Tampereen yliopisto

Ilona Sjöblom

SÄHKÖAUTOJEN JA LADATTAVIEN HYBRIDIEN VALMISTUKSEN JA KÄYTÖN AIKAISET PÄÄSTÖT BENSIINI- JA DIESELAUTOIHIN VERRATTUNA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Hannele Auvinen
Kesäkuu 2024

TIIVISTELMÄ

Ilona Sjöblom: Sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistuksen ja käytön aikaiset päästöt bensiini- ja dieselautoihin verrattuna
Emissions from Manufacture and Use of Electric Vehicles and Plug-in Hybrids Compared to Petrol and Diesel Cars
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden kandidaattiohjelma, ympäristö- ja energiatekniikan opintosuunta
Kesäkuu 2024

Sähköautot ja ladattavat hybridit voivat olla avainasemassa liikenteestä aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen ja ilmansaasteiden vähentämisessä. Sähköauton ja ladattavan hybridin valmistus aiheuttaa päästöjä, vaikka etenkin sähköauton käyttö on vähäpäästöistä. Ei ole yksiselitteistä, onko sähköauto tai ladattava hybridi vähäpäästöisempi kuin polttomoottoriauto sekä valmistusta että käyttöä tarkasteltaessa. Aihe on ajankohtainen, sillä sähköautojen ja ladattavien hybridien määrät ovat lisääntyneet viime vuosina. Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan siis sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistuksesta ja käytöstä aiheutuvia päästöjä ja verrataan niitä polttomoottoriautoista aiheutuviin päästöihin. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena.

Polttomoottoriautossa on polttomoottori ja polttoainetankki. Sähköautossa on näiden tilalla akku ja sähkömoottori. Ladattavassa hybridissä on sekä polttomoottori ja polttoainetankki että akku ja sähkömoottori. Sähköautoa ja ladattavaa hybridiä ladataan sähköverkosta. Sähköautossa ja ladattavassa hybridissä voi olla litiumioniakku tai nikkeli-metallihydridiakku. Litiumioniakkuja on kuutta eri tyyppiä.

Sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistukseen tarvitaan enemmän harvinaisia alkuaineita kuin polttomoottoriautojen valmistukseen. Sähköautojen ja ladattavien hybridien akuissa käytettävien nikkelin, koboltin ja litiumin hankinnasta syntyy erilaisia päästöjä ja ympäristöongelmia. Sähköauton ja ladattavan hybridin valmistaminen on noin 10–40 % energiaintensiivisempää kuin polttomoottoriauton valmistaminen. Suurempi energiankulutus voi johtaa suurempiin kasvihuonekaasupäästöihin ja ilmansaasteisiin. Sähköauton ja ladattavan hybridin valmistuksen päästöt riippuvat merkittävästi esimerkiksi akkutyypistä ja käytetyistä energianlähteistä.

Sähköauton ja ladattavan hybridin käytön aikaiset päästöt riippuvat merkittävästi siitä, millä energianlähteellä niiden lataamiseen käytettävä sähkö on tuotettu. Sähköauton hyötysuhde on huomattavasti parempi kuin polttomoottoriauton. Myös ladattava hybridi on polttomoottoriautoa energiatehokkaampi. Sähköautoista ei synny haitallisia pakokaasupäästöjä niin kuin polttomoottoriautoista. Ladattavista hybrideistä syntyy yleensä vähemmän ilmansaasteita kuin polttomoottoriautoista.

Sähköautot ja ladattavat hybridit kuluttavat vähemmän energiaa valmistuksen ja käytön aikana ja niistä aiheutuu vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin polttomoottoriautoista, paitsi jos ne toimivat pelkästään kivihiilestä peräisin olevalla sähköllä. Sähköautojen ja ladattavien hybridien lisääntyminen voi kuitenkin lisätä energiankulutusta ja siirtää tieliikenteen päästöjä energiasektorille.

Avainsanat: sähköauto, ladattava hybridi, electric vehicle, plug-in hybrid

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check –ohjelmalla.

Opinnäytteessäni käytetyt tekoälytyökalut ja niiden käyttötarkoitukset on kuvailtu alla:

Scopus AI:
Käyttötarkoitus ja osio, jossa työkalua käytettiin: lähteiden etsiminen, luvut 2–3

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien tekoälyllä tuotetut osat, ja hyväksyn vastuun mahdollisista julkaisueettisten normien rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1.JOHDANTO 1
2.SÄHKÖAUTOJEN JA LADATTAVIEN HYBRIDIEN OSAT JA TOIMINTA 3
2.1 Sähköauton osat ja toiminta 3
2.2 Ladattavan hybridin osat ja toiminta 4
2.3 Akun toiminta 6
2.3.1 Litiumioniakku 8
2.3.2 Nikkeli-metallihydridiakku 9
3.VALMISTUKSEN PÄÄSTÖT 11
3.1 Tarvittavat materiaalit 11
3.2 Tarvittavien metallien louhinta ja rikastus 14
3.3 Akun valmistus 19
3.4 Sähkömoottorin valmistus 23
3.5 Vertailu polttomoottoriautojen valmistuksesta aiheutuviin päästöihin 27
4.KÄYTÖN AIKAISET PÄÄSTÖT 29
4.1 Sähköautojen ja ladattavien hybridien käytön aikaiset päästöt 29
4.2 Vertailu bensiini- ja dieselautojen käytön aikaisiin päästöihin 33
5.JOHTOPÄÄTÖKSET 35
LÄHTEET 37

LYHENTEET JA MERKINNÄT

LCO	litiumkobolttioksidiakku
LFP	litiumrautafosfaattiakku
LMO	litiummangaanioksidiakku
LTO	litiumtitanaattiakku
NCA	litiumnikkelikobolttialumiinioksidiakku
NdFeB	neodyymi-rauta-booriboorimagneetti
NiMH	nikkeli-metallihydridiakku
NMC	litiumnikkelimangaanikobolttioksidiakku
REE	harvinainen maametalli

1 JOHDANTO

Kotimaan liikenteestä aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen määrä Suomessa oli vuonna 2020 noin 10,4 miljoonaa tonnia hiilidioksidiekvivalenttia, mikä vastaa noin 22 % Suomen kaikista kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2020 (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2022). Kasvihuonekaasupäästöihin lasketaan hiilidioksidi-, metaani- ja typpioksiduulipäästöt, ja ne yhteismitallistetaan hiilidioksidiekvivalenteiksi, jotta voidaan laskea yhteen eri kasvihuonekaasupäästöjen vaikutus (Tilastokeskus, n.d.; VTT, n.d.). Vuonna 2020 kotimaan liikenteen kasvihuonekaasupäästöistä noin 95 % oli peräisin tieliikenteestä. Tieliikenteen päästöistä 53 % syntyi henkilöautoista. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2022) Henkilöautot ovat siis hyvin merkittävä päästölähde Suomessa.

Suomen tulee vähentää kasvihuonekaasupäästöjään 39 % vuoteen 2030 mennessä vuoteen 2005 verrattuna (Euroopan parlamentti, 2018). Kasvihuonekaasut aiheuttavat ilmaston lämpenemistä, minkä vuoksi kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen on välttämätöntä (Euroopan parlamentti, 2023). Tieliikenteestä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää suosimalla vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivia autoja eli täyssähköautoja, ladattavia hybridejä, kaasuautoja tai etanoli- ja vetyautoja (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2023). Tässä työssä tarkastellaan täyssähköautoja sekä ladattavia hybridejä.

Kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi polttomoottoriautoista syntyy pakokaasuja, jotka sisältävät runsaasti ilmanlaatua heikentäviä epäpuhtauksia. Näitä ovat esimerkiksi typpidioksidi, typpimonoksidi, hiilimonoksidi, haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC), pienhiukkaset ja metalliyhdisteet. (HSY, 2023) Nämä ilmansaasteet aiheuttavat haittaa ihmisten terveydelle ja ympäristölle (Hänninen et al., 2016, s. 3). Tämä on yksi syy lisää siirtyä polttomoottoriautoista vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimiviin autoihin.

Kaikkien EU:ssa myytävien uusien henkilö- ja pakettiautojen tulee olla hiilidioksidipäästöttömiä vuodesta 2035 alkaen (Euroopan parlamentti, 2022). Käytännössä tämä tarkoittaa siis uusien polttomoottoriautojen myyntikieltoa. Monet autovalmistajat ovat jo ilmoittaneet lopettavansa polttomoottoriautojen valmistamisen. Volkswagen lopettaa polttomoottoriautojen valmistamisen Euroopassa vuoteen 2035 mennessä (MTV Uutiset, 2021a), Audi lopettaa polttomoottoriautojen valmistamisen vuonna 2033 (MTV Uutiset,

2021b) ja Volvo valmistaa viimeisen dieselauton vuonna 2024 (Volvo Cars, 2023). Polttomoottoriautojen määrä siis väistämättä vähenee ja vastaavasti vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivien autojen määrä kasvaa tulevaisuudessa.

Sekä ladattavien hybridien että täyssähköautojen määrät ovat jo kasvaneet runsaasti viime vuosina. Vuosina 2021–2023 ladattavat hybridit lisääntyivät noin 30 000 kappaletta vuodessa. Vuonna 2023 sähköautojen määrä kasvoi lähes 39 000 kappaletta. Samalla polttomoottoriautojen määrä on vähentynyt: bensiiniautojen määrä väheni vuonna 2023 noin 30 000 kappaletta ja dieselautojen määrä noin 25 000 kappaletta. Bensiini- ja dieselautojen määrän vähenemisen tulee kiihtyä merkittävästi, jotta liikenteen päästövähennystavoitteet toteutuvat. (Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2023)

Sähköautot ja ladattavat hybridit eivät kuitenkaan ole täysin ongelmattomia. Akkujen valmistukseen tarvitaan paljon raaka-aineita ja raaka-aineiden louhinnasta seuraa erilaisia päästöjä ja ympäristövaikutuksia (Härri, 2018). Lisäksi sähköautojen ja ladattavien hybridien yleistyminen lisää energiankulutusta huomattavasti (European Environment Agency, 2021).

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistuksen ja käytön aikaisia päästöjä ja verrataan niitä polttomoottoriautoihin eli bensiini- ja dieselautoihin. Sähköautojen ja ladattavien hybridien käytön aikaiset päästöt ovat yleensä pienemmät kuin polttomoottoriautojen, mutta akun ja sähkömoottorin valmistus aiheuttaa runsaasti erilaisia päästöjä. Työn tavoitteena on selvittää, miten sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistuksen ja käytön aikaiset päästöt ja niiden määrät eroavat polttomoottoriautojen päästöistä, eli onko sähköautolla tai ladattavalla hybridillä ajaminen vähäpäästöisempää valmistusvaihe huomioon otettuna kuin polttomoottoriautolla. Työstä on rajattu elinkaaren viimeinen vaihe, käytöstä poisto, pois, jotta työ pysyy kandidaatintyön rajoissa. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena.

Työn alussa tarkastellaan sähköautojen ja ladattavien hybridien osia ja toimintaa. Tämän jälkeen tarkastellaan sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistusta ja valmistuksesta syntyviä päästöjä ja verrataan niitä polttomoottoriautojen valmistuksesta syntyviin päästöihin. Seuraavaksi tarkastellaan sähköautojen ja ladattavien hybridien käytön aikaisia päästöjä ja verrataan niitä polttomoottoriautoihin. Viimeiseksi kootaan työstä tehtävät johtopäätökset.

2 SÄHKÖAUTOJEN JA LADATTAVIEN HYBRIDIEN OSAT JA TOIMINTA

Tässä luvussa tarkastellaan sähköautojen ja ladattavien hybridien osia ja toimintaa. Tarkastelussa keskitytään erityisesti akun toimintaan, sillä se on tärkeä komponentti.

2.1 Sähköauton osat ja toiminta

Sähköauton tärkeimpiä komponentteja ovat akku, johon energiaa varastoidaan, sähkömoottori ja säädin (Larminie & Lowry, 2012, s. 19). Lisäksi sähköautossa on regeneratiiviset jarrut (European Environment Agency, 2016, s. 11). Sähköautossa akku on ainoa energiavarasto sekä painavin ja tilavuudeltaan suurin komponentti (Larminie & Lowry, 2012, s. 29). Sähkömoottori antaa akkuun varastoitua sähköenergiaa ajoneuvolle. Sähkömoottorin säädin ohjaa moottorin suorituskykyä, kuten säätelee akusta moottorille syötettävää tehoa. Sähkömoottori voi toimia akun sisäisenä generaattorina tuottamalla sähköä ajoneuvon hidastaessa. (European Environment Agency, 2016, s. 11)

Regeneratiivinen jarrujärjestelmä auttaa pitämään sähköauton akun ladattuna, sillä jarrujärjestelmä muuntaa sähköksi suuren osan energiasta, joka muuten häviäisi lämpönä jarrutuksen aikana. Järjestelmään kuuluu pieni sähkögeneraattori, jota käytetään yhdessä perinteisten kitkajarrujen kanssa. Energiatehokkuuden parantamisen lisäksi regeneratiivinen jarrujärjestelmä pidentää ajoneuvon käyttöikää, sillä sen osat eivät kulu niin nopeasti kuin ilman regeneratiivista jarrujärjestelmää. (European Environment Agency, 2016, s. 13)

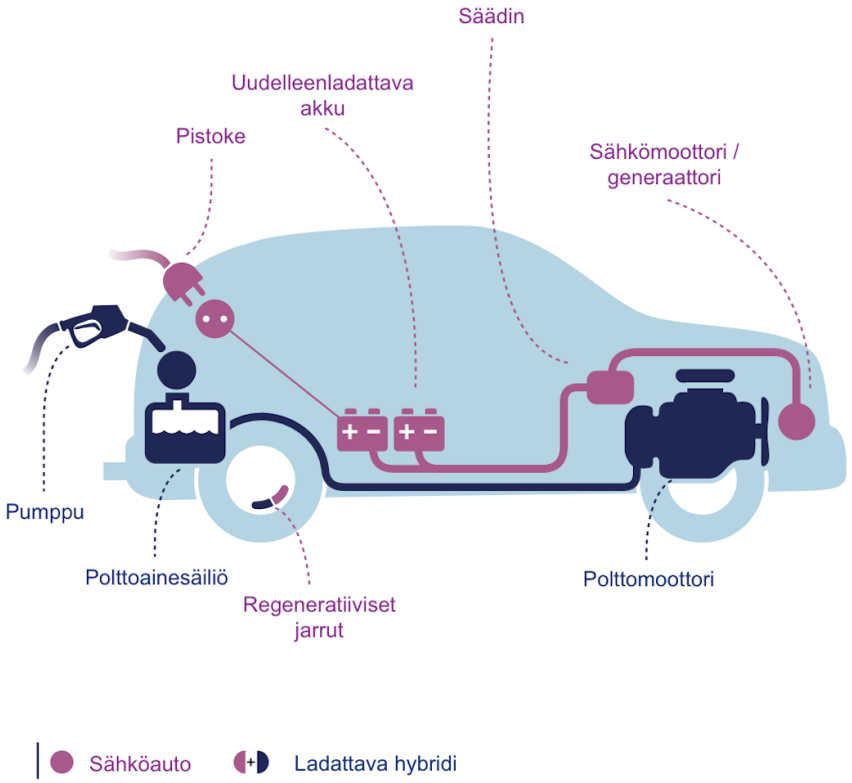
Kuten polttomoottoriautoissa, myös sähköautoissa on useita lisävarusteita. Näitä ovat muun muassa ohjaustehostin, jarrutustuki, valot, matkustajien jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmät sekä akun lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät. Etenkin kylminä aikoina akun ja matkustajien lämmitysjärjestelmät voivat kuluttaa suuren osan akun kapasiteetista, mikä voi vähentää ajomatkaa. Lisävarusteiden energiankäytön optimointi onkin tärkeää sähköajoneuvoissa. (European Environment Agency, 2016, s. 13)

Sähkömoottorilla on korkeampi hyötysuhde kuin tavallisella polttomoottorilla. Sähköauto pystyy muuntamaan noin 80 % käyttämästään energiasta käyttökelpoiseksi voimaksi, kun taas perinteisellä polttomoottoriautolla hyötysuhde on noin 20 %. Sähkömoottori on myös hyvin kestävä, sen huoltokustannukset ovat alhaisemmat ja se on alhaisilla nopeuksilla hiljaisempi kuin polttomoottori. (European Environment Agency, 2016, s. 11)

Sähköautoissa on yleensä suuret akut, jotka maksimoivat energian varastointikapasiteetin ja siten mahdollistavat pidemmät ajomatkat (European Environment Agency, 2016, s. 18). Useimmissa uusissa sähköautoissa on litiumioniakku (Dragonfly Energy, 2022b). Sähköautossa voi olla myös nikkeli-metallihydridiakku (Best Hybrid Batteries, n.d.). Litiumioniakkua tarkastellaan tarkemmin Luvussa 2.3.1 ja nikkeli-metallihydridiakkua Luvussa 2.3.2. Sähköauton akkua ladataan yleensä verkkovirrasta pistokkeen ja latausyksikön kautta (Larminie & Lowry, 2012, s. 19). Sähköautoilla on edelleen jokseenkin rajallinen toimintasäde polttomoottoriautoihin verrattuna (European Environment Agency, 2016, s. 18).

