

Usporedna analiza ugljičnog otiska električnog i konvencionalnog vozila

Grbin, Donat

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:150751>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Donat Grbin

Zagreb, godina 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Mihael Cipek, dipl. ing.

Student:

Donat Grbin

Zagreb, godina 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija uz korištenje navedene literature.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Mihael Cipek, dipl. ing. na pomoći te mentorstvu pri izradi ovog rada.

Također, zahvaljujem se čitavoj obitelji na podršci te svima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

Donat Grbin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Donat Grbin**

JMBAG: **0035232532**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedna analiza ugljičnog otiska električnog i konvencionalnog vozila**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparative analysis of the carbon footprint of electric and conventional vehicle**

Opis zadatka:

Električni i hibridni pogoni trenutno se smatraju ekološki prihvatljivom tehnologijom u automobilskoj industriji. Električni pogoni su učinkovitiji od konvencionalnih koji koriste motore s unutarnjim izgaranjem, a potpuno elektrificirana vozila ne proizvode ispušne plinove. S druge strane, električna vozila zahtijevaju komponente izrađene od specifičnih materijala što često rezultira dodatnim ugljičnim emisijama pri njihovoj proizvodnji u usporedbi s konvencionalnim vozilima. Stoga ovaj rad analizira koliki je ugljični otisak proizvodnje, korištenja i recikliranja prosječnog električnog naspram konvencionalnog automobila. U radu je potrebno:

- Opisati problem definiranja ugljičnog otiska.
- Predložiti metodu za određivanje ugljičnog otiska.
- Odabrati električno i konvencionalno vozilo sličnih karakteristika.
- Provesti analizu ugljičnog otiska za odabrano električno i konvencionalno vozilo.
- Na temelju rezultata analize dati zaključak.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

24. 4. 2024.

Zadatak zadao:

doc. dr. sc. Mihael Cipek

Datum predaje rada:

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Predsjednik Povjerenštva:

prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1. UVOD.....	1
2. DEFINIRANJE POJMA UGLJIČNOG OTISKA.....	4
2.1. Međunarodni protokoli.....	6
3. UGLJIČNI OTISAK ELEKTRIČNIH I KONVENCIONALNIH AUTOMOBILA	8
3.1. Rad električnih i konvencionalnih automobila	9
3.2. Proizvodnja	11
3.2.1. Materijali	13
3.2.2. Proizvodnja baterije	16
3.3. Korištenje vozila	20
3.4. Recikliranje i odlaganje	22
4. METODOLOGIJA KVANTITATIVNE ANALIZE	25
4.1. Odabir električnog i konvencionalnog automobila.....	26
5. KOMPARATIVNA ANALIZA UGLJIČNOG OTISKA.....	27
5.1. Proizvodnja automobila	27
5.2. Korištenje automobila.....	28
5.3. Recikliranje automobila.....	29
5.4. Rezultati analize.....	30
6. DISKUSIJA.....	32
7. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA.....	35

POPIS SLIKA

Slika 1 Postotci emisija CO ₂ pomoću izgaranja fosilnih goriva različitih sektora	2
Slika 2 Pregled nastanka ugljičnog otiska tijekom životnog ciklusa električnog automobila...	9
Slika 3 Rad četverotaktnog motora s unutarnjim izgaranjem	10
Slika 4 Dijelovi električnog automobila Tesla Model 3	11
Slika 5 Komponente električnih i konvencionalnih automobila : specifični dijelovi za MSUI vozilo (Crveno), specifični dijelovi za BEV (Plavo) te zajednički dijelovi (Crno).....	12
Slika 6 Građa litij-ionske ćelije.....	18
Slika 7 Ugljični otisak tijekom korištenja Toyota Corolla Sedan i Tesla Model 3 ovisno o području korištenja.....	29
Slika 8 Prikaz najgoreg scenarija ugljičnog otiska	31
Slika 9 Prikaz najboljeg scenarija ugljičnog otiska	31

POPIS TABLICA

Tablica 1 Pregled ugljičnog otiska proizvodnje električne energije najvećih težišta EV-a 2019.-te godine	19
Tablica 2 Specifikacije automobila Tesla Model 3 (AWD)	26
Tablica 3 Specifikacije automobila Toyota Corolla Sedan Terra	27
Tablica 4 Ugljični otisak proizvodnje automobila	28

POPIS OZNAKA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
EV	/	Električno vozilo
MSUI	/	Motor s unutarnjim izgaranjem
KS	/	Konjske snage
BEV	/	Električno vozilo napajano baterijom

SAŽETAK

Ovaj rad bavi se obradom danas vrlo aktualnog problema utjecaja automobilske industrije i transportnog sektora na okoliš, točnije utjecaja električnih naspram konvencionalnih automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem (MSUI). Predstavljena je analiza ugljičnog otiska proizvodnje, korištenja kao i recikliranja prosječnog električnog naspram konvencionalnog automobila. Analiza ugljičnog otiska električnih vozila fokusirana je na emisije povezane s proizvodnjom litij-ionskih baterija, njihovim recikliranjem te energijom potrebnom za punjenje s posebnim naglaskom na ugljični otisak procesa dobivanja električne energije elektroenergetskih mreža. S druge strane analiza vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem bazirana je na emisijama izgaranja goriva kao i proizvodnje ovakvih automobila.

Ključne riječi: ugljični otisak, električna vozila (EV), staklenički plinovi, konvencionalni automobili.

SUMMARY

This paper addresses the highly relevant issue of the impact of the automotive industry and the transport sector on the environment, specifically the impact of electric versus conventional internal combustion engine (ICE) vehicles. It presents an analysis of the carbon footprint of the production, use, and recycling of an average electric versus conventional vehicle. The carbon footprint analysis of electric vehicles focuses on emissions related to the production of lithium-ion batteries, their recycling, and the energy required for charging, with a special emphasis on the carbon footprint of electricity generation processes in power grids. On the other hand, the analysis of internal combustion engine vehicles is based on fuel combustion emissions as well as the production of these vehicles.

Key words: carbon footprint, electric vehicles (EV), greenhouse gases, conventional cars.

1. UVOD

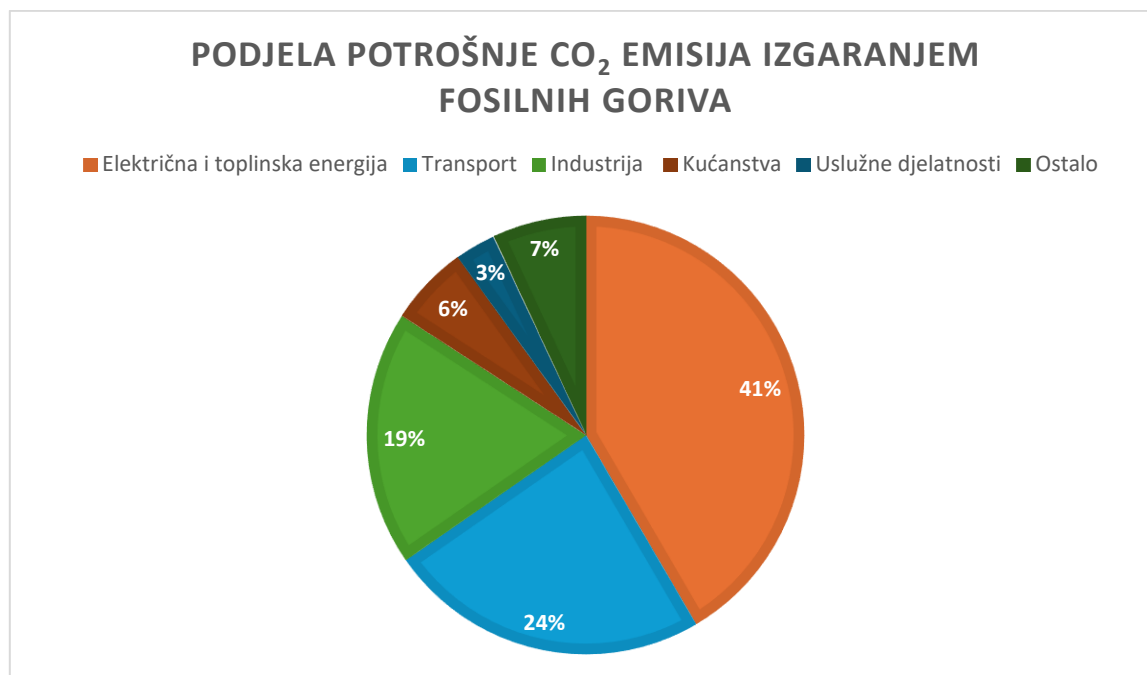
Od prve industrijske revolucije pa sve do danas potrošnja energije kao i emisije štetnih plinova neprestano i ubrzano rastu iz dana u dan. Stručnjaci kao i brojne organizacije za zaštitu okoliša neumorno apeliraju na organizacije, industrije te i same pojedince da je potrebno smanjiti utjecaj ljudskog djelovanja kako bi se sačuvao okoliš. Negativan ljudski utjecaj je najvjerodostojnije prikazati mjerom ugljičnog otiska koji pokazuje ukupne količine emisija stakleničkih plinova koje nastaju direktno ili kao nusprodukt djelovanja pojedinca, organizacije ili nekog procesa.

Razvojem tehnologije proces globalizacije naišao je na skokovit porast u 21.-om stoljeću posebice kada ga spominjemo u kontekstu potrošnje energije. Uz samu globalizaciju vežemo i proces industrijalizacije koji omogućava masovnu proizvodnju što sa sobom veže i rast emisija CO₂ te ostalih stakleničkih plinova. Eksponencijalnim rastom industrijalizacije i globalizacije stvaraju se ogromni ugljični otisci koji rezultiraju problemima kao što su globalno zatopljenje i iscrpljivanje prirodnih resursa. Od 1990-e do 2020-e zagrijavanje Zemljine površine prouzrokovano stakleničkim plinovima od strane ljudskog djelovanja povećalo se za zastrašujućih 45 % [1].

Jedna od vodećih industrija koja prouzrokuje veliki ugljični otisak jest automobilska industrija te s njom povezan transportni sektor. Od dobivanja sirovina potrebnih za proizvodnju, korištenja pa sve do postupka odlaganja i recikliranja automobila stvara se izrazito velik ugljični otisak posebice kada se nalazimo u dobu intenzivne globalizacije kada ljudska populacija sve više ovisi o transportnom sektoru te fosilnim gorivima.

U današnje vrijeme je, zbog već prije spomenute globalizacije, sve više proizvoda pa tako i automobila u enormnim količinama dostupno široj populaciji ljudi. Samo u Europi, po podacima Eurostata za 2023. godinu, je broj registriranih automobila bio 253 milijuna što je porast od 7 % naspram 2018. godine [2]. Takva brojka se možda ne čini prevelika, ali potrebno je razumjeti da to znači da svaka treća osoba na kontinentu posjeduje registrirani automobil. No, Europa je tek treći kontinent po broju registriranih automobila dok primjerice SAD i Republika Kina pojedinačno posjeduju više registriranih automobila od cijele Europe s brojkama od 280 i 319 milijuna [3,4]. Već iz samih brojki može se dati zaključak kako se radi o izrazito velikoj industriji koja dovodi do značajne potrošnje energije koja iza sebe ostavlja veliki ugljični otisak. U 2017.-oj godini, prema podacima Međunarodne agencije za energiju,

čak 24 % sveukupnih emisija stakleničkih plinova bilo je proizvedeno u transportnom sektoru od čega je 74 % bilo prouzrokovano cestovnim transportom [15].



Slika 1 Postotci emisija CO₂ pomoću izgaranja fosilnih goriva različitih sektora

U protekla tri desetljeća emisije CO₂ u prometnom sektoru su porasle za 33,5 % u periodu između 1990. i 2019. godine prema podacima Europske agencije za okoliš [5]. Kako bi se riješio problem ogromnih emisija od strane prometnih vozila, kao i zavisnost ovakvog načina transporta o fosilnim gorivima, cijela automobilska industrija okreće se električnim vozilima za rješenje i budućnost transporta.

Laički rečeno, vozila s električnim pogonom ne ispuštaju štetne plinove koje bi konvencionalno vozilo s motorom s unutarnjim izgaranjem inače proizvodilo. Električni automobili koriste električnu energiju za napajanje pogona vozila, točnije elektromotora, što predstavlja puno efikasniji način korištenja energije sa stupnjem iskorištavanja od 90 % naspram 35 % kod MSUI. Sve to čini električne automobile veoma primamljivima, ali i oni imaju svoje nedostatke koji ih i dalje čine problematičnim sa stajališta ugljičnog otiska i korištenja. Naime, sama baterija električnog vozila koja je osnovna komponenta kod svakog električnog vozila se izrazito teško proizvodi s gledišta materijala koji su potrebni za proizvodnju. Također enorman problem jest i odlaganje te recikliranje takvih baterija jer su materijali unutar samih baterija izrazito štetni za okoliš. Još jednu poteškoću predstavlja i mali domet baterije te način punjenja, to jest način na koji se dobiva električna energija korištena za punjenje. Domet baterije odnosi se na udaljenost koju vozilo može prijeći s jednim potpunim punjenjem baterije.

Mijenjanjem globalnog voznog parka kojim dominiraju konvencionalni automobili s motorom s unutarnjim izgaranjem sa svojim električnim pandanom bi uvelike pomoglo u ograničavanju globalnog zatopljenja na 1,5-2 °C stupnja na godišnjoj razini. Taj cilj postavljen je Pariškim sporazumom u kojemu su sudjelovale brojne svjetske velesile ne bi li se pronašlo bolje i učinkovitije rješenje za korištenje Zemljinih resursa [6].

Uz sve prije spomenuto postavlja se pitanje koliki je zapravo ugljični otisak samih električnih vozila u odnosu na konvencionalne te jesu li pak stvarno bolji za okoliš kada ih uspoređujemo s njihovim prethodnicima. Stoga se ovaj završni rad bavi analizom ugljičnog otiska prilikom procesa proizvodnje pa sve do procesa odlaganja i recikliranja standardnog električnog automobila naspram konvencionalnog sa svrhom boljeg razumijevanja problema ugljičnog otiska u automobilskoj industriji i transportnom sektoru.

