



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Jalmari Jännes

Onko sähköauto ratkaisu liikenteen päästöihin?

Sähköauton elinkaaren hiilidioksidipäästöt verrattuna polttomoottoriautoon

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

14.5.2020

Tekijä Otsikko	Jalmari Jännes Onko sähköauto ratkaisu liikenteen päästöihin?
Sivumäärä Aika	31 sivua 14.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Vesa Linja-aho
<p>Tässä insinööriyössä tutkitaan henkilöautojen koko elinkaaren aikaisia hiilidioksidipäästöjä ja vertaillaan sähköautoja polttomoottoriautoihin. Työssä käydään läpi myös eri litiumioniakkukemioita ja niiden vaikutusta päästöihin. Työn tavoitteena on selvittää, kuinka paljon päästöissä on eroavaisuutta. Työssä tarkastellaan, miten akkukemia ja muut seikat vaikuttavat valmistuksesta aiheutuviin päästöihin. Työssä vertaillaan litium-ioniakkujen valmistuksen päästöistä tehtyjä tutkimuksia kriittisesti ja lasketaan usean tutkimuksen avulla keskiarvoja, joiden pohjalta päästövertailu voitaisiin suorittaa kohtalaisella tarkkuudella.</p> <p>Työstä käy ilmi, että sähköautot ovat Euroopassa 12–39 % vähäpäästöisempiä verrattuna keskivertoautoon ja pienemmät sähköautot 8–18 % vähäpäästöisempiä kuin Ford Fiesta. Fiesta oli tulosten mukaan 16 % pienipäästöisempi kuin Tesla Model S Euroopassa. Suomessa sähköautot olivat 39–96 % vähäpäästöisempiä verrattuna keskivertoautoon ja 0–41 % vähäpäästöisempiä kuin Ford Fiesta. Työssä huomattiin, että akkukemialla oli suuri vaikutus valmistuksen päästöihin. Ero oli suurimmillaan 49%. Työssä huomattiin myös, että tutkimusmaa ja tutkimusmenetelmä vaikuttavat tuloksiin huomattavasti.</p>	
Avainsanat	Sähköauto, hiilidioksidipäästöt, litiumioniakku, ympäristövaikutukset, dieselauto

Author Title	Jalmari Jännes Are Electric Cars the Solution to Traffic Emissions?
Number of Pages Date	31 pages 14 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Vehicle Design Engineering
Instructors	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>The aim of this thesis is to study the lifetime emissions of passenger electric and ICEV (Internal combustion engine vehicles) and to compare them. The goal is to estimate with reasonable precision, the differences in emissions between vehicles and also to find out why studies in the field of li-ion battery manufacturing vary so greatly in their results. A tertiary goal is to find the difference in emissions between lithium-ion battery chemistries.</p> <p>The data in the thesis is based on multiple studies, which were selected based on credibility to get average emissions which could then be used further to calculate necessary figures in the thesis.</p> <p>The results of the thesis showed that when compared to the average European ICEV (Internal combustion engine vehicle), electric cars were 12-39% less emissive. When comparing the smaller Ford Fiesta to smaller EVs (electric vehicles) EVs were 8-18% less emissive and the larger EV used in the study the Tesla Model S was 16% more emissive. In Finland the same EVs were 39-96% less emissive than the average ICEV and 35-41% less emissive than the Ford Fiesta. The Tesla Model S' emissions were on par with the Fiesta.</p>	
Keywords	CO ₂ , Electric vehicle, EV, ICEV, emissions, lithium ion, diesel, petrol, comparison

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Opinnäytetyön tausta	1
1.2	Tavoitteet ja työn rajaaminen	1
2	Litiumioniakkujen teoriaa	2
2.1	Historia	2
2.2	Rakenne	2
2.3	Akkujen valmistus	3
2.4	Akkuratkaisuja	4
2.5	Katodit	4
2.6	Anodit	6
2.7	Kennoratkaisut	6
2.8	Tulevaisuuden näkymät	7
2.9	Akuston komponenttien paino	8
3	Litiumioniakkujen valmistus ja kasvihuonekaasupäästöt	9
3.1	Analysoinnin tavoitteet	9
3.2	Peters ym.	10
3.3	Ellingsen ym.	10
3.4	Ambrose & Kendall	11
3.5	Kim ym.	12
3.6	Messagie	12
3.7	Hao ym.	13
4	Sähköautojen päästöt	14
4.1	Lataussähkön päästöt	15
4.2	Korin valmistuksen päästöt	17
4.3	Yhdistetyt päästöt	17
5	Polttomoottoriautojen päästöt	18
6	NEDC-päästömittauksen vaikutus	19
7	Päästöt Suomessa 150 000 km käyttöiällä	21
7.1	Päästöt suomessa 200 000 kilometrin käyttöiällä	23
7.2	Autokalkulaattori	24
8	Yhteenveto ja pohdinta	25
	Lähteet	27

Lyhenteet

Li-ion	Litiumioni.
EV	Electronic vehicle, sähköajoneuvo.
GHG	Greenhouse gas, kasvihuonekaasu.
Gr	Grafiitti.
LFP	Lithium iron phosphate, litium-rautafosfaatti.
LMO	Lithium manganese oxide, litium-mangaanioksidi.
NCA	Lithium nickel cobalt aluminium oxide, litium-nikkeli-koboltti-alumiini-oksidi.
NMC	Lithium manganese cobalt oxide, Litium-mangaani-kobolttioksidi.
LCO	Lithium cobalt oxide, litium-kobolttiitti.
LCA	Life cycle assessment, elinkaarianalyysi.
CO ₂ eq	Carbon dioxide equivalent. Suure, jossa muut kasvihuonekaasut on muunnettu vastaamaan hiilidioksidin ilmastovaikutusta.
ICE	Internal Combustion Engine. Polttomoottori.
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle. Polttomoottoriajoneuvo.

1 Johdanto

Tässä työssä käsitellään autojen valmistuksesta ja käytöstä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä niiden elinkaaren aikana. Työssä vertaillaan polttomoottoriauton sekä sähköauton koko käyttöiän aikaisia hiilidioksidipäästöeroja. Työn tarkoituksena on saada selville todellisuutta vastaavat päästöt sekä sähkö-, että polttomoottoriautoille ja vertailla tuloksia. Työssä pyritään myös selvittämään aiheesta tehtyjen tutkimusten tuloksien erojen syitä.

Käyttöiäksi on valittu osassa työstä Euroopan keskiarvo [1], joka on pyöristetty 150 000 km:ksi. Se on myös useilla sähköautovalmistajilla akkutakuun kilometrimäärä [2]. Työn osuudessa, jossa käsitellään Suomen tilastoja, käytetään käyttöiän kilometrimääränä myös 200 000 km:ä, sillä Suomessa autoilla ajetaan keskimäärin kauemmin. [1]

1.1 Opinnäytetyön tausta

Sähköautot ovat yleistyneet nopeasti edellisellä vuosikymmenellä, ja niiden myynti on kiihtynyt jatkuvasti. Sähköautomarkkinoilla on enemmän valinnanvaraa uusimmalla teknologialla varustelluista luksusmaastureista ”hyperautoihin” ja normaaleihin perheautoihin. Sähköautoja yhdistää kuitenkin nykyään erityisen tärkeässä asemassa oleva seikka, päästöt. Sähköautojen ja hybridien mainonnassa on usein nähtävillä iskulauseita, kuten ”zero emission” eli nollapäästöt [3], jotka viittaavat pakoputkesta tuleviin päästöihin, joita sähköautot eivät tuota. Sähköautojen litiumioniakkupaketit ovat kuitenkin työläitä valmistaa, ja niiden raaka-aineet tarvitsevat huomattavan määrän jalostusta akkuvalmiuteen.

1.2 Tavoitteet ja työn rajaaminen

Työn tavoitteena on selvittää olemassa olevien tutkimuksien avulla, miten sähkö- ja polttomoottoriautojen päästöt eroavat toisistaan ja miksi eri tahojen tekemät

tutkimukset saavat eri tuloksia. Työssä tarkastellaan kriittisesti aiheesta tehtyjä tutkimuksia ja pyritään saamaan selville, mistä tutkimusten eroavaisuudet johtuvat sekä miten sähköauton ja polttomoottoriauton koko käyttöiän aikaiset päästöt eroavat toisistaan. Aiheesta on tehty useita tutkimuksia, joiden tulokset vaihtelevat hyvinkin suurella skaalalla. Työssä pyritään selvittämään, miten akkukemia ja muut seikat vaikuttavat valmistuksesta aiheutuviin päästöihin.

Työn alue on rajattu hiilidioksidipäästöjen lukemiin, joissa muiden kasvihuonekaasujen ympäristövaikutukset on muunnettu vastaamaan hiilidioksidipäästöjä (CO₂ eq). Työssä ei oteta kantaa hybrideihin, vetyautojen tai muiden ajoneuvo-tyyppien päästölukemiin. Työssä keskitytään henkilöautoihin.

2 Litiumioniakkujen teoriaa

Litiumioniakuston voi toteuttaa monella tavalla. Tässä luvussa tarkastellaan yleisellä tasolla litiumioniakkuja ja litiumioniakkukemioita sekä niiden hyviä ja huonoja puolia.