2.2 Ladattavan hybridin osat ja toiminta

Ladattavassa hybridissä on samat osat kuin sähköautossa, joiden lisäksi ajoneuvossa on myös tavallinen polttomoottori ja siihen liitetty polttoainesäiliö (European Environment Agency, 2016, s. 11). Ladattava hybridi saa voimansa sähkömoottorista ja polttomoottorista, jotka voivat toimia joko yhdessä tai erikseen. Auton akkua voidaan ladata sähköverkosta. (European Environment Agency, 2016, s. 20) Myös ladattavassa hybridissä on regeneratiivinen jarrujärjestelmä. Tällöin sähkömoottori toimii generaattorina ja samanaikaisesti hidastaa ajoneuvoa ja lataa akkua. (Larminie & Lowry, 2012, s. 21) Akun lataamiseen käytetään auton liikkuessa syntyvää kineettistä energiaa (Singh et al., 2021). Kuvassa 1 on sähköauton ja ladattavan hybridin tärkeimmät osat.



Kuva 1. Sähköauton ja ladattavan hybridin tärkeimmät osat, muokattu lähteestä (European Environment Agency, 2016, s. 12)

Kuvasta 1 nähdään, että ladattavassa hybridissä on enemmän komponentteja kuin sähköautossa. Ladattavan hybridin akku tekee siitä yleensä polttomoottoriautoa painavamman ajoneuvon (European Environment Agency, 2016, s. 43). Suurempi massa voi kasvattaa ladattavasta hybridistä aiheutuvia päästöjä.

Ladattava hybridi voi käyttää polttomoottoria ja akkua yhdistelmänä optimoiden jatkuvasti polttomoottorin tehokkuutta (Larminie & Lowry, 2012, s. 22). Polttomoottori toimii yhdessä sähkömoottorin kanssa, kun tarvitaan suurempaa käyttötehoa tai akun varaustila on alhainen (European Environment Agency, 2016, s. 20). Ladattava hybridi voi ottaa ajoneuvon toimimiseen tarvittavan perustehon, yleensä noin 50 % huipputehontarpeesta, polttomoottorista ja lisätehoa sähkömoottorista. Akkua voidaan ladata ajettaessa sähkömoottorin generaattorilla silloin, kun akusta ei pureta virtaa. Nykyaikaisilla ohjaustekniikoilla polttomoottorin nopeutta ja vääntömomenttia voidaan säätää pakokaasupäästöjen minimoimiseksi ja polttoaineen hyötysuhteen maksimoimiseksi. (Larminie & Lowry, 2012, s. 22)

Hybridiauton hybridisaatioaste (engl. Degree of Hybridisation, DOH), joka kertoo sähkömoottorin ja polttomoottorin toimintasuhteesta, on (Larminie & Lowry, 2012, s. 22) mukaan

$$DOH = \frac{\text{sähkömoottorin teho}}{\text{sähkömoottorin teho} + \text{polttomoottorin teho}}. \quad (1)$$

Mitä suurempi hybridisaatioaste on, sitä suurempi mahdollisuus on käyttää pienempää polttomoottoria ja saada moottori toimimaan lähellä optimaalista tehokkuutta suuremman osan ajasta (Larminie & Lowry, 2012, s. 22). Siten hybridisaatioaste vaikuttaa ladattavan hybridin päästöihin ja energiatehokkuuteen.

Hybridiauton akun täytyy jatkuvasti ottaa vastaan ja luovuttaa sähköenergiaa (Larminie & Lowry, 2012, s. 29). Hybridiautoissa on ensisijaisesti nikkeli-metallihydridiakku (Dragonfly Energy, 2022b). Ladattavassa hybridissä voi olla myös litiumioniakku (Best Hybrid Batteries, n.d.). Ladattavassa hybridissä voi olla joko yksi suuri akku tai sarja litiumioniakkuja. Litiumioniakkusarja varmistaa pidemmän käyttöiän ja lisää sähkömoottorin kokonaishyötysuhdetta. (Singh et al., 2021)

2.3 Akun toiminta

Akun tarkoitus on varastoida energiaa (Larminie & Lowry, 2012, s. 32). Akku koostuu yhdestä tai useammasta toisiinsa liitetystä sähkökennosta, jotka muuntavat kemiallista energiaa sähköenergiaksi. Kennot koostuvat positiivisista ja negatiivisista elektrodeista, jotka ovat elektrolyytissä. Kemiallinen reaktio elektrodien ja elektrolyytin välillä synnyttää tasavirtaa. Uudelleenladattavassa akussa kemiallinen reaktio voidaan saada tapahtumaan toisin päin, jolloin virta kulkee vastakkaiseen suuntaan ja akku latautuu. (Larminie & Lowry, 2012, s. 29) Akkuun varastoidun energian määrä riippuu akun jännitteestä ja varastoidusta varauksesta (Larminie & Lowry, 2012, s. 32).

Akusta saatavan sähkövarauksen suuruuteen vaikuttaa merkittävästi se nopeus, jolla akkua puretaan. Jos akun varaus puretaan paljon nopeammin, kuin on tarkoitettu, akun kapasiteetti eli akkuun varastoitunut varaus laskee merkittävästi. Jos taas akkua puretaan hyvin hitaasti, akun kapasiteetti nousee. Muutos kapasiteetissa johtuu kennossa tapahtuvista ei-toivotuista sivureaktioista. Vaikutus ilmenee kaikentyyppisissä akuissa. (Larminie & Lowry, 2012, s. 31) Nopeus, jolla akkua puretaan, vaikuttaa merkittävästi akun energiatehokkuuteen.

Energiatehokkuus on akusta saatavan sähköenergian ja lataamiseen käytetyn sähköenergian määrän suhde. Korkea energiatehokkuus on tavoiteltavaa, koska se vähentää kokonaispäästöjä. Akun energiatehokkuuteen vaikuttavat monet eri tekijät, kuten akun lataus- ja purkamisnopeudet, itsepurkautumisnopeus, käyttölämpötilat sekä akun ja ajoneuvon lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät. (Larminie & Lowry, 2012, s. 35)

Itsepurkautumisella tarkoitetaan akun purkautumista, kun sitä ei käytetä. Itsepurkautumisen taso vaihtelee akun tyypin ja muiden tekijöiden, kuten lämpötilan, mukaan. Mitä korkeammassa lämpötilassa akku on, sitä suurempaa itsepurkautuminen on. (Larminie & Lowry, 2012, s. 35) Akun itsepurkautuminen ei ole toivottavaa, sillä se vähentää ajoneuvon energiatehokkuutta.

Useimmat akut toimivat ympäristön lämpötilassa. Jotkut akut toimivat korkeammissa lämpötiloissa, jolloin niitä tarvitsee ensin lämmittää ja käytön aikana jäähdyttää. Akkua täytyy lämmittää myös silloin, jos akun suorituskyky heikkenee alhaisissa lämpötiloissa. (Larminie & Lowry, 2012, s. 35) Akun lämmittäminen ja jäähdyttäminen voivat kuluttaa paljon energiaa ja siten vähentää ajoneuvon energiatehokkuutta. Myös matkustajien lämmitysjärjestelmät voivat kuluttaa paljon energiaa (European Environment Agency, 2016, s. 13) ja siten vähentää energiatehokkuutta.

Sähköautot ja ladattavat hybridit ladataan yleensä liittämällä ajoneuvo latauspisteeseen kaapelilla ja pistokkeella (European Environment Agency, 2016, s. 25). Latauslähteen tehotaso riippuu virtalähteen jännitteestä ja maksimivirrasta. Tämä määrittää sen, kuinka nopeasti akku voidaan ladata. Tehokkaan ja nopean latauksen haittapuolena on se, että voimakkaampien sähkövirtojen takia siirron aikana menetetään enemmän sähköä, jolloin hyötysuhde on pienempi. (European Environment Agency, 2016, s. 26) Lisäksi usein toistuva nopea lataus voi lyhentää akun käyttöikää. Toistuva ja epätäydellinen purkautuminen ja lataaminen hitaasti ei vahingoita akkua yhtä paljon kuin nopea lataus. (European Environment Agency, 2016, s. 34)

Akun käyttöikä on lataus- ja purkausjaksojen eli syklien lukumäärä, jonka akku voi suorittaa ennen suorituskyvyn laskua (Kalogirou, 2018, s. 925). Yksi sykli vastaa yhtä purkausta, jota seuraa yksi lataus. Käyttöikä (engl. cycle life) kertoo, kuinka monta sykliä akku voi kestää käyttöikänsä aikana. Käyttöikä ilmoitetaan tavallisesti purkaussyklien lukumääränä tiettyyn DOD-arvoon, jonka akku voi kestää ennen kuin sen käytettävissä oleva kapasiteetti vähenee tiettyyn murto-osaan alkuperäisestä kapasiteetista. (Kalogirou, 2018, s. 799) DOD-arvo (engl. Depth of Discharge) eli purkaussyvyys on osuus kapasiteetista, joka on poistettu täysin ladatusta akusta (Kalogirou, 2018, s. 798).

Litium- ja nikkelipohjaiset akut toimittavat 300–500 täydellistä purkaus- ja latausjaksoa ennen kuin niiden kapasiteetti laskee alle 80 %:iin (Battery University, 2021a). Tarkka purkaus- ja latausjaksojen lukumäärä riippuu akun tyypistä, akun suunnittelun yksityiskohdista sekä siitä, miten akkua on käytetty (Larminie & Lowry, 2012, s. 35). Litiumioniakkujen käyttöikään vaikuttaa merkittävästi akun purkaussyvyys sitä käytettäessä

(Kalogirou, 2018, s. 925). Useimmat valmistajat suosittelevat, että akkuja käytetään vain välillä 80–10 % niiden kapasiteetista (European Environment Agency, 2016, s. 34) eli akkuja ei tulisi ladata täyteen eikä purkaa aivan tyhjäksi.

2.3.1 Litiumioniakku

Litiumioniakku on uudelleenladattava akku, jonka toiminta perustuu litiumionien liikkeeseen anodin ja katodin välillä. Anodi on negatiivinen elektrodi ja katodi positiivinen elektrodi. Litiumionikennon katodi on yleensä metallioksidia, anodi on grafiittia ja elektrolyytti on litiumin suola orgaanisessa liuottimessa. (Larminie & Lowry, 2012, s. 51) Akun tarkempi koostumus riippuu akun tyypistä.

Litiumioniakkuja on kuutta eri tyyppiä (Dragonfly Energy, 2022a). Taulukkoon 1 on koottu erityyppisten litiumioniakkujen nimi, lyhenne ja anodin ja katodin koostumus. Sähköautoissa ja ladattavissa hybrideissä käytetään näistä yleensä kaikista energiatiheintä: litiumkobalttioksidia (engl. Lithium Cobalt Oxide, LCO) tai litiumnikkelikobalttialumiinioksidia (engl. Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide, NCA) (Dragonfly Energy, 2022b; Battery University, 2023).

Erilaisilla litiumioniakuilla on erilainen käyttöikä. Akun käyttöikä vaikuttaa ajoneuvon elinkaareen ja sen pituuteen. Taulukossa 1 on esitetty myös erityyppisten litiumioniakkujen ideaalinen käyttöikä sykleinä. Akun syklien määrä riippuu akun kuormasta, lämpötilasta ja akun varauksen purkaussyvyydestä (Battery University, 2023).

Taulukko 1. Erilaisten litiumioniakkujen nimet, lyhenteet, koostumukset ja ideaalinen käyttöikä sykleinä (Battery University, 2023; Battery University 2024a)

Nimi ja lyhenne	Katodin koostumus	Anodin koostumus	Käyttöikä sykleinä
Litiumkobolttioksidi LCO	$LiCoO_2$	grafiitti	500–1000
Litiummangaanioksidi LMO	$LiMn_2O_4$	grafiitti	300–700
Litiumnikkelimangaanikobolttioksidi NMC	$LiNiMnCoO_2$	grafiitti	1000–2000
Litiumrautafosfaatti LFP	$LiFePO_4$	grafiitti	1000–2000
Litiumnikkelikobolttialumiinioksidi NCA	$LiNiCoAlO_2$	grafiitti	500
Litiumtitanaatti LTO	$LiMn_2O_4$ tai $LiNiMnCoO_2$	Li_2TiO_3	3000–7000

Taulukosta 1 nähdään, että kaikkien litiumioniakkujen katodeissa on litiumia. Useassa eri akkutyypissä on myös kobolttia, nikkeliä ja/tai mangaania. Lisäksi katodeissa on käytetty akkutyypistä riippuen nikkeliä, rautaa tai alumiinia. Kaikkien litiumioniakkujen, paitsi LTO-akun, anodi on grafiiittia. LCO-akun katodista noin 60 % on kobolttia, kun taas NCA-

akun katodista vain noin 9 % on kobolttia (Battery University, 2023). Taulukosta 1 havaitaan myös, että erityyppisten litiumioniakkujen käyttöikä sykleinä vaihtelee hyvin paljon. Suurin syklien määrä on LTO-akulla ja pienin LMO-akulla.

Litiumioniakuilla on joitakin hyötyjä useimpiin muihin akkutyyppeihin verrattuna. Niillä on suurempi energian varastointikapasiteetti ja pidempi elinikä. (European Environment Agency, 2016, s. 11) Litiumioniakun energiatiheys on suhteellisen korkea. Tosin litiumioniakkujen energiatiheys on vain noin kymmenesosa polttomoottoriautojen polttoaineen energiatiheydestä. Litiumioniakuilla on myös alhaiset itsepurkautumisnopeudet. (European Environment Agency, 2016, s. 13) Nikkeli-metallihydridiakun itsepurkautuminen on yleensä yli kaksinkertaista verrattuna litiumioniakkuihin (Battery University, 2022). Nykyiset litiumioniakkujärjestelmät ovat kuitenkin yleensä kalliita ja painavia. Lisäksi vaikka akkuja käytettäisiin valmistajan ohjeiden mukaisesti, ne menettävät kapasiteettia ajan myötä ikääntymisen ja toistuvien latausjaksojen seurauksena. (European Environment Agency, 2016, s. 11) Litiumioniakut kestävät tyypillisesti noin 10 vuotta ja ne voidaan ladata 2500–3500 kertaa (European Environment Agency, 2016, s. 13, Battery University mukaan). Litiumioniakut voivat toimia suhteellisen laajalla lämpötila-alueella, vaikka ne ovatkin vähemmän tehokkaita lämpötila-alueen ääripäissä. Useimmat litiumioniakut voidaan ladata 0–45 °C:n välillä. (European Environment Agency, 2016, s. 13)

Nykyaikaisissa sähköautoissa on yleensä suuremmat akkukapasiteetit. Useat uudet sähköautomallit on varustettu litiumioniakuilla, joiden kapasiteetti on yli 30 kWh, mikä voi johtaa ajoneuvon perusmassan merkittävään nousuun. Ajoneuvon massan lisäys voi lisätä energiankulutusta kuljettua kilometriä kohden. Joidenkin sähköautomallien litiumioniakkujen paino voi olla 25 % auton peruspainosta. Suosittu sähköauton akun kapasiteetti on 20–22 kWh. Kaksipaikkaiset sähköautot on varustettu pienemmillä akuilla (6,1–12,3 kWh), joiden paino on 100–150 kg. Sähköautojen suuremman kapasiteetin (60–100 kWh) akkujen paino on 385–544 kg, kun autojen kokonaispaino on 2050–3070 kg. Akkujen painoa lisäävät lisäelementit, kuten akunhallintajärjestelmä, jäähdytys- ja turvajärjestelmä sekä akkumoduulien asennuslaatikko. (Berjoza & Jurgena, 2017)

2.3.2 Nikkeli-metallihydridiakku

Nikkeli-metallihydridiakussa (engl. Nickel Metal Hydride Battery, NiMH) on positiivisella elektrodilla nikkelioksihydroksidia ja negatiivisella elektrodilla metallihybridiin absorboitunutta vetyä. Negatiivinen elektrodi toimii kuin polttokenno. (Larminie & Lowry, 2012, s. 44) Elektrolyyttinä käytetään kaliumhydroksidia (Shuoyao & Yu, 2020).

