakupalvelusta Andorista, sekä Google Scholarista. Lähteinä on pyritty käyttämään mahdollisimman uusia lähteitä alkaen vuodesta 2016. Työssä on hyödynnetty tekoälysovellus ChatGPT:tä tutkielman hahmottamiseen.

Luvussa kaksi käsitellään sähköautoja ja niiden teknologiaa yleisellä tasolla. Luvussa kolme käsitellään sähköautoilun erilaisia haasteita kylmissä olosuhteissa, kuten energian kulutuksen kasvu, akkuteknologian haasteet, sekä akkujen vanheneminen. Luvussa neljä esitellään akkujen lämmitysteknologioita, sekä uusia kehitteillä olevia akkuteknologioita. Luvussa viisi tehdään yhteenveto ja käsitellään sähköautoilua kylmissä olosuhteissa ja sen tulevaisuuden näkymiä.

2. SÄHKÖAUTOJEN TEKNIikka

Sähköautoissa 86 % akun energiasta saadaan muutettua mekaaniseksi energiaksi. Se on huomattavasti enemmän, kuin polttomoottoriautolla, jossa 38 % polttoaineen energiasta saadaan muutettua mekaaniseksi energiaksi. (Muneer et al. 2017, s. 93–106) Sähköautoissa on vähemmän osia kuin polttomoottoriautoissa, sillä sähkömoottorin rakenne on yksinkertaisempi kuin polttomoottorin. Sähköautot eivät myöskään välttämättä tarvitse vaihteistoa voimansiirtoon, sillä sähkömoottori toimii tehokkaasti laajalla kierrosalueella.

2.1 Teknologia

Sähkömoottori käyttää sähköenergiaa tuottaakseen kineettistä energiaa renkaille. Jarrutettaessa sähkömoottori toimii generaattorina ja jarrutus lataa auton akkua. Kaupunkiajossa kiihdytyksiä ja jarrutuksia on paljon, mutta akkua lataavan jarrutuksen ansiosta hukkaenergiaa syntyy vähemmän. Esimerkiksi 1 600 kg painavan auton kineettinen energia 120 km/h vauhdissa on noin 0,25 kWh, joka vastaa noin 1,25 km:n matkaa akun avulla. (Muneer et al. 2017, s. 93–104)

Sähköautoissa on käytetty monia eri akkuteknologioita ja niistä on olemassa neljä erilaista akkukategoriaa: lyijyakut, alkaliakut, litiumakut ja natriumakut (Iannicello et al. 2018). Litiumioniakku on yleisimmin käytetty akkutyyppeistä täyssähköautoissa, joten työssä keskitytään lähinnä niihin.

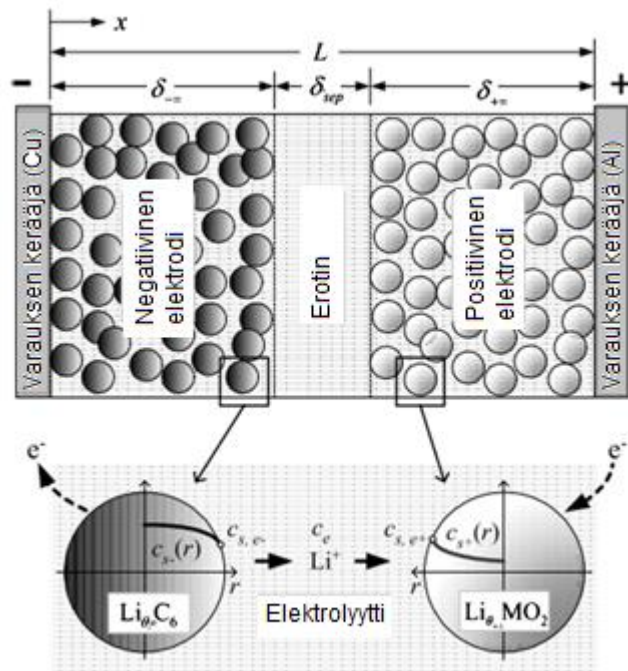
2.2 Akut ja akun rakenne

Sähköautojen akkujen tarve kasvaa vuosittain, sillä sähköautoja myydään yhä enemmän. Myös sähköautojen akkujen hinnat ovat laskeneet huomattavasti ensimmäisiin malleihin verrattuna. (Houache et al. 2022, s. 1)

Litiumioniakku koostuu positiivisesta ja negatiivisesta elektrodista, elektrolyytistä ja kalvosta, jonka vain litiumionit voivat läpäistä vapaasti, sekä akkukotelosta. Litiumioniakut käyttävät hiilestä koostuvaa materiaalia negatiivisena elektrodina eli anodina ja litiumia sisältäviä yhdisteitä positiivisena elektrodina eli katodina. (Zhang et al. 2022)

Litiumioniakut toimivat pääasiassa siirtäen litiumioneja positiivisen ja negatiivisen navan välillä. Akun luovuttaessa energiaa litiumionit irtoavat negatiivisesta elektrodista ja läpäisevät elektrolyytin päästäkseen positiiviseen elektrodin. Ladattaessa akkua reaktio on päinvastainen. Litiumioniakun lataaminen ja purkaminen vievät aikaa, ja niihin sisältyy elektrokemiallinen reaktio, jossa energia muuttuu muotoaan. Yleinen käyttölämpötila litiumioniakuille on

15–40 °C. Soveltuva käyttölämpötila on akulle tärkeää, jotta akku toimii tehokkaasti ja sähköauton suorituskyky paranee. (Zhang et al. 2022) Kuvasta 1 havaitaan, kuinka elektrokemiallinen reaktio toimii akussa käytön aikana.



Kuva 1: Akun tapahtumat havainnollistettuna latauksen purkauksen aikana. Muokattu lähteestä (Jaguemont et al. 2016, s. 105).