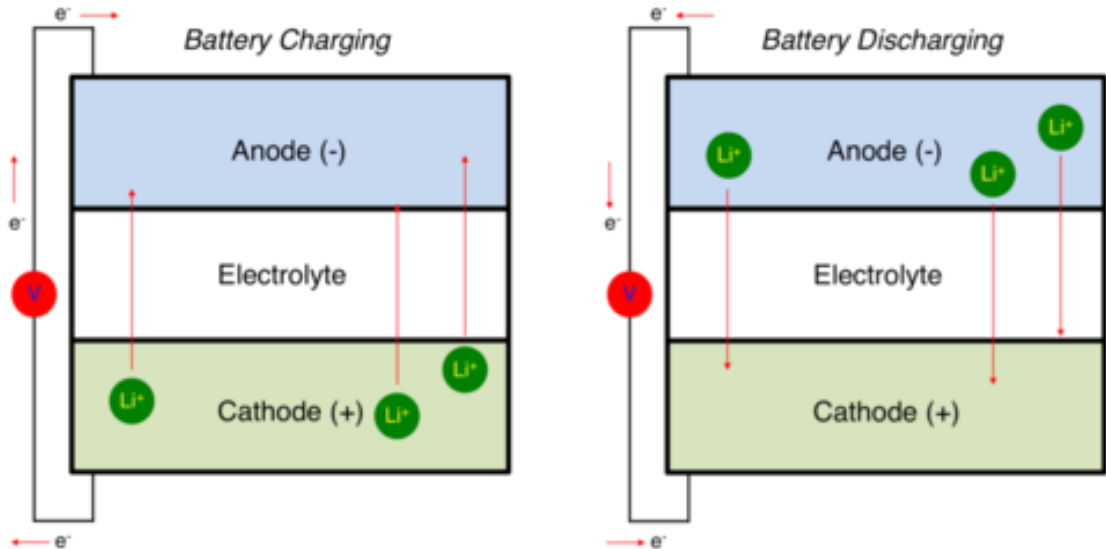
2.1 Historia

Kemian professori Michael Stanley Whittingham keksi litiumakun 1970-luvulla. Tässä akussa hän käytti elektrodina titaanisulfidia ja litiumia. Akku ei kuitenkaan ollut suosittu turvallisuusriskin takia. Myöhemmin ryhdyttiinkin kehittämään akkuja, joissa oli litiumyhdisteitä metallisen litiumin sijasta, joka paransi akkujen turvallisuutta ja suorituskykyä. [4]

2.2 Rakenne

Litiumioniakku on akku, jossa litiumioni liikkuu anodin ja katodin välillä. Akun purkauksessa anodista katodiin ja ladattaessa katodista anodiin. Tyypillinen elektrolyytti koostuu orgaanisista karbonaateista kuten etyleenikarbonaatti. [5, s. 5.]

Elektrolyytti estää elektrodien fyysisen kosketuksen toisiinsa sekä mahdollistaa litiumionien liikkeen elektrodien välillä. Kuvassa 1. on pelkistetty litiumionien liike elektrodien välillä lataus- ja purkutilanteessa.

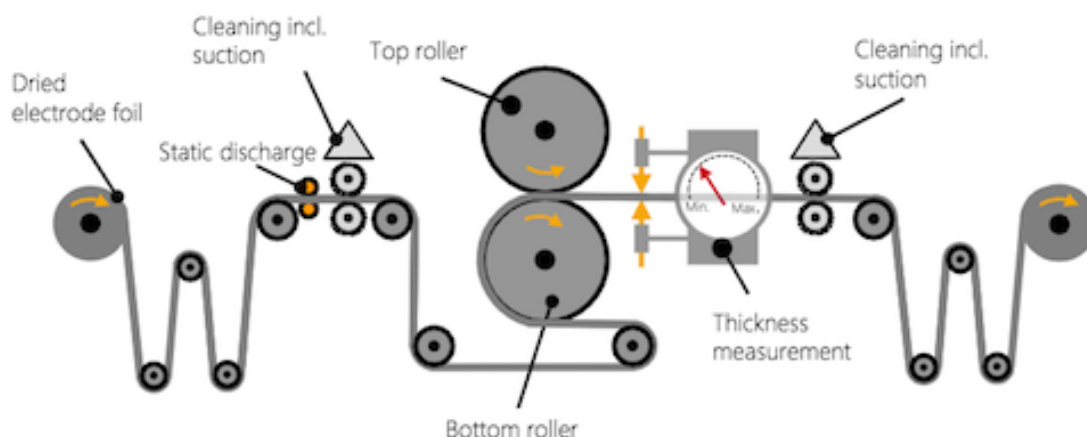


Kuva 1. Pelkistetty kuva 18650 litiumakkukennosta [6].

2.3 Akkujen valmistus

Tuotannon ensimmäinen vaihe on elektrodien eli katodin ja anodin valmistus. Katodi ja anodi voidaan valmistaa monesta eri materiaalista, joita kuvaillaan seuraavissa kappaleissa. Elektrodit saatetaan ensin tahnamaiseen muotoon ja niillä päällystetään kupari ja alumiinifoliota, joka kuivataan uunissa. Folio tiivistetään, puhdistetaan, mitataan ja siitä poistetaan staattinen sähkö. Seuraavaksi folio rullataan, minkä jälkeen se kuivataan tyhjiössä. Rullista leikataan oikeankokoisia katodi- ja anodilevyjä, joita kasaamalla kootaan haluttu akkukkenno. Prosessia on havainnollistettu kuvassa 2. Tuotannossa on useita välivaiheita, eikä kaikkia akkuja valmisteta täsmälleen samalla tavalla. Tämän monivaiheisen ja työlään valmistusprosessin takia, li-ion-akut ovat suuripäästöisiä. [7]

Electrode manufacturing



Kuva 2. Osa katodin ja anodin valmistusprosessia [7].

Kuvassa on yksi vaihe pitkästä valmistusprosessista. Elektrodifolio liikkuu useiden rullien läpi, missä sitä valmistellaan seuraavaan valmistusvaiheeseen.

2.4 Akkuratkaisuja

Li-ion-akkukennon voi toteuttaa monella eri tavalla. Katodi ja anodimateriaalien lisäksi myös yksittäisten kennojen rakenne voi olla erilainen. Valmistuksen päätöt riippuvat suuresti materiaaleista ja konstruktiosta.

2.5 Katodit

Taulukossa 1 kuvaillaan erilaisia katodimateriaaleja sekä niiden hyviä ja huonoja puolia. Koboltti ja nikkeli ovat haittapuolia, sillä niiden kysyntä on suuri ja etenkin koboltti on hyvin kallis materiaali, joka kallistuu jatkuvasti. Lisäksi kobolttin louhintaan liittyy mahdollisesti lapsityövoimaan liittyviä eettisiä kysymyksiä [8]. Ne eivät siis ole hyviä vaihtoehtoja pitkäaikaiseen käyttöön massatuotannossa.

Taulukko 1. Yleisimmin käytetyt katodimateriaalit [9, s. 11].

Katodi	Lyhenne	Käyttötarkoitus	Hyvät puolet	Haittapuolet
Litium-kobolttiitti	LCO	Pienelektroniikka	Suorituskykyinen, hyvin ymmärretty	Turvallisuus, käyttää nikkeliä ja kobolttia
Litium-mangaanikobolttioksidi	NMC	Yleinen sähköautoissa	Turvallisempi ja suorituskykyisempi kuin LCO	Hinta, käyttää nikkeliä ja kobolttia
Litium-rautafosfaatti	LFP	Potentiaalia sähköautokäyttöön	Tehokas, pitkäkestoinen ja turvallinen Raakamateriaalin saatavuus	Matala energiatiheys
Litium-mangaanioksidi	LMO	Käytetty ennen sähköautoissa	Halpa, suuri teho	Käyttöikä, matala kapasiteetti
Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi	NCA	Käytössä joissain sähköautoissa	Korkea kapasiteetti, suuri teho	Turvallisuus, käyttää nikkeliä ja kobolttia

2.6 Anodit

Taulukossa 2 kuvaillaan yleisimpiä anodimateriaaleja li-ion-akuissa.

Taulukko 2. Taulukko Yleisimmät anodimateriaalit [9, s. 12].

Anodi	Lyhenne	Käyttötarkoitus	Hyvät puolet	Haittapuolet
Grafiitti	Gr	Yleisin sähköautokäytössä	Pitkä käyttöikä, hyvin ymmärretty, runsaasti saatavilla (synteettisesti)	Tehottomuus, halvempi
Litium-titaani-oksidi	LTO	Mahdollinen sähköautokäytössä	Erinomainen teho	Matalampi jännite, vähemmän energiaa.

Ylivoimaisesti yleisin materiaali on grafiitti, mutta vaihtoehtoja sille on olemassa. Grafiitti on kuitenkin suosittu sen alhaisen hinnan ja hyvän soveltuvuuden takia.

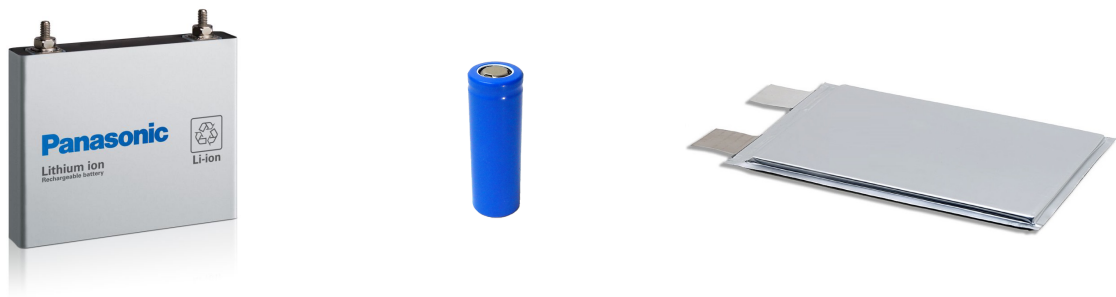
2.7 Kennoratkaisut

Taulukossa 3 on kuvailtu erilaisia kennorakenteita. Sylinterimäisiä kennoja on käytössä esimerkiksi Teslan akkupaketeissa. Prismaattisia kennoja käytetään lähinnä mobiililaitteissa. Pussiratkaisu on käytössä esimerkiksi Nissanin sähköautoissa. Kennorakenteilla on omat hyvät puolensa, mutta sylinterimäisillä kennoilla on suuri etumatka, sillä ne soveltuvat tällä hetkellä parhaiten massatuotantoon. Pussimaiset kennot eivät ole yhtä standardisoituja, ja niiden valmistus on monimutkaisempaa.

Taulukko 3. Yleisimmät kennorakenteet [10].

Kennon rakenne	Hyvät puolet	Haittapuolet
Sylinterimäinen	Vakaa, kestää painetta, tuotanto halpaa	Huono pakkaustehokkuus, vaikea jäähdyttää
Prismaattinen	Hyvä pakkaustehokkuus	Kallis, raskaat passiivimateriaalit, turpoamisriski
Pussimainen	Matala passiivipaino, hyvä pakkaustehokkuus	Turpoamisriski, tarvitsee kompressiota

Kuvassa 3 on esillä taulukossa esitellyt akkutyypit.