Konkretno, rad se sastoji od 6 dijelova. U prvom poglavlju definiran je pojam ugljičnog otiska u kontekstu životnog ciklusa električnog automobila. Spominju se međunarodni protokoli i konvencije koje se dotiču ugljičnog otiska transportnog sektora te automobilske industrije. Poslije toga pružen je kratak osvrt o osnovnim elementima električnih i konvencionalnih automobila kao i svi aspekti životnog ciklusa vozila u kontekstu ugljičnog otiska. Nakon sagledavanja kompletnog životnog ciklusa objašnjena je metodologija određivanja ugljičnog otiska pomoću koje se vrši detaljnija analiza i usporedba rezultata dobivenih u kasnijim poglavljima. U poglavlju nakon uspoređena su dva vozila sličnih karakteristika, bolje rečeno uspoređen je potpuno elektrificiran naspram konvencionalnog automobila u smislu količine ugljičnog otiska. Sljedeći dio ovog rada jest diskusija rezultata dobivenih analizom. Konačno, posljednje poglavlje je zaključak u kojem je dan osvrt na dobivene rezultate i cijelu analizu.

2. DEFINIRANJE POJMA UGLJIČNOG OTISKA

Iz dana u dan možemo svjedočiti rapidnim promjenama klimatskih uvjeta kao što su porast prosječne temperature Zemljine površine, podizanje morske razine kao rezultat topljenja ledenjaka te izrazito veliko zagađenje kompletnog okoliša. Sve navedeno se može prepisati porastu emisija, štetnih stakleničkih plinova posebice u posljednja dva stoljeća. Nužan preduvjet ovakvih štetnih pojava je upravo ljudsko djelovanje prouzrokovano industrijalizacijom te globalizacijom.

Staklenički plinovi su plinovi unutar Zemljine atmosfere koji su zaslužni za podizanje temperature Zemljine površine pa tako i za prije navedene klimatske promjene planete. Najznačajniji, to jest oni koji prouzrokuju najveće probleme, su ugljikov dioksid (CO_2), metan (CH_4), dušikov oksid (N_2O), te fluor (F) i plinovi na bazi fluora poput hidrofluorugljika (HFC) [7]. Često se spominje i vodena para kao staklenički plin u najvećoj količini, ali kako je količina vodenih para koje su nastale kao rezultat ljudskog djelovanja izrazito mala na globalnoj razini, ne može se smatrati štetnom u okviru ovakve analize.

Ono što ih pak čini stakleničkim te kao takvim i štetne jest to da ovi plinovi upijaju infracrveno zračenje prouzrokovano odbijanjem sunčeve svjetlosti, točnije zračenja, od Zemljine površine. Upijanjem zračenja zadržavaju toplinu koja bi se inače propustila izvan Zemljine atmosfere te tako stvaraju efekt staklenika. Efekt je dobio ime po stakleniku, odnosno instalaciji koja se koristi primarno u poljoprivredi kako bi se biljke uzgajale na dovoljno visokoj temperaturi bez unošenja dodatnog ultraljubičastog zračenja koje ne prolazi kroz staklo instalacije.

No sam proces efekta staklenika je nužan kako bi postojao život na Zemlji. Kada staklenički plinovi poput ugljikovog dioksida ne bi postojali unutar Zemljine atmosfere prosječna temperatura površine bi otpala za čak $33\text{ }^\circ\text{C}$ [8]. Problem stvara ljudsko djelovanje koje je pak u bliskoj prošlosti, predvođeno industrijalizacijom, prouzrokovalo velik porast u količini ovih plinova. Nagla potreba za energijom te Zemljinim resursima prouzrokovana globalizacijom diktira veliko zagađenje kao i emisije stakleničkih plinova.

Sama „šteta“ prouzročena emisijama objedinjuje se pod pojmom ugljičnog otiska. Ugljični otisak je mjera koja predstavlja količinu i utjecaj stakleničkih plinova, a posebice ugljikovog dioksida, koji se odvede u atmosferu i okoliš [9]. Najčešće se govori o količini koju neka aktivnost, proces ili pak neka organizacija plasira u okolinu. Pojam ugljičnog otiska proizlazi iz koncepta Švicarskog regionalnog prostornog uređivača Mathisa Wackernagela i Kanadskog

ekologa Williama Reesa Sveučilišta Britanske Kolumbije koji se naziva ekološki otisak [10]. Ekološki otisak je mjera koja uzima u obzir potrebe ljudi, grupa, industrija za prirodnim resursima točnije količinu kopnenih i morskih površina korištenih za takve potrebe te kolika je iskoristivost tih površina kada se govori o procesu dobivanja dobara.

Ovakve mjere su nastale kako bi se javnosti prikazala neodrživost i nejednakost u korištenju Zemljinih resursa između država, industrija i firmi.

Razlika između ugljičnog i ekološkog otiska jest u tome što ekološki otisak predstavlja ukupnu kopnenu i morsku površinu te posjede korištene od strane čovjeka kako bi zadovoljio svoje potrebe dok je ugljični otisak najčešće prikazan u količini ugljičnog dioksida i ostalih stakleničkih plinova ispuštenih u okoliš ljudskim djelovanjem. S vremenom je pojam ekološki otisak postao gotovo arhaičan zbog brojnih kritika na činjenicu da ne daje točnu percepciju o samom zagađenju. Najbolji primjer ovih kritika jest u tome da ako pratimo ekološki otisak kao indikator zagađenja dolazimo do potpuno krivog zaključka da su primjerice plantaže i tvornice masovnih proizvodnja zapravo bolje od manjih, održivih, načina proizvodnje jer zauzimaju znatno manju površinu s obzirom na količinu proizvedenih dobara. Međutim situacija je zapravo suprotna jer masovna proizvodnja, na primjer hrane, proizvodi puno veće zagađenje okoliša nego lokalni poljoprivrednici. Zbog svega rečenog pojam ugljični otisak je postao standardna mjera kada se priča o zagađenju i emisijama prouzrokovanih ljudskim djelovanjem.

Definicija ugljičnog otiska nailazi na brojne preinake unutar istraživačke zajednice. Mnogi smatraju da je najprigodniji prikaz pojma ugljičnog otiska preko proizvedene mase CO₂ u nekom periodu primjerice metričkih tona CO₂ (tCO₂) po godini, ali opširniji i često korišten prikaz je s pomoću CO₂ ekvivalenta (CO₂e). Kao što je i prije spomenuto CO₂ je stavljen u središte proučavanja kada se govori o stakleničkim plinovima premda i ostali staklenički plinovi u određenom kontekstu rade isto, a ponekad i više štete. Upravo iz toga je uvedena mjera CO₂e s pomoću koje se stavlja naglasak i na ostale prije navedene štetne stakleničke plinove. U kontekstu životnog ciklusa automobila koristi se mjera grama CO₂ ekvivalenta po prijeđenom kilometru (gCO₂e/km) koja je češća kod analize automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem dok se mjera gram CO₂ ekvivalenta po proizvedenom kilovat-satu (gCO₂e/kWh) energije koristi u slučaju istraživanja električnih automobila. Obje mjere predstavljaju koliko se grama CO₂e ispusti u određenom periodu, to jest nakon jednog kilometra i nakon kilovat-sata generirane električne energije.

Kako se u kontekstu provedene analize unutar ovog rada proučavaju emisije ispušnih plinova prilikom životnog ciklusa i proizvodnje automobila ugljični otisak je definiran s pomoću oba prikaza CO₂e i CO₂, ovisno o kakvoj analizi je riječ, kako bi se obuhvatio širi spektar plinova. Osim prije spomenutih stakleničkih plinova u mjeru ugljičnog otiska automobila pribrojani su plinovi kao što su brojni dušikovi oksidi (NO_x), ugljični monoksid (CO), sumporovi oksidi (SO_x) kao i ne izgoreni ugljikovodici (C_xH_y). Ovi plinovi se ispuštaju u okoliš preko ispušnih sustava konvencionalnih vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem te su kao takvi ključni pri analizi. Premda su udjeli ovih plinova mali u usporedbi s CO₂ njihov utjecaj je izrazito značajan u kontekstu globalnog zatopljenja.

2.1. Međunarodni protokoli

Kako bi se daljnja šteta prouzrokovana emisijama smanjila, brojne konvencije, mjere i protokoli provedeni su među državama u svrhu borbe za zaštitu okoliša.

Neki od važnijih u okviru analize životnog ciklusa automobila te transportnog i prometnog sektora su : Kyotski protokol, Pariški sporazum te Europski zeleni plan. Slijedi kratki pregled svake od njih.

Kyotski protokol je prihvaćen 11. prosinca 1997. godine na Trećoj Konferenciji stranaka Okvirne konvencije UN-a o promjeni klime (UNFCCC) koja se održala u Kyotu [11]. Cilj protokola jest da industrijalizirane države smanje emisije stakleničkih plinova za 5 % u razdoblju od 2008. do 2012.godine u odnosu na 1990.godinu. Ovisno o razvijenosti država ciljevi su se razlikovali od -8 % smanjenja do +10 % povećanja emisija. Kyotski protokol se bazira na činjenici da je s gledišta globalnog zatopljenja planete sasvim ne bitno gdje je geografski došlo do emisije ili gdje će doći do smanjenja istih. Protokol se odnosi na emisije stakleničkih plinova poput CO₂, CH₄, N₂O te plinova na bazi fluora (F). Uspostavljen je međunarodni sustav koji omogućava smanjivanje emisija uz minimalne troškove te ujedno dolazi do prijenosa tehnologija i financijskih sredstava s pomoću kojih bogatije države mogu pomoći siromašnijim sa svrhom postizanja manjih emisija. Predstavljale su se strategije optimiziranja transportnog sektora kao i poticanje razvijanja vozila s boljom potrošnjom energije točnije goriva. Problem ovog protokola je u tome što nije bio pravno obvezivan te ga brojne velesile poput SAD-a nisu poštivale. Bez obzira na to Kyotski protokol je od velike

važnosti zbog same činjenice da je prvi protokol u kojemu se počinje pričati o alarmantnim problemima globalnog zatopljenja.

No ipak najveći iskorak u borbi protiv problema globalnog zatopljenja je napravljen Pariškim sporazumom [12]. Pariški sporazum je potpisan na 21.zasjedanju Konferencije stranaka (COP21) Okvirne konvencije UN-a o promjeni klime (UNFCCC) u Parizu 2015.godine te je prvi pravno obvezujući ugovor o globalnim klimatskim promjenama. Kroz prošlost sporazumi i konvencije nisu bile od prevelikog značaja za globalni problem zagađivanja planete te se zato Pariški sporazum smatra početkom istinski „zelenih“ inicijativa u kojoj je nastala ideja Europskog zelenog plana, to jest dugoročne strategije Europske unije u borbi protiv povećavanja emisija stakleničkih plinova. Glavni cilj Pariškog sporazuma je zadržavanje porasta prosječne globalne temperature na razini koja je manja od 2°C na godišnjoj razini. Kako su zemlje i vlade koje su potpisale ugovor bile pravno obvezane da provode ovaj dogovor, brojne strategije smanjenja emisija su provedene u svrhu smanjenja emisija i klimatskih promjena. Kako je prometni sektor, a pogotovo kopneni, jedan od najvećih uzročnika prekomjernog ugljičnog otiska brojne države su se preko nacionalno utvrđenih doprinosa usredotočile na promoviranje električnih vozila ne bi li se smanjila ovisnost o fosilnim gorivima.

Među članicama Europske unije, pa tako i Hrvatske, provodi se i inicijativa Europskog zelenog plana s namjerom stvaranja prvog klimatski neutralnog gospodarstva do 2050.-te godine [13]. Pokrenuta je u prosincu 2019.-te godine s ciljem postizanja održivog ugljičnog otiska u sektorima prometa, proizvodnje energije kao i u različitim industrijama među kojima je i automobilska. U planu se navode potrebna ulaganja te dostupni financijski alati potrebni za osiguranje tranzicije ka ovom cilju. Do 2030.-e godine plan je smanjivanje ugljičnog otiska za minimalno 55 % u usporedbi s razinama 1990.-e godine. Kako je prometni sektor odgovoran za 25 % emisija stakleničkih plinova u EU provodi se proces smanjivanja ugljičnog otiska ovog sektora. Fokus se stavlja na promicanje električnih vozila te obnovljivih goriva poput biodizela i vodika. Razvijaju se infrastrukture za punjenje električnih vozila te se smanjuje ovisnost prometnog sektora o fosilnim gorivima.

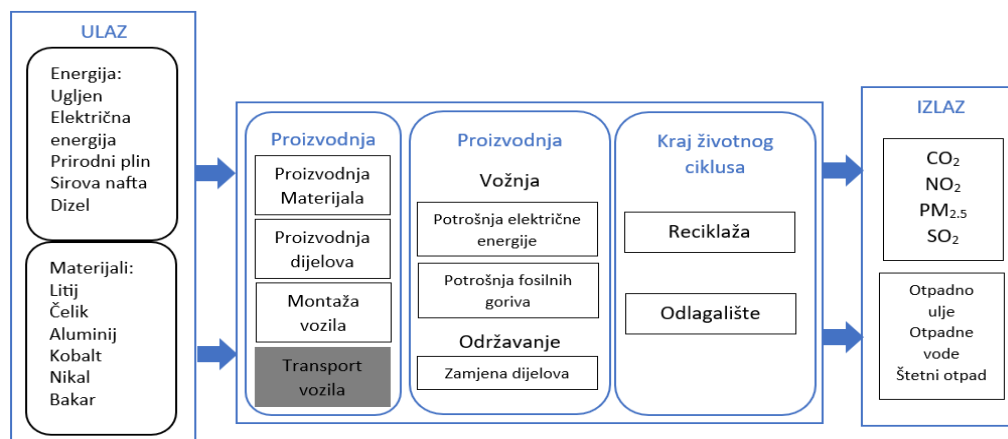
Detalji o gore navedenim konvencijama, sporazumima te protokolima neće se proučavati unutar ovog rada već je razlog njihovog kratkog pregleda istaknuti kako postoji i pravna regulativa na međunarodnoj razini koja obvezuje države potpisnice, a jedna od njih je i Hrvatska, na promjene. Napori zemalja potpisnica idu u smjeru smanjenja količina ugljičnog

otiska i globalnog zatopljenja te uvođenje principa „zagađivač plaća“. Pravne regulative su iznimno važne kako bi se sankcionirale prevelike i neispravne emisije stakleničkih plinova, ali i kako bi se pružila zaštita ugroženim teritorijima koji su zahvaćeni prekomjernim zagađenjem. Također, iznimno je bitno da se pravne regulative razvijaju i mijenjaju u skladu s ljudskim napretkom i novim tehnološkim zahtjevima.

