

Povratna logistika litij-ionskih baterija

Žeger, Mihaela

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:303095>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-11**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mihaela Žeger

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Goran Đukić, dipl. ing.

Student:

Mihaela Žeger

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Goranu Đukiću na vodstvu, savjetima i ustupljenim radovima tijekom istraživanja, prof. dr. sc. Danijelu Pavkoviću na pomoći pri izboru literature, prof. dr. sc. Vedranu Bobancu i prof. dr. sc. Hrvoju Pandžiću sa Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu i Sonji Tadić, Stručnjakinji za zaštitu okoliša iz Rimac Technology-a na pruženim podacima te svojim najbližima na strpljenju i razumijevanju.

Mihaela Žeger



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: **Mihaela Žeger**

JMBAG: **0035224934**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Povratna logistika litij-ionskih baterija**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Reverse logistics for lithium-ion batteries**

Opis zadatka:

Električna mobilnost kontinuirano raste te se predviđa da će do 2030. godine ovo područje predstavljati 90% tržišta za baterije. No dok s jedne strane elektromobilnost pridonosi smanjenju emisija stakleničkih plinova i onečišćenja zemlje, s druge strane proizvodnja i zbrinjavanje nakon životnog vijeka baterija uzrokuju i suprotne efekte te stvaraju odgovarajuće logističke izazove. Jedan od njih je povratna logistika litij-ionskih baterija, s ciljem sigurnog rukovanja, recikliranja i odgovarajućeg zbrinjavanja nakon životnog vijeka.

U radu je potrebno:

- Dati teorijski prikaz logističke aktivnosti pod nazivom Povratna logistika, s relevantnim definicijama, povijesnim razvojem, stanjem i trendovima općenito, te njenu povezanost sa zelenom logistikom i održivošću.
- Objasniti litij-ionske baterije, s naglaskom na stanje i trendove upotrebe.
- Prikazati povratnu logistiku litij-ionskih baterija, stanje i trendove (svijet, EU, RH), zakonsku regulativu i smjernice u EU i RH za manipuliranje i zbrinjavanje te primjere i planove sustava povratne logistike litij-ionskih baterija u RH.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Goran Đukić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
2. POVRATNA LOGISTIKA	2
2.1. Definicija.....	2
2.2. Povijesni razvoj.....	4
2.3. Aktivnosti i provedba.....	4
2.3.1. Izazovi.....	6
2.3.2. Prednosti	8
2.4. Zelena logistika i održivost	8
2.5. Gospodarenje otpadom	11
3. LITIJ – IONSKE BATERIJE	13
3.1. Definicija i povijesni razvoj	13
3.2. Tehnološki napredak i primjene.....	16
3.3. Ciljevi Europske unije i porast broja električnih vozila.....	19
4. POVRATNA LOGISTIKA LITIJ – IONSKIH BATERIJA.....	24
4.1. Dugoročni planovi Europske unije i svijeta	24
4.1.1. Global Battery Alliance	25
4.1.2. European Battery Alliance	26
4.1.3. Battery 2030+.....	26
4.1.4. Direktiva za ekološki prihvatljiv dizajn	28
4.2. Transport i skladištenje u povratnom toku.....	28
4.2.1. Transport	28
4.2.2. Skladištenje	31
4.3. Aktivnosti na kraju životnog vijeka proizvoda	31
4.3.1. Ponovna upotreba.....	31
4.3.2. Recikliranje	33
4.3.3. Odlaganje	37
4.4. Europske regulative.....	39
4.4.1. Direktiva 2006/66/EZ	39
4.4.2. Regulativa 2023/1542	41
4.5. Legislativa, prikaz stanja i primjeri iz Republike Hrvatske	43
4.5.1. Prikupljanje, recikliranje i odlaganje u RH.....	44
4.5.2. Rimac Technology	47
5. ZAKLJUČAK.....	50
LITERATURA.....	52

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema glavnih funkcija i ključnih aktivnosti logistike [1]	3
Slika 2. Hijerarhija povratne logistike prema Stocku (1992) i Kopickom (1993), izrađeno prema [3]	6
Slika 3. Shema ključnih aktivnosti zelene logistike [1]	9
Slika 4. Reduce, reuse, recycle vizual [9]	11
Slika 5. Prizmatične i cilindrične litij-ionske ćelije [12].....	14
Slika 6. Baterijski sklop (eng. <i>battery pack</i>) [14]	15
Slika 7. Osnovne komponente i princip rada litij-ionske ćelije [13].....	16
Slika 8. Pad cijena litij-ionskih baterija po kWh u američkim dolarima u logaritamskom mjerilu [15].....	17
Slika 9. Li-ion baterija u pametnom telefonu [19]	18
Slika 10. Porast broja registriranih električnih automobila u EU, izrađeno prema [22]	20
Slika 11. Usporedba ekvivalenata emisije CO ₂ tijekom proizvodnje vozila [23]	21
Slika 12. Faze potrebne za pokretanje vozila [23]	22
Slika 13. Emisije prema vrsti automobila i državama Europe [23]	22
Slika 14. <i>Battery 2030+</i> , holistički pregled [26].....	27
Slika 15. Oznaka pakiranja u transportu litijeve baterije [28].....	30
Slika 16. Tipični proces recikliranja litij-ionskih baterija [33]	34
Slika 17. Geografska karta reciklažnih postrojenja [31]	36
Slika 18. Obavezni simbol za odvojeno prikupljanje baterija i akumulatora [35]	40
Slika 19. Model automobilske baterije, Rimac Technology [46]	47
Slika 20. Prateći list za otpad [47].....	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Uobičajene aktivnosti povratne logistike, izrađeno prema [2].....	5
Tablica 2. Pokazatelji lošeg upravljanja povratima, izrađeno prema [2]	7
Tablica 3. 10 principa, Global Battery Alliance [24]	25
Tablica 4. Ključni brojevi otpada [40]	44
Tablica 5. Učinkovitost recikliranja otpadnih baterija u RH i propisani ciljevi u razdoblju 2018.-2022., izrađeno prema [44]	46

SAŽETAK

Razvojem tehnologije baterija i rastućim trendom uporabe litij-ionskih baterija te svjetskim i europskim inicijativama za smanjenje emisija stakleničkih plinova i poticanjem elektromobilnosti postavlja se pitanje povratne logistike litij-ionskih baterija odnosno njihovog odgovarajućeg zbrinjavanja i mogućnosti koje se otvaraju na kraju njihovog životnog vijeka. U ovome radu daje se pregled aktivnosti povratne logistike, definicija i način rada litij-ionskih baterija te načini njihova recikliranja, ponovne upotrebe i sigurnog odlaganja uz osvrt na zakonske okvire Europske Unije i Republike Hrvatske za prikupljanje i obradu dotrajalih baterija te također i primjer organizacije povratne logistike automobilskih litij-ionskih baterija hrvatskog proizvođača.

Ključne riječi: povratna logistika, litij-ionske baterije, održivost, ponovna upotreba, recikliranje, odlaganje, električna vozila, emisije, direktive

SUMMARY

With the advancement of battery technology and the growing trend of lithium-ion batteries use, coupled with global and European initiatives to reduce greenhouse gas emissions and promote electromobility, arises the issue concerning the reverse logistics of lithium-ion batteries, including their appropriate disposal and the opportunities that arise at the end of their life cycle. This paper provides an overview of reverse logistics activities, defines lithium-ion batteries, explores methods of recycling, reuse, and safe disposal, and considers the legal frameworks of the European Union and the Republic of Croatia for collecting and processing end-of-life batteries. Additionally, it presents an example of organizing reverse logistics for automotive lithium-ion batteries by a Croatian manufacturer.

Key words: reverse logistics, lithium-ion batteries, sustainability, reuse, recycling, disposal, electric vehicles, emissions, directives

1. UVOD

U posljednjem desetljeću svjedočimo velikom porastu upotrebe litij-ionskih baterija, potaknutom rastućim trendovima u električnoj mobilnosti, inicijativama za smanjenje stakleničkih plinova te tehnološkim napretkom. Europske strategije naglašavaju potrebu za prelaskom na ekološki prihvatljivija rješenja, ističući električnu mobilnost kao ključnu komponentu. Skora zabrana prodaje vozila na fosilna goriva dodatno potiče ovaj trend, povećavajući potražnju za litij-ionskim baterijama. No, litij-ionske baterije nisu ograničene samo na električna vozila već se uvelike koriste i u širokom spektru manjih električnih uređaja. Njihove specifične prednosti učinile su ih nezamjenjivima u svakodnevnom životu, no uz sve napore usmjerene na njihov razvoj i implementaciju na tržište, ključno je promišljati o cijelom životnom ciklusu tih baterija.

Povratna logistika litij-ionskih baterija ključna je kako bi se osiguralo odgovorno postupanje ovim energetskim izvorima. Integrirano razmišljanje o kraju životnog ciklusa kroz sve faze konstrukcije, proizvodnje i upotrebe litij-ionskih baterija nužno je za postavljanje okvira koji omogućuju recikliranje, ponovnu upotrebu i sigurno odlaganje ovih baterija. U tom kontekstu, razmatranje povratne logistike postaje bitno pitanje koje zahtijeva pažnju i planiranje kako bi se osigurala održivost i odgovornost u upotrebi litij-ionskih baterija u budućnosti.

Kako bi se razradila ova problematika, potrebno je prvenstveno razumijevanje ključnih pojmova povratne logistike te njenih aktivnosti, načina organizacije, izazova, ali prednosti i koristi koje ona donosi svojim provođenjem i litij-ionskih baterija različitih kemijskih sastava, načina rada i primjene, ali i zasebnih aktivnosti i pojmova kao što su gospodarenje otpadom, zelena logistika i održivost. Nakon usvajanja osnovnih pojmova, ovdje će se razraditi tema povratne logistike litij-ionskih baterija obuhvaćajući transport i skladištenje u povratnom toku te za to potrebnih sigurnosnih mjera, odgovarajuće i moguće načine recikliranja, ponovne upotrebe i odlaganja uz trenutne svjetske trendove o provođenju tih aktivnosti. Među vodećima u regulatornim okvirima, inicijativama i strategijama, kako na raznim područjima tako vezano i za litij-ionske baterije, je Europska Unija koja se tehnologije baterija dotiče kroz organizacije usmjerene na razvoj litij-ionskih baterija, ali i mnoge direktive koje postavljaju ciljeve za budućnost, ali i kontroliraju tok otpadnih baterija, stope prikupljanja i recikliranja. Republika Hrvatska kao članica Europske unije također prati njen primjer te kroz vlastitu legislativu provodi potrebne mjere te će se ovaj rad osvrnuti i na zakonodavni okvir i prikaz stanja povratne logistike litij-ionskih baterija u Republici Hrvatskoj.

2. POVRATNA LOGISTIKA

Povratna logistika ima veliku ulogu u gotovo, ako ne i svim industrijama. Kako bi se bar donekle predočila i razjasnila njena kompleksnost i obim, u narednim poglavljima predstaviti će se neke od njenih definicija, dati kratak pregled njenog povijesnog razvoja te njenih ključnih dijelova i aktivnosti kao i izazova i prednosti. Obzirom na trendove u svijetu i smjer razvoja industrije, a i na poveznicu sa samom temom rada, na pojam povratne logistike nadovezat će se pojmovi zelene logistike i održivosti te gospodarenja otpadom.

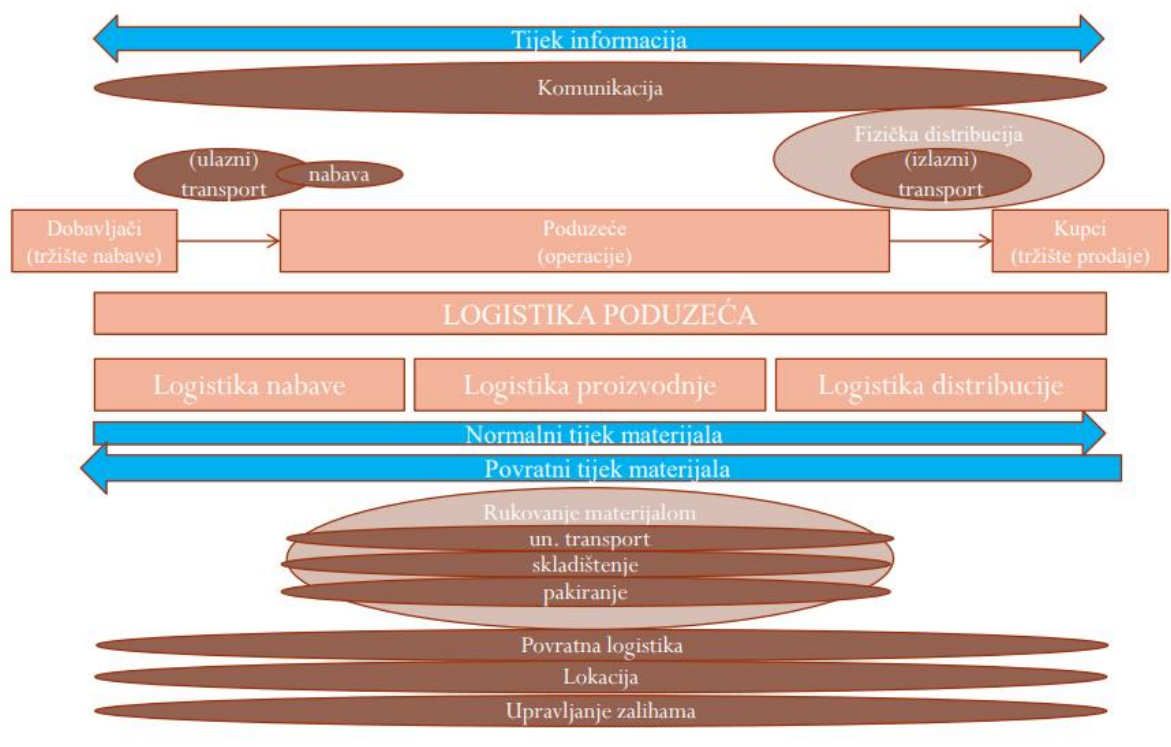
2.1. Definicija

Različiti autori imaju razne pristupe u samoj podjeli logistike kao i njezinih dijelova i aktivnosti pa striktno granice u sistematizaciji funkcija i aktivnosti logistike često ne postoje.

No, velika većina, ako ne i svi autori i stručnjaci složiti će se da je povratna logistika među nekoliko ključnih logističkih aktivnosti.

Povratna logistika je logistička aktivnost usmjerena na planiranje, izvršavanje i kontrolu svih dijelova procesa i operacija vezanih uz povratni tok materijala u svrhu ponovne upotrebe ili odgovarajućeg zbrinjavanja. Odgovarajuće zbrinjavanje može uključivati odlaganje otpada, ponekad i opasnog, recikliranje i slično, a ponovna upotreba odgovara i povratu proizvoda u situacijama reklamacija ili najma robe gdje se onda pojavljuju i pojmovi poput upravljanja povratima (eng. *returns management*) ili logistika povrata (eng. *return logistics*).

Unutar povratne logistike javljaju se aktivnosti koje pripadaju i normalnom tijeku materijala, kao što su transport, skladištenje, pakiranje i ostale. [1]



Slika 1. Shema glavnih funkcija i ključnih aktivnosti logistike [1]

Vijeće logističkog menadžmenta (eng. *The Council of Logistics Management*), sa sjedištem u Sjedinjenim Američkim Državama, definira logistiku kao:

„Proces planiranja, implementiranja i kontrole efikasnog i efektivnog toka sirovina, inventara u procesu, gotovih proizvoda i povezanih informacija od početne točke (porijekla) do kupca i točke upotrebe u svrhu ispunjavanja zahtjeva kupca.“

Povratna logistika uključuje iste aktivnosti navedene u gornjoj definiciji, ali razlika je u tome što se one provode u obrnutom redoslijedu pa ista organizacija povratnu logistiku definira kao:

„Proces planiranja, implementiranja i kontrole efikasnog i efektivnog toka sirovina, inventara u procesu, gotovih proizvoda i povezanih informacija od kupca i točke upotrebe do početne točke (porijekla) u svrhu vraćanja vrijednosti ili odgovarajućeg odlaganja.“

Ovakve definicije i pristup ističu veliku ulogu povratne logistike u samoj logistici i naglašavaju kompleksnost iste.

2.2. Povijesni razvoj

Povrat materijala i opreme je kao praksa vrlo stara, prvenstveno kroz prošlost motivirana oskudnošću resursa. Naravno, situacija se znatno mijenja pojavom jeftinih materijala, masovne proizvodnje i kulture jednokratne uporabe, međutim u takvim počecima održivi razvoj i ekološki aspekti nisu izazivali zabrinutost niti imali ulogu u upravljanju poslovanjem. Tek u sedamdesetim godinama prošlog stoljeća akademici i društvo primjećuju utjecaj takve kulture na okoliš te naglašavaju da postoje granice takvog rasta i razvoja. Pojavljuju se i počinju koristiti pojmovi poput recikliranja, ponovne upotrebe, reduciranja resursa, ekološke odgovornosti i zelenih proizvoda. Sredinom devedesetih, posebice na području Europe, takva nova perspektiva potakla je zakonske odrednice u vezi povrata proizvoda i materijala te odgovarajućeg odlaganja. Još noviji primjeri, poput prerade mobilnih telefona i vraćanja korištenog materijala ponovno u proizvodnju, pokazuju veću korist i profitabilnost u smislu stvaranja vrijednosti povratom materijala nego što je to u ekološkom aspektu. Također, politika povrata postaje ključan dio poslovanja koji omogućava dobar marketing i pariranje konkurenciji.

Kroz jačanje aktivnosti povratne logistike u navedenim aspektima jačala je i važnost te teme u praksi, ali i radovima akademika kao što su Stock, Kopicky, Fleischmann, Rogers i Tibben-Lembke, Guide i van Wassenhove. No, unatoč mnogoj literaturi posvećenoj temi Povratne logistike, sve do danas nedostaje razrade teorije na tu temu, specifičnosti i jedinstvenih definicija.

Kako je već spomenuto, koncept i praksa povratne logistike datira daleko u povijest, no porijeklo samog termina teško je odrediti. Pojmovi kao što su povratni kanali i povratni tok materijala pojavljuju se u znanstvenoj literaturi sedamdesetih godina, ali gotovo uvijek u svezi s recikliranjem. Prvu znanu definiciju povratne logistike objavilo je Vijeće logističkog menadžmenta (eng. *The Council of Logistics Management*), spomenuto u 2.1, u ranim devedesetima, a onda se je ista kroz godine neznatno mijenjala. [4]

2.3. Aktivnosti i provedba

Aktivnosti koje se provode u sklopu povratne logistike uključuju procese koje poduzeće koristi da bi prikupilo upotrebljavane, oštećene, neželjene ili zastarjele proizvode, ali isto tako i njihovu ambalažu i transportne materijale od kupca.

Najpoželjnija situacija je povrat nekoristene robe jer u tom slučaju postoji mogućnost direktne ponovne prodaje drugom kupcu, a u slučaju da postoje oštećenja, znakovi korištenja ili neispravnosti, proizvod se popravljiva ili vraća u proizvodnju kako bi se ponovno ostvarila njegova prodajna vrijednost.

Tablica 1. Uobičajene aktivnosti povratne logistike, izrađeno prema [2]

Materijal	Aktivnosti povratne logistike
Proizvodi	Povrat dobavljaču/proizvođaču Preprodaja „Outlet“ prodaja Popravak Povratak u proizvodnju Iskorištavanje dijelova i materijala Recikliranje Odlaganje/otpad
Pakiranje/Ambalaža/Sredstva za odlaganje	Ponovno korištenje Popravak Iskorištavanje dijelova i materijala Recikliranje

Ako i nakon provedenih popravaka i vraćanja u proizvodnju proizvod nema vrijednost i kvalitetu potrebnu za prodaju, ili prodaja istog proizvoda nije moguća zbog zakonskih i ekoloških razloga, poduzeće će se najčešće željeti riješiti proizvoda uz najmanje troškove.

Vrijedne komponente i dijelovi koji se mogu reciklirati bit će izdvojeni, a ostatak u konačnici svrstan u otpad.

