Recikliranje baterija iz električnih automobila

Coronelli, Eduard

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:341903

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

RECIKLIRANJE BATERIJA IZ ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

Diplomski rad

Eduard Coronelli
R-202

Zagreb, 2020.

KLASA: 602-04/20-01/77
URBROJ: 251-70-03-20-2
U Zagrebu, 15.09.2020.

Eduard Coronelli, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/77, UR. BROJ: 251-70-03-20-1 od 23.04.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

RECIKLIRANJE BATERIJA IZ ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu prof. dr. sc. Gordan Bedeković, redoviti profesor Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Prof. dr. sc. Gordan Bedeković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

RECIKLIRANJE BATERIJA IZ ELEKTRIČNIH AUTOMOBILA

EDUARD CORONELLI

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za mineralogiju, petrologiju i mineralne sirovine
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Električni automobili smatraju se ekološkom alternativom automobilima s motorom s unutarnjim izgaranjem zbog smanjenih emisija ispušnih plinova i povoljnijeg utjecaja na okoliš. Iako ovakva vozila nemaju direktne emisije, u pitanje se dovode načini dobivanja električne energije za napajanje vozila, kao i pitanje utjecaja njihovih baterija na okoliš. Recikliranjem baterija dodatno se umanjuje onečišćenje planete i brzo iscrpljivanje sirovina potrebnih za njihovu izradu, stoga je od iznimne važnosti pravovremeno razvijati kvalitetne metode i tehnologiju. Cilj ovog diplomskog rada je prikazati na koji način se postupa s baterijama električnih vozila u Republici Hrvatskoj i u svijetu, postupak i metode recikliranja uz uspješne primjere u inozemstvu te mogućnosti njihove ponovne uporabe. Rad je napravljen uz pomoć tvrtke Rimac Automobili d.o.o.

Ključne riječi: električna vozila, hibridna vozila, automobili, baterije, recikliranje

Diplomski rad sadrži: 52 stranice, 5 tablica, 18 slika i 29 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Gordan Bedeković, redoviti profesor RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Gordan Bedeković, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF

Datum obrane: 22. rujna 2020.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

RECYCLING OF ELECTRIC CAR BATTERIES

EDUARD CORONELLI

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Institute of Mineralogy, Petrology and Mineral deposits,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Electric cars are considered to be an environmentally friendly alternative to cars with an internal combustion engine due to reduced exhaust emissions and a more favorable environmental impact. Although such vehicles do not have direct emissions, the ways of obtaining electricity to power vehicles, as well as the issue of the impact of their batteries on the environment, are still questionable. Recycling batteries further reduces planetary pollution and the rapid depletion of the raw materials needed for their production, so it is extremely important to develop quality methods and technology in a timely manner. The aim of this thesis is to show how electric vehicle batteries are handled in the Republic of Croatia and the world, the procedure and methods of recycling with successful examples abroad and the possibilities of their reuse. The thesis was made with the help from Rimac Automobili d.o.o.

Keywords: electric vehicle, hybrid vehicle, cars, battery, recycling

Thesis contains: 52 pages, 5 tables, 18 figures, and 29 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Gordan Bedeković, Full Professor

Reviewers: PhD Gordan Bedeković, Full Professor
PhD Dalibor Kuhinek, Associatppe Professor
PhD Želimir Veinović, Assistant Professor

Date of defense: September 22nd, 2020.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. ELEKTRIČNA VOZILA (EV) 2
2.1 Povijest električnih vozila 2
2.2 Vrste električnih vozila 6
2.2.1 Baterijska električna vozila (BEV) 7
2.2.2 Hibridna električna vozila (HEV) 8
2.3 Prednosti i nedostaci 9
2.4 Okolišno pitanje 10
3. ELEKTRIČNA BATERIJA 14
3.1 Povijest baterija 14
3.2 Vrste baterija 15
3.2.1 Olovne baterije 15
3.2.2 Litij-ionske baterije (Li-Ion) 16
3.2.3 Nikal-kadmijeve baterije (NiCd) 16
3.2.4 Nikal-metal hidridne baterije (NiMH) 17
3.3 Osnovni elementi 18
3.4 Princip rada baterije 20
3.4.1 Pražnjenje olovno-kiselinske baterije 21
3.4.2 Punjenje olovno-kiselinske baterije 21
4. RECIKLIRANJE BATERIJA 23
4.1 Recikliranje općenito 23
4.2 Ponovna uporaba baterija 24
4.3 Razlozi recikliranja 25
4.4 Postupak recikliranja baterija 26
4.4.1 Recikliranje baterija na bazi litija 27
4.4.1.1 Hidrometalurška metoda 28
4.4.1.2 Pirometalurška metoda 30
4.4.1.3 Biohidrometalurška metoda 32
4.4.1.4 Metoda postrojenja Duesenfeld 34
4.5 Recikliranje baterija u Hrvatskoj 38
4.5.1 Zakonski okvir 38
4.5.2 Trenutno stanje 42
5. ZAKLJUČAK 46
LITERATURA 48

POPIS SLIKA

Slika 1. Broj korištenih električnih vozila u svijetu (2012. - 2019.) 6
Slika 2. Komponente BEV-a 7
Slika 3. Shematski prikaz komponenti serijskog HEV-a 8
Slika 4. Shematski prikaz komponenti paralelnog HEV-a 9
Slika 5. Serijski spoj baterija 19
Slika 6. Paralelni spoj baterija 19
Slika 7. Osnovna struktura baterije 21
Slika 8. 4R princip 23
Slika 9. Projekt *The Reborn Light* 24
Slika 10. Prateći list za otpad 27
Slika 11. Proces recikliranja baterija u postrojenju Recupyl 29
Slika 12. Temperaturne zone peći IsaSmelt^{TM} postrojenja Umicore 32
Slika 13. Duesenfeld metoda recikliranja 34
Slika 14. Učinkovitost Duesenfeld metode 35
Slika 15. Ušteda CO_2 u usporedbi s pirometalurškom metodom i primarnom ekstrakcijom 37
Slika 16. Oznaka za odvojeno sakupljanje istrošenih baterija i akumulatora 39
Slika 17. Oznaka *Preuzimamo otpadne baterije* 41
Slika 18. Količina sakupljenih i oporabljenih baterija (2016. - 2018.) 43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba emisija CO_2 12
Tablica 2. Ovlašteni sakupljači otpadnih baterija i akumulatora u RH u 2019. godini .. 41
Tablica 3. Ovlašteni oporabitelji otpadnih baterija i akumulatora u RH u 2019. godini 41
Tablica 4. Količine baterija ili akumulatora stavljene na tržište po vrstama 43
Tablica 5. Udio koncesionara u ukupnoj sakupljenoj količini otpada 44

POPIS KORIŠTENIH JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
m	t	masa
U	V	napon
P	W	snaga
I	A	jakost struje
l	m	dužina
v	m/s	brzina
t	°C	temperatura

1. UVOD

Posljednjih desetljeća sve više jača svijest javnosti o utjecaju ljudske aktivnosti na stanje okoliša i nužnosti održivog korištenja prirodnih resursa. Ekološka kriza kojoj svjedočimo potiče ljude da se sve češće odlučuju za rješenja kojima će umanjiti negativan utjecaj na klimatske promjene i onečišćenje prirode. Napredak tehnologije i okretanje čišćim, obnovljivim izvorima energije, doveo je do toga da se u posljednje vrijeme automobilska industrija sve više fokusira na razvoj bezemisijskih vozila. Baterijska električna vozila, kao i hibridna, smatraju se ekološkom alternativom vozilima s motorom s unutarnjim izgaranjem zbog smanjenih emisija ispušnih plinova a time i utjecaja na okoliš. No, od iznimne je važnosti pravovremeno prepoznati i rješavati druga ekološka pitanja koja se uz njih nameću. Jedno od njih je i pitanje utjecaja baterija ovih vozila na okoliš, ali i njihovog recikliranja, čime bi se dodatno umanjilo onečišćenje planete i brzo iscrpljivanje sirovina potrebnih za njihovu izradu.

