



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

TAVOITTEENA HIILINEUTRAALI AUTON ELINKAARI

Atte Hauru

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Maaliskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Tavoitteena hiilineutraali auton elinkaari

Atte Hauru

Oulun yliopisto, konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2023, 34 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Louhisalmi Y., Yliopisto-opettaja

Hiilineutraalius ja muut ilmastokysymykset ovat jo kauan olleet ajankohtaisia ja tieliikenteen päästöjä on varsinkin viime vuosikymmenen aikana pyritty erilaisilla metodeilla vähentämään.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan auton hiilineutraalin elinkaaren tavoittelua. Työn tarkoituksena on tuoda ilmi kirjallisuuslähteiden perusteella erilaisia mahdollisuuksia hiilineutraaliuden saavuttamiseksi. Työssä tuodaan myös esille erilaisten raaka-aineiden, valmistusmenetelmien, käyttövoimien, sekä kierrätysmenetelmien ongelmia, mahdollisuuksia sekä tulevaisuuden näkymiä.

Asiasanat: hiilineutraalius, kierrätys, henkilöautot

ABSTRACT

Pursuing carbon neutrality in passenger vehicles

Atte Hauru

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2023, 34 pp.

Supervisor(s) at the university: Louhisalmi Y., University teacher

Carbon neutrality and other climate issues have been high topic for a long time now and various methods have been used to try and reduce road traffic emissions over the past decade.

The topic of this bachelor's thesis is the pursuit of a carbon neutral lifecycle for a passenger vehicle. The objective of this thesis is to explore and reveal different possibilities towards achieving carbon neutrality, relying on scientific literature as a basis. This thesis additionally highlights challenges, opportunities and prospects of different raw materials, manufacturing processes, alternative power sources and recycling techniques.

Keywords: carbon-neutrality, recycling, passenger vehicles

ALKUSANAT

Työn tarkoituksena on tutkia kirjallisuuden avulla otsikon mukaista aihetta ”Tavoitteena hiilineutraali auton elinkaari”. Kandidaatintyö on tehty tammikuun 2023 ja maaliskuun 2023 välillä.

Oulu, 28.3.2023

Atte Hauru
Atte Hauru

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	7
2 Hiilineutraaliuden käsite	8
2.1 Hiilipäästöt ja ilmastonmuutos	8
2.2 Hiilineutraaliuden käsite	10
2.3 Hiilineutraaliuden haasteet	10
3 Autojen raaka-aineet	12
3.1 Teräs	12
3.2 Alumiini	13
3.3 Kumi	15
3.4 Lasi	15
3.5 Muovi	16
3.6 Elektroniset osat	16
4 Varsinainen elinkaari	18
4.1 Tutkimus 1	18
4.2 Tutkimus 2	20
4.3 Ekopolttoaineet (biokaasu ja bioetanoli)	21
5 Kierrätys ja uusiokäyttö	24
5.1 Teräksen kierrätys, uusiokäyttö ja uudelleenvalmistus	24
5.2 Alumiinin kierrätys ja uusiokäyttö	25
5.3 Kumin kierrätys ja uusiokäyttö	25
5.4 Muovin kierrätys ja uusiokäyttö	26
5.5 Elektronisten osien kierrätys ja uusiokäyttö	28
6 Yhteenveto	29
LÄHDELUETTELO	30

MERKINNÄT JA LYHENTEET

GHG	kasvihuonekaasu (greenhouse gas)
HYBRIT	Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology
NCM	nikkeli-koboltti-mangaani-akku
NCA	nikkeli-koboltti-alumiini-akku
LFP	litium-rautafosfaattiakku
CBG	paineistettu biometaani (compressed biomethane)
CNG	paineistettu maakaasu (compressed natural gas)
LBG	nesteytetty biometaani (liquefied biomethane)

1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön aiheena on hiilineutraalin auton elinkaaren tavoittelu. Ainoana alana, jolla kasvihuonepäästöt ovat kasvaneet viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana, liikenteessä on tapahtumassa suuria muutoksia. Varsinkin vaihtoehtoiset käyttövoimat ovat kasvattaneet suosiotaan reilusti. Uusienkin autojen ympäristöystävällisempi kehittäminen on kuitenkin hieman hiipunut ja auton koko elinkaaren aikana päästöjä tulee huomattavasti myös muusta kuin sen tieliikennekäytöstä, kuten esimerkiksi valmistuksesta. Tieliikenteen päästöt muodostavat noin 25 % kokonaispäästöistä Euroopan Unionin alueella, joista noin 60,6 % johtuu henkilöautoista. (Euroopan Parlamentti, 2019)

Autojen valmistuksen ja raaka-aineiden päästöjen vähentäminen voi tosin olla jopa haastavampaa kuin tieliikenteen päästöjen laskeminen. Vaikka esimerkiksi sähköautot tuottavat vähän päästöjä tieliikenteessä, on niiden tuottaminen huomattavasti perinteisiä polttomoottoriautoja kuormittavampaa ympäristölle.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaankin erilaisia ongelmia ja mahdollisuuksia sekä autojen valmistuksen, että käyttämisen päästöjen vähentämiseksi. Työssä käydään läpi erilaisten raaka-aineiden ja autojen käyttövoimien vahvuuksia ja heikkouksia ympäristön kannalta.

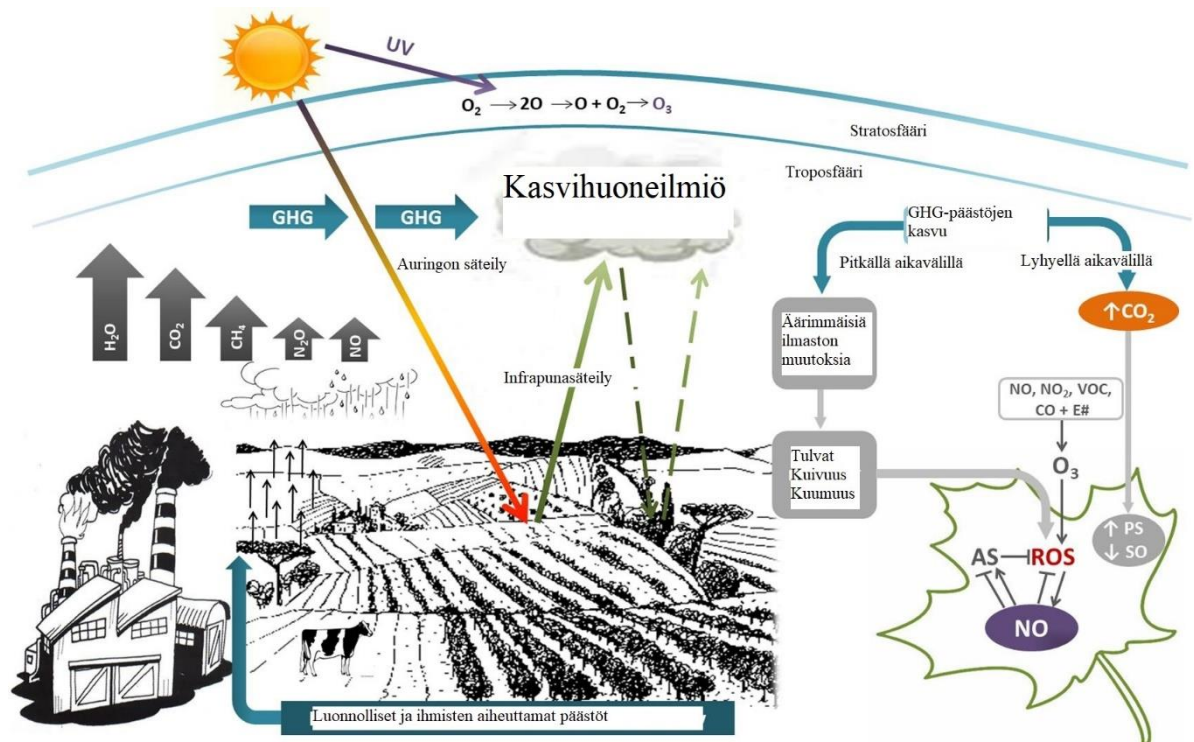
2 HIILINEUTRAALIUDEN KÄSITE

Ilmastonmuutoksesta on jo muodostunut mittava ongelma maailmassa. Sen aiheuttamia tuhoja ovat esimerkiksi yleistynyt kuivuus, kuumuus, rankkasateet ja tulvat. Muita ilmastonmuutokseen liittyviä riskejä ovat esimerkiksi meriveden nouseminen napajäätiköiden sulamisen vuoksi. Näiden riskien ja haittojen hillitsemiseksi on tehty useita kansainvälisiä sopimuksia, joissa on sitouduttu vähentämään hiilidioksidipäästöjä. Esimerkiksi Pariisin ilmastosopimuksessa, jonka 195 maata on allekirjoittanut, on sitouduttu korkeintaan 1,5° celsiusasteen ilmaston lämpenemiseen. (Euroopan Parlamentti, 2019)