3. UGLJIČNI OTISAK ELEKTRIČNIH I KONVENCIONALNIH AUTOMOBILA

Ugljični otisak automobila je izrazito kompleksan i širok pojam za obuhvatiti kada se uzme u obzir kompletna slika životnog ciklusa vozila. Bez obzira govori li se o konvencionalnim automobilima s motorom s unutarnjim izgaranjem goriva ili o električnim automobilima, ugljični otisak je značajan. Uključuje cjelokupni životni vijek automobila, od dobivanja sirovih materijala potrebnih za proizvodnju, korištenja automobila te samog odlaganja ili recikliranja automobila na samom kraju životnog ciklusa. Kada se promatraju razlike između ugljičnog otiska konvencionalnih naspram električnih automobila najveća razlika je u tome da električni automobili nemaju emisije iz ispušnih sustava te su iz tog aspekta znatno povoljniji za okoliš. Razlog zašto je provedena analiza unutar ovog rada jest to da električni automobili nadoknađuju manjak svojeg ugljičnog otiska ispušnih plinova u proizvodnji baterija te ostalih specifičnih dijelova koje je u uvjetima eksploatacije potrebno zamijeniti i reciklirati. Osim prije navedenoga, ugljični otisak električnih vozila jako je ovisan i o izvoru električne energije, to jest o načinu proizvodnje, radi li se o nuklearnoj elektrani, elektranama pogonjenim obnovljivim izvorima energije ili štetnim elektranama na fosilna goriva. Detalji vezani za ove stavke objašnjeni su u nadolazećim poglavljima.

Komparacija ugljičnog otiska između potpuno elektrificiranog i automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem vozila ograničena je na analizu proizvodnje, korištenja te recikliranja automobila. Čimbenici poput transporta dijelova, goriva kao i gotovih vozila nisu detaljno analizirani u okviru ovog rada već su samo spomenuti u globalnoj slici problematike ugljičnog otiska automobila. Dolje navedena slika prikazuje životni ciklus automobila u kontekstu nastanka ugljičnog otiska [45].



Slika 2 Pregled nastanka ugljičnog otiska tijekom životnog ciklusa automobila

PM_{2,5} (eng. Particulate matter) predstavlja sitne čestice ili kapljevine koje su prisutne u zraku te su izrazito štetne za okoliš i ljudsko zdravlje. Indeks 2,5 predstavlja njihov promjer u mikrometrima. Bitno ih je spomenuti jer je jedan od razloga njihovog nastanka izgaranje goriva potrebnog za rad konvencionalnih automobila.

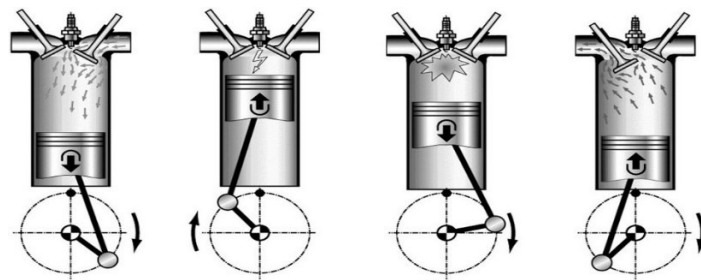
3.1. Rad električnih i konvencionalnih automobila

Kako bi se bolje razumjela problematika ugljičnog otiska električnih vozila u usporedbi s vozilima koji koriste motor s unutarnjim izgaranjem, pružen je kratak uvid u sam rad ovih vozila.

Kada se uspoređuju vozila s MSUI naspram EV najznačajnija razlika je u njihovom pogonskom sustavu. Konvencionalna vozila koriste motor s unutarnjim izgaranjem goriva za pogon. Takvi motori složeni su sustavi s mnogo pokretnih dijelova kao što su klipovi, cilindri, koljenasto i bregasto vratilo, ispušni i usisni ventili te remenja. Osim motora pogonski sustav se sastoji od prijenosnika i ispušnog sustava. Uloga prijenosnika, bio on automatski ili manualni, jest da kontrolira snagu motora koja će se prenijeti na kotače s pomoću sustava zupčanika i vratila.

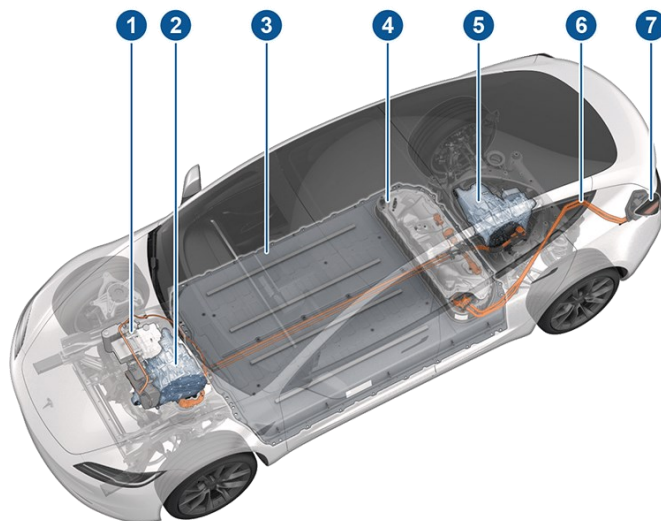
Motor s unutarnjim izgaranjem radi s pomoću sagorijevanja goriva unutar komora za izgaranje u koju se raspršuje mješavina goriva i zraka. Današnja industrija za izvor goriva koristi primarno benzin ili dizel zbog njihovih povoljnih kemijskih svojstava, to jest visoke gustoće energije koju pružaju ovakva goriva za rad. Princip rada ovakvih motora, bez obzira koristi li se benzin ili dizel kao gorivo, je gotovo isti. Klipovi unutar motora komprimiraju smjesu goriva i zraka pri čemu tlak toliko naraste da dolazi do spontanog izgaranja. Ovo je slučaj za dizel

motore, kod benzinskih motora sam pritisak stvoren od strane klipa nije dovoljan da bi se ostvarilo zapaljenje gorive smjese već je benzinskim motorima potrebna i svjećica koja stvara iskru koja zapali smjesu. Nakon komprimiranja i zapaljenja nastala energija i širenje plinova potiskuju klip u suprotnom smjeru. Klip je mehanizmom spojen s radilicom motora koja se s klipom pomiče, čime se ostvaruje cirkularno gibanje koje pokreće osovinu te u suštini i samo vozilo. Naravno, proces izgaranja stvara i nusprodukte u obliku ispušnih plinova. Ti plinovi se uklanjaju iz cilindra s pomoću ispušnih ventila koji ih prenose u ispušni sustav vozila koji ih odvode u okoliš kroz ispušnu cijev.



Slika 3 Rad četverotaktnog motora s unutarnjim izgaranjem [46]

S druge strane električno vozilo je znatno drugačije od vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem. Ovakva vozila koriste električnu energiju dobivenu iz punjive baterije za rad elektromotora koji zamjenjuje motor s unutarnjim izgaranjem. S pomoću elektroničkih upravljača i regulatora, elektromotor dobiva električnu energiju iz baterije kada vozač pritisne papučicu gasa čime se električna energija pretvara u mehaničku. Ovi dijelovi i sklopovlje električnog vozila zamjenjuju motor s unutarnjim izgaranjem, spremnik goriva, cjevovod za gorivo i ispušni sustav u tradicionalnom automobilu. Dok je motor s unutarnjim izgaranjem ključan za pogon tradicionalnog vozila, elektromotor, ili njih više, s punjivom baterijom su ključni članovi za rad električnih vozila. Naravno i konvencionalni automobili s motorom s unutarnjim izgaranjem također posjeduju bateriju, to jest akumulator, sa funkcijom početnog pokretanja motora te napajanja električnih komponenti. Baterije električnih vozila, za razliku od tradicionalnih automobilskih akumulatora, omogućuju konstantno napajanje potrebno za rad električnih vozila. Električna vozila su generalno jednostavnije izvedbe od konvencionalnih zbog manje pokretnih dijelova. Koriste jednostupanjski prijenos jer za razliku od motora s unutarnjim izgaranjem elektromotori proizvode okretni moment, koji je direktno povezan sa snagom preko brzine vrtnje elektromotora, u širokom rasponu pa složeni prijenosnici nisu potrebni. Kako elektromotoru nije potrebna energija sagorijevanja fosilnih goriva za pogon nema ni ispušnih plinova pa tako ni sustava odvođenja istih.



1. Sklop dizalice topline
2. Prednji motor
3. Visoko-naponska baterija
4. Ploča za pristup servisiranja visoko-naponskih komponenti
5. Stražnji motor
6. Visoko-naponski vodovi
7. Priključak za punjenje

Slika 4 Dijelovi električnog automobila Tesla Model 3 [47]

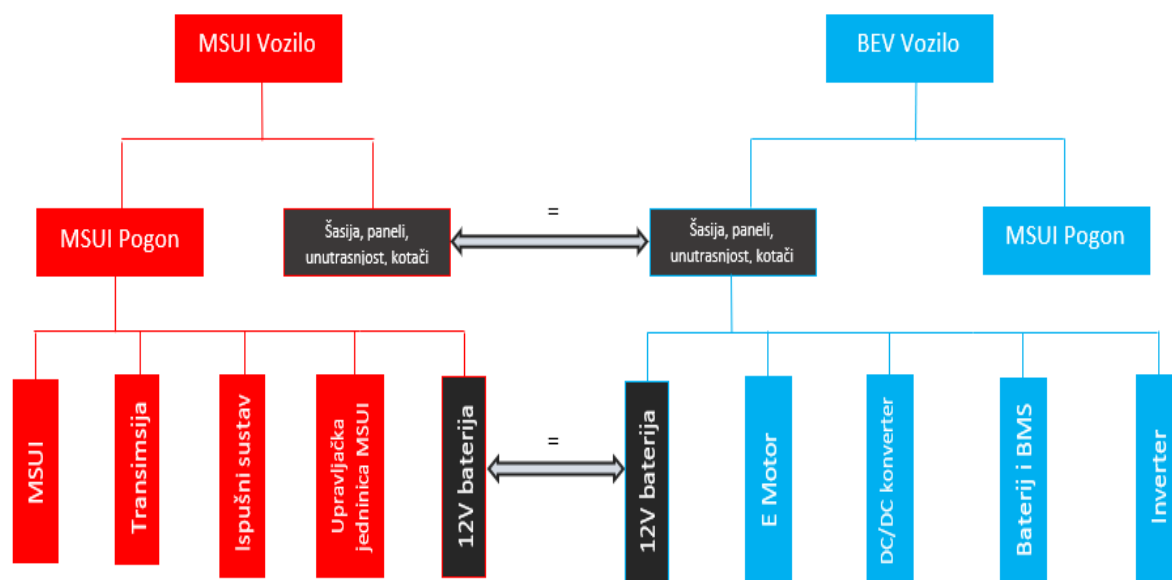
3.2. Proizvodnja

Proizvodnja električnih i konvencionalnih automobila je složen i energetska zahtjevan proces. U ovom poglavlju predstavljene su osnovne stavke i tijekom proizvodnje automobila od samih materijala potrebnih kod proizvodnje do transporta gotovih proizvoda.

Električni automobili dijele većinu dijelova s konvencionalnim automobilima s izuzetkom pogonskog sklopovlja. Tu se pak stvari, barem promatrajući ugljični otisak, znatno mijenjaju. Naime, glavni pogonski element električnog vozila je elektromotor, ili u nekim slučajevima više njih, koji zamjenjuje ulogu motora s unutarnjim izgaranjem. S inženjerske strane, kao i sa stajališta iskoristivosti energije, elektromotor je znatno učinkovitiji od svojeg pandana. Dok primjerice standardni benzinski ili dizel motor ima stupanj korisnosti od 35 % elektromotori imaju blizu 95 % kada rade u optimalnom području rada [14]. No kao što je i klasičnom motoru potrebno gorivo električnom automobilu je potrebna struja, točnije električna energija, koju dobiva iz punjive baterije. Baterija koja se koristi za pogon električnih vozila je komplicirana za izvesti kada se promatra sa stajališta materijala potrebnih za proizvodnju. Upravo je sama baterija te za nju vezano pogonsko sklopovlje jedina značajna razlika između proizvodnje konvencionalnih naspram električnih automobila gledano s aspekta ugljičnog otiska.

Postoje različite vrste baterija korištenih za proizvodnju električnih vozila. Baterije električnih automobila moraju imati sposobnost ponovnog punjenja, a najpopularnije u industriji su tri vrste: olovne baterije, niki-metal hibridne te litij-ionske baterije.