Ovaj diplomski rad je podijeljen u tri dijela koja se bave električnim vozilima, baterijama i recikliranjem, a u kojima se pobliže upoznajemo s navedenim pojmovima. Cilj rada je prikazati: na koji način se postupa s baterijama električnih vozila u Republici Hrvatskoj i u svijetu; postupak i metode recikliranja uz uspješne primjere u inozemstvu; mogućnosti njihove ponovne uporabe. Metodologija rada uključuje analizu i sintezu znanstvene literature i podataka s mrežnih izvora, kao i intervju s voditeljem sigurnosti i zaštite zdravlja radnika te zaštite okoliša tvrtke Rimac Automobili d.o.o. Svrha intervjua je bila dobiti uvid u načine zbrinjavanja baterija električnih automobila u Republici Hrvatskoj.

2. ELEKTRIČNA VOZILA (EV)

2.1 Povijest električnih vozila

Unatoč tome što električne automobile tek zadnjih nekoliko godina viđamo u prometu, i to i dalje u vrlo skromnom udjelu u odnosu na one s motorom s unutarnjim izgaranjem, prvi modeli električnih vozila pojavili su se prije gotovo dvjesto godina. Prvi minijaturni model automobila s električnim motorom izmuio je Mađar Ányos Jedlik 1828. godine. Interes za razvojem električnih vozila se nastavio, pa se tijekom sljedećih nekoliko desetljeća pojavljuju novi značajniji koncepti. Prva električna kočija 1830-ih škotskog izumitelja Roberta Andersona je koristila nepunjive baterije, zbog čega nije stekla veću popularnost ni komercijalnu primjenu. Tek je izum prve olovno – kiselinske baterije omogućio da električna vozila postanu praktično upotrebljivi i komercijalni proizvodi. Ovu bateriju izumio je Gaston Planté 1859. godine, a njegovo otkriće je unaprijedio Camille Faure 1881. godine tako što je poboljšao kapacitet baterije dodavši na olovne ploče mješavinu olovo – sulfata. Ovo otkriće omogućilo je novi val razvoja električnih vozila 1880-ih, kao što su prvi tricikl pokretan istosmjernim motorom u Parizu 1881. godine te prvi električni tramvaj u Engleskoj 1885. godine (Shaikh, 2018).

Iduće važno tehnološko dostignuće je takozvano regenerativno kočenje koje je Francuz Darracq prvi koristio u električnom automobilu predstavljenom na izložbi u Parizu 1897. godine. Ovaj izum je omogućio pretvorbu kinetičke energije vozila u električnu energiju, čime svako kočenje pomalo puni bateriju vozila. Regenerativno kočenje vrlo je važna komponenta i današnjih električnih i hibridnih vozila jer im uvelike povećava domet (ibid.).

Važno je spomenuti i razvoj hibridnih vozila, koja koriste motor s unutarnjim izgaranjem uz električni motor. Njihova inicijalna namjena je bilo poboljšati performanse vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem, a ne smanjiti potrošnju goriva. Prvo takvo vozilo predstavljeno je na izložbi u Parizu 1899. godine, a napravila su ga braća Pieper u Belgiji. Baterija je bila olovno kiselinska. Godine 1905. Pieper je podnio zahtjev za patent čime je postavio temelje današnjih hibridnih vozila. Drugo važno hibridno vozilo pod nazivom Lohner sastavio je Ferdinand Porsche, a predstavio ga je na izložbi u Parizu 1900. godine.

Posebnost ovog automobila je u tome što su elektromotori bilo povezani izravno na kotače, na taj način zaobilazeći prijenos između motora i kotača (ibid.).

Popularnost električnih vozila bila je osobito velika u razdoblju od 1890. do 1910. godine. Ova su vozila bila tiša, ugodnija za vožnju i manje zagađivala okoliš od automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem, a usto su imala i bolje performanse. Također su bila jednostavnija za vožnju budući da nisu imala spojku jer nije bilo potrebno mijenjati brzine, te nisu zahtijevala ručno pokretanje motora prije izuma pokretača motora (startera). Upravo je iz tih razloga samim krajem 19. stoljeća porasla popularnost ovakvih vozila, pa se tako javljaju prvi električni taksiji u Londonu, New Yorku i Philadelphiji. Osim za taksije, električna vozila su se koristila i u svrhu dostava i specijaliziranih usluga, poput vatrogasnih i smetlarskih kola, ali i u ratne svrhe. Vrhunac popularnosti u SAD-u doživjela su 1900. godine s ukupno 1575 električnih vozila od ukupno 4192 registriranih vozila u državi, odnosno gotovo 40 %. U većim gradovima poput New Yorka, Bostona i Chicaga taj je udio bio i veći budući da je ondje bilo dvostruko više električnih vozila u odnosu na ona na fosilna goriva. Već 1905. godine taj se udio drastično smanjio kad je od ukupno 78 000 registriranih vozila većina bila onih koja koriste benzin (ibid.).

Možemo izdvojiti nekoliko razloga pada popularnosti električnih vozila. Prvi i možda najvažniji faktor bio je kratki domet baterije koji je i najutjecajniji ograničavajući faktor kod današnjih električnih vozila. U početku automobilizma većina prometa se odvijala unutar gradova, te je gradska infrastruktura bila relativno nerazvijena, zbog čega mali domet nije bio presudan. Razvijanjem prometne infrastrukture i povećanjem međugradskog prometa, navedeni je problem postajao sve izraženiji. Drugi važan faktor bila je i cijena punjenja baterije koja je bila viša od cijene benzina te je 1900. godine u SAD-u bilo višestruko povoljnije napuniti spremnik goriva nego bateriju. Još jedan faktor bio je i brz razvoj infrastrukture za benzinske postaje koja se razvijala na već postojećoj infrastrukturi za opskrbu kerozinom, koji se koristio za svjetiljke, dok je infrastruktura za punjenje električnih vozila zaostajala. Na to je utjecao i problem standardizacije infrastrukture za punjenje zbog mnogobrojnih rasprava o izboru između istosmjerne i izmjenične struje. Izumom električnog startera za motore s unutarnjim izgaranjem 1912. godine, električna vozila izgubila su veliku prednost. Budući da nije više bilo potrebno ručno pokretati motor, motori s unutarnjim izgaranjem su dobili bolje performanse te su postali praktičniji za svakodnevnu upotrebu. Napredak motora s unutarnjim izgaranjem

ubrzano je porastao, dok su performanse električnih motora ostale ograničene baterijom. Pojavom masovne proizvodnje automobila pomoću pokretne trake, Henry Ford je uspostavio tržišnu dominaciju u autoindustriji čime je dodatno porasla popularnost vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem. Naime, njegov Model T je 1908. godine imao početnu cijenu od 850 američkih dolara, dok je cijena električnih automobila iznosila i po nekoliko tisuća dolara. Ubrzavanjem proizvodnog procesa, broj proizvedenih vozila bio je sve veći, a njihova cijena sve niža. Već do 1915. Ford je proizveo milijun primjeraka Modela T, a cijena je 1923. iznosila rekordno niskih 265 dolara (ibid.).

Svi spomenuti faktori rezultirali su time da su osobna električna vozila gotovo u potpunosti izašla iz upotrebe nakon 1920. godine, dok su neka dostavna i komercijalna električna vozila donekle ostala u upotrebi. Nestašicom benzina tijekom Drugog svjetskog rata, električni automobili ponovno su se počeli proizvoditi u Francuskoj (Peugeot), Italiji (Maserati), Engleskoj i Nizozemskoj. Iz istog razloga, završetkom Drugog svjetskog rata, u Japanu se pojavljuju električni automobili kao što je Tama 1947. godine. Ovaj automobil imao je olovno-kiselinsku bateriju napona 40 V dometa od gotovo 100 km. Iako je proizvodnja u Europi i Japanu u ratno i poslijeratno vrijeme nakratko ponovno porasla, upotreba osobnih električnih automobila je u razdoblju do 1920. do 1960. ostala skromna. Jačanjem ekološke svijesti 1960-ih godina i sve intenzivnijim razmišljanjem o utjecaju antropogenih utjecaja na kvalitetu zraka i okoliš općenito, ponovno se javlja interes za električna vozila. Mnogi proizvođači poput General Motorsa i Forda su počeli predstavljati svoje koncepte električnih automobila, ali bez puno uspjeha zbog učestalih tehničkih problema i ograničenja u usporedbi s vozilima koja su koristila motor s unutarnjim izgaranjem (ibid.).