2.1 Hiilipäästöt ja ilmastonmuutos

Elämä maapallolla on mahdollista ilmakehän kasvihuoneilmiön ansiosta. Planeettamme ilmakehä vangitsee auringon säteilyn ja lämmittää maan pintaa. Tämä kasvihuoneilmiö tapahtuu kasvihuonekaasujen (GHG) ansiosta. GHG-kaasut ovat kaasuja, jotka absorboivat säteilyä. Yleisimpiä näistä kaasuista ovat vesihöyry ja hiilidioksidi. Lisäksi GHG-kaasuja ovat esimerkiksi otsoni ja metaani. Näiden kaasujen määrän kasvamisen vuoksi maapallon lämpötila kuitenkin nousee aiheuttaen useita erilaisia ongelmia. (Cassia et al, 2018)

Hiilidioksidilla on suuri vaikutus auringon säteilyn ja lämmön vangitsemiseen ilmakehässä. Ihmisten kehittämän teollistumisen myötä hiilidioksidin määrä ilmakehässä on kasvanut huomattavasti, lämmittäen ilmastoa. Näiden GHG-kaasujen ilmakehään päätyminen rajoittaminen on tehokas tapa hidastaa ilmastonmuutosta. Kuvassa (kuva 1, Cassia et al, 2018) havainnollistettu kasvihuoneilmiö, auringon säteily jää GHG-kaasujen vuoksi maapallon ilmakehään.



Kuva 1. Yksinkertaistettu kuva GHG-kaasuista ja niiden aiheuttamasta kasvihuoneilmidiöstä. (Cassia et al. 2018).

Kasvihuoneilmiö aiheutuu, kun auringon säteily osuu maan pintaan, mutta maan pinnasta takaisin heijastuva infrapunasäteily ei pääse poistumaan ilmakehästä. Tämä johtuu ihmisten aiheuttamista kasvihuonekaasuista sekä luonnollisista päästöistä, jotka muodostavat troposfääriin kasvihuoneilmiön. Ultraviolettisäteily jää pääosin stratosfäärin otsonikerrokseen. (Cassia et al. 2018)

Kuvassa on esitelty myös mihin ilmiöihin kasvihuonekaasut johtavat lyhyellä aikavälillä sekä pitkällä aikavälillä. Lyhyellä aikavälillä kasvihuonekaasut nostavat ilmakehän CO₂-pitoisuutta. Pidemmällä aikavälillä ilmiöstä voi aiheutua äärimmäisiä ilmaston muutoksia, kuten tulvia, kuivia kausia, sekä kuumuutta. (Cassia et al. 2018)

2.2 Hiilineutraaliuden käsite

Hiilineutraaliudella tarkoitetaan hiilipäästöjen ja hiilinielujen tasapainoa. Poistamalla ja varastoimalla hiiltä ilmakehästä esimerkiksi kasveilla voidaan saavuttaa ”net zero”-tilanne, eli nollapäästötilanne, jos kaikki GHG-päästöt pystytään tasapainottamaan hiilinieluilla. Päästöjä voidaan kompensoida myös toisilla sektoreilla, kuten sijoittamalla uusiutuviin ja hiilineutraaleihin energioihin. Euroopan Unionin tavoitteena on saavuttaa nollapäästötilanne vuoteen 2050 mennessä ja vuoteen 2030 mennessä vähentää hiilipäästöjä jo 55 % vuoden 2021 tasoon verrattuna. (Euroopan Parlamentti. 2022)

Hiilipäästöjen tasapainottamiseen tarvitaan monenlaisia keinoja ja toimenpiteitä. Kuitenkin helpoimpia tapoja hiilinielujen kasvattamisen lisäksi on GHG-päästöjen vähentäminen, joihin tämäkin opinnäytetyö keskittyy.

2.3 Hiilineutraaliuden haasteet

Hiilineutraaliuden saavuttaminen tai päästöjen leikkaaminen huomattavasti ei kuitenkaan tule olemaan helppoa tai halpaa autoteollisuudelle. Zhao et al. (2022) kirjoittamassa artikkelissa ”Automobile Industry under China’s Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals: Challenges, Opportunities and Coping strategies” tutkitaan kiinalaisen autoteollisuuden näkökulmasta hiilineutraaliuden ja päästöjen vähentämisen haasteita. Samoja haasteita on nähtävissä myös länsimaisessa autoteollisuudessa. Kiina on sitoutunut saavuttamaan hiilineutraaliuden vain 10 vuotta myöhemmin kuin Euroopan Unioni, vuonna 2060.

Haasteita tälle tavoitteelle on kuitenkin useita. Kiinan tapauksessa autoteollisuuden valtava koko, Kiinassa on 292 miljoonaa autoa (vuonna 2021) ja määrän ennustetaan kasvavan 550 miljoonaan vuoteen 2050 mennessä. Kiinassa autoteollisuus on erittäin hallitseva teollisuudenala, Kiinassa on maailman suurimmat markkinat autoille ja ne kasvavat entisestään. (Zhao et al, 2022)

Maailmanlaajuisesti kilpailu on kovaa, varsinkin matalapäästöisissä autoissa. Uusia päästörajoituksia kehitetään koko ajan ja autoteollisuuden täytyy sopeutua ja innovoida.

Zhaon et al. (2022, s.6) mukaan valtiot todennäköisesti tulevat asettamaan tiukempia kaupankäyntilakeja hiilipäästöjen mukaan. Autoteollisuus ei myöskään yksin kykene saavuttamaan hiilineutraaliutta, sillä se kytkeytyy voimakkaasti myös muihin teollisuuden aloihin. Tavoitteiden saavuttamiseksi autoteollisuuden täytyy kiihdyttää päästöjen vähentämistä entisestään.

3 AUTOJEN RAAKA-AINEET

Suuri osa auton elinkaaren päästöistä syntyy jo sen valmistusvaiheessa. Tässä kappaleessa tutkitaan auton valmistukseen liittyviä asioita päästöjen vähentämisen kannalta, erilaisia materiaaleja ja niiden hiilineutraaleja valmistusmahdollisuuksia.

Autoihin käytetään suuria määriä terästä, ja kasvavissa määrin alumiinia. Sähköautojen akustoihin käytetään myös erilaisia metalleja, joiden valmistamisesta tai louhimisesta aiheutuu huomattavia hiilidioksidipäästöjä. Näiden raaka-aineiden valmistusprosessien päästöjen vähentämisellä on suuri merkitys auton valmistuksen ja elinkaaren päästöjen kannalta.

Valmistusprosesseihin ja niiden ekologisuuden parantamiseen perehdytään tässä työssä kuitenkin varsin pintapuolisesti, sillä työn pääpaino on auton varsinaisesta käytöstä aiheutuvat päästöt ja niiden vähentäminen.

3.1 Teräs

Terästeollisuus on suurimpia yksittäisiä hiilidioksidipäästöjen lähteitä, mutta viime vuosina pyrkimys vihreään tuotantoon on kiihtynyt. Ylen artikkelin mukaan, ”jos terästeollisuus olisi maa, sen hiilijalanjälki olisi maailman kolmanneksi suurin” (Heikinmatti A, 2023). Terästeollisuuden päästöt ovat valtavat ja niitä on ollut hankala muuttaa. Vaihtoehtoja perinteiselle koksien ja hiilen avulla tuotetulle teräkselle ei ole aiemmin ollut. Haasteena terästeollisuuden päästöjen leikkaamisessa on myös sen valtava koko. Yhteiskunta tarvitsee terästä paitsi autoteollisuuden käyttöön, myös moneen muuhun asiaan muun muassa infrastruktuuriin ja rakennuksiin. Viime vuosina hiilineutraalin teräksen tuotannossa on kuitenkin otettu suuria edistysaskeleita. (Heikinmatti A, 2023)

Terästeollisuus tuottaa jopa 8 % hiilidioksidipäästöistä maailmanlaajuisesti. Terästeollisuuden päästöjen tulisi pudota ainakin 30 %, jotta Pariisin ilmastopimuksen mukainen hiilineutraali vuosi 2050 saavutettaisiin. Terästeollisuus on kuitenkin

käymässä läpi muutosta. Suurimmat teräsyhtiöt tekevät jo mittavia sijoituksia ja projekteja hiilineutraalin teräksen eteen. (Gerres et al, 2021)