Kuva 3. Kolme erilaista kennotyppiä: prismaattinen (vasen)[11], sylinterimäinen [12] ja pussimainen (oikea)[13].

2.8 Tulevaisuuden näkymät

Litiumioniakkujen kehityssuuntia on monia, ja on vaikeaa sanoa, miten ne kehittyvät kokonaisuutena. Joitain asioita on kuitenkin jo nähtävissä. Akkujen kapasiteetti kasvaa jatkuvasti, ja valmistajat pyrkivät minimoimaan latausaikaa, jota pidetään usein yhtenä sähköautoilun huonoimmista puolista. Tämän ratkaisemiseksi on kehitteillä esimerkiksi ”asymmetric temperature modulation method”, jossa korkean lämpötilan ja lämpötilojen muutoksen avulla pyritään saavuttamaan nopeampia latausaikoja ilman akun vahingoittamista. [14]

2.9 Akuston komponenttien paino

Litiumioniakustossa on aktiivimateriaalien lisäksi monia komponentteja, jotka pyrkivät takaamaan toimivuuden ja turvallisuuden eri tilanteissa. Nämä komponentit lisäävät painoa. Taulukossa 4 on näkyvillä arvio komponenttien osuuksista kokonaispainosta

Taulukko 4. Arvio akuston komponenttien painosta prosentteina koko akun painosta [15, s. 7].

Komponentti	Osuus koko akun painosta
Katodin aktiivimateriaali	20 %
Anodin aktiivimateriaali	10 %
Separaattori	1–3 %
Alumiini (katodi)	2–3 %
Kupari (anodin)	8–13 %
Elektrolyytti	9–12 %
Akunhallinta	3 %
Jäähdytys	4 %
Runko	30 %

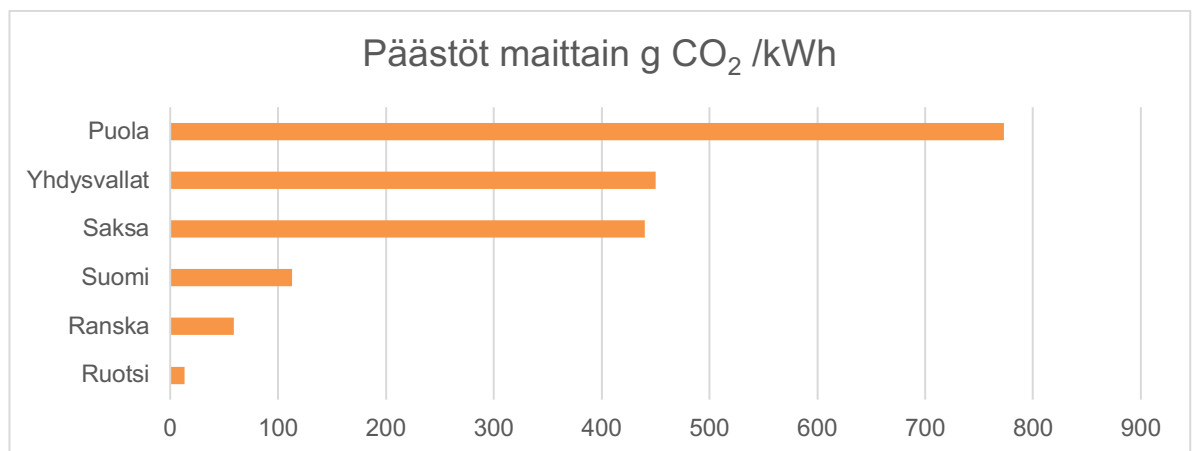
Itse akkukennot kattavat noin 60 % koko akun painosta. Akun ulkokuori on usein seuraavaksi suuri painoltaan; se on useimmiten valmistettu teräksestä tai alumiinista. Akustojen täytyy olla hyvin suojattuja ja tiiviitä, joten ulkokuoren rakenne on tärkeä.

3 Litiumioniakkujen valmistus ja kasvihuonekaasupäästöt

Litiumioniakkujen yleistyessä ajoneuvoissa on syytä olla tietoinen niiden tuotannon ympäristövaikutuksista. Tässä luvussa analysoidaan tutkimuksia, joissa on arvioitu yleisimpien li-ion-akkujen ja akkukemioiden valmistuksen aiheuttamat päästöt. Luvussa tarkastellaan tuotantoa, joten akkujen koon parametriksi vertailulle riittää kWh-kapasiteetti. Yleisesti tutkimusten perusteella akkuvalmistuksen päästöistä noin 50 % tulee käytetyn sähkön tuotannosta [16, s. 4; 17, s. 8]. Tutkimuksen toteutustapa vaikuttaa myös tuloksiin. Prosessikohtainen tai tehdas-kohtainen laskenta vaikuttaa huomattavasti lopputulemaan, ja näiden tapojen eroja tarkastellaan luvussa 3.2.

3.1 Analysoinnin tavoitteet

Tässä luvussa käydään läpi erinäisiä tutkimuksia, mutta koska tutkimusten tulokset vaihtelevat paljon, on muistettava, että aiheesta saatava data on epätäydellistä. Tutkimuksissa on täytynyt olettaa joitakin asioita, ja tämän takia on tärkeää olla kriittinen tuloksista. Tutkimuksen tilaaja, tutkimuksen ikä, datan ikä, valmistustapa ja akkukemioiden erot vaikuttavat tuloksiin. Tutkimuksen tulokset riippuvat suuresti myös alkuperämaasta. Kuvaajassa 1 on näkyvillä eri maiden sähköntuotannon päästöjä.



Kuvaaja 1. CO₂-päästöt g/kWh eri maissa [18].

3.2 Peters ym.

Petersin ym. tutkimuksessa [19] perehdytään litiumioniakkujen ympäristövaikutukseen ja vertaillaan useita eri elinkaarianalyysejä, kiinnittäen erityistä huomiota akkujen valmistusprosessiin. Tutkimus on kattava systemaattinen katsaus, jossa käydään läpi 36 eri tutkimusta aiheesta. Tulokset on esitetty taulukossa 5 muodossa kg CO₂ eq/kWh.

Taulukko 5. Päästöt Petersin ym. mukaan [19].

Akkukemia	Päästöt kg CO ₂ eq/kWh
NMC litium-mangaani-kobalttioksidi	160
LFP litium-rautafosfaatti	161
LMO litium-mangaanioksidi	55

Tutkimuksen laatijoiden mukaan tuloserot johtuvat lähestymistavasta. Joissain tutkimuksissa on otettu ensin huomioon kokonaisen tehtaan energiatarve ja sitten jaettu se pienempiin osiin prosessien mukaan. Toisissa tutkimuksissa taas on aloitettu pienemmistä prosesseista ja jatkettu suurempiin, joiden energiankäyttö on sitten laskettu yhteen saadakseen tulokseksi koko tehtaan tarve. Ensimmäinen vaihtoehto on kattavampi, sillä se ottaa huomioon kaiken tarvittavan energian käytön eikä vain välttämättömien prosessien vaatimaa [19, s. 497].

3.3 Ellingsen ym.

Ellingsenin ym. tutkimuksessa [20] analysoitiin tehtaan päästöjä raakadatan avulla. Raakadatan tutkimusta varten luovutti Miljøbil Grenland. Tutkimuksessa käytetty akku on NMC li-ion -akku. Akun paino on 253 kg, josta 60 % on akkukennoja. Energiakapasiteetti on 26,6 kWh, ja normaalikäytössä sen hyötysuhde 95–96 %. Tutkimuksen tulokset ovat esillä taulukossa 6.

Taulukko 6. Päästöt Ellingsenin ym. mukaan [20].

Akkukemia	Päästöt kg CO ₂ eq/kWh
NMC litium-mangaani-kobolttioksidi	172

Tutkimuksen tulokset ovat samaa luokkaa kuin muissakin tutkimuksissa. Akkuvalmistuksen energiantarve on tehtaan hyötysuhteeltaan parhaan kuukauden ajalta. Ellingsen ym. ovat tutkimuksessa sitä mieltä, että parhaan kuukauden datan käyttäminen on tarkoituksenmukaista. Tutkimuksessa painotettiin myös, että tehtaan sähköntuotanto vaikuttaa eniten prosessin päästöihin. Hiilivoimalla tuotettu sähkö on tietysti suuripäästöisempi kuin esimerkiksi vesivoimalla tuotettu sähkö. Tutkimuksessa huomattiin, että oli mahdollista pienentää tuotannon päästöjä jopa 60 prosentilla käytettäessä ainoastaan vesivoimaa muun energianlähteen sijasta.

3.4 Ambrose & Kendall

Ambrosen & Kendallin tutkimus [21] eroaa muista, sillä se perustuu muista tutkimuksista saatujen arvojen simulaatioihin. Tutkimuksessa simuloitiin 24 hypoteettisen auton käyttöiän päästöt viidellä eri akkukeimialla käyttämällä todennäköisyyksiin perustuvaa laskentaa. Tutkimus on siitä johtuen hyvä kuvaaman keskiarvoja. Tulokset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Päästöt Ambrosen & Kendallin mukaan [21].

Akkukemia	Päästöt kg CO ₂ eq/kWh
NMC litium-mangaani-kobolttioksidi	254
LFP litium-rautafosfaatti	252

Simulaation tulokset ovat huomattavasti korkeammat kuin aikaisempien tutkimusten arvot. Tutkimuksessa huomautettiin, että suuremmat akut olivat vähäpäästöisempiä, oletettavasti siksi, että akun vaatimat lisälaitteet eivät kasva lineaarisessa suhteessa verrattuna akun kokoon.

3.5 Kim ym.

Kimin ym. tutkimuksessa [16] tutkittiin Ford Focuksen 24 kWh:n akun valmistuksen päästöjä. Akku on pieni verrattuna muihin nykyaikaisiin sähköautoihin, joten se vaikuttaa tuloksiin. Tutkimuksessa huomioitiin, että LMO- ja NMC-akkukemioiden välillä ei ollut juuri eroja tulosten mukaan. Tulokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Päästöt Kimin ym. mukaan [16].

Akkukemia	Päästöt kg CO ₂ eq/kWh
LMO litium-mangaanioksidi	140

Tutkimuksessa mainittiin, että akkukemien valmistus kattaa 45 % tuotetuista kasvihuonekaasupäästöistä, mikä on linjassa muiden tutkimusten antamien tulosten kanssa.