Najveća tehnološka dostignuća za električna vozila u tom razdoblju dugujemo tehnologiji koju je razvila NASA za električno vozilo Lunar Roving Vehicle (LRV), koje je služilo u Apollo misijama na Mjesecu. Vozilo je bilo namijenjeno maksimizaciji ljudskog djelovanja na Mjesecu, što znači da je napredak tehnologija omogućio prijelaz sve većih udaljenosti (od početnih 200 m do 35 km) i prijenos sve većih količina uzoraka. LRV je koristio dvije srebro-cink baterije napona 36 V i dometa 91 km (ibid.).

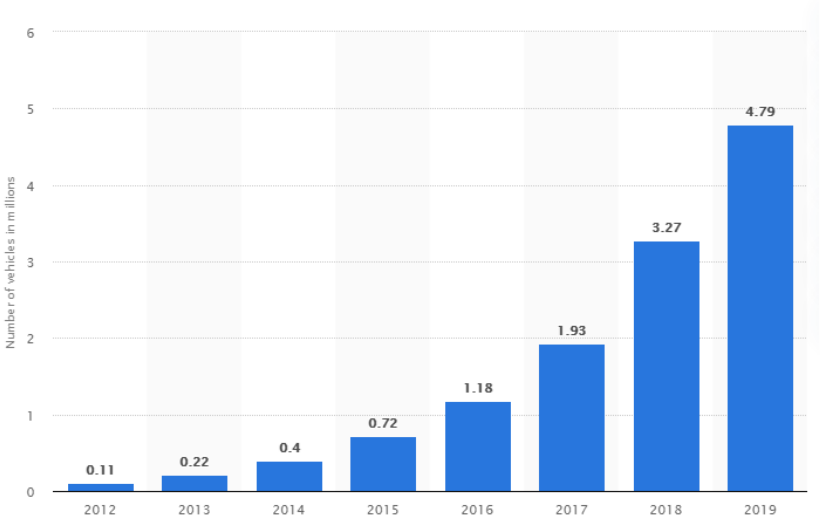
Tijekom 1970-ih godina arapski članovi organizacije OPEC (Organization of Petroleum Exploring Countries) su uslijed arapsko-izraelskog sukoba 1973. godine uspostavile

embargo na izvoz nafte što je dovelo do naftne krize u SAD-u a time i interesa za električna vozila. Unatoč poticajima američke vlade za istraživanjem novih tehnologija, tri najveća proizvođača (Ford, General Motors i Chrysler) i dalje nisu ulagala u električna vozila zbog slabe potražnje.

Iako je postojao interes za električna vozila, te su se javljali razni koncepti manjih proizvođača, i dalje je upotreba električnih vozila pretežito bila u komercijalne svrhe.
1980-ih godina nastavio se razvoj električnog automobilizma te se pojavljuju zanimljivi koncepti od mnogih poznatih proizvođača. No, tek je 1990-ih godina započeo ozbiljan razvoj električnih automobila kao posljedica ekološkog osvještavanja te zalaganja tadašnje američke vlade za zaštitu okoliša. Unatoč zalaganjima vlade i većim nastojanjima za razvitkom električnih i hibridnih vozila, interes kupaca je i dalje bio znatno manji u usporedbi s onim za vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem, te su ta vozila ostala na razini koncepata i nisu bila dostupna široj javnosti. Za početak masovne proizvodnje električnih, odnosno hibridnih vozila ranih 2000-ih godina zaslužna je japanska autoindustrija. Status prvog masovnog proizvedenog hibrida dobila je Toyota Prius, koja je bila u prodaji u Japanu od 1997. godine (ibid.).

U Kaliforniji je 2003. osnovan „start-up“ Tesla Motors koja je jedna od najvećih kompanija u proizvodnji električnih automobila, sadašnjeg naziva Tesla, Inc. Prvi automobil naziva Roadster predstavili su 2006. godine. Bio je to potpuno električni automobil koji je koristio bateriju s više od 6 000 litij – ionskih ćelija. Automobil je imao izvrsne performanse pa je tako ubrzanje od 0 km/h do 100 km/h trajalo manje od 4 sekunde, maksimalna brzina je bila preko 200 km/h, a tvrdili su da je domet gotovo 400 km. Roadster je prodan u preko 1200 primjeraka unatoč visokoj cijeni od preko 100 000 američkih dolara (ibid.).

U posljednjih 10 godina proizvođači automobila sve se više fokusiraju na ovu granu autoindustrije te u ponudi imaju sve veći broj modela električnih i hibridnih vozila. Sukladno tome uočavamo i sve veći broj prodanih primjeraka (slika 1).



Slika 1. Broj korištenih električnih vozila u svijetu (2012. - 2019.)

(Wagner, 2020)

2.2 Vrste električnih vozila

Prema punjenju baterija i vrsti motora, električna vozila možemo podijeliti na dva osnovna tipa (Shaikh, 2018):

- baterijska električna vozila (engl. Battery Electric Vehicle, ili BEV) i
- hibridna električna vozila (engl, Hybrid Electric Vehicle, ili HEV).

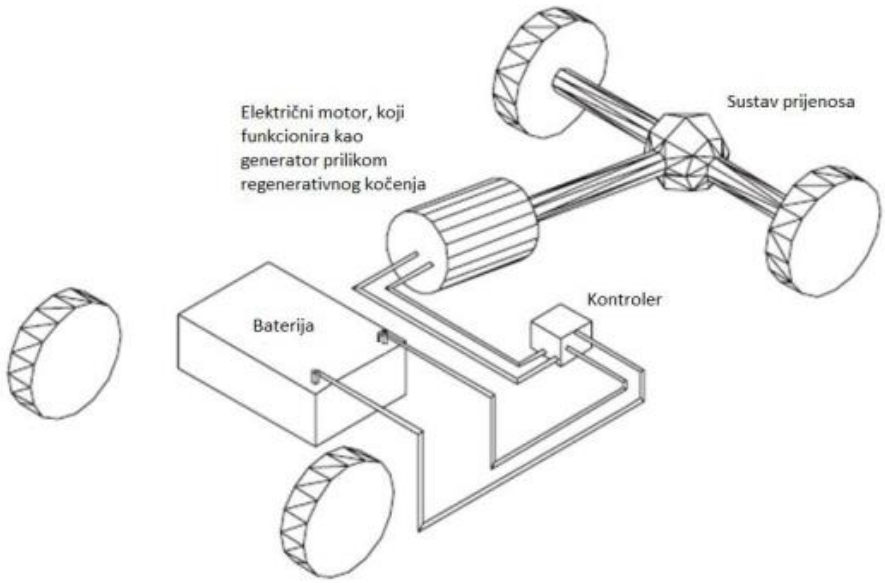
Baterijska električna vozila koriste električnu energiju pohranjenu u bateriji kao jedini izvor energije, dok hibridna koriste manji električni motor u kombinaciji s motorom s unutarnjim izgaranjem u svrhu optimizacije potrošnje goriva. **Hibridna električna vozila** dijelimo na serijska i paralelna, te na ona koja se mogu puniti na gradskoj mreži (Plug-In Hyrid Electric Vehicle, ili PHEV) i ona koja se pune isključivo kočenjem automobila (ibid.).

Uz spomenuta dva osnovna tipa električnih vozila, možemo spomenuti i električna vozila s pogonom na gorive ćelije, koja koriste vodik kao pogonsko gorivo. Kao i baterijska električna vozila, i ova vozila su bezemisijska (ibid.).

2.2.1 Baterijska električna vozila (BEV)

Ovaj tip električnih vozila za pogon koriste isključivo električnu energiju koja služi za pokretanje jednog ili više električnih motora, a potrebno ih je puniti spajanjem na gradsku mrežu. Uz *plug-in* punjenje, baterija se dopunjuje i regeneretivnim kočenjem pri kojem se kinetička energija vozila pretvara u električnu energiju baterije. Prednosti ovog tipa vozila su što nema ispušnih plinova (bezemisijska vozila) te imaju puno veću toplinsku efikasnost od vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem. I danas su im najveće mane kraći domet te viša početna cijena u odnosu na druge tipove vozila, uključujući i hibridna (Shaikh, 2018).

Ključne komponente BEV-a su: električna baterija, električni motor i kontroler (slika 2).