Hiilineutraalin teräksen tuotannossa ruotsalainen SSAB on edistynyt pitkälle ja testieriä on jo tuotettu. Yhdessä LKAB:n ja Vattenfallin kanssa SSAB tähtää kokonaan hiilineutraaliin tuotantoketjuun, kaivokselta valmiiseen teräkseen. SSAB:n kehittämä HYBRIT-teknologia käyttää vesielektrolyysillä tuotettua vetyä sekä fossiilivapaata sähköä rautamalmin pelkistämiseen. Näin hiiltä tai hiilestä valmistettua koksia ei enää tarvita ja hiilidioksidipäästöt putoavat huomattavasti. (Pei et al, 2020)

Ajoneuvoihin liittyen Volvo Group on yhteistyössä SSAB:n kanssa esitellyt ensimmäisen fossiilivapaasta teräksestä valmistetun ajoneuvon, kaivosteollisuudessa käytettävän maansiirtokoneen. Volvo Groupin mukaan ”Ajoneuvolla on suunnattomasti symboliarvoa teknologisena edistysaskeleena”. (SSAB, 2023)

Vaikka HYBRIT-teknologian kehitys on jo edennyt pitkälle, sen tai vastaavien vihreiden tuotantokeinojen käyttöönotto isommassa kaavassa on vielä muutamien vuosien päässä. SSAB kertoo kotisivuillaan pystyvänsä tuottamaan rautamalmipohjaista fossiilivapaata terästä kaupallisia määriä vuonna 2026. (SSAB, 2023)

Mikäli teräksen hiilineutraali valmistuminen yleistyy ja mittakaava kasvaa lähitulevaisuudessa, voidaan sillä huomattavasti vaikuttaa autojenkin valmistuksesta johtuviin hiilidioksidipäästöihin. Pilottitehtaat ja jo hiilineutraalista teräksestä valmistetut ajoneuvot todistavat, että teräksen hiilineutraalius on mahdollista, mutta kaupallista käyttöä ajatellen valmis tuote on kuitenkin vielä muutamien vuosien päässä.

3.2 Alumiini

Alumiini on autoteollisuudessa kasvavissa määrin käytettävä raaka-aine, jonka käyttö tulee vielä lisääntymään entisestään. Alumiinin hyvien ominaisuuksien kuten keveyteen suhteutettuna hyvien lujuusominaisuuksien ja kierrätettävyyden vuoksi sen suosio myös autoteollisuuden raaka-aineena on kasvanut. Alumiini on suosittu materiaali varsinkin nopeasti yleistyvissä sähköautoissa. Kuitenkin alumiinin suosion kasvamisen vuoksi,

myös alumiinin valmistuksen takia syntyy yhä enemmän GHG-päästöjä. Alumiinin valmistuksesta johtuvien päästöjen odotetaan nelinkertaistuvan vuoteen 2050 mennessä ja sen oletetaan muodostavan suurimman osan täyssähköautojen valmistuksen hiilidioksidipäästöistä. Mikäli tämänhetkinen kehitys jatkuu, voi sähköautoihin käytettävän alumiinin hiilijalanjälki kasvaa jopa akustoihin tarvittavia metallejakin suuremmaksi. (Billy ja Müller, 2023)

Alumiini on teräksen ja raudan jälkeen maailmanlaajuisesti tuotetuin ja käytetyin metalli. Kuten teräksen ja raudan valmistus, myös alumiinin valmistus on erittäin energiaintensiivistä ja se aiheuttaa suuria määriä hiilidioksidipäästöjä. Vuonna 2018 alumiiniteollisuus aiheutti 2 % maailmanlaajuisista päästöistä. Terästeollisuuden tavoin, päästötavoitteiden saavuttamiseksi myös alumiiniteollisuudessa tulee pyrkiä hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen tai hiilineutraaliuteen. Jotta kansainvälisissä ilmastotavoitteissa pysyttäisiin, tulee alumiiniteollisuuden päästöjä vähentää 54 % vuoteen 2060 mennessä. (Yi et al, 2022)

Nykyajan teollisuudessa käytetyin alumiinin valmistusmenetelmä on Hall–Héroult-menetelmä. Tässä menetelmässä alumiinioksidi (Al_2O_3) pelkistetään korkeassa lämpötilassa alkuainealumiiniksi, joka yhdistetään kryoliittiliuokseen, johon on sulamispisteen laskemiseksi lisätty alumiinifluoridia. Tähän liuokseen upotetaan hiilianodeja ja johdetaan sähkövirtaa, jolloin hiilianodien reagoidessa liuoksen kanssa syntyy alumiinia. (Craig et al, 1997)

Myös alumiinin valmistamiseen on jo kehitteillä hiilineutraaleja vaihtoehtoja perinteisten keinojen tilalle. Vuonna 2018 brittiläis- australialainen kaivosyhtiö Rio Tinto yhteistyössä Alcoa, Applen ja Kanadan hallituksen aloitti ELYSIS-yrityksen, joka tutkii ja kehittää hiilineutraalin alumiinin mahdollista valmistusteknologiaa. Tällä ELYSIS-teknologialla on tarkoitus korvata alumiinin valmistuksessa käytettävät hiilianodit erilaisilla patentoiduilla materiaaleilla, jolloin kaikki suorat GHG-päästöt alumiinin valmistusprosessista eliminoituisivat ja hiilidioksidipäästöjen sijaan prosessi vapauttaisi ilmaan happea. ELYSIS-yhtiön mukaan, mikäli teknologia otettaisiin täysimittaisesti käyttöön edes Kanadassa, vähentäisi se päästöjä noin 7 miljoonaa tonnia, joka vastaa 1,8 miljoonan auton poistamista tieliikenteestä. Teknologian kehitysvaiheessa tuotettua

hiilineutraalia alumiinia on jo käytetty esimerkiksi Audin toimesta eTron GT:n vanteissa. Tämänhetkisen kehitysaikataulun mukaan ELYSIS-teknologia olisi valmis käytettäväksi vuonna 2024 ja suurempien alumiinimäärien valmistus olisi mahdollista vuonna 2026. (Rio Tinto, 2021)

3.3 Kumi

Auton valmistamiseen tarvitaan paljon kumia, renkaiden lisäksi myös erilaisiin tiivisteisiin autojen ovissa, ikkunoissa, sekä moottorissa. Kuitenkin suhteessa esimerkiksi metallien määrään autoissa, kumin määrä yhtä valmistettua autoa kohden on vähäinen.

Kumituotteet valmistetaan kumipuista kerättävästä lateksista, jota jalostetaan edelleen erilaisiksi kumeiksi, kuten esimerkiksi autojen renkaiksi. Kumipuuta viljellään suurimmaksi osaksi Kaakkois-Aasiassa suotuisan ilmaston vuoksi. Myös kumiteollisuutta tarkastellaan ympäristökysymysten suhteen. Kansainvälisillä markkinoilla myytävä kumi tulee olla kestävästi tuotettua. Kumin tuotannon kokonaishiilijalanjälkeä auttaa tasapainottamaan kumipuiden toiminta hiilinieluna. Kuitenkin esimerkiksi erilaisten lannoitteiden käytöstä aiheutuu huomattavia määriä GHG-päästöjä. Kumin tuotannossa päästöjä syntyy myös kumin jalostamiseen tarvittavasta energiasta ja esimerkiksi käytettävä sähkö ei useimmiten ole hiilineutraalisti tuotettua. Suuri osa kumituotannon päästöistä johtuu myös pitkistä toimitusketjuista ja kuljetuksesta. Näitä päästöjä on haastava vähentää, sillä kumipuiden viljeleminen esimerkiksi länsimaissa on suurimmaksi osaksi mahdotonta. Kumin tuotannon päästöjen minimoimiseksi on suunniteltu erilaisia toimenpiteitä, mutta niiden käyttöönotto on paikoin vielä jäljessä. (Dayaratne ja Gunawardana, 2015)

3.4 Lasi

Lasia autoissa käytetään ikkunoihin ja esimerkiksi valojen umpioihin. Myös lasiteollisuudessa on ryhdytty ilmastotoimiin ja päästöjä vähentäviin toimiin. Lasin hiilijalanjälkeä voidaan vähentää kierrättämällä, mutta kuitenkin vanhojen autojen ikkunoita ja tuulilaseja ei pystytä samalla tavalla tehokkaasti uusiokäyttämään kuin esimerkiksi pulloja.