Akun kapasiteetti on yksi sen tärkeimmistä ominaisuuksista, sillä se on maksimimäärä sähköenergiaa, jonka akku voi varastoida ja toimittaa. Litiumioniakulla on suuri energiatiheys, alhainen itsepurkautuminen ja alhaiset ylläpitovaatimukset. Se sisältää kuitenkin turvallisuusriskejä, kuten vuodon tai ylikuumenemisen mahdollisuuden tai kiteisen rakenteen muodostumisen elektrodien välille. (Iannicello et al. 2018) Litiumioniakuissa on tärkeää huomioida, että liian alhaisissa tai korkeissa lämpötiloissa akun suorituskyky on edelleen suuri ongelma. Akkujen lämmönhallintajärjestelmillä on tärkeä rooli sähköauton käytön ja turvallisuuden kannalta. Niitä on tarpeen kehittää, jotta sähköautoja voidaan käyttää tehokkaasti ja turvallisesti vaihtelevissa ympäristöolosuhteissa ja ajotilanteissa. (Zhang et al. 2022)

2.3 Nykyiset akkuteknologiat

Nykyisten akkuteknologioiden ongelmana on niiden pieni energiatiheys, joka rajoittaa sähköautojen kantamaa, sillä suuren energiamäärän varastointi vaatii liian suuria ja painavia akkuja. Tähän mennessä korkeimmat tilavuus- ja painoenergiatiheydet kennotasolla ovat 670 Wh/L ja 250 Wh/kg (Houache et al. 2022). Tällä hetkellä katodit (positiiviset elektrodit)

rajoittavat akkujen energiatiheyttä ja vaikuttavat näin ollen varastosysteemien lopulliseen kustannukseen. Akkukemia vaikuttaa suorituskykyyn, kustannuksiin ja turvallisuuteen. (Camargos et al. 2022) Näin ollen oikeiden materiaalivalintojen tekeminen akkuja suunniteltaessa on kriittisen tärkeää.

Litiumioniakut koostuvat erilaisista katodimateriaaleista, joilla kullakin on omia etuja ja haittoja kustannusten, turvallisuuden, suorituskyvyn ja muiden parametrien osalta. Tällä hetkellä litiumkoolttioksidin (LCO) on kulutuselektroniikan eniten käytetty katoditeknologia. Tämä ei kuitenkaan sovellu rakenteellisen epävakautensa vuoksi sähköautoihin. Muut katodikemiat, kuten litiumrautafosfaatti (LFP), litiumnikkelimangaanikoolttioksidin (NMC), litiumnikkelikoolttialumiinioksidin (NCA) ja spinaalinen litiummangaanioksidin (LMO), ovat suosittuja katodikemioita autoteollisuudessa, sillä ne ovat edullisempia ja vakaampia kiteisen rakenteensa vuoksi. Tesla käyttää litiumnikkelikoolttialumiinioksidin (NCA) -teknologiaa, useimmat muut autonvalmistajat käyttävät muita katoditeknologioita. (Houache et al. 2022)

LFP:llä on korkea elektrokemiallinen suorituskyky ja pitkä elinikä. Näillä akuilla on laaja toimintalämpötila-alue, mutta kosteus saattaa rajoittaa LFP:n käyttöikä (Camargos et al. 2022). LFP rajoittavia tekijöitä on myös heikko energiatiheys (190 Wh/kg) ja heikko sähköjohtavuus. Matalan tilavuusenergian (220 Wh/L), korkean turvallisuuden ja nopeiden latausaikojen vuoksi LFP sopii tavallisten autojen käyttöön. Se on tällä hetkellä eniten käytetty akuteknologia ja teknologian pitkäikäisyyden ansiosta akulla voi ajaa jopa 600 000–800 000 km. (Houache et al. 2022)

LMO teknologian etuna on sen edullisuus ja korkea teho muihin katodimateriaaleihin verrattuna. Heikkouksina sillä on matala energiatiheys, sekä lyhyt käyttöikä rakenteellisen epävakauden vuoksi. LMO:n käyttöä rajoittaa myös heikko kapasiteetti. Monet nykyiset sähköautot käyttävät LMO/NMC-yhdistettä, jolloin akustossa on mahdollista hyödyntää molempien teknologioiden paremmat puolet. Pitkällä aikavälillä kehitteillä on uusia teknologioita, jotka pohjautuvat LMO teknologiaan. Nikkelin sisällyttäminen LMO-katodiin mahdollistaa korkean energiatihedden (580 Wh/kg). Vaikka nikkeli on kallista, materiaalikustannukset alenevat, koska materiaalia ei tarvita yhtä paljon kilowattituntia kohden. LNMO teknologia vaatii kuitenkin vielä lisää tutkimusta, sillä akun kapasiteetti ei kestä riittävän montaa lataus sykliä. Teknologia ei myöskään sovellu kaupallisten elektrolyyttien kanssa käytettäväksi, koska tämä teknologia toimii liian korkeassa käyttöjännitteessä. (Houache et al. 2022, s. 7)

NMC katoditeknologia kehitettiin, jotta akuista saadaan suuri ominaisteho. Nikkelillä on korkea ominaisenergia ja alhainen stabiilius. NMC:tä käytetään tällä hetkellä laajasti sähköautojen akuteknologioissa. (Camargos et al. 2022) NMC:n etuina on matala sisäinen resistanssi, korkea kapasiteetti ja edullisuus (Houache et al. 2022, s. 8)

NCA on samankaltainen, kuin NCM ja sillä on korkea ominaisenergia, hyvä virranantokyky ja pitkä elinikä. Tämä teknologia vaatii kuitenkin erityisiä turvatoimenpiteitä, jotta sitä voi käyttää sähköautoissa. (Camargos et al. 2022) NCA-teknologian odotetaan saavuttavan 700 Wh/L ja 300 Wh/kg kennotasolla vuoteen 2025 mennessä. (Houache et al. 2022, s. 7)

3. SÄHKÖAUTOILUN HAASTEET KYLMISSÄ OLOSUHTEISSA

Kuten polttomoottoriautoissa myös sähköautoissa matkustamo täytyy lämmittää ajon aikana. Polttomoottoriautoissa matkustamo voidaan lämmittää moottorin tuottamalla hukkalämmöllä, mutta sähköautoissa lämmitys vaatii itsenäisen lämmitysjärjestelmän. (Haitao et al. 2020) Kylmissä olosuhteissa sähköautot kohtaavat monia haasteita liittyen akkuteknologiaan, kuten energian kulutuksen kasvu, heikentynyt lataus- ja purkauskkyky, sekä akun heikompi syklikestävyys.