Slika 2. Komponente BEV-a

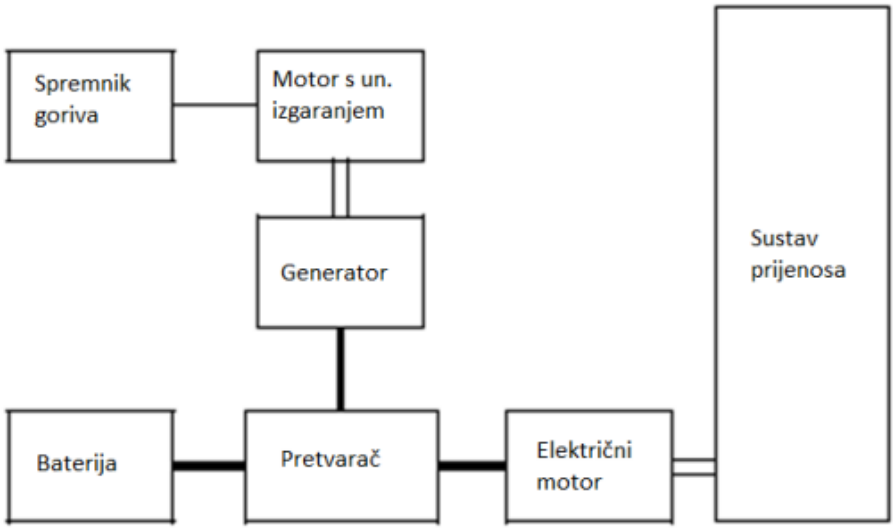
(Shaikh, 2018)

Električni kontroler je komponenta između baterije i motora za određivanje koliko struje će motor dobiti, te za punjenje baterije pri regenerativnom kočenju.

2.2.2 Hibridna električna vozila (HEV)

Serijska hibridna električna vozila

Kod serijskih hibridnih vozila, automobil se kao i BEV uvijek pokreće električnim motorom (Shaikh, 2018). Za razliku od BEV-a ovaj tip vozila koristi tri propulzijska sustava: motor s unutarnjim izgaranjem, generator i električni motor (slika 3).



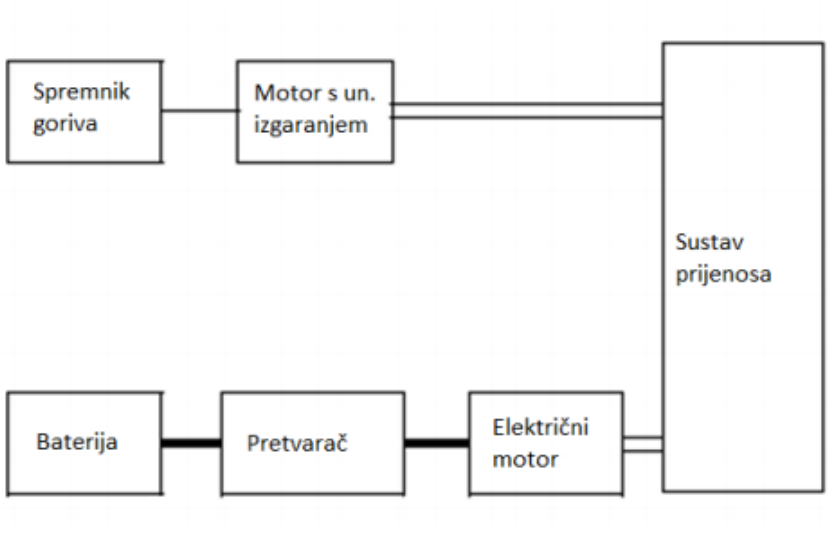
Slika 3. Shematski prikaz komponenti serijskog HEV-a

(Shaikh, 2018)

Motor s unutarnjim izgaranjem preko generatora puni bateriju ili direktno pokreće električni motor kad se baterija isprazni, što vozilu omogućuje dulje trajanje baterije i veći domet.

Paralelna hibridna električna vozila

Za razliku od serijskih, paralelna hibridna električna vozila se mogu pokretati pomoću više od jednog propulzijskog sustava (slika 4): motorom s unutarnjim izgaranjem, električnim motorom, te s oba tipa motora istovremeno (ibid.).



Slika 4. Shematski prikaz komponenti paralelnog HEV-a

(Shaikh, 2018)

Svrha paralelne izvedbe hibrida je smanjenje potrošnje goriva i emisija ispušnih plinova.

Punjiva hibridna električna vozila

Punjiva vozila tipa HEV (engl. Plug-In Hybrid Electric Vehicle, ili PHEV) imaju dodatnu mogućnost punjenja baterija spajanjem na gradsku električnu mrežu. Time se znatno povećava domet pri vožnji na isključivo električnu energiju u odnosu na ostale hibride, pa tako današnji PHEV-ovi imaju domet do 160 km samo na električnu energiju. Kada se baterija isprazni, propulziju preuzima motor s unutarnjim izgaranjem, pri čemu se opet baterija dopunjava pri regenerativnom kočenju. Upravo ta fleksibilnost i svestranost ovog tipa vozila, čini ga među najpopularnijim tipovima električnih vozila današnjice (ibid.).

2.3 Prednosti i nedostaci

Prednosti (Turčinović, 2019):

- Jednostavna koncepcija – lakši popravak i dijagnostika
- Kraće vrijeme održavanja i manja mogućnost pojave kvara – manji ukupni troškovi
- Laka dobavljivost električne energije
- Nema emisije stakleničkih plinova
- Porezne olakšice na kupnju novog vozila

- Niže cijene osiguranja vozila
- Bolja energetska učinkovitost
- Tiši rad motora – manje zagađenje okoliša bukom i vibracijom
- Mogućnost vraćanja energije u bateriju prilikom kočenja
- Veća ekonomičnost – jeftinije ili čak besplatno punjenje
- Bolje dinamičke osobine – dostupan maksimalan okretni moment u svim režimima rada
- Itd.

Nedostaci (ibid.):

- Manja autonomija (domet)
- Ograničen vijek trajanja baterije
- Cijena automobila
- Vrijeme trajanja punjenja baterije
- Slabo razvijena električna infrastruktura
- Itd.

2.4 Okolišno pitanje

Jedna od najvećih prednosti koje se pripisuju električnim automobilima je njihova ekološka prihvatljivost, budući da njihova upotreba ne proizvodi emisiju štetnih tvari u okoliš. No, posljednjih se godina dovodi u pitanja koliko su električni automobili ustvari „zeleni“. Iako su sama vozila bezemisijska, možemo izdvojiti tri ključna ekološka problema koja se postavljaju.

Proizvodni proces

Električna vozila predstavljaju problem i prije nego što izađu na tržište, budući da su proizvod više tvornica, što znači da je komponente potrebno dopremiti iz nekoliko različitih lokacija na mjesto sastavljanja vozila. Za ovaj transport potrebno je utrošiti mnogo nečiste energije u obliku nafte za pogon velikih transportnih brodova i kamiona, čiji ispušni plinovi potom završavaju u atmosferi. Prema nekim izračunima, električni automobili tijekom izrade i sklapanja zagađuju i više nego automobili s motorom na

unutarnje izgaranje (Pejović, 2018). Ova problematika se uglavnom odnosi na proizvodnju samih baterija, budući da se ostatak električnih vozila ne razlikuje od klasičnih vozila, no o tome u daljnjem tekstu.

Baterija

Kao što je ranije spomenuto, *otisak ugljika* (engl. *carbon footprint*) pri proizvodnji električnog vozila može znatno nadmašiti otisak koji nastaje pri proizvodnji automobila s motorom na unutarnje izgaranje. Osim otiska koji je rezultat transporta pri proizvodnji, eksploatacija sirovina potrebnih za izradu baterije (litij, kobalt...) odgovorna je za emisije golemih količina stakleničkih plinova, ali i za eksploataciju vode pri ekstrakciji litija, te za druge probleme poput izrabljivanja djece za rad (Donut Media, 2020).

Dok je za proizvodnju automobila s motorom na unutarnje izgaranje potrebno prosječno 7 t CO_2, u prosjeku je potrebno 8-10 tona CO_2 za proizvodnju električnog automobila, ovisno o veličini baterije. Za mala gradska električna vozila potrebno je oko 2 t CO_2, dok je za veća vozila s baterijom velikog dometa potrebno čak 17 t CO_2, što znači da taj raspon varira između 2 i 17 t (Donut Media, 2020). Iako je taj raspon velik, pa samim time značajno varira i ekološka isplativost pojedinih električnih vozila, istraživanja pokazuju da su ona svakako bolja za okoliš – bilo u obliku baterijskih ili hibridnih vozila. Na ekološki utjecaj vozila također utječe i izvor električne energije, što znači da je u nekim regijama potrebno više godina do isplativosti električnog vozila, no ono i dalje uvijek nadmašuje vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem (Engineering Explained, 2018b). Ipak, napretkom tehnologije i prelaskom na obnovljive izvore energije, te će emisije biti sve manje.