Olovne baterije su najjeftinije za proizvest uz visoki postotak mogućnosti recikliranja od 97 % [17] no pružaju slabe performanse i izlazne struje. S druge strane nikel-metal hibridne baterije pružaju puno veće performanse, ali su zato znatno skuplje za proizvodnju od olovnih te su štetnije za okoliš od litij-ionskih baterija. U automobilskoj industriji danas prevladavaju litij-ionske baterije koje su lakše, bolje gustoće snage, ali naravno i najskuplje za proizvest. U usporedbi s olovnim baterijama litij-ionske zadovoljavaju kriterije automobilske baterije svojom dugotrajnošću i težinom. Za usporedbu prosječan automobil pogonjen olovnim baterijama će potrajati 4 godine nakon čega se baterija mora zamijeniti dok litij-ionske baterije traju 10 godina prije zamjene [17]. To je upravo i glavni razlog zašto gotovo svi električni automobili koriste litij-ionske baterije. Zbog te činjenice se u okviru ove analize promatraju isključivo litij-ionske baterije.



Slika 5 Komponente električnih i konvencionalnih automobila : specifični dijelovi za MSUI vozilo (Crveno), specifični dijelovi za BEV (Plavo) te zajednički dijelovi (Crno) [48]

Sama proizvodnja automobila kako konvencionalnih tako i električnih se sastoji od nekoliko stavki : Izvlačenja sirovih materijala, rafiniranja i procesiranja sirovina, proizvodnje gotovih dijelova te montaže automobila. Dolje navedena pod poglavlja ulaze u detalje pojedinačnih stavki proizvodnje.

3.2.1. Materijali

Najčešće korišteni materijali prilikom proizvodnje automobila su metali poput čelika, aluminijski i bakra, nemetalni materijali poput različitih vrsta plastika i kompozita te posebice u modernije doba takozvani rijetki materijali poput litija, kobalta i nikla postaju neophodni prilikom proizvodnje automobila, to jest električnih komponenti i dijelova poput baterija i elektromotora. Razvoj materijala korištenih za proizvodnju automobila ide u smjeru korištenja što lakših, a relativno čvrstih materijala kako bi se smanjila sveukupna težina automobila. Masa vozila je izrazito bitna kod električnih automobila jer diktira kapacitet i veličinu baterije potrebne za pogon cijelog električnog automobila, jednostavno rečeno težem automobilu je potrebna i veća baterija koja sa sobom povlači i veći ugljični otisak te probleme prilikom recikliranja.

Naravno, ove materijale je potrebno „izvući“ iz Zemljine kore kao i rafinirati čime postaju prikladni za upotrebu, ali takvi postupci sa sobom povlače enormno velike količine potrošene energije potrebne za rudarenje i procesiranje izvučenih materijala. Ovakvi procesi su naravno popraćeni i velikim emisijama stakleničkih plinova ovisno o tome kakva vrsta energije je korištena te kako se dobiva, primjerice koriste li se fosilna goriva ili pak obnovljivi izvori energije. Proizvodnja električne energije proizvodi otprilike 1 kg CO₂/kWh proizvedene energije kada je tehnologija proizvodnje termoelektrana na ugljen, 0,50 kg CO₂/kWh u slučaju termoelektrane koja koristi prirodni plin za pogon te samo 0,1 kg CO₂/kWh za slučaj najefikasnije nuklearne elektrane [16]. Većina materijala je gotovo identična prilikom proizvodnje električnih naspram konvencionalnih automobila s izuzetkom materijala poput litija, kobalta, nikla i mangana koji se značajno više koriste u proizvodnji električnih automobila, to jest prilikom proizvodnje baterija električnih automobila.

Nastavno na sve prije rečeno, u centar analize su stavljeni upravo ti materijali koji predstavljaju bitnu razliku u metodologiji proizvodnje električnih naspram konvencionalnih automobila.

Ono što predstavlja najveći problem u proizvodnji električnih automobila jest baterija, točnije postupak dobivanja litija. Naime, litij kao element je osnovna komponenta u proizvodnji baterija, točnije katoda baterija no to je detaljnije pojašnjeno u kasnijim poglavljima, potrebnih za električne automobile te se kao takav često naziva „bijela nafta“. Litij, kao i fosilna goriva, je neobnovljiv, to jest njegove zalihe su konačne. Procjenjuje se da su trenutne rezerve litija 22-80 milijuna tona dok se čak 14 milijuna pronalazi u državama poput Kine, Čilea, Australije i Argentine. Ako proizvodnja električnih automobila nastavi sa svojim rastom, procjenjuje se

da će rezerve litija „presušiti“ do 2080.-e što je slična pojava kao i kod ostalih fosilnih goriva [17]. U grubo 14 milijuna tona litija se još uvijek nalazi na kopnenim površinama dok je čak 230 milijuna tona u morima. Litij na kopnu je primaran izvor koji se koristi za proizvodnju baterija. Najveće količine rezerva kopnenog litija se pronalaze u takozvanim slanim jezerima u Južnoj Americi dok se ostatak može pronaći u obliku minerala unutar stijena. Izvlačenje litija iz slanih jezera je vremenski zahtjevan proces koji koristi sunčevu svjetlost kako bi vodena masa isparila, sličan procesu dobivanja morske soli u solanama. Naravno nakon isparavanja ne dobiva se čisti litij već je slanu masu potrebno dalje obraditi s pomoću različitih kemijskih postupaka. Litij u slanim masama je sadržan u količinama od 2000-6000 mg/L. Problem kod ovakvog dobivanja litija jest u tome da postupak, ako želimo da je ekonomski isplativ, izrazito ovisi o energiji sunčeve svjetlosti. To znači da je postupak ovisan o geografskoj lokaciji slanih jezera, a osim toga takvi postupci prouzrokuju velike gubitke vode i vodenih površina. Za jednu metričku tonu litija potrebno je čak 2 000 000 litara vode. Rudarenje litija je naravno značajno teži postupak koji također zahtjeva velike količine vode te je izrazito ovisan o načinu proizvodnje potrebne električne energije s visokim ugljičnim otiscima. Kao i ostale operacije rudarenja izrazito je štetan za okoliš. Zagađenje zraka, vode, zemlje kao i devastiranje površine na kojoj bi se rudarenje obavljalo samo su neki od velikih problema protiv kojih se bore brojne organizacije za zaštitu okoliša, primjerice u Srbiji gdje se nalazi jedan od najvećih rudnika litija na svijetu često se povlače pitanja oko održivosti rudarenja i njegovog utjecaja na okoliš. Naizgled nepresušne količine litija sadržanog u moru nisu baš najjednostavnije za izvlačenje. Problem kod izvlačenja litija iz mora je u tome da su količine elementa izrazito razrijeđene, 0,1–0,2 mg/L, što bi značilo da su potrebne enormne količine energije kako bi se izolirao iz mora, a to je s današnjom tehnologijom ekološki i ekonomski ne isplativo. Ono što litij čini prikladnim i poželjnim za proizvodnju baterija jest to da je metal male gustoće čime omogućava pohranjivanje velikih količina energije naspram njegove mase.

No litij nije jedini materijal potreban za proizvodnju baterija. Ovisno o vrsti baterija materijali poput kobalta, nikla, aluminijske i grafita su od velike važnosti te su kao takvi izrazito poželjne sirovine. Kao i litij ovi materijali su ne obnovljivi te svaka država posjeduje svoje rezerve ovih sirovina. Rastom flote električnih vozila ovi materijali postaju od sve veće važnosti za automobilsku industriju te će u budućnosti njihovo dobivanje sa sobom povlačiti velike ugljične otiske [18]. Nikal koji je potreban za proizvodnju baterija je izrazito visoke kvalitete, 99,8 % zasićenosti, a otprilike 70 % se dobiva iz sulfidnih rudača lociranih u državama poput Rusije, Kine i Kanade. Osim sulfidnih rudača ostalih 30 % se dobiva iz takozvanog miješanog

hidroksidnog taloga. Dobivanje nikla putem rudarenja je također štetan za okoliš te energetski zahtjevan postupak. U procesu dobivanja nikla i dalje najveća potrošnja energije je u postupku samog rudarenja rudača gdje se najviše energije dobiva s pomoću prirodnih plinova i fosilnih goriva. Čak 56 % energije u operacijama rudarenja nikla dobiva se prirodnim plinovima, 12 % iz ugljena, a ostatak s pomoću električne energije. Slična pojava je i kod dobivanja kobalta koji se najčešće dobiva kao nusprodukt rudarenja nikla ili bakra. Kobalt visoke kvalitete potreban za proizvodnju baterija i elektronskih komponenti najčešće se pronalazi u obliku kobalt sulfata (CoSO_4). Najveći proizvođač kobalt sulfata je Kina, koja posjeduje 80 % proizvodnje, dok je ostatak proizveden poglavice u Finskoj. Samo rudarenje kobalta odvija se najvećim djelom u Demokratskoj Republici Kongo koja je odgovorna za čak 70 % izvučenog kobalta 2019.-e godine [18]. Mangan kao materijal korišten u različitim vrstama litij-ionskih baterija jedan je od najrasprostranjenijih materijala u Zemljinoj kori. Zbog njegovih povoljnih kemijskih svojstava više od 90 % proizvedenog mangana koristi se u proizvodnji čelika gdje ima ulogu rasplinjavanja taljevina, a pridonosi i tvrdoći te čvrstoći čelika. Mangan visoke kvalitete i čistoće koristi se u proizvodnji električnih baterija gdje pridonosi strukturalnoj stabilnosti te izdrživosti samih baterija. Najveća proizvodnja mangana vrši se u Južnoafričkoj Republici koja je odgovorna za 30 % svjetske proizvodnje, a ujedno posjeduje 80 % svjetskih rezervi. Države poput Australije, Brazila i Kine također su veliki proizvođači u kojima se nalaze najveći rudnici metala. Postupak dobivanja mangana je gotovo identičan prethodno navedenim materijalima. Mangan se dobiva iz Zemljine kore u obliku oksidne ili karbonatne rude. Oksidne rude su najveći izvor mangana radi činjenice da se rude nalaze relativno blizu površine čime predstavljaju jednostavniji i energetski manje zahtjevan proces. Karbonatne rude su pak na većim dubinama te zahtijevaju veće operacije rudarenja pa tako i veću potrošnju energije. Aluminijski se također koristi prilikom proizvodnje automobilskih baterija gdje su komponente poput pozitivnog ulaza baterijske ćelije i folija unutar njih u potpunosti izrađene od aluminijskih. Prije navedeni materijali koristili su se isključivo zbog povoljnih kemijskih svojstava vezanih za pohranu energije i električne vodljivosti, aluminijski se pak koristi i zbog svoje toplinske vodljivosti i relativno male mase te se kao takav koristi za kućišta, zaštitne omotače, same spremnike ćelija te toplinske obloge unutar istih. Proizvodnja aluminijskih se sastoji od dvije faze. Prva faza se sastoji od pretvorbe boksita izvučenog iz zemljine kore u glinicu, a zatim se u drugoj fazi preko postupaka taljenja glinica reducira u čisti aluminijski. Ovdje se značajnija potrošnja energije pojavljuje u drugoj fazi zbog tehnoloških potreba za što čistim aluminijskim prilikom proizvodnje različitih komponenti vezanih za proizvodnju baterija. Posljednji materijal koji je vrijedno spomenuti u kontekstu ugljičnog otiska prilikom proizvodnje baterija

jest grafit. Naime, grafit se koristi u proizvodnji električnih automobila kao materijal anode u gotovo svim litij-ionskim baterijama. Postoje dvije vrste grafita koje se koriste u proizvodnji anoda baterija, a to su prirodni i sintetički grafit. Prirodni grafit se dobiva direktno iz rudnika te kao takav ne zahtijeva značajne količine energije za prerađivanje, u većini slučajeva potrebno je samo mljevenje i kemijsko pročišćavanje rudača kako bi se dobio grafit dovoljne čistoće. S druge strane sintetički grafit zapravo je naftni koks koji se obrađuje na visokim temperaturama od 2500°C te je izrazito energetski zahtjevan. Naftni koks se dobiva kao nusprodukt prerade nafte koja već sama prouzrokuje ugljični otisak prilikom izvlačenja i rafiniranja nafte. Vrsta grafita korištenog za anode baterija u velikoj količini diktira ugljični otisak koji nastaje prilikom proizvodnje baterija jer čak 10-20 % sveukupne mase baterije su upravo grafitne anode [19].

Kako potražnja za električnim vozilima raste, cijela automobilska industrija i proizvođači materijala su sve više usredotočeni na poboljšanje učinkovitosti u proizvodnji materijala, smanjivanje utjecaja na okoliš i poboljšanje procesa recikliranja kako bi stvorili održivije tehnologije baterija.

3.2.2. Proizvodnja baterije

Nakon prethodne faze dolazi do proizvodnje dijelova potrebnih za montažu automobila kao proizvoda. Kao što je rečeno na početku poglavlja većina dijelova u konvencionalnim i električnim automobilima dijele neke sličnosti. Primjerice proizvodnja šasije, interijera i elektronike, prijenosnika, kočnica te ovjesa je gotovo identična kod električnih naspram standardnih automobila. Najveća razlika između ove dvije vrste automobila jest pak u prije spomenutom pogonskom sklopovlju, točnije razlika između proizvodnje baterije naspram motora s unutarnjim izgaranjem. Proizvodnja elektromotora potrebnog za pogon električnih automobila kao i MSUI ne razmatra se detaljno unutar ovog rada zbog toga što je ugljični otisak njihove proizvodnje niskog značaja kada ih uspoređujemo s proizvodnjom baterije.

Stoga je u okviru proizvodnje dijelova potrebnih za rad električnog naspram konvencionalnih automobila fokus stavljen na postupak proizvodnje litij-ionskih baterija.