3.6 Messagie

Messagien tutkimuksen [17] tulokset saatiin 30:n kWh akkupaketista, joka on valmistettu Euroopassa, ja sen tulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Päästöt Messagienin mukaan [17].

Akkukemia	Kasvihuonekaasujen tuotto kg CO ₂ eq/kWh
NMC litium-mangaanikobolttioksidi	160
LFP litium-rautafosfaatti	161
LMO litium-mangaanioksidi	55
NCA litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi	116

Tutkimuksen mukaan sähköautolla on pienemmät elinikäiset päästöt kuin vastaavalla dieselautolla missä tahansa Euroopassa.

3.7 Hao ym.

Haon ym. tutkimuksessa [22] vertailtiin Kiinassa valmistettuja akkuja Yhdysvalloissa valmistettuihin. Yhdysvalloissa valmistetut akut tuottivat keskimäärin 65 % vähemmän päästöjä kuin Kiinassa valmistetut. Taulukossa 10 Kiinassa laskettuja arvoja. Arvot ovat huomattavasti pienemmät kuin muissa tutkimuksissa, luultavasti laskentatavan takia.

Taulukko 10. Päästöt Haon ym. mukaan [22].

Akkukemia	Päästöt kg CO ₂ eq/kWh
NMC litium-mangaani-kobolttioksidi	104
LFP litium-rautafosfaatti	109
LMO litium-mangaanioksidi	96

Tutkimuksessa laskettiin, että valmistuksen osuus 35,2 % (NMC), 43,8 % (LMO) ja 46,1 % (LFP) päästöistä riippuu tehtaan käyttämästä energiantuotantotavasta.

4 Sähköautojen päästöt

Tässä luvussa tarkastellaan edellisten tutkimusten tulosten keskiarvoja ja lasketaan niiden avulla päästöjä. Laskentaan on valittu kahdenlaisia tutkimuksia. Useammasta tutkimuksesta laaditut yhteenvedot antavat hyviä keskiarvollisia lukuja, Petersin ym. tutkimuksessa oli perehdytty 36 aikaisempaan tutkimukseen. [19, s. 493] Raakadataan perustuvat tutkimukset saavat taas tarkempia arvoja yhden tehtaan päästöistä. Tällaisen tutkimuksen tulokset auttavat todellisten keskiarvojen pääättelemisessä, sillä tehtaan sijainnista ja tuotannosta voi päätellä enemmän kuin keskiarvoisista luvuista. Ellingsenin ym. tutkimuksesta [20] voi esimerkiksi päätellä, että hiilidioksidipäästöt ovat hieman matalammat kuin joissain muissa tutkimuksissa, koska tutkimuksessa käsitellään Grönlannissa sijaitsevaa tehdasta. Grönlannissa käytetään vähäpäästöisempää sähköä (Grönlannissa on mahdollista tuottaa noin 50 % sähköstä vesivoimalla [23]) kuin esimerkiksi Saksassa tai Kiinassa. Taulukossa 11 on listattuna kaikkien tutkimusten arvoista laskettuja keskiarvoja.

Taulukko 11. Tutkimuksista saatuja keskiarvoja.

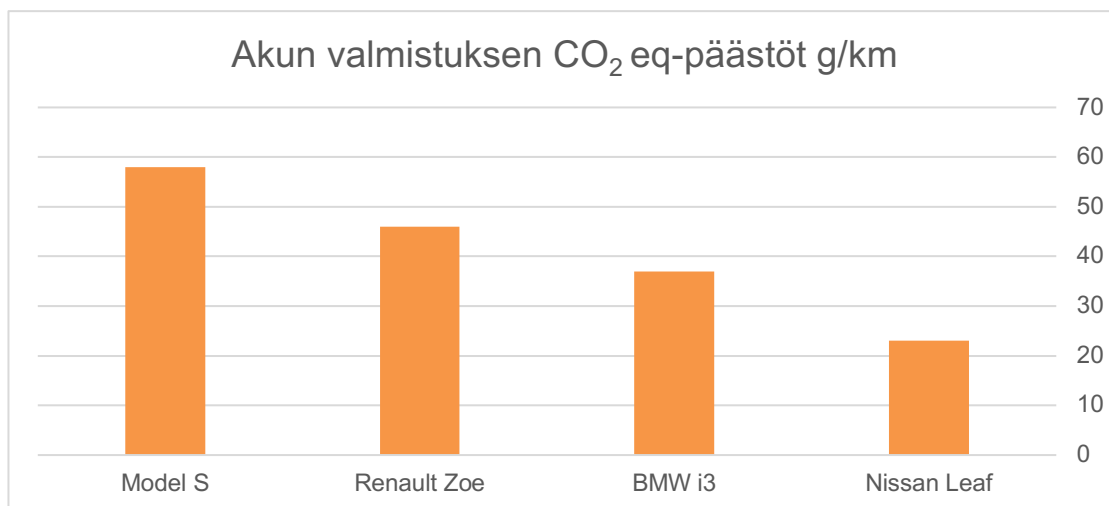
Keskiarvot	
Akkukemia	kg CO ₂ eq/kWh
NMC litium-mangaanikobolttioksidi	170
LFP litium-rautafosfaatti	191
LMO litium-mangaanioksidi	87
NCA litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi	116

Työssä käytettävät automallit on valittu niiden kokoerojen akkukapasiteetin ja yleisyyden vuoksi. Valitut autot ovat Tesla Model S, Nissan Leaf, BMW i3 ja Renault Zoe ja niiden tiedot on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Työssä käytettävien autojen akkujen akkukemiat ja kapasiteetit.

Akkukemia ja kapasiteetti				
Malli	Nissan Leaf	Model S	BMW i3	Renault Zoe
Kapasiteetti	40 kWh	75 kWh	33 kWh	41 kWh
Akkukemia	LMO	NCA	NMC	NMC

Käyttämällä laskennassa tutkimuksista saatuja keskiarvoja saadaan autojen koko akkupaketeille valmistuksen päästöiksi seuraavia lukuja, kun ne suhteutetaan 150 000 km:n käyttöiälle. Suuret erot johtuvat pääosin akkujen koosta, mutta myös akkukemiasta. Kuvaajassa 2 havainnollistettu tuloksia.



Kuvaaja 2. Akkuvalmistuksen päästöarvoja eri automalleille

4.1 Lataussähkön päästöt

Sähköntuotannon keskiarvoiset päästöt vaihtelevat huomattavasti maiden välillä. Sähköauton lataaminen Suomessa on noin neljä kertaa vähäpäästöisempää kuin esimerkiksi Saksassa: vuonna 2016 Suomessa 113 g CO₂ eq/kWh ja Saksassa 440 g CO₂ eq/kWh. Euroopan sähköntuotannon päästöjen keskiarvo oli vuonna 2016 295,8 g CO₂ eq/kWh. [18] Sähköntuotannon päästöjen lisäksi laskennassa tarvitaan autojen kulutus (taulukko 13).

Taulukko 13. Sähköautojen kulutus kWh / 100 km [23].

	Nissan Leaf	Model S	BMW i3	Renault Zoe
kWh / 100 km	16,3	20,6	14,8	14,8

Lisäksi on huomioitava sähköverkon häviöt. Suomessa sähköverkon häviöt ovat noin 3 % [25] ja muualla Euroopassa ne ovat 2–10 % [26]. Taulukoissa 14 ja 15 on kuvattu lataussähkön päästöt Euroopassa ja Suomessa ottaen huomioon sähköverkkojen häviöt. Euroopan taulukossa on käytetty keskiarvoa (6 %).

Taulukko 14. Sähköautojen lataussähkön päästöt Euroopassa.

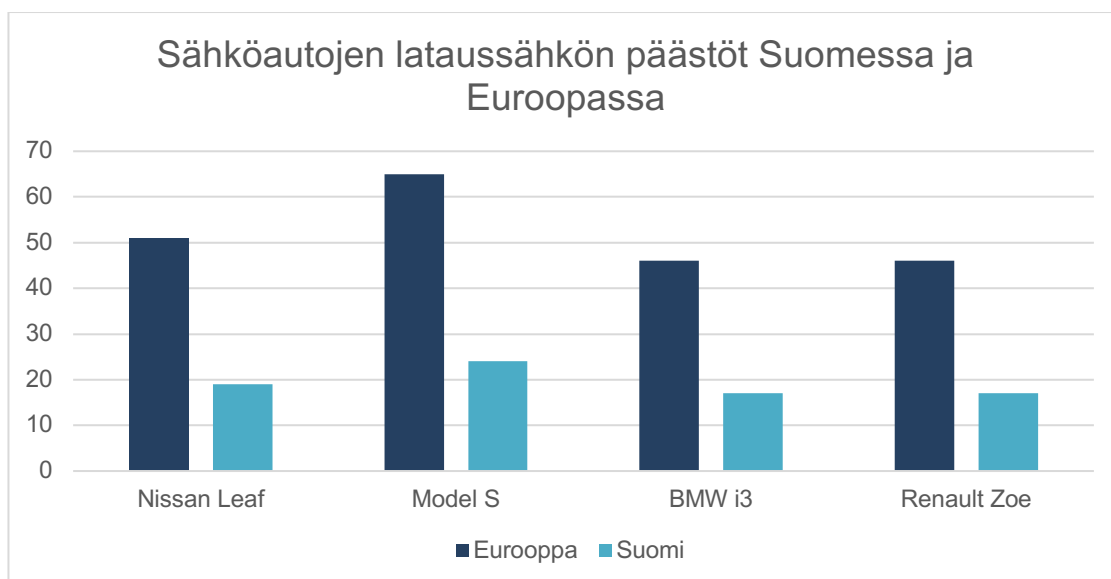
Eurooppa				
Malli	Nissan Leaf	Model S	BMW i3	Renault Zoe
CO2 eq/km	51	65	46	46

Taulukoista voi huomata, että sähköauton latauksen päästöt riippuvat huomattavasti alueesta.

Taulukko 15. Sähköautojen lataussähkön päästöt Suomessa

Suomi				
Malli	Nissan Leaf	Model S	BMW i3	Renault Zoe
CO2 eq/km	19	24	17	17

Kuvaajassa 3 on havainnollistettuja erot Euroopan keskiarvojen ja Suomen arvojen välillä.