Velik dio problema s baterijama vezan je i uz njihov relativno kratak vijek trajanja, koji prosječno iznosi oko 10 godina, ovisno o intenzitetu i načinu upotrebe vozila. Nakon što performanse baterije padnu ispod zadovoljavajućih razina, one se najčešće odlažu pod zemlju, pri čemu zagađuju okoliš narednih 70 do 80 godina (Pejović, 2018).

Izvori električne energije

Iako sama vozila ne stvaraju emisije prilikom uporabe, električnu energiju za pokretanje vozila potrebno je proizvesti iz drugih izvora energije. U tehnološki naprednijim zemljama, električna energija se može dobivati iz ekološki čišćih izvora poput solarne energije, energije vjetra, morskih valova i mijena te geotermalnih izvora, koji su bez štetnosti za okoliš i ljude. No, u većem dijelu svijeta se električna energija dobiva iz neobnovljivih izvora energije, poput termoelektrana. One su jedan od većih zagađivača okoliša iz razloga što ispuštaju velike količine štetnih plinova u atmosferu te imaju niz štetnih nusproizvoda poput šljake, zagađene vode, ekoloških problema nastalih eksploatacijom ugljena, itd. (ibid.).

Usporedba

Iako postoje oprečna mišljenja o ekološkoj isplativosti električnih vozila, podaci ukazuju na to da su ona dugoročno gledano manje štetna (Donut Media, 2020). Već nakon 6 mjeseci do 2 godine, njihov utjecaj na okoliš postaje manji od onog vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem. U Tablici 1. možemo vidjeti usporedbu prosječnih emisija CO_2 za obje vrste vozila. To uključuje emisije tijekom proizvodnog procesa vozila, tijekom godišnje proizvodnje energije (električne i goriva) potrebne za prosječan automobil (oko 20 000 km), te ukupne emisije tijekom životnog vijeka vozila (10 godina).

Tablica 1. Usporedba emisija CO_2

(Donut Media, 2020)

	Električni automobili	**Automobili s motorom s unutarnjim izgaranjem**
Proizvodni proces	8-10 t	7 t
Godišnje	2 t	5,2 t
Ukupno	28 t	57 t

Podaci u tablici ukazuju na to da prosječan električni automobil u odnosu na automobil s motorom na unutarnje izgaranje uzrokuje upola manje emisija CO_2 tijekom 10 godina korištenja. Također je važno napomenuti da su vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem gotovo već dosegnula svoj tehnološki vrhunac, dok električna vozila imaju još puno mjesta za napredak u tehnologiji, što će samo povećati razliku u isplativosti i ekološkoj prihvatljivosti u korist električnih vozila.

3. ELEKTRIČNA BATERIJA

3.1 Povijest baterija

Daleke 1936. godine, arheolozi su u selu u blizini Bagdada pronašli 2000 godina stare zdjele od terakote omotane bakrenim pločicama, za koje se vjeruje da su bile prve galvanske ćelije. Smatra se da su se ove *bagdadske baterije* koristile za elektroforezu nakita ili manje elektrošokove u svrhu religijskog iskustva (Lozina, 2017).

Mnogo godina nakon bagdadske baterije, 1749. godine, Benjamin Fanklin je osmislio pojam *baterija* (engl. *battery*) kako bi opisao skup povezanih kondenzatora koje je koristio za pokuse s električnom strujom. To je ustvari bila staklena ploča obložena metalom sa svake strane. Nešto kasnije, 1786. godine, talijanski fizičar Luigi Galvani je izveo eksperiment pri kojem je između dva različita metala napravio kontakt preko žabljih nogu i električnom strujom ih pomaknuo. On je smatrao da je za to zaslužna životinja, te je ovu pojavu nazvao *životinjski elektricitet*. Njegov kolega Alessandro Volta je smatrao da je do kontrakcije došlo spajanjem dva metala preko vlažnog posrednika. On je 1800. izumio prvu pravu bateriju koja je davala stabilnu energiju i imala nisko samopražnjenje, ali je imala kratak životni vijek i nedostatak curenja elektrolita (ibid.).

Kao što je već ranije opisano, 1859. godine je Gaston Planté izumio prvu punjivu bateriju. Ova je baterija bila teška i glomazna u odnosu na količinu energije koju je davala, no koristi se i danas u neznatno izmijenjenom obliku.

Tijekom 20. stoljeća, tehnologija je ubrzano napredovala. 1980-ih godina su se pojavile prve nikal-metal hidridne baterije, koje su izdržljivije i ekološki prihvatljivije. 1990-ih se u baterijama počeo koristiti litij, metal s najmanjom gustoćom i najvećim elektrokemijskim potencijalom. Prva litij-polimerna baterija koja se zbog svoje fleksibilnosti i kompaktnosti danas upotrebljava u manjim uređajima kao što su mobiteli, pojavila se 1996. godine (Janton, 2019).

3.2 Vrste baterija

Postoje različite baterije s obzirom na veličinu, oblik, sastav, punjivost itd. Prema obliku, baterije mogu biti prizmatične (uglavnom pravokutne prizme) ili cilindrične (Novosel, 2016), te gumbaste i vrećaste (Buchmann, 2020). Ipak, najčešće ih se dijeli na primarne ili nepunjive, te sekundarne ili punjive baterije.

Unatoč tome što imaju negativan utjecaj na okoliš, **primarne ili nepunjive baterije** i danas su u širokoj svakodnevnoj upotrebi diljem svijeta zbog toga što omogućuju pristup električnoj energiji kada je punjenje baterija nepraktično ili nemoguće. Često se primjenjuju u vojnim borbama i misijama spašavanja, ali i u medicini, daljinskim signalima, satovima, elektroničkim ključevima i igračkama za djecu. Osim toga, prednosti primarnih baterija su relativno visoka specifična energija, dugi rok trajanja i lagana uporaba. Nedostaci ovog tipa baterije su veliki unutarnji otpor, što znači da pod većim uvjetima opterećenja dolazi do pada napona i zagrijavanja ćelije, te utjecaj temperature na rad baterije. Niske temperature usporavaju rad baterije, dok visoke ubrzavaju, čak i do razine gubitka kapaciteta u kratkom vremenskom periodu. Najpoznatije vrste primarnih baterija su cink-ugljik baterije, cink-klorid baterije, alkalne baterije, srebro-oksid baterije te litijske baterije (Lozina, 2017).

Sekundarne ili punjive baterije danas čine osnovu funkcioniranja većine električnih uređaja, budući da je kemijska reakcija u ovim baterijama reverzibilna (ibid.). Kao što je ranije navedeno, električni automobili koriste punjive baterije, stoga će u radu biti pobliže prikazan ovaj tip baterije. Vrste sekundarnih baterija koje se najčešće koriste upotrebljavaju u električnim i hibridnim vozilima su olovne, litij-ionske, nikal-kadmijeve i nikal-metalne hidridne baterije.

3.2.1 Olovne baterije

Kao što je već ranije spomenuto, olovne baterije izumio je francuski fizičar Gaston Planté davne 1859. godine. Olovno-kiselinske baterije bile su prve punjive baterije koje su se koristile u električnim vozilima, a i danas se koriste za automobilske akumulatore. Princip rada ove vrste baterije nije se bitno promijenio, ali su joj razvojem tehnologije kapacitet i energetska gustoća znatno napredovali. Unatoč puno manjoj specifičnoj energiji od

nikal-metal hibridnih baterija i litij-ionskih baterija, i danas su u širokoj upotrebi, pretežno zbog niske cijene. Osim u automobilskoj industriji, olovne baterije imaju i drugu široku industrijsku primjenu, od poljoprivrednih vozila i dizelskih lokomotiva do telekomunikacijskih sustava i pričuvnih izvora energije u slučaju nužde. Ovaj tip baterije može biti opasan zbog toga što sadrži sumpornu kiselinu te prilikom samopražnjenja ispušta vodik koji je zapaljiv. Također, prilikom proizvodnog procesa baterija te u slučaju automobilskih nesreća i odlaganja otpada, može doći do emisija olova u okoliš (Shaikh, 2018).