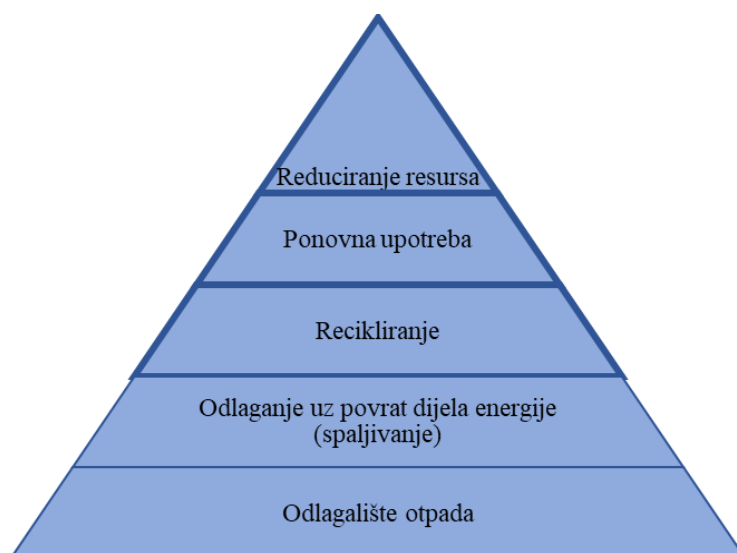
Osim na samu robu, aktivnosti povratne logistike odnose se i na materijale za pakiranje, ambalažu i sredstva za odlaganje i oblikovanje jediničnih tereta koja olakšavaju, a ponekad i omogućuju transport kao što su često palete koje su u optjecaju duži period prije nego li se i same odlažu, a i za takva sredstva postoji mogućnost popravaka oštećenja, bilo u samom poduzeću ili u kooperaciji.

Unutar Europske unije postoje zakonske odrednice za povrat sredstava koja su korištena u transportu, ali i sami proizvođači teže što češćoj ponovnoj upotrebi takvih materijala kako bi smanjili troškove. [2]

U svojim radovima Stock (1992.) i Kopicki (1993.) iznad svih ranije spomenutih aktivnosti povratne logistike još postavljaju reduciranje resursa u smislu smanjenja količine i vrsta

materijala i energije korištene u proizvodnji što dovodi do smanjenja normalnog, ali posljedično i povratnog toka materijala. Istim pristupom olakšava se, i čini učinkovitijim, recikliranje i odlaganje jer se proizvod rastavlja na manje sličnih materijala.

I ovi autori kao posljednju opciju predlažu odlagalište otpada, no kao preporučenu metodu, kada je to moguće, izdvajaju spaljivanje zbog, u tom slučaju, mogućeg povrata dijela energije. [3]



Slika 2. Hijerarhija povratne logistike prema Stocku (1992) i Kopickom (1993), izrađeno prema [3]

Naravno, za pravilno funkcioniranje i provedbu aktivnosti povratne logistike potrebna je organizacija i planiranje. Planiranje i donošenje odluka u sustavima povratne logistike mogu se poistovjetiti sa tri faze takvih procesa koje su vezane uz lanac opskrbe. Prva kao takva je faza konstruiranja u kojoj se provodi strateško planiranje i ona predstavlja proces dugoročnog donošenja odluka poput lokacija proizvodnje, proizvoda koji imaju mogućnost vraćanja u proizvodnju, transportnih puteva, marketinga i odabira sekundarnih tržišta. Sljedeća faza je faza planiranja u kojoj se donose odluke koje se odnose na period od šest mjeseci do godinu dana i uključuju politike proizvodnje i inventara, ulazak/izlazak proizvoda. Treća i posljednja faza odnosi se na svakodnevne aktivnosti kao što su radni nalozi, podjela poslova, kontrola inventara itd. [5]

2.3.1. Izazovi

Jedna od čestih poteškoća kod upravljanja povratom robe je sukob interesa proizvođača i kupca. Do neslaganja dolazi kod stavki kao što su stanje i vrijednost proizvoda te vremena isporuke ili odgovora u smislu povrata novca i slično. Kod povrata proizvoda zbog oštećenja

kupac će gotovo uvijek pretpostaviti da je do oštećenja došlo ili u transportu ili već u samoj proizvodnji, dok proizvođač može posumnjati da kupac zlorabi opciju povrata zbog vlastite loše organizacije ili oštećenja robe. Iz toga proizlazi problem određivanja vrijednosti proizvoda koji ide u povrat jer se obje strane odriču odgovornosti i žele u cijelosti namiriti svoje gubitke.

Dr. Richard Dawe s Fritz Instituta međunarodne logistike (eng. *Fritz Institute of International Logistics*) definira šest pokazatelja lošeg upravljanja povratima kako je prikazano u Tablica 2.

Tablica 2. Pokazatelji lošeg upravljanja povratima, izrađeno prema [2]

Pokazatelji lošeg upravljanja povratima	
1.	Povrati stižu brže nego što se procesuiraju ili odlažu
2.	Velika količina povrata na skladištu
3.	Neautorizirani i neidentificirani povrati
4.	Duga vremena procesuiranja povrata
5.	Neznani troškovi povrata
6.	Kupac gubi povjerenje u aktivnost popravka

Navedene stavke daju do znanja da poduzeće nema dovoljnu kontrolu nad aktivnostima povrata te ne prikuplja dovoljno podataka koji kroz dulji period omogućavaju optimizaciju aktivnosti povratne logistike i smanjenje njihovih troškova.

Nažalost, mnoga poduzeća uvode i provode Povratnu logistiku prvenstveno zbog regulativa vlasti te pritiska „zelenih“ organizacija, a ne zbog vlastitog dobitka. U takvim poslovanjima ovim aktivnostima nije dano dovoljno značaja i sredstava kao ostalima sve dok se ne primijeti posljedična velika financijska šteta.

Prema provedenom istraživanju, na kojem se bazira rad Dr. Rogers-a i Dr. Tibben-Lembke-a [2], preko 25 posto ispitanih poduzeća naglašava i kako regulative vezane uz legalno zbrinjavanje i odlaganje otpada predstavljaju određene prepreke. Pristojbe odlagališta rastu, a opcija za odlaganje opasnog otpada je sve manje te pravilno odlaganje neiskoristivog materijala postaje sve teže, a poduzeća koja pokušavaju izbjeći tu problematiku susreću se sa sankcijama i organizacijama za zaštitu okoliša. [2]

2.3.2. Prednosti

U prethodnom odlomku spomenuta je profitabilnost povratne logistike kao veća motivacija za provođenje takvih aktivnosti od ekološke osviještenosti, no samo umanjivanje vlastitih troškova i održivost koju omogućavaju aktivnosti povratne logistike nikako se ne smiju uzimati za manu. Poduzeća, čiji proizvodi su pogodni za regeneraciju, i sa strateški organiziranom povratnom logistikom mogu uštedjeti do 60 posto procijenjenog troška za izradu potpuno novog proizvoda. [5]

Jedan od glavnih ciljeva povratne logistike jest umanjivanje troškova i ušteda – materijala, vremena i novca, te daje priliku vraćanja vrijednosti proizvodu ili materijalu. Za primjer, logistika u ekonomiji Sjedinjenih Američkih Država drži udio od oko 10 posto. Međutim, takve podatke za povratnu logistiku teže je procijeniti, ali pretpostavka je da čini četiri posto od troškova logistike. [2]

Bitna prednost vraćanja u proizvodnju – regeneracije može biti skraćenje vremena isporuke jer se smanjuje potreba za rezervnim dijelovima koji onda dolaze iz povrata.

Poneke organizacije od kupaca preuzimaju i proizvode svoje konkurencije, za iskorištavanje dijelova ili prikladno odlaganje, kako bi povećali svoj udio u tržištu pa često tu uslugu provode kroz politiku popusta na vlastiti proizvod uz predaju zastarjelog tuđeg proizvoda.

Povrat proizvoda proizvođaču na kraju životnog ciklusa, pogotovo u slučaju poduzeća visoke tehnologije, sprječava da vrijedne komponente, s time i informacije, preuzima konkurent ili da se one preprodaju na sekundarnom tržištu.

Prema teoriji Vlăduțescu & Ciupercă, povratna logistika do neke mjere može ublažiti i Forrester efekt. [5] Forrester efekt ili efekt biča (eng. *Bullwhip effect*) predstavlja neočekivane varijacije i poremećaje u potražnji koji od kupca do proizvođača imaju sve veći utjecaj na procese. [6] Navedeni autori pokazuju kako povratna logistika i točnije povrat proizvoda mogu ublažiti ovaj efekt upijajući fluktuacije u potražnji od samog početka opskrbnog lanca nadalje jer su troškovi povratne logistike manji od troškova varijacija.

2.4. Zelena logistika i održivost

Kako je spomenuto u 2.2, sve većim razvojem društva, industrije i proizvodnje javlja se zabrinutost oko utjecaja istih na okoliš i propitkuju se granice takvog rasta, odnosno ekološka, socijalna i ekonomska održivost. Iz navedenih razloga javljaju se pojmovi poput zelene

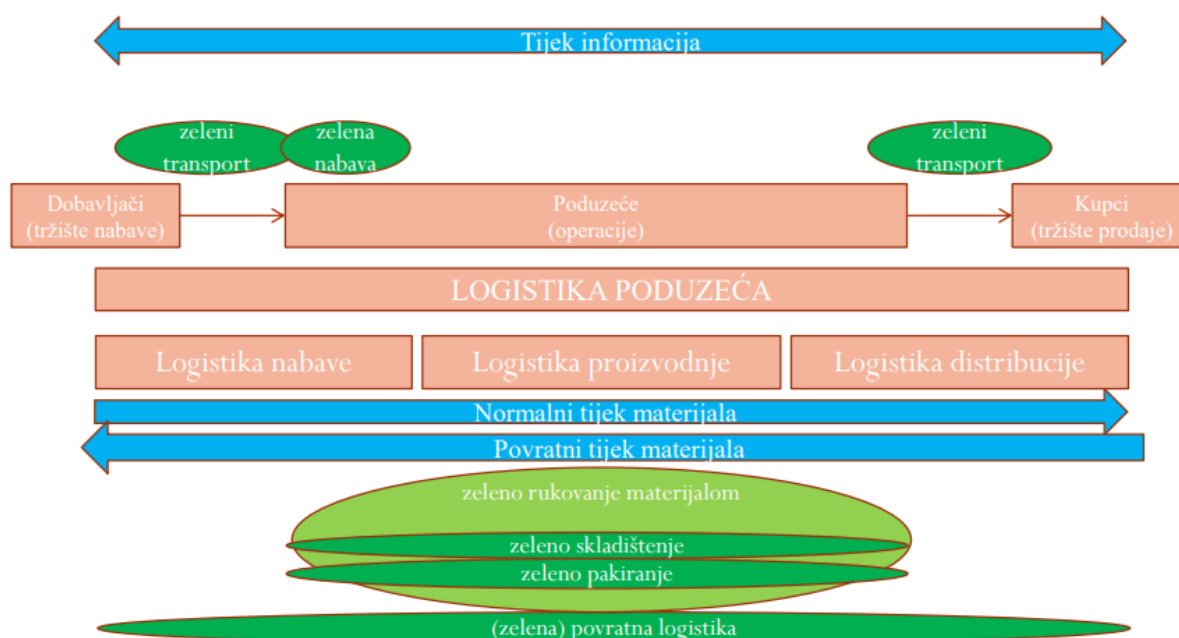
logistike (eng. *green logistics*) i upravljanja zelenim lancima opskrbe (eng. *green supply chain management*, GSCM).

Zelena logistika uključuje svijest o okolišu u gotovo sve aspekte logistike, kao što su nabava, transport, skladištenje, pakiranje, rukovanje materijalom i naravno, povratna logistika, dok GSCM takvo ekološko razmišljanje integrira još dublje, u cijeli lanac opskrbe, odnosno u samo konstruiranje proizvoda, odabir materijala, proizvodnju, isporuku i zbrinjavanje proizvoda na kraju njegovog životnog vijeka. [1]

Dakle, oba pojma u obzir uzimaju okolišne i društvene faktore i s time nisu orijentirani na ekonomski utjecaj logistike i poslovanja na organizaciju, već na utjecaj logistike i poslovanja organizacije na društvo i okoliš, ponajviše u smislu zagađenja.

Aktivnosti koje zelena logistika još nadodaje osnovnim aktivnostima logistike jesu, primjerice, određivanje i izmjera parametara utjecaja različitih strategija distribucije na okoliš, smanjenje količine energije korištene u aktivnostima logistike i minimiziranje otpada te upravljanje njegovim zbrinjavanjem.

Povratna logistika i zelena logistika dva su različita koncepta, ali se u određenim područjima preklapaju i međusobno nadograđuju, na primjer u recikliranju i odlaganju te su oba principa od važnosti opskrbnom lancu i pridonose ostvarivanju održivosti. [7]



Slika 3. Shema ključnih aktivnosti zelene logistike [1]

Emisija stakleničkih plinova je tema koja u društvu izaziva mnogo zabrinutosti, a logistički sustavi, točnije transport, znatno pridonose ovoj vrsti zagađenja. Prema Eurostatu, transport je odgovoran za gotovo 25% ukupne emisije CO₂ u Europi.

Dodatno, transport najviše ovisi o fosilnim gorivima koja su neobnovljivi izvori energije pa se na temelju ovakvih činjenica mora povući pitanje dugotrajne održivosti takvih sustava, čime se, unazad nekoliko desetljeća, bave razne organizacije i tijela vlasti.

Jedan od ciljeva i karakteristika provedbe zelene logistike je upravo smanjenje emisija stakleničkih plinova, ali i povećani udio recikliranja i ponovne upotrebe, korištenje obnovljivih izvora energije, orijentiranost ka održivosti, odnosno dugoročno planiranje s prioritetom minimalnog utjecaja na okoliš. [7]

Velika prijetnja za okoliš su, također, opasni i otrovni materijali koji su ranije često, kao i ostali otpad, slani na odlagališta. No, iz razloga kapaciteta odlagališta – održivosti, i štetnosti određenih materijala, donose se regulative koje ograničavaju vrste otpada koji se može na taj način zbrinjavati čime se potiče, ako je moguće, recikliranje i odgovarajuće zbrinjavanje te su poduzeća prisiljena okrenuti se i ekološki prihvatljivim alternativama odlaganja otpada.

Razlog iz kojeg se poduzeća još priklanjaju zelenoj logistici je marketing. Prikazuju se kao „prijatelji okoliša“ zbog pritiska kupaca koji sve više biraju proizvode koji su ekološki prihvatljivi. [5] Na taj način ostvaruje se prednost nad konkurentom, ali i profit. Zelena logistika, odnosno njene aktivnosti su aktivnosti koje dodaju vrijednost proizvodu (eng. *value-added service*, VAS). Što znači, ako je proizvod „zelen“ i ekološki prihvatljiv te su na njemu provedene dodatne logističke aktivnosti kako bi on bio takav, te aktivnosti nisu trošak, već donose vrijednost proizvodu, odnosno čine udio u prodajnoj cijeni proizvoda.

Uz prednosti priklanja zelene logistici još treba naglasiti da osim što se poduzeće ističe na tržištu, stvara reputaciju i pozitivnu sliku poslovanja, smanjenjem otpada i unaprjeđenjem učinkovitosti ostvaruje uštedu, olakšava prilagodbu zakonskim smjernicama, smanjuje negativan utjecaj na okoliš te može pridonijeti vlastitoj otpornosti na promjene u opskrbnom lancu kao što su, primjerice, rast cijene nafte. [7]

Osim „zelenog razmišljanja“, ključevi održivog razvoja su povratna logistika i upravljanje lancem opskrbe (eng. *Supply chain management*).

Brundland definira održivi razvoj kao „zadovoljavanje potreba sadašnjosti bez ugrožavanja mogućnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe“ pa se povratna logistika može shvatiti kao prilagodba takve definicije na razini poduzeća koje teži osigurati da se vrijednost proizvoda u potpunosti iskoristi, efektivno i efikasno. [4]

Dok je tržište pokretano zakonom ponude i potražnje, upravljanje lancem opskrbe i inovacije u području logistike i održivosti imaju veliku ulogu u opstanku poduzeća na, pogotovo globalnom, tržištu. [7]

2.5. Gospodarenje otpadom

Gospodarenje otpadom razlikuje se od pojma povratne logistike jer su njegova domena proizvodi koji nemaju potencijala za ponovnu upotrebu, odnosno gospodarenje otpadom osigurava efektivno i efikasno prikupljanje i obradu otpada, dok je povratna logistika, kako je već naglašeno, širi pojam, a zbrinjavanje otpada samo je jedna od njenih aktivnosti. Razlika među dva navedena pojma vidljiva je i u toku materijala gdje su proizvodi u povratu usmjereni ka postupcima vraćanja vrijednosti i ponovnoj upotrebi, a tok otpadnog materijala ka odlagalištima ili spalionicama nakon raznih postupaka obrade i pripreme za odlaganje.

Ovisno o politici i postupku povratne logistike, proizvodi se ne vraćaju nužno do točke porijekla, već na drugačiju točku oporavka ili, u slučaju otpada, odlaganja, što je dokaz stalnog porasta kompleksnosti povratne logistike i potrebe za upravljanjem postupcima u cijelom opskrbnom lancu.

Kao u povratnoj logistici, tako i u gospodarenju otpadom i recikliranjem, reduciranje resursa treba biti ključan aspekt kako bi se smanjenjem korištenog materijala i proizvodnjom okolišu prihvatljivijih proizvoda u krajnosti smanjila količina proizvedenog otpada i olakšalo njegovo odlaganje. Na takvom konceptu nastala je i široko poznata jednostavna hijerarhija „reduce, reuse, recycle“ (reduciraj, ponovno upotrebi, recikliraj) sa svojom vizualnom reprezentacijom Slika 4. koja je također u širokoj primjeni.



Slika 4. Reduce, reuse, recycle vizual [9]

Ponovna upotreba proizvoda omogućuje se uz postupke oporavka i popravka proizvoda, a gdje to nije moguće, recikliranje je najbolja opcija za iskorištenje upotrebljivanih materijala.

Materijali u povratnom toku koji ne mogu biti procesuirani kroz te elemente ulaze u tok otpada.

Prema europskoj Direktivi o obradi otpada prije odlaganja iz listopada 2007. godine (eng. *The Producer Pre-Treatment Requirement of the Landfill Directive*) zabranjuje se slanje otpada koji nije opasan na odlagalište bez prethodne obrade, što je odgovornost samog proizvođača otpada, s ciljem smanjenja štetnog utjecaja na odlagalište i okoliš i poticanja iskorištenja dijela materijala kroz recikliranje. Direktiva ističe tri točke prema kojima se provodi obrada otpada prije odlaganja:

1. Obrada mora uključivati fizički, termički, kemijski ili biološki proces kao i sortiranje.
2. Obrada mora promijeniti karakteristike otpada.
3. Sve to kako bi se:
 - smanjio volumen otpada
 - smanjila opasnost ili otrovnost otpada
 - olakšalo rukovanje otpadom.

Danjim direktivama koje se dotiču opasnog otpada i bolje propisuju kriterije za njegovo odlaganje došlo je do smanjenja licenciranih odlagališta koja mogu primati opasan otpad što dovodi do izvoza takvog otpada preko regionalnih granica te značajnog porasta cijene prikupljanja i odlaganja istog.

Također, kako bi se spriječilo neregulirano kretanje i odlaganje opasnog otpada prema europskoj Direktivi o opasnom otpadu iz 2005. godine (91/689/EEC) proizvođači opasnog otpada dužni su isti prijaviti i registrirati vladinoj organizaciji prije transportiranja materijala sa svoje lokacije. Na ovaj način omogućava se praćenje opasnog otpada i odgovarajuće rukovanje istim dok ga ne preuzme tijelo odgovorno za njegovo odlaganje.