Kuvaaja 3. Latauksen CO₂ eq -päästöt.

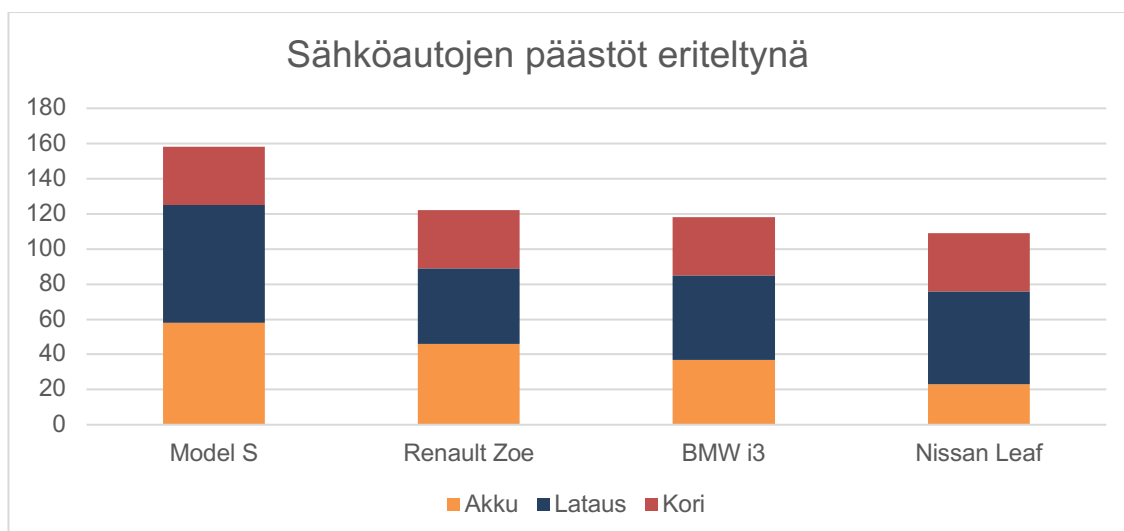
Tuloksista voidaan päätellä, että ainakin auton massa lisää päästöjä käyttövaiheessa. Model S on painavin ja suuripäästöisin, mutta moottorin hyötysuhteella ja aerodynamiikalla on myös suuri vaikutus, sillä kevein auto ei ole aina pienipäästöisin

4.2 Korin valmistuksen päästöt

Korin ja kaiken muun kuin akuston valmistus tuottaa tietenkin myös päästöjä. Nämä arvot vaihtelevat valmistajan ja auton koon mukaan, mutta tässä tutkimuksessa käytetään arvona yksinkertaisuuden vuoksi arvoa 5 t CO₂/auto [27, s. 5]. Suhteutettuna 150 000 km:n käyttöikään se on noin 33 g CO₂/km ja 200 000 km käyttöikään suhteutettuna 25 g CO₂/km

4.3 Yhdistetyt päästöt

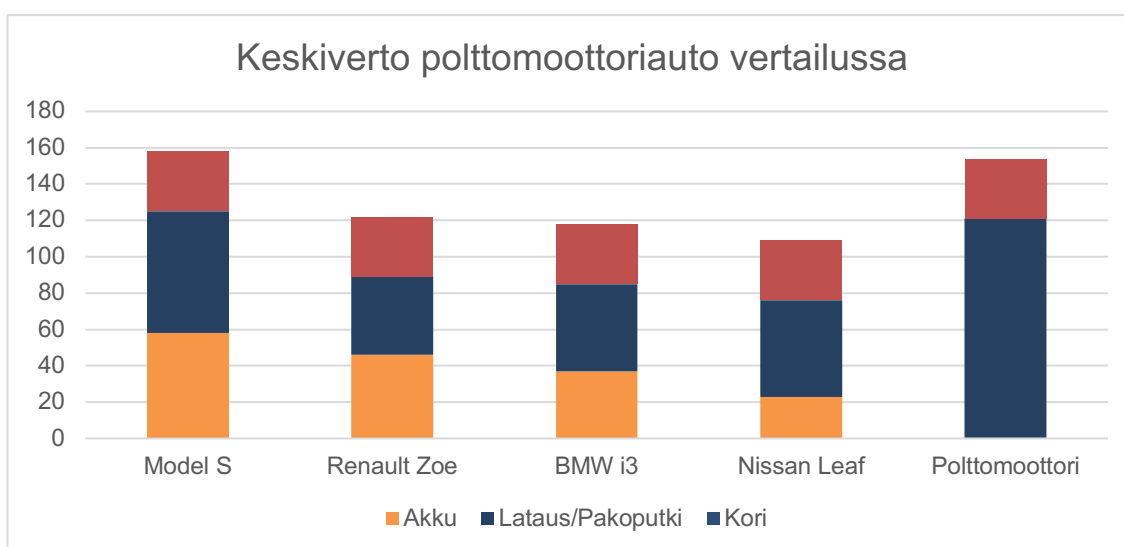
Seuraavassa taulukossa on yhdistettynä kaikkien autojen eri osa-alueiden päästöt jaoteltuna ja yhteen laskettuna kuvaajaan 4.



Kuvaaja 4. Yhdistetyt päästöt.

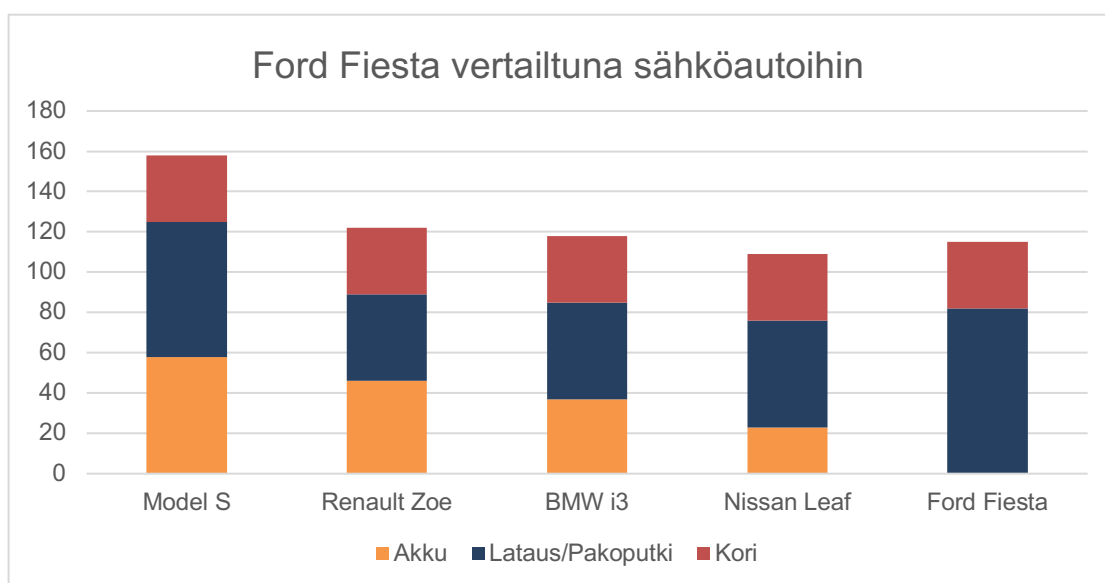
5 Polttomoottoriautojen päästöt

Polttomoottoriauton päästöt ovat yksinkertaisempi laskea, sillä dataa on huomattavasti enemmän ja se on helpompi tulkita. On kuitenkin vaikea päättää, millä tavalla polttomoottoriautoja voi verrata sähköautoon. Polttoaineen tuotanto ja kuljetus olisi mahdollista laskea yhtälöön kuten sähköautoilla. Tässä työssä sitä ei ole huomioitu. Laskelmissa käytetään tässä tapauksessa kaikkien eurooppalaisten autojen keskimääräistä päästöarvoa vuonna 2018 eli 121 g/km. [28] Lisäämällä tähän korin valmistuksen päästöt 150 000 km:n käyttöiällä saadaan arvoksi 154 g/km. Lisätään arvo kuvaajaan 5 vertailua varten.



Kuvaaja 5. Päästövertailu polttomoottoriautojen keskiarvon ja sähköautojen välillä.

Taulukosta voidaan tulkita, että sähköauto ei ole välttämättä kaikissa tapauksissa vähäpäästöisin. Teslan Model S on suuren akkunsä ja suuremman massansa takia näillä arvoilla laskettuna suuripäästöisempi kuin keskivertopolttomoottori-auto Euroopassa, kun päästöt mitataan NEDC (New European Driving Cycle) -menetelmällä. Muut sähköautot listalla ovat kuitenkin vähäpäästöisempiä. Kuvaajassa 6 verrataan sähköautoja pienipäästöisempään Ford Fiestaan. Ford Fiestan päästöt on mitattu NEDC-menetelmällä, ja ne ovat 82 g CO₂ eq/km [29].



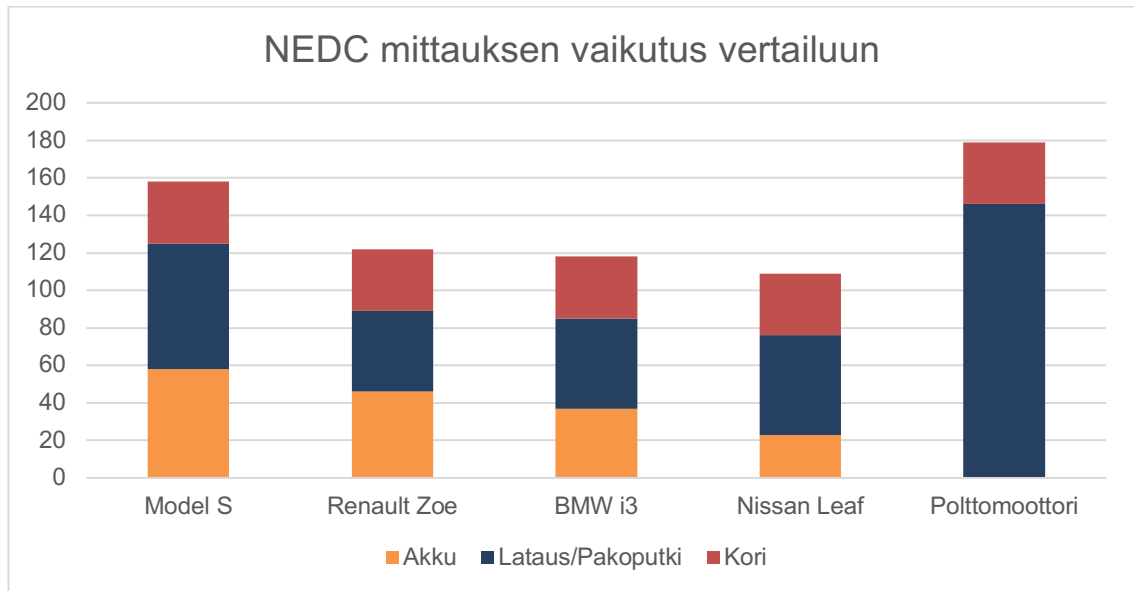
Kuvaaja 6. Ford Fiesta vertailussa sähköautoihin.