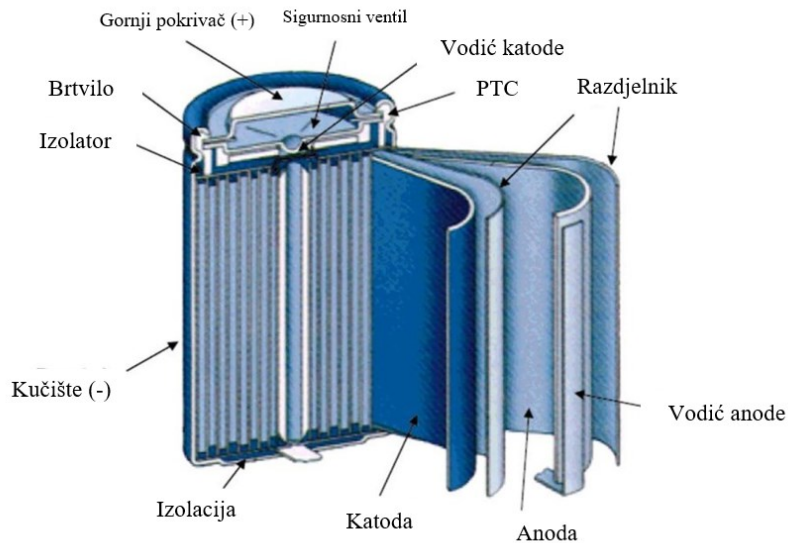
Proizvodnja baterija električnih vozila sastoji se od proizvodnje elektroda i elektrolita, baterijskih ćelija te sklapanje istih u pakete.

Materijali poput litija, kobalta i nikla se posebnim postupcima prerađuju u pogodne oblike za formiranje baterija. Postoje brojne podvrste litij-ionskih baterija od kojih je svaka različite

kemijske građe. Danas najkorištenije litij-ionske baterije su nikal-mangan-kobalt (NMC) i litij-željezo-fosfat baterije (LFP) te se ove baterije nalaze u više od 90 % komercijalnih električnih automobila. Materijali koji se nalaze u imenima ovih podvrsta baterija su zapravo materijali od kojih se sastoji katoda baterijskih ćelija. Konkretno NMC baterije su najkorištenije litij-ionske baterije u električnim vozilima te kao takve imaju brojne varijacije pri čemu se mijenjaju udjeli litija, kobalta, nikla i mangana. Svaka baterija se sastoji od katode i anode, to jest pozitivne i negativne elektrode. Njihova uloga od ključnog je značaja za pohranu i isporuku energije. Katoda, pozitivna elektroda, se izrađuje od mješavine litija, kobalta, aluminijske ovisno o različitim vrstama baterija [20,21]. Ovi materijali se prerađuju u disperzivne praškaste oblike te se miješaju u suspenzije koje se nanose na aluminijske folije te se procesom sušenja i valjanja formiraju u tanke listiće. S druge strane baterije je anoda, odnosno negativna elektroda, najčešće izrađena od grafita koji prolazi identičan postupak kao i materijali katode samo što se ovdje koriste folije bakra. Po završetku postupka dobivaju se također tanki listići. Funkcija katode jest da pohranjuje litijeve ione kada je baterija napunjena, točnije ima ulogu spremnika energije te određuje ukupni kapacitet baterija pa tako i vozila. Primjerice, baterije čije su katode načinjene od materijala obogaćenih niklom imaju veći kapacitet od onih koji posjeduju mangan zbog veće količine litijevih iona koji se pohranjuju s pomoću nikla. Anoda služi prilikom procesa punjenja kada litijevi ioni putuju iz katode te se skladište unutar anoda, a prilikom pražnjenja baterije isti ti ioni izlaze iz anode prema katodi čime oslobađaju električnu energiju potrebnu za napajanje vozila.

Od ključnog značaja za prijenos litijevih iona su elektroliti, to jest smjesa litijevih soli i organskih otapala kao što je propilen karbonat. Elektroliti povećavaju mobilnost litijevih iona čime se povećava učinkovitost baterije, točnije poboljšava se brzina punjenja i korištenja energije pohranjene u bateriji. Kako bi se sigurnost ovih baterija unutar električnih vozila poboljšala često se koriste viskozni gelovi kao elektroliti kako bi se smanjila mogućnost curenja čime su sklone ovakve vrste baterija, a samim time i mogućnost zapaljenja. Između katode i anode se postavlja takozvani separator koji je zapravo porozna membrana izrađena od polietilena ili polipropilena te sprječava međusobni kontakt anode i katode. Služi i u sigurnosne svrhe tako da ako dođe do pregrijavanja baterije membrana se otapa čime se onemogućuje prijenos iona koji bi inače rezultirao brzim izgaranjem. Naravno, zbog same naravi ovakvih kemijskih postupaka, baterije imaju i razne sigurnosne elemente poput raznih ventila i toplinskih izolatora. Također, u samom središtu se nalazi igla koja sprječava rijetke slučajeve nastajanja kratkog spoja kod litij-ionskih baterija koji bi inače pregrijali bateriju za nekoliko

stotina °C u svega par sekundi. Uz sve navedene sigurnosne dijelove proizvođači automobila ugrađuju i razne sustave odvođenja i regulacije topline čime omogućavaju da baterija radi na optimalnoj temperaturi (eng. Battery management system, BMS). Za sam kraj litij-ionska ćelija se stavlja u aluminijsko kućište te se potom formiraju u baterijske pakete koji se potom ugrađuju u vozila. Primjera radi, model automobila Chevrolet Volt sadrži 288 litij-ionskih ćelija u svojem paketu.



Slika 6 Građa litij-ionske ćelije [21]

Čitav postupak formiranja materijala i sklapanja baterija je, poslije dobivanja sirovih materijala, drugi najveći proizvođač ugljičnog otiska prilikom proizvodnje baterija. Najveći problem je u tome što sama proizvodnja baterija i dalje ovisi o prirodnim plinovima i električnoj energiji. Ovdje se također javlja problem dobivanja električne energije iz različitih izvora. Iz ovog razloga nije isto proizvede li se baterije u Europi, gdje je električna energija poglavice dobivena obnovljivim izvorima, ili pak u Kini gdje se znatno veći postotak električne energije dobiva s pomoću fosilnih goriva kao što je ugljen. Proizvodnja 75 kW-ne baterije u Teslinoj tvornici u Nevadi proizvodi 4500 kg CO₂ dok proizvodnja iste baterije u Azijskim tvornicama rezultira proizvodnjom 7500 kg CO₂ zbog visoke stope korištenja ugljena kao izvora električne energije [22]. Tablica ispod prikazuje ugljični otisak mreža proizvodnje električne energije nekih od najvećih korisnika električnih automobila [23].

Tablica 1 Pregled ugljičnog otiska proizvodnje električne energije najvećih tržišta EV-a 2019.-te godine

Država	Ugljični otisak gCO ₂ /kWh
Sjedinjene Američke Države	475
Europska Unija	248
Kina	623
Svjetski prosjek	475

Ali, čak i ako je proizvodnja baterija na energetski zadovoljivoj lokaciji javlja se problem transporta tih istih baterija ovisno o mjestu proizvodnje i montaže automobila.

Važno je napomenuti kako je transport baterija kao i materijala potrebnih za izradu istih jedan od najvećih problema kod proizvodnje električnih automobila. Često su baterijski paketi električnih vozila velikih masa i dimenzija što naravno ima posljedicu povećanog ugljičnog otiska u transportu. Potrebno je više energije za transport kao i više potrebnih putovanja za velike količine baterija. Bez obzira na to, transport baterija se neće uzimati u obzir prilikom ove analize zbog toga što se ista paradigma može reći i za transport motora s unutarnjim izgaranjem kao i samog goriva potrebnog za rad konvencionalnih automobila. Također, nije mjerodavno uspoređivati ugljični otisak vezan za transport baterija naspram pogonskog sklopovlja konvencionalnog automobila jer je proizvodnja konvencionalnih automobila preteča proizvodnji električnih te kao takva i optimiziranija. Primjerice, proizvodnja motora s unutarnjim izgaranjem je izrazito lokalizirana, posebice u Europi, dok je opskrbeni lanac za proizvodnju baterija električnih automobila izrazito složen s velikim udaljenostima između samih tvornica automobila, baterija i materijala potrebnih za izradu baterija. Kako automobilska industrija kreće sve više u smjeru intenzivne proizvodnje električnih automobila za očekivati je kako će se ugljični utisak logistike i transporta baterija s vremenom ublažiti te izjednačiti s onim proizvedenim tijekom transporta dijelova automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem koji postoji kao takav već desetljećima.

U kasnijim poglavljima kvantificirana je mjera ugljičnog otiska vezanog za proizvodnju komponenti električnih i konvencionalnih automobila.

3.3. Korištenje vozila

Ugljični otisak električnih vozila prilikom njihove upotrebe i radnog vijeka predstavlja bitnu razliku prilikom komparacije električnih naspram konvencionalnih vozila. Najjednostavnije rečeno električna vozila zbog manjka ispušnih plinova bi trebala imati znatno manji ugljični otisak od svojih pandana. No u realnosti ta činjenica nije onakva kakva se naizgled čini. Već prije spomenuta proizvodnja električne energije za punjenje kao i sama učinkovitost baterija samo su neki od mnogih čimbenika koji značajno mijenjaju percepciju o električnim autima kao „zelenim“ alternativama konvencionalnih automobila. Stoga ovo poglavlje daje pregled čimbenika koji utječu na ugljični otisak prilikom rada i korištenja električnih automobila naspram automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem.

Za početak korištenja električnog automobila potrebno je imati napunjenu bateriju, a za to je potreban izvor električne energije. Ako je električna energija dobivena iz obnovljivih izvora poput hidroelektrana, solarne energije te vjetroelektrana, ugljični otisak je sveden na minimum. Problem predstavlja električna energija dobivena s pomoću fosilnih goriva poput ugljena ili prirodnog plina kada je ugljični otisak izrazito velik. Primjerice ugljični otisak električne mreže u Indiji je 2020.-te godine iznosio 720 g CO₂/kWh dok je u zemljama EU prosjek iznosio 225 g CO₂/kWh [23]. Sljedeća stavka o kojoj uvelike ovisi ugljični otisak električnih automobila jest sam elektromotor. Jedna od najvećih prednosti električnih automobila jest u tome da generalno imaju znatno veću učinkovitost u pretvaranju dobivene energije u snagu potrebnu za pogon kotača. Za primjer električno vozilo ima samo jedan elektromotor koji služi za pogon on pretvara otprilike 80 % električne energije iz mreže u snagu za pogon dok konvencionalni motori s unutarnjim izgaranjem pretvaraju samo 12-30 % energije pohranjene u gorivu za pogon kotača [24]. Ovaj postotak varira ovisno o broju elektromotora koji se koriste za pogon vozila, primjerice automobil Tesla Model 3 koristi dva elektromotora od kojih je svaki zasebno spojen na svoj par kotača, prednji i stražnji. Naravno čimbenici poput težine vozila, aerodinamičnosti te sama izvedba baterija također diktiraju ugljični otisak proizveden korištenjem električnih automobila. Masa vozila predstavlja velik problem ovakvih vozila zbog toga što je sama baterija izrazito teška što pridonosi nižoj učinkovitosti prilikom korištenja kao i većoj potrošnji. Kao što je već prije spomenuto ono što uvelike diktira životni ciklus električnih vozila jest degradacija baterije. S vremenom se baterije električnih vozila degradiraju, to jest opada im njihov kapacitet pohranjene energije. To je ujedno i glavni fokus automobilske industrije koja želi smanjiti taj čimbenik eksperimentirajući s različitim vrstama

baterija. Današnje, najrasprostranjenije, baterije su litij-ionske koje imaju relativno nisku stopu degradacije sadržavajući 75 % svog kapaciteta nakon 10 godina korištenja. Inženjeri u Tesli tvrde da njihova tipična baterija može trajati 20-35 godina ili 500 000-800 000 km ovisno o tome što se prije dogodi [25]. Podatci koji koriste su prikupljeni od više od 1 000 000 Teslinih automobila koji su trenutno na cestama te s pomoću njih tvrde da nakon 350 000 km baterija ima 80 % početnog kapaciteta. Takav podatak treba uzeti s rezervom zato što je degradacija i trošenje baterije izrazito uvjetovano načinom vožnje korisnika, navikama punjenja te radnom temperaturom automobila. Kako bi se sadržalo optimalno trajanje baterije Tesla preporučuje zadržavanje napunjenosti baterije na razini iznad 20 % pogotovo na dužim periodima [26]. Naravno ovo je moguće ako su punionice u dostatnom broju te dobro umrežene što je problem kod nekih područja u svijetu posebice u manje razvijenim zemljama. Uzmemo li za primjer SAD, u saveznoj državi Kaliforniji su punionice udaljene u prosjeku svakih 8 km dok je u saveznoj državi Nebraska prosječna udaljenost između punionica čak 430 km što čini, ako se automobil ne puni s pomoću osobnih punionica, električne automobile gotovo neiskoristivim te je teško održavati optimalno punjenje baterija [27]. Premda danas razvoj punionica ide u smjeru što bržih i snažnijih ni to pak nije „zdravo“ za optimalan rad baterije. Koristeći takozvane super brze punionice, koje mogu napuniti vozilo do 320 km dometa u čak 15 minuta, znatno utječe na trajanje baterije. Naime, kada se baterije električnih vozila pune ovakvim brzinama proizvode više topline koja ubrzava kemijske reakcije prijenosa litijevih iona čime se baterija troši. Osim toga pojava elektrokemijskog naprezanja prisutna je zbog velike količine napona kojeg baterije primaju. Ova pojava ima posljedicu degradacije materijala anode, a posebice katode. Stoga se preporučuje korištenje normalnih brzina punjenja dok bi se super brze punionice trebale koristiti samo prilikom dugih putovanja. Velika mana ovih automobila naspram konvencionalnih jest u tome da vozač, želi li optimalno trošiti bateriju, mora paziti na način vožnje. Visoke brzine vožnje na duže udaljenosti rezultiraju povećanom potrošnjom baterije te je ograničen udaljenošću između punionica. Uz to sve javlja se i problem povećane degradacije baterije prilikom ovakve vožnje. Promatrajući sve ovo može se dobiti dojam kako električni automobili nisu ni malo isplativi naspram konvencionalnih automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem pogotovo kada se u obzir uzme cijena samih automobila. U prosjeku su električni automobili skuplji za 10-20 % od svojih pandana sličnih karakteristika. Inicijalni troškovi kupovine novog automobila ublažuju se s pomoću činjenice da je gorivo i dalje znatno skuplje od električne energije potrebne za punjenje automobila, a brojne države pružaju i razne poticaje s ciljem poticanja kupovine električnih automobila. Cijena električne energije potrebne za punjenje u Njemačkoj iznosi € 0,402 po kWh što rezultira u cijeni od

