



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖAUTON TALVIKÄYTTÖ JA KYLMYYDEN VAIKUTUS AJOSÄTEESEEN

Sami Heikkinen

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2018



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖAUTON TALVIKÄYTTÖ JA KYLMYYDEN VAIKUTUS AJOSÄTEESEEN

Sami Heikkinen

Ohjaaja: Prof. Eva Pongrácz

PROSESSITEKNIikka

Kandidaatintyö

Huhtikuu 2018

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Prosessitekniikan tutkinto-ohjelma		Pääaineopintojen ala (lisensiaatintyö)	
Tekijä Heikkinen, Sami		Työn ohjaaja yliopistolla Pongrácz E, Professori	
Työn nimi Sähköauton talvikäyttö ja kylmyyden vaikutus ajosäteeseen			
Opintosuunta	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Huhtikuu 2018	Sivumäärä 35
<p>Tiivistelmä</p> <p>Sähköautot ovat yleistymässä myös Suomessa ja ne katsotaan yhtenä ratkaisuna liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Sähköautojen talvikäyttö on kuitenkin otettava huomioon. EU:n vaihtoehtoisten polttoaineiden lainsäädäntö ehdottaa latauspisteiden väliseksi etäisyydeksi 150 km. Tässä kandidaatintyössä kartoitettiin kylmän vaikutuksia sähköauton ajosäteeseen sekä akuston lataukseen. Tämän lisäksi selvitettiin miten talviolosuhteet olisi hyvä ottaa huomioon sähköautojen latauspisteiden maksimietäisyyden suunnittelussa. Tavoitteena oli selvittää, onko 150 km latauspisteiden välinen etäisyys järkevä Suomessa.</p> <p>Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena, johon sisältyi tieteellisiä julkaisuja sekä muita verkkolähteitä, kuten blogeja ja alan sivustoja. Työssä tehtiin katsaus nykyiseen sähköautokantaan, akustolta vaadittaviin ominaisuuksiin ja olemassa oleviin teknologioihin. Tämän jälkeen selvitettiin akuston ikääntymisprosesseja ja matalan käyttölämpötilan vaikutusta akun suorituskykyyn. Lopuksi tarkasteltiin sähköautojen käyttöä talviolosuhteissa ja tämän vaikutusta virrankulutukseen sekä ajosäteeseen testien ja alan julkaisujen pohjalta.</p> <p>Litiumioniakut ovat tällä hetkellä yleisin sähköautoissa käytetty akkuteknologia, mutta sillä on myös heikkoutensa. Tulevaisuudessa markkinoilla voidaan nähdä myös muita kilpailevia tekniikoita, kuten akustojen hybridiratkaisuja. Akuston elinikään vaikuttavat esimerkiksi kuinka tyhjäksi se puretaan ennen latausta ja missä lämpötilassa se ladataan.</p> <p>Kylmyydellä on selvä vaikutus ajosäteen lyhenemiseen, mutta vaikutuksen laajuus on vaikea määrittää. Talvikäytössä ilmastointilaitteella on suuri merkitys virrankulutukseen ja täten ajosäteen suuruuteen. Muita virrankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa auton esilämmitys, ajo-olosuhteet sekä kuljettajan ajotapa. Voitiin päätellä, että nykytekniikalla latauspisteiden välinen maksimietäisyys on arviolta 110-120 kilometriä.</p>			
Muita tietoja			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Process Engineering		Major Subject (Licentiate Thesis)	
Author Heikkinen, Sami		Thesis Supervisor Pongrácz E, Professor	
Title of Thesis Winter use of an electric cars and the impact of cold on driving range			
Major Subject	Type of Thesis Bachelor's Thesis	Submission Date April 2018	Number of Pages 35
<p>Abstract</p> <p>Electric cars are getting more common in Finland, and are considered one solution to reducing the greenhouse gas emissions associated with transportation. However, the conditions of winter use of electric cars need to be considered. The EU legislation on alternative transport suggests a 150 km range between charging points. In this bachelor's thesis, the impact of cold weather on electric car range and battery charge was surveyed. In addition, it was investigated how winter conditions should be considered when planning the maximum distance between recharging points. The objective was to determine whether 150 km between charging points is reasonable in Finland.</p> <p>The research method used in this thesis was literature review, which included scientific publications as well as other internet sources such as blogs and electric car related sites. In the work, the status of electric car fleet in Finland, car battery requirements and technologies were reviewed. Further, the aging processes and the impact of cold temperature on car batteries were also investigated. Lastly, based on test reports and publications, the impact of winter use on the range of electric cars and the state of battery charge were surveyed.</p> <p>At the moment, lithium-ion batteries are the most common technology for electric car use; but they have some critical weaknesses. In the future, other technologies such as hybrid battery solutions may emerge. Factors affecting battery life cycle are for example the depth of discharge before charging and the charging temperature.</p> <p>Cold temperatures have a clear impact on range shortening but the extent of impact is difficult to quantify. The use of a cabin heater has a significant impact on power consumption and thus the battery range. Other factors affecting power consumption are cabin preheating, driving conditions and the way of driving. It was concluded that, with the current battery technology, the maximum distance between charging points in Finland should be 110-120 kilometers.</p>			
Additional Information			

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	5
2 SÄHKÖAUTOT SUOMESSA JA NIISSÄ KÄYTETYT AKUT	7
2.1 Lyijyakut	9
2.2 Li-Ion.....	9
2.3 Nikkelimetallihydridi (NiMH) ja Nikkeli-kadmium (NiCd)	10
2.4 Natrium-nikkeli-kloridi (Na/NiCl ₂ , Zebra)	10
2.5 Rauta-ilma (Fe-Air) ja Sinkki-ilma (Zn-Air)	11
2.6 Superkondensaattori	11
3 AKKUJEN KESTO/VARAUS	13
3.1 Ikääntymisen vaikutukset akkuihin.....	13
3.2 Kylmän vaikutus akun varaukseen/lataukseen.....	14
4 SÄHKÖAUTOJEN KÄYTTÖ KYLMISSÄ OLOSUHTEISSA	16
4.1 Centrian talvitesti	17
4.2 FleetCarman keräämät tulokset.....	21
4.3 RekkEVIDde-projektin testit.....	22
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	25
6 YHTEENVETO	28
LÄHDELUETTELO.....	30

1 JOHDANTO

Sähköautojen rooli kasvaa myös Suomessa sitä mukaa, kun lähestytään Eurooppa-neuvoston määrittämää 60% kasvihuonepäästöjen vähentämistavoitetta liikenteen osalta. Suomen kylmät talvet herättävät epäilyksiä sähköautojen ja siinä käytetyn akkutekniikan riittävästä jokapäiväisessä talvikäytössä. Termi ”range anxiety” eli virran riittävyys koko matkan tekemiseksi on vallinnut sähköautoista puhuttaessa, eikä suotta. Kylmyyden vaikutus näkyy akun tavallista matalampana varauskapasiteettina ja hytin sekä akuston lämmittäminen vaatii oman osuutensa kokonaisvirrasta. Jotta sähköautot yleistyisivät entisestään, on kuluttajat saatava vakuuttumaan niiden pätevydestä myös talviautoina tutkimusten ja testien avulla.

Näiden lisäksi Suomi tarvitsee maan kattavan latausverkoston. Tämänhetkisen listauksen mukaan latauspisteitä on 981 kappaletta yhteensä 304 eri paikassa, joista valtaosa sijoittuu maan etelä- ja länsiosiin (Sähköinen liikenne 2017). Liikenne- ja viestintäministeriö on asettanut julkisten latauspisteiden minimitalvoitemääräksi vuodelle 2020 yhteensä 2000, josta 200 on pikalatauspisteitä. Latausinfrastruktuurin tavoitteena on kattaa muun muassa kaikki kunnat ja kaupungit sekä liikennekeskukset. Vuoden 2030 tavoite on vähintään 25 000 latauspistettä. Euroopan parlamentin ja neuvoston antaman direktiivin ohjearvo tankkauspisteiden väliseksi keskietäisyydeksi on noin 150 km, mitä voitaneen pitää myös mittapuuna latauspisteiden väliselle maksimietäisyydelle haja-asutusalueilla (Jääskeläinen 2017; Euroopan parlamentti ja neuvosto 2014).

Tämän työn tarkoituksena on saada vastaukset seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten kylmyys vaikuttaa sähköautoihin?
- Miten talviolosuhteet tulisi ottaa huomioon latauspisteiden välisessä maksimietäisyydessä?

Työssä tehdään ensin lyhyt katsaus sähköauton nykyisestä asemasta Suomessa ja millaisia ominaisuuksia sähköauton akuilta toivotaan. Tämän jälkeen tehdään katsaus tähän mennessä saatuihin tutkimustuloksiin eri akkuteknologioista sekä niiden sopivuudesta ja tulevaisuuden potentiaalisuudesta käytettäväksi tulevissa sähköautoissa. Jotta ymmärrettäisiin paremmin akuissa tapahtuvia muutoksia varauskyvyssä, käydään läpi itse lämpötilan vaikutuksia mutta myös akuissa ilmeneviä ikääntymisprosesseja.