Hiilidioksidipäästöjen lähteitä lasiteollisuudessa ovat korkean lämpötilan sulatuslaitteet ja sulatusprosessista syntyvät oheistuotteet. Sulatusuuneja käytetään usein vielä fossiilisilla polttoaineilla. Lasiteollisuuden päästöt ovat kuitenkin olleet jyrkässä laskussa jo 1960-luvulta asti. Kun uusia energiamuotoja sulatusuuneille kehitetään ja raakamateriaalien käyttöä vähennetään lisäämällä kierrätettyä lasia prosessiin, päästöt vähenevät entisestään. Tällä hetkellä lasiteollisuuden tavoite Euroopassa on muuttaa kaikki sulatusuunit sähköllä toimiviksi, sekä käyttää entistä enemmän kierrätettyä lasia tuotannossa. (Glass Alliance Europe, 2019)

3.5 Muovi

Autoihin käytetään myös paljon muovia, niin moottorissa, sisätiloissa kuin ulkopuolellakin. Muovit ovat halpoja, keveitä ja suhteellisen kestäviä materiaaleja, jonka vuoksi ne ovat suosittuja autoteollisuudessa monissa eri sovelluksissa. Monikäyttöisyytensä vuoksi muovit ovat todella yleisiä materiaaleja kaikilla yhteiskunnan sektoreilla.

Muovituotanto on kuitenkin riippuvaista fossiilisista polttoaineista, tuottaen päästöjä. Kuuselan et al (2021) artikkelissa tutkitaan, onko hiilipohjaisen polypropeenin (PP) valmistus mahdollista ilman GHG-päästöjä. Muovituotannon päästöongelmaan on kehitteillä lupaavia ratkaisuja, niin kutsuttuja ”power-to-X”-teknologioita. Näiden teknologioiden tarkoitus on hyödyntää hiiltä ilmakehästä ja muuttaa se metaaniksi tai metanoliksi, joita pystytään käyttämään raaka-aineina uusiutuvan muovin tuottamisessa. Tutkimuksen mukaan ainakin polypropeenin valmistus tällä teknologialla hiilineutraalisti on mahdollista ja se voisi vähentää muovin valmistuksen hiilijalanjälkeä huomattavasti. Lisää tutkimusta aiheesta kuitenkin tarvitaan prosessien käytännöllisyyden ja taloudellisuuden kannalta.

3.6 Elektroniset osat

Elektroniikan määrä henkilöautoissa on viime vuosina kasvanut huomattavasti. Siirtymä sähköautoihin on kovassa vauhdissa, sillä sen on huomattu olevan yksi tehokkaimpia tapoja hillitä tieliikenteen päästöjä. Kuitenkin sähköautojen akustojen ja myös

polttomoottoristen autojen elektronisten järjestelmien valmistamisesta syntyy huomattavia määriä hiilidioksidipäästöjä. (Xu et al, 2022)

Tutkimusten mukaan sähköautot ovat polttomoottoriautoja ympäristöystävällisempiä, mutta pitkällä ajanjaksolla tarkasteltuna akkujen valmistuksen ympäristövaikutukset ovat vielä epäselviä. Xu et al (2022) tutkivat artikkelissaan kahdeksan erityyppisen akun valmistusta ja arvioivat valmistuksen tulevaisuutta Yhdysvalloissa, Kiinassa ja Euroopan unionissa aikavälillä 2020–2050. Tulosten huomattiin vaihtelevan huomattavasti valmistusmaan mukaan, johtuen suurimmaksi osaksi uusiutuvan energian käyttöasteesta. Uusiutuvaa energiaa käytettiin suhteessa eniten Euroopan unionissa, jonka takia EU:n GHG-päästöt yhtä akuston kilowattituntia kohden olivat jopa 41 % matalammat kuin Kiinassa vuonna 2020. Suuri vaikutus oli myös erilaisilla akkutyypeillä. NCM/NCA-akkuihin tarvitaan energiaintensiivisesti valmistettuja metalleja kuten alumiinia, nikkeliä tai kobolttia, joten niiden valmistus aiheuttaa huomattavasti enemmän päästöjä. Tulevaisuuden ratkaisu voisi artikkelin mukaan olla esimerkiksi panostaminen akkuihin, joissa energiaintensiivisesti tuotettuja metalleja ei tarvita, kuten LFP-akut. Myös akkujen valmistukseen käytettävän energian alkuperä ja tuotanto tulee huomioida. Tällä hetkellä valtaosa akuista valmistetaan Kiinassa, mutta tutkimuksen mukaan Kiinassa käytettiin vertailukohteista suhteessa vähiten uusiutuvaa energiaa akkujen valmistukseen. (Xu et al, 2022)

Henkilöautoissa akkutyyppejä on käytössä useita, mutta uusissa sähköautoissa yleisimpiä ovat edellä mainitut NCM, NCA ja LFP-akut. Kaikilla akkutyypeillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. NCM-akut ovat yleisimpiä nykyisissä sähköautoissa. Näillä akkutyypeillä on hyvät käyttöominaisuudet, mutta niiden hiilijalanjälki on suuri niissä käytettyjen metallien takia. NCA-akut ovat harvinaisempia, niihin saadaan enemmän energiaa ja pidempi käyttöikä kuin NCM-akkuihin, mutta ympäristöystävällisyyden suhteen ne kohtaavat samoja ongelmia. LFP-akut ovat koko ajan yleistymässä ja niiden ennustetaankin paitsi vähentävän akkutuotannosta johtuvia GHG-päästöjä, myös laskemaan sähköautojen tuotantokustannuksia ja samalla niiden ostohintaa. (Man, 2022)

4 VARSINAINEN ELINKAARI

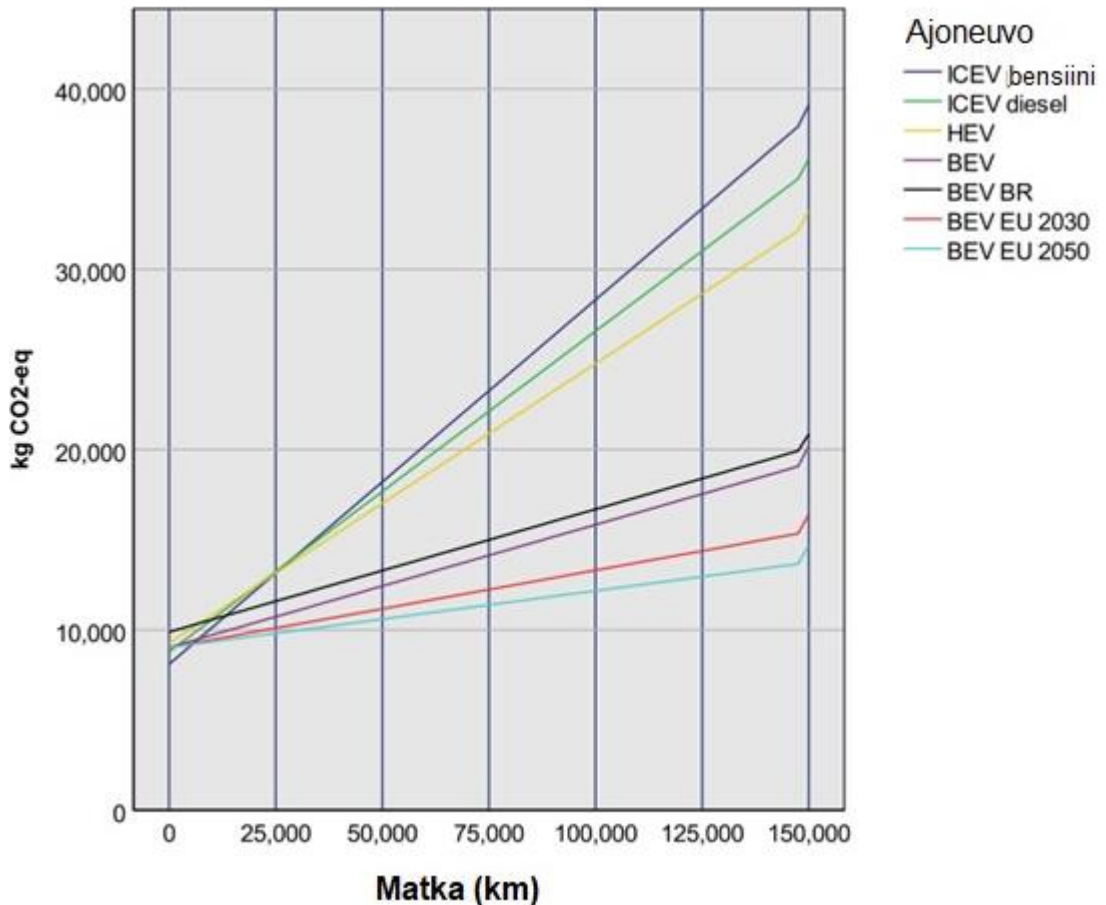
Seuraavissa kappaleissa tutkitaan autojen käytöstä johtuvia hiilidioksidipäästöjä ja niiden eroja eri energialähteiden välillä, käyttäen Naranjo et al (2021) artikkelia, sekä Volvo Cars (2020) suorittamaa tutkimusta. Naranjo et al. (2021) kirjoittamassa tutkimuksessa vertailtiin sähkö-, hybridi-, bensiini- ja dieselautoja Espanjan tieliikenteessä oletetulla 150 000 kilometrin elinkaarella. Sähkö- ja hybridautojen tapauksessa tutkimuksessa otettiin huomioon myös sähköntuotannon ympäristövaikutukset.