Sa sve više smjernica, direktiva i regulativa za odlaganje otpada razvijaju se mnogi inovativni sustavi za gospodarenje otpadom koji uključuju zbrinjavanje raznih vrsta materijala i najčešće se predlažu srednje velikim poduzećima koja ponekad i ne proizvode veliku količinu otpada, ali svejedno moraju pratiti zakonske odredbe pa takva poduzeća nerijetko ugovaraju zbrinjavanje otpada sa velikim kooperatorima. [8]

3. LITIJ – IONSKE BATERIJE

Porastom interesa za smanjenjem emisija štetnih plinova nastalih upotrebom fosilnih goriva te time i porastom interesa za električnim vozilima potaknutim raznim inicijativama i odredbama, ali i potrebom za većom učinkovitosti izvora i spremnika energije, raste i interes za litij-ionskim baterijama koje postaju često otvorena tema među stručnjacima, ali i društvom. No, kako bi se mogla razumjeti „pomama“ za ovim baterijama i njihova trenutna važnost, potrebno je razmotriti njihov način rada, komponente, primjenu, prednosti i mane ili štetnost.

3.1. Definicija i povijesni razvoj

Prije zalaženja u rad i funkciju litij-ionskih baterija, poželjno je krenuti od samog pojma baterije. Prema Ministarstvu zaštite okoliša i prirode baterija se definira kao „*svaki izvor električne energije proizvedene izravnim pretvaranjem kemijske energije i koji se sastoji od jedne ili više primarnih baterijskih članaka (koje nisu namijenjene ponovnom punjenju) ili jedne ili više sekundarnih baterijskih članaka (koje su namijenjene ponovnom punjenju)*“.

[10] Pojednostavljeno, baterija je uređaj koji pretvara kemijsku u električnu energiju. No, ovdje je upotrijebljena definicija koju izdaje Ministarstvo jer će se rad na istu, u kasnijim poglavljima, referirati.

Prvi eksperimenti s litijevim baterijama krenuli su 1912. godine, no prve litijeve baterije, bez mogućnosti punjenja, nisu komercijalizirane sve do 70-ih godina prošlog stoljeća. U to vrijeme, 1970.-ih, započeo je razvoj litij-ionske baterije odnosno punjive baterije koja danas pokreće sve od prijenosne elektronike do električnih vozila.

Stanley Whittingham, engleski kemičar, istraživao je ideju nove baterije koja bi se mogla ponovno napuniti za kratko vrijeme i jednoga dana mogla zamijeniti energiju fosilnih goriva. Koristio je litij i titanijev disulfid za elektrode, ali takva kombinacija izazvala je sigurnosnu zabrinutost, pogotovo nakon što su takve baterije dovodile do kratkog spoja i zapaljenja.

1980.-ih, John B. Goodenough, profesor na Teksaškom sveučilištu, za materijal katode umjesto titanijevog disulfida odabrao je litij kobalt oksid što je udvostručilo energijski potencijal baterije.

Akira Yoshino sa Meijo sveučilišta u Japanu je 1985. godine promjenu napravio u korištenom materijalu anode te reaktivni litij zamijenio karbonskim materijalom što je bateriju učinilo

znatno sigurnijom i njen rad stabilnijim te se ovaj napredak smatra i prvim prototipom litij-ionske baterije koji je Sony komercijalizirao već 1991.

Zajedno su ova tri znanstvenika sa svojim otkrićima dovela do litij-ionske baterije kakvu danas poznajemo, a isti su za svoj rad i doprinos u razvitku litij-ionske baterije 2019. primili Nobelovu nagradu za kemiju. [11]

Litij je metal male gustoće, ali velikog elektrokemijskog potencijala, a litij-ionske baterije, kao što i samo ime naslućuje, sadrže litijeve ione koji svojim gibanjem omogućavaju punjenje odnosno pražnjenje baterije. [11]

Litij-ionske (Li-ion) baterije dolaze u raznim veličinama i oblicima, a same ćelije mogu biti cilindrične te izgledom podsjećaju na AA baterije ili mogu biti prizmatične. [12] Ćelije se zatim povezuju serijski, paralelno ili u kombiniranim konfiguracijama ovisno o potrebnom većem naponu ili struji. Tako povezane ćelije čine modul, a više modula čini baterijski sklop (eng. *battery pack*) na koji se često referira kao samu bateriju. [13]



Slika 5. Prizmatične i cilindrične litij-ionske ćelije [12]



Slika 6. Baterijski sklop (eng. *battery pack*) [14]

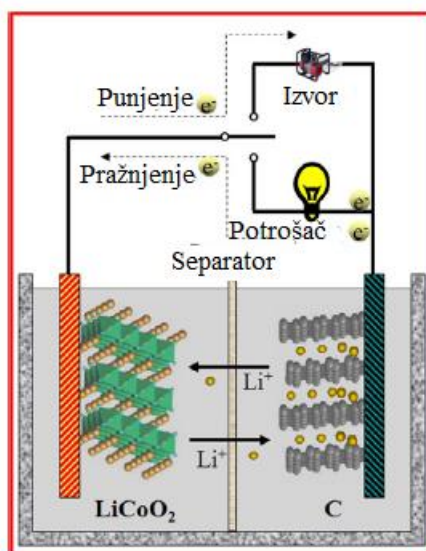
Bez obzira na oblik, litij-ionska ćelija sastoji se od četiri ključna dijela:

1. Katoda
2. Anoda
3. Separator
4. Elektrolit

Pozitivna elektroda (katoda) i negativna elektroda (anoda) obje se nalaze u elektrolitu (najčešće tekućina, no može biti i krutina) koji sadrži litijeve ione i omogućava njihovo kretanje. Elektrode su međusobno odvojene separatorom (polimernom membranom visoke poroznosti) koja omogućava prolazak iona, ali ne i elektrona, među elektrodama. [13]

Kako bi to bilo moguće i elektrolit mora imati karakteristike visoke ionske vodljivosti, ali bez električne vodljivosti, a da bi se omogućio protok elektrona, elektrode moraju biti električki međusobno povezane, a one same izvedene kao krute metalne rešetke, kao kod olovnih baterija, ili aktivni elektrodni materijal nanesen na metalnu foliju koja služi kao vodič struje kao što je to kod litijevih, ali i nikalnih baterijskih ćelija. Za negativnu elektrodu klasično se koriste grafit i karbonski materijali, ali u novije vrijeme sve više i materijali temeljeni na siliciju, dok se za pozitivnu elektrodu najčešće koriste litij nikal mangan kobalt oksid (LiNiMnCoO_2 ili NMC), litij nikal kobalt aluminijski oksid (LiNiCoAlO_2 ili NCA), litij mangan oksid (LiMn_2O_4 ili LMO), litij željezo fosfat (LiFePO_4), litij kobalt oksid (LiCoO_2 ili LCO) ovisno o upotrebi.

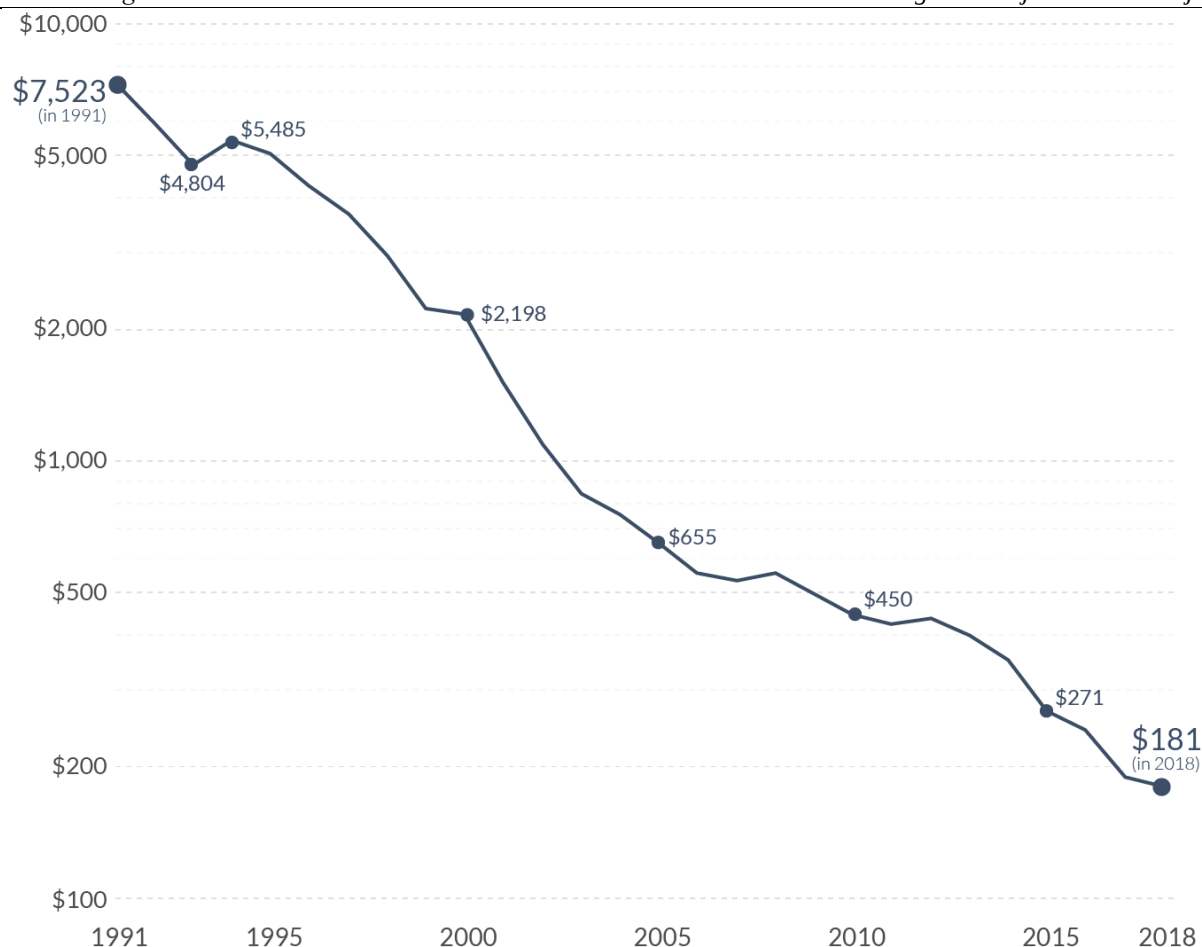
Separator može biti izrađen od raznih materijala, ali mora biti tanak i porozan kako bi bio moguć prolazak nabijenih iona, a kako se tu radi o polimerima u obzir se uzimaju visoke temperature kako ne bi došlo do začepeljivanja pora ili prodiranja oštih rubova ili izraslina na pločama elektroda što bi dovelo do kratkog spoja. [11]



Slika 7. Osnovne komponente i princip rada litij-ionske ćelije [13]

3.2. Tehnološki napredak i primjene

Ono što fosilna goriva još uvijek čini dominantnim izvorima energije je njihova niska cijena, no to se sve više mijenja padom cijena obnovljivih resursa kao što su sunčeva i energija vjetra, ali i spremnika energije kao što su litij-ionske baterije koje su sve više u upotrebi. Od njihove komercijalizacije 1991. njihova cijena pala je za više od 95% dok njihov kapacitet, uz konstantan razvoj, raste. Prema tome, za svako udvostručenje kapaciteta li-ion baterije njihova je cijena padala za oko 20%. [15]



Slika 8. Pad cijena litij-ionskih baterija po kWh u američkim dolarima u logaritamskom mjerilu [15]

Padom cijena baterija tempo snižavanja je usporavao, a predviđanje za 2024. godinu bio je pad ispod 100 \$/kWh. No, zbog rasta cijena sirovina i izazova u opskrbnom lancu uzrokovanih pandemijom COVID-19, u 2022. godini prvi puta je zabilježen porast cijena li-ion baterija za 7% u odnosu na 2021. godinu te se predviđanje o padu cijene ispod 100 \$/kWh čini ostvarivim tek u 2026. godini.

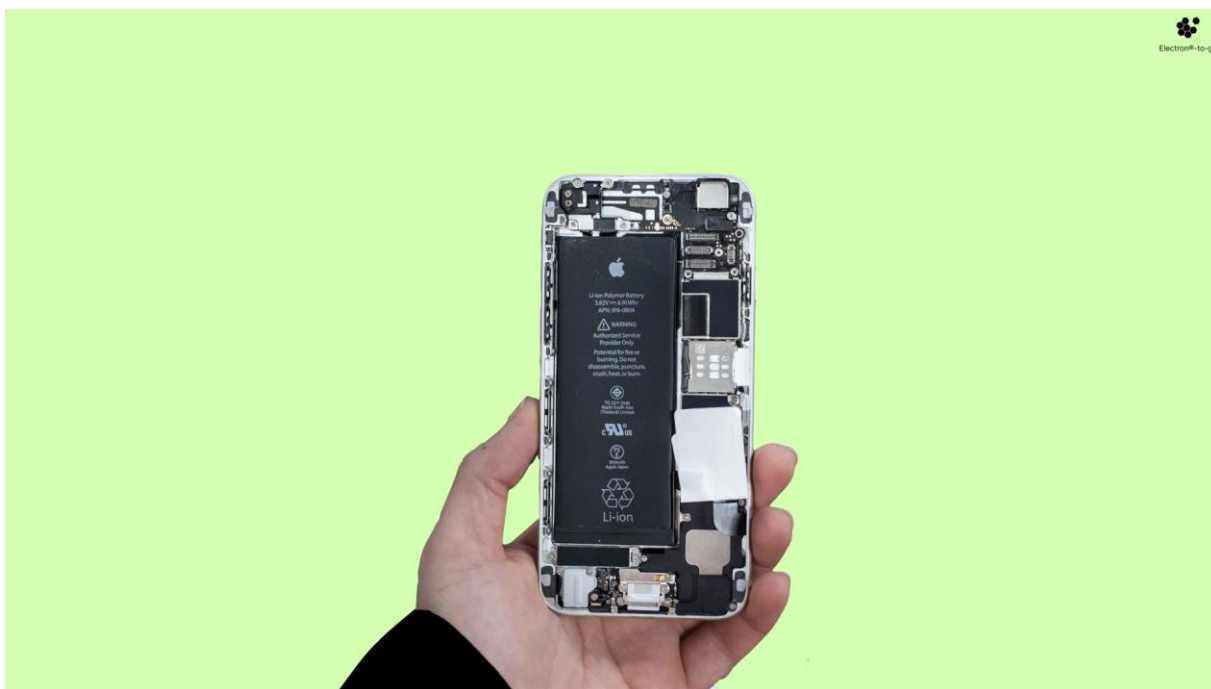
Trenutno, najniže cijene li-ion baterija su u Kini, sa oko 130 \$/kWh dok iste u SAD-u koštaju u prosjeku oko 24% više, a u Europi čak 33% više. [16]

Spomenuti pad cijena te s time i veća pristupačnost litij-ionskih baterija kao i njihove prednosti poput veće energetske gustoće po jedinici mase, u pola manja stopa pražnjenja u usporedbi s najbližom alternativom (NiCd) te životni vijek preko 1000 ciklusa pražnjenja pridonijele su njihovoj sve široj primjeni.

Prijenosni elektronički uređaji

Trenutno, vodeća primjena litij-ionskih baterija je u prijenosnim elektroničkim uređajima kao što su mobilni telefoni, digitalne kamere, GPS uređaji, tableti i prijenosna računala.

Kako su se razvijali mobilni telefoni do današnjih pametnih telefona rasla je i potreba za većim kapacitetom baterija zbog mnogih novih energijski zahtjevnih funkcija. Za primjer, model Motorola iz 2000. godine sa li-ion baterijom od 680 mAh omogućavao je oko četiri sata razgovora i 75 sati rada bez korištenja telefona, dok je za pametne telefone, kako bi podržali operativni sustav poput Androida potreban kapacitet preko 2320 mAh, a današnji telefoni koriste baterije kapaciteta i oko 4500 mAh koje, nakon kombinacija raznih napredaka, pružaju i jednu od najvažnijih funkcija današnjih pametnih telefona, a to je brzo punjenje (eng. *quick-charge*, QC).



Slika 9. Li-ion baterija u pametnom telefonu [19]

Prednost primjene litij-ionskih baterija, ne samo u mobilnim telefonima, nego i u tabletima i prijenosnim računalima je mogućnost njihovog oblikovanja da što učinkovitije zauzmu slobodan prostor u uređaju, a s tom karakteristikom i s visokom energijskom gustoćom i malom masom predstavljaju gotovo jedine kandidate za uređaje poput pametnih satova, naočala i sličnih „uređaja budućnosti“. [17]

Automobilska industrija

Zbog već na početku navedenih prednosti, litij-ionske baterije u primjeni su i u automobilske industriji. No, u uporabi nisu samo u električnim vozilima, već ih neki proizvođači koriste i u automobilima sa motorima s unutarnjim izgaranjem umjesto konvencionalnih olovniha baterija odnosno u ulozi akumulatora čime se postiže do 10 kilograma manja masa.

Naravno, općenito možda najpoznatija primjena litij-ionskih baterija je u hibridnim i električnim vozilima. Kod hibridnih električnih vozila (HEV) motor s unutarnjim izgaranjem može pokretati vozilo ili pak sagorijevanjem goriva puniti električni motor (bateriju) koji onda pokreće vozilo, ovisno o vrsti hibridnog vozila. Plug-in hibridna električna vozila (PHEV) su pak hibridna vozila s mogućnošću punjenja baterija na električnoj mreži, a kada se njihova baterija isprazni do određene razine, motor s unutarnjim izgaranjem izravno preuzima pokretanje vozila ili puni bateriju, dok je kod električnih vozila (EV) litij-ionska baterija jedini izvor energije.

Prethodno su navedene neke od ključnih primjena, no područje upotrebe litij-ionskih baterija je mnogo šire od spomenutog te se one koriste i u alatima poput motornih pila, kosilica i trimera, ali i manjim uređajima kao što su električne cigarete i ručne igračke konzole, a što se tiče električnih vozila, osim u automobilima, ove baterije imaju primjenu i u električnim romobilima i motociklima.