Näiden tietojen pohjalta tutkitaan käytännön kokemuksia ja testejä sähköautojen akkukestosta talvikäytössä sekä millä tavoin sitä voitaisiin parantaa. Läpikäytyjen tulosten perusteella on tarkoitus saada vastaukset edellä mainittuihin tutkimuskysymyksiin sekä käsitellä muita esille tulleita havaintoja, joita olisi mahdollisesti syytä ottaa huomioon esimerkiksi latausverkostoa suunnitellessa. Työn tarkoituksena on selvittää, onko direktiivissä asetettu 150 km etäisyys sähköautojen latauspisteiden välillä riittävä Suomen talviolosuhteissa.

2 SÄHKÖAUTOT SUOMESSA JA NIISSÄ KÄYTETYT AKUT

Sähköautojen ja plug-in-hybridiautojen määrä automarkkinoilla on kasvanut hiljalleen ja yleistyvät yhä enemmän tekniikan kehittyessä ja hintojen pudotessa. Tällä hetkellä Trafin ajoneuvokannan mukaan Suomessa on tieliikennekäyttöön rekisteröity 1449 sähköhenkilöautoa 20 eri merkiltä. Näistä suosituimpia malleja ovat Tesla Motorsin Model S (523 kpl) ja Model X (129 kpl) sekä Nissan Leaf (389 kpl). Vastaavasti sähköpakettiautoja on rekisteröity 210 kpl 10 eri merkiltä. Näistä selkeästi suosituin on Nissan e-NV200 (143 kpl). (Trafi 2017a) Hintataso sähköautojen välillä vaihtelee parhaimmillaan kymmeniä tuhansia euroja taulukon 1 mukaisesti. Taulukoiduista malleista nähdään, että alle 40 000 € hintaluokassa ollaan saavutettu 40 kWh akkukapasiteetti, joka on selkeä parannus esimerkiksi vuosimallin 2013 Nissan Leafiin 24 kWh akustolla (Idaho National Laboratory 2014).

Taulukko 1. Suosituimpien sähköautojen akkukapasiteetit ja hinnat.

Valmistaja	Malli	Akun kapasiteetti (kWh)	Verollinen hinta alkaen (€)	Lähde
BMW	i3	27,2/33,2	41 829	BMW 2018
Nissan	Leaf 2018	40	35 900	Nissan 2018a
	E-NV200 Van	24	33 111	Nissan 2018b
	E-NV200 Evalia (henkilönkuljetus)	24	36 542	Nissan 2018c
Renault	Zoe	41	32 890	Renault 2018
Tesla	Model S	75/100	92 016	Tesla 2018a
	Model X	75/100	99 190	Tesla 2018b
Volkswagen	e-Golf	35,8	42 551	Volkswagen 2018

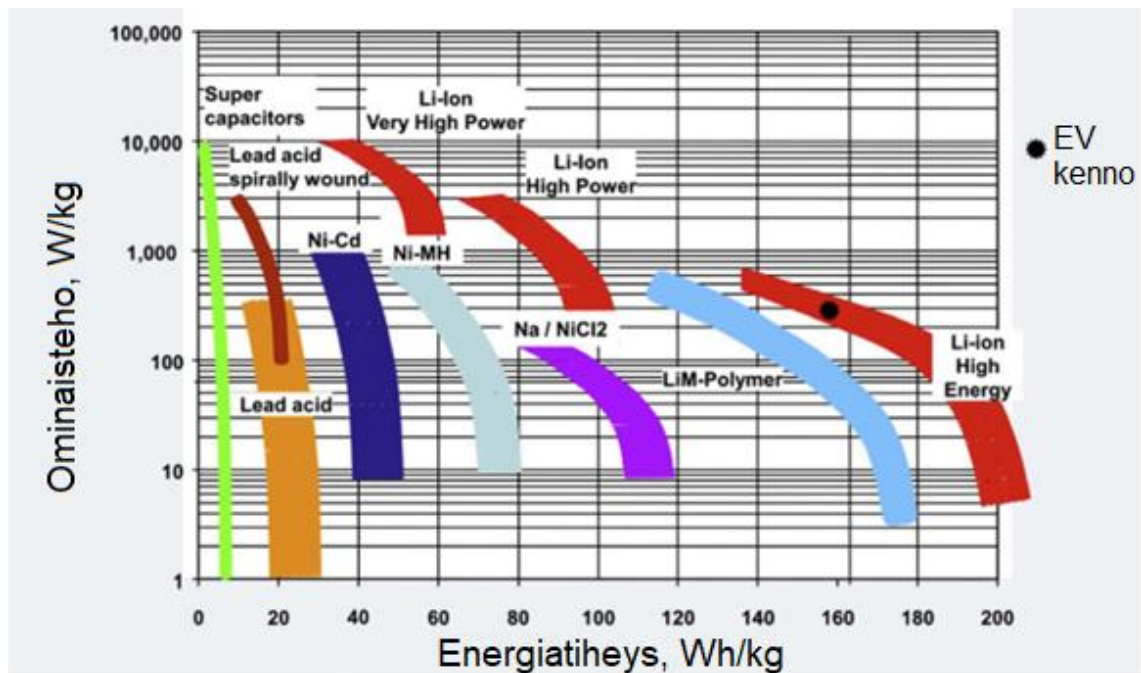
Varsinkin syrjäisemmissä maanosissa asuvat kuluttajat voivat pitää plug-in-hybridia vartenotettavampana vaihtoehtona niin latauspisteiden vähyyden, kuin myös suurten välimatkojen vuoksi. Ladattavia hybridihenkilöautoja on rekisteröity Suomessa yhteensä 5729 kappaletta. Trafin ajoneuvokannan perusteella varsinkin eri merkkien citymaasturimallit ovat suosittuja. (Trafi 2017a) Taulukosta 2 nähdään kuinka kolme suosituinta mallia edustavat eri hintaluokkia. Huomataan myös, että hybrideissä

käytetyn ajoakun kapasiteetti on selkeästi vaatimattomampi täysin sähköllä toimivaan verrattuna.

Taulukko 2. Suosituimpien plug-in-hybridien akkukapasiteetit ja hinnat.

Valmistaja	Malli	Akun kapasiteetti (kWh)	Verollinen hinta alkaen (€)	Lähde
Mercedes-Benz	350 e 4Matic	8,7	60 316	Mercedes-Benz 2018
Mitsubishi	Outlander PHEV	12	48 406	Mitsubishi 2018
Volvo	XC90 T8 Hybrid	9,2	90 036	Volvo 2018

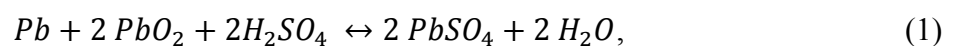
Akulta vaaditaan tietynlaisia ominaisuuksia ollakseen käyttökelpoinen sähköautoissa. Näitä vaadittuja piirteitä ovat muun muassa riittävä energiatiheys, ominaisteho, sietokyky lämmönvaihteluille, turvallisuus, materiaalien saatavuus ja taloudellisesti kannattava hinta. Energiatiheys on akun koon kannalta tärkeä, koska suuri energiatiheys mahdollistaa kevyemmän akun varattuun energiakapasiteettiin nähden. Ominaisteho on tärkeä etenkin kiihdyttäessä, kun energiaa tarvitaan paljon lyhyessä ajassa. Lämmönvaihtelun sietokyky määrää millaisen lämmönhallintajärjestelmän akku vaatii toimiakseen niin pakkupakkasilla kuin kesähelteellä. Turvallisuus on hyvin tärkeä ominaisuus päivittäisen käytön kannalta. Onnettomuustilanteissa stabiililla akulla vältetään lisävahingoilta ja vähemmän haitallisia materiaaleja sisältävä akku on myös helpompi kierrättää/hävittää. Myös valmistuksen kannalta olisi tärkeää, että materiaalien saatavuus on vakaa ja valmistaminen on taloudellisesti kannattavaa. Kuvassa 1 esitetään yleisimpien akkutyypin ominaisuuksia niin energiatiheyden kuin ominaistehon osalta.



Kuva 1. Akkutyypin energiatiheydet sekä ominaistehot (mukaillen Mahmoudzadeh Andwari et al. 2017).

2.1 Lyijyakut

Lyijyakut ovat olleet käytössä jo vuodesta 1860. Autoteollisuudessa niitä käytetään etenkin polttomoottorillisten autojen käynnistysakkuna. Tekniikka on tunnettu sen kestävydestä, turvallisuudesta, edullisesta hinnasta sekä lämmönsietokyvystä. Akku koostuu kahdesta lyijy-elektrodista ja elektrolyytinä toimivasta rikkihaposta. Akussa tapahtuva reaktio (1) on seuraava:



missä akun purkautuessa muodostuu $PbSO_4$ ja vapautuu vettä. Akun käyttöikä on 6-15 vuotta 200 lataussyklillä (Hannan et al. 2017) Näiden akkujen energiatiheys on matala, tyypillisesti 20-40 Wh/kg. Litiumioniakkuihin verrattuna ero energiatiheydessä on huomattava: Esimerkiksi 200 km ajomatkalle tarvittavan noin 150 kg litiumioniakuston korvaamiseksi tarvittaisiin 500 kg lyijyakkuja. (Mahmoudzadeh Andwari et al. 2017)