€1750 godišnje na prijeđenih 25000 km [28]. Uzmemo li u obzir pretpostavku da prosječan automobil troši 6-7 l/100 km goriva s cijenom litre dizela i benzina od €1,6 dolazimo do brojke od € 2600 potrošenih na istoj kilometraži [29]. Dodatni benefit kod troškova električnih automobila su i troškovi održavanja. Kako su električni automobili generalno jednostavnije građe, gledano s aspekta montaže te sama činjenica da imaju manje pokretnih dijelova naspram konvencionalnih automobila, troškovi održavanja električnog automobila su tijekom prosječnog životnog ciklusa u prosjeku €4150 dok su kod automobila s unutarnjim izgaranjem €8300 [30]. No ipak najveća prednost električnih automobila je u prije spomenutoj razlici između elektromotora naspram konvencionalnih motora s unutarnjim izgaranjem. Stupanj iskoristivosti elektromotora je u prosjeku 90 % [31], što je zapanjujuće ako uzmemo u obzir da najučinkovitiji motori s unutarnjim izgaranjem imaju 30 – 40 %. Elektromotor je također zaslužan i za smanjene troškove održavanja sustava kočenja zbog sposobnosti regenerativnog kočenja. Konvencionalni automobili koriste isključivo mehaničke kočnice koje zaustavljaju automobil s pomoću trenja između klijesta i diska kočnica što rezultira generiranjem topline te samim time rasipanjem kinetičke energije koju je automobil imao prije kočenja. Električni automobili s pomoću sposobnosti regenerativnog kočenja mogu pohraniti kinetičku energiju u obliku električne energije prilikom usporavanja ili vožnje nizbrdo. Električna energija koja se dobiva ovakvim načinom kočenja pohranjuje se u bateriji te poboljšava domet vozila za čak 10 %. Ovaj efekt se najviše osjeti u gradskom prometu gdje zbog relativno niskih brzina potreba za mehaničkim kočnicama je minimalna te u nekim slučajevima i nepostojeća.

3.4. Recikliranje i odlaganje

Recikliranje električnih vozila je izrazito bitan aspekt ako se električni automobili žele promovirati kao ekološki održivi. Sam postupak recikliranja automobila je izrazito bitan gledajući sa stajališta ugljičnog otiska zbog mogućnosti ponovnog korištenja materijala uz minimalni utrošak energije naspram procesa ponovne proizvodnje i dobivanja materijala koji su izrazito energetske zahtjevni te prouzrokuju velike količine ugljičnog otiska kako je i bilo rečeno u prethodnim poglavljima. Ono što je bitno napomenuti jest da recikliranje pojedinih materijala nije isplativo ako promatramo recikliranje kao način reduciranja ugljičnog otiska. Primjerice, staklo koje se dobiva iz automobila nije od velikog značaja za recikliranje zbog činjenice da transport recikliranog stakla gotovo uvijek ima veći ugljični otisak naspram

ponovne proizvodnje koja sama po sebi nije energetska zahtjevnija uspoređujući je s ostalim dijelovima. Naravno da primjerice u industriji pića recikliranje stakla ima smisla zbog same količine i naravi industrije, ali prilikom proizvodnje i recikliranja automobila ovaj postupak je kontradiktoran recikliranju kao nekakvom „zelenom“ postupku.

Kako električni i konvencionalni automobili dijele većinu dijelova prilikom recikliranja ovo poglavlje se bavi pregledom ugljičnog otiska prilikom recikliranja baterije električnih vozila koja predstavlja najznačajniju razliku u recikliranju električnih naspram konvencionalnih automobila. Recikliranje konvencionalnih automobila je već dobro poznat i desetljećima usavršavan proces. Zbog relativno jednostavne građe, gledano sa stajališta materijala, dijelova poput motora i prijenosnika, postupak recikliranja se sastoji od uklanjanja štetnih materijala, rastavljanja automobila, usitnjavanja i probiranja materijala. Naravno i električni automobili prolaze gotovo isti tretman po završetku svojeg životnog ciklusa sa bitnom razlikom u recikliranju litij-ionskih baterija. Premda je prilikom recikliranja dijelova konvencionalnog automobila poput motora s unutarnjim izgaranjem potrebno ukloniti štetne i otrovne supstance poput motornog ulja, goriva, ulja za podmazivanje kočnica, rashladne tekućine te brojnih drugih, puno veći problem za recikliranje predstavljaju materijali baterije električnih vozila poput litija, kobalta i nikla. Kako flota električnih vozila iz godine u godinu raste tako raste i broj baterija koje je potrebno reciklirati. Nažalost, u brojnim zemljama trećeg svijeta većina baterija završi na odlagalištima gdje materijali poput nikla i kobalta završe u tlu te tako postaju izrazito štetni za okoliš. Litij kao materijal je izrazito reaktivan te kao takav zahtjeva posebne procese recikliranja. Materijal kao što je olovo koji se koristi u proizvodnji akumulatora konvencionalnih automobila te se nalazi u komponentama električnog automobila miješa se s podvodnim vodama čime se narušava zdravlje čitavih zajednica koje ovise o njoj. Iz tog razloga se pravilno odlaganje i recikliranje baterija smatra nužnim ako želimo da električni automobili zaista budu „zeleni“. Naravno da recikliranje predstavlja i velik izvor vrijednih materijala prilikom ponovne proizvodnje automobila i komponenti te je od velike važnosti za smanjenje ugljičnog otiska automobila, a posebice električnih. Olovne baterije poput onih korištenih u kućanskoj elektronici su najviše reciklirani proizvod na svijetu te je u SAD-u gotovo 99 % svih olovnih baterija reciklirano [32]. Razlog tome je da su olovne baterije značajno jednostavnije građe od onih korištenih u električnim vozilima s kojima se bavi ova analiza. Različiti su postupci recikliranja ovisno o vrsti baterija korištenih no kako se ovaj rad bazira na analizi litij-ionskih baterija tako će se i ovdje postupak recikliranja fokusirati isključivo na njih [33]. Jedan od načina recikliranja jest pirometalurški proces obrade baterija. Postupak se bazira na

korištenju visokotemperaturnih peći koje pri 800-1200 °C reduciraju metalne okside u baterijama na legure materijala poput kobalta, bakra, željeza i nikla ovisno o točnom sastavu samih baterija. Premda je ovaj proces uglavnom korišten za potrošačke litij-ionske baterije, može se uvelike primijeniti za recikliranje baterija električnih vozila. Produkti postupka su komadi metalnih legura, troska kao i mješavina plinova. Plinovi su proizvedeni pri nižim temperaturama te se sastoje od elektrolitnih ostataka koji su štetni u plinovitom obliku te ih je potrebno ukloniti. Metalne legure se mogu odvojiti takozvanim hidrometalurškim recikliranjem. Obrada s pomoću ovakve metode se bazira na ispiranju željenih metala iz katodnih materijala koji su dobiveni prijašnjim postupcima s pomoću otopina H_2SO_4 i H_2O_2 gdje veći udjeli H_2O_2 poboljšavaju učinkovitost ispiranja u smislu uklanjanja nečistoća. Nakon faze ispiranja dodaju se organska otapala s pomoću kojih se metali izvlače tako da se talože na dnu. Kobalt se pojavljuje u obliku sulfata, hidroksida, karbonata dok se litij pojavljuje u obliku Li_2CO_3 ili Li_3PO_4 . Alternativa hidrometalurškoj obradi bi bila mehaničko-kemijska obrada. Ovakav način obrade se sastoji od mehaničkog usitnjavanja materijala katode s kloridima pri čemu se dobivaju soli kobalta. Bez obzira na način obrade veliki izazov predstavljaju mogućnost kontaminacije materijala kao i velike količine otapala potrebnih za ekstrakciju željenih materijala. Nedostatak kod pirometalurške ili hidrometalurške metode recikliranja je u niskom postotku mogućnosti recikliranja. Dok za katode bogate kobaltom ovakve metode recikliranja mogu povratiti gotovo 70 % vrijednosti kobalta, kod anoda ili katoda drugog kemijskog sastava ovaj postotak naglo opada. S toga se često koristi i direktna reciklaža s pomoću koje se izravno uklanja materijal katode i anode bez prijašnje kemijske obrade te se kao takvi mogu ponovno primjenjivati u novim litij-ionskim baterijama. Posebice katodni materijali se mogu primjenjivati uz minimalne promjene strukture. Proces se sastoji od namakanja folija katode u posebnim otopinama nakon čega ih se podvrže postupku sonifikacije čime se omogućuje odvajanje praškastih materijala poput kobalta i nikla od samih folija s pomoću ultrazvučnih valova bez prouzrokovanja mehaničkog naprezanja. Tako dobiveni prašci se obnavljaju sintetičkim postupcima dodavanjem Li_2CO_3 ili hidrotermalnim tretmanima s pomoću $LiOH$. Izravna reciklaža omogućuje ponovno korištenje gotovo svih komponenti baterije izuzev separatora. Najveći nedostatak ovakve reciklaže leži u tome da kvaliteta recikliranja uvelike ovisi o prethodnom stanju baterije koja se reciklira. Postupci recikliranja baterija također prouzrokuju svoj ugljični otisak u kontekstu životnog vijeka električnog automobila, ali u puno manjoj mjeri naspram ponovne proizvodnje. Pirometalurški način recikliranja predstavlja energetska najzahtjevniji proces recikliranja te u prosjeku proizvede

5,11 kg CO₂/kWh kapaciteta baterije dok primjerice hidrometalurški proces proizvede 2,68 kg CO₂/kWh, a direktna reciklaža 3,65 kg CO₂/kWh [42].

4. METODOLOGIJA KVANTITATIVNE ANALIZE

Prilikom kvantitativne analize ugljičnog otiska za električne i konvencionalne automobile odabrane u kasnijem poglavlju korišten je širok spektar i pregled literature kao temelj za dobivanje podataka. Kako ugljični otisak životnog ciklusa automobila obuhvaća složeno i opširno područje istraživanja ovom analizom u obzir je uzeta nekolicina stavki. Promatrana je proizvodnja, korištenje te recikliranje električnih naspram konvencionalnih automobila s MSUI.

Prilikom analize proizvodnje automobila korišteni su podatci vezani za proizvodnju ključnih dijelova koji predstavljaju bitnu razliku između električnih naspram konvencionalnih automobila. U fokus su stavljeni dijelovi poput MSUI, elektromotor te za njih vezan pogonski sustav kao i baterija električnog vozila koja predstavlja najznačajniju razliku u proizvodnji.

Ugljični otisak prilikom korištenja električnog automobila izračunat je na temelju podataka vezanih za energetske intenzitet električne mreže o kojoj ovisi ugljični otisak punjenja automobila te preko prosječne potrošnje baterije ovisno o prijeđenoj kilometraži. Za način punjenja pretpostavljen je najgori slučaj punjenja isključivo preko energetske mreže određenih područja dok punjenje s pomoću primjerice solarne energije nije uzeto u obzir. Izračun ugljičnog otiska konvencionalnog automobila provodi se s pomoću podataka o emisijama koje navodi sam proizvođač automobila bez obzira na to da one nisu najmjerodavnije jer proizvođači često skrivaju točne podatke o emisijama [43].

Posljednja stavka analize je recikliranje električnih i konvencionalnih automobila koja se bazira na recikliranju litij-ionskih baterija korištenih u baterijskim paketima električnih vozila.

U obzir je uzeta i činjenica da različite države nemaju iste intenzitete energetske mreže dobivanja električne energije tako da provedena analiza varira o državi u kojoj se koristi električni automobil.

4.1. Odabir električnog i konvencionalnog automobila

Prilikom odabira automobila za analizu ugljičnog otiska potrebno je u obzir uzeti nekoliko kriterija. Kako bi analiza bila vjerodostojna odabrani su automobili koji su zabilježili visoke brojke prodanih jedinica. Osim toga odabrani automobili nisu visoke klase te su kao takvi cjenovno prihvatljiviji većem broju ljudi. Na ovaj način su se iz analize isključili automobili visokih performansi koji nisu mjerodavni u okviru analize ugljičnog otiska.

Za analizu ugljičnog otiska električnog automobila odabran je automobil marke Tesla točnije model Tesla Model 3 s pogonom na prednjim i stražnjim kotačima (AWD) standardnih specifikacija. Ovaj automobil je odabran jer je jedno od najprodavanijih vozila u industriji s brojkom od 1.2 milijuna prodanih vozila od 2017.-te godine kada je prvi put plasiran na tržište [34]. Osim kriterija prodaje pripada srednjoj klasi automobila s početnom cijenom od € 50000 u Hrvatskoj koja se umanjuje ovisno o poticajima koje država pruža ne bi li potaknula veći broj ljudi na kupovinu, inače skupog, električnog automobila. Specifikacije automobila su prikazane u tablici ispod [35, 36].

Tablica 2 Specifikacije automobila Tesla Model 3 (AWD)

Masa praznog vozila	1828 kg
Snaga automobila	366 kW
Kapacitet baterije (upotrebivo)	78,1 kWh (75)
Vrsta baterije	Litij-ionska (NMC)
Domet automobila na jednom punjenju	360-720 km
Potrošnja	14 kWh / 100 km

Potrebno je uzeti u obzir da su podatci vezani za domet električnog automobila prikazani u tablici srednje vrijednosti zbog toga što domet varira ovisno o načinu vožnje automobila te vremenskim uvjetima.

Odabrani konvencionalni automobil s MSUI koji se uspoređuje prilikom ove analize je automobil marke Toyota model Corolla Sedan Terra standardne opreme [49]. Kao i njegov električni pandan ovaj model automobila je jedan od najprodavanijih u svojoj klasi te se ne rijetko pronalazi među najprodavanijim automobilima na svijetu na godišnjoj razini [37]. Zbog svoje pristupačne cijene od otprilike € 21000 u Hrvatskoj kao i niske potrošnje predstavlja solidan omjer cijene i kvalitete zbog koje se upravo i prodaje u velikom broju.