3.1 Energian kulutuksen kasvu

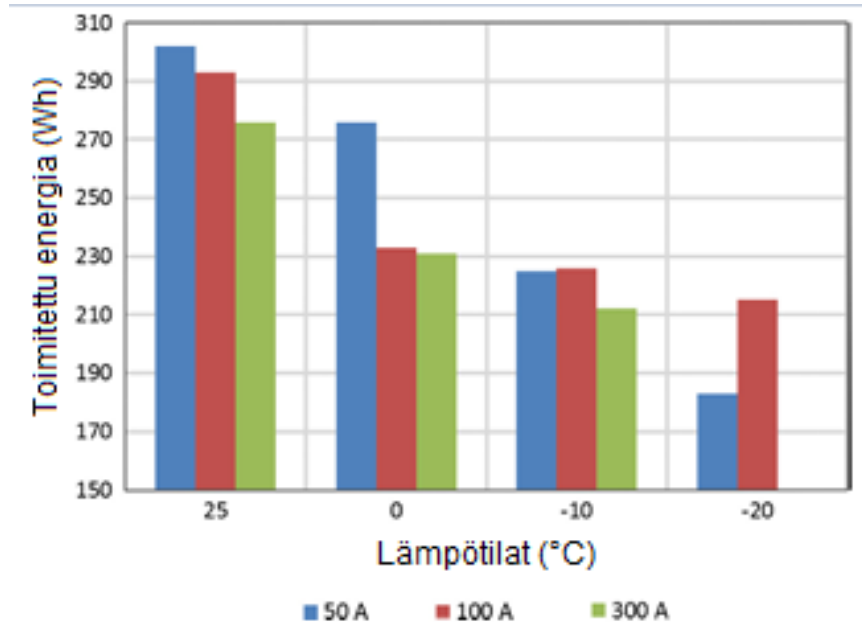
Sähköauton toimintasäteeseen vaikuttaa monet asiat, kuten ajoneuvon nopeus, ajotyylit, kyydissä oleva kuorma, maasto-olosuhteet sekä kaikki energiankulutukseen vaikuttavat tekijät, kuten lämmitys ja ilmastointi. Ilmasto-olosuhteet vaikuttavat myös sähkökomponenttien toimintaan, joka lisää edelleen energiankulutusta. Suurin yksittäinen energian kulutusta lisäävä tekijä kylmissä olosuhteissa on matkustamon ja akkukennoston lämmitys. Lämmitys tapahtuu useimmiten sähköisellä resistiivilämmityksellä, joka kuluttaa enemmän energiaa kuin lämpöpumppu. (Iora & Triboli 2019)

Ajettaessa kylmissä olosuhteissa suurin osa energiasta, jolla sähköautoa lämmitetään, on johdettu akusta (Haitao et al. 2020). Testissä, jossa analysoitiin yli 10 000 Tesla Model S:n toimintaa havaittiin, että energian kulutus kasvoi jopa 45 % -10 °C:n lämpötilassa. Toisessa tutkimuksessa, jossa ajettiin Nissan Leaf:illa havaittiin, että auton kantama tippui -26 °C:n lämpötilassa jopa 70 % (Steinstraeter et al. 2021).

Kun akun lämpötila on riittävän alhainen, lataava jarrutus ei lataa akkua, jolloin jarrutuksen energia menee hukkaan. Tutkimusten perusteella auton kantama tippuu noin 21 % kylmissä oloissa, koska lataavaa jarrutusta ei saada hyödynnettyä täyteen potentiaaliin akun alhaisen lämpötilan vuoksi. Sähköautojen kantama tippuu jopa 50 % kylmissä oloissa, johtuen lämmitysenergian tarpeesta ja lataavan jarrutuksen puutteesta. (Steinstraeter et al. 2021)

3.2 Akkuteknologian haasteet

Kylmyys vaikuttaa merkittävästi litiumioniakkujen suorituskykyyn. Litiumioniakkujen purkauskkyky alenee merkittävästi alle nollan asteen lämpötiloissa. Alentunut purkauskapasiteetti johtaa akusta saatavan energian vähenemiseen. (Hu et al. 2020) Litiumioniakusta samalla virralla saatavissa oleva energia $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa on vain 60 % huoneenlämpöisen akun energiasta (Jagumont et al. 2016). Kuvasta 2 havaitaan, kuinka akun energia on huomattavasti suurempi huoneenlämpötilassa kuin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa.



Kuva 2: Litiumioniakun suorituskyky eri lämpötilakokeissa. Muokattu lähteestä (Jagumont et al. 2016, s. 101).

Litiumioniakkujen suorituskyvyn heikkeneminen alhaisissa lämpötiloissa johtuu akkumateriaalien ominaisuuksien muutoksista. Muutokset tapahtuvat mikrotasolla ja tekevät varastoidun kemiallisen energian käyttökelvottomaksi. Tällaiset muutokset saavat litiumioniakkujen lataamisesta hitaampaa, purkauskapasiteetista heikompaa ja teho-ominaisuuksista heikompia alhaisissa lämpötiloissa. (Hu et al. 2020) Alhaiset lämpötilat vaikuttavat sekä lataus- että purkauskkykyyn, koska elektrokemiallisia reaktioita ei voida suorittaa normaalisti (Zhang et al. 2022).