Nikkeli-metallihydridiakku koostuu akkukotelosta ja 28 akkumoduulista. Akkukotelo on pääasiassa rautaa. Akkumoduuleista 76 % eli 22,01 kg on valmistettu metalliresursseista, 11 % muovista ja noin 13 % on elektrolyyttiä. NiMH-akku painaa noin 39,07 kg. Moduulit painavat yhteensä 29,12 kg ja akkukotelo 9,95 kg. NiMH-akkuja on pääasiassa kahdenlaisia: ympyrän muotoisia ja neliön muotoisia. Yleisin tyyppi nykyisin on neliön muotoinen akku. (Shuoyao & Yu, 2020) Ladattavassa hybridissä yleensä käytettävä NiMH-akku on siis huomattavasti kevyempi kuin sähköautoissa yleensä käytettävät litiumioniakut.

NiMH-akulla on sekä hyviä että huonoja puolia litiumioniakkuihin verrattuna. Vaikka sekä NiMH-akut että litiumioniakut ovat pitkäikäisiä, on NiMH-akku vielä kestävämpi (Arun et al., 2022). NiMH-akun käyttöikä sykleinä on 300–500 täydellistä purkaus- ja latausjaksoa (Battery University, 2024b). NiMH-akkua pidetään yleisesti myrkyttömänä (Battery University, 2024b). NiMH-akku on alttiina melko nopealle itsepurkautumiselle, mikä johtuu vetymolekyylien diffusoitumisesta elektrolyytin läpi anodilta katodille (Larminie & Lowry, 2012, s. 45). Itsepurkautuminen vähentää akun energiatehokkuutta. NiMH-akun coulombinen tehokkuus on vain noin 65 %, kun litiumioniakuille se on 99 % (Battery University, 2021b). Lisäksi litiumioniakkujen coulombinen hyötysuhde paranee syklien myötä. Coulombinen hyötysuhde, jota kutsutaan myös faradiseksi hyötysuhteeksi tai kapasiteettihyötysuhteeksi, kuvaa varaustehokkuutta, jolla elektronit siirtyvät akussa. Coulombinen tehokkuus on akusta puretun kokonaisvarauksen ja akkuun koko syklin aikana syötetyn kokonaisvarauksen suhde. (Battery University, 2021c) Coulombisella tehokkuudella on siis yhteys akun energiatehokkuuteen.

NiMH-akku voidaan ladata niin nopeasti, että se vaatii jäähdytysjärjestelmän. Tämä johtuu siitä, että akun normaali sisäinen resistanssi synnyttää lämpöenergiaa. Lisäksi akkua ladattaessa tapahtuva reaktio, jossa vety sitoutuu negatiivisen elektrodin viereiseen metalliin, on eksoterminen. (Larminie & Lowry, 2012, s. 45) Myös tämä voi vaikuttaa akun ja siten ajoneuvon energiatehokkuuteen.

3 VALMISTUKSEN PÄÄSTÖT

Tässä luvussa tarkastellaan sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistusta ja siitä aiheutuvia päästöjä ja verrataan niitä bensiini- ja dieselautojen valmistuksesta aiheutuviin päästöihin. Valmistuksessa keskitytään tarvittavien metallien louhintaan ja rikastukseen ja niistä aiheutuviin päästöihin sekä sähköautojen ja ladattavien hybridien akun ja sähkömoottorin valmistuksesta aiheutuviin päästöihin.

Sähköauton ja ladattavan hybridin muiden osien, paitsi akun ja sähkömoottorin, valmistuksen ja auton kokoonpanon oletetaan olevan vastaavat kuin polttomoottoriautolla. Valmistuksessa oletetaan, että käytetään neitseellisiä materiaaleja, vaikka kierrätetty materiaali olisi yleensä vähäpäästöisempää. Kuljetuksista tulevia päästöjä ei oteta huomioon.

3.1 Tarvittavat materiaalit

Sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistukseen tarvitaan runsaasti erilaisia raaka-aineita. Polttomoottoriautoihin verrattuna suurimmat erot tarvittavissa materiaaleissa johtuvat akusta, tehoelektroniikasta ja sähkömoottorista. Nämä komponentit sisältävät huomattavia määriä tavallisia metalleja, kuten kuparia, alumiinia ja rautaa, mutta myös kriittisiä raaka-aineita. (European Environment Agency, 2018, s. 14) Sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistus vaatii useita erilaisia harvinaisia raaka-aineita erityisesti sähkömoottorissa käytettäviin magneetteihin. Monia näistä metalleista pidetään kriittisinä, sillä ne ovat välttämättömiä sähköautojen yleistymiselle, mutta on epävarmaa, riittääkö niiden määrät tulevaisuudessa. (European Environment Agency, 2016, s. 41)

Litiumioniakkujen sisältämää litiumia ei pidetä kriittisenä metallina, sillä maailmanlaajuisesti litiumia on runsaasti (European Environment Agency, 2016, s. 41). Pienessä noin 900 kg:n painoisessa sähköautossa käytettävä kompakti litiumioniakku sisältää noin 4 kg litiumia (European Environment Agency, 2016, s. 13). Akut voivat sisältää lisäksi useita muita suhteellisen harvinaisia alkuaineita, kuten kobolttia, lantaania ja nikkeliä. Erityisesti koboltin ja nikkelin tuotantoprosesseihin liittyy mahdollisia ympäristö- ja terveysriskejä. (European Environment Agency, 2016, s. 41) Katodikemioiden nykysuuntaukset ovat kuitenkin siirtymässä pois koboltista ja nikkelistä. Tämän suuntauksen jatkuessa nykyiset kobolttі- ja nikkelivarastot voivat riittää. (Dunn et al., 2015, L. Gaines & P. Nelson 2010 mukaan) Kadmiumia, joka oli aiemmin tärkeä, mutta myrkyllinen ladattavien nikkeli-kadmiumakkujen osa, ei käytetä nykyisissä litiumioniakuissa (European

Environment Agency, 2016, s. 41). Myös sähköautojen ja ladattavien hybridien sähkömoottoreiden suuritehoiset magneetit sisältävät usein kriittisinä pidettäviä harvinaisia maametalleja, kuten neodyymia, dysprosiumia, samariumia ja kobolttia (European Comission, 2014, s. 41; European Environment Agency, 2016, s. 19).

Sähköautoissa ja ladattavissa hybrideissä käytetään akkujen ja sähkömoottorin osalta enemmän kuparia ja mahdollisesti nikkeliä sekä kriittisiä raaka-aineita ja harvinaisia maametalleja kuin polttomoottoriautoissa (European Environment Agency, 2018, s. 14). Kriittisten raaka-aineiden ja harvinaisten maametallien ehtyminen voi lisätä näiden materiaalien louhinnan ympäristövaikutuksia. Tämä johtuu siitä, että raaka-aineiden louhinta saattaa siirtyä paikkoihin, joissa ihmisten terveyden ja ympäristönsuojelun suojatoimenpiteet ovat heikommat. (European Environment Agency, 2018, s. 15)

Harvinaiset maametallit (engl. Rare Earth Elements, REEs), kuten neodyymi, praseodyymi ja dysprosium, ovat keskeisiä materiaaleja neodyymi-rauta-booriboorimagneettien (engl. neodymium-iron-boron, NdFeB) eli NdFeB-magneettien valmistuksessa (Eggert et al., 2016; Jin et al., 2018). NdFeB-magneetteja käytetään sähköautojen ja hybridien sähkömoottoreissa. Yhden kilon NdFeB-magneettien valmistukseen neitseellisistä raaka-aineista tarvitaan 1,3–3,0 kg uusia materiaaleja, joista osa häviää sintrauksen, hehkutuksen, hiomisen ja viipaloimisen aikana. (Jin et al., 2018)

Tällä hetkellä sähköautojen ja ladattavien hybridien koreissa ja apujärjestelmissä käytetään monissa tapauksissa saman verran samoja materiaaleja kuin polttomoottoriautoissa. Joissakin tapauksissa sähköautojen korit suunnitellaan käyttäen kevyempiä materiaaleja, kuten alumiinia, hiilikuitua ja muovikomposiitteja, kantaman maksimoimiseksi. Tätä kutsutaan ajoneuvon keventämiseksi. Hiilikomposiittien ja alumiinin käytön lisääntyminen lisää valmistuksen energiankulutusta. (European Environment Agency, 2018, s. 14) Energiankäytöstä aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi alumiinin tuotannosta aiheutuu merkittävä määrä suoria hiilidioksidi- ja perfluorihiilivetypäästöjä (PFC-yhdisteet) (European Environment Agency, 2018, s. 16).

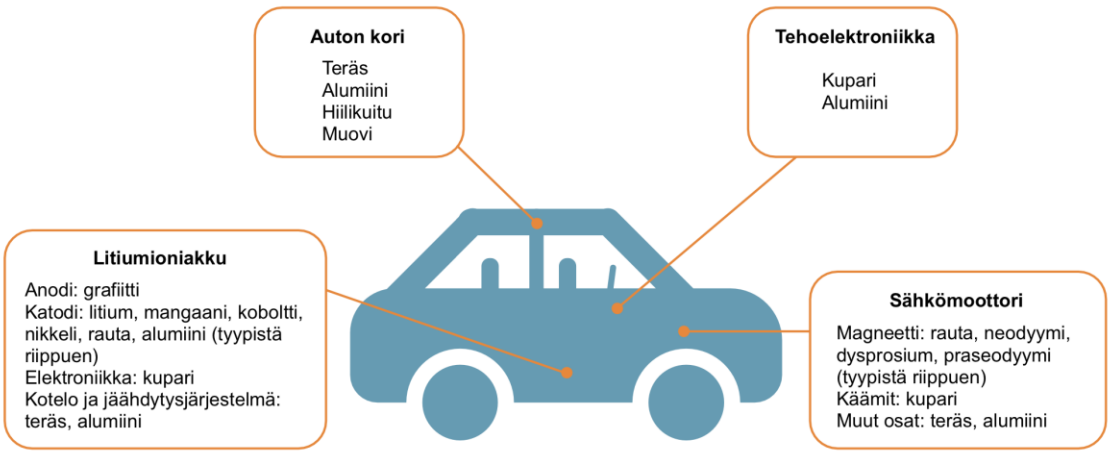
Taulukkoon 2 on koottu sähköautoissa, ladattavissa hybrideissä ja polttomoottoriautoissa yleisesti käytettyjen alkuaineiden ilmastonlämmityspotentiaalit eli GWP-arvot (engl. Global Warming Potential, GWP) sekä kumulatiivinen energiankulutus (engl. Cumulative Energy Demand, CED) raaka-aineen hankinnan ja valmistusvaiheen aikana.

Taulukko 2. Eri ajoneuvoihin tarvittavien tärkeimpien alkuaineiden GWP-arvot ja kumulatiivinen energiankulutus. Luvut on arvioitu näiden alkuaineiden vuotuisen tuotannon perusteella vuonna 2008. (Nuss & Eckelman, 2014)

Alkuaine ja kemiallinen merkki	GWP-arvo (kg CO_2-ekv/kg)	Kumulatiivinen energiankulutus (MJ-ekv/kg)
Litium Li	7,1	125
Koboltti Co	8,3	128
Nikkeli Ni	6,5	111
Rauta Fe	1,5	23,1
Alumiini Al	8,2	131
Kupari Cu	2,8	53,7
Lantaani La	11,0	215
Neodyymi Nd	17,6	344
Dysprosium Dy	59,6	1170
Samarium Sm	59,1	1160
Platina Pt	12 500	243 000
Palladium Pd	3880	72 700
Rodium Rh	35 100	683 000

Taulukosta 2 nähdään, että harvinaisempien alkuaineiden, kuten lantaanin, neodyymin, dysprosiumin ja samariumin, kasvihuonekaasupäästöt ja energiankulutus ovat suurempia kuin yleisempien metallien, kuten raudan, alumiinin ja kuparin. Platinan, palladiumin ja rodiumin GWP-arvo ja kumulatiivinen energiankulutus ovat huomattavasti suurempia kuin muiden tarvittavien alkuaineiden. Rodiumilla on kaikista alkuaineista korkeimmat GWP-arvo ja kumulatiivinen energiankulutus. Korrelaatio GWP-arvon ja kumulatiivisen energiankäytön välillä johtuu fossiilisten polttoaineiden käytöstä tuotannossa (Nuss and Eckelman, 2014).

Pitkällä aikavälillä sähköautojen yleistyminen voi vähentää platinan, palladiumin ja rodiumin kysyntää, sillä niitä käytetään nykyisin polttomoottoriautojen katalysaattoreissa. Tosin näitä alkuaineita tarvitaan myös ladattavien hybridien katalysaattoreihin. (European Environment Agency, 2016, s. 44). Kuvaan 2 on koottu tärkeimmät neitseelliset raaka-aineet, joita tavallisesti käytetään sähköauton valmistuksessa.



Kuva 2. Tärkeimmät yleisesti sähköauton valmistukseen tarvittavat materiaalit, muokattu lähteestä (European Environment Agency, 2018, s. 15)

Kuvasta 2 huomataan, että sähköauton valmistukseen tarvitaan monia erilaisia materiaaleja. Toisaalta moniin osiin tarvitaan samoja materiaaleja, kuten terästä tai alumiinia. Ladattavan hybridin valmistukseen tarvitaan samoja materiaaleja kuin sähköautonkin valmistukseen, joiden lisäksi ladattavassa hybridissä tarvitaan myös polttomoottorin ja siihen liittyvien osien, kuten katalysaattorin, valmistukseen tarvittavia materiaaleja.

3.2 Tarvittavien metallien louhinta ja rikastus

Ajoneuvojen valmistus alkaa materiaalien hankkimisesta. Päästöjä malmien louhinnasta ja metallien valmistuksesta tarkastellaan kolmen tärkeän metallin, litiumin, nikkelin ja koboltin osalta. Lisäksi tarkastellaan harvinaisten maametallien louhimista ja valmistusta.

Nikkeliä esiintyy yleisesti kahdessa päämalmityypissä, sulfidimalmissa ja lateriittimalmissa. Vaikka suurin osa taloudellisista nikkelivaroista on lateriittimalmissa, suurin osa nikkelin tuotannosta on peräisin sulfidimalmeista, koska lateriittimalmi vaatii monimutkaisempaa prosessointia. Tulevan kysynnän tyydyttämiseksi nikkeliä louhitaan yhä enemmän lateriittimalmeista, mikä johtaa nikkelin tuotannosta aiheutuvan energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen kasvuun. Malmien keskimääräiset nikkelipitoisuudet laskevat, vaikka tämä on merkittävämpää sulfidimalmien kuin lateriittimalmien osalta. (Mudd, 2010)

Yleensä nikkeliä louhitaan sulfidimalmeista joko avolouhoksella tai maanalaisella louhinnalla, jonka jälkeen malmeja rikastetaan vaahdotuksen avulla, rikasteet sulatetaan ja jalostetaan puhtaaksi metalliksi. Kaivokset, sulattamot ja jalostamot sijaitsevat yleensä eri paikoissa alueellisista maantieteellisistä tekijöistä riippuen. Sulfidimalmien rikasteita voidaan jalostaa pyrometallurgisilla menetelmillä. (Mudd, 2010)

Nikkelin tuotanto lateriittimalmeista on suhteellisen monimutkaista. Lateriittikaivokset ovat enimmäkseen avolouhoksia. Lateriittimalmien kanssa käytetään yleensä malmin perusrikastusta ennen jalostusta. Lateriittimalmien korkea kosteuspitoisuus on käsiteltävä kuivaamalla tai kalsinoimalla. Lateriittimalmien prosessoinnille on kolme pääprosessivaihtoehtoa: kiertosähköuunit (engl. Rotary Kiln Electric Furnace, RKEF), Caronin ammoniakkiliuotusprosessi tai happoliuotus korkeassa paineessa (engl. High Pressure Acid Leaching, HPAL). Caron-prosessi perustuu korkean lämpötilan ammoniakkiliuotukseen, jossa metallipitoiset liuokset johdetaan liuotinuuttoon hydrometallurgiseen laitokseen. HPAL-laitoksissa malmi liuotetaan rikihapolla korkeassa paineessa ja lämpötilassa titaanipäällysteisessä autoklaavissa. Tämän jälkeen kiinteä liuos erotetaan vastavirtauksen avulla ja nikkeliä tuotetaan liuotinuutolla. (Mudd, 2010) Prosessien korkea lämpötila lisää nikkelin valmistuksen energiankulutusta ja siten kasvihuonekaasupäästöjä energianlähteestä riippuen.