2.2 Li-Ion

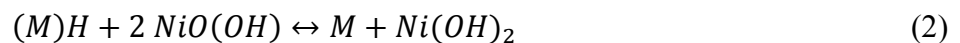
Litiumioniakkuja on pidetty lupaavimpana teknologiana ja siksi se on myös tutkituin akkutyyppejä. Sen energiatiheys on suuri litiumin keveyden ja korkean elektrokemikaalisen potentiaalin vuoksi. (Mahmoudzadeh Andwari et al. 2017) Li-ion akussa positiivisesti varatut litiumionit liikkuvat elektrolyytissä anodin ja katodin

välillä. Anodi ja katodi ovat pääosin valmistettu grafiitista tai piistä. Tutkimusten perusteella hiilinanoputkista valmistettujen elektrodien avulla pystyttäisiin lisäämään akkujen kapasiteettia. Hyödyntämällä erityisellä menetelmällä käsiteltyjä ohuita hiilinanoputkikerroksia voi saatu voimansiirto olla jopa kymmenkertainen. Elektrodit valmistetaan kerroksittain upottamalla pohjamateriaali käsiteltyjä hiilinanoputkia sisältäviin liuoksiin joko hieman positiivisen tai negatiivisen varauksen saamiseksi, jolloin vastakkaisten varausten magneettiset voimat vetävät niitä toisiinsa. (Kumar & Revankar 2017)

Litiumioniteknologian etuja ovat tehokkuus, pitkäikäisyys sekä hyvä kehityspotentiaali. Negatiivisia puolia ovat turvallisuusongelmat, materiaalien epävarma riittävyys pitkällä aikavälillä sekä tekniikan kallis hinta. Turvallisuusriskeistä merkittävin on akun ylilatauksesta johtuvat tulipalot. Litiumia hyödyntäviä akkuja on useita eri tyyppisiä ja niiden hyvät ja huonot puolet vaihtelevat. (Mahmoudzadeh Andwari et al. 2017)

2.3 Nikkelimetallihydridi (NiMH) ja Nikkeli-kadmium (NiCd)

NiMH-tekniikkaa on käytetty etenkin hybridautoissa, joista ehkäpä tunnetuin on Toyota Prius. Akkutyypin etuja ovat pieni muisti-ilmiö, huoltovapaus, pienet ympäristövaikutukset sekä hyvä lämmönsietokyky. Akussa tapahtuu yhtälön (2) mukainen reaktio:



Huonoja puolia ovat käytön yhteydessä syntyvä lämpö sekä lataaminen vaatii kalliin laturin. (Hannan et al. 2017) Teknologia on saavuttanut suurimman potentiaalinsa niin hinnan ja ominaisuuksien puolesta, ollen Li-Ionia taloudellisempi. Saavutettu 60-80 Wh/kg energiatiheys on todettu riittämättömäksi käyttöön sähköautoissa. (Mahmoudzadeh Andwari et al. 2017)

Nikkeli-kadmium -akun energiatiheys on 30-50 Wh/kg ja se on 10 kertaa kalliimpi lyijyakkuun verrattuna. Toisin kuin NiMH, siinä on suuri muisti-ilmiö sekä myrkylliset aineet vaikeuttavat kierrätystä. (Hannan et al. 2017)

2.4 Natrium-nikkeli-kloridi (Na/NiCl₂, Zebra)

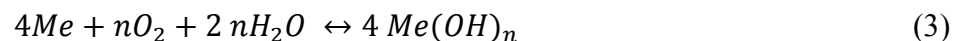
Tekniikan etuja ovat sen turvallisuus, edullinen hinta ja pitkä käyttöikä. Li-Ionista poiketen akun varauskapasiteetti ei huonone, vaikka sen varaus tyhjennetään lähes

kokonaan. Vaikka akun energiatiheys on verrattavissa Li-Ioniin (120 Wh/kg), sen ominaisteho on huomattavasti matalampi (150W/kg). Tämän takia akkutyyppejä ei sovellu yksinomaan sähköautojen käyttövoiman varastointiin, mutta sillä on käyttöpotentiaalia superkondensaattoriin yhdistettynä. (Mahmoudzadeh Andwari et al. 2017)

2.5 Rauta-ilma (Fe-Air) ja Sinkki-ilma (Zn-Air)

Rauta-ilma akku on potentiaalinen vaihtoehto sähköautojen akuksi. Energiatehdydeltään se on matala (60-75 Wh/kg), pienikustannuksinen elinkaarensa aikana, muotoa muuttamaton ja metalli-ilma akuista edullisin valmistaa. (Hannan et al. 2017)

Sinkki-ilma akku sähköisesti sekä mekaanisesti ladattava akkuteknologia, jossa on tavanomaiset kennot sekä useita polttoainekennomaisia ominaisuuksia. Akussa tapahtuvaa reaktiota säädetään muuttuvalla ilmavirralla. Sähköisesti ladattavassa akussa on kaksitoiminen ilmaelektrodi elinkaaren lisäämiseksi. Mekaanisesti ladattavassa akussa on anodi, joka voidaan vaihtaa uuteen purkautuneen tilalle muodonmuutosten välttämiseksi. Hybridiratkaisuna energiatehdydeltään korkea Zn-Air akku voidaan liittää lyijyakkuun, jossa on korkea ominaisteho. Yleinen metalli-ilma akussa tapahtuva reaktioyhtälö (3) on muotoa:



missä Me on metalli ja n hapettuvan metallin valenssimuutoksesta riippuva arvo. (Hannan et al. 2017)

2.6 Superkondensaattori

Superkondensaattoreita on kehitetty vuodesta 1990 lähtien. Niissä energianvarastointi toteutetaan erottamalla positiivinen ja negatiivinen varaus toisistaan kahdelle rinnakkaiselle levyille, joiden välissä on eriste. Superkondensaattoreiden hyötyjä ovat korkea ominaisteho (1000-2000 W/kg) ja pitkä elinikä, mutta niiden matalan energiatehdyden (5-7 Wh/kg) takia ne eivät sovellu yksinomaan sähköauton käyttövoiman varastointiin. Superkondensaattorin ja akun kytkeminen DC/DC konverterilla on potentiaalinen ratkaisu, jolloin superkondensaattori tasoittaa akun energiansyöttöä. Virranvaihtelun tasoittuminen vähentää samalla akussa tapahtuvaa lämmönvaihtelua, mikä taas edistää akun elinikää. Nopeiden lataus- ja purkausnopeuksien ansiosta ne ovat hyödyllisiä osana regeneroivaa jarrutusta ja

nopeaan voimansyöttöön autoa kiihdyttäessä. (Mahmoudzadeh Andwari et al. 2017; Kumar & Revankar 2017; Hannan et al. 2017)

ZEBRA-akun ja superkondensaattorin yhdistelmää tutkimalla on saatu lupaavia tuloksia. Yhdistelmän etuja litiumioniakkuun verrattuna ovat kolme kertaa edullisempi hinta, eikä sen valmistamiseen vaadita harvinaisia materiaaleja. Sen heikkouksia kuitenkin ovat noin kolme kertaa pienempi ominaisteho ja superkondensaattorin rajoittunut pitkäaikainen voimansyöttö esimerkiksi mäen päälle noustessa. (Mahmoudzadeh Andwari et al. 2017)

3 AKKUJEN KESTO/VARAUS

3.1 Ikääntymisen vaikutukset akkuihin

Akun ikääntyminen vaikuttaa tämän toimintaan. Ensimmäiseksi tämä ilmenee elektrolyytin ja elektrodien rajapinnalla, mikä johtuu kennon elektrolyytin kemiallisesta koostumuksesta. Ikääntyminen voi olla mekaanista tai kemiallista ja se on pitkälti riippuvainen elektrodien rakenteesta/koostumuksesta. Kaksi päävaikutusta ovat impedanssin kasvu ja kapasiteetin heikkeneminen (Aurbach et al. 2004; Jaguemont et al. 2016; Zhang & White 2008).

Kiinteä elektrolyytti-interfaasi (SEI) eli niin sanottu passivointikerros muodostuu anodin pinnalle kasvattaen anodin impedanssia. Muodostuminen alkaa ikääntymisen alkuvaiheessa ja sen kasvu jatkuu akun käytön myötä. SEI kasvaa anodilla elektrolyytin hapettuessa oksidipintarakenteeksi, minkä johdosta akussa kierrätettävän litiumin määrä vähenee. Anodin impedanssi kasvaa sitä mukaa kun kontaktipinta pienenee. (Lu et al. 2014; Jaguemont et al. 2016) Tämän lisäksi elektrodeissa tapahtuu materiaalin liukenemista, rakenteellista hajoamista ja epäjärjestäytymistä. Aktiivisen materiaalin vähenemisestä aiheutuvan kapasiteetin heikentymisen lisäksi akun resistanssin kasvu voivat vaikuttaa suoraan tehonheikkenemiseen. (Li et al. 2001; Jaguemont et al. 2016)

Kaksi akuissa ilmenevää ikääntymistyyppiä ovat kalenteri- ja sykli-ikäntyminen. Kalenteri-ikäntymisellä viitataan akun varastointiin ja sen aikana pysyvästi katoavaan kapasiteettiin, joka aiheutuu käytön vähyydestä. (Ji & Wang 2013; Whitacre et al. 2006) Korkea säilytyslämpötila nopeuttaa sivureaktioita kuten metallin liukenemista, mikä nopeuttaa akun kapasiteetin heikkenemistä. Toinen merkitsevä tekijä on kennon varauksen taso. Korkea varaustaso merkitsee yleisesti suurempaa litium-ionien määrää elektrodeilla, mikä taas edistää SEI:n muodostumista. (Belt et al. 2011; Jaguemont et al. 2016)

Sykli-ikäntyminen ilmenee, kun kennoa ladataan tai sen varausta puretaan. Samat edellä mainitut tekijät ovat myös osallisina sykli-ikäntymisessä eli yleensä korkeat lämpötilat lisäävät latauskapasiteetin menetystä sekä impedanssin kasvua. (Ping et al. 2014; Jaguemont et al. 2016) Korkean lämpötilan lisäksi erittäin kylmät olosuhteet lisäävät metallisen litiumin muodostumista elektrodien pinnalle. Kennon varauksella on tässä tapauksessa suuri merkitys, koska pahimmillaan ikääntyminen voi olla hyvin

nopeaa. (Jaguemont et al. 2016) Myös akun virran purkamisen määrällä ennen seuraavaa latausta on merkitystä. Tutkimuksessa verrattiin Li-ioni akkujen käyttäytymistä pitkäaikaisessa käytössä purkamalla niiden varaukset tietylle tasolle ennen seuraavaa latausta. Tulosten perusteella voitiin todeta selkeä ero akkujen varauskapasiteeteissa samalla määrällä purkaukertoja. Täysin tyhjäksi puretussa akussa oli huomattavasti enemmän kapasiteettihäviötä verrattuna 30% tasolle purettuun akkuun. (Shim & Striebel 2003; Jaguemont et al. 2016) Myös korkean latausjännitteen on todettu vaikuttavan akuston nopeaan ikääntymiseen (Kötz et al. 2010).