Litiumionikemien alhaisen lämpötilan suorituskykyä voidaan selittää useilla eri tekijöillä, kuten litiumionien liikkumisella elektrolyytissä. Liuoksen johtavuus kasvaa lämpötilan vuoksi, jolloin ionien liikkuvuus vähenee kylmissä olosuhteissa johtaen sisäisen resistanssin merkittävään kasvuun. Muita suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi kennojen suunnittelu, elektrodien paksuus, erotinhuokoisuus ja erotinmärkyden ominaisuudet. (Jagumont et al. 2016) Äärimmäisissä olosuhteissa elektrolyytti saattaa jopa jäättyä, mikä estää akun purkautumisen ja auton käynnistymisen (Zhang et al. 2022).

3.3 Akun vanheneminen

Akun vanhenemisessa kapasiteetti pienenee ja käyttökertojen määrä vähenee peruuttamattomasti (Zhang et al. 2022). Yleisenä sääntönä akuille on kaksi vanhenemismekanismia, jotka ovat kalenterivanheneminen, jossa vanheneminen tapahtuu kennon ollessa varastoituna, jolloin akun kapasiteetti pienenee, vaikka sitä ei käytetä. Toinen tunnettu vanhenemismekanismi on syklivanheneminen, jossa akun kapasiteetti heikkenee käytöstä aiheutuvan vaurioitumisen seurauksena. (Jaguemont et al. 2016)

Akun ikääntyminen tapahtuu ensin elektrolyytin ja elektrodien välisissä rajapinnoissa solun elektrolyytin kemiallisen koostumuksen vuoksi. Ikääntymismekanismit voivat olla joko mekaanisia tai kemiallisia ja ne riippuvat vahvasti elektrodien koostumuksesta. Useimmiten akun ikääntymisen kaksi päävaikutusta on havaittavissa, jotka ovat impedanssin nousu sekä kapasiteetin häviö. Suorituskyvyn heikkeneminen johtuu erilaisista kemiallisista mekanismeista, jotka riippuvat elektrodien materiaaleista. (Jaguemont et al. 2016)

Merkittävä lämpötilaero akkukennojen eri alueilla voi aiheuttaa paikallista heikkenemistä, kiihdyttäen akun vanhenemistä ja lyhentäen akun käyttöikää (Zhang et al. 2022). Akun lataamisen alhaisissa lämpötiloissa on havaittu aiheuttavan litiumpinnoitusta, joka johtaa akun kapasiteetin heikkenemiseen lopullisesti (Hu et al. 2020). Litiumpinnoituksessa metallista litiumia kertyy kennon anodin pinnalle heikentäen sen toimintaa. Tämä vähentää vapaiden litiumionien määrää ja lisää kennon impedanssia. (Steinstraeter et al. 2021)

4. AKUN TOIMINNAN PARANTAMINEN KYLMISSÄ OLOSUHTEISSA

Lämpötila vaikuttaa litiumioniakkujen suorituskykyyn merkittävästi. Korkeat lämpötilat aiheuttavat turvallisuusrisikin, kun taas matalissa lämpötiloissa akkujen suorituskyky heikkenee merkittävästi. (Wu et al. 2020) Akkujen lämmönhallinta on siis erittäin tärkeää sähköautoissa niin turvallisuuden, kuin suorituskyvynkin vuoksi.

4.1 Akun lämmitysjärjestelmät

Litiumioniakkujen lämmönhallintamenetelmät voidaan jakaa pääasiassa kahteen luokkaan, jotka ovat lämmönhallintateknologiat ja lämmitysteknologiat. Lämmönhallintateknologioiden avulla sähköautojen akkuja voidaan käyttää myös korkeissa lämpötiloissa. Tällä hetkellä yhtenä tehokkaimmista keinoista parantaa litiumioniakkujen toimintaa kylmissä olosuhteissa, pidetään akkukennojen lämmitysteknologioita. Ne voidaan jakaa pääasiassa kahteen luokkaan, jotka ovat ulkoinen ja sisäinen lämmitys. Ulkoisessa lämmityksessä lämpö siirtyy useimmiten johdettuna. Yleisiä ulkoisen lämmityksen menetelmiä ovat ilmalämmitys, nestelämmitys ja lämmityslevylämmitys. (Chen & Li 2021) Muita lämmitysmenetelmiä ovat sähkölämmitys, PCM-lämmitys, peltier-ilmiö ja lämpöputki. Akkukennon toimintaa voidaan parantaa myös eristämällä akusto. (Zhang et al. 2022)

Ilmalämmityksessä vastus lämmitetään ensin akun virran avulla, jonka jälkeen vastus lämmittää sitä ympäröivän ilman konvektiolla. Lämmennyt ilma virtaa akkukennostoon tuulettimen avulla ja lämmittää akkukennoston sopivaan lämpötilaan. Ilmalämmityksen etuna on sen korkea tehokkuus, mutta yhtenä rajoittavana tekijänä on akkukennon paksuus, joka saattaa johtaa epätasaiseen lämpötilaan akkukennon sisällä. Akkujen välinen etäisyys vaikuttaa myös merkittävästi lämmönhallintakeinoon. (Zhang et al. 2022)

Nestelämmityksessä sähkövirralla vastus lämmitetään oikeaan lämpötilaan, jonka jälkeen vastus lämmittää nesteen, joka virtaa akkukennoston läpi tiettyjä virtauskanavia pitkin. Neste lämmittää akkukennoston sopivaan lämpötilaan. Useimmiten käytettyjä lämmönvälittäjäaineita ovat vesi, öljy, glykoli ja asetoni. Ilmalämmitykseen verrattuna nestelämmityksellä on etuina esimerkiksi suurempi erityislämpökapasiteetti ja korkeampi lämmönsiirtokerroin. Tämän seurauksena akkupaketti voi olla tiiviimpi, kuin ilmalämmityksessä. Nestelämmityksen ongelmia on kuitenkin edelleen nestevuodon riski ja tehokkaan virtausverkoston kehittäminen. (Zhang et al. 2022)