Lateriittimalmien prosessoinnin energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt ovat huomattavasti suurempia kuin sulfidimalmien. Sulfidimalmien prosessoinnin energiankulutus on yleensä alle 100 GJ/t metallia, kun taas lateriittimalmien prosessoinnin energiankulutus on 252–572 GJ/t metallia. Sulfidimalmien prosessoinnista aiheutuu kasvihuonekaasupäästöjä alle 10 t CO_2/t metallia, kun lateriittimalmien prosessoinnin päästöt ovat 25–46 t CO_2/t metallia. Nikkelin tuottaminen lateriittimalmista on siis noin 2,5–5,7 kertaa energiaintensiivisempää ja tuottaa noin 2,5–4,6 kertaa enemmän kasvihuonekaasuja kuin tuotanto sulfidimalmista. Kasvihuonekaasupäästöt riippuvat energiankulutuksesta ja siitä, mitä energianlähdettä käytetään. Energia- ja kasvihuonekaasuintensiteetti riippuvat myös malmilaadusta. Malmilaadun laskiessa nämä kasvavat merkittävästi. (Mudd, 2010)

Nikkelin valmistuksen rikkidioksidipäästöt vaihtelevat suuresti eivätkä ne liity vain tiettyyn malmityyppiin. Saastepäästöjen valvonta ja hallinta, kuten talteenotto ja muuntaminen rikkihapoksi, vaikuttavat merkittävästi kaivoksen tai laitoksen rikkidioksidipäästöihin. (Mudd, 2010)

Monilla maailman suurimmilla nikkelikentillä ympäristövaikutukset ovat olleet merkittäviä. Nikkelin louhinta ja jalostus, erityisesti sulatus, on aiheuttanut rikkidioksidi-, hiukkas- ja raskasmetallien päästöjä, mikä on aiheuttanut ympäristön saastumista, happosateita, happamoituneita kosteikkoja, biologisen monimuotoisuuden ja kasvillisuuden häviämistä sekä voimakasta maaperän eroosiota. Kirjallisuudessa on edelleen merkittävä aukko globaalin nikkelin louhinnan historiallisista kehityssuunnista. (Mudd, 2010)

Koboltti on usein nikkelin tai kuparin louhinnan sivu- tai rinnakkaistuote, joten jotkin sen paikallisista ympäristövaikutuksista ovat samankaltaisia kuin nikkelin ja kuparin louhinnan vaikutukset. Kuparikaivosten, josta saadaan myös kobolttia, päästöt ovat merkittävämpiä kuin nikkelikaivosten, sillä kuparikaivosten vuotuinen tuotanto voi olla jopa 10 kertaa suurempaa kuin nikkelikaivosten. Kuparikaivokset, joista saadaan myös kobolttia, keskittyvät Keski-Afrikan Katangan kuparivyöhykkeelle. Kaivostoiminta Katangan kuparivyöhykkeellä on vähemmän dokumentoitua kuin kaivostoiminta muualla maailmassa. (Dunn et al., 2015) Jerome O. Nriagu toteaa yleisesti, että afrikkalainen kaivostoiminta perustuu saastumisalttiisiin tekniikoihin. Afrikkalaisista kaivoksista ja sulattamoista peräisin olevien päästöjen valvonta on löyhää tai sitä ei ole ollenkaan. Lopputuloksena ilma, vesi, maaperä ja kasvillisuus kaivoskeskusten läheisyydessä ovat yleensä pahasti myrkyllisten metallien saastuttamia. (Dunn et al., 2015, Nriagu mukaan)

Koboltin louhinnassa käytetään avolouhosta tai maanalaista louhintaa, minkä jälkeen seuraa murskaus, jauhatus ja vaahdotus sulatukseen ja jalostukseen tarkoitettujen rikasteiden tuottamiseksi. Rikasteet käsitellään liuotuksella ja liotinuuttoelektrolyyttisellä uuttamisella tai pyrometallurgisilla menetelmillä. (Mudd et al., 2013)

Nikkelin lateriittimalmista saatavan koboltin käsittely on energiaintensiivisempää kuin sulfidimalmien käsittely (Mudd et al., 2013), mikä lisää syntyvien kasvihuonekaasujen määrää, jos nikkeliä tuotetaan lateriittimalmista. Koboltin louhinnassa hyödynnetään usein arsenidimalmeja, mikä aiheuttaa ympäristöriskejä (Dunn et al., 2015). Energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi koboltin louhintaan ja rikastukseen liittyy vedenkulutusta ja kaivannaisjätteiden syntymistä (Mudd et al., 2013).

Litiumia erotetaan tällä hetkellä tiivistetystä suolavedestä aavikkomaisissa ympäristöissä äärimmäisen hitaalla ja suhteellisen tehottomalla menetelmällä (Flexer et al., 2018). Suolavettä pumpataan suolatasangolta ja haihdutetaan ulkona altaissa (Dunn et al., 2015), joissa eri suolat saostuvat peräkkäin. Litiumkarbonaatti otetaan talteen tiivistetystä suolavedestä hienokäsittelylaitoksessa haihdutusprosessin lopussa. Lisäksi litiumia louhitaan malmeista, koska suolavedestä saatava tarjonta ei ole riittävää. (Flexer et al., 2018) Akkuihin käytettävä litiumkarbonaatti Li_2CO_3 on yleensä peräisin Etelä-Amerikasta (Dunn et al., 2015).

Litiumin louhinnasta aiheutuu pienempiä ympäristövaikutuksia kuin muiden metallien (Flexer et al., 2018). Litiumin talteenotto on vähemmän energia- ja päästöintensiivisempää kuin kuparin ja nikkelin (Dunn et al., 2015). Litiumin valmistus kuluttaa kuitenkin runsaasti vettä. Tuotettua tonnia lopullista akkukäyttöön soveltuvaa litiumkarbonaattia kohti tarvitaan 5–50 m^3 makeaa vettä. Alueet, joilta vettä pumpataan, ovat erittäin kuivia,

minkä vuoksi tämä on merkittävä haitta. Jos litiumin louhinta vaikuttaa alueen vesitasapainoon, se vaikuttaa myös paikalliseen kasvistoon ja eläimistöön. Vähemmän selvä mahdollinen vaikutus liittyy myös mikrobitoimintaan suolatasangoilla ja niiden läheisyydessä. (Flexer et al., 2018)

Vedenkulutuksen lisäksi haihdutusprosessi tuottaa valtavasti jätettä. Suolaveden liuenneiden kiintoaineiden kokonaismäärä on hyvin korkea. Kun suolavettä haihdutetaan, kaikki muut suolat paitsi litiumkarbonaatti päätyvät jätteeksi. Jätteessä on runsaasti erilaisia natrium- ja kaliumsuoloja, koska ne ovat suolaveden tärkeimmät kationiset komponentit. Tällä hetkellä suurin osa jätteestä kerääntyy suolatasangon reunoille. Yhden litiumkarbonaattitonnin tuottaminen vettä haihduttamalla tuottaa samaan aikaan yli 115,041 kg jätettä. Tämä jäte ei kuitenkaan ole myrkyllistä. (Flexer et al., 2018)

Litiumin louhinnan ja jalostuksen kokonaisympäristövaikutuksista ei kuitenkaan ole riittävästi tietoa. On näyttöä litiumin louhinnan mahdollisista riskeistä, jotka liittyvät veden ehtymiseen ja pilaantumiseen, myrkyllisiin vaikutuksiin kasvistossa ja eläimistössä, jätteiden syntyyn ja hävittämiseen sekä maan vajoamiseen. (Kaunda, 2020)

Harvinaisten maametallien tuotanto keskittyy Kiinaan. Kiinassa louhitaan ja tuotetaan vähintään 80 % maailman harvinaisten maametallien tuotannosta. Kiinalaiset yritykset myös valmistavat yli 80 % NdFeB-magneeteista. (Eggert et al., 2016) Harvinaiset maametallit voidaan jakaa kevyisiin, keskiraskaisiin ja raskaisiin yhdisteisiin. Kevyitä REE-yhdisteitä, kuten neodyymiä ja praseodyymia, tuotetaan louhimalla REE-pitoisia malmeja, kuten bastnasiittia ja monatsiittia, avolouhoksessa. (Jin et al., 2018) Harvinaisten maametallien tuotanto louhimalla koostuu seuraavista kuudesta vaiheesta: malmien louhinta, REE-pitoisen malmin rikastaminen, happopaahto, liuotus, liuotinuutto ja elektrolyysi (Sprecher et al., 2014). Keskiraskaiden ja raskaiden REE-yhdisteiden, kuten dysprosiumin ja gadoliniumin, osalta ioniadsorptiosavet ovat maailman tärkein lähde (Jin et al., 2018). Myös raskaita harvinaisia maametalleja voidaan kuitenkin louhia bastnasiitista ja monatsiitista avolouhoksessa (Vahidi et al., 2016).

REE-yhdisteitä tuotetaan ioniadsorptiosavista liuottamalla. REE-yhdisteiden uuttamiseksi ioniadsorptiosavista on useita erilaisia liuotusmenetelmiä. In situ -liuotus on nykyään yleisin tekniikka. Tämän tekniikan ympäristövaikutukset ovat pienemmät kuin muiden tekniikoiden. Ioniadsorptioprosessi alkaa kaivospaikan valinnasta ja porauspaikkojen paikantamisesta. Poratut reiät toimivat injektiokaivoina. Seuraavana vaiheena on in situ -liuotus. Tämän jälkeen korkean konsentraation liuotusliuokselle tehdään suotoveden puhdistus. Harvinaiset maametallit saostetaan ja saostumat suodatetaan. Viimeisinä vaiheina ovat mekaaninen puristaminen, joka vie sähköä sekä kalsinointi, johon tarvitaan

polttoöljyä. Tämän seurauksena saadaan sekoitus harvinaisten maametallien oksideja. Kaivoslaitteet, kuten ilmakompressorit ja vesipumput, kuluttavat myös sähköä. Suotoveden harvinaisten maametallien pitoisuus on alhainen. Jokainen litra liuosta sisältää yleensä vain muutamia grammoja harvinaisia maametalleja. (Vahidi et al., 2016)

Ioniadsorptiosavissa on paljon enemmän joitakin erittäin arvokkaita raskaita harvinaisia maametalliyhdisteitä kuin bastnasiitissa ja monatsiitissa. Lisäksi ne ovat ioniadsorptiosavissa helpommin saatavissa. Ioniadsorpitosavea liuotettaessa ei tarvita fysikaalista ja kemiallista rikastusta, joita käytetään valmistettaessa harvinaisia maametalleja bastnasiitista tai monatsiitista. Ioniadsorptiosavista saatujen harvinaisten maametallien oksidien ympäristövaikutukset ovat samankaltaisia ilmaston lämpenemisen ja kumulatiivisen energiantarpeen osalta, mutta erilaisia rehevöitymisen ja happamoitumisen osalta kuin bastnasiitista tai monatsiitista louhittujen. Ioniadsorptiosavien käsittelyllä on suurempi vaikutus rehevöitymiseen, mutta pienempi vaikutus happamoitumiseen kuin bastnasiitilla ja monatsiitilla. Koska raskaiden harvinaisten maametalliyhdisteiden pitoisuudet ovat yleensä suurempia ioniadsorptiosavissa kuin monatsiitissa tai bastnasiitissa, in situ -liuotuksesta saatavien yksittäisten harvinaisten maametallien oksidien ympäristövaikutukset ovat yleensä pienemmät kuin monatsiittia tai bastnasiittia louhimalla tuotetut. Ioniadsorptioprosessin ympäristövaikutukset johtuvat suurimmaksi osin ammoniumsulfaatin ja oksaalihapon käytöstä. Lisäksi prosessissa tarvitaan ammoniumvetykarbonaattia sekä rikkihappoa. (Vahidi et al., 2016)

Vaikka REE:t ovat ratkaisevan tärkeitä monille puhtaan energian teknologioille, REE-yhdisteiden louhinta, jalostus ja tuotanto vaativat paljon energiaa ja materiaaleja ja tuottavat samalla päästöjä ilmaan ja veteen sekä kiinteitä jätteitä. Tuotettaessa 1 kg harvinaisten maametallien oksideja ioniadsorptiosavista syntyy suoria päästöjä: 0,26–3,5 kg NH_4^+ veteen ja 0,34 kg NH_4^+ maaperään, 4,72–8,28 kg SO_4^{2-} veteen sekä 0,46 kg CO_2 ilmaan kalsinoinnista. (Vahidi et al., 2016)

Alexander & Abraham (2024) mukaan hiilidioksidipäästöt yhteensä materiaalien louhinnasta, käsittelystä ja kuljetuksesta ovat sähköautolle 5344 kg CO_2 ja ladattavalle hybridille 3896 kg CO_2. Tarkasteltava sähköauto oli Tesla Model 3 ja ladattava hybridi Ford Escape. Molemmissa ajoneuvoissa oletettiin olevan litiumioniakku, jonka katodi on litiumnikkelimangaanikobolttioksidia (NMC). Erot päästöissä johtuvat suurimmaksi osin akusta, joka on paljon suurempi sähköautossa.

3.3 Akun valmistus

Ajoneuvojen valmistuksen aikainen energiankulutus ja päästöt riippuvat monesta eri tekijästä. Sähköauton kantaman maksimointi voi aiheuttaa lisäpäästöjä valmistusvaiheessa, jos akun kapasiteettia lisätään akun kennojen määrää kasvattamalla. Tällöin ajoneuvon kantama kasvaa, mutta myös akuston koko ja paino kasvavat. Akkukapasiteetin lisääminen kennoja lisäämällä lisää raaka-aineiden louhinnan ja käsittelyn ympäristövaikutuksia. (European Environment Agency, 2018, s. 18) Suurempi massa voi johtaa suurempiin päästöihin myös käytön aikana. Yleisesti suurempien sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistus vaatii enemmän energiaa ja materiaaleja, jolloin myös niiden ympäristövaikutukset ovat suuremmat. Tämä pätee myös polttomoottoriautoille. (European Environment Agency, 2018, s. 27).

Tarkastellaan ensin litiumioniakkujen valmistusta ja lopuksi nikkeli-metallihydridiakun valmistusta. Tarkastellaan litiumioniakkuja, joissa on LMO-, LFP-, NMC- ja LCO-katodit.

Akkukennot ovat akun tärkein osa ja muodostavat noin 55–60 % keskikokoisissa sähköautoissa käytettävän akkupaketin kokonaispainosta. Muita akun osia ovat moduuli ja akkupaketin kotelo (32–38 % akun kokonaispainosta), lämmönhallintajärjestelmä (3 %), akun hallintajärjestelmä (3 %) ja sähköjärjestelmä (1 %). (Ellingsen & Hung, 2018, s. 27)

Akkujen valmistus voidaan jakaa kennojen valmistukseen ja akkupaketin kokoonpanoon. Kennojen valmistus on monimutkainen ja pitkäkestoinen prosessi, joka vaatii paljon energiaa. Akun kokoonpano on kennojen valmistukseen verrattuna paljon yksinkertaisempi ja vähemmän energiaa vaativa prosessi. (Ellingsen & Hung, 2018, s. 27)

Akun valmistus alkaa kennojen valmistuksesta (Ellingsen & Hung, 2018, s. 27). Kennojen valmistuksen ensimmäinen vaihe on katodin ja anodin valmistus erikseen. Katodi, positiivinen elektrodi, koostuu alumiinisesta virrankerääjästä, joka on päällystetty katodimateriaalilla. Katodimateriaali koostuu aktiivisesta materiaalista, polymeerisideaineesta ja johtavasta lisäaineesta. Anodi, negatiivinen elektrodi, koostuu kuparisesta virrankerääjästä, joka on päällystetty anodimateriaalilla. Anodimateriaali koostuu aktiivisesta anodimateriaalista, joka on useimpien litiumioniakkujen tapauksessa grafiitti, ja sideaineesta. Sekä katodin että anodin osalta aktiivinen materiaali, sideaineet ja lisäaineet sekoitetaan liuottimiin, jotta saadaan liete, joka voidaan päällystää virrankerääjiin. (Ellingsen & Hung, 2018, s. 28) Sen jälkeen elektrodit kuivataan, puristetaan haluttuun muotoon ja leikataan sopivan kokoisiksi (Dunn et al., 2015).

Seuraavaksi kennot kootaan. Elektrodien väliin asetetaan erotin ja elektrodit liitetään napoihin. Elektrolyytti lisätään kuivahuoneessa ja kennot tiivistetään. (Dunn et al., 2015).