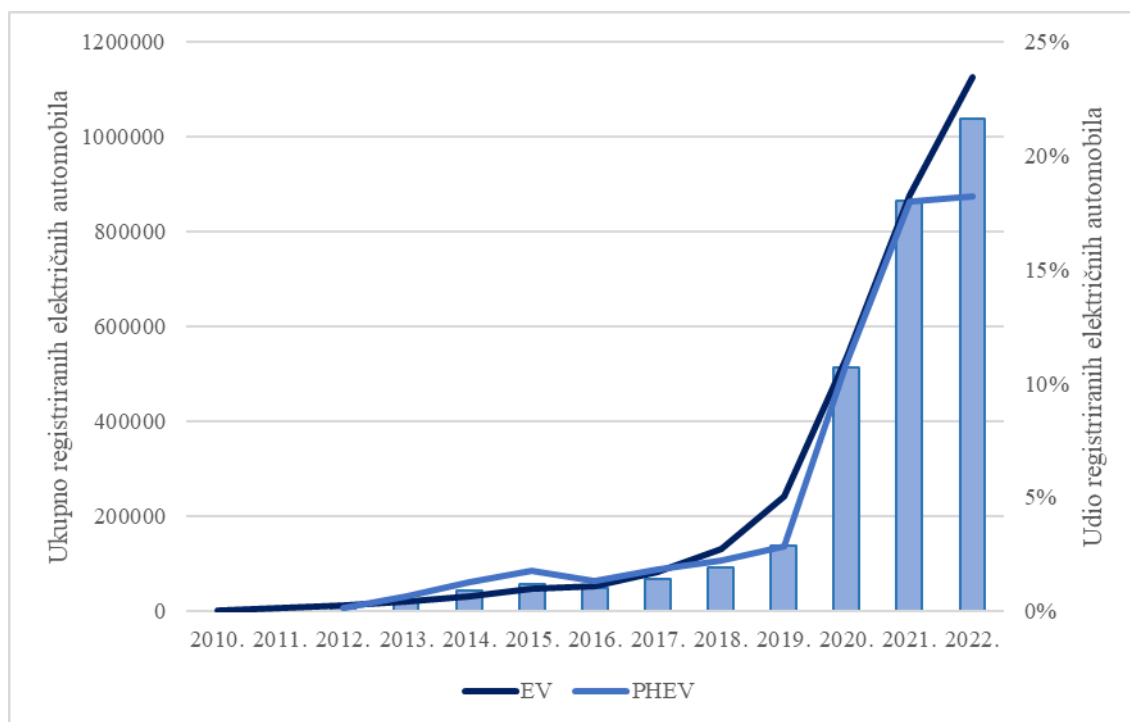
3.3. Ciljevi Europske unije i porast broja električnih vozila

Broj litij-ionskih baterija u upotrebi kontinuirano raste, a još se veći porast očekuje, prvenstveno u Europi, točnije Europskoj uniji, zbog njenih regulativa i ciljeva za smanjenje emisija CO₂ i ostvarenje klimatske neutralnosti, a obzirom da cestovni promet čini petinu emisija CO₂ u Europskoj uniji, postavlja se skoriji cilj smanjenja emisija za 55% u usporedbi sa 2021. godinom, kada su u pitanju osobni automobili i 50% za kombije (laka gospodarska vozila) do 2035. godine u sklopu paketa „Spremni za 55%“ u kojem EU revidira zakonodavstvo u mnogim sektorima, ne samo prometu. [20]

Od iste, 2035. godine, na snagu stupa zabrana prodaje novih automobila i kombija s motorima s unutarnjim izgaranjem, što znači da svako novo vozilo te vrste na tržištu ne smije emitirati CO₂. Ova zakonska regulativa ne zahvaća postojeće automobile, ali životni vijek prosječnog

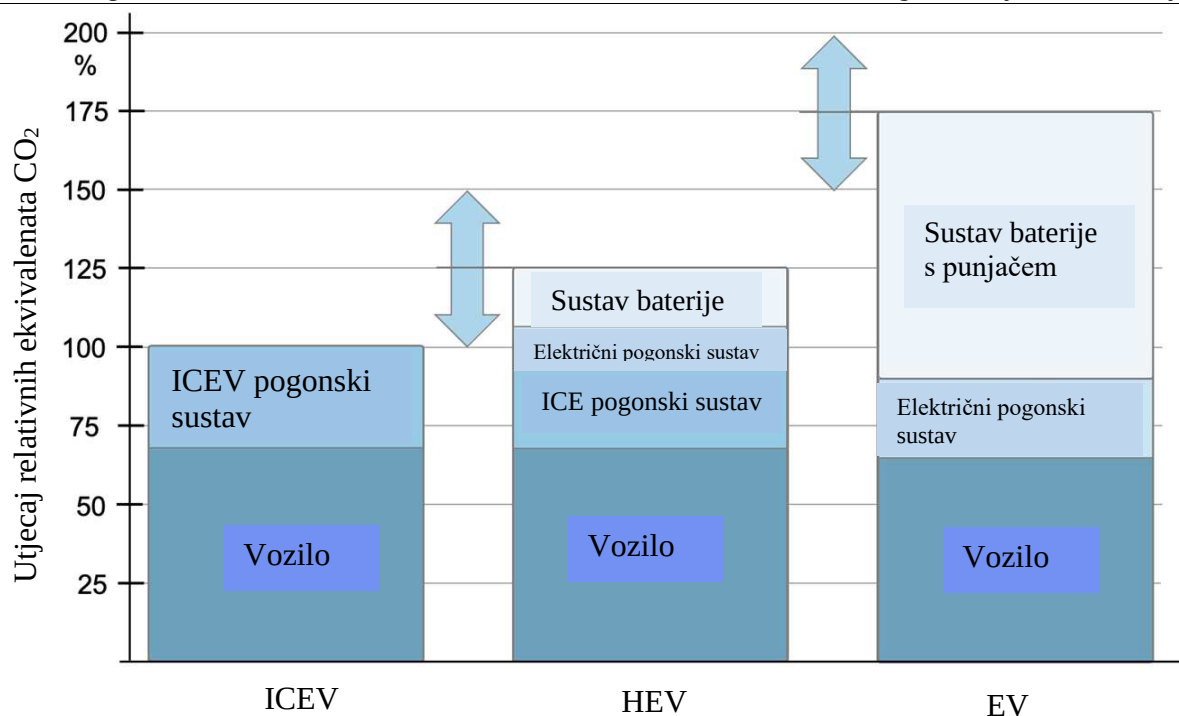
automobila je 15 godina te je stoga 2035. ključna godina za ostvarenje konačnog cilja EU – CO₂ neutralnost svih automobila u cestovnom prometu do 2050. godine. Obzirom na spomenute regulative i zabrane i Europski parlament predviđa usmjerenost trenda ka električnim vozilima zbog cjenovne pristupačnosti u odnosu na alternative, vodika i e-goriva odnosno sintetičkog goriva. Također ističu kako je cijena električne energije trenutno niža od cijena fosilnih goriva, iako su danas električni automobili skuplji, ali nadaju se da će nova pravila potaknuti proizvođače na razvoj i inovacije koje će učiniti njihove proizvode pristupačnijima. [21]

Od 2019. godine udio registriranih električnih vozila u EU je znatno porastao, sa okvirnih 3% do čak 22%, a u prijelazu iz 2021. u 2022. godinu došlo je razdvajanja trenda električnih vozila (EV) i plug-in hibrida (PHEV). Broj novoregistriranih električnih vozila porastao je za 25% u tom razdoblju, dok je broj plug-in hibrida stagnirao. [22]



Slika 10. Porast broja registriranih električnih automobila u EU, izrađeno prema [22]

Obzirom na spomenuti porast broja električnih vozila i ciljeva Europske unije koje se tiču smanjenja emisija stakleničkih plinova, ponajviše CO₂ napraviti će se kratak osvrt na ekvivalent emisije CO₂ prilikom same proizvodnje električnih automobila, a s time i litij-ionskih baterija te usporedba ekvivalenata emisije CO₂ konvencionalnih i električnih automobila.

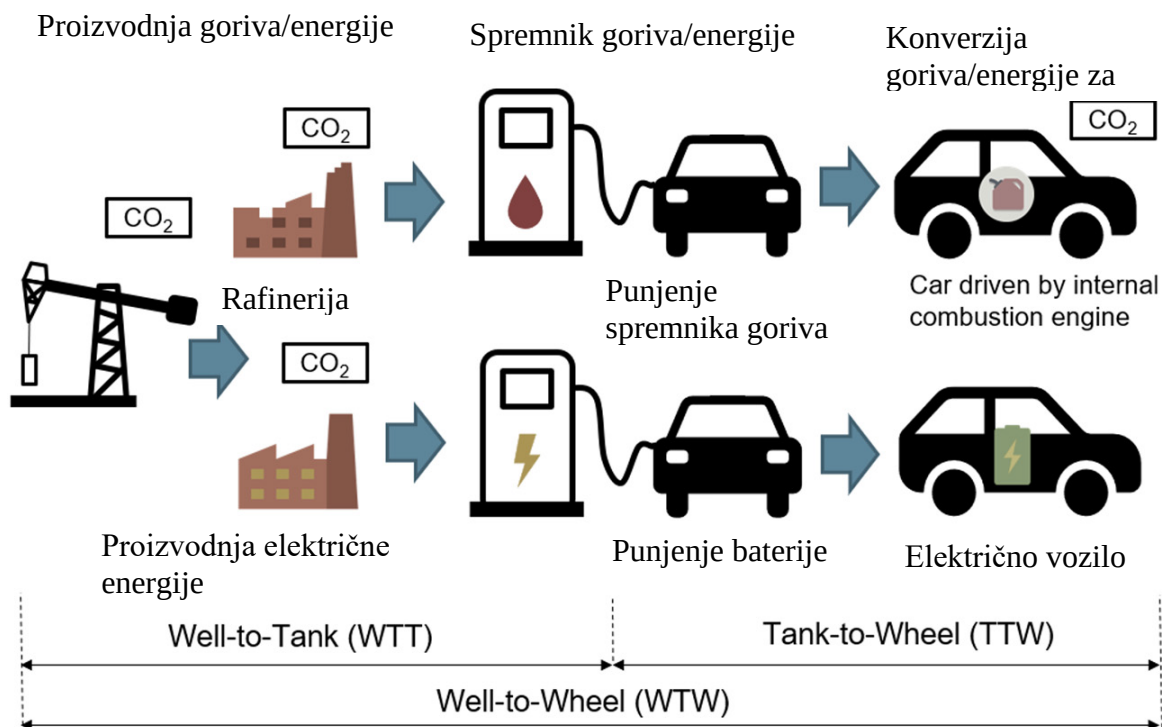


Slika 11. Usporedba ekvivalenata emisije CO₂ tijekom proizvodnje vozila [23]

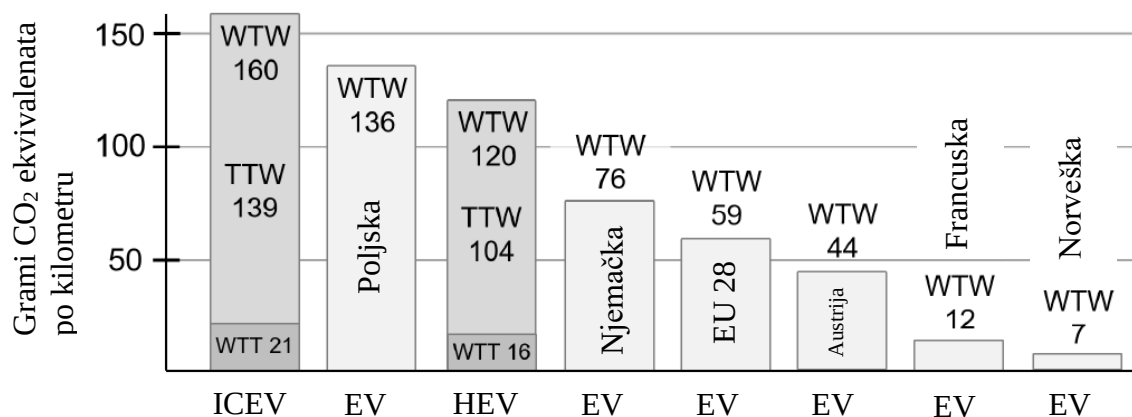
Dijagram prikazuje da proizvodnja električnih vozila ima 50 do 100% veći ugljični otisak (eng. *carbon footprint*) od automobila sa konvencionalnim pogonskim sustavima, odnosno motorima s unutarnjim izgaranjem ovdje označenim kao ICEV (eng. *Internal Combustion Engine Vehicle*), a taj postotak ovisi gotovo isključivo o proizvodnji baterije, njenim parametrima, veličini i tehnologiji proizvodnje.

Krenuvši od same proizvodnje, treba uzeti u obzir da se CO₂ i ostali staklenički plinovi ne emitiraju samo prilikom same vožnje automobila, već kroz cijeli njegov životni ciklus.

Na Slika 12. su prikazane faze u kojima dolazi do emisija, a koje su potrebne samo za pokretanje vozila. Emisije nastale u fazi proizvodnje goriva ili električne energije potrebne za pokretanje vozila označene su kao WTT (eng. *well-to-tank*) emisije. TTW (eng. *tank-to-wheel*) emisije su one koje se najčešće uzimaju u obzir u raznim raspravama o štetnosti automobila za okoliš, a to su emisije nastale pretvorbom energije u samom vozilu. WTT i TTW emisije kada se zbroje čine WTW (eng. *well-to-wheel*) emisije koje zapravo predstavljaju pravi učinak ekvivalenta emisije CO₂ koji je pridružen pojedinom automobilu u fazama potrebnim za njegovo pokretanje.



Slika 12. Faze potrebne za pokretanje vozila [23]



Slika 13. Emisije prema vrsti automobila i državama Europe [23]

Iz Slika 13. vidljivo je da hibridna vozila imaju mogućnost srezati WTW emisije za 25% u odnosu na konvencionalna vozila s motorima s unutarnjim izgaranjem, a ovisno o WTT fazi mogu se, kako je u Norveškoj, ukupne WTW emisije reducirati na čak 4% u usporedbi s ICE vozilima jer električna vozila u TTW fazi ne emitiraju CO₂, a u državama kao što su Francuska i Norveška već sama proizvodnja električne energije ima niski ugljični otisak. [23]

Ako se u obzir uzmu podaci iz Slika 12. i Slika 13. zaključivo je da ranije spomenuti ciljevi Europske unije, ako provedeni, zaista daju tražene rezultate, međutim kako bi se zaista izračunao stvarni ekvivalent emisije CO₂ koji pripada jednom automobilu kroz njegov cijeli životni vijek potrebno je u obzir uzeti i s njima usporediti podatke dane u Slika 11. te emisije nastale tijekom završne faze životnog vijeka vozila, koja uključuje rastavljanje, odvajanje, recikliranje kao i termičke i druge procese. No, takve usporedbe nisu tema ovoga rada te se ovdje neće provoditi.

4. POVRATNA LOGISTIKA LITIJ – IONSKIH BATERIJA

Kako je navedeno u prijašnjem poglavlju, litij-ionske baterije postaju ključni spremnici energije u mnogim sferama industrije te stoga pitanje povratne logistike litij-ionskih baterija kao i nužnost odgovornog i učinkovitog upravljanja cijelim njihovim životnim ciklusom postaje neizostavno.

Prije nego li se mogu razmatrati pojedinosti konkretno povratne logistike litij-ionskih baterija bilo je potrebno razumjeti pojam povratne logistike kao logističke aktivnosti (2.) te koncept litij-ionskih baterija sa njihovom osnovnom građom i trendovima upotrebe (3.).

Povratna logistika osim što pridonosi održivosti, ima ključnu ulogu u smanjenju štetnog utjecaja na okoliš i racionalizaciji resursa, a u ovom će se poglavlju analizirati izazovi i prilike koji proizlaze iz završetka životnog vijeka litij-ionskih baterija u smislu procesa i načina transporta, skladištenja, recikliranja, sigurnog odlaganja i ponovne upotrebe uključujući zakonske regulative i smjernice Europske unije i Republike Hrvatske koje se odnose na to pitanje te zašto je pažljivo regulirana i organizirana povratna logistika litij-ionskih baterija ključna, ne samo za očuvanje okoliša, već i za podržavanje rastuće potrebe za energetski učinkovitim rješenjima bliske budućnosti.

Za primjer kako se sve do sad navedeno provodi u praksi bit će iznesen dio načina poslovanja hrvatskog proizvođača automobilskih litij-ionskih baterija Rimac Technology u pogledu povratne logistike litij-ionskih baterija i općenite organizacije zbrinjavanja istih unutar poduzeća.

4.1. Dugoročni planovi Europske unije i svijeta

Prateći hijerarhiju predstavljenu u 2.3. (Slika 2.) aktivnosti povratne logistike započinju već u samom planiranju proizvodnje te kako bi se olakšala i pospješila povratna logistika, a ujedno i postigla određena razina održivosti potrebno je u sam dizajn proizvoda uključiti upravljanje krajem životnog ciklusa proizvoda, točnije identificirati ključne faze proizvoda i karakteristike koje pospješuju mogućnost sekundarnog života i recikliranja. Bez takve politike i planiranja, dodatne mjere na završetku životnog ciklusa proizvoda (litij-ionske baterije) značajno poskupljuju i otežavaju proces demontaže i recikliranja. No, dizajn prikladan reciklaži sam povisuje početne troškove proizvodnje pa je time prijeko potreban i regulatorni okvir.

Neke od karakteristika koje čine dizajn litij-ionske baterije prikladnim za kasniju ponovnu upotrebu ili recikliranje jesu modularnost koja onda omogućava lakšu zamjenu, nadogradnju i održavanje, standardizirana kućišta, dizajn pogodan rastavljanju, a gdje zavarivanje i lijepljenje otežavaju taj proces, konzistentna nomenklatura te standardizacija tržišta. No, obzirom da je tehnologija litij-ionskih baterija još uvijek tehnologija u razvoju, ipak dolazi do sukoba inovativnosti u razvoju baterija i standardizacije proizvoda i tržišta. [11]

Iz navedenih razloga, a prvenstveno s ciljem ostvarivanja održivog lanca proizvodnog i životnog ciklusa baterije osnivaju se svjetski i europski programi i projekti koji teže upravo tome.

4.1.1. Global Battery Alliance

Global Battery Alliance (GBA) je partnerstvo osnovano 2017. godine s više od 150 sudionika, odnosno raznih poduzeća, vlada, akademika, industrija, međunarodnih i nevladinih organizacija s ciljem razvijanja održive strukture lanca vrijednosti baterija do 2030. godine, a kako bi to ostvarili, 2020. usuglašeno je deset niti vodilja u tri kategorije kojima se taj cilj nastoji osigurati.

Tablica 3. 10 principa, Global Battery Alliance [24]

Razvijanje kružnog lanca vrijednosti baterija u svrhu zadovoljavanja Pariškog sporazuma	1. Maksimiziranje produktivnosti baterija u primarnom životnom vijeku
	2. Omogućavanje produktivne i sigurne sekundarne primjene
	3. Osiguravanje kružnog povrata materijala baterija
Razvijanje niskougljične ekonomije, otvaranje novih radnih mjesta, stvaranje dodane vrijednosti	4. Progresivno smanjenje emisija stakleničkih plinova
	5. Postavljanje energetske učinkovitosti kao prioriteta, značajno povećati upotrebu obnovljivih izvora energije
	6. Integracija energije iz obnovljivih izvora u baterijske sustave s naglaskom na pristupačnost
	7. Podrška stvaranju sofisticiranih radnih mjesta i vještina
Očuvanje ljudskih prava, ekonomski razvoj u skladu s UN-ovim ciljevima održivog razvoja	8. Trenutno i hitno eliminirati dječji i prisiljeni rad, poštivati ljudska prava zaposlenih u vrijednosnom lancu baterija
	9. Minimiziranje i sanacija negativnog utjecaja na okoliš
	10. Podrška odgovornom tržištu i anti-korupcijskim praksama

Zbog značajnog i kontinuiranog rasta tržišta i cijelog opskrbnog lanca litij-ionskih baterija, a kako bi se mogli pratiti okolišni, društveni i drugi učinci takve rastuće industrije, od ključne je važnosti transparentnost. U tu svrhu, GBA razvija koncept „baterijske putovnice“ koja bi bila

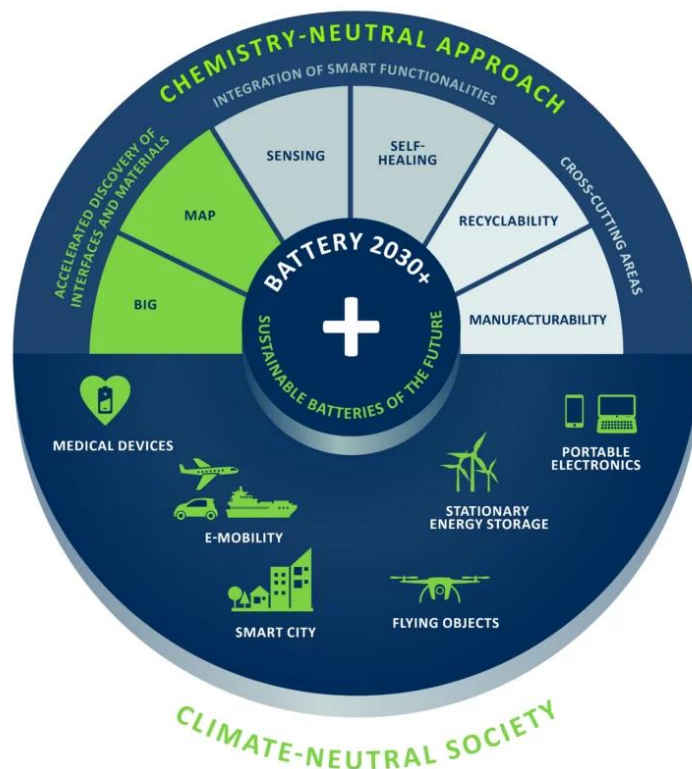
digitalna kopija fizičke baterije, odnosno koja bi prikupljala, razmjenjivala i izvještavala o svim relevantnim podacima kroz čitav životni vijek baterije, od kemijskog sastava i proizvodnje do podataka o performansama tijekom rada te na taj način omogućavala transparentnost na svim razinama životnog vijeka litij-ionske baterije. Ovakav koncept osim transparentnosti nudi svjetski održiv i odgovoran kružni vrijednosni lanac baterija koji je standardiziran, usporediv i kontrolabilan. [24]