PCM-lämmityksessä eli faasimuutoslämmityksessä akun lämpötilaa ylläpidetään sopivana, faasia muuttavan aineen ansiosta. PCM:t sisältävät hydrattuja suoloja, steariinihappoa, polyeteeniglykolia, parafiinia, grafeenia ja niihin perustuvia faasinmuutoskomposiitteja. Akun purkautuessa PCM absorboi akusta vapautuvan lämmön, muuttuessaan nestemäiseksi, alentaen nopeasti akun lämpötilaa. (Zhang et al. 2022) Lämpötilan laskiessa alle PCM:n sulamislämpötilan, varastoitu lämpö vapautuu takaisin akkupakettiin materiaalin muuttuessa takaisin kiinteäksi. (Jaguemont 2016) PCM:ien käyttö on kiinnostava tapa saavuttaa passiivinen lämmönhallinta ja varmistaa, että akun lämpötila pysyy sopivana. PCM:n etuna on luotettavuus, eikä se kuluta energiaa toisin kuin muut lämmönhallintajärjestelmät. (Iannicello et al. 2018)

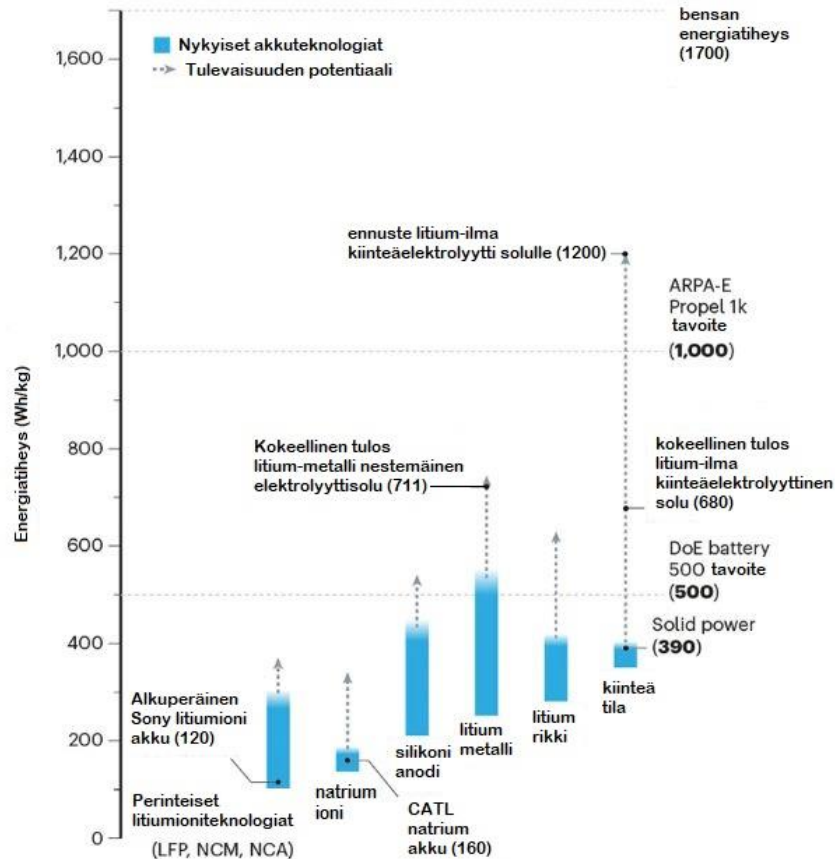
Vaihtovirtalämmitys perustuu vaihtovirran (AC) johtamiseen akkuun. Sisäisen resistanssi ansiosta akku lämpenee (Joulen laki). Lämmitysmuoto havaittiin toimivaksi jopa -40 °C :n lämpötiloissa. Kun lämmityksessä käytetään suurta virtaa (60–80 A), akku lämpenee erittäin nopeasti. Tutkimuksessa havaittiin, että verrattuna ulkoisiin lämmitysstrategioihin AC-lämmitys lämmittää akkukennoa tasaisemmin, eikä kennoon synny suuria lämpötilaeroja. Lämmitysteknologian etuna ulkoisiin lämmitysmuotoihin on myös sen edullisuus ja keveys. (Jaguemont et al. 2016)

ACB-akussa eli kaikkien lämpötilojen akussa on tavalliset akun komponentit eli anodi, katodi ja elektrolyytti, mutta näiden lisäksi siinä on neljäs komponentti eli $50\text{ }\mu\text{m}$:n paksuinen nikkelilevy. Levyssä on liittimet kummassakin päässä. Toinen liitin on yhdistetty anodikerrosten liittimien kanssa ja toinen liitin ulottuu solun ulkopuolelle. Se on aktivaationapa, jota käytetään akun sisäisen lämmityksen aktivointiin alhaisessa lämpötilassa. Kun kytkin yhdistää aktivaationavan negatiiviseen napaan, sähkövirta kulkee nikkelilevyn läpi tuottaen lämpöä. Akun lämpötilan saavuttaessa 0 °C :n lämpötilan, aktivaatioprosessi on valmis. Tämän lämmitysstrategian etuja on esimerkiksi alhaiset kustannukset ja nopeus, sillä lämmitys -30 °C :n lämpötilasta kestää vain 30 sekuntia. Tutkimuksissa havaittiin, että lämmitysstrategia ei myöskään heikennä akun käyttöikää huomattavasti, sillä erittäin kylmiä päiviä on harvoin. (Wang et al. 2016)

4.2 Uudet akkuteknologiat

Lyhyellä aikavälillä (<2025) sähköautot toimivat vanhoilla akkuteknologioilla eli NCA, NMC ja LMO/NMC. Pitkällä aikavälillä (>2025) kiinteän tilan akut vaikuttavat lupaavimmalta teknologialta sähköautoille. Erityisesti litiummetallin kiinteän tilan akut voisivat avata uusia mahdollisuuksia sähköautoille, koska metallinen litium on mahdollisesti yksi suorituskykyisimmistä anodeista seuraaville akuille. Myös turvallisuus paranisi kiinteän tilan elektrolyyteillä

niiden fysikaalisen ja kemiallisen stabiilisuuden ansiosta. (Houache et al. 2022) Ne myös toimivat paremmin kylmissä oloissa, koska niissä ei ole nestettä, jonka viskositeetti kasvaisi kylmyyden vuoksi (Jones 2024). Kuva 3 havainnollistaa, kuinka paljon enemmän potentiaalia uusilla akkuteknologioilla on, kun verrataan nykyisiin käytössä oleviin akkuteknologioihin.