3.2.2 Litij-ionske baterije (Li-Ion)

Litij-ionske baterije danas imaju izuzetno široku primjenu te su najčešće birane baterije većine proizvođača električnih uređaja te novijih električnih automobila. Prednosti ovog tipa baterija su visoka specifična energija (čak višestruko veća od one nikal-kadmijevih i posebno od one olovnih baterija), dugi životni vijek (oko 1000 ciklusa punjenja i pražnjenja), vrlo mala masa (zbog male gustoće litija), prihvatljivost za okoliš te ju je moguće bilo kada puniti bez potrebe za periodičkim pražnjenjem. Iznimno su osjetljive na prepunjavanje i pretjerano pražnjenje, no o tome brine elektronika ugrađena u svaku bateriju. Najveća mana Li-Ion baterija je to što su ograničene radnom temperaturom i naponom, jer prekoračenjem tih ograničenja dolazi do brzog slabljenja učinkovitosti baterije, pa čak i do ugrožavanja sigurnosti (Novosel, 2016).

Unatoč ograničenjima litij-ionskih baterija, one predstavljaju velik korak u evoluciji punjivih baterija. Navedene prednosti čine ih najupotrebljavanijim i najpopularnijim tipom baterija današnjice, što potvrđuje i činjenica da se koriste u električnim automobilima Tesla, trenutno vodeće kompanije u polju električnog automobilizma. Također ih koriste i mnogi današnji električni *superautomobili*, koji se odlikuju iznimnim performansama u vidu akceleracije i maksimalne brzine. Jedan od primjera je i model Concept 2 hrvatske tvrtke Rimac Automobili d.o.o. (Shaikh, 2018).

3.2.3 Nikal-kadmijeve baterije (NiCd)

Nikal-kadmijeve baterije za pozitivnu elektrodu koriste niklov oksihidroksid (NiOOH) a za negativnu elektrodu kadmij. Ovaj tip baterije duguje svoju popularnost visokoj

specifičnoj snazi (teorijska snaga baterije po jedinici mase baterije), dugom životnom vijeku (više od 2000 ciklusa punjenja i pražnjenja), otpornosti na mehanička oštećenja, mogućnosti brzog punjenja, širokom rasponu radne temperature (od -40°C do +85°C) te niskom samopražnjenju. Mana ove baterije je nizak nominalni napon (približna vrijednost elektromotorne sile izvora), koji iznosi između 1,2 V i 1,3 V, dok kod olovno-kiselinskih iznosi 2 V. Iz tog je razloga potrebno serijski spajati više ćelija kako bi se dostigao željeni napon, a čime rastu cijena i dimenzija baterije. No, važno je napomenuti da nikal-kadmijeva baterija ima višestruko dulji životni vijek od olovnih baterija. Ipak, najveća mana ove baterije je štetnost kadmija za okoliš i ljudsko zdravlje, budući da se radi o teškom metalu koji je iznimno kancerogen. Odlaganje kadmija u prirodi vrlo je štetno jer može prodrijeti u podzemne vode te se njima dalje proširiti na cijeli ekosustav (Shaikh, 2018).

Kao i olovne baterije, i nikal-kadmijeve baterije se koriste u industrijskim vozilima i dizelskim motorima. Vrlo je pogodna za određene primjene, poput kućanskih uređaja i alata, prijenosnih radio stanica, medicinske opreme te profesionalnih video kamera. Korištene su i u nekim komercijalno dostupnim modelima električnih automobila, kao što je Peugeot 106, Citroën AX i Mitsubishi EV (Novosel, 2016).

3.2.4 Nikal-metal hidridne baterije (NiMH)

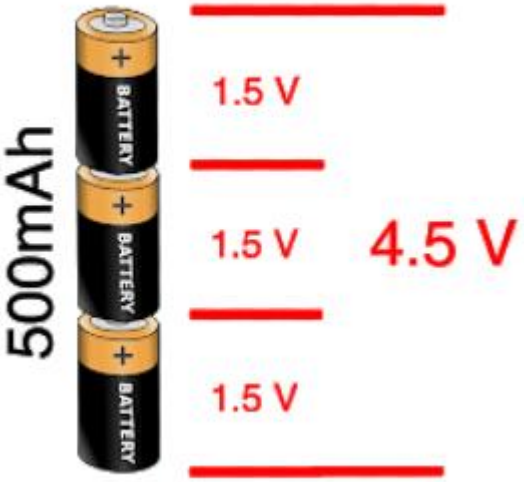
Za razliku od nikal-kadmijskih baterija, NiMH baterije za negativnu elektrodu koriste vodik apsorbiran u metalnu leguru (legure lantana i nikla te legure koje sadrže titan i cirkonij). Od svih baterija baziranih na niklu, ovaj tip baterija ima najveću specifičnu energiju i energetsku gustoću. Usto, nema velikih padova napona tijekom pražnjenja, ima mogućnost brzog punjenja, širok temperaturni raspon i sposobnost da izdrži iznimno puno ciklusa punjenja i pražnjenja. Također, ne sadrži štetni kadmij, zbog čega je ekološki prihvatljiviji i zdravstveno sigurniji izbor, te sve češće zamjenjuje nikal-kadmijske baterije (Shaikh, 2018).

NiMH baterije često se koriste kod hibridnih električnih vozila, budući da je za hibridna vozila važnija specifična snaga nego specifična energija. U odnosu na litij-ionske baterije, ove baterije imaju manju specifičnu energiju, no budući da hibridna vozila kao glavni cilj nemaju poboljšanje performansi, već smanjenje potrošnje goriva i povoljniji utjecaj na

okoliš, to u ovom slučaju nije presudni faktor pri odabiru baterija. Tako možemo izdvojiti nekoliko primjera hibridnih vozila koja koriste NiMH baterije, kao što je Toyota Prius, prvi i vjerojatno najpoznatiji hibrid, ali i neki modeli tvrtki Honda, BMW i Mercedes (ibid.).

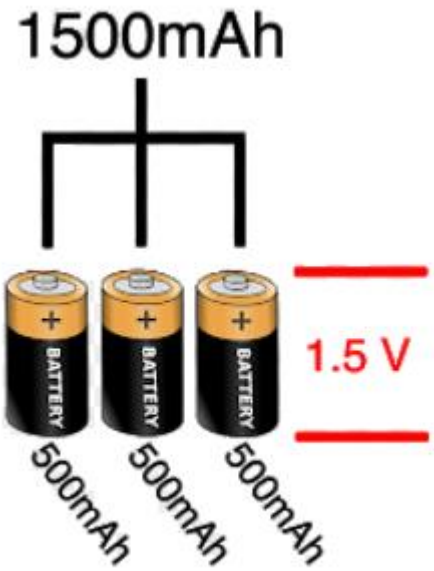
3.3 Osnovni elementi

Osnovna baterijska jedinica se naziva **baterijska ćelija**, a odlikuje se svojim nazivnim naponom i kapacitetom. Baterijska ćelija je skupina elektroda u jednom spremniku uobičajenog napona od 1 V do 4 V. Ćelije se mehanički povezuju i električki spajaju jedna s drugom u **baterijske module** koji u električnim vozilima uobičajeno imaju 10 V do 30 V. Moduli se zatim serijski (slika 5) ili paralelno (slika 6) spajaju u **baterijske pakete**, ovisno o željenom kapacitetu i naponu. Serijsko spajanje ćelija daje bateriju napona jednakog zbroju napona pojedinačnih ćelija, dok kapacitet ostaje jednak kapacitetu jedne ćelije. Paralelnim spajanjem povećava se ukupni kapacitet dok napon ostaje nepromijenjen. Paketi sadrže i elektroniku te sustav protiv pregrijavanja, koji su potrebni za normalan rad baterije. Baterijski ili akumulatorski sustav električnog vozila može sadržavati jedan baterijski paket ili više spojenih paketa kako bi zadovoljio potrebe vozila što najčešće uključuje 10 do 40 baterijskih modula ukupnog napona od 100 V do 350 V (Novosel, 2016).