Kenno laitetaan kennosäiliöön (Ellingsen & Hung, 2018, s. 27). Tällä hetkellä litiumionikennoja tuotetaan pääasiassa Etelä-Koreassa, Kiinassa ja Japanissa (Ellingsen & Hung, 2018, s. 30). Ennen akkupakkauksen kokoamista kennot yhdistetään akkumoduuleiksi (Ellingsen & Hung, 2018, s. 29). Akun kokoonpanon viimeisessä vaiheessa akkupaketti kootaan eli moduulit kiinnitetään akkupaketin alustaan (Dunn et al., 2015). Lisäksi akkupakettiin asennetaan akkupaketin kotelo, lämmönhallintajärjestelmä, akun hallintajärjestelmä ja sähköjärjestelmä (Ellingsen & Hung, 2018, s. 27).

Osa kennojen valmistukseen tarvittavasta energiasta voidaan kattaa vain sähköllä, minkä seurauksena kennojen valmistuksen ympäristövaikutukset määräytyvät osittain sähkön tuottamiseen käytettävien energianlähteiden mukaan. Etelä-Korea, Kiina ja Japani käyttävät paljon fossiilisia polttoaineita sähköntuotantoon, mikä nostaa valmistuksen päästöjä. (Ellingsen & Hung, 2018, s. 30)

Akun katodimateriaalit vaikuttavat merkittävästi akun kokonaisenergiankulutukseen ja -ympäristövaikutuksiin (Dunn et al., 2015). Siten eri akkutyypeillä on erilaiset päästöt ja ympäristövaikutukset. Eri litiumioniakkutyyppien katodimateriaalien valmistus kuluttaa energiaa 35–315 MJ/kg. Energiankulutus vaihtelee huomattavasti materiaalien, valmistustavan ja akkujen valmistuksessa käytettävän laitoksen kapasiteetin mukaan. Katodimateriaaleista eniten energiaa kuluttaa LCO:n ja NMC:n valmistus, kun otetaan huomioon myös raaka-aineiden hankinta. Vähiten energiaa kuluttavat LFP ja LMO. (Dunn et al., 2015) Dunn et al. (2015) mukaan kirjallisuudessa on paljon epävarmuutta akkujen kokoonpanon energiaintensiteetistä, joten edelle mainitut arvot eivät ole absoluuttisia faktoja, vaan suuntaa antavia.

Eri litiumioniakkutyyppien katodimateriaalien kasvihuonekaasupäästöt vaihtelevat raaka-aineen hankinnan ja valmistusvaiheen aikana välillä 3–20 $\frac{\mathrm{kg\ CO_2-ekv}}{\mathrm{kg}}$. Katodimateriaalien hankintaketjujen kasvihuonekaasupäästöjen taustalla vaikuttavat samat tekijät kuin energiankulutuksen taustalla. (Dunn et al., 2015)

Eri katodimateriaalien rikin oksidipäästöt vaihtelevat välillä 0–560 kg SO_x/t. Korkeimmat rikin oksidipäästöt aiheuttaa LCO-katodin valmistus ja matalimmat LMO-katodin valmistus. Myös LFP-katodin rikin oksidipäästöt ovat lähellä nollaa. (Dunn et al., 2015)

Kobolttia ja nikkeliä sisältävillä katodimateriaaleilla on raaka-aineen hankinnan ja valmistusvaiheen aikana korkeampi energiaintensiteetti kuin katodimateriaaleilla, jotka eivät sisällä kobolttia tai nikkeliä eli LMO- ja LFP-katodeilla. Prosessit koboltin ja nikkelin talteenottamiseksi malmeista aiheuttavat suuremman energiankulutuksen. Näissä proses-

seissa käytetään energiaintensiivisiä ja paljon päästöjä aiheuttavia vaiheita, kuten sulatusta. Litiumin talteenotto suolavedestä kuluttaa paljon vähemmän energiaa. (Dunn et al., 2015)

Koboltin ja nikkelin talteenoton sulatusvaihe vaikuttaa merkittävästi myös rikin oksidi -päästöihin (SO_x). LCO- ja NMC-katodien SO_x-päästöt ovat huomattavasti suuremmat kuin katodien, jotka eivät sisällä kobolttia ja nikkeliä. Katodimateriaalien hankintaketjujen muiden ilmansaasteiden, kuten typen oksidien (NO_x), orgaanisten haihtuvien yhdisteiden (VOC) ja pienhiukkasten (PM_{10} ja $PM_{2,5}$), päästöt ovat myös korkeammat kobolttia ja nikkeliä sisältävien katodien osalta. Näiden ilmansaasteiden päästöt ovat noin suuruusluokkaa pienemmät kuin edellä mainittujen katodien SO_x-päästöt. (Dunn et al., 2015)

Vaikka katodimateriaalien, jotka eivät sisällä kobolttia tai nikkeliä, energiankulutus ja päästöt raaka-aineen hankinnan ja valmistusvaiheen aikana on pienempi, niiden ominaisenergiat ovat yleensä alhaisemmat kuin kobolttia ja nikkeliä sisältävien katodien, mikä voi tarkoittaa, että akussa on oltava enemmän näitä katodeja saman suorituskyvyn saavuttamiseksi. (Dunn et al., 2015) Tällöin materiaaleja tarvitaan siis enemmän, mikä taas lisää näiden katodien energiankulutusta ja päästöjä.

Katodimateriaalien lisäksi akun valmistuksen energiakulutukseen vaikuttaa merkittävästi akun valmistuksessa käytettävän laitoksen kapasiteetti. Tietyt laitteet, kuten kuivahuone, kuluttavat todennäköisesti saman verran energiaa tuotantotehosta riippumatta. Tämän seurauksena yhden akun valmistus kuluttaa enemmän energiaa, jos tuotantoteho on alhainen. Jos laitoksen oletetaan toimivan suunnitellulla kapasiteetilla tai lähellä sitä, akun kokoonpanovaiheen osuus on vähemmän kuin 10 % akun energiankulutuksesta raaka-aineen hankinnan ja valmistusvaiheen aikana. Akun valmistuksen kokonaisenergiankulutus raaka-aineen hankinnan ja valmistusvaiheen aikana korkeammalla kokoonpanoenergialla eli pienemmällä tuotantoteholla voi olla jopa kymmenen kertaa suurempi kuin kokonaisenergiankulutusarviot, kun laitos toimii kapasiteetillaan eli arvioitu kokoonpanoenergiaa on pienempi. (Dunn et al., 2015)

Litiumioniakkujen tuotannon laajentuessa kennojen ja akkujen kokoonpanolaitokset voivat aluksi toimia selvästi kapasiteettia pienemmällä teholla. Akkuteollisuuden kehittyessä laitokset toimivat todennäköisesti vähintään sillä kapasiteetilla, jota varten ne on suunniteltu, jolloin energiankulutus yhtä akkua kohti on pienempi. Siten litiumioniakkujen kokoonpanon energiankulutus ja päästökuormitus vähenee ajan mittaan. (Dunn et al., 2015)

Katodien, erityisesti kobolttia ja nikkeliä sisältävien, valmistaminen on merkittävin litiumioniakkujen raaka-aineen hankinnan ja valmistusvaiheen aikaisen energiankulutuksen, kasvihuonekaasupäästöjen ja rikin oksidipäästöjen aiheuttaja, kun akkujen kokoonpanolaitos toimii kapasiteetillaan. Katodin jälkeen toiseksi merkittävin litiumioniakkujen raaka-aineen hankinnan ja valmistusvaiheen aikaiseen energiankulutukseen vaikuttava tekijä on rakennemateriaalina käytettävä taottu alumiini. Lisäksi koko akun energiankulutukseen vaikuttavat kokoonpano, muut rakennemateriaalit, anodimateriaalina käytettävä grafiitti sekä muut komponentit. (Dunn et al., 2015)

Kun akun kokoonpanolaitoksen oletetaan toimivan kapasiteetillaan, akkujen valmistuksen energiankulutus vaihtelee välillä 76–158 MJ/kg akkumateriaalia. Pienin energiankulutus yhtä kilogrammaa akkumateriaalia kohti on LMO-akulla ja suurin LCO-akulla. Myös LFP-akun energiankulutus on lähellä LMO-akkua. Energiankulutus akkua kohti vaihtelee välillä 16 000–27 000 MJ. Myös koko akkua tarkasteltaessa suurin energiankulutus akkua kohti on LCO-akulla ja pienin LMO-akulla. (Dunn et al., 2015)

Alexander & Abraham (2024) mukaan akun valmistus- ja kokoonpanoprosessien hiilidioksidipäästöt ovat sähköautolle 5200 kg CO_2, kun vastaavat päästöt ovat ladattavalle hybridille vain 1498 kg CO_2. Tarkasteltava sähköauto oli Tesla Model 3 ja ladattava hybridi Ford Escape. Molemmissa ajoneuvoissa oletettiin olevan NMC-akku. Sähköauton akku oli 50 kWh, kun taas ladattavan hybridin akku oli vain 14,4 kWh.

Tarkastellaan vielä NiMH-akun valmistusta. Tärkeimmät NiMH-akun moduulien valmistukseen tarvittavat materiaalit ovat nikkeli, koboltti, sinkki, kupari, rauta, elektrolyyttinä kaliumhydroksidi, polypropeeni ja alumiini. Tärkeimmät akkukoteloon tarvittavat materiaalit ovat rauta, muovi ja kupari. (Shuoyao & Yu, 2020)

Materiaalien tuotantoprosessin aikana vapautuu yhteensä noin 150 kg hiilidioksidia. Kaikista materiaaleista nikkelihydroksidin eli vetyä absorboivan metalliseoksen tuotannosta aiheutuu eniten CO_2-päästöjä (84,55 kg, 52 %) ja nikkelin elektrolyyttisen sähkösaostuman (engl. nickel electrodeposit) tuotannosta toiseksi eniten (23,88 kg, 16 %). Raakateräksen valmistuksesta aiheutuu kolmanneksi eniten, 20,34 kg, CO_2-päästöjä. (Shuoyao & Yu, 2020)

NiMH-akun valmistusprosessissa akun materiaalit jaetaan katodimateriaaleihin, anodimateriaaleihin, elektrolyyttiin ja akun suojukseen (Shuoyao & Yu, 2020, Sakai 2008 mukaan). Toimitetuista raaka-aineista valmistetaan ensin akkujen komponentteja, minkä jälkeen komponentit kootaan moduuleiksi ja lopulta kokonaisiksi NiMH-akuiksi. Akun eri osat valmistetaan ja akku kootaan eri paikoissa. Akun kokoonpano- ja tuotantoprosessi aiheuttaa noin 30 kg CO_2-päästöjä. (Shuoyao & Yu, 2020) Raaka-aineiden hankinta ja

valmistus aiheuttaa siis huomattavasti enemmän päästöjä kuin itse akun valmistus. Yhden NiMH-akun valmistaminen aiheuttaa siis yhteensä noin 180 kg CO_2-päästöjä, joiden lisäksi komponenttien ja akun kuljetuksesta syntyy lisäpäästöjä (Shuoyao & Yu, 2020).

3.4 Sähkömoottorin valmistus

Sähkömoottoreita on useita erilaisia. Viimeaikaisen teknologisen kehityksen seurauksena kestomagneettimoottoreista on tullut suosittuja sähköautojen ja hybridien käyttövoimajärjestelmissä (Pravallika et al., 2023). Useimmissa sähköautoissa ja ladattavissa hybrideissä käytetään joko sisäkestomagneettimoottoria (engl. Interior Permanent Magnet Motor, IPM) tai kestomagneettiavusteista synkronista reluktanssimoottoria (engl. Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, PMaSynRM) (Krings & Monissen, 2020). Myös häkkikäämitty induktiomoottori (engl. Squirrel-Cage Induction Machine, SCIM) ja kestomagneettitahtimoottori (engl. Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) ovat suosittuja vaihtoehtoja nykyaikaisten sähköautojen vetomoottoreiksi (Li & Wan, 2024). Kestomagneettiavusteisessa synkronisessa reluktanssimoottorissa (PMaSynRM) voi olla kestomagneettina ferriittimagneetti tai neodyymi-rauta-boorimagneetti (Siadatan et al., 2020). Sähkömoottorin magneetti voi myös samarium-kobolttimagneetti (Hernandez et al., 2017). Neodyymi-rauta-boorimagneetti (NdFeB) on näistä magneeteista yleisin (Krings & Monissen, 2020). NdFeB-magneetit mahdollistavat erittäin voimakkaan magneettikentän tuottamisen hyvin pieneen tilavuuteen ja siten kompaktin ja kevyen moottorin sekä korkean hyötysuhteen (Widmer et al., 2015).

Tarkastellaan 45 kW:n kestomagneettisynkronimoottorin, jossa on NdFeB-magneetti (engl. Rare-Earth Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor, SYRM), valmistusta. Taulukkoon 3 on koottu sähkömoottorin valmistuksessa tarvittavat materiaalit ja niiden massat.

Taulukko 3. Sähkömoottorin valmistukseen tarvittavat materiaalit ja niiden massat (Hernandez et al., 2017)

Materiaali	Massa (kg)
Sähköteräs	107
Muu teräs	10
Alumiini	16
Kupari	10
Eristemateriaalit	0,5
Kyllästyshartsi	2
Maali	1,5
Muovit	0,5
Magneetti	2,5
Yhteensä	150

Taulukosta 3 nähdään, että moottorin staattorissa käytettävä sähköteräs muodostaa merkittävän osan kokonaismassasta. Myös kotelossa ja käämikomponenteissa käytetty alumiini ja kupari muodostavat huomattavan osan sähkömoottorin massasta. Sähköteräs on rautaseos, jossa on piitä 0–6,5 %. (Hernandez et al., 2017) Taulukosta 3 huomataan myös, että kestomagneetin massa on vain 2,5 kg, kun koko sähkömoottorin massa on 150 kg.

Sähkömoottori koostuu pääasiassa staattorista, roottorista ja akselista, kotelosta, päätykilvistä ja laakereista. Staattorin valmistukseen kuuluu yleensä sähköteräksestä valmistettujen magneettisten laminointipinojen lävistys, hitsaus ja asentaminen koteloon. Tämä on valmistuksen yksi eniten aikaa ja energiaa vievistä prosesseista. Staattorin valmistukseen kuuluu kuparikäämien käämitys, johon kuuluu käämin teippaaminen, asettaminen, eristäminen ja kytkentöjen valmistelu. Kun kaikki staattorin osat on asetettu paikoilleen, staattori peitetään kyllästyshartsilla ja poltetaan lämpö- ja sähköeristyksen parantamiseksi. Roottorin valmistuksessa kestomagneetit sijoitetaan roottoripinoon ja akselit ja laakerit asetetaan paikoilleen. Tämän jälkeen roottori ja staattori liitetään toisiinsa yhteen päätyjen, kiinnikkeiden, luukkujen ja moottorin maalauksen avulla. (Hernandez et al., 2017)

Moottorin valmistuksen aikana kulutettua energiaa voidaan arvioida energiaintensiteetillä 0,492 kWh/kg sähköä ja 0,415 kWh/kg lämpöä (Hernandez et al., 2017, ABB 2002 mukaan). Kun energiankulutus lasketaan 150 kg painavan sähkömoottorin kokonaismassalle, saadaan kulutetuksi energiaksi 73,8 kWh sähköä ja 62,25 kWh lämpöä.

Tarkasteltavan sähkömoottorin valmistuksen merkittävin ympäristövaikutus on vaikutus metallien ehtymiseen. Pääasiassa magneettisissa laminoinneissa käytetty sähköteräs edistää metallien ehtymistä lähes 67 %. Toiseksi eniten metallien ehtymiseen vaikuttaa kuparin käyttö (27 %). Käytetty vaikutustenarviointimenetelmä antaa kuitenkin liian suuren painoarvon raudan kulutukselle. Valmistusvaiheella on merkittävää vaikutusta myös makean veden ekotoksisuuteen, myrkyllisyyteen ihmisille ja pienhiukkasten muodostumiseen (Hernandez et al., 2017).

Taulukkoon 4 on koottu kunkin sähkömoottorin valmistukseen tarvittavan materiaalin aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt, pienhiukkaspäästöt ja rikkidioksidipäästöt. Taulukossa 4 mainittujen päästöjen ja edellä mainittujen vaikutuksen lisäksi sähkömoottorin valmistuksella on vaikutuksia fossiilisten polttoaineiden ehtymiseen, makean veden rehevöitymiseen, ionisoivan säteilyn määrään, otsonikerroksen heikkenemiseen, fotokemiallisten hapettimien muodostumiseen sekä maan happamoitumiseen ja ekotoksisuuteen (Hernandez et al., 2017).