4.1.2. European Battery Alliance

European Battery Alliance (EBA) je savez osnovan 2017. godine na poticaj tadašnjeg podpredsjednika Europske komisije u svrhu ostvarivanja održivog lanca proizvodnje baterijskih ćelija u Europi. Savez je definirao ukupno 43 potrebne stavke, od kojih je 18 označeno kao visokoprioritetno, sa ciljem zauzimanja većeg udjela u rastućem globalnom tržištu odnosno procjenjuje se da će europsko tržište baterija do 2025. godine vrijediti 250 milijardi eura. Program ovog saveza ponajviše je orijentiran ka zadovoljavanju rastuće i buduće potrebe za baterijama, pogotovo onim namijenjenim električnim vozilima u skladu sa ciljevima Europske unije za smanjenjem štetnih emisija (3.3.), ali u planiranim akcijama i definiranim stavkama uključuju osiguravanje pristupa sekundarnim sirovinama putem recikliranja i kružne ekonomije baterija i standardiziranje tehnologija i sigurnosnih pravila. [25]

4.1.3. Battery 2030+

Među europskim programima s ciljem održivih baterija, a s time i litij-ionskih baterija, ističe se program „Battery 2030+“ Europske unije koji predstavlja dugoročni plan za istraživanje i razvoj tehnologije baterija s ciljem radikalnih promjena u načinu razumijevanja, konstruiranja i proizvodnje izdržljivih, sigurnih, održivih i pristupačnih baterija s mogućnošću recikliranja za svakodnevne i razne primjene, ali i u svrhu organiziranja jedinstvene europske proizvodnje baterijskih ćelija. Ovaj program, koji uključuje niz projekata sa navedenim ciljevima, najveći utjecaj ima na trenutno najprimjenjivnije litij-ionske baterije, no istraživanje i razvoj usmjereno je i prema post-litijskim baterijama koje su već ili u razvoju ili takvi kemijski spojevi još nisu testirani, sve u svrhu održivosti, sigurnosti, pristupačnosti, zaštite, ekološke osviještenosti i ispunjenja spomenutih ciljeva (3.3) Europske unije o klimatskoj neutralnosti. [26]



Slika 14. *Battery 2030+*, holistički pregled [26]

Battery 2030+ kao skup projekata ima pet glavnih ciljeva:

1. Koordinirati i nadzirati implementaciju plana projekta definiranjem ključnih pokazatelja uspješnosti (eng. *key performance indicators*, KPI),
 2. Održavati plan programa stalnim unaprjeđenjem i razvojem samog plana,
 3. Standardizirati i poticati na primjenu optimalnih praksi u istraživanju i razvoju baterija,
 4. Uključiti rezultate projekata u sustav obrazovanja i mlade znanstvenike u ovu europsku inicijativu,
 5. Promovirati ciljeve i postignuća ove inicijative putem konferencija i javnih događanja.
- [26]

Iako ovaj program nije direktno orijentiran na povratnu logistiku litij-ionskih baterija, on svakako na nju utječe razvojem baterija koje su sigurnije, manje štetne za okoliš, praktičnije konstrukcije, pomno odabranih materijala i kemijskih spojeva što na samom koncu čini organizaciju njihovog povratnog toka jednostavnijom. Razvijaju se baterije koje je lakše rastaviti na manje komponenti koje su ciljano materijali s mogućnošću reciklaže (2.3.),

održive baterije sa duljim životnim vijekom i mogućnošću ponovne upotrebe što značajno umanjuje aktivnosti poput gospodarenja otpadom i odlaganja.

4.1.4. Direktiva za ekološki prihvatljiv dizajn

Direktiva 2009/125/EZ iz 2009. godine Europskog parlamenta i Vijeća uspostavlja okvir sa zahtjevima ekološkog dizajna za proizvode koji su povezani s energijom. Sama direktiva ne postavlja obavezne zahtjeve na proizvode, ali pruža okvir, u smislu pravila i kriterija, prema kojemu Europska komisija priprema mjere samo za proizvode koji imaju značajni utjecaj na tržištu Europske unije, a također imaju takav utjecaj i na okoliš. Ova Direktiva zamijenila je prethodnu (2005/32/EZ) koja se je odnosila na proizvode koji troše energiju. Po definiciji proizvoda koji su povezani s energijom iz važeće Direktive, u sferu takvih proizvoda spadaju i baterije, a Direktiva pruža opće smjernice za konstruiranje i proizvodnju istih kako bi njihov dizajn bio ekološki prihvatljiv, prikladan za reciklažu i slično.

2018. godine izdan je i Strateški plan akcije za baterije u kojemu se Europska komisija posvećuje pokretanju studije za određivanje ključnih faktora za proizvodnju sigurnih i održivih baterija prema kojima će se izraditi održivi zahtjevi za konstrukciju i korištenje svih baterija na tržištu EU. [27]

4.2. Transport i skladištenje u povratnom toku

Slika 1. prikazuje, kako je u tom poglavlju i opisano, da povratna logistika sadrži mnoge aktivnosti koje se provode i u normalnom toku materijala. U takve, među ostalima, pripadaju transport i skladištenje, koji su neizostavni u povratnoj logistici, a za reaktivne materijale poput litija, a samim time i proizvoda poput litij-ionskih baterija, navedene aktivnosti potrebno je regulirati, posebice u slučaju oštećenih proizvoda.

4.2.1. Transport

Transport je jedna od aktivnosti koja je, kako u normalnom toku materijala, itekako neizbježna i u povratnoj logistici, a kod litij-ionskih baterija često je ključan i duži, ponekad i prekooceanski transport. Razlozi su lokacije proizvodnje i kasnije lokacije sortiranja, recikliranja ili odlaganja. Kako je opisano u 3.2. najniže cijene litij-ionskih baterija su u Aziji što ih, može se zaključiti, čini velikim proizvođačima, te svoje proizvode distribuiraju širom svijeta, a isto tako obzirom na opasnu prirodu litij-ionskih baterija, odlagališta i reciklažni

centri za takvu vrstu materijala nisu gusto geografski raspoređeni te se stoga i u povratnom toku toga materijala odvija čest transport.

Litij-ionske baterije uz sve svoje prednosti mogu biti opasne i štetne i u određenim okolnostima uzrokovati ozbiljan problem, a ako se neodgovarajuće koriste ili transportiraju predstavljaju opasnost sličnu benzinu, propanu i sumpornoj kiselini. Litij je sam visoko reaktivan element te se ni u prirodi takav ne nalazi, već u spojevima s drugim elementima, u mineralima i ionskom obliku pa već kratak spoj ili oštećenje na litij-ionskoj ćeliji može dovesti do pregrijavanja ili čak do eksplozije i zapaljenja koje je teško ugasiti.

Takve situacije posebno su opasne u zračnom transportu. Iz tog razloga Međunarodna udruga za zračni prijevoz (eng. *International Air Transport Association*, IATA) objavila je niz restriktivnih regulativa koje se tiču prijevoza litijevih i litij-ionskih baterija kao i uređaja koji takve baterije sadrže te su one dio Regulativa o opasnim dobrima (eng. *Dangerous Goods Regulations*) koje su formirane prema tehničkim uputstvima UN-ove Organizacije međunarodnog civilnog zrakoplovstva (eng. *International Civil Aviation Organization*, ICAO). Općenita pravila o zračnom prijevozu litijevih i litij-ionskih baterija ovise o njihovom kapacitetu u Wh (vat-satima) i udjelu litija. Regulative se odnose putničku prtljagu kao i na teretne letove, ali naravno kroz različita pravila. Preko 60% zabilježenih incidenata u zračnom prometu uzrokovanih litij-ionskim baterijama bile su vezane uz putničku prtljagu te su i tu uspostavljena striktna pravila o tome što se, na koji način i u kojem obliku može unijeti u zrakoplov.

Regulative koje su relevantne za transport litij-ionskih baterija u logističkom smislu, a time i u smislu povratne logistike jesu regulative vezane uz li-ion baterije koje se prevoze teretnim zrakoplovima. Prvenstveno, takav transport je zakonska odgovornost pošiljatelja, a svaki takav teret mora imati pripadajući list sa sigurnosnim podacima za opasne materijale na kojemu, dodatno, mora stajati napomena da proizvođač posjeduje UN certifikat što potvrđuje da zadovoljava uvjete potrebnih ispitivanja i kontrole. Također, navedeni list mora sadržavati podatak o udjelu litija u proizvodu. Baterije sa više od jednog grama litija smatraju se opasnim materijalom i na njih se odnose regulative vezane uz pakiranje, označavanje i transport. Manje baterije mogu se prevoziti unutar ili izvan uređaja, ali pojedinačno pakirane. Veće baterije poput onih koje se koriste u električnim automobilima često zahtijevaju dodatnu zaštitu i izolaciju te se pakiraju u posebne kutije i spremnike kao što je i za baterije osjetljive na temperaturu potrebno osigurati praćenje i kontrolu temperature tijekom transporta, a zračni

prijevoz mehanički oštećenih baterija je zabranjen te je nužno posebno označavanje pakiranja koje sadrži više od dvije litij-ionske baterije ili četiri litij-ionske ćelije. [28]



Slika 15. Oznaka pakiranja u transportu litijeve baterije [28]

Slika 15. prikazuje obaveznu oznaku na pakiranju koje sadrži litijeve (ili litij-ionske baterije), a koje je u transportu. Donji središnji dio označen * predstavlja prostor za kontaktne informacije poput telefonskog broja u slučaju potrebe za više podataka o teretu.

Osiguravanje sigurnog zračnog transporta litij-ionskih baterija, osim navedenog, zahtjeva brojne aktivnosti i radnje u različitim područjima, kao što su ostvarivanje suradnje kontrole tereta, utovara i istovara sa osobljem i rukovodstvom zračne luke u smislu pružanja informacija o potencijalnim opasnim situacijama koje uključuju li-ion baterije i znanja o postupanju i sigurnom rukovanju takvim teretom. [28]

Iako su pravila za zračni prijevoz litij-ionskih baterija striktnija nego za ostale vrste transporta, postoje regulacije za kopneni i pomorski transport.

Kopneni prijevoz li-ion baterija na području Europe regulira ADR, odnosno Sporazum o međunarodnom cestovnom prijevozu opasnih dobara (eng. *Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road*), a smjernice za siguran transport litij-ionskih baterija na brodovima sadrži IMDG kodeks, odnosno Međunarodni kodeks za transport opasnih tereta morem (eng. *International Maritime Dangerous Goods Code*) te oba sporazuma na sličan način kako je opisano za zračni promet postavljaju pravila za pakiranje, označavanje i dokumentiranje opasnog materijala, između ostalog, i litij-ionskih baterija. [29]

4.2.2. Skladištenje

U određenim dijelovima toka materijala, bilo normalnog ili povratnog, dolazi do potrebe za skladištenjem, a kako je zbog prirode litij-ionskih baterija potrebno postaviti smjernice za siguran transport, tako je potrebno isto napraviti i za skladištenje, ne samo iz potreba sigurnosti, već i iz razloga kao što su prirodno starenje baterija.

Prilikom skladištenja su preporuke da ono bude pri 5-25°C u suhom okruženju, ne u blizini izvora topline te nikako na otvorenim prostorima ili izravnoj sunčevoj svjetlosti te da su pozitivni i negativni kontakti baterija izolirani i zaštićeni od kratkog spoja.

U takvim uvjetima, čak i korištene baterije, mogu biti uskladištene dulje vremena bez danjeg gubitka kapaciteta, a za usporavanje prirodnog starenja baterija, produljenje životnog vijeka i sprječavanje nepoželjnog pražnjenja, litij-ionske baterije mogu se skladištiti pri nižim temperaturama, odnosno u hladnjacima, a ako je baterije potrebno skladištiti dulje od mjesec dana, one se obično prazne do oko 20% i onda skladište.

Navedene preporuke jesu one u, takoreći, općoj primjeni, no postoje i smjernice koje se dotiču, posebice sigurnog, skladištenja litij-ionskih baterija kao što su IFC, odnosno Međunarodni požarni kodeks (eng. *International Fire Code*) koji sadrži propise koji se odnose na sigurnost od požara, uključujući i smjernice za skladištenje baterija i EU Directive 2006/66/EC (Battery Directive) koja pruža smjernice za prikupljanje baterija, ali također obuhvaća pitanja sigurnog skladištenja. [30]

4.3. Aktivnosti na kraju životnog vijeka proizvoda

Na kraju životnog vijeka proizvoda pa tako i litij-ionskih baterija potrebno je razmotriti opcije ponovne upotrebe i zbrinjavanja, kako vrlo dobro predstavlja hijerarhija povratne logistike prikazana u Slika 2., te prema stanju proizvoda i mogućnostima i kapacitetima tržišta usmjeriti dotrajalu bateriju prema odgovarajućoj vrsti oporabe ili odlaganja.

4.3.1. Ponovna upotreba

Odlaganje korištenih litij-ionskih baterija trebalo bi, svakako, kako je prikazano u Slika 2. i detaljnije objašnjeno u tom poglavlju, biti posljednja opcija iz razloga vrijednosti, održivosti i očuvanja. U početnom dijelu ovoga poglavlja (4.1.) već je naglašeno kako se održivosti teži već u samom procesu planiranja proizvodnje, no u kasnijim razdobljima životnog ciklusa

baterije poželjno je razmotriti mogućnosti ponovne upotrebe, posebice kod baterija korištenima u električnim vozilima zbog njihovog tehnološkog i ekonomskog potencijala u poboljšanju raznih drugih energijskih sustava.

Litij-ionske baterije u električnim vozilima koje dosegnu 80% svog nazivnog kapaciteta uklanjaju se iz vozila, ali i dalje su prikladne za manje zahtjevne primjene poput stacionarne pohrane energije. Obzirom na njihovu tada smanjenu moć cikličkog punjenja i pražnjenja prikladne su kao rezerva elektroenergetskom sustavu, omogućavaju odgađanje investicija u prijenosni i distribucijski sustav električne energije te akumulaciju i skladištenje viška energije obnovljivih izvora.

Kako bi baterija bila pogodna za takvu sekundarnu primjenu, ona mora proći kroz proces prilagodbe, odnosno određuje se stanje zdravlja baterije te se vrši potpuno pražnjenje, rekonfiguracija, implementacija prikladnih sustava upravljanja te ponovno pakiranje, a sekundarna primjena takve baterije kao stacionarne pohrane može produljiti životni vijek baterije za pet do petnaest godina ovisno o njenom stanju i konkretnoj primjeni. [11]

Stanje zdravlja korištene litij-ionske baterije ovisi o više faktora kao što su elektrode i elektrolit, odnosno njihovi kemijski spojevi, uzorci punjenja i pražnjenja i radne temperature pa je stoga, bez dubinske analize, koja je dugotrajan i skup proces, izazovno odrediti i predvidjeti trend starenja baterije. Za određivanje stanja zdravlja i preostalog korisnog života baterije potrebno je provesti nekoliko fizičkih, elektrokemijskih i spektroskopskih testiranja.

Idealno, testiranja se provode bez rastavljanja baterijskog modula do ćelijske razine zbog visoke cijene i sigurnosne opasnosti procesa rastavljanja i ponovnog sastavljanja. Međutim, rastavljanje će svakako biti nužno ukoliko se testiranjem utvrdi da određeni udio ćelija ne zadovoljava standarde rada ili sigurnosti te ih je potrebno zamijeniti.

Općenito stanje korištene baterije procjenjuje se obzirom na sigurnost, preostali kapacitet, unutrašnji otpor i brzinu pražnjenja.

Prvi korak u procjeni korištene baterije je vizualni pregled kao provjera vidljivih nabubrenja, deformacija ili izljeva elektrolita, ako postoji bilo što od navedenog, mogućnost ponovne upotrebe baterije se trenutno eliminira. Iako je ovaj korak relativno lak i brz, mogućnost ljudske pogreške je iznimno visoka te se razvijaju napredni algoritmi za obradu slike kako bi se i ovaj korak automatizirao. Nakon vizualnog pregleda procjenjuju se povijesni operativni parametri li-ion baterije za koje postoje striktni kriteriji koji uključuju broj puta kada je baterija prepunjena ili prepražnjena, broj puta kada je dostigla visoke temperature (50-80°C), period korištenja preko osam godina i postotak pražnjenja prilikom skladištenja na sobnoj

temperaturi u periodu od tri sata. Zatim se evaluiraju parametri performansi, sa jednako striktnim kriterijima, koji uključuju napon pri kojemu se pražnjenje zaustavlja, unutrašnji otpor te kapacitet pri različitim temperaturama. Konačno, provjerava se i mikrostruktura baterije uz pomoć nedestruktivne tomografije koja omogućava trodimenzionalni pregled unutar materijala, a anoda se analizira magnetskom rezonancom kako bi se otkrile moguće izrasline dendrita koje predstavljaju opasnost navedenu u 3.1.

Iako navedeni postupci i kriteriji testiranja mogu učinkovito sortirati korištene baterije u svrhu sekundarne primjene, još uvijek izostaje standardizirani protokol za procjenu i sortiranje korištenih litij-ionskih baterija koji bi omogućio univerzalnost i pouzdanost, a time smanjio utrošak resursa. [31]

Baterije koje su testirano pogodne za ponovnu upotrebu susreću se dakako sa drugim tržišnim izazovima kao što su raznolikost dizajna baterijskih paketa što uključuje samu veličinu i format, ali i kemijske sastave, od kojih su neki navedeni u 3.1. Također, obrada i priprema baterija za ponovnu upotrebu su aktivnosti koje ponovno dodaju vrijednost proizvodu, a cijene novih litij-ionskih baterija, kako je prikazano u Slika 8., kontinuirano padaju. Iako je životni vijek litij-ionskih baterija u električnim vozilima reguliran mnogim parametrima i prosjekom korištenja od osam godina, takve regulacije trajanja životnog vijeka baterija u njihovom sekundarnom životu nedostaju. [11]

Uz navedene prednosti i mogućnosti ponovne upotrebe litij-ionskih baterija iz električnih vozila, stručnjaci ipak predviđaju da će u 2025. godini tri četvrtine baterija koje završavaju svoj životni vijek u električnim vozilima biti usmjerene direktno na recikliranje. To je, prvenstveno, tako zbog trenutnih i najavljenih regulacija Europske unije koje će zahtijevati određeni udio recikliranog aktivnog materijala u proizvodnji novih baterija, ali i ambicija proizvođača da postignu brz povrat vrijednih materijala kao što su bakar, nikal i kobalt. Neznatna promjena u omjeru recikliranih i ponovno upotrebljivanih baterija se očekuje oko 2030. godine kada će i broj korištenih baterija biti znatno veći kao što se može zaključiti iz rastućeg trenda prikazanog u Slika 10. [32]

4.3.2. Recikliranje

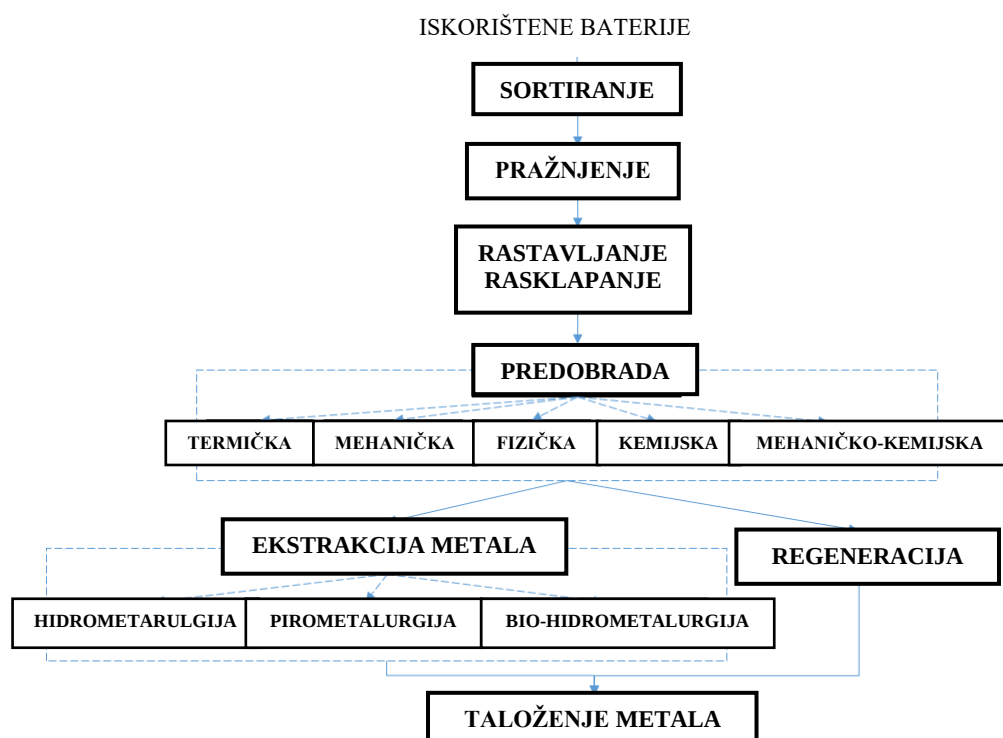
Ukoliko se ispitivanjima pokazalo kako litij – ionska baterija nije pogodna za ponovnu upotrebu odnosno sekundarno korištenje, sljedeće optimalno rješenje za takvu bateriju, ponovno kako je prikazano u Slika 2., jest recikliranje koje je, kako je navedeno u

prethodnom poglavlju, česta sljedeća faza nakon primjene baterije i bez testiranja za ponovnu upotrebu.