Tehtyjen tutkimusten perusteella on voitu todeta tarve kehittyneille mallipohjaisille lämmönhallintastrategioille. Näitä malleja hyödyntämällä saadaan parempi ymmärrys muun muassa akun heikkenemisen syistä ja sen muista sisäisistä prosesseista, mitkä mahdollistavat optimaalisen suorituskyvyn ja eliniän. (Jaguemont et al. 2016)

3.2 Kylmän vaikutus akun varaukseen/lataukseen

Li-ioni akkujen elinikä ja suorituskyky ovat riippuvaisia niiden käyttölämpötiloista. Matalan lämpötilan vaikutuksille on useita syitä. Elektrolyytin sisäinen vastus kasvaa merkittävästi kylmässä, jolloin litium-ionien liike hidastuu huonontuen johtokykyä. Tämän minimoimiseksi on kehitetty matalan lämpötilan elektrolyyttejä, joilla on sekä matala jäätympiste että korkea ioninen johtokyky. (Jaguemont et al. 2016; Herreyre et al. 2001) Varsinkin karbonaattipohjaiset elektrolyytit ovat todettu johtokyvyltään hyväksi. Akun kylmänsieto on myös riippuvainen kennon rakenteesta, elektrodien paksuudesta, separaattorin huokoisuudesta sekä sen ominaisuuksista märkänä. (Jaguemont et al. 2016) Eräässä tutkimuksessa verrattiin Li-ioni kennon varauskapasiteettia huoneenlämmössä ja -20 °C lämpötilassa. Tulosten perusteella voitiin todeta, että kennon varaama energiamäärä kylmässä oli 60% huoneenlämpöiseen verrattuna. (Bugga et al. 2007)

$LiBF_4$ -pohjaista elektrolyyttiä tutkiessa on huomattu, että sen varauksensiirtovastus kasvaa huomattavasti lämpötilan pudotessa alle -20 °C . (Zhang et al. 2002b, Jaguemont et al. 2016 mukaan) Korkea varauksensiirtovastus ilmenee akussa siten, että sen lataaminen on ongelmallisempaa kuin ladatun akun varauksen purkaminen. Tämän ilmiön päätekijä on grafiittinen anodi, jossa on todettu tapahtuvan Li^+ -diffuusio. (Jaguemont et al. 2016; Huang et al. 2000) Tutkimalla kennon kemiallista

diffuusiokerrointa huomattiin selkeä litium-ionien diffusiviteetin lasku 0 °C ja sitä matalammilla lämpötiloilla. Toinen saatu tulos oli, että litium-ioneilla oli matalampi diffusiviteetti litiumittomassa grafiitissa (purkautunut tila) kuin litiumillisessa grafiitissa (ladattu tila) kylmällä lämpötilalla. Näiden seikkojen perusteella on voitu todeta purkautuneen kennon lataamisen olevan ladatun kennon purkamista vaikeampaa. (Zhang et al. 2002a, Jaguemont et al. 2016 mukaan)

Pakkasella akun sisäisen resistanssin kasvaessa maksimijännite saavutetaan aikaisemmin. Korkeammalla jännitteellä akusto voi vaurioitua, minkä takia latausvirran suuruutta on pienennettävä, jolloin myös latausaika pitenee. Lindgrenin ja Lundin laatiman mallin mukaan -10 °C lämpötilassa latausaika voi olla jopa yli 100%, jos akustoa ei ole lämmitetty. Latausaikaa voidaan lyhentää tuossa lämpötilassa noin 28% akuston aktiivisen lämmönhallintajärjestelmän ja matkustamon esilämmittimen ollessa käytössä. Ajon aikana minimijännite saavutetaan aikaisemmin, jolloin virranottoa on pienennettävä, mikä taas huonontaa auton kiihtyvyyttä. (Lindgren & Lund 2016)

4 SÄHKÖAUTOJEN KÄYTTÖ KYLMISSÄ OLOSUHTEISSA

Tieteellisiä julkaisuja sähköautojen akkukeston kylmissä olosuhteissa on niukasti, joten tässä kappaleessa asiaa käsitellään vapaamuotoisemmin myös alan uutissivustojen julkaisuihin ja blogeihin pohjautuen.

Toisin kuin tavanomaisessa polttomoottorilla toimivassa autossa, jossa moottorissa tuotettu lämpö ohjataan sisätilaan, ei sähköauton moottorin lämpö riitä yksinomaan lämmittämään matkustamoä kylmällä säällä. Tämän takia lämmitykseen täytyy hyödyntää lämpövastusta tai -pumppua, mitkä lisäävät sähkönkulutusta ja täten vähentävät ajokilometrejä. (Reichmuth 2016) Boschin vuonna 2015 esittelemä lämpöpumppua hyödyntävä lämmönhallintajärjestelmä perustuu jäähdytysnesteen sitoutuvaan lämpöön. Järjestelmään pohjautuen 1000 W lämpöpumppu pystyy heidän mukaansa tuottamaan 2000-3000 W lämpöekvivalentin ja järjestelmällä saavutetaan jopa 25% suurempi ajomatka. Hyödynnettävää lämpöä saadaan sähkömoottorin lisäksi esimerkiksi auton tehoelektronikasta ja jarrutusenergiaa muuttaessa sähköksi. Matkustamon lisäksi lämmönhallintajärjestelmä on usein suunniteltu säätelemään akuston lämpötilaa. (Reichmuth 2016; Green Car Congress 2015) Tesla hyödyntää Model S mallissaan syntyvän hukkalämmön ainoastaan akun lämmittämiseen sille omalla lämmitys/jäähdytyskierrolla. (Bower 2016)

Toimintasäteen parantamiseksi auto ja akusto on hyvä esilämmittää jo latausvaiheessa, jolloin ajolle lähdettäessä lämmitykseen tarvittavaa virtaa vaaditaan vähemmän. Muita teknisiä ratkaisuja ovat muun muassa korkean hyötysuhteen lämpöpumppu lämpövastusten sijaan sekä sähkömoottorissa ja tehonsäätöelektronikassa syntyvän lämmön hyödyntäminen. (Reichmuth 2016)

Sähkölämmitteisiä istuimia hyödyntämällä voidaan säästää energiaa täysin ilmalla lämmitettyyn hyttiin verrattuna säilyttäen kohtuullinen ajomukavuus. Muita käytännöllisiä huomioonotettavia asioita ovat ajonopeuden pitäminen tasaisena, voimakkaiden kiihdytysten välttäminen, oikea rengaspaine sekä aerodynamiikkaa haittaavien ulkoisten lisävarusteiden poistaminen, kun niille ei ole käyttöä. (Schaal 2017)

Li-ion akuilla on kaksi teknistä ongelmaa talvikäytössä. Regeneratiivinen jarrutus on rajoitettava tai kytkettävä kokonaan pois päältä metallisen litiumin muodostumisen välttämiseksi anodin pinnalle, mikä lyhentäisi akun ikää ja lisäisi turvallisuusvaaroja. (Zhang, Ge et al. 2017) Toisekseen, kuten aiemmin on jo mainittu, akun suorituskyky heikkenee huomattavasti vallitsevan lämpötilan laskiessa matalille pakkasasteille.

4.1 Centrian talvitesti

J. Heikkilän Centria-ammattikorkeakoululle tekemässä talvitestissä tutkittiin sähköauton ajosäteen sekä akusta saatavien lukemien kehitystä kolmella eri reitillä ulkolämpötilan vaihdellessa 0 ... -23 °C välillä. Tuloksissa ilmoitettu akuston varaus on auton järjestelmän ilmoittama varauksen määrä, kun taas SOC on suoraan akuston CAN-väylästä luettu arvo. (Heikkilä 2013) State of charge (SOC) eli varaustila kertoo prosenttimääräisen varauksen akuston maksimikapasiteetista (Murnane & Ghazel 2017). Rivillä ”Ajosäteen muutos/matka” verrataan auton järjestelmän ilmoittaman matkalukeman suhdetta todelliseen ajomatkaan. Esilämmitys-rivillä termillä ”Auto lämmin” tarkoitetaan, että autolla on jo ajettu ennen kyseistä ajoa.