Slika 5. Serijski spoj baterija

(Galarraga, 2013)



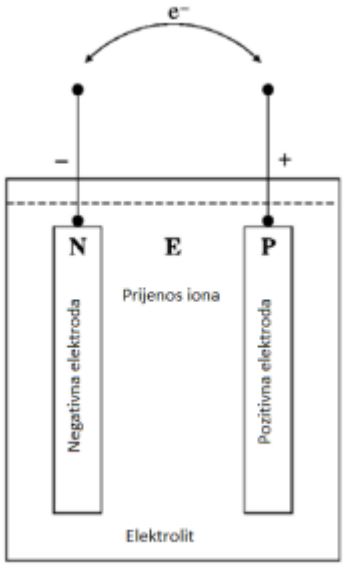
Slika 6. Paralelni spoj baterija

(Galarraga, 2013)

3.4 Princip rada baterije

Kao što je ranije opisano, osnovne gradivne jedinice baterije su baterijske ćelije, koje se serijski ili paralelno povezuju. Ove ćelije, koje nazivamo *galvanskim člancima*, pretvaraju kemijsku energiju u električnu putem *redoks reakcija*. Redoks reakcije su reakcije *oksidacije* (uklanjanje elektrona s neutralnog atoma ili iona, to jest smanjenje gustoće elektronskog oblaka oko jezgre atoma unutar molekule) i *redukcije* (dodavanje elektrona neutralnom atomu ili ionu, to jest povećanje gustoće elektronskog oblaka oko jezgre atoma unutar molekule). Pritom dolazi do potpunog prijenosa elektrona kod nastajanja ionskih spojeva, odnosno do djelomičnog prijenosa elektrona kod nastajanja kovalentnih spojeva (Shaikh, 2018).

Baterija se sastoji od pozitivne elektrode (*katode*) i negativne elektrode (*anode*) koje se nalaze unutar elektrolita, tvari koja provodi električnu energiju pomoću iona (slika 7). Negativna elektroda, anoda, je oksidirana tijekom pražnjenja baterije, što znači da elektroni s nje prelaze u vanjski dio strujnog kruga. Anoda je sačinjena od metala ili legura (na primjer cinka ili litija) koje lako otpuštaju elektrone tijekom reakcije. Katoda je pozitivna elektroda koja je tijekom praženjenja reducirana, odnosno prima elektrone s anode. Nju uglavnom čine određeni oksidi ili sulfidi, koji lako prihvaćaju elektrone. Tijekom punjenja baterije je proces obrnut, što znači da se anoda reducira, odnosno prima elektrone, a katoda oksidira, odnosno otpušta elektrone. Između anode i katode se nalazi *separator*, koji osigurava njihovu odvojenost i dopušta elektrolitu provođenje iona. Elektrolit ne smije provoditi elektrone, budući da bi to uzrokovalo kratki spoj između elektroda. Može biti u tekućem ili krutom stanju, no uglavnom je tekućina poput vode ili vodena otopina kiseline. Separatori se uglavnom izrađuju od plastičnih ploča s porama ili celofana (ibid.).



Slika 7. Osnovna struktura baterije

(Shaikh, 2018)

Polovi baterije su spojeni s vanjskim strujnim krugom. Iako bi struja trebala teći samo dok je vanjski strujni krug zatvoren, ona može teći i bez zatvorenog vanjskog strujnog kruga zbog difuznih procesa, što dovodi do pražnjenja baterije (ibid.).

3.4.1 Pražnjenje olovno-kiselinske baterije

Kao što je ranije opisano, tijekom pražnjenja baterije dolazi do oksidacije anode, pri čemu elektroni prelaze s anode na katodu (Shaikh, 2018). Na anodi se događa sljedeća reakcija:

(3-1)

$$Pb + SO_4^{2-} \rightarrow PbSO_4 + 2e^-$$

Na katodi istovremeno dolazi do redukcije:

(3-2)

$$PbO_2 + 4H^+ + SO_4^{2-} + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$$

Prilikom oksidacije, na anodi dolazi do stvaranja olovnog sulfata te se otpuštaju dva elektrona. Kod katode se prilikom redukcije stvara voda i olovni sulfat.

3.4.2 Punjenje olovno-kiselinske baterije

Kod punjenja se događa proces obrnut od onog pri pražnjenju (Shaikh, 2018). Na anodi dolazi do redukcije:

(3-3)

$$PbSO_4 + 2e^- \rightarrow Pb + SO_4^{2-}$$

Na katodi dolazi do oksidacije:

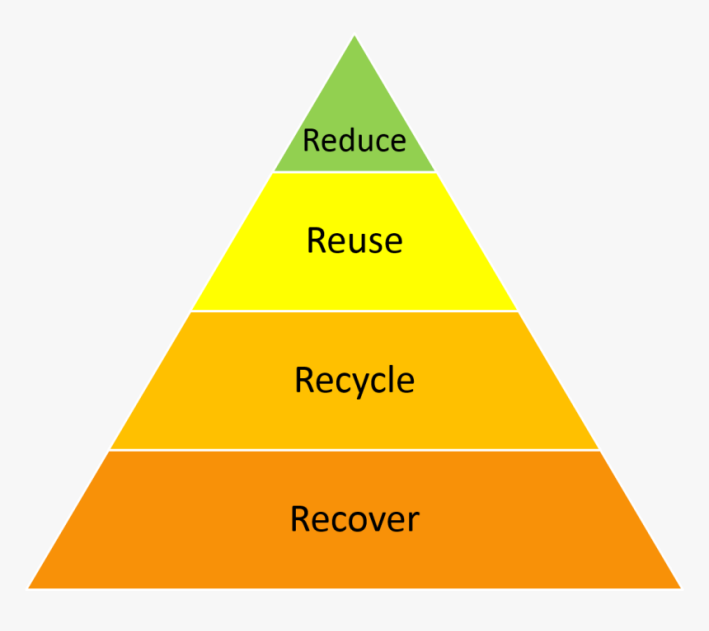
(3-4)

$$PbSO_4 + 2H_2O \rightarrow PbO_2 + 4H^+ + SO_4^{2-} + 2e^-$$

4. RECIKLIRANJE BATERIJA

4.1 Recikliranje općenito

Recikliranje je „proces obradbe otpadnih materijala i iskorištenih proizvoda radi dobivanja sirovina za ponovno iskorištavanje i uporabu“ (Hrvatska enciklopedija, 2020). Glavni ciljevi recikiranja su smanjenje uporabe prirodnih izvora i količine otpada te zaštita okoliša. Reciklirati se mogu različiti materijali (papir, plastika, staklo, drvo, metal, guma) te otpad iz različitih izvora (kućanstva, industrija) i različitih područja primjene (npr. ambalažni otpad).



Slika 8. 4R princip

(Seth, 2019)

Na slici 8. možemo vidjeti shemu *4R principa* koji obuhvaća:

- *smanjenje količine otpada* (engl. *reduce*),
- *ponovnu upotrebu* (engl. *reuse*),
- *recikliranje* (engl. *recycle*),
- *energetsku oporabu* (engl. *recover*).

Shema je koncipirana kao piramida, pri čemu je najviša razina (reduce) ujedno i najpoželjnija metoda, što znači da se prvenstveno polazi od smanjenja same količine nastalog otpada, a tek zatim se razmatraju načini postupanja s istim. Druga mogućnost (reuse) je ponovna upotreba za istu ili drugu namjenu. Treća (recycle) označava skup postupaka kojima se iz otpada dobivaju sekundarne sirovine i izrađuju novi proizvodi. Četvrta opcija (recover) je energetska oporaba, odnosno spaljivanje otpada u svrhu dobivanja energije. Posljednja i najmanje prihvatljiva, ali ponekad i neizbježna mogućnost je *odlaganje otpada* (engl. *disposal*) u odlagalištima otpada.

4.2 Ponovna uporaba baterija

Baterije električnih vozila mogu se ponovno upotrijebiti u druge svrhe. Jedan od primjera je korištenje dotrajalih baterija automobila Nissan Leaf za napajanje ulične rasvjete u gradu Namie u Japanu (slika 9). Ovim projektom, pod nazivom *The Reborn Light* (hrv. *Ponovno rođeno svjetlo*), namjeravala se osigurati javna rasvjeta kao dio oporavka nakon potresa i tsunamija 2011. godine. Ovo je nova vrsta vanjske rasvjete koja djeluje izvan glavne elektroenergetske mreže (engl. *off-grid*) i ne zahtijeva nikakve električne kablove ili utičnice, već se baterije pune pomoću solarnih panela. Namjera kompanije Nissan je u budućnosti u potpunosti ponovno upotrebljavati baterije za napajanje bilo gdje na Zemlji ili u zraku. Osim za rasvjetu, stare baterije mogu poslužiti i za napajanje u hitnim slučajevima te na područjima bez električne infrastrukture (Nissan Motor Corporation, 2018).