Recikliranje litij – ionskih baterija omogućuje smanjenje potrošnje energije i emisije CO₂, sprječava iskop i uvoz materijala, umanjuje štetnost po okoliš, stvara ekonomski dobitak te reducira nastali otpad i rješava određena pitanja sigurnosti. Procjenjuje se da recikliranje metala litij – ionskih baterija može srezati troškove proizvodnje novih baterija do 13% po kWh, ali trenutno se svega 3% litij – ionskih baterija u svijetu reciklira.

Među glavnim motivatorima za recikliranje li-ion baterija je vrijednost metala koje sadrži aktivni sloj katode. Zbog izvedivosti recikliranja određenih materijala i krajnje koristi, obično se recikliraju samo kobalt, bakar, čelik, nikel i aluminij, dok se plastične komponente spaljuju u cilju povrata energije, a litij, mangan i grafit rijetko se razmatraju kada je u pitanju recikliranje. Kada se radi o industrijskoj razini, većina procesa recikliranja usmjerena je na spojeve poput litij kobalt oksida, upravo zbog visokog udjela kobalta.

Osim navedene isplativosti i izvedivosti, recikliranje litij-ionskih baterija susreće se i s brojnim drugim izazovima kao što su različitost korištenih kemijskih spojeva, prisutnost nečistoća, stalni razvoj i inovacije na tržištu, ali i sigurno rukovanje komponentama zbog izloženosti elektrolitu ili litijevim atomima, skalabilnost, standardizacija i pojednostavljenje koraka obrade. [33]



Slika 16. Tipični proces recikliranja litij-ionskih baterija [33]

Slika 16. prikazuje uobičajeni postupak recikliranja litij-ionskih baterija. Nakon inicijalne faze pripreme (sortiranja, pražnjenja i rastavljanja), baterije prolaze predobradu kako bi se izdvojili aktivni vrijedni materijali kroz termičke (isparavanje organskih komponenti), mehaničke (drobljenje i usitnjavanje), fizičke (plutanje), kemijske (otapanje veziva) ili mehaničko-kemijske procese. Zahvaljujući ovakvim postupcima predobrade, izdvojene, metalima bogate, frakcije pogodne su za ekstrakciju metala izluživanjem kiselim otopinama, pirolizom na visokim temperaturama i taljenjem. Hidrometalurgija uvelike ovisi o omjeru krutine i tekućine, vremenu izluživanja i temperaturi, ali omogućava učinkovitu ekstrakciju metala visoke čistoće uz mali utrošak energije, dok pirometalurgiju karakteriziraju visoki početni troškovi, značajne emisije opasnih plinova, gubitak sadržaja litija i intenzivan utrošak energije, ali ista ima mogućnost tretiranja litij-ionskih baterija raznolikih kemijskih spojeva relativno jednostavnim procesom. [33] Pirometalurškim procesom dobiva se legura kobalta, nikla i bakra, dok litij i mangan ostaju u troski koja može biti korištena u građevini ili pak dalje obrađivana kako bi se izdvojio litij, a hidrometalurški proces omogućava izdvajanje i razdvajanje litija, nikla i kobalta. [11] Bio-hidrometalurški proces je alternativa trenutno izvediva samo na laboratorijskoj razini zbog spore kinetike, a temelji se na razgradnji materijala elektrode metabolitima koje izlučuju mikroorganizmi ili gljivice. Za razliku od navedenih postupaka koji ciljano pojedinačno ekstrahiraju vrijedne metale, metoda regeneracije reciklira i direktno resintetizira katodni prah nakon ponovne litijacije kroz precipitaciju ili sol-gel tehnologiju. Izbjegavajući razdvajanje metala, učinkovitost i vrijeme provedbe ovdje se optimiziraju, ali skalabilnost i ponovljivost procesa izrazito ovise o dostupnosti li-ion baterija iste kemijske strukture.

Konačno, metali se talože u svoju metalnu strukturu putem ekstrakcije otapalom, precipitacije ili elektrolize. Mnogi od navedenih procesa koriste više različitih navedenih postupaka istovremeno ili uzastopno kako bi optimizirali određene parametre te smanjili utrošak vremena i resursa. [33]

Recikliranje litij-ionskih baterija provodi ideju „urbanog rudarenja“ te je ključno kako bi se ostvarila zatvorena petlja životnog ciklusa baterija koja je u interesu proizvođača i društva zbog ekonomskih, okolišnih, socijalnih i raznih prednosti koje dovode i do, već mnogo puta spomenute, i poželjne održivosti.

Motivirano prednostima recikliranja litij-ionskih baterija, trenutno je u funkciji 21, a u planu 11 većih reciklažnih postrojenja sa ukupnim kapacitetom preko 300 000 tona, rasprostranjenih u istočnoj Aziji, Europi i Sjevernoj Americi. [31]



Slika 17. Geografska karta reciklažnih postrojenja [31]

Slika 17. prikazuje geografsku rasprostranjenost postrojenja za recikliranje, uključujući organizacije i poduzeća koji pružaju usluge prikupljanja i transporta, kao i postrojenja koja provode projekte za ponovnu upotrebu i sekundarni životni ciklus litij-ionskih baterija. [31]

Podaci o utjecaju recikliranja li-ion baterija na okoliš trenutno nisu jednoznačni. Primjerice, već je spomenuto kako se pirometalurškim procesima oslobađaju otrovni dimni plinovi, a njihovom neutralizacijom i generacijom visokih temperatura emitiraju se staklenički plinovi, međutim dio generirane topline može se koristiti u hidrometalurškim procesima kako bi se povećala energetska učinkovitost.

S ekonomskog gledišta, litij nije isplativo reciklirati zbog trenutno vrlo niske cijene sirovine. Komercijalno dostupni procesi usmjereni su na recikliranje kobalta i nikla, uz aluminij, bakar i čelik, ali za ponovno korištenje materijala u elektrodama, on mora biti pročišćen u dovoljno visokom stupnju kvalitete ili se alternativno reciklirani materijali mogu koristiti za primjene s nižim zahtjevima stupnja kvalitete i čistoće.

Smanjenju prethodno navedenih troškova reciklaže u budućnosti bi potencijalno moglo pridonijeti povećanje količine „umirovljenih“ baterija te samim time i povećanje opsega posla reciklažnih postrojenja, ali i veća transparentnost dizajna baterija. Ukoliko se nastavi trend niskih cijena sirovina, a broj i količina korištenih baterija, kako se i predviđa, nastavi rasti, bit će potrebno uvoditi mjere poput produžene odgovornosti proizvođača ili poticaji za razvoj postrojenja za recikliranje. [11]

4.3.3. Odlaganje

Kako je pak navedeno u 4.3.2., vrlo mali postotak nepovratno oštećenih i iskorištenih litij-ionskih baterija na svjetskoj razini se uistinu reciklira te je moguće odredište za baterije koje nisu pogodne za ponovnu upotrebu, a ne prolaze postupak recikliranja, odlagalište. Ponovno prateći hijerarhiju prikazanu u Slika 2. treba naglasiti da bi opcija odlagališta trebala i morala biti posljednja i jedina opcija što, u velikoj većini slučajeva, nije tako. Konkretno za same litij-ionske baterije to je iz razloga zagađivanja tla i podzemnih voda elektrolitom i izluživanjem štetnih metala, ali i ispuštanja otrovnih plinova u kontaktu s vlagom kao i mogućnosti požara. [33]

Trenutno, na svjetskoj razini, ne postoje univerzalni standardi za odlaganje otpadnih litij-ionskih baterija. Zasebne zemlje koriste različite prakse, od odlagališta i spalionica do djelomičnog ili potpunog recikliranja, ovisno o količini iskorištenih baterija i trenutnim regulativama i infrastrukturi, a ni neformalno i ilegalno odlaganje i obrada nisu rijetkost.

Dakle, lokalne rute za odlaganje ovise o zakonodavstvu i regulativama, reciklažnim kapacitetima, sustavima prikupljanja, ponašanju potrošača i samom tržištu baterija, uz različite pristupe ovisno o veličini baterija. Manje litij-ionske baterije, koje su lako odvojive od uređaja, bilo zbog neznanja ili ravnodušnosti, često završavaju u mješovitom otpadu što dovodi do incidenata u transportu ili postrojenjima za obradu otpada gdje baterije, skupa sa ostalim mješovitim otpadom, bivaju deformirane u standardnim procesima obrade što može uzrokovati požar ili čak eksploziju. Primjerice, Njemački savez za recikliranje čelika (BDSV) izvještava da je 90% požara na reciklažnim lokacijama uzrokovano upravo litij-ionskim baterijama, a konkretni primjer takvog incidenta je onaj iz 2017. godine na odlagalištu otpada Great Blakenham u Ujedinjenom Kraljevstvu kada se zapalila dizalica i 100 tona metala.

Veće litij-ionske baterije poput onih iz električnih vozila obično, odmah po uklanjanju iz vozila, preuzimaju stručne ili ovlaštene službe za transport i odlaganje, no zbog nedostatka produžene odgovornosti u regulaciji ovog tržišta, što će kasnije biti jasnije objašnjeno, ni navedeno ne mora vrijediti.

Odlagališta otpada glavna su metoda odlaganja krutog otpada, a oko 4% takvog otpada uključuje elektronički otpad, odnosno e-otpada koji često sadrži i baterije, između ostalog i litij-ionske. Obzirom na niske stope recikliranja li-ion baterija, kako je spomenuto u 4.3.2., ali i niske stope prikupljanja baterija – unutar Europske unije je to 40% za sve baterije, ali samo 12% za litij-ionske što ipak čini EU jednim od dobro reguliranih tržišta, većina e-otpada koja

sadrži litij-ionske baterije biva odbačeno na odlagališta. Ovo nije problem samo za tržište baterija, pogotovo onih u razvoju, već i za razvijena i velika tržišta iz razloga slabe regulacije i nedostatka strukture za recikliranje. Stoga, barem u skorijoj budućnosti, gotovo je sigurno da će veliki udio litij-ionskih baterija (posebice onih iz malih prijenosnih uređaja) završiti životni ciklus na odlagalištima. Trenutno, zbog relativno malog ukupnog broja električnih vozila, njihove veće baterije uobičajeno se prikupljaju, no zbog brzog rasta ovog tržišta i broja električnih vozila (prikazano u Slika 10.) i još uvijek neadekvatne infrastrukture, može se očekivati odlaganje ili privremeno skladištenje i većih litij-ionskih baterija.

Česta pojava na odlagalištima, i nevezano za odlaganje litij-ionskih baterija, jesu požari. Dvije su takve vrste požara: površinski i dubinski, a oba su najčešće uzrokovani samozapaljenjem metana. Površinski požari relativno su lako ugasivi, no dubinski požari su vrsta požara gdje dolazi do termičke reakcije u anoksičnim uvjetima duboko ispod površine. Iste je teško detektirati i mogu uzrokovati velike šupljine u odlagalištu što može dovesti do odrona. Litij-ionske baterije, koje još zadržavaju napon i sadrže zapaljivi elektrolit, u slučaju odlaganja mogu uzrokovati, pojačati i produžiti požar na odlagalištu, a kako je i spomenuto ranije u ovom potpoglavlju, požari na odlagalištima uzrokovani litij-ionskim baterijama (obično manjim) veliki su problem i osim ugrožavanja sigurnosti i zdravlja, mogu uzrokovati i milijunske štete.

Na odlagalištima, baterije najčešće bivaju oštećene prilikom kompaktiranja otpada i time do zapaljenja može doći odmah ili nakon odlaganja kada se nalaze u okruženju zapaljivih materijala i metana. Ako do zapaljenja ni ne dođe, u dubinskim slojevima pod utjecajem pirolize generiraju se visoke temperature i otrovni, čak i eksplozivni plinovi, a do samog zapaljenja baterije može doći čak i godinama nakon odlaganja. Dodatno, ovakvi požari osim što ispuštaju niz mješavina otrovnih plinova, pokazano čak kratkoročno mogu uzrokovati porast koncentracije teških metala u vodama oko područja.

Iz do sad navedenih razloga, zaključiva je važnost, ako ne izbjegavanja odlaganja litij-ionskih baterija, onda barem neutralizacije opasnih sadržaja, kao primjerice potpuno pražnjenje baterija i uklanjanje zapaljivog elektrolita.

Obzirom na trenutno stanje infrastrukture za recikliranje i odlaganje, stroge zakone vezane uz zaštitu okoliša te često „vaganje“ ekonomske koristi adekvatnog recikliranja i odlaganja (2.3.1.), može se pretpostaviti da će se određena količina ovakvog otpada odlagati ilegalno. Isto podržavaju i količine e-otpada proizvedenog na području EU koje godišnje iznose oko 44,3 Mt, međutim samo je za oko 0,6 Mt poznato da je dospjelo na lokacije odlagališta, dok

se za ostatak pretpostavlja da je neadekvatno odloženo, utržišteno, neformalno izvezeno i slično. Stoga se ne može očekivati da isto ne vrijedi i za dotekle litij-ionske baterije. [34]

4.4. Europske regulative

Regulative vezane za ponovno korištenje ili recikliranje litij-ionskih baterija po završetku njihovog životnog ciklusa omogućavaju bitno smanjenje sigurnosnih rizika, rast brige o okolišu, povećanje društvene dobiti i pružanje sigurnosti tržištu stabilizacijom lanca dobave kritičnih elemenata, ali također i smanjenje količine neiskoristivog otpada.

Takva jedinstvena regulativa na globalnoj razini ne postoji, ali već spomenuto partnerstvo Global Battery Alliance (4.1.1.) sa svojih 10 principa, koji nisu zakonske smjernice, ipak pruža čvrstu osnovu pojedinim regulativama koje će u ovome radu isto tako biti spomenute te se usporedbom mogu primijetiti sličnosti navedenih principa i prijedloga GBA partnerstva i donesenih ili najavljenih zakonskih regulativa (EU).

Europska unija još od 90-ih godina prošlog stoljeća donosi direktive koje se dotiču baterija te ih mijenja i ukida u skladu sa razvojem tehnologija i pojavom novih baterija te novih vezanih problematika, a prema istima zemlje članice izrađuju vlastite pravilnike, zakone i regulative kako bi se prilagodile važećim europskim direktivama.

4.4.1. Direktiva 2006/66/EZ

Direktiva 2006/66/EZ Europskog parlamenta i Vijeća o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima usvojena je 6. rujna 2006. godine te je ova Direktiva zamijenila je prethodnu Direktivu 91/157/EEZ iz 1991. godine koja je ujedno bila i prva direktiva koja je regulirala upravljanje baterijama u Europskoj uniji, a odnosila se na baterije i akumulatore koji sadrže određene opasne tvari.

Direktiva 2006/66/EZ, poznata kao i Direktiva o baterijama (eng. *Battery Directive*) za vrijeme pisanja ovoga rada je važeća direktiva, a njezine glavne inicijative u odnosu na prethodnu su reguliranje postupaka za prikupljanje i recikliranje baterija u korist smanjenja utjecaja na okoliš i promicanja održivosti, a glavni cilj ove Direktive je smanjenje količine neiskoristivog otpada uz ograničenje odlaganja baterija i označavanja proizvođača kao odgovorne za zbrinjavanje baterija uz standardiziranje zahtjeva vezanih uz sadržaj teških metala i označavanje baterija i akumulatora s ciljem poboljšavanja unutarnjeg tržišta. U pokušaju minimiziranja odlaganja otpadnih baterija i akumulatora na način koji je štetan za

okoliš i izbjegavanja zabune krajnjeg korisnika oko zahtjeva gospodarenja različitim vrstama otpadnih baterija i akumulatora, ova direktiva vrijedi za sve vrste baterija stavljenih na tržište unutar Europske unije, a baterijom se smatra svaki uređaj koji odgovara definiciji baterije Ministarstva zaštite okoliša i prirode (navedenoj u 3.1.) iz Pravilnika o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima koji pruža hrvatski prijevod definicije baterije dane u Direktivi 2006/66/EZ.

Prema istoj, zemlje članice Europske unije dužne su uspostaviti sheme prikupljanja otpadnih prijenosnih baterija kroz, krajnjim korisnicima pristupačnim, lokacijama prikupljanja te troškovi prikupljanja, obrade i recikliranja svih prikupljenih otpadnih prijenosnih baterija i akumulatora moraju biti financirani od strane proizvođača ili treće strane koja djeluje u njihovo ime. Proizvođači i distributeri nadalje su dužni preuzeti prijenosne, automobilske i industrijske baterije (uključujući i one iz električnih vozila) bez naplate. Industrijske, automobilske i prikupljene prijenosne otpadne baterije moraju podići obradi i recikliranju uz najbolje dostupne tehnologije u cilju zaštite zdravlja i okoliša prije nego li ostatak komponenti može biti odloženo i spaljeno, ali direktno odlaganje i spaljivanje otpadnih industrijskih i automobilskih baterija i akumulatora je zabranjeno. Direktiva također definira pravilno označavanje pakiranja baterija i samih baterija. Svaka baterija, akumulator i baterijski sklop treba biti vidljivo označen simbolom prikazanim na Slika 18. koji indicira odvojeno prikupljanje za sve baterije i akumulatore. [35]



Slika 18. Obavezni simbol za odvojeno prikupljanje baterija i akumulatora [35]

Kako bi se potaklo odvojeno prikupljanje otpadnih baterija od mješovitog otpada, direktiva postavlja minimalne pragove prikupljanja i učinkovitosti recikliranja za zemlje članice. Stopa prikupljanja računa se kao omjer mase prikupljenih prijenosnih otpadnih baterija unutar jedne godine i prosječne godišnje mase prijenosnih baterija stavljenih na tržište u posljednje tri godine, a minimalne stope prikupljanja jesu 25% do 2012. i 45% do 2016. godine. Prema

izvješću iz 2019. godine, ciljevi za 2012. godinu su postignuti, no samo je 14 zemalja članica ostvarilo stopu prikupljanja od 45% do 2016. godine.