42,3 km pitkällä reitti 1:llä testejä suoritettiin yhteensä kaksi: ensimmäinen auto esilämmitettynä -2 ... -5 °C ja toinen esilämmittämättömänä -14 ... -17 °C lämpötiloissa. Testin tuloksia on nähtävissä taulukosta 3. Saatujen tulosten perusteella esilämmityksestä oli hyötyä esilämmittämättömään verrattuna. Tämä ilmeni SOC:n alussa matalampana, mutta ajon lopussa korkeampana arvona sekä pienempänä akustosta otetun virran keskiarvona. Yhtä ajokilometriä kohden auton ilmoittama ajosäde laski 1,8-2 km. (Heikkilä 2013)

Taulukko 3. Testituloksia 42,3 km matkalla (mukaiillen Heikkilä 2013).

Päivämäärä	10.1.2013	11.1.2013
Aika	14:08-14:59	09:05-09:55
Keskinopeus (km/h)	56,2	56,5
Ulkolämpötila alussa (°C)	-2	-14
Ulkolämpötila lopussa (°C)	-5	-16
Esilämmitys	Kyllä	Ei
Asetettu sisälämpötila (°C)	20	20
Ilmastointilaitteen kWh	1,6 – 2,5	2,9 – 4,5
Akuston varaus alussa (%)	100	100
Akuston varaus lopussa (%)	41,6	33,3
Varauksen muutos (%)	58,4	66,7
SOC alussa (%)	88	91,6
SOC lopussa (%)	45,1	40,8
SOC muutos (%)	42,9	50,8
Ajosäde alussa (km)	116	117
Ajosäde lopussa (km)	40	30
Ajosäteen muutos (km)	76	87
Ajosäteen muutos/matka	1,8	2

Reitillä 2, jonka pituus oli 34,4 km, tehtiin seitsemän testiajoa. Kolme testeistä tehtiin -8 °C , kaksi 0 °C sekä kaksi yksittäistä ajoa $-18 \dots -20\text{ °C}$ ja -23 °C ulkolämpötilassa. Testin tuloksia on nähtävissä taulukosta 4. $-8 \dots -20\text{ °C}$ lämpötilavälillä havaittiin selkeitä suorituskykyeroja. Havainnot olivat SOC:n putoaminen 10% enemmän -20 °C lämpötilassa, matalampi akuston jännite, suurempi akuston virranoton määrä sekä nopeampi auton ilmoittaman ajosäteen nopeampi lasku. Sisälämpötilan matalammalla asetuksella oli pienentävä vaikutus ilmastointilaitteen energiankulutukseen: -8 °C ulkolämpötilassa asetuksella 16 °C ilmastointilaitte kulutti vähemmän kuin 0 °C ulkolämpötilassa asetuksella 20 °C . Myös näissä testeissä huomattiin SOC:n pienempi lasku esilämmitetyllä autolla esilämmittämättömään verrattuna. (Heikkilä 2013)

Taulukko 4. Testituloksia 34,4 km matkalla (mukailten Heikkilä 2013).

Päivämäärä	15.1.2 013	15.1. 2013	15.1. 2013	16.1. 2013	17.1. 2013	29.1. 2013	29.1. 2013
Aika	08:59- 09:34	13:51- 14:27	14:31- 15:05	13:50- 14:30	09:01- 09:36	11:58- 12:32	12:37- 13:11
Keskinopeus (km/h)	65,6	63,9	65,4	64,9	63,3	-	-
Ulkolämpötila alussa (°C)	-8	-8	-8	-18	-23	0	0
Ulkolämpötila lopussa (°C)	-8	-8	-8	-20	-23	0	0
Esilämmitys	Ei	Kyllä	Auto lämmin	Ei	Kyllä	Ei	Auto lämmin
Asetettu sisälämpötila (°C)	20	16	Pois päältä	20	20	20	20
Ilmastointilaitteen kWh	2,4	0,8 - 1	-	3,1 - 5	3,8 - 4	1,6 – 4,6	1,6
Akuston varaus alussa (%)	100	91,6	58,3	100	100	100	58,3
Akuston varaus lopussa (%)	58,3	58,3	25	50	33,3	58,3	16,6
Varauksen muutos (%)	41,7	33,3	33,3	50	66,7	41,7	41,7
SOC alussa (%)	88,9	85,8	58,1	91,6	84,5	91,1	58,5
SOC lopussa (%)	56,7	58,3	33,3	49,4	45,7	58,5	28
SOC muutos (%)	32,2	27,5	24,8	42,2	38,8	32,6	30,5
Ajosäde alussa (km)	104	109	77	117	87	119	64
Ajosäde lopussa (km)	54	77	29	44	31	64	18
Ajosäteen muutos (km)	50	32	48	73	56	55	46
Ajosäteen muutos/ matka	1,4	0,9	1,4	2,1	1,6	1,6	1,3

Kolmannella reitillä tutkittiin, onko kaupunkiajon kulutuksessa eroa matka-ajoon. Taulukosta 5 nähdään yksittäisten kierrosten jälkeiset tulokset ja taulukossa 6 on tilanne koko testin alussa ja lopussa. Neljän peräkkäisen 9,2 km kaupunkireittikierron saatujen tulosten perusteella ei huomattu suuria eroja energiankulutuksessa kaupunkiajon ja matka-ajon välillä. Merkittäviä eroja kierrosten välillä ei huomattu pois lukien ensimmäisellä kierroksella kylmästä autosta johtuneet suurempi SOC:n, ajosäteen ja jännitteen lasku. (Heikkilä 2013)

Taulukko 5. Testituloksia 9,2 km reitiltä -22 °C ulkolämpötilassa (mukaiillen Heikkilä 2013).

Aika	14:15- 14:36	14:36-14:55	14:55-15:14	15:14-15:32
Esilämmitys	Ei	Auto lämmin	Auto lämmin	Auto lämmin
Asetettu sisälämpötila °C	20	20	20	20
Ilmastointilaitteen kWh	4,2	4,2	4	3,7
Akuston varaus alussa (%)	83,3	75	58,3	33,3
Akuston varaus lopussa (%)	75	58,3	33,3	16,6
Varauksen muutos (%)	8,3	16,7	25	16,7
SOC alussa (%)	79	67,3	56,2	45,6
SOC lopussa (%)	67,3	56,2	45,6	34,8
SOC muutos (%)	11,7	11,1	10,6	10,8
Ajosäde alussa (km)	85	62	48	32
Ajosäde lopussa (km)	62	48	32	18
Ajosäteen muutos (km)	23	14	16	14
Ajosäteen muutos/matka	2,5	1,5	1,7	1,5

Taulukko 6. Testituloksia kun 9,2 km reitti on kierretty neljä kertaa (mukaiillen Heikkilä 2013).

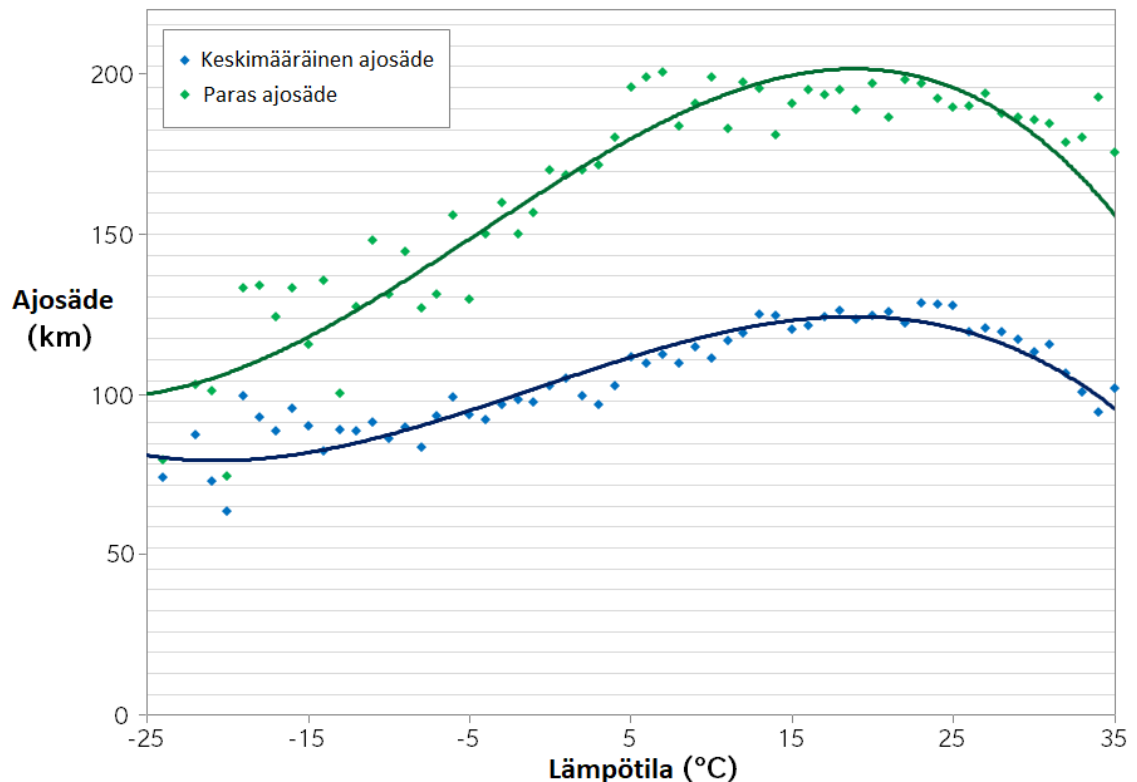
Matka (km)	36,8
Keskinopeus (km/h)	32,3
Ulkolämpötila alussa (°C)	-22
Ulkolämpötila lopussa (°C)	-2
Esilämmitys	Ei
Asetettu sisälämpötila (°C)	20
Ilmastointilaitteen kWh	3,7 – 4,5
Akuston varaus alussa (%)	83,3
Akuston varaus lopussa (%)	16,6
Varauksen muutos (%)	66,7
SOC alussa (%)	79
SOC lopussa (%)	34,8
SOC muutos (%)	44,2
Ajosäde alussa (km)	85
Ajosäde lopussa (km)	18
Ajosäteen muutos (km)	67
Ajosäteen muutos/matka	1,8