Kuva 3: Tutkimuksella pyritään jatkuvasti nostamaan energiatiheyttä kaikissa akkutyypeissä, joillakin on suuri potentiaali. Muokattu lähteestä Jones (2024).

Piitä pidetään yhtenä suurimmista lähitulevaisuuden litiumioniakkuteknologian kehityksen läpimurroista grafiitin korvaajana anodina. Piianodin avulla on mahdollista saavuttaa merkittävästi korkeampi teoreettinen kapasiteetti. Materiaalin haasteena on kuitenkin sen 400 %:n turpoaminen reagoidessaan litiumin kanssa, joka aiheuttaa suurta rakenteellista rasitusta akun sisällä. (Houache et al. 2022)

Litiummetalliset anodit mahdollistavat 10 kertaa korkeamman teoreettisen kapasiteetin kuin grafiittianodit. Suuri kapasiteetti tekee siitä ihanteellisen materiaalin akun anodille. Turvallisuusshuolet ovat kuitenkin estäneet litiumanodien käytön. Akun heikkouksina on lyhyt syklinen käyttöikä ja litiumin laajentuminen ionin ottaessaan. Kehitystyö on jatkunut, sillä uuden teknologian ansiosta akkuteknologia voisi kehittyä huomattavasti. (Houache et al. 2022, s.

10–11) Ongelma litiummetallisessa anodissa on, että litium saattaa kerääntyä anodille epätasaisesti, muodostaen kuumia pisteitä, jotka saattavat ulottua elektrolyytin läpi aiheuttaen oikosulun akulle. Eräs tutkijaryhmä saavutti 700 Wh/kg energiatiheyden litiummetallianodilla vuonna 2023. (Jones 2024)

Litiumrikkiakku tarjoaa korkeita energiatiheyksiä. Se koostuu litiummetallianodista ja rikkikattodista (Jones 2024). Litiumrikkiakulla on erittäin korkea teoreettinen energiatiheys. On tärkeää kehittää akkuteknologioita, jotka eivät käytä harvinaisia metalleja, kuten nikkeliä ja kobolttia. Teknologiaa ei ole vielä kaupallistettu, sillä siinä on vielä monia haasteita rikin ominaisuuksien vuoksi. Haasteita ovat matala ioni- ja elektronijohtavuus, tilavuuden muuttuminen reaktion aikana, sekä polysulfidin eli väliaineen liukeneminen elektrolyyttiin. Litiumrikkiakku on potentiaalinen vaihtoehto tulevaisuuden akkuteknologiaksi, sillä rikkiä on saatavilla runsaasti ja sitä on mahdollista louhia ympäristöystävällisesti. Litiumrikkiakusta on myös mahdollista tehdä kiinteän tilan akku, mutta haasteena on puuttuva valmistusteknologia. (Nakamura et al. 2023)

Tällä hetkellä suurin osa sähköautojen akuista koostuvat silikoni- ja grafiitti- anodeista tai niiden yhdistelmistä yhdessä nestemäisen elektrolyytin kanssa. Akkujen seuraava sukupolvi tulee kuitenkin olemaan kiinteän tilan akut (SSB), sillä nykyinen litiumioniteknologia on saavuttanut kehityksen pullonkaulan. Tällä hetkellä kiinteän tilan akut voisivat saavuttaa jopa 550 Wh/kg energiatiheyden, joka on huomattavasti korkeampi kuin parhaiden litiumioniakkujen. Korkea energiatiheys johtuu suojatuista litiumanodeista. Kiinteät elektrolyytit ovat lupaavia ehdokkaita turvallisuuden ja suuren energiatiheyden mahdollistajina. Tällä hetkellä on kolme lupaavaa kiinteää elektrolyyttimateriaalia, jotka ovat orgaaniset polymeerielektrolyytit, epäorgaaniset sulfidipohjaiset elektrolyytit ja epäorgaaniset oksidipohjaiset elektrolyytit. (Houache et al. 2022)

Metalli-ilma-akut ovat uusi teknologia, joka on suosittu tutkimusaihe tällä hetkellä. Sinkki-ilma akut voisivat tarjota erittäin korkean ominaisenergian (1084 Wh/kg), jonka lisäksi ne ovat turvallisia, ympäristöystävällisiä ja edullisia. Sinkki-ilma akuissa on perinteisten akkujen ominaisuuksia, mutta sillä on myös samankaltaisuuksia polttokennon kanssa, koska se tarvitsee ilmaa toimiakseen. Sinkkiä käytetään negatiivisena elektrodina ja katodina on ilmaelektrodi. Akkuihin on kehitetty monia erilaisia elektrolyyttejä, joista monilla on hyvät ominaisuudet erittäin kylmissä olosuhteissa. Yhtenä heikkoutena sinkki-ilma akuilla on, että ne muodostavat karbonaattia reagoidessaan hiilidioksidin kanssa. Sinkki-ilma akuissa on vielä paljon kehitettävää ennen kuin ne on mahdollista kaupallistaa. (Zhang P. et al. 2023) Sinkki-ilma akut eivät tarjoa yhtä korkeaa teoreettista energiatiheyttä, kuin muut metalli-ilma-akut, mutta niiden käyttäminen käytännön ratkaisuissa on helpompaa. (Li et al. 2023)