Taulukko 4. Kunkin sähkömoottorissa käytetyn materiaalin aiheuttamat päästöt valmistusvaiheessa (Hernandez et al., 2017). PM_{10} tarkoittaa pienhiukkaisia, jotka ovat halkaisijaltaan alle 10 mikrometriä.

Materiaali	Kasvihuonekaasupäästöt (kg CO_2-ekv)	Pienhiukkaset (kg PM_{10}-ekv)	Rikkidioksidi (kg SO_2-ekv)
Sähköteräs	180	0,74	0,84
Muu teräs	22	0,55	2,2
Alumiini	150	0,27	0,60
Kupari	13	0,31	0,85
Eristemateriaalit	0,25	0,00042	0,0012
Kyllästyshartsi	11	0,018	0,046
Maali	3,2	0,0070	0,021
Muovit	1,2	0,0017	0,0049
Magneetti	25	0,058	0,13
Yhteensä	410	2,0	4,7

Staattorin elementit, kuten sähköteräs ja kupari, aiheuttavat suurimmat ympäristövaikutukset useimmissa vaikutusluokissa. Toisaalta tämä johtuu näiden materiaalien suuresta osuudesta moottorissa, toisaalta primääriteräksen valmistus on alumiinin valmistuksen jälkeen yksi energiaintensiivisimmistä prosesseista, mikä lisää sen ympäristövaikutuksia käytetystä energianlähteestä riippuen. Kupari muodostaa lähes puolet ihmisen myrkyllisyyden kokonaisvaikutuksista käämien valmistukseen liittyvien louhinta- ja jalostustoimien seurauksena. Raaka-aineiden kaivostoiminta vaikuttaa pääasiassa vesistöjen ja maaperän ekotoksisuuteen, myrkyllisyyteen ihmisille ja metallien ehtymiseen. (Hernandez et al., 2017)

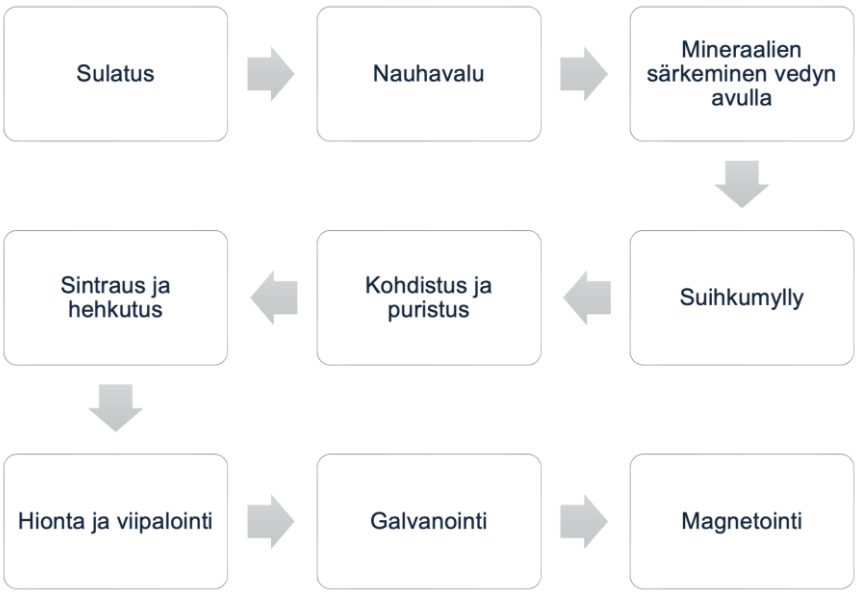
Tarkastellaan vielä tarkemmin sähkömoottoreissa yleisesti käytettäviä neodyymi-rauta-boorimagneetteja. Neodyymi-rauta-boorimagneetti on valmistettu neodyymin, raudan ja boorin seoksesta ($Nd_2Fe_{14}B$) (Hernandez et al., 2017). Neitseellisistä materiaaleista valmistetun NdFeB-magneetin materiaalikoostumus on esitetty Taulukossa 5.

Taulukko 5. Neitseellisistä materiaaleista valmistetun NdFeB-magneetin materiaalikoostumus massaprosentteina (Jin et al., 2018) Fe = rauta, Nd = neodyymi, Dy = dysprosium, Pr = praseodyymi, B = boori, Co = koboltti, Ga = gallium, Cu = kupari, Al = alumiini

Alkuaine	Fe	Nd	Dy	Pr	B	Co	Ga	Cu	Al
Massaprosentti	66,88	18,0	6,15	4,60	1,02	2,84	0,21	0,18	0,12

Taulukosta 5 nähdään, että suurin osa NdFeB-magneetista on rautaa. Lisäksi magneetti sisältää useita harvinaisia alkuaineita sekä hieman booria, kobolttia, kuparia ja alumiinia. Näiden lisäksi NdFeB-magneetit sisältävät joskus myös pieniä määriä gadoliniumia (Gd) (Jin et al., 2018).

NdFeB-magneettien tuotanto neitseellisistä materiaaleista alkaa sulatuksella ja nauhavalulla. Tähän tarvitaan REE-yhdisteitä, elektrolyyttisesti puhdasta rautaa ja ferrobooria. Nämä yhdistetään upokkaassa ja sulatetaan sen jälkeen teollisessa nauhavalulaitteistossa. Sulatettu metalliseos kaadetaan vesijäähdytetylle kuparipyörälle, jolloin saadaan NdFeB-seoksen hiutaleita. NdFeB-seos hienonnetaan kuumentamalla vetyreaktorissa, jolloin muodostuu karkeaa jauhetta. Tämän jälkeen sintrataan ja sintrattuja magneettilohkoja leikataan ja kuutioidaan. Harvinaiset maametallit on suojattava korroosiolta orgaanisella tai metallisella kerroksella. (Jin et al., 2018) NdFeB-magneettien valmistuksen prosessikaavio on esitetty Kuvassa 3.



Kuva 3. NdFeB-magneetin valmistusprosessi eli niin kutsuttu sintrattu magneettiprosessi (Sprecher et al., 2014; Hernandez et al., 2017; Jin et al., 2018)

Nauhavalulla on suurin vaikutus NdFeB-magneettien tuotannon ympäristöjalanjälkeen, kun magneetti valmistetaan neitseellisistä raaka-aineista. Nauhavalun osuus on 64–96 % kokonaisvaikutuksesta. Harvinaisten maametallien kulutus taas aiheuttaa 94–99 % nauhavalun ympäristövaikutuksista. Nauhavalusta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 100 kg CO_2-ekv per 1 kg NdFeB-magneettia. Muiden prosessivaiheiden ympäristövaikutukset ovat huomattavasti nauhavalua pienempiä. Mineraalien särkeminen vedyn avulla ja suihkumylly aiheuttavat toiseksi suurimmat ympäristövaikutukset. (Jin et al., 2018) Magneetin valmistukseen, sisältäen raaka-aineiden louhinta ja valmistus, liittyy noin 15,25 kWh:n kokonaisenergiankulutus (Hernandez et al., 2017).

NdFeB-magneeteilla saattaa olla massayksikköä kohti suuremmat ympäristövaikutukset kuin muilla sähkömoottoreissa yleisesti käytetyillä materiaaleilla (Widmer et al., 2015).

NdFeB-magneetit voivat olla vastuussa noin 25 %:sta materiaaleihin liittyvistä kasvihuonekaasupäästöistä (Widmer et al., 2015), vaikka niiden osuus sähkömoottorin kokonaismassasta on vain noin 2 % (Hernandez et al., 2017). Hernandez et al. (2017) mukaan harvinaisista maametalleista valmistetulla kestomagneetilla ei ole merkittävää roolia moottorin aiheuttamissa ympäristövaikutuksissa magneetin vähäisen massan vuoksi. Widmer et al. (2015) mukaan heidän analyysinsa saattaa liioitella NdFeB-magneettien ympäristövaikutuksia, kun niitä tarkastellaan osana sähköautojen ja hybridien kokonaisjärjestelmää, mutta näiden magneettien poistaminen saattaisi pienentää sähkömoottorien valmistuksen ympäristövaikutuksia ja siten sähköautojen ja hybridien valmistuksen ympäristövaikutuksia.

3.5 Vertailu polttomoottoriautojen valmistuksesta aiheutuviin päästöihin

Sekä polttomoottoriautojen että sähköautojen valmistamiseen vaaditaan huomattavia määriä sekä raaka-aineita että energiaa (European Environment Agency, 2016, s. 9). Sähköautojen valmistus on tyypillisesti energiaintensiivisempää kuin tavallisten polttomoottoriautojen valmistus (European Environment Agency, 2016, s. 41). Jos oletetaan, että akkujen kokoonpanotehdas toimii kapasiteetillaan, sähköauton ja ladattavan hybridin valmistaminen akku mukaan lukien on noin 10–40 % energiaintensiivisempää kuin polttomoottoriauton valmistaminen (Dunn et al., 2015). Suurempi energian tarve voi johtaa suurempiin kasvihuonekaasupäästöihin ja niihin liittyviin ilmansaasteisiin käytetystä energianlähteestä riippuen (European Environment Agency, 2016, s. 41).

Sähköautojen tuotantoon liittyvät raaka-aineiden hankintaketjun loppupään tärkeimmät ilman pilaantumiseen vaikuttavat päästöt ovat rikkidioksidi, typenoksidipäästöt, hiukkaspäästöt sekä muut epäpuhtaudet, jotka aiheutuvat komponenttien valmistukseen ja ajoneuvojen kokoonpanoon käytetystä energiasta. Nämä voivat olla peräisin sähköntuotannosta polttolaitoksissa tai polttoaineiden suorasta poltosta lämmön tai käyttövoiman tuottamiseksi. (European Environment Agency, 2018, s. 26) Koska sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistus on energiaintensiivisempää kuin polttomoottoriautojen valmistus, voidaan olettaa, että sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistuksesta aiheutuu myös enemmän ilmansaasteita.

Sähköauton valmistuksen ympäristövaikutukset ovat huomattavasti polttomoottoriautoa suuremmat seuraavissa kategorioissa: myrkyllisyys ihmisille, makean veden ekotoksisuus ja rehevöityminen sekä maan ekotoksisuus. Myös sähköauton valmistuksen pienhiukkaspäästöt ovat hieman polttomoottoriauton valmistusta suuremmat. Sen sijaan polttomoottoriauton valmistuksen vaikutukset ovat hieman sähköautoa suuremmat, kun

tarkastellaan maan happamoitumista. Akun valmistus on tärkein syy siihen, että sähköauton valmistuksen ympäristövaikutukset ovat suuremmat kuin polttomoottoriauton valmistuksen vaikutukset useissa eri vaikutuskategorioissa. (European Environment Agency, 2018, s. 26)

4 KÄYTÖN AIKAISET PÄÄSTÖT

Tässä luvussa tarkastellaan sähköautojen ja ladattavien hybridien käytöstä aiheutuvia päästöjä ja verrataan niitä bensiini- ja dieselautojen käytöstä aiheutuviin päästöihin. Käyttövaiheessa ei oteta huomioon ajoneuvojen mahdollista huollon tarvetta.

4.1 Sähköautojen ja ladattavien hybridien käytön aikaiset päästöt

Sähköautojen päästöihin käyttövaiheessa vaikuttavat ajoneuvon suunnitteluun ja käyttöön sekä sähköverkkoon liittyvät eri näkökohdat (European Environment Agency, 2018, s. 45). WTW-elinkaarivaiheen (lähteestä renkaisiin, engl. Well-To-Wheels) hiilidioksidipäästöt riippuvat käytetystä energianlähteestä, energianlähteen ja voimansiirron hyötysuhteista, regeneratiivisen jarrutuksen hyötysuhteesta ja kunkin energianlähteen suhteellisesta osuudesta vetovoimasta. WTW-elinkaarivaihe ottaa huomioon sekä energiaresurssien talteenoton, energian tuotannon ja jakelun että energian muunnoksen auton käyttövoimaksi. (Alexander & Abraham, 2024)

Sähköautoilla, toisin kuin polttomoottoriautoilla ja ladattavilla hybrideillä ei ole pakokaasupäästöjä. Sähköautot vähentävät siten hiilidioksidipäästöjä ja paikallisia pakokaasupäästöjä. (Larminie & Lowry, 2012, s. 15) Tämä auttaa parantamaan paikallista ilmanlaatua (European Environment Agency, 2016, s. 18). Sähköautojen ja ladattavien hybridien kuluttaman sähkön tuottamisessa syntyy kuitenkin hiukkasia, typenoksideja, rikkidioksidia ja muita ilman epäpuhtauksia (European Environment Agency, 2018, s. 33). Yleisesti ottaen sähköautolla on pienemmät käytön aikaiset päästöt kuin ladattavalla hybridillä (Dunn et al., 2015).

Sähköautot ja ladattavat hybridit vähentävät riippuvuutta öljystä ja muista fossiilisista polttoaineista (Larminie & Lowry, 2012, s. 13–14). Ladattavat hybridit kuluttavat noin 30–60 % vähemmän raakaöljyä kuin polttomoottoriautot (Oak Ridge National Laboratory, n.d.).

Sähköauton akun lataamiseen tarvittavalla sähkön tuotantotavalla on suuri merkitys sähköautosta koko sen elinkaaren aikana syntyviin päästöihin (European Environment Agency, 2016, s. 42). Myös ladattavan hybridin kokonaisympäristövaikutus riippuu merkittävästi siitä, kuinka suuri osa kulutetusta sähköstä on tuotettu uusiutuvilla energian-

lähteillä (European Environment Agency, 2016, s. 20). Pienemmän hiili-intensiteetin sähköntuotanto lisää sähköauton etua ladattavaan hybridiin verrattuna (Alexander & Abraham, 2024). Ladattavien hybridien ympäristövaikutukset riippuvat myös niiden toimintatavasta. Kun ladattava hybridi saa virtansa pelkästään akusta, ei pakokaasupäästöjä synny. Pelkästään polttomoottorilla ajaminen voi johtaa jopa suurempiin päästöihin kuin vastaavan kokoisella polttomoottoriautolla, koska ladattavan hybridin akku tekee ajoneuvosta painavamman. (European Environment Agency, 2016, s. 42–43) Ladattavan hybridin Luvussa 2.2 mainittu hybridisaatioaste vaikuttaa siis merkittävästi ajoneuvon käytön aikaisiin päästöihin.

Sähköautot eivät ole täysin päästöttömiä edes toimiessaan sähköllä, joka on tuotettu uusiutuvilla energianlähteillä. Sähköautoista aiheutuu muita kuin pakokaasupäästöjä, kuten pienhiukkasia renkaiden, jarrujen ja teiden kulumisen vuoksi. (European Environment Agency, 2016, s. 42)

Fingridin laskema Suomessa kulutetun sähkön päästökertoimen (g CO_2/kWh) volyymipainotettu vuosikeskiarvo vuonna 2023 on 38 g CO_2/kWh (Fingrid, 2024). Kun sähköauton akku on ladattu Suomessa sähköverkosta, ajoneuvo tuottaa siis ajettaessa epäsuoria hiilidioksidipäästöjä keskimäärin 38 g per kulutettu kilowattitunti. Sähköautojen epäsuorat hiilidioksidipäästöt ovat siis suoraan verrannollisia kulutetun sähkön määrään. Tähän vaikuttavat oleellisesti ajoneuvolla ajetut kilometrit, mutta myös ajoneuvon energiatehokkuus. Akun ja siten ajoneuvon energiatehokkuuteen vaikuttavat Luvussa 2.3 mainitut akun nopea lataaminen ja purkaminen, akun itsepurkautumisnopeus, akun ja ajoneuvon käyttölämpötila sekä akun ja ajoneuvon lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät.

Luvussa 2.3 mainittiin, että sähköautojen hyötysuhde on huomattavasti korkeampi kuin polttomoottoriautojen. Siten sähköautot kuluttavat vähemmän energiaa kuin polttomoottoriautot. Sähköauto käyttö kuluttaa noin 1,6–3,4 kertaa vähemmän energiaa kuin polttomoottoriauton käyttö kilometriä kohti (Dunn et al., 2015). Sähköautojen TTW-energiankulutus (tankista pyöriin, engl. Tank-To-Wheel) energiankulutus on yleensä 1/3–1/4 polttomoottoriautojen energiankulutuksesta (European Environment Agency, 2018, s. 37). TTW-elinkaarivaihe huomioi vain energian muunnoksen polttoaineesta auton käyttövoimaksi (Alexander & Abraham, 2024). Sähköautojen energiatehokkuusetu vertailukelpoisiin polttomoottoriautoihin vaihtelee kuitenkin huomattavasti ajopaikasta ja -tyylistä, apujärjestelmien käytöstä sekä ajoneuvon koosta ja painosta riippuen. Tärkein sähköautojen ja ladattavien hybridien energiankulutukseen vaikuttava tekijä on se, kuinka paljon regeneratiivista jarrutusta voidaan käyttää energian talteenottoon. Regeneratiivinen jarrutus on tehokkainta vähittäisessä hidastamisessa sekä alamäkeen ajettaessa.