4.2 FleetCarman keräämät tulokset

FleetCarman julkaisi vuonna 2013 kuvaajan Nissan Leafin ajosäteestä eri lämpötiloissa ajoneuvoihin asennettujen lokilaitteiden keräämän tiedon perusteella. Mittauksia oli kaiken kaikkiaan 7375 matkalta aina -25 °C pakkasesta $+35\text{ °C}$ helteeseen ja niistä saatu kuvaaja on esitetty kuva 2:ssa. Kuvaajasta nähdään, että lämpötilalla on selvästi merkitystä etenkin parhaan ajosäteen suhteen, kun ulkolämpötila lähestyy 0 °C . Keskiverto ajomatka -15 °C lämpötilassa asettuu kutakuinkin 75–80 kilometriin, kun taas -5 °C lämpötilassa tulos on noin 95 kilometriä. Näissä lämpötiloissa parhaat ajomatkat asettuvat noin 120 ja 150 kilometrin paikkeille.

Pääosin parhaan ja keskimääräisen ajosäteen välillä on selkeä ero. Tämä selittyy osittain seurattujen autojen ja kuljettajien suuresta määrästä. Muuttujia voivat olla esimerkiksi kuljettajan regeneratiivisen jarrituksen mahdollisimman suuri käyttö ja yleisesti energiatehokas ajostrategia sekä auton esilämmitys. (Allen 2013)

−5 ... −25 °C lämpötilavälillä saatuja tuloksia tarkastellessa huomataan suurta sisäistä vaihtelua niin parhaassa, että keskimääräisessä ajosäteessä, kun taas tätä lämpimämmissä olosuhteissa arvot kulkevat kutakuinkin piirretyn käyrän mukaisesti. Huomionarvoinen yksityiskohta on myös se, että ajosäde alkaa pienentyä lämpötilan noustessa yli +25 °C. Tulosten perusteella voidaan sanoa, että lämpötilalla on huomattava vaikutus ajosäteen suuruuteen, mutta itse vaikutuksen suuruutta on vaikea määrittää edellä mainituista syistä (Allen 2013).



Kuva 2. Nissan Leafin ajosäde eri lämpötiloissa 7375 matkalta sisältäen kaikki vuosimallit (mukaiillen Allen 2013).

4.3 RekkEVIDde-projektin testit

Osana RekkEVIDde-projektia VTT teki laboratoriotestejä muun muassa tienpinnan vaikutuksesta kulutukseen. Testeissä käytettiin taulukon 7 mukaisia käyttäjäksi Citroën C-Zero sähköautolla −20 °C lämpötilassa. Tienpinta otettiin laskennallisesti huomioon jo aiemmin TSS:n toimesta määritettyjen kertoimien avulla. Taulukon 8 arvoista nähdään kuinka tienpinta vaikuttaa kulutuksellisesti vähän nopealla ajolla, kun taas Helsinki City -käyttäjäksi pysähdykset ja matala ajonopeus nostavat suuremman vierintävastuksen kanssa kulutusta melkein 20%.

Taulukko 7. VTT:n laboratoriotutkimuksissa käyttämiä käyttöjaksoja (mukaiillen Haakana et al. 2013).

Käyttö jakso	Matka (km)	Keskinopeus (km/h)	Maksimi nopeus (km/h)	Pysähdykset kierron aikana	Kokonais aika (s)
NEDC	11,007	33,6	120	12	1180
Helsinki City	6,600	19,1	55	17	1360
Road, FIN	24,800	81,3	120	1	1370

Taulukko 8. Tienpinnan vaikutukset $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ vallitsevassa lämpötilassa (kWh/km) (mukaiillen Haakana et al. 2013).

Tienpinnan tyyppi	Asfaltti	Vanha lumi	Uusi lumi
NEDC	0,192	0,196	0,201
Helsinki City	0,173	0,211	0,208
Road, FIN	0,251	0,267	0,267

TSS testasi sähköautojen ominaisuuksia 3,140 km ympyräradalla Älvsbyssä Ruotsissa. Testit suoritettiin $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ulkolämpötilassa maksiminopeuden ollessa 100 km/h. Kenttätestissä Citroën C-Zeron saatu energiankulutus oli 0,37 kWh/km, joka oli 111% verrattuna VTT:n samanlaisella autolla tehtyihin laboratoriotesteihin. Nissan Leafilla päästiin lähemmäksi laboratoriotuloksia kulutuksen ollessa 0,46 kWh/km, joka oli 105% VTT:n tulokseen nähden. Kenttätestin tulokset voitiin tässä tapauksessa todeta olevan hieman laboratoriotestien tuloksia korkeammat. (Haakana et al. 2013)

Taulukoista 9 ja 10 nähdään myös testitulokset lämmittimen vaikutuksesta energiankulutukseen. Molemmissa automalleissa havaitaan lämmittimen suuri osuus kulutuksesta, joka pienenee ajonopeuden kasvaessa. Lämmittimen vaikutus havaittiin olevan pienempi Citroën C-Zeroon verrattuna. (Haakana et al. 2013)

Taulukko 9. Lämmittimen vaikutus energiankulutukseen Citroën C-Zerossa (mukailten Haakana et al. 2013).

km/h	Ilman lämmitystä kWh/km	Lämmitys päällä kWh/km	Lämmittimen vaikutus
50	0,107	0,174	+63%
70	0,136	0,187	+38%
90	0,187	0,242	+29%
120	0,232	0,289	+25%

Taulukko 10. Lämmittimen vaikutus energiankulutukseen Nissan Leafissa (mukailten Haakana et al. 2013).

km/h	Ilman lämmitystä kWh/km	Lämmitys päällä kWh/km	Lämmittimen vaikutus
50	0,154	0,231	+50%
70	0,177	0,239	+35%
90	0,219	0,253	+16%
120	0,272	0,305	+12%

Projektin aikana kylmän sään ja haitallisten tieolosuhteiden todettiin lyhentävän ajosädettä. Akun eliniälle edullisinta on käyttää hidasta latausta ja akuston lämmitystä, jottei akusto pahimmassa tapauksessa vahingoitu. Matkustamon lämmitys kuluttaa merkittävästi energiaa, mutta myös lämmitysratkaisuissa on ajomukavuuteen vaikuttavia eroja. Mittausten perusteella testeissä käytetyllä Nissan Leafilla pystyy ajamaan -20 °C pakkasella lämmitin päällä yli 70 km. Kaupunkiajoa ajatellen huomio keskittyi kuitenkin lämmittimen suureen energiankulutukseen matalilla nopeuksilla, jolloin myös ajokilometrien määrä vähenee. (Haakana et al. 2013)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähköautot ovat tulleet myös Suomeen jäädäkseen, kun direktiivien asettamat tavoitteet päästöjen vähentämiseen ohjaavat liikennettä pois fossiilisista polttoaineista. Litiumioniakut ovat tällä hetkellä tärkeimmässä osassa sähköautojen voimanlähteenä ja uusien menetelmien potentiaali lupaa hiljalleen vuosien mittaan kasvavaa kapasiteettia, kuten myös pakkaskestävyyttä. Tämä teknologia ei ole kuitenkaan ongelmaton hinnan, turvallisuuden ja raaka-aineiden saatavuuden kannalta. Muut kilpailevat teknologiat vaativat vielä paljon tutkimus- ja kehitystyötä, joista jokaisella on omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Yksi näistä on Zebra-akun ja superkondensaattorin yhdistelmä, joka on edullisempi eikä vaadi harvinaisia materiaaleja, mutta sitä rajoittavat pieni ominaisteho ja pitkäaikainen voimansyöttö. Tulevaisuus näyttää millaisia uusia akkuja tuodaan markkinoille ja miten pakkaskestäviä nämä ratkaisut ovat.

Akunkestoon vaikuttavat akun ikä ja miten sitä on ladattu. Litiumioniakkujen iän pidentämiseksi sitä ei tulisi purkaa tyhjäksi asti ennen seuraavaa latausta. Myös pienempi latauksen syöttövirta sekä vähintään 0 °C lämpötila edesauttavat välttämään akuston ennen aikaista ikääntymistä. Tässä myös auton oma akuston lämmönhallintajärjestelmä on tärkeässä osassa, jotta lämpötila saadaan pidettyä akuston toiminnan kannalta sopivana.

Eräs kovien talvipakkasten tuoma ongelma on se, ettei akkujen pikalataaminen ole tällöin suotavaa akuston vahingoittumisvaaran vuoksi. Tämä ei ole niinkään suuri ongelma kotiolosuhteissa, koska oletusarvoisesti sähköauton lataaminen tapahtuu hitaalla latauksella. Jotta pikalatauksesta aiheutuva vaurioittumisvaara saataisiin minimoitua myös pakkaspäivinä, olisi latauspisteen oltava sisätiloissa. Vaikka hidas lataus onkin akustolle turvallisempi pakkasella, olisi tämäkin lataus hyvä suorittaa tallissa, jolloin auto on myös nopeampi esilämmittää.