Tutkimuksen mukaan elinkaarensa aikana sähköautojen hiilidioksidipäästöt olivat jopa 48 % vastaavan perinteisen polttomoottoriauton hiilidioksidipäästöjä pienemmät. Kuitenkin sähköautot ja niiden valmistus tuottavat muita haitallisia pienhiukkasia polttomoottoriautoja enemmän. Päästöjä on tutkimuksen mukaan niin sanotusti siirretty auton käyttövaiheesta raaka-aineiden tuotantoon ja autojen valmistusvaiheeseen. (Naranjo et al, 2021)

Volvo Cars (2021) suorittamassa tutkimuksessa puolestaan vertailtiin lähes identtisten Volvo XC40-autojen hiilijalanjälkeä. Toinen autoista oli täyssähköauto, kun taas toinen oli perinteisellä bensiinimoottorilla varustettu.

4.1 Tutkimus 1

Naranjo et al (2021) tutkimuksen tuloksista nähdään bensiiniautojen aiheuttavan kaikista suurimmat päästöt 150 000 kilometrin aikana, dieselkäyttöisten autojen ja hybridautojen päästöt taas olivat hieman pienemmät. Selvästi pienemmät päästöt aiheutuivat kuitenkin sähköautojen käytöstä. Alla olevassa kuvassa (Kuva 2, Naranjo et al, 2021) on esitetty graafisesti eri käyttövoimien GHG-päästöt.



Kuva 2. Eri käyttövoimien GHG-päästöt. (Naranjo et al. 2021)

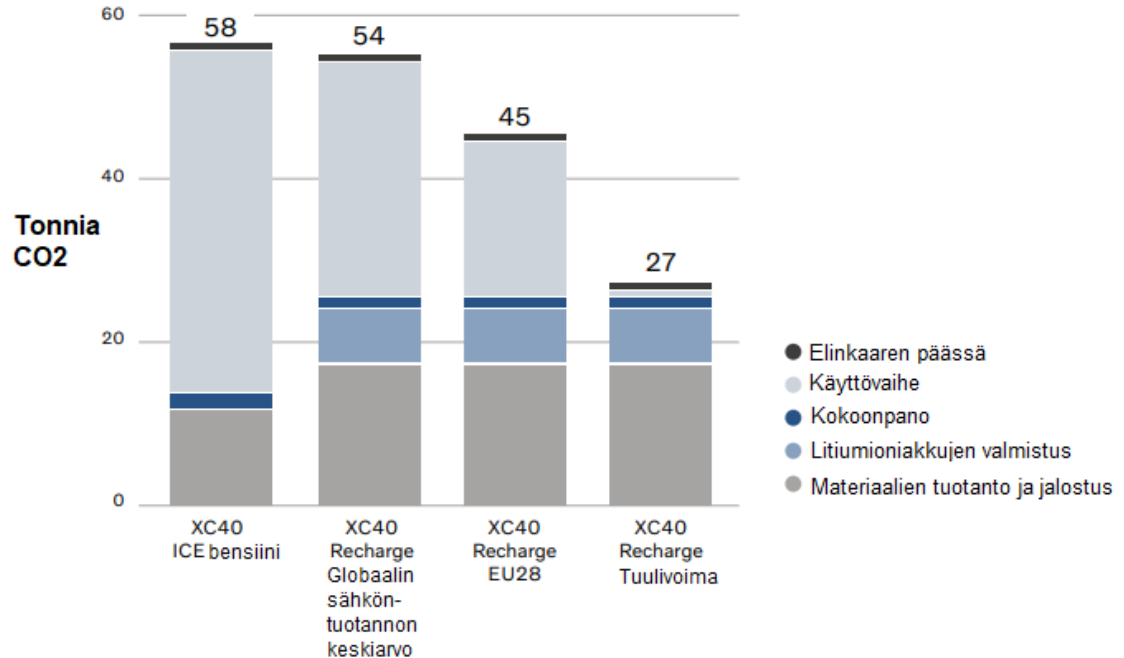
Kuvaajassa päästöiltään suurimpia vaihtoehtoja ovat bensiiniauto (ICEV bensiini), dieselauto (ICEV diesel) sekä hybridauto (HEV). Sähköauton (BEV) päästöt olivat huomattavasti alemmat.

Tutkimuksessa otettiin sähköauton lisäksi huomioon myös sähköauto, johon vaihdetaan akusto (BEV BR), sekä sähköautojen päästöt, mikäli niihin käytettäisiin vähemmän saastuttavaa sähköntuotantoa EU-tavoitteiden mukaisesti (BEV EU 2030 ja BEV EU 2050). Sähköautoista selvästi huonoiten suoriutui sähköauto, jossa akunvaihto oli otettu huomioon. Sähköautojen käytöstä aiheutuvia päästöjä voidaan kuitenkin huomattavasti laskea muuttamalla Euroopan sähköntuotantoa vihreämmäksi. (Naranjo et al, 2021)

4.2 Tutkimus 2

Volvo teki samantapaisen tutkimuksen vuonna 2020 omasta XC40-autostaan. Tutkimuksessa vertailtiin muuten täysin samanlaisen täyssähköauton ja bensiiniauton hiilijalanjälkeä. Tutkimuksessa otettiin huomioon valmistumisesta, logistiikasta ja käytöstä johtuvat päästöt ja tutkimuksessa auton elinkaareksi arvioitiin 200 000 kilometriä. (Volvo Cars, 2020)

Kuten aiemmin tarkastellussa tutkimuksessa, myös Volvon tutkimuksessa sähköauton aiheuttamia GHG-päästöjä vertailtiin erilaisissa skenaarioissa. Kuvassa alla (Kuva 3, Volvo Cars, 2020) autojen tuottamat päästöt 200 000 kilometrin aikana jaoteltuna osaluaisiin.



Kuva 3. Volvon XC40-tutkimuksen tulokset. (Volvo Cars, 2020)

Volvon tutkimuksessa sähköautojen päästöjä mallinnettiin kolmessa eri tapauksessa; maailmanlaajuisen sähköntuotannon keskiarvolla, EU28-maiden keskiarvolla sekä täysin

tuulivoimalla ladattuina. Verrokkina oli saman auton bensiiniversio. Päästöt jaettiin tutkimuksessa vielä eri osa-alueisiin; materiaalien tuotantoon ja jalostukseen, litiumioniakkujen valmistukseen, kokoonpanoon, käyttövaiheeseen sekä elinkaaren päähän. (Volvo Cars, 2020)

Volvon mukaan sähkökäyttöisen XC40 valmistus tuottaa jopa 70 % enemmän päästöjä kuin vastaavan bensiiniversion. Koska sähköautojen valmistaminen kuormittaa ympäristöä huomattavasti bensiiniauton valmistusta enemmän, tulee molemmilla autoilla ajaa tietty määrä kilometrejä ennen kuin sähköautosta tulee ekologisempi. Tähän päästöjen leikkauspisteeseen pääsemiseen vaadittava kilometrimäärä riippuu sähköauton lataukseen käytettävästä sähköntuotannosta. Jos sähköautoa ladattaisiin ainoastaan tuulivoimalla, olisivat sen valmistuksesta aiheutuneet päästöt bensiiniautoon verrattuna hyvitetty jo 47 000 kilometrin kohdalla. Toisaalta jos sähköntuotannossa käytetään globaalia keskiarvoa, joudutaan autolla ajamaan 146 000 kilometriä ennen kuin bensiiniauton päästöt ylittävät sähköauton päästöt. Näiden väliin asettuu EU28-maiden sähkötuotannon keskiarvo, jolla sähköauto on bensiiniautoon verrattuna kuitannut päästönsä 84 000 kilometrin kohdalla. (Volvo Cars, 2020)

Mikäli myös akuston elinkaari on vähintään 200 000 kilometriä, kaikilla vertailuilla sähköntuotantokeinoilla sähköauto tuottaa lopulta vähemmän päästöjä kuin vastaava bensiiniauto. Tutkimuksessa ei kuitenkaan oteta huomioon akuston vaihtoa, joka saattaisi muuttaa tilannetta, mikäli akusto jouduttaisiin vaihtamaan ennen 200 000 kilometriä.