Litiumilma-akut ovat potentiaalinen teknologia tulevaisuudessa, sillä niillä on mahdollista saavuttaa jopa 2000 Wh/kg energiatiheys. Litiumilma-akut jaetaan neljään tyyppiin: ei vesipohjaisiin, vesipohjaisiin, hybridimallisiin ja kiinteän tilan akkuihin. Kiinteän tilan litiumilma-akut vaikuttavat lupaavimmalta vaihtoehdolta niiden turvallisuuden vuoksi. Kaikki akut koostuvat Happikatodista, Litiumanodista, katalyytistä, elektrolyytistä ja erottimesta. (Li et al. 2023)

Litiumioniakkujen seostaminen niobiumin kanssa parantaa niiden suorituskykyä, elinikää ja turvallisuutta. Se on siis erinomainen valinta sähköautojen akustoihin. Kun tavallisen kemiallisen rakenteen omaavaa litiumioniakkua seostetaan niobiumin avulla, sen sähköjohtavuus pysyy korkeana, jopa akun toimiessa alhaisissa lämpötiloissa. Tutkimuksessa, jossa vertailtiin niobiumilla ja mangaanilla seostettuja akkuja, havaittiin, että niobiumilla seostetun akun kapasiteetti pieneni paljon vähemmän kuin mangaanilla seostetun akun, syklien määrän kasvaessa. Niobium akuilla on etuja muihin akkutyyppeihin verrattuna monessa eri osa-alueessa, mutta yksi heikkous on sen korkeat kustannukset. (Camargos et al. 2022)

Natriumioniakku toimii samalla tavalla kuin litiumioniakku, mutta se käyttää natriumioneja varauksenkantajana. Natriumioniakku koostuu katodista, anodista, elektrolyytistä ja erottimesta. Teknologialla on useita etuja kilpaileviin akkuteknologioihin nähden, mutta niitä ei ole vielä kaupallistettu. Natriumioniakun energiatiheys ei ole yhtä suuri, kuin litiumioniakun, mutta sillä on hyvä elektrokemiallinen suorituskyky ja korkea stabiilius. Natriumioniakun etuna litiumioniakkuun verrattuna on, että natriumista ei ole pulaa akkujen kysynnän kasvaessa, toisin kuin litiumista. (Molaiyan et al. 2023) Natriumioniakun on mahdollista toimia hyvin erittäin matalissa lämpötiloissa. Kun natriumioniakkua seostetaan koboltin kanssa, se toimii hyvin jopa $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötiloissa. Niobiumin kanssa seostettuna natriumioniakku kesti 1800 sykliä $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa, jolloin akku säilytti 76 % kapasiteetistaan. (Guo et al. 2023)

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli saada tietoa sähköautojen innovaatioista ja tekniikoista, joilla niiden toimintaa on pyritty parantamaan kylmissä olosuhteissa. Yksi merkittävimmistä kylmien olosuhteiden haasteista on suurempi energiankulutus, sillä sähköautojen akut eivät tuota kylmissä oloissa riittävästi hukkalämpöä, jonka vuoksi sähköauton matkustamo ja akkukennostoa täytyy lämmittää akusta saatavalla energialla. Nykyisille sähköautoille, joissa käytetään litiumioniakkuja, oikea toimintalämpötila on erittäin tärkeää optimaalisen toiminnan ja kantan kannalta. Liian matalissa lämpötiloissa akun käyttöikä heikkenee ja suorituskyky saattaa heikentyä peruuttamattomasti. Heikko toiminta johtuu akun elektrokemiallisista ominaisuuksista, sillä lämpötilan ollessa liian matala elektrokemiallisten reaktioiden suorittaminen ei ole yhtä tehokasta. Äärimmäisen kylmissä olosuhteissa litiumioniakkujen nestemäinen elektrolyytti saattaa jopa jäätyä estäen sähköauton toiminnan. Alhaiseen lämpötilaan liittyy myös turvallisuusriskejä, jonka vuoksi akkujen lämmönhallinta on erittäin tärkeää.

Kylmissä olosuhteissa sähköauton akkua on tehokasta lämmittää, jotta sen toiminta on turvallista. Lämmityksen ansiosta energiankulutus pienenee ja suorituskyky paranee. Erilaisia lämmitysteknologioita on esimerkiksi ilmalämmitys, nestelämmitys, PCM-lämmitys, sekä vaihtovirtalämmitys. Teknologioiden avulla sähköautot pystyvät toimimaan myös kylmissä olosuhteissa. Lämmityksen tulee tapahtua riittävän tasaisesti, jotta akkukennostoon ei synny suuria lämpötilaeroja, jotka saattavat vahingoittaa akkua.

Tulevaisuudessa sähköautojen toiminta kylmissä olosuhteissa saattaa olla huomattavasti parempaa, kuin tällä hetkellä. Uusia akkuteknologioita on kehitteillä jatkuvasti, sillä kiinnostus sähköautojen suorituskyvyn kehittämiseen on valtava, vaikka uusia teknologioita ei ole vielä onnistuttu kaupallistamaan tehokkaasti. Monet akkuteknologiat mahdollistavat korkeamman akkukapasiteetin, jonka ansiosta sähköautojen kantama paranee huomattavasti. Uusien akkuteknologioiden ansiosta myös turvallisuus paranee, sillä monet esitellyistä teknologioista ovat turvallisempia kuin litiumioniteknologia.

Erityisesti kiinteän tilan akut ovat potentiaalinen teknologia tulevaisuudessa, sillä ne mahdollistavat korkean energiatiheden ja ovat erittäin turvallisia. Teknologia toimii hyvin myös kylmissä olosuhteissa, sillä elektrolyytti on kiinteä, eikä nestemäinen. Myös metalli-ilma akut ovat potentiaalinen teknologia tulevaisuudessa, sillä ne mahdollistavat erittäin korkean energiatiheden ja suorituskyvyn myös kylmissä olosuhteissa.