Minimalne stope učinkovitosti recikliranja navedene u aneksu Direktive jesu 65% za olovno-kiselinske, 75% za nikal-kadmiske i 50% za ostale otpadne baterije i akumulatore. [35]

Navedena direktiva, sa trenutnog je gledišta, manjkava. Tehnologija na spomenutom području napreduje velikom brzinom i obzirom na godinu izdanja ove Direktive, ona se može smatrati i zastarjelom. Direktiva prema kemijskom sastavu izuzima samo olovno-kiselinske i nikal-kadmiske baterije, dok svi ostali kemijski sastavi, uključujući litij-ionski, pripadaju kategoriji ostale baterije i akumulatori što više ne odgovara aktivnom stanju na tržištu. Uz navedeno, Direktiva jasno ne definira produljenu odgovornost proizvođača niti industriju sekundarne upotrebe. Navedeni i mnogi drugi nedostaci bili su raspravljani na sjednicama Europskog parlamenta te kroz izglasane promjene uskoro na snagu stupa nova i opširnija regulativa.

4.4.2. Regulativa 2023/1542

Na plenarnoj sjednici Europskog parlamenta 14. lipnja 2023. godine odobrena su nova pravila vezana uz konstrukciju, dizajn, proizvodnju i gospodarenje otpadom svih vrsta baterija na tržištu Europske unije. [36] Ista je usvojilo i Vijeće u srpnju 2023. godine, a objavom u Službenom listu Europske unije ona su stupila na snagu 28. srpnja 2023., no navedena pravila u sklopu Regulative 2023/1542, izuzev određenih odredbi, vrijede od 18. veljače 2024. godine.

Nova regulativa u obzir uzima tehnološke napretke i buduće izazove u ovom sektoru i pokriva cijeli životni ciklus baterije, od konstruiranja do kraja životnog ciklusa, te ista svojim stupanjem na snagu zamjenjuje i ukida Direktivu 2006/66/EZ, no nova Regulativa ne zamjenjuje postojeći zakonski okvir, već ga proširuje i nadograđuje. [37]

Odredbe Regulative podržavaju razvoj tehnologija koje potiču održivost baterija i prate tranziciju ka elektromobilnosti i stoga uključuju posebne zahtjeve za materijale poput litija i kobalta kao i mehanizme za mogućnost prilagodbe budućim promjenama u tehnologiji baterija. Prvenstveno, uvodi se nova kategorizacija baterija pa se umjesto dosadašnje tri (prijenosne, industrijske i automobilske baterije i akumulatori), izdvaja 5 kategorija – prijenosne baterije, LMT baterije lakih prijevoznih sredstava (eng. *Light Means of Transport*) (primjerice električnih bicikala), SLI baterije odnosno akumulatori za pokretanje, osvjetljavanje i paljenje (eng. *Starting, Lighting and Ignition*), industrijske baterije i baterije električnih vozila. [38]

Jedna od novosti koje uvodi Regulativa jest obavezna deklaracija o ugljičnom otisku (eng. *carbon footprint*) za baterije električnih vozila (i baterije lakših prijevoznih sredstava i industrijskih baterija kapaciteta većeg od 2 kWh) koja će sadržavati podatke kao što su podaci o proizvođaču i geografskoj lokaciji proizvodnog pogona. Među ciljevima Regulative je povećati upotrebu recikliranih materijala u svrhu razvoja kružnog gospodarstva, ali i minimiziranja ovisnosti o sirovinama iz zemalja koje nisu članice Europske unije. S time, proizvođači će biti dužni ustupiti podatke o recikliranom sadržaju njihovih baterija, a minimalni udjeli recikliranog materijala u novim baterijama jesu 16% za kobalt, 85% za olovo, 6% za litij i 6% za nikal unutar osam godina od stupanja na snagu, a unutar 13 godina od stupanja na snagu ti su udjeli 26% za kobalt, 85% za olovo, 12% za litij i 25% za nikal. [36] Postrožuju se i ciljane stope prikupljanja koje za prijenosne baterije iznose 63% do 2027. i 73% do 2023. godine, a za LMT baterije 51% do 2028. i 61% do 2031. godine te se uvode minimalne razine materijala dobivenog recikliranjem otpadnih baterija u novim baterijama koje iznose za litij 50% do 2027. i 80% do 2031. godine, a za kobalt, bakar, olovo i nikal 90% do 2027. i 95% do 2031. godine. Međutim, u Regulativu nisu uključene stope prikupljanja za industrijske baterije i baterije električnih vozila, ali se postavlja zakonski okvir za uspostavljanje prikladnog prikupljanja ove vrste baterija. Nove ciljane učinkovitosti recikliranja jesu, do 2025. godine, 75% za olovno-kiselinske, 65% za baterije na bazi litija, 80% za nikal-kadmijske i 50% za ostale otpadne baterije, a ciljevi za 2030. godinu jesu 80% za olovno-kiselinske i 70% za baterije na bazi litija.

Važna novost koju uvodi Regulativa je zahtjev za praćenjem mnogih parametara koji utvrđuju stanje baterije SOH (eng. *State of Health*) te ujedno predlaže mnoge kontrole za utvrđivanje istog čime, između ostalog, potiče i stvara regulatorni okvir za ponovnu potrebu baterija. Podatke s takvim parametrima uz mnoge druge informacije o proizvođaču, vrsti baterije, očekivanom životnom vijeku, kemijskom sastavu, udjelu recikliranih materijala i slično sadržavat će baterijska putovnica koja se ovom Regulativom uvodi kao obavezna za sve LMT baterije, baterije električnih vozila i industrijske baterije kapaciteta većeg od 2 kWh. Takav koncept predložilo je i Global Battery Alliance partnerstvo kako je spomenuto u 4.1.1., a funkcionirat će putem QR koda naznačenog na kućištu baterije te tako omogućavati pristup podacima od kojih su neki navedeni, ali i uputstvima za demontažu i sigurnosnim mjerama koje su od važnosti primjerice reciklažnim postrojenjima i operaterima u sekundarnom životnom ciklusu. Proizvođači baterija morat će biti registrirani u svrhu izrade baterijske

putovnice, a uz praćenje podataka cijelog životnog ciklusa baterije omogućava se regulacija i uspostavljanje produžene odgovornosti proizvođača.

Osim do sad navedenih ciljeva i odredbi Regulativa sadrži još mnoge pojedinosti koje se odnose na sve vrste baterija, ali i pojedine, te obuhvaćaju sve faze njihovog životnog vijeka. U odnosu na prethodnu Direktivu 2006/66/EZ, nova Regulativa u obzir uzima razvoj tehnologije i novih kemijskih sastava baterija te aktivno i buduće stanje na tržištu što je vidljivo u specifičnim ciljevima, zahtjevima i uputama za pojedine vrste baterija kao što su one na bazi litija među kojima, na tržištu, dominiraju litij-ionske. Za takve se postavljaju, što do sada nije bio slučaj, zasebni ciljevi učinkovitosti recikliranja, ali i primjerice zahtjevi za skladištenje i obradu kao što su posebne sigurnosne mjere za zaštitu od topline, vatre, izravne sunčeve svjetlosti, vode, vlage i fizičkog oštećenja. Otpadne baterije na bazi litija također se moraju skladištiti u orijentaciji za pravilnu instalaciju u ventiliranom prostoru pokriveno gumenom izolacijom za visoki napon, a postrojenja koja takve skladište bit će označena znakom upozorenja. [38]

4.5. Legislativa, prikaz stanja i primjeri iz Republike Hrvatske

Republika Hrvatska je kao zemlja članica Europske unije dužna provoditi odredbe iznesene u europskim direktivama i regulativama. Pravilnik koji prenosi odredbe europske Direktive 2006/66/EZ, koja je u vrijeme pisanja ovog rada još uvijek na snazi, donesen 2015. godine od strane Ministarstva zaštite okoliša i prirode na temelju Zakona o održivom gospodarenju otpadom je Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima kojim se u pravni poredak Republike Hrvatske prenosi Direktiva 2006/66/EZ Europskog parlamenta i Vijeća. Kako Pravilnik prenosi odredbe navedene Direktive, sve opisano pod 4.4.1. izneseno je i vrijedi i za Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima. [10]

Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja na temelju Zakona o gospodarenju otpadom 2023. godine donosi Pravilnik o gospodarenju posebnim kategorijama otpada u sustavu Fonda koji se dotiče gospodarenja otpadnom električnom i elektroničkom opremom, otpadnim vozilima, otpadnim baterijama i akumulatorima, otpadnim gumama te otpadnim uljima i osim odredbi Direktive 2006/66/EZ prenosi i odredbe direktiva koje se dotiču ostalih navedenih vrsta otpada. Članci ovog Pravilnika koji se dotiču otpadnih baterija i akumulatora ponovno sliče svemu navedenom u 4.4.1. [39]

Obzirom na skoro ukidanje Direktive 2006/66/EZ i stupanja na snagu Regulative 2023/1542, očekuje se i promjena hrvatskog zakonodavnog okvira koji će morati pratiti odredbe nove europske Regulative. Obzirom da Regulator 2023/1542 svojim stupanjem na snagu u veljači 2024. godine uvodi i novu kategorizaciju baterija, ali i ističe više kemijskih sastava baterija, očekivana bi bila promjena i kategorizacije vrsta otpada u RH, odnosno ključnih brojeva otpada koji trenutno, kako je prikazano u Tablica 4., u obzir ne uzimaju primjerice baterije na bazi litija kao zasebnu kategoriju, a prema prikazanome početni broj 16 označava kategoriju Otpada koji nije drugdje specificiran u katalogu, a broj 20 Komunalni otpad (otpad iz kućanstava i slični otpad iz obrta, industrije i ustanova) uključujući odvojeno skupljene sastojke. [40]

Tablica 4. Ključni brojevi otpada [40]

Ključni broj otpada	Naziv otpada
16 06 01*	olovne baterije
16 06 02*	nikal-kadmij baterije
16 06 03*	baterije koje sadrže živu
16 06 04	alkalne baterije (osim 16 06 03*)
16 06 05	ostale baterije i akumulatori
16 06 06*	odvojeno skupljeni elektroliti iz baterija i akumulatora
20 01 33*	baterije i akumulatori obuhvaćeni pod 16 06 01*, 16 06 02* ili 16 06 03* i nesortirane baterije i akumulatori koji sadrže baterije
20 01 34*	baterije i akumulatori koji nisu navedeni pod 20 01 33*

4.5.1. Prikupljanje, recikliranje i odlaganje u RH

U Republici Hrvatskoj gospodarenje otpadnim prijenosnim baterijama i akumulatorima organizira Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost sukladno odredbama Zakona o gospodarenju otpadom („Narodne novine“ broj 84/21) i Pravilnika o gospodarenju posebnim kategorijama otpada u sustavu Fonda („Narodne novine“ broj 124/23). Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost, prema navedenim zakonima i izdanim ovlaštenjima, odnosno koncesijama od strane Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja, sklapa ugovore i organizira fizičke ili pravne osobe kao sakupljače otpadnih prijenosnih baterija i akumulatora, u koje, između ostalog, prema definiciji baterije, pripadaju i litij-ionske baterije. Prema posljednjoj dokumentaciji iz listopada 2022. godine ovlašteni sakupljači otpadnih baterija

jesu: UNIVERZAL d.o.o., METIS d.d., C.I.A.K. d.o.o., STR AKUMULATOR, ODLAGALIŠTE SIROVINA d.o.o., FLORA VTC d.o.o., FRIŠ d.o.o.

Nakon prikupljanja svaki je sakupljač obavezan sve sakupljene baterije i akumulatore predati obrađivaču otpadnih baterija i akumulatora uz odgovarajući dokument o prekograničnom prometu otpadom.

Obrađivač, ovlašten od iste strane kao i sakupljač, je obrtnik koji bez naplate i uz ovjeru prateće dokumentacije, od sakupljača preuzima otpadne prijenosne baterije i akumulatore te ih razvrstava, priprema za proces recikliranja ili priprema za zbrinjavanje, a obrada minimalno treba uključivati uklanjanje svih tekućina i kiselina. Prema dokumentaciji iz listopada 2022. godine ovlašteni obrađivači jesu C.I.A.K. d.o.o. i FRIŠ d.o.o. [41]

U Republici Hrvatskoj recikliraju se olovno-kisele, nikal-kadmijske baterije te ostale baterije i akumulatori za koje postoji dostupna tehnologija, a otpadne baterije i akumulatori koji se ne oporabe u pogonima na ovom području, uglavnom se prevoze u Njemačku, Francusku, Austriju i Sloveniju. [42]

Navedeni ovlašteni sakupljač i obrađivač C.I.A.K. d.o.o. od 2015. godine uspješno vodi Centar za Reciklažu Olovno-kiselinskih baterija CIAK Grupe u Zaboku, a objavljen je i početak prve faze projekta Centra za Reciklažu Litij-ion baterija. Prva faza projekta pokrenuta je u svibnju 2021. godine, s očekivanjem operativnog početka Centra prije kraja 2023. godine, no novih objava napretka, među javno dostupnim podacima, nema. [43]

Prema posljednjem izvješću za 2022. godinu, objavljenom od strane Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja, u kojem su obrađeni podaci o prijenosnim otpadnim baterijama i akumulatorima sakupljenim u okviru sustava Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost, 58% količine prijenosnih baterija i akumulatora stavljenih na tržište je sakupljeno. Od toga se 81% sakupljenoga odnosilo na olovne baterije i akumulatore koji se gotovo u cijelosti (99%) obrađuju u RH, dok se ostale otpadne baterije i akumulatori nakon prepakiranja, razvrstavanja i sortiranja izvoze na obradu.

Isto izvješće sadržava i podatke o prikupljenim količinama svih vrsta otpadnih baterija i akumulatora, koje uključuju, osim prijenosnih baterija i akumulatora, također startere i industrijske baterije i akumulatore. U 2022. godini bilježi se, u odnosu na prethodnu godinu, porast od 46% nastalih količina svih vrsta otpadnih baterija i akumulatora, a od ukupne nastale količine te godine u RH obrađeno je 66% baterija, 28% je izvezeno na konačnu obradu u druge zemlje bez ikakve predobrade u RH, 4% izvezeno je nakon prepakiranja, razvrstavanja i sortiranja, a 2% prikupljenih baterija privremeno je ostalo na skladištu

obrađivača. Iz svega navedenog zaključivo je da se sve prikupljene količine litij-ionskih baterija, koje su kategorizirane pod ostale baterije prema kategorizaciji razrađenoj u 4.5., na konačnu obradu izvoze u strane zemlje.

Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja je za svaku kalendarsku godinu, prema Uredbi Europske unije, dužno izraditi Izvješće o učinkovitosti recikliranja, a izračun se temelji na omjeru stvarne količine dobivene recikliranjem i početne količine otpadnih baterija i akumulatora koja je ušla u proces recikliranja. Izračuni se rade za tri vrste prijenosnih otpadnih baterija: olovne, nikal-kadmijske i ostale otpadne baterije i akumulatori, a u konačni izračun o učinkovitosti recikliranja uzimaju se podaci svih obrađivača za pojedinu vrstu baterija. MINGOR izrađuje Izvješće o učinkovitosti recikliranja temeljem podataka tvrtki koje posjeduju dozvolu za gospodarenje otpadom za djelatnost oporabe odnosno zbrinjavanja otpadnih baterija i akumulatora kao i podataka oporabitelja izvan RH koji su preuzeli dijelove baterija ili cijele baterije na daljnju uporabu, a podaci o učinkovitosti recikliranja te propisani ciljevi za razdoblje od 2018. do 2022. godine prikazani su u Tablica 5. [44]

Tablica 5. Učinkovitost recikliranja otpadnih baterija u RH i propisani ciljevi u razdoblju 2018.-2022., izrađeno prema [44]

Vrsta otpadne baterije	Propisani cilj	Dostignuta učinkovitost recikliranja				
		2018.	2019.	2020.	2021.	2022.
Olovne otpadne baterije i akumulatori	65 %	80 %	79 %	81 %	83 %	82 %
Nikal-kadmijske baterije i akumulatori	75 %	51 %	51 %	51 %	79 %	54 %
Ostale otpadne baterije i akumulatori	50 %	94 %	61 %	62 %	86 %	94 %

Iako litij-ionske baterije ne čine zasebnu kategoriju u do sad navedenim podacima, niti se kao takve spominju, ipak prema postocima prikazanim u Tablica 5. koji su izrađeni i prema izvještajima obrađivača izvan RH, može se pretpostaviti da se određeni udio prikupljenih litij-ionskih baterija na području RH ipak uspješno reciklira.

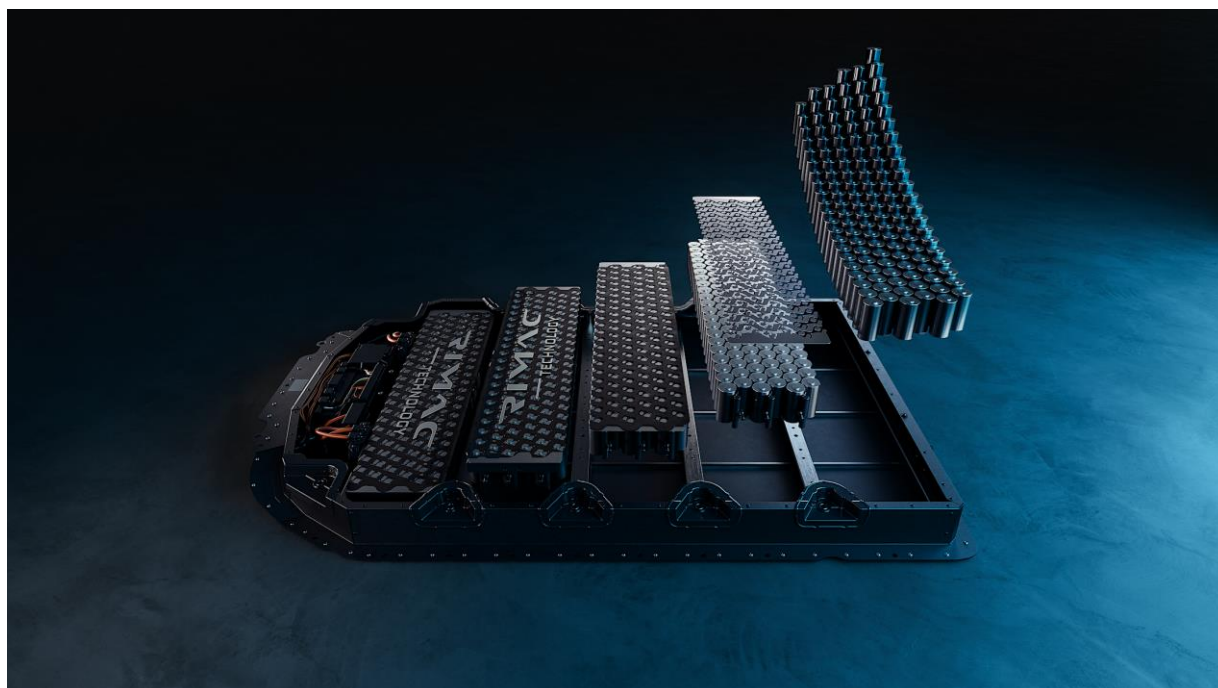
Osim liste sakupljača i obrađivača ovlaštenih od strane Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja te podataka iz Pregleda o gospodarenju otpadnim baterijama i akumulatorima za 2022. godinu Ministarstva gospodarstva i održivog razvoja koji su prikazani u ovom potpoglavlju o prikupljanju i recikliranju baterija u Republici Hrvatskoj, daljnji postupci i destinacije prikupljenih baterija su podaci koji nisu javno dostupni te isto tako nisu uspješno pribavljeni od kontaktiranih navedenih sakupljača i obrađivača kao ni od Ministarstva zaštite okoliša i energetike i Gradskih ureda grada Zagreba. Stoga nije poznato odlaže li se određeni

udio litij-ionskih baterija na odlagalištima kao što je nepoznato i stanje na odlagalištima po pitanju incidenata uzrokovanih litij-ionskim baterijama kakvi su opisani pod 4.3.3.