4.3 Ekopolttoaineet (biokaasu ja bioetanoli)

Perinteisten fossiilisten polttoaineiden tilalle on pyritty kehittämään myös ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja, kuten biokaasu ja bioetanoli. Näitä ekopolttoaineita käyttäviä autoja Suomessakin on jonkin verran. Biokaasun ja -etanolin jakeluverkosto onkin kehittynyt ja kasvanut paljon viime vuosien aikana. Tässä kappaleessa tarkastellaan lähemmin näitä ekopolttoaineita ja niiden mahdollisia vaikutuksia liikenteen hiilidioksidipäästöihin ja niiden vähentämiseen.

CBG (compressed biomethane) -ja CNG (compressed natural gas) -kaasut ovat yleisimpiä tieliikenteessä polttoaineena käytettäviä kaasuja. Lisäksi joissakin raskaan liikenteen sovelluksissa on siirrytty käyttämään nesteytettyä LBG-kaasua (liquefied biomethane). CNG-kaasu on valmistettu fossiilisesti maakaasusta tuottamalla, kun taas CBG-kaasu on tuotettu uusiutuvasta biokaasusta. Yleisesti tieliikenteessä olevissa kaasuautoissa pystytään käyttämään sekä CBG- että CNG-kaasuja. Biokaasun raakamateriaalien helpon saatavuuden vuoksi sitä pystyttäisiin teoriassa valmistamaan jokaisessa maailman maassa. (Dahlgren S, 2020)

Biokaasua tuotetaan Suomessakin paikallisesti, esimerkiksi Oulun Ruskossa Gasum Oy:llä. Biohajoavia raaka-aineita biokaasulle kerätään noin 100 kilometrin säteeltä tuotantolaitoksista. Näitä raaka-aineita Gasumin tapauksessa ovat esimerkiksi kauppojen ja kotitalouksien biojätteet, jätevesilietteet, lanta ja teollisuuden orgaaniset sivuvirrat. Kaasun tuotannosta syntyy myös ravinnejäännöstä, jota voidaan hyödyntää lannoitteena. Suomessa suurin osa tuotetusta biokaasusta käytetään lämmitykseen, mutta noin 15 % käytetään polttoaineena tieliikenteessä. (Gasum, 2023)

Toinen yleisesti käytettävä biopolttoaine on bioetanoli (E85). E85-polttoaine sisältää noin 85 % etanolia ja 15 % bensiiniä. Polttoaineissa käytettävät etanolit sisältävät denaturointiaineita, jonka vuoksi todellinen etanolin määrä polttoaineessa voi vaihdella 70 % - 80 % välillä. Jotta henkilöautossa pystytään käyttämään E85-polttoainetta, täytyy autossa olla asennettuna muutossarja, joka mahdollistaa korkeaetanolisen polttoaineen käytön. Päästöjen väheneminen voi vaihdella huomattavasti riippuen E85-polttoainetta käyttävästä autosta. Kuitenkin keskimäärin päästöt vähenevät perinteiseen bensiiniautoon verrattuna siitä huolimatta, että etanolipohjaista polttoainetta kuluu noin 20 % - 30 % bensiiniä enemmän. (Yanowitz ja McCormick, 2009)

Suuri osa Suomessa käytetystä E85-polttoaineesta on St1-ketjun valmistamaa. St1 lupaa verkkosivuillaan heidän jättepohjaisen etanolinsa tuottavan jopa 90 % perinteisiä fossiilisia polttoaineita vähemmän päästöjä. St1 tuottaa Cellulonix-tekniologialla etanolia metsäteollisuuden jätteistä. Selluloosaetanolia tuotetaan esimerkiksi sahanpurusta. Toinen St1:n etanolin valmistusteknologia on Etanolix, jota hyödyntämällä pystytään

tärkkelys- ja sokeripitoiset jätteet, sekä sivuvirrat jalostamaan jopa 99,8 % etanoliksi. Suomessa on tällä hetkellä kolme St1:n Etanolix-biojalostamo. (St1, 2023)

Teoriassa nämä vaihtoehdot olisivat hyviä mahdollisuuksia hiilineutraalin auton polttoaineeksi. Nykyisen autokannan muuttaminen pääosin biopolttoaineilla kulkevaksi ei kuitenkaan tällä hetkellä ole kovin realistinen ajatus esimerkiksi biopolttoaineiden tuotannon vähyyden vuoksi. Tulevaisuudessa on kuitenkin mahdollista, että biopolttoaineet kilpailisivat esimerkiksi sähkön kanssa ekologisina vaihtoehtoina autojen käyttövoimaksi.

5 KIERRÄTYS JA UUSIOKÄYTTÖ

Autojen valmistuksesta ja käytöstä syntyviä päästöjä pystytään edelleen vähentämään ja kompensoimaan varsinaisen elinkaaren jälkeen materiaalien oikeanlaisella kierrätyksellä ja uusiokäytöllä. Jotkut autojen materiaalit ovat helpommin kierrätettävissä kuin toiset, mutta kierrätysteknologiat kehittyvät koko ajan. Mikäli auton valmistuksesta ja käytöstä itsessään ei saataisikaan täysin hiilineutraalia, voitaisiin materiaalien tehokkaalla kierrätyksellä ja uusiokäytöllä kompensoimalla auton elinkaari saada hiilineutraaliksi. Seuraavissa kappaleissa tutkitaan määrältään suurimpien käytöstä poistetuista autoista saatavien materiaalien kierrätettävyyttä ja uusiokäytön mahdollisuuksia.

5.1 Teräksen kierrätys, uusiokäyttö ja uudelleenvalmistus

Teräs on määrältään suurin yksittäinen käytöstä poistettujen autojen materiaali. Teräs on maailman kierrätetyin materiaali ja sitä voidaan kierrättää useita kertoja uudelleen ilman, että sen ominaisuudet kärsivät. Tätä kierrätettyä terästä voidaan käyttää esimerkiksi terästeollisuuden raaka-aineena rautamalmin korvikkeena tai jalostaa suoraan muiksi terästuotteiksi. (SSAB, 2023)

Keskimäärin yhdestä käytöstä poistetusta autosta saadaan noin 6–8 m² rakenneterästä suoraan metallinmuovaustarkoituksiin uusien tuotteiden valmistusta varten. Tämä sama määrä voidaan myös kierrättää tai käyttää uudelleenvalmistuksessa. Teräs on täysin kierrätettävää, joten tarkasti erottelemalla mahdollisimman paljon terästä kierrätykseen, uusiokäyttöön ja uudelleenvalmistukseen saadaan teräksen osuudesta auton elinkaaren loppuvaiheen hiilidioksidipäästöihin varsin vähäinen. (Abdullah, 2021)

Suomessa autojen teräsosat murskataan ja jaetaan kolmeen osaan. Magneettista terästä käytetään terästeollisuuden raaka-aineena, kevytjätettä hyödynnetään pääosin energiana ja muita metalleja jatkojalostetaan metalliteollisuuden raaka-aineiksi. Yhdestä romuautosta saadaan keskimäärin 740 kg terästä kierrätykseen. (Suomen Autokierrätys, 2023)

5.2 Alumiinin kierrätys ja uusiokäyttö

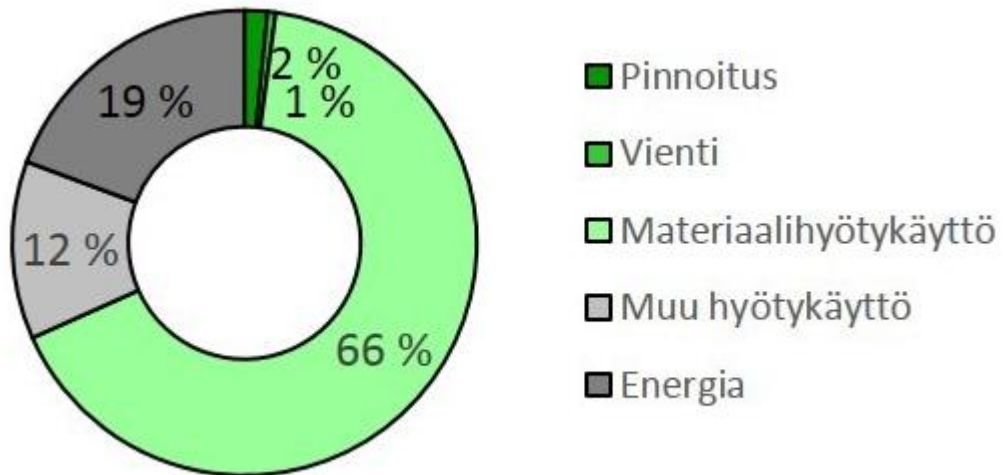
Kuten edellä jo alumiinin valmistusta käsittelevässä kappaleessa kerrottiin, alumiinin käyttö henkilöautoissa on sen hyvien ominaisuuksien vuoksi ollut kasvussa. Alumiinin kierrätysvaikeudet voivat kuitenkin nostaa omalta osaltaan auton kokonaispäästöjä. Kun henkilöautoissa käytetään enemmän useita materiaaleja sisältäviä seoksia, tulee näiden materiaalien kierrättäminen ja uusiokäyttö vaikeammaksi ja vaaditaan monimutkaisempia erotteluprosesseja. Nykyisillä autoteollisuuden ja autojen kierrätyksen toimintatavoilla alumiinijätteen määrä tulee kasvamaan, joten purkamisen ja erottelun metodeja tulee kehittää entisestään. Näitä tehokkaampia metodeja ei ole kuitenkaan tällä hetkellä käytössä tai kehityksessä laajalla skaalalla, sillä ne lisäävät huomattavasti kierrätysprosessin kustannuksia. Toinen ratkaisu ongelmaan on siirtyä käyttämään enemmän valettuja komponentteja ja vähemmän erilaisia seoksia. Mahdollisimman suurilla valetuilla osilla ja mahdollisesti standardisoiduilla seoksilla voitaisiin jätealumiinin erottelusta ja kierrätyksestä tehdä helpompaa, energiatehokkaampaa ja ekologisempaa. (Billy ja Müller, 2023)