Tilannetta ei auta se, että talven vaativat tieolosuhteet ja siitä johtuva vierintävastus lisää energiankulutusta sekä akuston varauskyky heikkenee sisäisten reaktioiden hidastuessa. RekkEVIDde-projektin testien perusteella nopeassa ajossa vierintävastuksen merkitys virrankulutuksen kannalta on pieni, mutta se kasvaa kaupunkiajossa matalilla ajonopeuksilla. Lisäksi auton sisätilalämmittimen osuus kulutuksesta on kaupunkiajossa

merkittävä lisäen kulutusta jopa 50-60%. Nämä aiheuttavat muiden tekijöiden kanssa sen, että auton järjestelmän ilmoittama toimintasäde voi huveta liki kaksinkertaisella nopeudella.

Yhtälö on vaativa maan pohjoisosissa, missä talvipakkasten lisäksi asutus on harvaa ja välimatkat ovat pitkiä, minkä takia sähköautoa on nykyisellä tekniikalla vaikea ajatella alueella asuvan ensisijaiseksi autoksi. Sen sijaan polttomoottorilla varustetut plug-in-hybridimallit ovat huomattavasti soveltuvampia valintoja myös harvaanasutuissa maanosissa. Etelä-Suomessa olosuhteet ovat otollisempia sähköauton ensisijaiseen käyttöön välimatkojen ollessa lyhyempiä ja talvien leudompia. FleetCarman tutkimuksesta huomataan, että lämpötilalla on selkeä ajosädettä huonontava vaikutus alle +5 °C olosuhteissa. Vaikutuksen suuruutta on vaikea määrittää, mutta havaintojen paikkansapitävyyttä tukee tutkimuksen suuri otanta. Suomen olosuhteiden kannalta huomionarvoista on myös se, että sähköauton optimikäyttölämpötila asettuu kuvaajassa +10–25 °C alueelle ja että tätä korkeammilla lämpötiloilla auton suorituskyky heikkenee.

Centria-ammattikoululle tehdyissä testeissä eri testiasetuksien haasteeksi tulee tulosten vertailukelpoisuus. Tuloksia lukemalla nähdään, kuinka vallitsevia muuttujia on useita ulkolämpötilan lisäksi, kuten esilämmitys, sisälämpötilan säätö sekä SOC-arvo. Taulukossa 3 esitetyt kaksi reitin 1 testiajoa olisi ehkä kannattanut tehdä osana reitin 2 testejä, jolloin oltaisiin vältetty reittien matkaero. Esilämmityksen ja ulkolämpötilaerojen johdosta on ajoista vaikea sanoa, onko lämpötilalla merkitystä varaukseen. Tämän työn kannalta hyödyllisempää tietoa saataisiin pitämällä muut testimuuttujat vakiona pois lukien ulkolämpötila. Testien kannalta olisi myös ollut toivottavaa, että esimerkiksi taulukossa 4 esitetyt ajot suoritettaisiin yksittäisinä, jolloin mahdollisia peräkkäisistä ajoista aiheutuvia muuttujia saataisiin poistettua. Näistä tutkimusmenetelmällisistä yksityiskohdista huolimatta testeistä huomattiin esilämmityksen ja ulkolämpötilan vaikutus ilmastointilaitteen energiankulutukseen. Myös auton järjestelmän ilmoittama ajosäde pienenee pakkasella nopeammin korkeamman kulutuksen takia. Tämä korostui varsinkin –20 °C pakkasilla.

Työssä käsiteltyjen tutkimusten ja käytännöntestien perusteella johdannossa arveltu 150 km latauspisteiden välinen maksimietäisyys maanlaajuisessa latausverkostossa voidaan todeta talvikäytön kannalta liian pitkäksi. Huomioitavaa kuitenkin on, että testejä käsittelevä aineisto on vuodelta 2013, jolloin käytössä on ollut ensimmäisen sukupolven

sähköautoja. Esimerkiksi 2013 vuosimallin Nissan Leafissa alun perin ollut 24 kWh akusto on nykyisimmässä mallissa korvautunut 40 kWh vastineella, mikä lupaa selvästi parempaa toimintasädetä. RekkEVIDde-projektissa todettiin 2013 vuosimallin Nissan Leafin ajosäteeksi $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pakkasessa lämmitin päällä yli 70 km, joten uudelle mallille jokseenkin realistinen latauspisteiden maksimietäisyys on luultavasti 110-120 km luokkaa. Akkukapasiteetin kasvun lisäksi autossa paljon energiaa vaativien lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien kehitys auttaa pienentämään kulutusta.

6 YHTEENVETO

Suomen sähköhenkilöautokanta on vielä vaatimattomat 1449 autoa. Tämän hetken alempaan hintaluokkaan kuuluvien autojen, kuten Nissan Leafin ja Renault Zoen verolliset hinnat ovat 30 000 – 40 000 € välillä, kun taas Teslan Model S ja X hinnat nousevat edullisimmillaan päälle 90 000 €. Kehitystä on tapahtunut akkukapasiteetin saralla ja uusin Leaf on varustettu 40 kWh akustolla, kun vielä 2013 vuosimallissa se oli 24 kWh. Tesloissa suurin akusto on kapasiteetiltaan 100 kWh.

Litiumioniakut ovat tällä hetkellä käytetyimpiä sähköautoissa teknologian soveltuvimpien ominaisuuksien vuoksi ja on siksi myös tutkituin akkutyyppejä. Tekniikkaa varjostavat sen kallis hinta, turvallisuus sekä tulevaisuuden kannalta epävarma materiaalien saatavuus. Kilpailevissa teknologioissa ovat omat heikkoutensa ja vahvuutensa. Usein rajoittavina ominaisuuksina toimivat joko akun ominaisteho tai energiatiheys, mikä tarkoittaa sitä, että kaksi eri akkutyyppejä pyritään yhdistämään toimivaksi hybridikokonaisuudeksi.

Akuissa tapahtuvat ikääntymisprosessit vaikuttavat varauskykyyn. Kalenteri-ikäntyminen ilmenee akkua varastoidessa, jolloin sitä ei käytetä. Sykli-ikäntyminen taas ilmenee akun käytöstä johtuvien sisäisten reaktioiden takia. Pakkasella metallisen litiumin muodostuminen elektrodien pinnalle kiihtyy lyhentäen akun ikää ja pienentäen sen latauskapasiteettia. Virran purkamisen määrällä ennen seuraavaa latausta on myös merkitystä. Täysin tyhjäksi purettuna akussa havaittiin huomattavasti enemmän kapasiteettihäviötä verrattuna 30% tasolle purettuun akkuun.

Latauksella on merkitystä akuston ikääntymiseen ja sitä kautta myös ominaisuuksiin talvikäytössä. Sisäisen resistanssin kasvaessa maksimijännite pienenee, minkä takia latauksen virransyöttöä on pienennettävä. Talvella lataus olisi hyvä suorittaa akun elinikää ja latausaikaa ajatellen sisätiloissa säältä suojattuna, jolloin akuston lämpötila pysyy sopivana ja sisäinen resistanssi muuttuu vähän.

Sähköautojen talvitestien ja kerätyn datan perusteella on selvää, että pakkasella lyhentää akustosta saatavaa ajosädetä. Sen sijaan vaikutuksen määrää on vaikea sanoa. Lämmitys on merkittävä osa sähköauton energiankulutuksesta. Esilämmityksellä latauksen yhteydessä on havaittu olevan hyötyä ja tällä vähennetään ajon yhteydessä

tarvittavan matkustamon lämmityksen määrää. Lisäkilometrejä saadaan laskemalla matkustamon lämpötilaa, mutta tämä etu saavutetaan ajomukavuuden kustannuksella. Pakkasen kiristyessä myös kuljettajan ajotyylin merkitys korostuu, mikä on nähtävillä kerätyn datan perusteella. Myös Li-ion akkujen ennenaikaisen ikääntymisen välttämiseksi regeneratiivinen jarrutus on rajoitettava tai kytkettävä kokonaan pois päältä. Pakkasen lisäksi myös tieolosuhteet vaikuttavat energiankulutukseen ja etenkin kaupunkiajossa vierintävastuksen merkitys korostuu kasvattaen kulutusta $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa parhaimmillaan melkein 20%.

Nykyisen tekniikan kannalta sähköautojen latauspisteiden välinen maksimietäisyys ei yllä 150 km asti, vaan tämä lukema on luultavasti 110-120 km suuruusluokkaa.

LÄHDELUETTELO

Allen, M., 2013. Electric Range For The Nissan Leaf & Chevrolet Volt In Cold Weather [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<https://www.fleetcarma.com/nissan-leaf-chevrolet-volt-cold-weather-range-loss-electric-vehicle/> [viitattu 26.2.2018]

Aurbach, D., Talyosef, Y., Markovsky, B., Markevich, E., Zinigrad, E., Asraf, L., Gnanaraj, J.S. & Kim, H., 2004. Design of electrolyte solutions for Li and Li-ion batteries: a review. *Electrochimica Acta*, 50 (2), S. 247-254.