4.5.2. Rimac Technology

Rimac Technology, sa sjedištem u Zagrebu, kroz razvoj i proizvodnju baterijskih sustava, električnih pogonskih jedinica, elektroničkih sustava i komponenti korisničkog sučelja po kojima su poznati njihovi automobili, izgradio je vodeću ulogu u industriji električnih vozila i inovacijama u tom području. Osim za potrebe vlastitih proizvoda, odnosno Rimac „hiperautomobila“, Rimac Technology razvija i proizvodi, između ostalog, i litij-ionske automobilske baterije za kupce te je iz tog razloga, i svog utjecaja na tržištu, odabran za prikaz realnog stanja povratne logistike litij-ionskih baterija, odnosno kako se sve do sad navedeno u ovome radu provodi u praksi. [45]

Podaci o provođenju povratne logistike litij-ionskih baterija, odnosno načinu postupanja sa otpadnim litij-ionskim baterijama unutar Rimac Technology poduzeća prikupljeni su putem usmenog anketiranja i ustupljeni od strane Stručnjakinje za zaštitu okoliša (eng. *Environmental Protection Specialist*) Rimac Technology-a.



Slika 19. Model automobilske baterije, Rimac Technology [46]

Rimac Technology zbrinjava litij-ionske baterije sukladno Zakonu i Pravilniku o gospodarenju otpadom putem ovlaštenih Sakupljača za ključni broj otpada 16 06 05 (kako je opisano u 4.5.), a od svojih Sakupljača dobili su informaciju kako se baterije prvo skladište, a kasnije izvoze prema ovlaštenim Obradivačima u Njemačku ili Austriju zbog izostanka Obradivača za litij-ionske baterije u Republici Hrvatskoj (4.5.1.), no isto tako da nijedna baterija (kao ni ostale vrste otpada) ne završavaju u okolišu. Unutar poduzeća odvojeno se sakuplja oko 33 različite kategorije otpada, a baterije (KB 16 06 05) izdvajaju se i stavljaju u zasebne, za takvu vrstu otpada, adekvatne plastične spremnike, a iste su prije izdvajanja ispražnjene u laboratoriju za testiranje baterija te pravilno označene. Prema potrebi kontaktira se ovlašteni Sakupljač kojemu se predaju baterije uz ispunjeni Prateći list za otpad.

PRATEĆI LIST ZA OTPAD

DIO A – PODACI O OTPADU				BROJ PL-O:			
KLJUČNI BROJ:				KOLIČINA OTPADA U POŠILJCI: kg m ³ NAČIN:			
FIZIKALNO SVOJSTVO:		KOMUNALNI ☐ PROIZVODNI ☐		OPASNI ☐ NEOPASNI ☐		H OZNAKE:	
OPIS OTPADA:				POŠILJKA JE NAMIJENJENA ZA:			
PAKIRANJE OTPADA: rasuto ☐ posuda ☐ kanta ☐ kanistar ☐ kontejner ☐ bačva ☐ kutija ☐ vreća ☐ ostalo ☐				BROJ PAKIRANJA POŠILJKE:			
PORIJEKLO KOMUNALNOG OTPADA:							
DIO B – PODACI O OSOBI KOJA PREDAJE OTPAD							
NAZIV OSOBE:				DATUM PREDAJE POŠILJKE:			
OIB/B.P.:				ADRESA POLAZIŠTA:			
SJEDIŠTE/ADRESA:				PREDAO:			
NKD RAZRED (2007):				PRIJEVOZNIK PREUZE:			
KONTAKT OSOBA:				potpis			
KONTAKT PODACI:							
DIO C – PODACI O TVRTKI KOJA PREUZIMA OTPAD							
TVRTKA:				DATUM PREUZIMANJA POŠILJKE:			
OIB:				ADRESA ODREDIŠTA:			
SJEDIŠTE/ADRESA:				PREUZE:			
OVLAST ZA PREUZIMANJE OTPADA U POSJED:				PRIJEVOZNIK PREDAO:			
KONTAKT OSOBA:				potpis			
KONTAKT PODACI:							
DIO D – PODACI O PRIJEVOZNIKU OTPADA							
TVRTKA:				NAČIN PRIJEVOZA:			
OIB:				REGISTARSKA OZNAKA:			
SJEDIŠTE/ADRESA:							
BROJ UPISA U OČEVIDNIK PRIJEVOZNIKA: PRV-							
KONTAKT OSOBA:							
KONTAKT PODACI:							
NAPOMENA:							

Slika 20. Prateći list za otpad [47]

Iako se litij-ionske baterije danas mogu vrlo uspješno reciklirati, Rimac Technology nažalost nema službeno izvješće o krajnjem postupku i količini i postotku recikliranog materijala, jer kako navode, sukladno trenutnim zakonima u Republici Hrvatskoj, njihova odgovornost za zbrinjavanje prestaje u trenutku predaje Pratećeg lista za otpad ovlaštenom Sakupljaču, no nadaju se kako će uskoro dobiti uvid u takve informacije kako bi uspješno vodili poduzeće ka održivosti te postavljali daljnje strategije i ciljeve u odabiru Sakupljača/Obrađivača i načina pripreme baterija za recikliranje. Navode i kako će uskoro postavljati nove ciljeve i strategije u skladu s nadolazećom Regulativom 2023/1542 (4.4.2.), no njih u ovome trenutku ne mogu iznositi.

Rimac Technology razvija proizvode za svoje kupce, a u fazi istraživanja i razvoja nastaje najveća količina otpadnih baterija iz razloga strogih pravila i ispitivanja kojima se baterije moraju podvrgnuti kako bi bile prikladne i smjele izaći na tržište kao proizvod te je u prethodnoj, 2023. godini ovo poduzeće ovlaštenim Sakupljačima predalo 13 tona otpadnih baterija. U budućnosti, s početkom serijske proizvodnje očekuju da će te količine padati, no sve ovisi o intenzivnosti istraživanja i razvoja za nove proizvode, ali i razvoju samog poduzeća i porastu opsega proizvoda, a samim time i otpada. Međutim, bez obzira na buduće trendove, navode kako će nastojati pratiti nove zahtjeve i sudjelovati u ispunjavanju europskih ciljeva za gospodarenje otpadnim baterijama.

5. ZAKLJUČAK

Razvoj i napredak tehnologije litij-ionskih baterija te svjetske i europske inicijative za poticanje elektromobilnosti pokreću rastući trend uporabe litij-ionskih baterija, ne samo u električnim vozilima već u mnogim različitim uređajima upravo zbog specifičnih prednosti tehnologije litij-ionskih baterija. Još veći porast količine upotrebljivanih baterija očekuje se zbog zabrane stavljanja na tržište vozila na fosilna goriva Europske unije koja stupa na snagu 2030. godine što će u budućnosti posljedično uzrokovati i porast količine otpadnih baterija i zahtijevati veće kapacitete postrojenja za obradu, recikliranje i testiranje baterija u svrhu ponovne upotrebe. Smjer razvoja ovog tržišta potiče potrebu za razmišljanjem o organizaciji aktivnosti povratne logistike. Trenutne cijene ključnih materijala poput litija trenutno su dovoljno niske da čine recikliranje litij-ionskih baterija u neku ruku neisplativim, međutim aktivne zakonske mjere i zahtjevi za stopama upotrebljivanih recikliranih materijala u novim proizvodima ipak podupiru da se opcije poput recikliranja i ponovne upotrebe razmotre prije samog odlaganja otpada. No, kao dodatna motivacija, ali i potreba u budućnosti zbog očekivanog povećanja obujma korištenih i otpadnih litij-ionskih baterija, potreban je poticaj za izgradnju novih postrojenja za obradu i recikliranje te uvođenje produžene odgovornosti proizvođača jer kako i hrvatski primjer Rimac Technology navodi, odgovornost proizvođača prestaje u trenutku predaje otpada uz Prateći list (Slika 20.) ovlaštenom Sakupljaču te im ne bivaju ustupljene danje informacije o postupcima obrade što bi pridonijelo pripremi otpadnih baterija za danju obradu. Ovakvi nedostaci govore o manjku transparentnosti i nedovoljnim informacijama za sljedeće operacije koje vrše Obrađivači i reciklažna postrojenja, ali navedene manjkavosti ima za mogućnost unaprijediti uvođenje Baterijske putovnice koju čini obaveznom nova europska Regulativa (4.4.2.) time što bi navedena putovnica sadržavala ključne i detaljne informacije o bateriji od njene proizvodnje do kraja životnog vijeka i na taj način davala i upute za postupanje sa konkretnom baterijom. Ovakvim i sličnim mjerama, na određenoj razini, eliminira se problem nedostatka transparentnosti i produžene odgovornosti proizvođača. Kroz rad su prezentirane različite aktivnosti od samog provođenja povratne logistike do pojedinih metoda recikliranja, odlaganja i ponovne upotrebe uz njihove prednosti i mane, ali iako svjetski podaci tvrde kako se izrazito mali broj litij-ionskih baterija reciklira, podaci iz službenih izvještaja Republike Hrvatske i Europske unije daju drugačiju sliku i uvjeravaju u popriličnu uspješnost recikliranja litij-ionskih baterija, iako zbog još uvijek

prisutnog nedostatka transparentnosti izostaju podaci o konkretnim postupcima i lokacijama obrade. Republika Hrvatska, iako veliki udio ostalih vrsta baterija obrađuje i reciklira unutar svojih granica ipak nema kapacitet za recikliranje litij-ionskih baterija te gotovo svu količinu istih izvozi u ostale zemlje članice Europske unije na recikliranje i odlaganje, a znatni dio i bez predobrade i pripreme.

Veliki se značaj općenito u svijetu, ali i Europi pridodaje razvoju litij-ionskih baterija i zadovoljavanju rastuće potrebe za istima, a primjer toga su i u radu navedene organizacije i inicijative, no povratna logistika i integrirano razmišljanje o kraju životnog vijeka baterije ključni su za postizanje održivosti. Nova Regulativa Europske unije koja na snagu stupa ove, 2024. godine, sa mnogim svojim stavkama i mjerama djeluje obećavajuće te u obzir uzima stanje na tržištu kojem dominiraju litij-ionske baterije i ostavlja prostor za promjene i napredak u tehnologiji, ali i teži održivosti, transparentnosti i odgovornosti. Rezultati mnogih od uključenih mjera mogu se očekivati nakon 2030. godine te će s njima biti dostupno znatno više podataka i statistike na ovu temu koji će biti plodnija podloga za buduće dublje istraživanje.

LITERATURA

- [1] Predavanja, kolegij: Tehnička logistika, Prof. dr. sc. Goran Đukić, FSB
- [2] Rogers, D. S., Tibben-Lembke, R. S.: Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices, Reverse Logistics Executive Council, 1998.
- [3] Carter, C.R., Ellram, L. M.: Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation, *Journal of Business Logistics*, Vol. 19, No. 1, str. 85–102. 1998.
- [4] De Brito, M. P., Dekker, R.: Reverse Logistics – a framework, Econometric Institute Report EI 2002-38, 2002.
- [5] Grabara, J., Man, M., Kolcun, M.: The benefits of reverse logistics, *International Letters of Social and Humanistic Sciences*, ISSN: 2300-2697, Vol. 26, str. 138–147., 2014.
- [6] „Distortion in the supply chain – beware the Bullwhip effect“, *SCCG The Supply Chain Consulting Group*, <https://www.sccgltd.com/featured-articles/distortion-in-the-supply-chain-beware-the-bullwhip-effect/>. Pristupljeno 14. listopada 2023.
- [7] Banguera Arroyo, L. A., De Los Santos Barreto, C. A., Santos Vasquez, O. B., Vera Nicola, R. J.: The importance of Reverse Logistics and Green Logistics for Sustainability in Supply Chains, *Journal of business and entrepreneurial studies*, Vol. 7 – 4 – 2023, str. 46.–72., 2023.
- [8] Green Logistics; Improving the environmental sustainability of logistics, uredili Alan McKinnon, Sharon Cullinane, Michael Browne, Anthony Whiteing, The Chartered Institute of Logistics and Transport (UK), 2010.
- [9] „What does „Reduce, Reuse, Recycle“ mean?“, *Vogel Disposal Service, Inc.*, <https://www.vogeldisposal.com/vogel-disposal-news/what-does-reduce-reuse-recycle-mean-3047>. Pristupljeno 15. listopada 2023.
- [10] „Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima“, *Ministarstvo zaštite okoliša i prirode, Narodne novine*, https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_10_111_2147.html. Pristupljeno 17. studenog 2023.
- [11] Prof. dr. sc. Hrvoje Pandžić, Domagoj Badanjak: Predavanje, *Osnove električnih i hibridnih vozila; Proizvodnja baterija i utjecaj na okoliš*, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, 2022.

- [12] „Cylindrical Battery vs Prismatic Battery, What is the difference?“, *Eco Lithium Battery*, <https://www.ecolithiumbattery.com/cylindrical-battery-vs-prismatic-battery/>. Pristupljeno 17. studenog 2023.
- [13] Deng, D.: Energy Science & Engineering, Li-ion batteries: basics, progress, and challenges, *Energy Science and Engineering*, str. 385–418., 2015.
- [14] „Are you killing your lithium batteries?“, *Electrek*, <https://electrek.co/2018/05/04/are-you-killing-your-lithium-batteries/>. Pristupljeno 24. studenog 2023.
- [15] Ritchie, H.: „The price of batteries has declined by 97% in the last three decades“, *Our World in Data*, <https://ourworldindata.org/battery-price-decline>. Pristupljeno 26. studenog 2023.
- [16] Colthorpe, A.: „Lithium battery pack prices go up for first time since BloombergNEF began annual survey“, *Energy Storage News*, <https://www.energy-storage.news/lithium-battery-pack-prices-go-up-for-first-time-since-bloombergnef-began-annual-survey/>. Pristupljeno 26. studenog 2023.
- [17] Rechargeable Ion Batteries: Materials, Design, and Applications of Li-Ion Cells and Beyond, Prvo izdanje, uredili Katerina E. Aifantis, R. Vasant Kumar i Pu Hu, WILEY-VCH GmbH, 2023.
- [18] Safder, A.: „Automotive Applications for Lithium-Ion Batteries“, *Nanografi Nano Technology*, <https://nanografi.com/blog/automotive-applications-for-lithiumion-batteries/>. Pristupljeno 26. studenog 2023.
- [19] „The Power Behind Your Phone: How Batteries Work“, *Electron-to-Go*, <https://electronstogo.com/blog/the-power-behind-your-phone-how-batteries-work>. Pristupljeno 4. prosinca 2023.
- [20] „Smanjenje emisija u prometu: objašnjenje novih ciljeva za smanjenje emisija CO₂ iz automobila i kombija“, *Vijesti Europski parlament*, <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20180920STO14027/smanjenje-emisija-u-prometu-objasnjenje-novih-ciljeva-za-smanjenje-emisija-co2>. Pristupljeno 2. prosinca 2023.
- [21] „EU ban on the sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained“, *News European Parliament*, <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20221019STO44572/eu-ban-on-sale-of-new-petrol-and-diesel-cars-from-2035-explained>. Pristupljeno 4. prosinca 2023.

- [22] „New registrations of electric vehicles in Europe“, *European Environment Agency*, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/new-registrations-of-electric-vehicles>.
Pristupljeno 4. prosinca 2023.
- [23] Hirz, M., Nguyen, T. T.: Life-Cycle CO₂-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems, *World Electric Vehicle Journal*, 13(4), 61., 2022.
- [24] *Global Battery Alliance*, <https://www.globalbattery.org/>. Pristupljeno 6. prosinca 2023.
- [25] „About EBA250“, *European Battery Alliance*, <https://www.eba250.com/about-eba250/>.
Pristupljeno 22. siječnja 2014.
- [26] *Battery 2030*, Europska unija, <https://battery2030.eu/>. Pristupljeno 6. prosinca 2023.
- [27] „Ecodesign preparatory Study for Batteries“, *European Commission*, <https://ecodesignbatteries.eu/introduction.html>. Pristupljeno 22. siječnja 2024.
- [28] Krajewska, R., Bomba, I.: Air transport of lithium batteries, *AUTOBUSY – Technika Eksploatacja Systemy Transportowe*, 6, 2019.
- [29] „About the ADR“, *UNECE*, <https://unece.org/about-adr#>. Pristupljeno 30. prosinca 2023.
- [30] He, J.: Classification and Application Research of Lithium Electronic Batteries, *MATEC Web of Conferences*, 386, 03008, 2023.
- [31] Hantanasirisakul, K., Sawangphruk, M.: Sustainable Reuse and Recycling of Spent Li-Ion Batteries from Electric Vehicles: Chemical, Environmental, and Economical Perspectives, *Global Challenges*, 7, 2200212, 2023.
- [32] Kampker, A., Heimes, H. H., Offermanns, C., Frank, M., Klohs, D., Nguyen, K.: Prediction of Battery Return Volumes for 3R: Remanufacturing, Reuse, and Recycling, *Energies*, 16, 6873, 2023.
- [33] Mossali, E., Picone, N., Rodriguez, O., Perez, J. M., Colledani, M.: Lithium-Ion Batteries towards Circular Economy: a Literature Review of Opportunities and Issues of Recycling Treatments, *Journal of Environmental Management*, 264, 110500, 2020.
- [34] Mrozik, W., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O., Christensen, P.: Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries, *Energy & Environmental Science*, 14, str. 6099–6121., 2021.

- [35] „Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC (Text with EEA relevance)“, *EUR-Lex*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32006L0066>. Pristupljeno 16. siječnja 2024.
- [36] „Making batteries more sustainable, more durable and better-performing“, *Vijesti*, Europski parlament, <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/press-room/20230609IPR96210/making-batteries-more-sustainable-more-durable-and-better-performing>. Pristupljeno 23. siječnja 2024.
- [37] „New Batteries Regulation“, *Legislative Train Schedule*, Europski parlament, [https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-revision-of-the-eu-battery-directive-\(refit\)](https://www.europarl.europa.eu/legislative-train/theme-a-european-green-deal/file-revision-of-the-eu-battery-directive-(refit)). Pristupljeno 23. siječnja 2024.
- [38] „Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC (Text with EEA relevance)“, *EUR-Lex*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1542>. Pristupljeno 23. siječnja 2024.
- [39] „NN 124/2023 (25.10.2023.), Pravilnik o gospodarenju posebnim kategorijama otpada u sustavu Fonda“, *Zakon.hr*, <https://www.zakon.hr/cms.htm?id=58522>. Pristupljeno 24. siječnja 2024.
- [40] „Ključni brojevi otpada“, *Preglednik registra onečišćavanja okoliša*, Agencija za zaštitu okoliša, <http://roo-preglednik.azo.hr/ViewData.aspx?qid=9>. Pristupljeno 24. siječnja 2024.
- [41] „Otpadne baterije i akumulatori“, *Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost*, <https://www.fzoeu.hr/hr/otpadne-baterije-i-akumulatori/7755>. Pristupljeno 8. siječnja 2024.
- [42] Fuk, B.: Otpadne baterije iz električnih vozila – odgođeno rješavanje budućeg problema, *Sigurnost*, 64 (1), str. 85–89., 2022.
- [43] „Projekt: Centar za reciklažu Litij-ion baterija iz električnih vozila“, *CIAK Grupa*, <https://ciak.hr/prva-faza-projekta-centar-za-reciklazu-litij-ion-baterija/>. Pristupljeno 8. siječnja 2024.

- [44] Pregled podataka o gospodarenju otpadnim baterijama i akumulatorima za 2022. godinu, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Izvjesca/ostalo/Pregled%20podataka%20o%20gospodarenju%20otpadnim%20baterijama%20i%20otpadnim%20akumulatorima%20za%202022_ver.%201_FINAL.pdf. Pristupljeno 16. siječnja 2024.
- [45] Rimac Technology, <https://www.rimac-technology.com/>. Pristupljeno 24. siječnja 2024.
- [46] „Rimac Technology and EVE Energy announce collaboration on battery cell production in Europe“, Rimac Newsroom, <https://www.rimac-newsroom.com/press-releases/rimac-technology/rimac-technology-and-eve-energy-announce-collaboration-on-battery-cell-production>. Pristupljeno 24. siječnja 2024.
- [47] „Prateći list za otpad“, Ministarstvo gospodarstva i održivog razvoja, <https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA-ZA-PROCJENU-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ODRZIVO-GOSPODARENJE-OTPADOM/Sektor%20za%20odr%C5%BEivo%20gospodarenje%20otpadom/Obrasci/Dodatak%20XIII%20-%20Prateci%20list.docx>. Pristupljeno 24. siječnja 2024.