Sähköautoilla on siten suurin hyötysuhde-etu polttomoottoriautoihin verrattuna kaupunkiajossa, kun ajotyyli on pehmeä. Tällöin voidaan hyödyntää kaupunkiajossa usein toistuvia kiihdytyksiä ja hidastuksia energian talteenottoon parhaalla mahdollisella tavalla. (European Environment Agency, 2018, s. 37)

Lisäksi sähköautojen energiatehokkuuteen vaikuttaa apujärjestelmien, kuten lämmityksen ja ilmastoinnin, sähkönkulutuksen määrä. Useimpien apujärjestelmien vaikutus sähköautojen ja polttomoottoriautojen energiankulutukseen on samanlainen. Lämmitystä varten sähköautojen on kuitenkin otettava energiaa akusta, kun polttomoottoriautoissa voidaan hyödyntää polttomoottorin hukkalämpöä. Näin ollen kylmissä olosuhteissa, kun matkustamon ja muiden osien lämmitys on tarpeen, sähköautojen hyötysuhde-etu polttomoottoriautoihin verrattuna pienenee. (European Environment Agency, 2018, s. 37)

Sähköautojen energiankulutus käytön aikana korreloi voimakkaasti ajoneuvon koon ja painon kanssa, kuten myös polttomoottoriautojen tapauksessa. Sähköautot ovat keskimäärin painavampia kuin polttomoottoriautot. Tämä vähentää sähköautojen mahdollista etua energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen osalta polttomoottoriautoihin verrattuna. (European Environment Agency, 2018, s. 37) Sähköautojen suurempi massa johtuu suurelta osin akusta ja siihen liittyvästä toissijaisesta painonlisäyksestä, jota tarvitaan ajoneuvon korin vahvistamiseksi (European Environment Agency, 2018, s. 37–38).

Hernandez et al. (2017) mukaan arvio sähköauton käytöstä aiheutuvalle sähkönkulutukselle on yhteensä noin 30 MWh, josta noin 10 % eli 3 MWh liittyy sähkömoottoriin. Sähkömoottorin sähkönkulutus käytön aikana aiheutuu sen massasta ja hyötysuhteesta johtuvista häviöistä (Nordelöf et al., 2019). Sähkömoottorin käytön aikana kulutetun energian määrä riippuu suuresti voimansiirron hyötysuhteista. Sähkömoottorin käyttövaiheen energiankulutus vastaa merkittävästä osasta sähkömoottorin ympäristövaikutuksia. Käyttövaiheen osuus sähkömoottorin elinkaaren eri ympäristövaikutuksista on 15–90 % eri vaikutusluokissa, ja se vastaa jopa 75 % kasvihuonekaasupäästöistä ja 90 % ionisoivasta säteilystä. Voimansiirron tehokkuuden, ajoneuvon painon ja ajotavan parantaminen voi auttaa vähentämään sähköauton ja ladattavan hybridin ympäristövaikutuksia käyttövaiheessa. (Hernandez et al., 2017)

Akun ikääntyminen aiheuttaa menetyksiä sen kapasiteetissa, toimitetussa energiassa, tehossa ja turvallisuudessa (Canals Casals et al., 2016). Akun vanheneminen vaikuttaa merkittävästi ajoneuvon toimintasäteeseen (Ndiaye et al., 2021). Akun käyttöikä vähenee sitä käytettäessä väistämättä, mutta luonnollista käyttöiän lyhenemistä voidaan hi-

dastaa (Lehtola & Zahedi, 2021). Akun kapasiteetti voi heikentyä jopa 13 % kolmen vuoden käytön aikana (Rücker et al., 2024). Akun ikääntymiseen vaikuttavat muiden muassa liian matala tai korkea lämpötila, lataustila (engl. State of Charge, SoC), purkausssyvyys, sähkövirran voimakkuus, akun lataustapa ja latausnopeus (Lehtola & Zahedi, 2021; Ndiaye et al., 2021). Energianlähteen hyötysuhde vaikuttaa ajoneuvon päästöihin (Alexander & Abraham, 2024), minkä vuoksi akun ikääntyminen voi kasvattaa ajoneuvon käytön aikaisia päästöjä.

Ilmapäästöjen ja pienhiukkasten lisäksi ajoneuvoista syntyy käytön aikana melupäästöjä. Melua syntyy kahdesta eri lähteestä: vierintämelua vierivän renkaan vuorovaikutuksesta tien kanssa sekä käyttövoimamelua ajoneuvon käyttövoimajärjestelmästä. Käyttövoimamelu aiheutuu ajoneuvon komponenteista, kuten moottorista, vaihteistosta, jäähdytysjärjestelmästä ja pakoputkesta. Kevyillä ajoneuvoilla vierintämelu kasvaa suuremmaksi kuin käyttövoimamelu, kun ajoneuvon nopeus on suurempi kuin 30 km/h. (van Blokland & Peeters, 2009) Alhaisilla nopeuksilla, kuten kaupungeissa, polttomoottorista aiheutuva melu on merkittävämpää toistuvien kiihdytysten ja hidastusten takia. Tällöin sähkömoottorilla toimivat sähköautot ja ladattavat hybridit aiheuttavat siis polttomoottoriautoja vähemmän melua. Suuremmilla nopeuksilla (yli 50 km/h) sähköautojen ja polttomoottoriautojen välinen meluero on mitätön. (European Environment Agency, 2016, s. 9)

Tulevaisuudessa sähköautojen määrän merkittävä kasvu johtaa sähkön kysynnän kasvuun ja edellyttää sekä riittävää tuotantokapasiteettia että sähköverkkojen kykyä käsitellä ylimääräisiä tuotantomääriä. Tällöin tieliikenteen päästöt siirtyvät oikeastaan sähköntuotantosektorille. Sähköntuotannosta aiheutuvat päästöt riippuvat kyseisellä sektorilla käytetystä kokonaispolttoaineyhdistelmästä. Tämä vaihtelee alueittain. Jos polttoaineyhdistelmä vaihtelee päivän aikana, sähköauton päästöt riippuvat ajoneuvon latausajasta. (European Environment Agency, 2016, s. 42)

Sähköautojen lisääntyminen johtaa tieliikenteestä aiheutuvien kasvihuonekaasujen ja paikallisten ilmansaasteiden, kuten typen oksidien, rikkidioksidin ja pienhiukkasten, vähenemiseen. Riippuen sähköntuotannon lähteestä näiden myönteisten vaikutusten vastapainona on osittain sähkön lisäkysynnästä aiheutuvat lisäpäästöt energiasektorilla. Tieliikenteen paikallisten ilmansaasteiden vaikutusta ja sähköntuotannon päästöjen vaikutusta ei voida suoraan vertailla, koska eri sektoreilta syntyvien päästöjen altistus on erilainen. Tieliikenteestä aiheutuvat päästöt esiintyvät maan tasolla ja yleensä alueilla, joilla ihmiset elävät ja työskentelevät, kuten kaupungeissa, joten monet väestöstä altistuvat niille. Voimalaitokset taas sijaitsevat yleensä kaupunkien ulkopuolella harvemmin asutuilla alueilla. (European Environment Agency, 2016, s. 43)

Kaiken kaikkiaan siirryttäessä polttomoottoriautoista sähköautoihin vältetyt hiilidioksidipäästöt tieliikennesektorilla ylittävät energiasektorin tuottamat lisäpäästöt. Maissa, joissa fossiilisia polttoaineita käyttävien voimaloiden osuus sähköntuotannosta on suuri, sähköautojen lisääntyminen voi johtaa korkeampiin hiilidioksidipäästöihin. Rikkidioksidia syntyy tieliikenteestä suhteellisen vähän verrattuna energiantuotantoon. Lisääntyneen energiantarpeen takia energiasektorin lisääntyneet rikkidioksidipäästöt ylittävät tieliikenteessä syntyvät päästövähennykset jopa moninkertaisesti. (European Environment Agency, 2021)

4.2 Vertailu bensiini- ja dieselautojen käytön aikaisiin päästöihin

Polttomoottoriautot käyttävät fossiilisia polttoaineita, bensiiniä tai dieseliä, polttomoottorin voimanlähteenä. Ne tuottavat ajon aikana melua ja pakokaasuja, jotka saastuttavat ilmaa. (European Environment Agency, 2016, s. 17) Pakokaasujen merkittävimmät komponentit ovat hiilidioksidi, hiilimonoksidi, typen oksidit, haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC), pienhiukkaset ja rikkidioksidi. Bentseeni on yksi esimerkki polttomoottoreissa syntyvistä karsinogeenisistä haihtuvista orgaanisista yhdisteistä. (Larminie & Lowry, 2012, s. 254) Polttomoottoriautot ovat tehottomia: vain noin 18–25 % polttoaineesta saatavasta energiasta saadaan käytettyä ajoneuvon voimanlähteenä (European Environment Agency, 2016, s. 17). Polttomoottoriauton käyttö kuluttaa huomattavasti enemmän energiaa kuin sähköauton. Polttomoottoriauton käytön aikainen energiankulutus ylittää myös ladattavan hybridin energiankulutuksen. (Dunn et al., 2015)

Polttomoottoriautoista aiheutuu eri kokoisia pienhiukkasia pakokaasujen lisäksi jarrupalojen kulumisesta, renkaista ja tienpinnasta niiden välisen hankauksen seurauksena sekä myös jo olemassa olevan tiepölyn uudelleen suspendoitumisesta. Sähköautoista aiheutuu myös hiukkasia, mutta sähköautoilla ei ole pakokaasupäästöjä ja jarrupalojen kulumisesta aiheutuvia päästöjä vähennetään regeneratiivisen jarrutuksen käytöllä. (European Environment Agency, 2018, s. 33)

Kun myös sähköntuotannosta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt lasketaan mukaan, sähköauton ja ladattavan hybridin käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt ovat pienemmät kuin polttomoottoriautolla, kun sähköauto ja ladattava hybridi ladataan Yhdysvaltojen kansallisesta keskimääräisestä sähköverkosta. Sähköauton kasvihuonekaasupäästöt taas ovat pienemmät kuin ladattavan hybridin. (Dunn et al., 2015)

Sähköntuotannosta johtuen sähköautojen ja ladattavien hybridien polttoainesyklin (engl. Well-To-Pump, WTP) rikkidioksidipäästöt ovat korkeammat kuin polttomoottoriautoilla.

Sähköautojen tapauksessa tässä huomioidaan sähköntuotanto, joka ulottuu hankintaketjussa hiilen, maakaasun tai vastaavan hankintaan. Polttomoottoriauton tapauksessa tässä huomioidaan bensiinin koko polttoainekierto raakaöljyn louhinnasta alkaen. Ladattavan hybridin tapauksessa otetaan huomioon molemmat. Ajoneuvon käytön aikaiset (engl. Pump-To-Wheels, PTW) rikkidioksidipäästöt ovat alhaiset sekä polttomoottoriautolla että ladattavalla hybridillä. Sähköautolla ne ovat nolla. (Dunn et al., 2015)

Yksi merkittävä ongelma polttomoottoriautoissa hitaassa liikenteessä on se, että polttoaineen kulutus kasvaa merkittävästi, kun auto etenee kaupungissa hitaalla vauhdilla. Tällöin myös päästöt kasvavat. Sähköautoissa sähkömoottorin hyötysuhde pienenee hieman alhaisilla nopeuksilla ajettaessa, mutta akun hyötysuhde voi kasvaa, mikä johtaa melko tasaiseen hyötysuhteeseen auton koko nopeusalueella. Sekä polttomoottoriautolla että sähköautolla energiankulutus kuitenkin kasvaa ajoneuvon nopeuden lisääntyessä. (Larminie & Lowry, 2012, s. 255)

Sähköautojen valmistus kuluttaa enemmän energiaa ja tuottaa siten enemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin polttomoottoriautojen. Sähköauton valmistusvaiheessa syntynyt suurempi kasvihuonekaasupäästöjen määrä katetaan ensimmäisten 25 000 kilometrin aikana käyttämällä ajoneuvon lataamiseen Yhdysvaltojen kansallista keskimääräistä sähköverkkoa. (Dunn et al., 2015) Tällöin polttomoottoriauto ja sähköauto ovat siis kasvihuonekaasupäästöjen suhteen tasoissa. Koska autoilla ajetaan kuitenkin enemmän kuin 25 000 kilometriä, sähköauto kuluttaa vähemmän energiaa yhteensä valmistuksen ja käytön aikana kuin polttomoottoriauto, jolloin se tuottaa myös vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä.

Sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistuksen ja käytön aikainen energia- ja kasvihuonekaasupäästötehokkuus on parempi kuin polttomoottoriautojen, paitsi jos ne toimivat pelkästään kivihiilestä peräisin olevalla sähköllä. Tämä ei riipu siitä, toimiiko akkujen kokoonpanotehdas kapasiteetillaan vai matalammalla tuotantoteholla. Sähköautot ja ladattavat hybridit kuluttavat siis yleisesti ottaen vähemmän energiaa ja tuottavat vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin polttomoottoriautot. (Dunn et al., 2015)

Nykyisellä eurooppalaisella sähköyhdistelmällä toimivat sähköautot vähentävät ilmastonlämpenemispotentiaalia (GWP) 10–24 % bensiini- ja dieselautoihin verrattuna, kun oletetaan, että ajoneuvojen käyttöikä on 150 000 km. Sähköautot voivat kuitenkin lisätä merkittävästi myrkyllisyyttä ihmisille, makean veden ekotoksisuutta ja rehevöitymistä sekä metallien köyhtymistä, mikä johtuu suurelta osin näiden ajoneuvojen valmistamisesta ja raaka-aineiden hankinnasta. (Hawkins et al., 2013)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää, miten sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistuksen ja käytön aikaiset päästöt ja niiden määrät eroavat polttomoottoriautojen päästöistä, eli onko sähköautolla tai ladattavalla hybridillä ajaminen vähäpäästöisempää myös valmistusvaihe huomioon otettuna kuin polttomoottoriautolla. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena.

Merkittävimmät erot sähköauton ja polttomoottoriauton valmistuksessa johtuvat akusta, sähkömoottorista ja tehoelektroniikasta. Ladattavassa hybridissä on akun ja sähkömoottorin lisäksi myös polttomoottori ja polttoainetankki. Sähköautoissa ja ladattavissa hybrideissä käytetään akun ja sähkömoottorin osalta enemmän kuparia ja mahdollisesti nikkeliä sekä kriittisiä raaka-aineita ja harvinaisia maametalleja kuin polttomoottoriautoissa. Metallien ja harvinaisten maametallien louhintaan liittyy runsaan energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi erilaisia paikallisia ympäristövaikutuksia. Sähköautojen ja ladattavien hybridien koreissa saatetaan käyttää enemmän kevyempiä materiaaleja, kuten alumiinia, hiilikuitua ja muovikomposiitteja, kuin polttomoottoriautoissa. Näiden materiaalien lisääminen lisää myös valmistuksen energiankulutusta.

Sähköauton ja ladattavan hybridin valmistaminen akku mukaan lukien on noin 10–40 % energiaintensiivisempää kuin polttomoottoriauton valmistaminen, kun akkujen kokoonpanotehdas toimii kapasiteetillaan. Suurempi energian tarve voi johtaa suurempiin kasvihuonekaasupäästöihin ja niihin liittyviin ilmansaasteisiin käytetystä energianlähteestä riippuen. Sähköauton ja ladattavan hybridin valmistuksen päästöt riippuvat merkittävästi muiden muassa akkutyypistä, akun koosta, akun kokoonpanoenergiasta sekä käytetyistä materiaaleista ja energianlähteistä.

Sähköauto käyttö kuluttaa noin 1,6–3,4 kertaa vähemmän energiaa kuin polttomoottoriauton käyttö kilometriä kohti. Sähköautojen energiatehokkuus riippuu kuitenkin monesta eri tekijästä: muiden muassa ajopaikasta ja -tyylistä, apujärjestelmien käytöstä, ajoneuvon koosta ja painosta sekä regeneratiivisen jarrutuksen käytöstä.