Kuvaajasta voi nähdä, että Fiesta on hyvin lähellä sähköautoja päästöjensä puolesta ja pienipäästöisempi kuin useimmat. Nissan Leaf on 5 % vähäpäästöisempi.

6 NEDC-päästömittauksen vaikutus

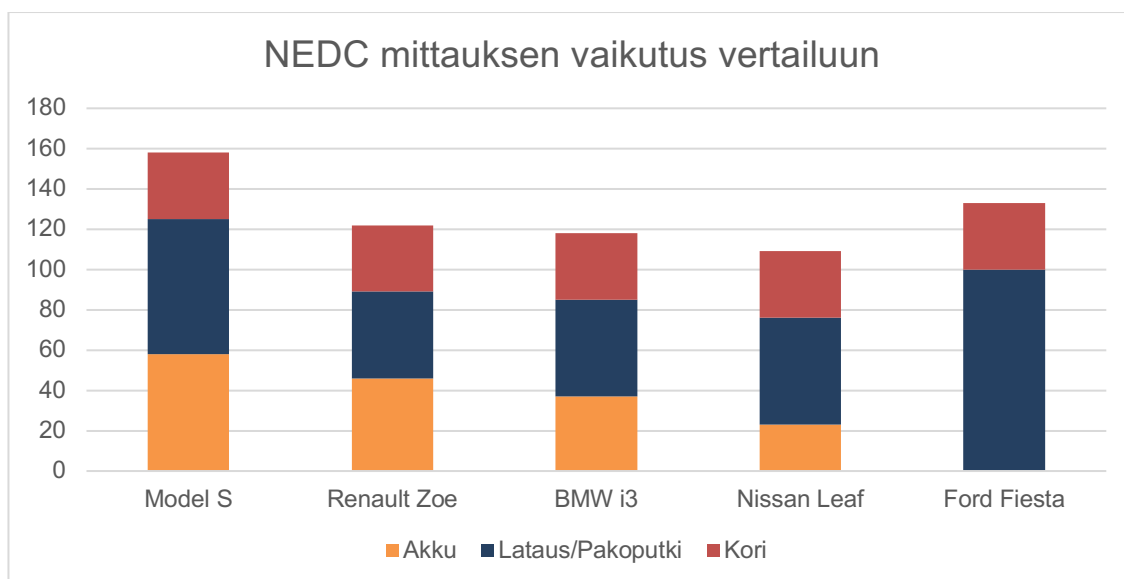
NEDC-päästömittauksen on todettu kuvaavan huonosti todellisia liikenteessä aiheutuvia päästöjä, sillä mittaustavassa ei oteta ajamisen vastuksia riittävästi huomioon. Tämän takia NEDC-mittauksesta siirrytään WLTP (Worldwide Light duty vehicle Testing Procedure) -mittaukseen, joka on huomattavasti kattavampi mittaustapa. Vuonna 2015 huomattiin, että WLTP-mittausten päästöjen tulokset oli-

vat keskimäärin noin 1,21 kertaa suurempia kuin NEDC-mittauksessa saadut tulokset, kun taas sähköautojen tulokset pysyivät samalla tasolla [30]. Kuvaajassa 7 tarkastellaan edellisen luvun tuloksia toisella päästömittausmenetelmällä mitattuna.



Kuvaaja 7. Keskiarvoinen polttomoottoriauto verrattuna sähköautoihin

WLTP-mittauksen tuloksia käytettäessä huomataan, että polttomoottoriauton päästöt ovat 12–39 % suuremmat kuin vertailussa mukana olevien sähköautojen. Kuvaajassa 8 vertaillaan Ford Fiestaa sähköautoihin.

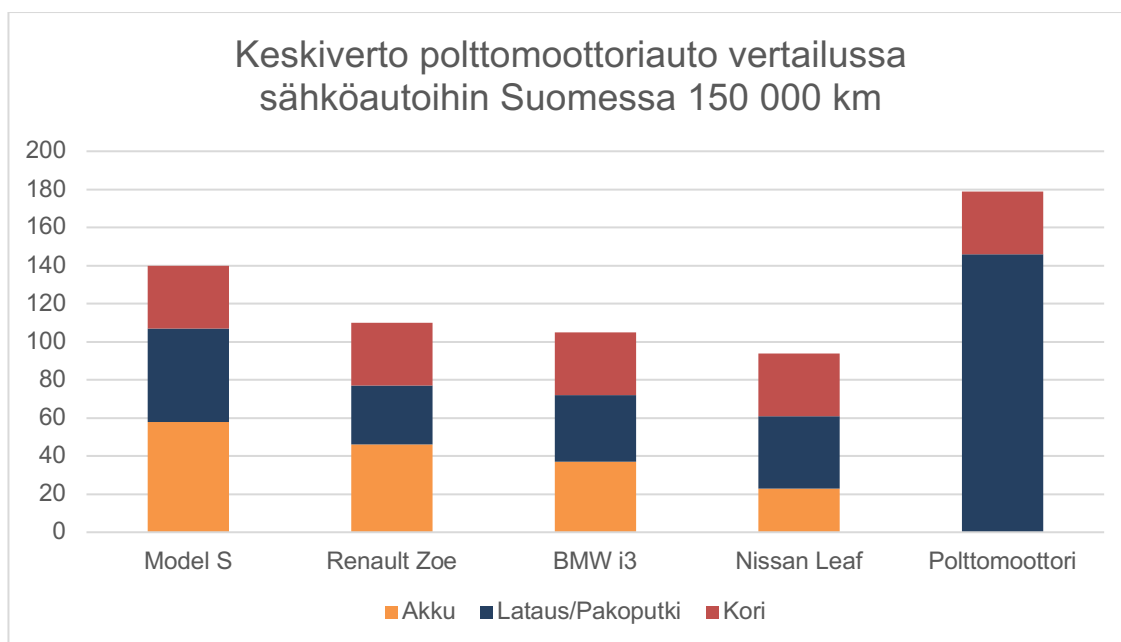


Kuvaaja 8. Ford Fiesta vertailussa sähköautoihin.

Kun Fiestan päästöt mitataan WLTP-menetelmällä, se on 8–18 % suuripäästöisempi kuin kolme pienempää vertailussa olevaa sähköautoa. Fiesta on 16 % vähäpäästöisempi kuin Model S huomattavan koko- ja painoeron takia, sekä Model S:n suuren akun takia.

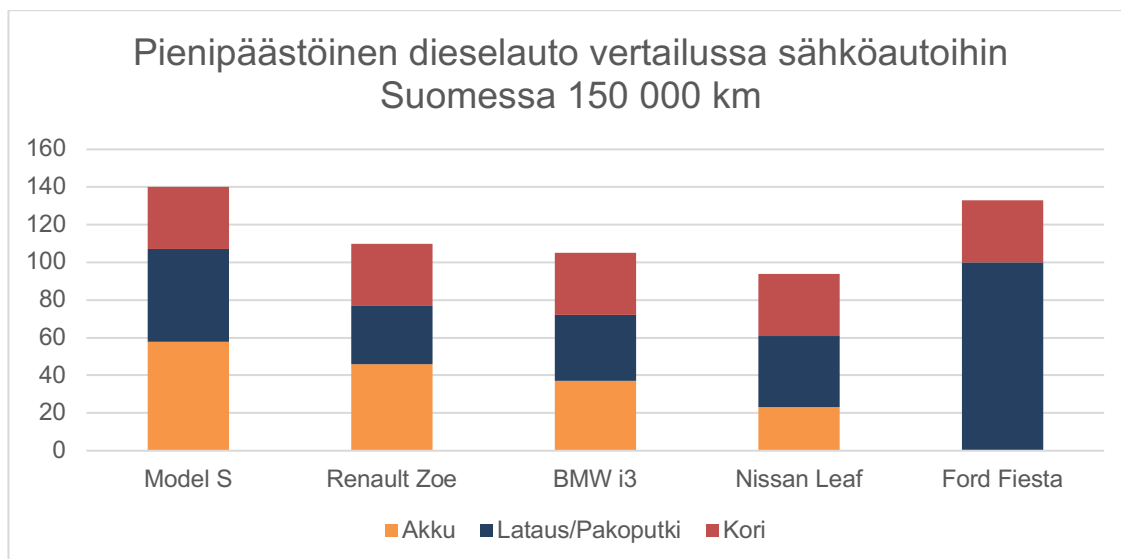
7 Päästöt Suomessa 150 000 km käyttöiällä

Suomen sähköntuotanto on huomattavasti vähäpäästöisempää kuin keskimäärin Euroopassa. Siitä johtuen sähköautojen lataussähkön ympäristövaikutus on pienempi. Suomessa vesi-, tuuli-, aurinko-, bio- ja ydinvoima kattoivat noin 80 % kaikesta energiantuotannosta vuonna 2019 [31, s. 4]. Sähköntuotannon päästöt laskivat 23 % vuodesta 2018–2019. Vuonna 2019 yhden kWh:n tuottamisen päästöt olivat keskimäärin 81 g CO₂/kWh [31, s. 15]. Kuvaajassa 9 on vertailtu samoja autoja kuin aikaisemmin, mutta lataussähkön päästöjen laskentaan on käytetty Suomen arvoja.



Kuvaaja 9. Keskiverto polttomoottoriauto vertailussa sähköautoihin Suomessa 150 000 km:n käyttöiällä.