5.3 Kumin kierrätys ja uusiokäyttö

Käytettyjen autonrenkaiden käsittelyä voidaan pitää maailmanlaajuisena ongelmana. Vielä 2000-luvun alkupuolella jäterenkaat pääsääntöisesti poltettiin, joka aiheutti suuret määrät GHG-päästöjä. Päästöjen määrä on kuitenkin laskenut jonkin verran viimeisen vuosikymmenen aikana. Jäterenkaiden kumia on alettu kasvavissa määrin kierrättämään esimerkiksi asfaltin raaka-aineeksi, jolloin sekä asfaltinvalmistuksen, että jätekumin käsittelyn päästöjä on pystytty vähentämään. (Wang et al, 2019)

Suomessa jäterenkaiden käsittelystä vastaa EU:n jätedirektiivien ja Suomen jätelakien mukaisesti Suomen Rengaskierrätys Oy. Jätelakien mukaan ensisijaisesti on pyrittävä estämään jätteen syntymistä, jolloin renkaat pyritään uusiokäyttämään, kierrättämään materiaalina tai hyödyntämään energiana. Käytettyjä rengasrunkoja pystytään pinnoittamaan uusiksi renkaiksi, esimerkiksi raskaan kaluston renkaat tyypillisesti

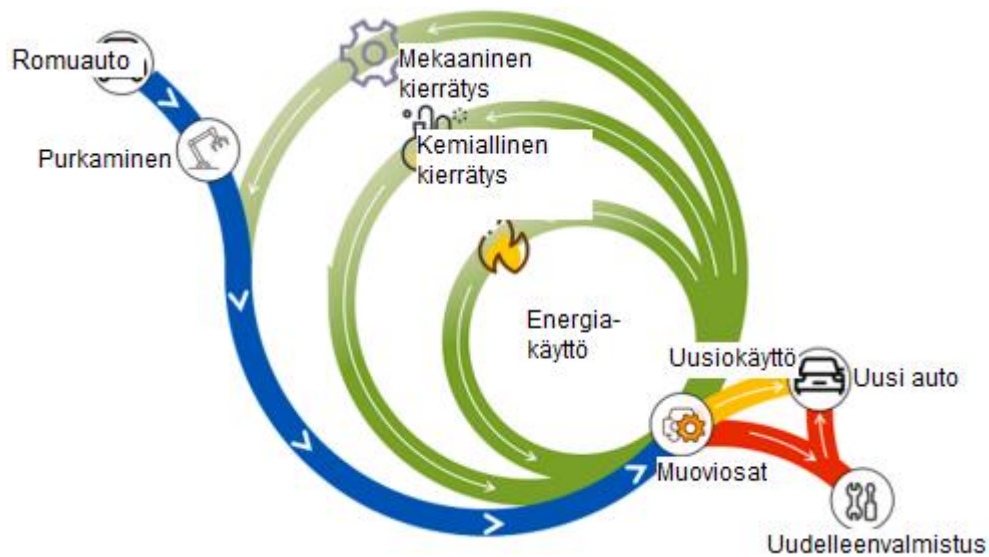
pinnoitetaan kaksi kertaa Suomessa. Suurin osa kierrätysrenkaista käytetään tie- ja maanrakennustarpeisiin. Kuvassa alla Suomessa käytöstä poistuneiden renkaiden hyötykäyttöjakauma vuodelta 2015. (Suomen Rengaskierrätys, 2023)



Kuva 4. Suomessa käytöstä poistettujen renkaiden hyötykäyttöjakauma. (Suomen Rengaskierrätys, 2023)

5.4 Muovin kierrätys ja uusiokäyttö

Muoveja valmistetaan vieläkin suurilta osin fossiilisesti, joten muovin kierrätys ja uusiokäyttö on hiilijalanjäljen ja hiilineutraaliuden tavoitteen takia todella tärkeää. Vuodesta toiseen muovien osuus autoissa on noussut muovien hyvien ominaisuuksien, kuten keveyden vuoksi. Muovijäte on huomattavasti vaikeampaa käsitellä ja kierrättää kuin metallit.



Kuva 5. Graafinen esitys muovin elinkaaresta ja kierrätystavoista. (Guo et al, 2022)

Pääsääntöisesti muovien kierrätykselle ja uusiokäytölle käytöstä poistuneilla autoilla on viisi eri tapaa: uusiokäyttö, jossa muoviosa asennetaan suoraan uuteen ajoneuvoon. Uudelleenvalmistus, jossa osaa korjataan tai muutetaan uuteen ajoneuvoon sopivaksi. Mekaaninen kierrätys, jossa muoviosa muotoillaan kokonaan erilaiseksi osaksi. Kemiallinen kierrätys, jossa muoviosa muutetaan monomeereiksi, joista voidaan valmistaa erilaisia kemikaaleja ja energiakäyttö, jossa muovijäte poltetaan energiantuotannossa. Tutkimusten mukaan mekaaninen kierrätys on paras ja järkevin metodi romuautoista syntyvälle muovijätteelle. Kuvassa yllä esitetty graafisesti muovin elinkaarta erilaisilla kierrätysmetodeilla. (Guo et al, 2022)

Varsinkin suurilla laadukkaista muoveista valmistetuilla autojen osilla, kuten puskureilla voitaisiin saavuttaa hyvä kierrätysaste. Näitä mekaanisen kierrätyksen metodeja tulisi kuitenkin kehittää myös erilaisilla muoveilla, jotta päästäisiin lähemmäs myös muiden teollisten muovien lähes täydellistä kierrätystä. (Guo et al, 2022)

5.5 Elektronisten osien kierrätys ja uusiokäyttö

Nykyautot sisältävät runsaasti elektronisia osia, jotka tulisi myös kierrättää hiilineutraaliuden saavuttamiseksi. Yksi suurimpia ongelmia varsinkin sähköautojen kierrätyksessä ovat suuret litiumioniakut. Litiumioniakuissa käytettäviä harvinaisia metalleja on olemassa rajallinen määrä, joten kierrätys on erittäin tärkeää sähköautojen tulevaisuuden kannalta. Litiumioniakuissa yleisimpien materiaalien grafiitin, litiumin ja koboltin tarpeen uskotaan kasvavan vuoteen 2050 mennessä jopa 383 %, 965 % ja 585 % vuoden 2021 tasosta. Litiumioniakkujen kierrätykseen kuitenkin on nykyään olemassa useita patentoituja ratkaisuja useilla eri yrityksillä, esimerkkinä suomalainen AkkuSer Oy. Suurinta osaa näistä metodeista on käytetty aiemmin esimerkiksi NiMH-akkujen kierrättämiseen, mutta toimintatapoja on muutettu sopiviksi Li-ion-akuille. (Martins et al, 2021)

Myös suomalainen Fortum Oyj on omalta osaltaan tutkinut litiumioniakkujen kierrätettävyyttä ja tiedottikin vuonna 2020 kehittäneensä uuden teknologian litiumin kierrätykseen. Fortum Oyj on ilmoittanut saavuttaneensa yli 80 % kierrätysasteen litiumioniakkujen hydrometallurgisessa kierrätysprosessissa ja pystyvänsä lisäksi kierrättämään akkujen sisältämän koboltin, nikkelin ja mangaanin. Fortum Oyj:llä on teollisessa mittakaavassa toimiva hydrometallurginen kierrätyslaitos Harjavallassa. (Fortum Oyj, 2020)

Uusia metodeja myös kehitetään koko ajan, jotta toimintaa saadaan tehokkaammaksi ja turvallisemmaksi. Tutkimusten mukaan akuissa käytettävien metallien kierrätys on ensiarvoisen tärkeää, mutta koko ajan kasvavan sähköautokannan vuoksi metallien louhiminen tulee olemaan tarpeellista vielä ainakin jonkin aikaa tulevaisuudessa. (Martins et al, 2021)