Belt, J., Utgikar, V. & Bloom, I., 2011. Calendar and PHEV cycle life aging of high-energy, lithium-ion cells containing blended spinel and layered-oxide cathodes. *Journal of Power Sources*, 196 (23), S. 10213-10221.

BMW, 2018. Hinnasto: Uusi BMW i3 [verkkodokumentti]. Saatavissa:

https://www.bmw.fi/content/dam/bmw/marketFI/bmw_fi/ladattavat/hinnastot/BMW_Hinnasto_i01.pdf.asset.1514842114771.pdf [viitattu 21.1.2018]

Bower, G., 2016. Tesla Model S Recycles Waste Heat to Warm the Battery [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<https://insideevs.com/tesla-model-s-recycles-waste-heat-to-warm-the-battery-bower/> [viitattu 5.1.2018]

Bugga, R., Smart, M., Whitacre, J. & West, W., 2007. Lithium Ion batteries for space applications. 2007 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, S. 1–7.

Euroopan parlamentti ja neuvosto, 2014. EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI 2014/94/EU [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0094&from=EN> [viitattu 6.2.2018]

Green Car Congress, 2015. Bosch presenting new heat pump EV thermal management system at IAA; up to 25% increase in effective range [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<http://www.greencarcongress.com/2015/09/20150908-boschiaa.html> [viitattu 5.1.2018]

Haakana, A., Laurikko, J., Granström, R. & Hagman, R., 2013. Assessing range and performance of electric vehicles in Nordic driving conditions – End of Project Report [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<http://gnf.fi/wp-content/uploads/2016/05/RekkEVIDde.pdf> [viitattu 26.2.2018]

Hannan, M.A., Hoque, M.M., Mohamed, A. & Ayob, A., 2017. Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69 (Supplement C), S. 771-789.

Heikkilä, J., 2013. WintEVE - sähköauton talvitestit [verkkodokumentti]. C, Centria tutkimus ja kehitys - forskning och utveckling, 13, Centria ammattikorkeakoulu. Saatavissa:

URN:ISBN:978-952-6602-62-2 [viitattu 20.1.2018]

Herreyre, S., Huchet, O., Barusseau, S., Pertion, F., Bodet, J.M. & Biensan, P., 2001. New Li-ion electrolytes for low temperature applications. *Journal of Power Sources*, 97-98, S. 576-580.

Huang, C., Sakamoto, J.S., Wolfenstine, J. & Surampudi, S. 2000. The Limits of Low-Temperature Performance of Li-Ion Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 147 (8), S. 2893-2896.

Idaho National Laboratory, 2014. BEV Battery Testing Results 2013 Nissan Leaf - VIN 5045 [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<https://energy.gov/sites/prod/files/2015/01/f19/batteryLeaf5045.pdf> [viitattu 21.2.2018]

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*, 164 (Supplement C), S. 99-114.

Ji, Y. & Wang, C.Y., 2013. Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures. *Electrochimica Acta*, 107, S. 664-674.

Jääskeläinen, S., 2017. Alternative transport fuels infrastructure. Finland's national plan [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-512-5> [viitattu 6.2.2018]

Kumar, M.S. & Revankar, S.T., 2017. Development scheme and key technology of an electric vehicle: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70 (Supplement C), S. 1266-1285.

Kötz, R., Ruch, P.W. & Cericola, D., 2010. Aging and failure mode of electrochemical double layer capacitors during accelerated constant load tests. *Journal of Power Sources*, 195 (3), S. 923-928.

Li, J., Murphy, E., Winnick, J. & Kohl, P.A., 2001. Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge–discharge cycling. *Journal of Power Sources*, 102 (1), S. 294-301.

Lindgren, J. & Lund, P., 2016. Effect of extreme temperatures on battery charging and performance of electric vehicles.

Lu, P., Li, C., Schneider, E.W. & Harris, S.J., 2014. Chemistry, impedance, and morphology evolution in solid electrolyte interphase films during formation in lithium ion batteries. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118 (2), S. 896–903.

Mahmoudzadeh Andwari, A., Pesiridis, A., Rajoo, S., Martinez-Botas, R. & Esfahanian, V., 2017. A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 (Supplement C), S. 414-430.

Mercedes-Benz, 2018. GLC-sarja (X253) hinnasto [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.mercedes-benz.fi/content/media_library/finland/passenger_cars/hinnastot/glc_pricelist.object-Single-MEDIA.download.tmp/GLC_X253_060218.pdf [viitattu 21.1.2018]

Mitsubishi, 2018. Mitsubishi Outlander PHEV hinnasto [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.mitsubishi.fi/workarea/downloadasset.aspx?id=66571993300> [viitattu 21.1.2018]

Murnane M. & Ghazel A., 2017. A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/A-Closer-Look-at-State-Of-Charge-and-State-Health-Estimation-Techniques-....pdf> [viitattu 14.3.2018]

Nissan, 2018a. New Leaf asiakashinnasto [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.nissan-cdn.net/content/dam/Nissan/fi/brochures/pricelist/new-leaf-asiakashinnasto.pdf> [viitattu 21.1.2018]

Nissan, 2018b. Nissan e-NV200 Van asiakashinnasto [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.nissan.fi/content/dam/Nissan/fi/brochures/pricelist/e-nv200-asiakashinnasto-van.pdf> [viitattu 21.1.2018]

Nissan, 2018c. Nissan e-NV200 Combi, Evalia asiakashinnasto [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.nissan.fi/content/dam/Nissan/fi/brochures/pricelist/e-nv200-asiakashinnasto-evalia&combi.pdf> [viitattu 21.1.2018]

Ping, P., Wang, Q., Huang, P., Sun, J. & Chen, C., 2014. Thermal behaviour analysis of lithium-ion battery at elevated temperature using deconvolution method. Applied Energy, 129, S. 261-273.

Reichmuth, D., 2016. Do Electric Cars Work in Cold Weather? Get the Facts... [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://blog.ucsusa.org/dave-reichmuth/electric-cars-cold-weather-temperatures> [viitattu 5.1.2018]

Renault, 2018. Renault Zoe suositus hinnasto 1.1.2018 [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.renault.fi/wp-content/uploads/2018/01/Hinnasto-Zoe-01012018.pdf> [viitattu 21.1.2018]

Schaal E., 2017. How To Extend Your Electric Vehicle's Range During The Winter [verkkodokumentti]. Saatavissa:

<https://www.fleetcarma.com/extend-electric-vehicle-range-winter/> [viitattu 26.2.2018]

Shim, J. & Striebel, K.A., 2003. Characterization of high-power lithium-ion cells during constant current cycling: Part I. Cycle performance and electrochemical diagnostics.

Sähköinen liikenne, 2017. Suomen julkiset latausasemat ja -pisteet 15.5.2017 [verkkodokumentti]. Saatavissa:

http://www.sahkoinenliikenne.fi/sites/sahkoinenliikenne_fi/files/attachments/15052017_suomen_latauspisteet.pdf [viitattu 8.12.2017]

Tesla, 2018a. Model S Design Studio [verkkodokumentti]. Saatavissa:

https://www.tesla.com/fi_FI/models/design [viitattu 21.1.2018]

Tesla, 2018b. Model X Design Studio [verkkodokumentti]. Saatavissa:

https://www.tesla.com/fi_FI/modelx/design [viitattu 21.1.2018]

Trafi, 2017a. Liikennekäytössä olevat sähköautot [verkkodokumentti]. Saatavissa:

https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/sahkokayttoiset_autot [viitattu 6.2.2017]

Trafi, 2017b. Liikennekäytössä olevat hybridiautot [verkkodokumentti]. Saatavissa:

https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot/hybridikayttoiset_henkiloautot [viitattu 6.2.2017]

Volkswagen, 2018. Volkswagen Golf 4-oviset Hinnasto [verkkodokumentti]. Saatavissa:

https://www.volkswagen.fi/content/dam/vw-ngw/vw_pkw/importers/fi/hinnastot/ha%20vw%202018%2001%2001%20golf%204-oviset%20nro%203.pdf/_jcr_content/renditions/original./ha%20vw%202018%2001%2001%20golf%204-oviset%20nro%203.pdf [viitattu 21.1.2018]

Volvo, 2018. Volvo XC90 Hinnasto 2.1.2018 [verkkodokumentti]. Saatavissa:

https://volvofi.s3.amazonaws.com/hinnasto/hinnasto_XC90.pdf [viitattu 21.1.2018]

Whitacre, J., Yazami, R., Hamwi, A., Smart, M.C., Bennett, W., Surya Prakash, G.K., Miller, T. & Bugga, R. 2006. Low operational temperature Li-CFx batteries using

cathodes containing sub-fluorinated graphitic materials. *Journal of Power Sources*, 160 (1), S. 577-584.

Zhang, G., Ge, S., Yang, X., Leng, Y., Marple, D. & Wang, C., 2017. Rapid restoration of electric vehicle battery performance while driving at cold temperatures. *Journal of Power Sources*, 371 (Supplement C), S. 35-40.

Zhang, Q. & White, R.E., 2008 Capacity fade analysis of a lithium ion cell. *Journal of Power Sources*, 179 (2), S. 793-798.

Zhang, S.S., Xu, K. & Jow, T.R., 2002a. Low temperature performance of graphite electrode in Li-ion cells. *Electrochimica Acta*, 48 (3), S. 241-246.

Zhang, S.S., Xu, K. & Jow, T.R., 2002b. A new approach toward improved low temperature performance of Li-ion battery. *Electrochemistry Communications*, 4 (11), S. 928-932.