Sähköautojen tulevaisuus vaikuttaa lupaavalta, sillä uusien akkuteknologioiden ansiosta niiden kantama pitenee huomattavasti myös kylmissä olosuhteissa. Markkinoille tarvittaisiin parempia kaupallistamismahdollisuuksia, jotta uudet akkuteknologiat saataisiin mahdollisimman nopeasti kaupalliseen tuotantoon.

LÄHTEET

Camargos, P., dos Santos, P., dos Santor, I., Ribeiro, G.& Caetano, R. (2022). Perspectives on Li-ion battery categories for electric vehicle applications: A review of state of the art. *International Journal of Energy Research* Vol.46(13). Saatavissa (29.2.2024): <https://doi.org/10.1002/er.7993>

Chen, M. & Li, J. (2021). Experimental study on heating performance of pure electric vehicle power battery under low temperature environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol.172. Saatavissa (23.2.2024): <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121191>

Guo, Z., Qian, G., Wang, C., Zhang, C., Yin, R., Liu, W-D., et al. (2023). Progress in electrode material for the industrialization of sodium-ion batteries. *Progress in Natural Science: Materials International* Vol.33. Saatavissa (15.3.2024): <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2022.12.003>

Haitao, M., Zhang, Z., Sun, W., Min, Z., Yu, Y., Wang, B. (2020). A thermal management system control strategy for electric vehicles under low-temperature driving conditions considering battery lifetime. Vol.181 *Saatavissa* (31.1.2024): <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115944>

Houache, M., Yim, C-H., Karkar, Z., Abu-Lebdeh, Y. (2022). "On the Current and Future Outlook of Battery Chemistries for Electric Vehicles—Mini Review" *Batteries* Vol.8(7). Saatavissa (27.2.2024): <https://doi.org/10.3390/batteries8070070>

Hu, X., Zheng, Y., Howey, D., Perez, H., Foley, A., Pecht, M. (2020). Battery warm-up methodologies at subzero temperatures for automotive applications: Recent advances and perspectives. *Progress in energy and combustion science*. Vol.77 [Online]. Saatavissa (5.2.2024): <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1016/j.pecs.2019.100806>

Iannicello, L., Biwole P. H., Achard, P. (2018). Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials. *Journal of power sources*. Vol.378, pp.383–403. Saatavissa (6.3.2024): <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.071>

Iora, P. & Tribioli, L. (2019). Effect of ambient temperature on electric vehicles' energy consumption and range: Model definition and sensitivity analysis based on Nissan Leaf data. *World electric vehicle journal*. [Online] Vol.10(1), 2-. Saatavissa (20.2.2024): <https://www.mdpi.com/2032-6653/10/1/2>

Li, T., Huang, M., Bai, X., Wang, Y.-X. (2023). Metal-Air batteries: A review on current status and future applications. *Progress in Natural Science: Materials International* Vol.33. pp.151–171. Saatavissa (18.3.2024): <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2023.05.007>

- Jaguemont J., Boulon L., Dubé Y. (2016). A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Applied Energy*, Vol.164 (pp. 99–114) Saatavissa (14.2.2024): <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.034>
- Jones, N. (2024) The new car batteries that could power the electric vehicle revolution. *Nature* Vol.626, pp. 248–251. Saatavissa (7.3.2024): <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00325-z>
- Molaiyan, P., Dos Reis, G.S., Karuppiyah, D., Subramaniam, C.M., García-Alvarado, F., Lassi, U. (2023). Recent Progress in Biomass-Derived Carbon Materials for Li-Ion and Na-Ion Batteries—A Review. *Batteries* Vol.9(116). Saatavissa (18.3.2024) <https://doi.org/10.3390/batteries9020116>
- Muneer, T., Kolhe, M. L., Doyle, A. (2017). *Electric vehicles: prospects and challenges*. Amsterdam: Elsevier. (pp. 93—105). Saatavissa (18.3.2024) <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=4913722>
- Steinstraeter, M., Heinrich, T., Lienkamp, M. (2021). Effect of low temperature on electric vehicle range. *World electric vehicle journal*. [Online] Vol.12(3), 115-. Saatavissa (2.2.2024): <https://www.proquest.com/docview/2576532241/fulltextPDF/8A7295266005440CPQ/1?accountid=14242&sourcetype=Scholarly%20Journals>
- Tieto.Traficom (2021). Liikenteen CO₂-päästöt liikennemuodoittain sekä maakunnittain (Päivitetty 10.11.2023) Saatavissa (9.2.2024): <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikenteen-co2-paastot-liikennemuodoittain-seka-maakunnittain?toggle=L%C3%A4hteet%20ja%20lis%C3%A4tiedot>
- Wang, C.-Y., Zhang G., Ge S., Xu T., Ji Y., Yang X.-G. & Leng Y. (2016). Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures. *Nature* Vol.529(7587). (Saatavissa 6.3.2024): <http://dx.doi.org.libproxy.tuni.fi/10.1038/nature16502>
- Wu, S., Xiong, R., Li, H., Nian, V., Ma, S. (2020). The state of the art on preheating lithium-ion batteries in cold weather. *Journal of energy storage*. Vol.27, [Online] 27101059-. Saatavissa (20.2.2024): <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101059>
- Zhang, P., Chen, Z., Shang, N., Wang, K., Zuo, Y., Wei, M., et al. (2023). Advances in polymer electrolytes for solid-state zinc-air batteries. *Materials chemistry frontiers*. Saatavissa (6.3.2024): <https://doi.org/10.1039/d3qm00337j>
- Zhang, X., Li, Z., Luo, L., Fan, Y., Du, Z. (2022). A review on thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy (Oxford)*. [Online] 238121652-. Saatavissa (13.2.2024): <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121652>