6 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön aiheena oli tutkia hiilineutraalin auton elinkaaren tavoittelua, siihen liittyviä ongelmia, mahdollisuuksia ja uusia innovaatioita. Lähteiden tutkimusten perusteella raaka-ainetuotannon hiilipäästöt laskevat nopeasti ja myös vaihtoehtoisilla käyttövoimilla vähennetään suuria määriä päästöjä. Kierrätysmenetelmät ovat nykyaikana tehokkaita ja suurimpina ongelmina romuautojen kierrätyksessä ovat enää muovit ja akustojen metallit. Hiilineutraalin auton elinkaaren tavoittaminen on teoreettisesti mahdollista ja tällä hetkellä myös käytännössä lähempänä kuin koskaan ennen

Tutkimusten valossa lupaavin vaihtoehto hiilineutraalin auton elinkaaren saavuttamisen kannalta on mahdollisimman puhtaasti tuotetuista materiaaleista valmistettu sähköauto, joka vielä käyttökänsä jälkeen kierrätetään mahdollisimman tehokkaasti. Vaikka hiilineutraali auton elinkaari ei olekaan vielä käytännössä mahdollinen, emme välttämättä ole enää monien vuosien päässä siitä. Jos muutamat keskeiset ongelmat kierrätykseen ja valmistukseen liittyen saadaan ratkaistua, voisimme jo suhteellisen pian käyttää tieliikenteessä hiilineutraaleja tai vähintään päästökompensoituja autoja.

LÄHDELUETTELO

Abdullah Z. 2021 Assessment of end-of-life vehicle recycling: Remanufacturing waste sheet metal into mesh sheet. PLoS ONE 16 (12)

American Chemical Society, 1997. Production of aluminum metal by electrochemistry [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/education/whatischemistry/landmarks/aluminumprocess/hall-process-aluminum-by-electrochemistry-commemorative-booklet.pdf> [viitattu 31.1.2023]

Billy, R., Müller D., 2023. Aluminium use in passenger cars poses systemic challenges for recycling and GHG emissions. Resources, Conservation and Recycling, 190

Cassia, R., Nocioni, M., Correa-Aragunde, N., & Lamattina, L. (2018). Climate Change and the Impact of Greenhouse Gases: CO₂ and NO, Friends and Foes of Plant Oxidative Stress. *Frontiers in plant science*, 9 (273).

Dahlgren S., 2022., Biogas-based fuels as renewable energy in the transport sector: an overview of the potential of using CBG, LBG and other vehicle fuels produced from biogas. *Biofuels*, 13 (5), s. 587–599.

Dayaratne S. P., Gunawardana K. D., 2015. Carbon footprint reduction: A critical study of rubber production in small and medium scale enterprises in Sri Lanka. *Journal of Cleaner Production*, 103, s. 87–103.

Euroopan parlamentti, 2019. Autojen hiilidioksidipäästöt: tietoja ja tilastoja. [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20190313STO31218/autojen-hiilidioksidipaastot-tietoa-ja-tilastoja> [viitattu 19.1.2023]

Euroopan Parlamentti, 2022. What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050? [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190926STO62270/what-is-carbon-neutrality-and-how-can-it-be-achieved-by-2050> [viitattu 19.1.2023]

Fortum Oyj, 2020. Fortumin uusi kierrätysteknologia mahdollistaa litiumin talteenoton ja parantaa sähköautoilun kestävyyttä [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/media/2020/11/fortumin-uusi-kierratysteknologia-mahdollistaa-litiumin-talteenoton-ja-parantaa-sahkoautoilun-kestavyytta> [viitattu 17.3.2023]

Gasum Oy, 2023. Biokaasu osana kiertotaloutta [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/> [viitattu 13.3.2023]

Gerres T., Lehne J., Mete G., Schenk S., & Swalec C. (2021). Green steel production: How G7 countries can help change the global landscape [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.industrytransition.org/insights/g7-green-steel-production/> [viitattu 23.1.2023]

Glass Alliance Europe, 2021. The European glass sector contribution to a climate neutral economy [verkkodokumentti] Saatavissa: https://www.glassallianceeurope.eu/images/para/2021-05-05-gae-position-paper-on-decarbonisation-v2_file.pdf [viitattu 26.1.2023]

Guo W., Li K., Fang Z., Feng T. & Shi T. 2022 A sustainable recycling process for end-of-life vehicle plastics: A case study on waste bumpers. *Waste Management* 154, s. 187–198

Heikinmatti A., (2023). Jos terästeollisuus olisi maa, sen hiilijalanjälki olisi maailman kolmanneksi suurin – tässä kolme syytä, miksi terästehtaat muuttuvat vihreämmiksi [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://yle.fi/a/74-20011478> [viitattu 23.1.2023]

Kuusela K., Uusitalo V., Ahola J., & Levänen J., 2021 The transformation of plastics production from net positive greenhouse gas emissions to net negative: An environmental

sustainability assessment of CO₂-based polypropylene. *Journal of CO₂ Utilization*, 52 (101672)

Martins L., Guimarães L., Botelho A., Tenório J. & Espinosa D. 2021. Electric car battery: An overview on global demand, recycling and future approaches towards sustainability. *Journal of Environmental Management* 295 (113091)

Naranjo G., Bolonio D., Ortega M., & García-Martínez., Comparative life cycle assessment of conventional, electric and hybrid passenger vehicles in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 291 (125883)

Pei, M., Petäjämäki, M., Regnell, A., & Wijk, O., (2020). Toward a Fossil Free Future with HYBRIT: Development of Iron and Steelmaking Technology in Sweden and Finland. *Metals*, 10 (972)

Rio Tinto, 2021. Carbon free aluminium smelting a step closer: ELYSIS advances commercial demonstration and operates at industrial scale [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.riotinto.com/en/news/releases/2021/carbon-free-aluminium-smelting-a-step-closer-elysis-advances-commercial-demonstration-and-operates-at-industrial-scale> [viitattu 25.1.2023]

SSAB, 2023. Fossiilivapaan teräksen aikataulu [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ssab.com/fi-fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/fossiilivapaissa-teraksissa/aikataulu> [viitattu 23.1.2023]

SSAB, 2023. Maailman ensimmäinen fossiilivapaasta teräksestä valmistettu ajoneuvo tuo tulevaisuuden lähemmäs [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ssab.com/fi-fi/fossiilivapaa/the-future-is-here-the-worlds-first-vehicle-made-with-fossil-free-steel> [viitattu 23.1.2023]

SSAB, 2023. Teräksen elinkaari [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ssab.com/fi-fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/alueet/teraksen-elinkaari> [viitattu 17.3.2023]

St1, 2023. Edistyneitä polttoaineita jätteistä [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.st1.com/fi/st1-lyhyesti/tietoa-yrityksesta/liiketoiminta-alueet/edistyneita-polttonesteita-jatteista> [viitattu 13.3.2023]

Suomen Autokierrätys, 2023. Romuajoneuvojen kierrätys [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://autokierratys.fi/tietoa-auton-kierratyksesta/kierratysjarjestelma/romuajoneuvojen-kierratys/> [viitattu 17.3.2023]

Suomen Rengaskierrätys, 2023. Monipuolista hyödyntämistä [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.rengaskierratys.com/nain_rengas_kiertaa/hyotykyttotavat [viitattu 17.3.2023]

Volvo Cars, 2020. Carbon footprint report: Battery electric XC40 Recharge and the XC40 ICE [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.volvocars.com/images/v-/media/applications/pdpspecificationpage/my24/xc40-electric/pdp/volvo-cars-LCA-report-xc40.pdf> [viitattu 28.2.2023]

Wang Q., Wang N., Tseng M., Huang Y., & Li N. 2020 Waste tire recycling assessment: Road application potential and carbon emissions reduction analysis of crumb rubber modified asphalt in China. *Journal of Cleaner Production*, 249 (119411)

Xu C., Steubing S., Hu M., Harpprecht C., van der Meide M., & Tukker A., Future greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion battery cell production. *Resources, Conservation and Recycling*, 187 (106606)

Yanowitz J., McCormick R., 2009. Effect of E85 on tailpipe emissions from light duty vehicles. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 59 (2), s.172–182

Yi, X., Lu, Y., He G., Li H., Chen C., & Cui H., 2022. Global carbon transfer and emissions of aluminum production and consumption. *Journal of Cleaner Production*, 362 (132513)

Zhao F., Liu X., Zhang H., & Liu Z. 2022. Automobile Industry under China's Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals: Challenges, Opportunities, and Coping Strategies. *Journal of Advanced Transportation*, 2022 (5834707).