Tablica 3 Specifikacije automobila Toyota Corolla Sedan Terra

Masa praznog vozila	1310 kg
Snaga motora	125 KS (93 kW)
Potrošnja goriva	5,7 l/100 km
Emisije CO ₂	129 g/km
Vrsta motora	1,5 litara benzinski motor
Kapacitet spremnika goriva	50 litara

5. KOMPARATIVNA ANALIZA UGLJIČNOG OTISKA

U ovom poglavlju pružena je kvantitativna analiza prije navedenih čimbenika ugljičnog otiska u životnom ciklusu električnog naspram konvencionalnog automobila. Uspoređena je proizvodnja, korištenje te recikliranje Tesla Model 3 električnog i Toyota Corolla Sedan Terra konvencionalnog automobila s MSUI unutar prije definiranih granica istraživanja.

5.1. Proizvodnja automobila

Proizvodnja litij-ionske (NMC) baterije Tesla Model 3 automobila predstavlja značajan postotak ugljičnog otiska prilikom sveukupne proizvodnje ovog automobila. Odabrani model automobila sadrži bateriju funkcionalnog kapaciteta u iznosu od 75 kWh. Kako proizvodnja ovisi o energetske mreži lokacije na kojoj se proizvodnja odvija ugljični otisak varira od 61-106 kg CO₂/kWh kapaciteta baterije. Najveći ugljični otisak se pojavljuje u Azijskim zemljama poput Kine i Indije čija je proizvodnja električne energije i dalje najviše pogonjena fosilnim gorivima [38]. Osim same baterije ugljični otisak proizvodnje ostalih dijelova automobila je gotovo identičan automobilu s MSUI s jedinom bitnom razlikom u proizvodnji dijelova specifičnih za električne automobile poput elektromotora te elektronike vezane za pogonsko sklopovlje.

Proizvodnja automobila Toyota Corolla Sedan Terra je značajno manjeg ugljičnog otiska zbog manjka litij-ionske baterije. Kako je većina dijelova između odabranog konvencionalnog i električnog automobila gotovo identična tako je i ugljični otisak sličan prethodnom automobilu

s razlikom ugljičnog otiska proizvodnje motora s unutarnjim izgaranjem te pogonskog sustava automobila s MSUI.

Proizvodnja šasije se smatra identičnom za oba automobila. Premda postoje razlike one su od malog značaja unutar analize kompletne proizvodnje ovih automobila [39].

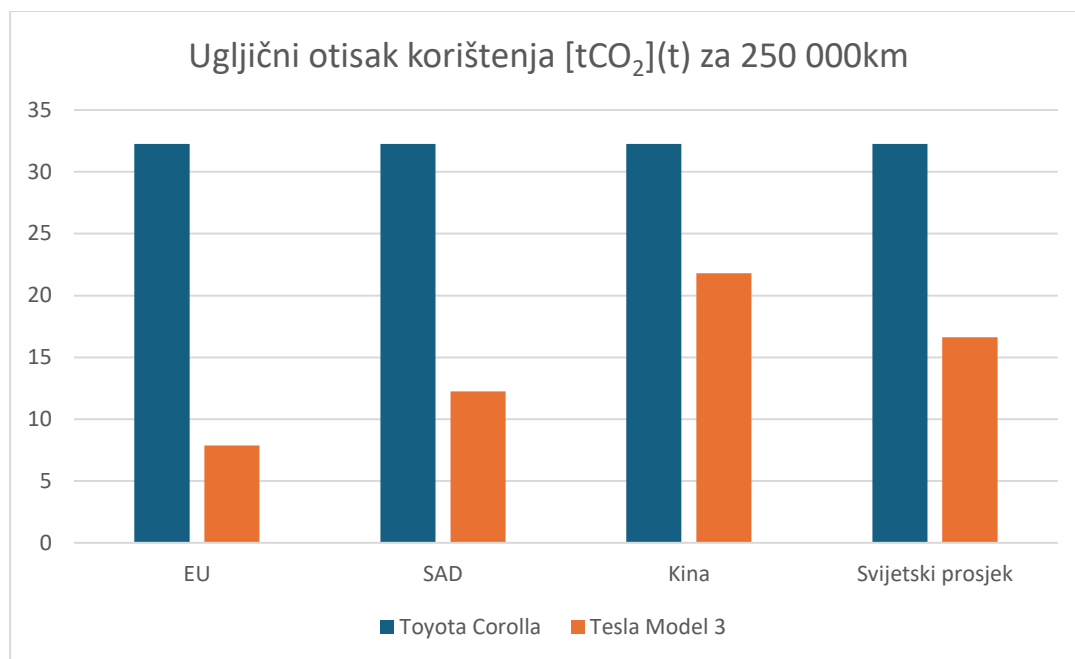
Sljedeća tablica prikazuje točne količine emisija CO₂ prilikom proizvodnje konvencionalnih naspram električnih automobila prema [39, 38].

Tablica 4 Ugljični otisak proizvodnje automobila

Ugljični otisak proizvodnje: [kg CO ₂]	Tesla Model 3	Toyota Corolla Sedan Terra
Baterija	4500-7950	/
Šasija	≈ 4200	≈ 4200
Pogonsko sklopovlje	≈ 1700	≈ 1200
Ukupno	10400-13850	≈ 5400

5.2. Korištenje automobila

Električno vozilo Tesla Model 3 koristi bateriju čija potrošnja električne energije iznosi 14 kWh/100 km. Uzmemo li za pretpostavku da je prosječni životni ciklus automobila 250 000 km, pomoću podatka o ugljičnom otisku energetske mreže najvećih tržišta automobila [23] na svijetu može se dobiti kvalitetna slika o emisijama prouzrokovanim korištenjem električnog automobila. Toyota Corolla Sedan Terra prouzrokuje u prosjeku 129 g CO₂/km te se pomoću toga može izračunati ugljični otisak korištenja ovakvog automobila naspram električnog.



Slika 7 Ugljični otisak tijekom korištenja Toyota Corolla Sedan i Tesla Model 3 ovisno o području korištenja

Prema podacima 2020. godine za proizvodnju jednog kWh struje proizvede se 225 g CO₂ u EU, 350 g CO₂ u SAD, 623 g CO₂ u Kini te je svjetski prosjek 475 g CO₂.

Tesla Model 3 čija je potrošnja 14 kWh/100km zahtjeva 35000 kWh da prođe očekivanih 250 000 km u svom životnom vijeku. Vidimo da čak ukoliko se u obzir uzme energetska mreža najvećeg ugljičnog otiska i dalje je konvencionalni automobil puno veći proizvođač emisija naspram električnom.

5.3. Recikliranje automobila

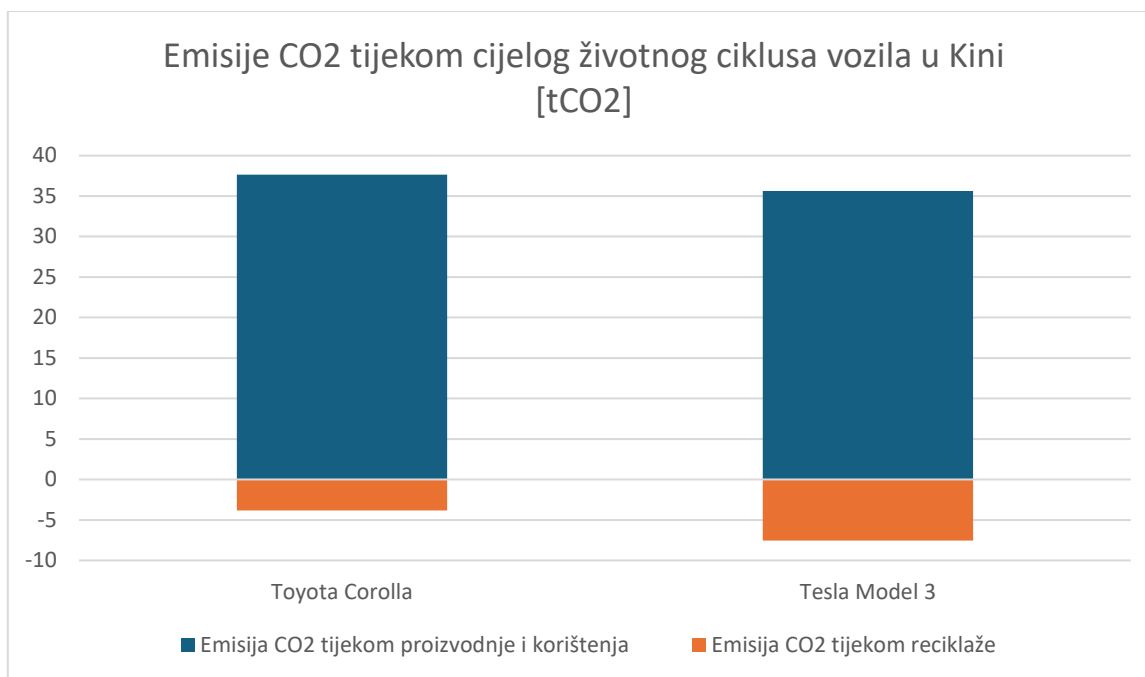
Ugljični otisak recikliranja automobila svodi se na postupak recikliranja baterije električnog automobila Tesla Model 3 te na postupak recikliranja MSUI. Kako su materijali poput čelika i aluminija te raznih polimernih materijala u velikom broju prilikom proizvodnje šasije kod obje vrste automobila, sitne razlike u materijalima specifičnih za šasije svakog automobila nisu uzete u obzir. Premda je broj elektroničkih komponenti u većoj količini korišten prilikom izrade Tesle Model 3 zbog njihovog relativnog malog ugljičnog otiska njihov ugljični otisak nije razmatran. Prilikom recikliranja svojih baterija Tesla sve više teži korištenju hidrometalurških procesa recikliranja koji su manje energetske zahtjevni od prethodno korištenih pirometalurških procesa tako da neki stariji izvori nisu uzeti u obzir. Prema izvoru

[41] reduciranje ugljičnog otiska zbog recikliranja baterije rezultira smanjenjem ugljičnog otiska za 48,3 kg CO₂e/kWh kapaciteta baterije tako da recikliranje baterije Tesla Model 3 automobila ušteduje 3623 kg CO₂. Recikliranje ostalih dijelova odabranog električnog automobila rezultira daljnjim smanjenjem od 3920 kg CO₂ ako se uzme u obzir da je težina vozila bez baterije 1338 kg, to jest da je težina baterije 490 kg [44].

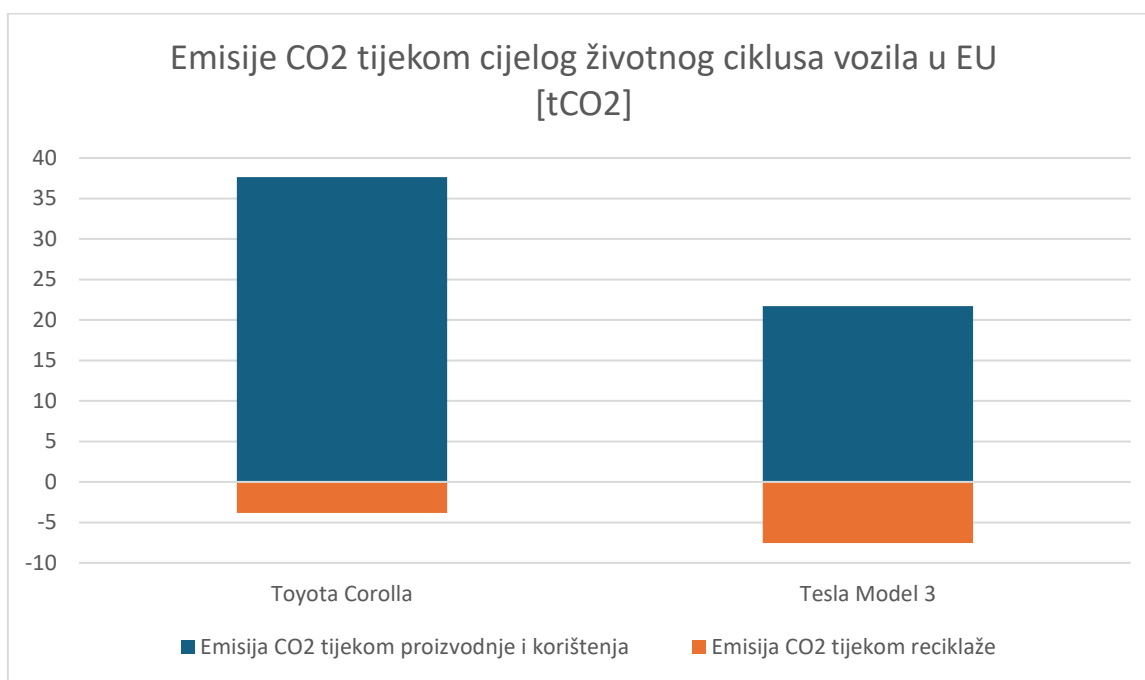
Recikliranje automobila Toyota Corolla polazi od stajališta da je recikliranje konvencionalnih automobila izrazito optimizirano jer kao takvo postoji veći broj godina od postupaka recikliranja električnih automobila. Prema istom izvoru kao i za ranije spomenuto recikliranje baterija [41] sa pretpostavkom da je MSUI izrađen od čelika te sa činjenicom da masa praznog vozila Toyota Corolla Sedan Terra iznosi 1310 kg dolazimo do smanjenja ugljičnog otiska od 3838,3 kg CO₂.