Sähköauton ja ladattavan hybridin käytön aikaiset päästöt riippuvat suuresti siitä, miten niiden lataamiseen käytetty sähkö on tuotettu. Lisäksi ladattavan hybridin päästöt riippuvat merkittävästi akun ja polttomoottorin toimintasuhteesta. Yleisesti ottaen sähköautolla on pienemmät käytön aikaiset päästöt kuin ladattavalla hybridillä. Kun myös sähköntuo-

tannosta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt lasketaan mukaan, sähköauton ja ladattavan hybridin käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt ovat pienemmät kuin polttomoottoriautolla, kun sähköauto ja ladattava hybridi ladataan Yhdysvaltojen kansallisesta keskimääräisestä sähköverkosta.

Sähköautot ja ladattavat hybridit vähentävät liikenteestä aiheutuvia pakokaasupäästöjä ja auttavat siten parantamaan paikallista ilmanlaatua. Sähköautojen ja ladattavien hybridien kuluttaman sähkön tuottamisessa syntyy kuitenkin hiukkasia, typenoksideja, rikkidioksidia ja muita ilman epäpuhtauksia. Siten sähköautojen ja ladattavien hybridien lisääntyminen siirtää liikenteen päästöjä energiasektorille. Kun fossiilisten polttoaineiden osuus sähköntuotannossa vähenee ja uusiutuvien energianlähteiden osuus kasvaa, myös sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistuksen ja etenkin käytön aikaiset päästöt vähenevät.

Sähköautoista aiheutuu vähemmän pienhiukkasia kuin polttomoottoriautoista, koska sähköautoilla ei ole pakokaasupäästöjä ja jarrupalojen kulumisesta aiheutuvia hiukkaspäästöjä vähennetään regeneratiivisen jarrutuksen käytöllä. Sähköntuotannosta johtuen sähköautojen ja ladattavien hybridien WTP-rikkidioksidipäästöt ovat suuremmat kuin polttomoottoriauton.

Sähköautojen ja ladattavien hybridien lisääntyminen ei poista liikenteestä aiheutuvia ongelmia, kuten suurta energiankulutusta ja raaka-aineiden tarvetta, liikenteestä aiheutuvaa melua, ruuhkia tai onnettomuuksia. Sähköajoneuvot eivät ole ainoa vaihtoehto liikenteen päästöjen vähentämiseen. Esimerkiksi kaasuautot tai etanoli- ja vetyautot voivat olla vielä vähäpäästöisempiä kuin sähköautot tai ladattavat hybridit.

Ajoneuvojen päästöjä vertaillessa tulisi tarkastella ajoneuvojen koko elinkaarta. Tästä työstä rajattiin pois ajoneuvojen elinkaaren viimeinen vaihe, käytöstä poisto, josta syntyy lisää päästöjä ja ympäristövaikutuksia. Lisäksi kirjallisuudessa on puutteellisia tietoja malmien louhinnan osalta. Malmien louhintaa tulisi tutkia tarkemmin, jotta voidaan arvioida luotettavammin ajoneuvojen koko elinkaaren aikaisia päästöjä. Lisäksi tässä kandidaatintyössä oletettiin, että ajoneuvot valmistetaan neitseellisistä raaka-aineista, vaikka kierrätettyjen raaka-aineiden käyttö voisi vähentää valmistuksen päästöjä merkittävästi.

Sähköautojen ja ladattavien hybridien valmistuksen ja käytön aikainen energia- ja kasvihuonekaasupäästötehokkuus on parempi kuin polttomoottoriautojen, paitsi jos ne toimivat pelkästään kivihiilestä peräisin olevalla sähköllä. Sähköautojen ja ladattavien hybridien raaka-aineiden louhinnasta ja valmistuksesta aiheutuu kuitenkin runsaasti erilaisia ympäristöhaittoja, joten ei ole yksiselitteistä, mikä ajoneuvo on ympäristön kannalta paras vaihtoehto, kun tarkastellaan kaikkia ympäristövaikutuksia koko elinkaaren aikana.

LÄHTEET

Alexander, S., Abraham, J., 2024. Making sense of life cycle assessment results of electrified vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews 199, 114470. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114470

Arun, V., Kannan, R., Ramesh, S., Vijayakumar, M., Raghavendran, P.S., Siva Ramkumar, M., Anbarasu, P., Sundramurthy, V.P., 2022. Review on Li-Ion Battery vs Nickel Metal Hydride Battery in EV. Advances in Materials Science and Engineering 2022, e7910072. https://doi.org/10.1155/2022/7910072

Battery University, 2024a. BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries. Battery University. https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries (viitattu 25.4.2024).

Battery University, 2024b. BU-215: Summary Table of Nickel-based Batteries. Battery University. https://batteryuniversity.com/article/bu-215-summary-table-of-nickel-based-batteries (viitattu 15.5.2024).

Battery University, 2023. BU-205: Types of Lithium-ion. Battery University. https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion (viitattu 21.4.2024).

Battery University, 2022. BU-204: How do Lithium Batteries Work? Battery University. https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work (viitattu 25.4.2024).

Battery University, 2021a. BU-801b: How to Define Battery Life. Battery University. https://batteryuniversity.com/article/bu-801b-how-to-define-battery-life (viitattu 25.4.2024).

Battery University, 2021b. BU-203: Nickel-based Batteries. Battery University. https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries (viitattu 29.4.2024).

Battery University, 2021c. BU-808c: Coulombic and Energy Efficiency with the Battery. Battery University. https://batteryuniversity.com/article/bu-808c-coulombic-and-energy-efficiency-with-the-battery (viitattu 29.4.2024).

Berjoza, D., Jurgena, I., 2017. Influence of batteries weight on electric automobile performance. Presented at the 16th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N316

Best Hybrid Batteries, n.d. What Are the Main Types of Hybrid Batteries?. https://www.besthybridbatteries.com/informationcenter/resources/types-of-hybrid-batteries (viitattu 19.4.2024).

Canals Casals, L., García, B., DAGA, S., 2016. THE ELECTRIC VEHICLE BATTERY

AGEING AND HOW IT IS PERCEIVED BY ITS DRIVERS. DYNA INGENIERIA E INDUSTRIA 91, s. 188–195. https://doi.org/10.6036/7599

Dragonfly Energy, 2022a. What Types of Batteries Are Used in Electric Cars? Dragonfly Energy. https://dragonflyenergy.com/electric-car-batteries/ (viitattu 18.2.2024).

Dragonfly Energy, 2022b. A Guide To The 6 Main Types Of Lithium Batteries. Dragonfly Energy. https://dragonflyenergy.com/types-of-lithium-batteries-guide/ (viitattu 21.4.2024).

Dunn, J.B., Gaines, L., Kelly, J.C., James, C., Gallagher, K.G., 2015. The significance of Li-ion batteries in electric vehicle life-cycle energy and emissions and recycling's role in its reduction. Energy & environmental science 8, s. 158–168. https://doi.org/10.1039/c4ee03029j

Eggert, R., Wadia, C., Anderson, C., Bauer, D., Fields, F., Meinert, L., Taylor, P., 2016. Rare Earths: Market Disruption, Innovation, and Global Supply Chains. Annual Review of Environment and Resources 41, s. 199–222. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085700

Ellingsen, L. A-W. & Hung, C. R. 2018, Research for TRAN Committee – Resources, energy, and lifecycle greenhouse gas emission aspects of electric vehicles, European Parliament, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Brussels.

Euroopan parlamentti, 2023. Ilmastonmuutos: ilmaston lämpenemistä aiheuttavat kasvihuonekaasut. https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20230316STO77629/ilmastonmuutos-ilmaston-lampenemista-aiheuttavat-kasvihuonekaasut (viitattu 7.2.2024).

Euroopan parlamentti, 2022. Uusien bensiini- ja dieselautojen myyntikielto – mitä vuosi 2035 tuo mukanaan? https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20221019STO44572/uusien-bensiini-ja-dieselautojen-myyntikielto-mita-vuosi-2035-tuo-mukanaan (viitattu 26.2.2024)

Euroopan parlamentti, 2018. EU:n kasvihuonekaasupäästöjen leikkaaminen: vuoden 2030 kansalliset tavoitteet. https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180208STO97442/eu-n-kasvihuonekaasupaastojen-leikkaaminen-vuoden-2030-kansalliset-tavoitteet (viitattu 7.2.2024).

European Comission, 2014. REPORT ON CRITICAL RAW MATERIALS FOR THE EU: Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. European Comissions. https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf

European Environment Agency, 2021. Electric vehicles and the energy sector - impacts on Europe's future emissions. https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-and-the-energy/electric-vehicles-and-energy (viitattu 9.4.2024).

European Environment Agency, 2018. Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives - TERM 2018: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report (Publication No. 13/2018).

European Environment Agency, 2016. Electric vehicles in Europe. Publications Office. https://data.europa.eu/doi/10.2800/100230

Fingrid, 2024. Sähköntuotannon ja -kulutuksen CO2-päästöarviot. Fingrid. https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/co2/ (viitattu 5.3.2024).

Flexer, V., Baspineiro, C.F., Galli, C.I., 2018. Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. Science of The Total Environment 639, s. 1188–1204. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223

Hänninen, O., Korhonen, A., Lehtomäki, H., Asikainen, A., Rumrich, I., 2016. Ilmansaasteiden terveysvaikutukset. Ympäristöministeriö. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/74861/YMra_16_2016.pdf

Härri, A., 26.11.2018. Sähköautot yleistyvät, mutta niiden akkujen tuotantoon liittyy suuria ongelmia. Fingo. https://fingo.fi/ajankohtaista/blogit/sahkoautot-yleistyvat-mutta-niiden-akkujen-tuotantoon-liittyy-suuria-ongelmia/ (viitattu 25.4.2024).

Hawkins, T.R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, A.H., 2013. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. Journal of Industrial Ecology 17, s. 53–64. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x

Hernandez, M., Messagie, M., Hegazy, O., Marengo, L., Winter, O., Van Mierlo, J., 2017. Environmental impact of traction electric motors for electric vehicles applications. Int J Life Cycle Assess 22, s. 54–65. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0973-9

HSY, 2023. Liikenteen pakokaasut heikentävät ilmanlaatua. Helsingin seudun ympäristöpalvelut HSY. https://www.hsy.fi/ilmanlaatu-ja-ilmasto/liikenteen-pakokaasut-heikentavat-ilmanlaatua/ (viitattu 4.3.2024).

Jin, H., Afiuny, P., Dove, S., Furlan, G., Zakotnik, M., Yih, Y., Sutherland, J.W., 2018. Life Cycle Assessment of Neodymium-Iron-Boron Magnet-to-Magnet Recycling for Electric Vehicle Motors. Environ. Sci. Technol. 52, s. 3796–3802. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05442

Kalogirou, S., 2018. Mcevoy's handbook of photovoltaics: fundamentals and applications, Third edition. ed. Academic Press, London, England.

Kaunda, R.B., 2020. Potential environmental impacts of lithium mining. Journal of Energy & Natural Resources Law 38, s. 237–244. https://doi.org/10.1080/02646811.2020.1754596

Krings, A., Monissen, C., 2020. Review and Trends in Electric Traction Motors for

Battery Electric and Hybrid Vehicles, in: 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). Presented at the 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), s. 1807–1813. https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9270946

Larminie, J., Lowry, J., 2012. Electric Vehicle Technology Explained. John Wiley & Sons, Incorporated, Newark, UNITED KINGDOM.

Lehtola, T.A., Zahedi, A., 2021. Electric Vehicle Battery Cell Cycle Aging in Vehicle to Grid Operations: A Review. IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 9, s. 423–437. https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2959276

Li, W., Wan, Y., 2024. Classical Electric Machines for Electric and Hybrid Vehicles. Green Energy and Technology Part F2211, s. 27–49. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3060-9_2

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2023. Liikennekäytössä olevat henkilöautot - käyttövoimat, päästöt ja keski-ikä. Tieto Traficom. https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikennekaytossa-olevat-henkiloautot-kayttovoimat-paastot-ja-keski-ika (viitattu 7.2.2024).

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom, 2022. Liikenteen kasvihuonekaasupäästöt ja energiankulutus. Tieto Traficom. https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikenteen-kasvihuonekaasupaastot-ja-energiankulutus (viitattu 7.2.2024).

MTV Uutiset, 27.06.2021a. Volkswagen lopettaa polttomoottoriautojen valmistuksen Euroopassa vuoteen 2035 mennessä. MTV Uutiset. https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/volkswagen-lopettaa-polttomoottoriautojen-valmistuksen-euroopassa-vuoteen-2035-mennessa/8179450 (viitattu 26.2.2024).

MTV Uutiset, 27.08.2021b. Nyt se on varmaa: Saksalaismerkki panee pisteen polttomoottoreille lopullisesti. MTV Uutiset. https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/nyt-se-on-varmaa-saksalaismerkki-panee-pisteen-polttomoottoreille-lopullisesti/8220506 (viitattu 26.2.2024).

Mudd, G.M., 2010. Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. Ore Geology Reviews 38, s. 9–26. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.003

Mudd, G.M., Weng, Z., Jowitt, S.M., Turnbull, I.D., Graedel, T.E., 2013. Quantifying the recoverable resources of by-product metals: The case of cobalt. Ore Geology Reviews 55, s. 87–98. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.04.010

Ndiaye, A., German, R., Bouscayrol, A., Venet, P., Castex, E., 2021. Influence of Electric Vehicle Charging on Lithium-ion Batteries Aging. Presented at the 2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2021 - ProceedingS. https://doi.org/10.1109/VPPC53923.2021.9699223

Nordelöf, A., Grunditz, E., Lundmark, S., Tillman, A.-M., Alatalo, M., Thiringer, T.,

2019. Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors. Transportation Research Part D: Transport and Environment 67, s. 263–274. https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004

Nuss, P., Eckelman, M., 2014. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. PloS one 9, e101298. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298

Oak Ridge National Laboratory, n.d. Plug-in Hybrids. http://www.fueleconomy.gov/feg/phevtech.shtml (viitattu 5.6.2024).

Pravallika, G., Sujatha, P., Bharath Kumar, P., 2023. Different traction motor topologies with lithium-air battery for electric vehicles: A review. Materials Today: Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.400

Rücker, F., Figgener, J., Schoeneberger, I., Sauer, D.U., 2024. Battery Electric Vehicles in Commercial Fleets: Use profiles, battery aging, and open-access data. Journal of Energy Storage 86, 111030. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111030

Shuoyao, W., Yu, J., 2020. Life-Cycle Assessment on Nickel-Metal Hydride Battery in Hybrid Vehicles: Comparison between Regenerated and New Battery: Ocena cyklu życia akumulatora niklowo-wodorkowego w pojazdach hybrydowych: porównanie akumulatora regenerowanego i nowego. Investigationes Linguisticae s. 57–79. https://doi.org/10.14746/il.2019.43.5

Siadatan, A., Goltieb, J., Afjei, E., 2020. Comparison of power factor between permanent magnet assisted synchronous reluctance motor with neodymium-iron-boron and ferrite magnets, in: 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). Presented at the 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), s. 144–150. https://doi.org/10.1109/SPEEDAM48782.2020.9161836

Singh, H., Ambikapathy, A., Logavani, K., Arun Prasad, G., Thangavel, S., 2021. Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs). Green Energy and Technology s. 53–72. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9251-5_3

Sprecher, B., Xiao, Y., Walton, A., Speight, J., Harris, R., Kleijn, R., Visser, G., Kramer, G.J., 2014. Life Cycle Inventory of the Production of Rare Earths and the Subsequent Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets. Environ. Sci. Technol. 48, s. 3951–3958. https://doi.org/10.1021/es404596q

Tilastokeskus, n.d. Hiilidioksidiekvivalentti. https://www.stat.fi/meta/kas/hiilidioksidiek.html (viitattu 26.2.2024).

Vahidi, E., Navarro, J., Zhao, F., 2016. An initial life cycle assessment of rare earth oxides production from ion-adsorption clays. Resources, Conservation and Recycling 113, s. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.006

van Blokland, G., Peeters, B., 2009. modeling the noise emission of road vehicles and

results of recent experiments. https://mp.nl/sites/default/files/publications/in09_895.pdf

Volvo Cars, 5.10.2023. Julistamme dieselin aikakauden päättyneeksi New Yorkin ilmastoviikolla – viimeinen dieselautomme valmistetaan alkuvuodesta 2024. Volvo Car Corporation. https://www.volvocars.com/fi/news/sustainability/we-declare-the-end-of-diesel-at-climate-week-nyc-our-last-diesel-car-will-be-built-in-early-2024/ (viitattu 26.2.2024).

VTT, n.d. LIPASTO. VTT. http://lipasto.vtt.fi/liisa/co2ekvs.htm (viitattu 26.2.2024).

Widmer, J.D., Martin, R., Kimiabeigi, M., 2015. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. Sustainable Materials and Technologies 3, s. 7–13. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.02.001