Kuvaajasta voi päätellä, että sähköauto on Suomessa huomattavasti vähäpäästöisempi vaihtoehto kuin keskivertoauto. Päästöt ovat sähköautosta riippuen 47–22 % pienemmät kuin keskivertoautolla. Kuvaajassa 10 vertaillaan Ford Fiestan päästöjä Suomessa.

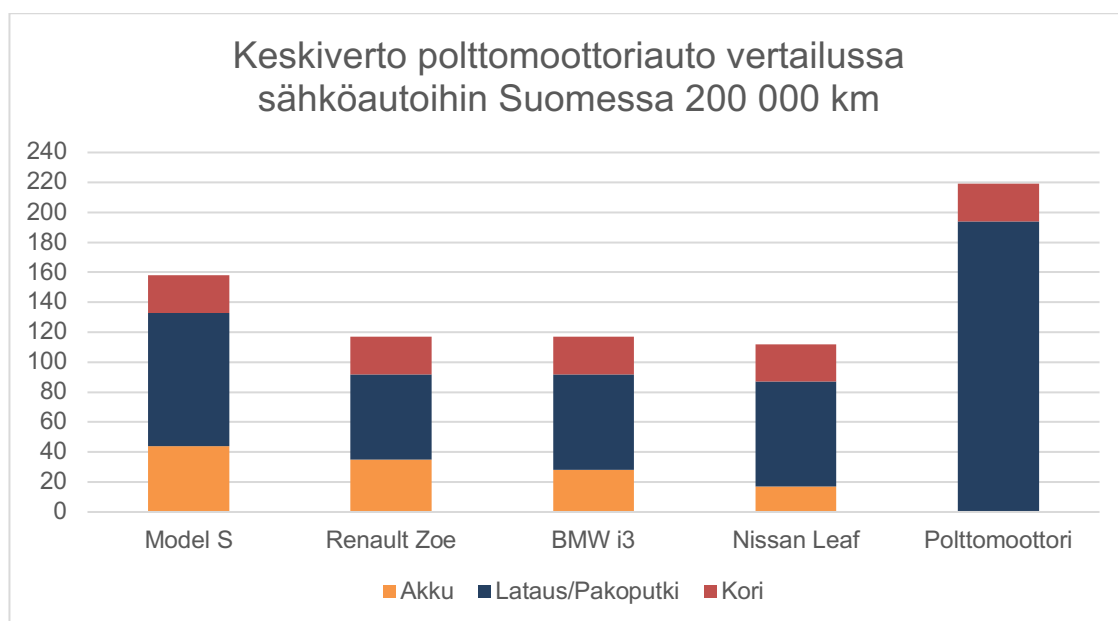


Kuvaaja 10. Pienipäästöinen dieselauto vertailussa sähköautoihin Suomessa 150 000 km:n käyttöiällä.

Kuvaajasta nähdään, että Suomessa pienemmät sähköautot ovat päästöjen kannalta parempi vaihtoehto myös verrattaessa pienipäästöiseen dieselautoon. Teslan Model S:n päästöt ovat kuitenkin 5 % korkeammat kuin vertailun Fiestalla. Muiden sähköautojen päästöt olivat 17–29 % pienemmät kuin Fiestan.

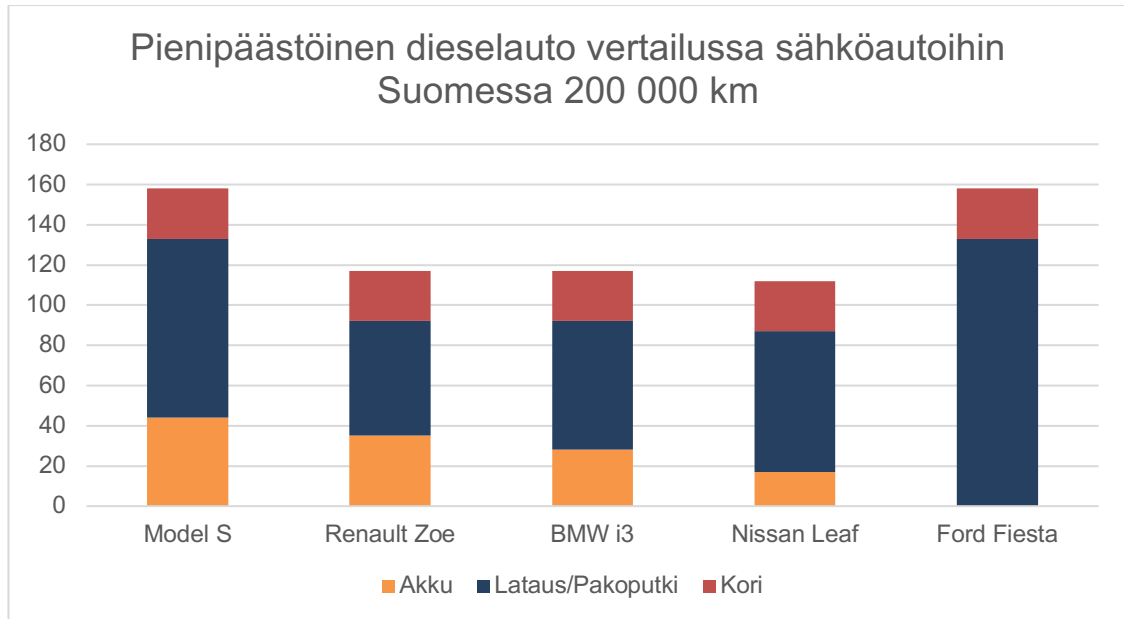
7.1 Päästöt suomessa 200 000 kilometrin käyttöiällä

Suomen tilastoissa täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että Suomessa autojen keski-ikä on korkeampi kuin useissa muissa Euroopan maissa (12,2 vuotta [32]) ja autoilla ajetaan usein yli 200 000 km. Mitä enemmän autolla ajetaan, sitä enemmän päästöero kasvaa sähköautojen ja polttomoottoriautojen välillä. Lataussähkön tuottamisen päästöt ovat pienemmät kuin bensiinin tai dieselin polttamisesta aiheutuvat. Kuvaajissa 11 ja 12 on laskettu samoja arvoja 200 000 km:n käyttöiällä.



Kuvaaja 11. Keskivertopolttomoottoriauto vertailussa sähköautoihin Suomessa 200 000 km:n käyttöiällä

Kuvaajasta 11 nähdään, että käyttöiän kilometrimäärän kasvaessa sähköauton ja polttomoottoriauton ero kasvaa huomattavasti. Sähköautojen päästöt ovat malista riippuen 96–39 % pienemmät kuin keskivertopolttomoottoriautolla.



Kuvaaja 12. Pienipäästöinen dieselauto vertailussa sähköautoihin Suomessa 200 000 km:n käyttöiällä.

Myös Ford Fiestaan verrattaessa voidaan havaita sama ilmiö: ero sähköautojen ja polttomoottoriauton välillä kasvaa kilometrimäärän mukana. Verrattaessa Fiestaan Tesla Model S on päästöiltään samalla tasolla. Muiden sähköautojen päästöt ovat 41–35 % pienemmät mallista riippuen.

7.2 Autokalkulaattori

Tässä luvussa vertaillaan työssä saatuja arvoja Autokalkulaattorilla [32] laskettuihin vastaaviin. Tulokset on esitetty taulukossa 15 ja 16. Autokalkulaattori on laskuri, jossa käyttäjä voi syöttää haluamansa auton tekniset tiedot ja nähdä karkeita laskelmia päästöistä ja käytön kustannuksista.

Taulukko 15. Autokalkulaattorin tulokset

Autokalkulaattori				
Malli/tyyppi	Fiesta		Keskiverto	
Kilometrimäärä	150 000	200 000	150 000	200 000
Ero sähköautojen päästöihin	7–47 %	18–60 %	27–75 %	38–89 %
Prosenttien keskiarvo	27 %	39 %	51 %	64 %

Taulukko 16. Opinnäytetyön tulokset

Opinnäytetyö				
Malli/tyyppi	Fiesta		Keskiverto	
Kilometrimäärä	150 000	200 000	150 000	200 000
Ero sähköautojen päästöihin	-5–29 %	0–41 %	22–47 %	39–96 %
Prosenttien keskiarvo	12 %	21 %	35 %	68 %

Autokalkulaattorin datalla päästöerot ovat Fiestan kohdalla huomattavasti suuremmat, mutta keskivertoautoon verrattuna Autokalkulaattorin tulokset ovat lähempänä tässä työssä saatuja. Erot johtuvat Autokalkulaattorin käyttämästä datasta. Autokalkulaattorin mukaan pienempien autojen akut tuottavat huomattavasti vähemmän päästöjä, kuin tässä työssä on laskettu, kun taas suurempien autojen akustojen päästöt ovat samalla tasolla. Autokalkulaattorin tarkoitus on antaa suurpiirteisiä arvoja monelle eri ajoneuvoluokalle niiden käytön hinnasta ja päästöistä, joten sen tarkkuus vaihtelee automallin mukaan.

8 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tavoitteena oli vertailla aiheesta tehtyjä tutkimuksia kriittisesti ja laskea usean tutkimuksen avulla keskiarvoja, joiden pohjalta päästövertailu voitaisiin suorittaa kohtalaisella tarkkuudella.

Sähköautojen päästökeskiarvojen laskenta onnistui työssä hyvin ja tulokset olivat todellisuutta vastaavia, vaikka tutkimusten luotettavuuden määrittäminen

oli haastavaa. Käsiteltävä aihe oli hyvin laaja ja monihaarainen. Työssä oli kuitenkin otettu huomioon suuri osa tuloksiin vaikuttavista muuttujista ja näin saatu vaadittavan tarkkoja keskiarvoja.

Työn lopputuloksena huomattiin, että sähköautot ovat keskimäärin vähäpäästöisempiä Euroopassa verrattuna polttomoottoriautoihin. Poikkeuksia on kuitenkin olemassa maissa, joissa sähkön tuotanto oli hiilivoimaan ja muihin korkeapäästöisiin energialähteisiin perustuvaa. Maissa kuten Saksa ja Puola ovat autojen päästölukemat lähempänä toisiaan.