5.4. Rezultati analize

Rezultati koje možemo vidjeti iz prethodnih analiza ugljičnog otiska životnog ciklusa električnog automobila Tesla Model 3 i konvencionalnog automobila Toyota Corolla Sedan Terra su čak i u najgorim slučajevima uvelike na strani električnog vozila. Bez obzira na brojne polemike oko netočnih podataka vezanih za proizvodnju emisija konvencionalnih automobila koje su dane od strane proizvođača, električni automobili proizvode značajno manji ugljični otisak naspram svojih konvencionalnih pandana. Rezultati analize su dani za najgori i najbolji slučaj ugljičnog otiska. Najgori scenarij je kada se energetska mreža punjenja nalazi u Kini [23], a emisije tokom proizvodnje baterije dosežu svoj maksimum s obzirom na korištenu energetska mrežu prema [38]. Najbolji slučaj pak predstavlja korištenje energetske mreže u EU dok su emisije prilikom proizvodnje baterije maksimalne kao i za najgori slučaj kako bi se postigla percepcija o količini utjecaja proizvodnje električne energije prilikom proizvodnje baterije električnih vozila na kompletni ugljični otisak električnog automobila.



Slika 8 Prikaz najgoreg scenarija ugljičnog otiska



Slika 9 Prikaz najboljeg scenarija ugljičnog otiska

Slike prikazuju kako je čak i u najgorem slučaju proizvedeni ugljični otisak na strani odabranog konvencionalnog automobila.

Ugljični otisak proizvodnje, korištenja i recikliranja odabranog električnog i konvencionalnog automobila za najgori scenarij iznose 33,8 tCO₂ za električni te 28,1 tCO₂ za konvencionalni

automobil kada se u obzir uzme smanjenje ugljičnog otiska zbog recikliranja. Pogledamo li ovaj slučaj koji se zasniva na energetske mreži Kine dobivamo stvarnu percepciju o tome koliko ugljični otisak energetske mreže diktira ekološku prihvatljivost električnih automobila.

Najbolji slučaj proizvedenog ugljičnog otiska se pak javlja u EU gdje zbog niskog ugljičnog intenziteta energetske mreže ugljični otisak odabranog električnog i konvencionalnog automobila iznose 33,8 tCO₂ i 14,18 tCO₂. Kako korištenje odabranog konvencionalnog automobila ne ovisi o ugljičnom otisku energetske mreže rezultati su za oba scenarija ista. Kada bi se energetska mreža EU u budućnosti sve više zasnivala na obnovljivim izvorima energije tada bi se emisije korištenja električnog automobila bile gotovo nepostojeće.

6. DISKUSIJA

Cilj ove analize bio je saznati koliki je zapravo ugljični otisak prilikom proizvodnje, korištenja i recikliranja odabranog električnog naspram konvencionalnog automobila. Kako kroz protekla dva desetljeća, radi povećane svijesti o problemu klimatskih promjena, države kroz agresivne zakonske regulative guraju automobilsku industriju prema proizvodnji isključivo električnih vozila, ovim radom željelo se pokazati koliko su zapravo „zeleni“. Proizvođači diljem svijeta su, kako bi zadovoljili nove zakonske regulative, investirali brojne resurse u razvoj i proizvodnju električnih vozila koja se radi manjka proizvodnje CO₂ tijekom korištenja čine kao ekološki prihvatljivijom opcijom. Analiziranjem cijelog životnog vijeka električnih i konvencionalnih vozila od dobivanja sirovina i rafiniranja materijala, proizvodnje dijelova, sastavljanja vozila, korištenja te reciklaže vidljivo je da u određenim dijelovima svog životnog ciklusa električna vozila proizvode znatno više CO₂ od standardnih vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem. Naime, problematične točke rudarenja litija, kobalta i nikla koji je ekološki vrlo štetan proces, kao i proizvodnja baterija gotovo udvostručuju ugljični otisak proizvodnje vozila u usporedbi s MSUI vozilom. Premda se nije detaljno analizirao, naročito veliki problem predstavlja činjenica da se sirovine, baterija i njeni razni dijelovi transportiraju diljem svijeta prije sastavljanja automobila dok je proizvodnja MSUI vozila izrazito lokalizirana. MSUI vozila naravno proizvode mnogo više CO₂ tijekom korištenja te preko 250 000 km njihov ugljični otisak znatno nadmašuje višak početnog ugljičnog otiska koja električna vozila imaju pri proizvodnji. No, uzmemo li u obzir ugljični otisak proizvodnje električne energije različitih svjetskih mreža koje pogone električna vozila očito je da njihov ugljični

otisak tijekom korištenja nije zanemariv već uvelike ovisi o načinu dobivanja električne energije. Emisije na kraju životnog vijeka električnog automobila su slične automobilu s unutarnjim izgaranjem sa bitnom razlikom recikliranja litij-ionske baterije. Recikliranje ovih baterija bila je česta meta brojnih skeptika električnih automobila zbog neadekvatne tehnologije. Kako je razvoj električnih automobila išao dalje tako je i sam postupak recikliranja ovih automobila omogućio smanjenje ugljičnog otiska električnih automobila.

Kroz sve analize čak i u najgorim slučajevima proizvodnje električne energije električna vozila ipak imaju manji ugljični otisak, ali u takvim scenarijima razlika postaje iznimno mala. Sagledavajući njihovu povećanu cijenu, kompleksnu proizvodnju i reciklažu, ograničen domet te nužne procese rudarenja materijala kao što su litij, kobalt i nikal jasno je zašto neki ljudi i dalje smatraju kako su električna vozila samo prolazni trend u automobilskoj industriji i transportnom sektoru. No, uzimajući u obzir sve faktore životnog ciklusa električna vozila ipak predstavljaju pozitivan iskorak prema ekološki prihvatljivijem načinu transporta koji će u budućnosti zasigurno prevladati konvencionalne automobile.

7. ZAKLJUČAK

U radu je detaljno opisan i definiran ugljični otisak u različitim fazama životnog ciklusa električnih i konvencionalnih automobila. Predložena je kvantitativna metoda za određivanje ugljičnog otiska koja se bazirala na opširnom pregledu širokog spektra literature. Kako bi se rezultati mogli podrobnije usporediti odabrano je jedno električno i konvencionalno vozilo sličnih karakteristika. S pomoću konkretnih podataka vezanih za automobile provedena je analiza svih faza životnog ciklusa ovih automobila. Rezultati dobiveni analizom prikazuju kako električni automobil Tesla Model 3 ima veći ugljični otisak prilikom proizvodnje, uglavnom zbog intenzivnog ugljičnog otiska u proizvodnji baterije, ali kako većina ugljičnog otiska dolazi iz faze korištenja, konvencionalno vozilo Toyota Corolla Sedan Terra ima puno veći ugljični otisak gledajući kompletan životni ciklus. Razlog tomu je da konvencionalna vozila proizvode emisije stakleničkih plinova iz ispušnih cijevi prilikom njihovog rada. Čak ni rezultati dobiveni recikliranjem ovih automobila nisu na strani konvencionalnih te je veće smanjenje ugljičnog otiska kod električnog automobila jer recikliranje same baterije uvelike smanjuje ugljični otisak ovih automobila vraćanjem vrijednih materijala u opskrbeni lanac proizvodnje. Konačno može se zaključiti kako su električna vozila ekološki očigledno bolja opcija od automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem.

LITERATURA

1. <https://www.epa.gov/climate-indicators/greenhouse-gases> (Pristupio 29. kolovoz 2024).
2. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_cars_in_the_EU#A_6.7.25_increase_in_EU-registered_passenger_cars_since_2018 (Pristupio 29. kolovoz 2024.).
3. <https://www.statista.com/statistics/285306/number-of-car-owners-in-china/> (Pristupio 29. kolovoz 2024.).
4. https://www.forbes.com/advisor/car-insurance/car-ownership-statistics/#national_car_ownership_section (Pristupio 29. kolovoz 2024.).
5. <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2021> (Pristupio 29. kolovoz 2024.).
6. <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/> (Pristupio 29.kolovoz 2024.).
7. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases> (Pristupio 30.kolovoz 2024.).
8. <https://science.nasa.gov/climate-change/faq/what-is-the-greenhouse-effect/> (Pristupio 30. kolovoz 2024.).
9. <https://www.britannica.com/science/carbon-footprint> (Pristupio 30.kolovoz 2024.).
10. <https://www.britannica.com/science/ecological-footprint> (Pristupio 30.kolovoz 2024.).
11. https://unfccc.int/kyoto_protocol (Pristupio 30.kolovoz 2024.).
12. <https://www.consilium.europa.eu/hr/policies/climate-change/paris-agreement/> (Pristupio 30.kolovoz 2024.).
13. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (Pristupio 30.kolovoz 2024.).
14. <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/determining-electric-motor-load-and-efficiency> (Pristupio 1.rujan 2024.).
15. Hung, C. R., Völler, S., Agez, M., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2021). Regionalized climate footprints of battery electric vehicles in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 322, 129052.
16. Besselink, I. J. M., Van Oorschot, P. F., Meinders, E., & Nijmeijer, H. (2010, November). Design of an efficient, low weight battery electric vehicle based on a VW

- Lupo 3L. In The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, EVS-25 Shenzhen, China (pp. 32-41).
17. Luong, J. H., Tran, C., & Ton-That, D. (2022). A paradox over electric vehicles, mining of lithium for car batteries. *Energies*, 15(21), 7997.
 18. Winjobi, O., Kelly, J. C., & Dai, Q. (2022). Life-cycle analysis, by global region, of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries of varying nickel content. *Sustainable Materials and Technologies*, 32, e00415.
 19. <https://aquametals.com/recyclopedia/why-is-graphite-so-important-to-lib/> (Pristupio 3.rujan 2024.).
 20. Gutsch, M., & Leker, J. (2024). Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries—From cathode active material synthesis to cell manufacturing and recycling. *Applied energy*, 353, 122132.
 21. Canis, B. (2011). Battery manufacturing for hybrid and electric vehicles: Policy issues.
 22. <https://www.politifact.com/factchecks/2021/may/11/viral-image/producing-electric-cars-battery-does-not-emit-same/> (Pristupio 4.rujan 2024.).
 23. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/carbon-intensity-of-electricity-generation-in-selected-countries-and-regions-2000-2020> (Pristupio 2.rujan 2024.).
 24. <https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml> (Pristupio 2.rujan 2024.).
 25. <https://www.solarreviews.com/blog/how-long-do-tesla-batteries-last> (Pristupio 2.rujan 2024.).
 26. <https://www.tesla.com/support/range> (Pristupio 5.rujan 2024.).
 27. <https://electrek.co/2022/01/23/the-best-and-worst-us-states-for-ev-charging/> (Pristupio 6.rujan 2024.).
 28. <https://switcher.ie/car-insurance/cost-of-charging-electric-car-europe/> (Pristupio 5.rujan 2024.).
 29. <https://www.cargopedia.net/europe-fuel-prices> (Pristupio 6.rujan 2024.).
 30. <https://advocacy.consumerreports.org/wp-content/uploads/2020/09/Maintenance-Cost-White-Paper-9.24.20.pdf> (Pristupio 5.rujan 2024.).
 31. Jape, S. R., & Thosar, A. (2017). Comparison of electric motors for electric vehicle application. *international Journal of Research in Engineering and Technology*, 6(09), 12-17.
 32. <https://batteryCouncil.org/news/press-release/new-study-confirms-lead-batteries-maintain-remarkable-99-recycling-rate/> (Pristupio 5.rujan 2024.).

33. Gaines, L. (2014). The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. *Sustainable Materials and Technologies*, 1, 2-7.
34. <https://www.goodcarbadcar.net/tesla-us-sales-figures/> (Pristupio 5.rujan 2024.).
35. https://www.tesla.com/hr_HR/model3 (Pristupio 5.rujan 2024.).
36. <https://ev-database.org/car/1991/Tesla-Model-3#efficiency> (Pristupio 5.rujan 2024.).
37. <https://www.statista.com/statistics/239229/most-sold-car-models-worldwide/> (Pristupio 7.rujan 2024.).
38. Emilsson, E., & Dahllöf, L. (2019). Lithium-ion vehicle battery production-status 2019 on energy use, CO2 emissions, use of metals, products environmental footprint, and recycling.
39. Kawamoto, R., Mochizuki, H., Moriguchi, Y., Nakano, T., Motohashi, M., Sakai, Y., & Inaba, A. (2019). Estimation of CO2 emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA. *Sustainability*, 11(9), 2690.
40. Thuve, C., & Pushphika Yuvraj, H. (2022). Life cycle assessment of a combustion engine-mapping the environmental impacts and exploring circular economy.
41. Buberger, J., Kersten, A., Kuder, M., Eckerle, R., Weyh, T., & Thiringer, T. (2022). Total CO2-equivalent life-cycle emissions from commercially available passenger cars. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112158.
42. Chen, Q., Lai, X., Gu, H., Tang, X., Gao, F., Han, X., & Zheng, Y. (2022). Investigating carbon footprint and carbon reduction potential using a cradle-to-cradle LCA approach on lithium-ion batteries for electric vehicles in China. *Journal of Cleaner Production*, 369, 133342.
43. <https://www.bbc.com/news/business-34324772> (Pristupio 10.rujan 2024.).
44. <https://evshop.eu/en/batteries/292-tesla-model-3-full-battery-pack-75kwh-long-range.html> (Pristupio 10.rujan 2024.).
45. Yang, L., Yu, B., Yang, B., Chen, H., Malima, G., & Wei, Y. M. (2021). Life cycle environmental assessment of electric and internal combustion engine vehicles in China. *Journal of Cleaner Production*, 285, 124899.
46. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/motor-s-unutarnjim-izgaranjem> (Pristupio 16. rujan 2024.).
47. https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/hr_hr/GUID-8FA15856-1720-440F-838B-ACFBA8D7D608.html (Pristupio 16. rujan 2024.).

48. Liu, Z., Song, J., Kubal, J., Susarla, N., Knehr, K. W., Islam, E., ... & Ahmed, S. (2021). Comparing total cost of ownership of battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles. *Energy Policy*, 158, 112564.
49. <https://www.toyota.hr/new-cars/corolla-sedan/features-and-specs> (Pristupio 6.rujan 2024.).