Työssä ei otettu kantaa autojen kierrätyksen vaikutukseen, mutta on otettava huomioon, että sähköauton akku ei ole käyttökelvoton sen jäädessä pois ajoneuvokäytöstä. Tuuli ja aurinkovoimalat tarvitsevat ”sähköpankkeja”, jotta niiden kausiluontoinen sähköntuotanto olisi käytännöllisempää kuluttajille. Sähköautojen akut saattaisivat sopia esimerkiksi sellaiseen käyttötarkoitukseen, jolloin valmistuksen päästöt jakautuisivat vielä pidemmälle käyttöiälle. Akkujen kierrätys ei ole saavuttanut täyttä potentiaalia, mutta keinoja sen saavuttamiseksi on kehitteillä. Fortum lupaa verkkosivuillaan voivansa kierrättää yli 80 % li-ion-akuista. [34]

Sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjen trendi on ollut laskeva [18, 31], ja sen voidaan olettaa laskevan tulevaisuudessakin. Toisaalta myös polttomoottoriautojen hiilijalanjälkeä voidaan pienentää biopolttoaineilla ja moottori- ja rakenneteknisillä ratkaisuilla.

Työssä päästiin tutustumaan syvemmin sähköautojen valmistusprosesseihin ja niitä koskeviin tutkimuksiin. Aihe on tällä hetkellä erittäin tärkeä ja siitä saadaan jatkuvasti uutta tietoa.

Lähteet

- 1 ACEA Report Vehicles in use Europe 2018. Verkkoaineisto. ACEA <https://www.acea.be/uploads/statistic_documents/ACEA_Report_Vehicles_in_use-Europe_2018.pdf>. Luettu 15.3.2020.
- 2 Teslan ajoneuvotakuu. Verkkoaineisto. Tesla <https://www.tesla.com/fi_FI/support/vehicle-warranty?redirect=no>. Luettu 15.3.2020.
- 3 Nissan Leaf: zero emission car. Verkkoaineisto. All-andorra <<https://all-andorra.com/nissan-leaf-zero-emission-car/>>. Luettu 12.2.2020.
- 4 M. Stanley Whittingham. Verkkoaineisto. Encyclopedia Britannica. <<https://www.britannica.com/biography/M-Stanley-Whittingham>>. Luettu 16.4.2020.
- 5 Science and Applications of Mixed Conductors for Lithium Batteries 2011. Verkkoaineisto. Cambridge university <www.cambridge.org/core/journals/mrsbulletin/article/scienceandapplicationsofmixedconductorsforlithiumbatteries/B98A3E40CFE78EE9C97DC70514D0DD11>. Luettu 12.11.2019.
- 6 Battery chemistry finally explained 2015. Verkkoaineisto. Batterybro. <<https://batterybro.com/blogs/18650-wholesale-battery-reviews/18880255-battery-chemistry-finally-explained>>. Luettu 15.4.2020.
- 7 Heimes, Heiner; Kampker, Achim; Lienemann, Christoph; Locke, Marc & Offermanns, Christian. 2019. Lithium-ion battery cell production process. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/330902286_LITHIUM-ION_BATTERY_CELL_PRODUCTION_PROCESS>. Luettu 3.2.2020.
- 8 Apple and Google named in US lawsuit over Congolese child cobalt mining deaths. 2019. Verkkoaineisto. The Guardian <<https://www.theguardian.com/global-development/2019/dec/16/apple-and-google-named-in-us-lawsuit-over-congolese-child-cobalt-mining-deaths>>. Luettu 28.4.2020.
- 9 Lithium Ion Battery Recycling Technology 2015 Current State and Future Prospects. Verkkoaineisto. Chalmers university of technology.

- <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/230991/local_230991.pdf>. Luettu 11.11.2019.
- 10 Types of battery cells 2017. Verkkoaineisto. Battery University. <https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_battery_cells>. Luettu 11.11.2019.
 - 11 Panasonic and Toyota launch joint venture for prismatic battery cells 2020. Verkkoaineisto. EEnews. <<https://www.eenewspower.com/news/panasonic-and-toyota-launch-joint-venture-prismatic-battery-cells>>. Luettu 16.4.2020.
 - 12 Li-ion Cylindrical Rechargeable Cell. Verkkoaineisto. Batteryspace. <<https://www.batteryspace.com/li-ion-14430-cylindrical-rechargeable-cell-3-7v-650mah-4-5-aa-size-2-4wh-ul-un38-3-passed-ndgr.aspx>>. Luettu 16.4.2020.
 - 13 Lithium-ion Battery Packaging Materials. Verkkoaineisto. Targray. <<https://www.targray.com/li-ion-battery/packaging-materials>>. Luettu 16.4.2020.
 - 14 Asymmetric temperature modulation for extreme fast charging of lithium ion batteries 2019. Verkkoaineisto. Cell. <[www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(19\)30481-7](http://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(19)30481-7)>. Luettu 13.11.2019.
 - 15 Dahllöf, Lisbeth & Romare, Mia. 2017. The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. Verkkoaineisto. <<http://www.ivl.se/download/The+life+cycle+energy+consumption+and+CO2+emissions+from+lithium+ion+batteries+.pdf>>. Luettu 12.3.2020.
 - 16 Arsenault, Renata; Bae, Chulheung; Ahn, Suckwon Lee Jaeran; Kim, Hyung Chul & Wallington, Timothy J. 2016. Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis. Verkkoaineisto. <pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.6b00830>. Luettu 13.1.2020.
 - 17 Messagie, Maarten. 2017. Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles. Verkkoaineisto. <www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE - draft report v04.pdf>. Luettu 10.1.2020.

- 18 Overview of electricity production and use in Europe. 2016. Verkkoaineisto. EEA <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment-4>>. Luettu 13.1.2020.
- 19 Bauman, Manuel; Braun, Jessica; Peters, Jens F; Weil, Marcel & Zimmermann, Benedikt. 2017. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review 2017. Verkkoaineisto <www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116304713#>. Luettu 12.1.2020.
- 20 Ellingsen, Linda Ager-Wick; Majeu-Bettez, Guillaume; Singh, Bhawna; Srivastava, Akhilesh K; Stroman, Anders Hammer & Valoen Lars Ole. 2016. Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack. Verkkoaineisto. <<https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2466860/Accepted+manuscript.pdf?sequence=3>>. Luettu 21.11.2019.
- 21 Ambrose, Hajiro & Kendall, Alissa. 2016. Effects of battery chemistry and performance on the life cycle. Verkkoaineisto <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920915300390>>. Luettu 12.1.2020.
- 22 Hao, Han; Mu, Zhexuan; Jiang, Shuhua; Liu Zongwei & Zhao, Fuquan. 2017. GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China. Verkkoaineisto. <<https://www.mdpi.com/2071-1050/9/4/504/htm>>. Luettu 5.12.2019.
- 23 Energy consumption in Greenland. 2020. Verkkoaineisto. World data <<https://www.worlddata.info/america/greenland/energy-consumption.php>>. Luettu 13.2.2020.
- 24 Range and efficiency test of 10 electric cars. 2018. Verkkoaineisto. Pushevs. <<https://pushevs.com/2018/07/29/range-efficiency-test-of-10-electric-cars/>>. Luettu 13.1.2020.
- 25 Annala, Salla; Haakana, Juha; Honkapuro, Samuli; Lassila, Jukka & Partanen, Jarmo. 2015. Selvitys sähkö- ja kaasuinfrastruktuurin energiatehokkuuden parantamismahdollisuuksista. Verkkoaineisto. <https://energia.fi/files/1224/Selvitys_sahko-_ja_maakaasuinfrastruktuurin_energiatehokkuuden_parantamismahdollisuuksista_2015.pdf>. Luettu 2.3.2020.

- 26 CEER Report on Power Losses. 2017. Verkkoaineisto. CEER. <<https://www.ceer.eu/documents/104400/-/-/09ecee88-e877-3305-6767-e75404637087>>. Luettu 4.3.2020.
- 27 Inaba, Atsushi; Kawamoto, Ryuji; Mochizuki, Hideo; Moriguchi, Yoshihisa; Nakano, Takahiro; Motohashi, Masayuki & Sakai, Yuji. 2019. Estimation of CO₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA <https://www.researchgate.net/publication/333046826_Estimation_of_CO2_Emissions_of_Internal_Combustion_Engine_Vehicle_and_Battery_Electric_Vehicle_Using_LCA>. Luettu 4.3.2020.
- 28 Dornoff Jan, Mock Peter & Tietge Uwe. 2018. CO₂ emissions from new passenger cars in the European Union: Car manufacturers' performance in 2018. Verkkoaineisto <https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2_emissions_pv_EU_2018_20190806.pdf>. Luettu 14.1.2020.
- 29 2018 Ford Fiesta 1.5 TDCi. Verkkoaineisto. Automobile Catalog <https://www.automobile-catalog.com/car/2018/2562950/ford_fiesta_1_5_tdc_i_85.html>. Luettu 23.1.2020.
- 30 S Tsiakmakis; G. Fontaras; C Cubito; J. Pavlovic; K. Anagnostopoulos & B. Ciuffo. 2017. From NEDC to WLTP: effect on the type approval CO₂ emissions of light-duty vehicles. Verkkoaineisto <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC107662/kjna28724enn.pdf>>. Luettu 23.1.2020.
- 31 Sähköntuotannon polttoaineet ja CO₂-päästöt. 2020. Verkkoaineisto. Energiatieteollisuus <https://energia.fi/files/1414/a_Sahkontuotannon_kk_polttoaineet_Joulukuu.pdf>. Luettu 29.1.2020.
- 32 Average age of passenger cars in some european countries. 2020. Verkkoaineisto. Autoalan tiedotuskeskus <http://www.aut.fi/en/statistics/international_statistics/average_age_of_passenger_cars_in_some_european_countries?sort_column=2&sort_direction=1>. Luettu 6.3.2020.
- 33 Autokalkulaattori. Verkkoaineisto. <<https://www.ilmastopaneeli.fi/autokalkulaattori/>>. Luettu 15.3.2020.

- 34 Lithium-ion Battery Recycling Solution 2020. Verkkoaineisto. Fortum <<https://www.fortum.com/products-and-services/fortum-battery-solutions/recycling/lithium-ion-battery-recycling-solution/>>. Luettu 12.2.2020.