Slika 9. Projekt *The Reborn Light*

(Nissan Motor Corporation, 2018)

Drugi primjer je razvijen u Portugalu, gdje kompanija Groupe Renault razvija projekt *Smart Island* (hrv. *Pametni otok*). Ideja projekta je podržati energetski prijelaz otoka Porto Santo prema razvoju obnovljivih, solarnih i vjetrovitih izvora energije. Cilj je u vrlo bliskoj budućnosti na otoku postići 80 % ne-ugljične energije i mobilnosti. U tom cilju, timovi rade od početka godine na razvijanju pametnih rješenja za punjenje i stacionarnom skladištu energije s *second life* (hrv. *drugi život*) baterijama iz električnih vozila Groupe Renault (Groupe Renault, 2018).

Iskorištene baterije se mogu ponovno upotrijebiti u kućanstvima, gdje mogu poslužiti kao izvor napajanja. Na primjer, ako kućanstvo troši 12,5 kWh energije dnevno, iskorištena baterija s 50 % kapaciteta od početnih 30 kWh može napajati čitavo kućanstvo duže od jednog dana, u slučaju nestanka struje (Engineering Explained, 2018a).

4.3 Razlozi recikliranja

Dotrajale baterije koje se više ne mogu upotrebljavati, nužno je reciklirati iz nekoliko razloga. Prvi i najvažniji razlog je zaštita okoliša. Kao što je ranije objašnjeno, baterije sadrže široki spektar materijala i komponenti, uključujući i neke koje mogu biti opasne za okoliš i ljude. Uslijed bacanja i nepravilnog odlaganja ovakve vrste otpada može doći do istjecanja opasnih tvari u tlo i vode, čime se može ozbiljno onečistiti prirodu, ugroziti zdravlje ljudi i životinja, te izazvati požare. Recikliranjem se također smanjuje gomilanje otpada na odlagalištima. Također je važno napomenuti da proizvodnja novih baterija zahtijeva velike količine sirovina, što u budućnosti može uzrokovati njihovu nestašicu i zbog toga porast cijene. Recikliranjem se iz starih baterija dobivaju sekundarne sirovine za izradu novih baterija, čime se smanjuje potreba za eksploatacijom primarnih sirovina i usporava njihov nestanak (Lozina, 2017).

Osim ekološke prednosti, recikliranje baterija može imati i ekonomsku važnost. Razvojem tehnologije i povećanjem efikasnosti reciklažnog procesa, bit će potrebno uložiti manje energije, a samim time i novca, u recikliranje starih baterija, nego u proizvodnju novih iz primarnih resursa. Nažalost trenutno situacija još nije takva, kao što možemo vidjeti iz riječi Jeffa Wandella, EV voditelja za komunikacije kompanije Nissan:„Nissan Leaf baterije se mogu u potpunosti reciklirati. Sastavljene su od čelika,

bakra, aluminija i plastike. Ćelije se mogu reciklirati različitim metodama da bi se dobile mješavine kobalta, nikla, mangana i litija. Dobiveni materijali se obrađuju do potrebne čistoće za ponovnu uporabu u industriji i potencijalnu ponovnu proizvodnju novih baterijskih ćelija. No, trenutno je još uvijek ekonomski isplativije proizvesti nove baterije nego reciklirati stare. Što će biti više električnih vozila te razvijanjem tehnologije za recikliranje, to će se promijeniti“ (Engineering Explained, 2018a).

4.4 Postupak recikliranja baterija

Recikliranje baterija se kao tehnološki postupak sastoji od sljedećih faza (Lozina, 2017):

- Prikupljanja dotrajalih ili odbačenih baterija na odgovarajućim i predviđenim mjestima,
- Ukoliko je potrebno, rastavljanja od elektroničkih uređaja u skladištima ili reciklažnim dvorištima,
- Transporta do reciklažnog pogona na siguran način,
- Procesa sortiranja različitih vrsta baterija,
- Sitnjenja različitim postupcima i strojevima,
- Separiranja različitih sirovina odgovarajućim metodama.

Korisnik je dužan otpadnu bateriju ili akumulator predati u posebne spremnike za sakupljanje ove vrste otpada. Dužnost prodavača je postaviti takve spremnike za odvojeno sakupljanje u svojem poslovnom prostoru, sakupiti tu vrstu otpada bez obzira na proizvođača, te potom prikupljene otpadne baterije predati ovlaštenom sakupljaču ili izravno oporabitelju, koji ih bez naknade preuzima (ibid.).

Ovlašteni sakupljač otpadnih baterija i akumulatora je dužan predati takav otpad ovlaštenoj osobi za obradu i/ili recikliranje ili ga izvozi iz Republike Hrvatske uz posebnu dozvolu Ministarstva zaštite okoliša. Oporabitelj ili reciklažer je pravna ili fizička osoba s dozvolom za obavljanje djelatnosti obrade i recikliranja otpadnih baterija i akumulatora, ovlaštenik je koncesija i ima ugovor s Fondom za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost (FZOEU). Oporabitelj zatim preuzima prikupljene baterije i akumulatore od sakupljača te prilikom preuzimanja ovjerava prateći list (ibid.) (slika 10).

DODATAK XIII.

Obrazac PL-O

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: OIB/B.P.: SJEDIŠTE/ADRESA: NKD RAZRED (2007): KONTAKT OSOBA: KONTAKT PODACI:			DATUM PREDAJE POŠILJKE: ADRESA POLAZIŠTA: PREDAO: _____ Potpis PRIJEVOZNIK PREUZEO: _____	
DIO C - PODACI O TVRTKI/OBRTU KOJA PREUZIMA OTPAD				
TVRTKA: OIB: SJEDIŠTE/ADRESA: OVLAST ZA PREUZIMANJE OTPADA U POSJED: KONTAKT OSOBA: KONTAKT PODACI:			DATUM PREUZIMANJA POŠILJKE: ADRESA ODREDIŠTA: PREUZEO: _____ Potpis PRIJEVOZNIK PREDAO: _____	
DIO D - PODACI O PRIJEVOZNIKU OTPADA				
TVRTKA: OIB: SJEDIŠTE/ADRESA: BROJ UPISA U OČEVIDNIK PRIJEVOZNIKA: PRV- KONTAKT OSOBA: KONTAKT PODACI:			NAČIN PRIJEVOZA: REGISTARSKA OZNAKA:	
NAPOMENA:				

Slika 10. Pratećilist za otpad

(Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, 2017)

4.4.1 Recikliranje baterija na bazi litija

Trenutno se čak 70 % litija u svijetu koristi za izradu baterija te se procjenjuje da će se poznate zalihe litija iscrpiti do 2040. godine, ako nastavimo ovim tempom eksploatacije. Stoga je izuzetno važno što veću količinu litija dobivati recikliranjem. U svijetu postoji 12 procesa recikliranja baterija na bazi litija, no samo su tri ekonomski isplativa. Dobivanje litija recikliranjem čak je pet puta skuplje od proizvodnje novog materijala, budući da je proces recikliranja baterija na bazi litija tehnološki zahtjevniji od recikliranja drugih vrsta baterija. Litij-ionske baterije sačinjene su od više vrsta materijala u odnosu na druge vrste baterija te sastav materijala od kojih se sastavljaju njihove katode nije standardiziran, što čini proces njihovog recikliranja kompleksnijim. Također, dok olovno-kiselinski akumulatori imaju relativno velik udio materijala u jednom kućištu, litij-ionski paket može imati 100 i više individualnih ćelija, što dodatno otežava proces recikliranja. Na primjer, automobil Tesla Model S u podnici ima oko 8000 ćelija povezanih u module te potom u pakete (Lozina, 2017).

U daljnjem su tekstu opisane tri glavne metode recikliranja baterija na bazi litija: hidrometalurški proces, pirometalurški proces te proces odvajanja materijala iz baterije uz pomoć protustrujne metode.

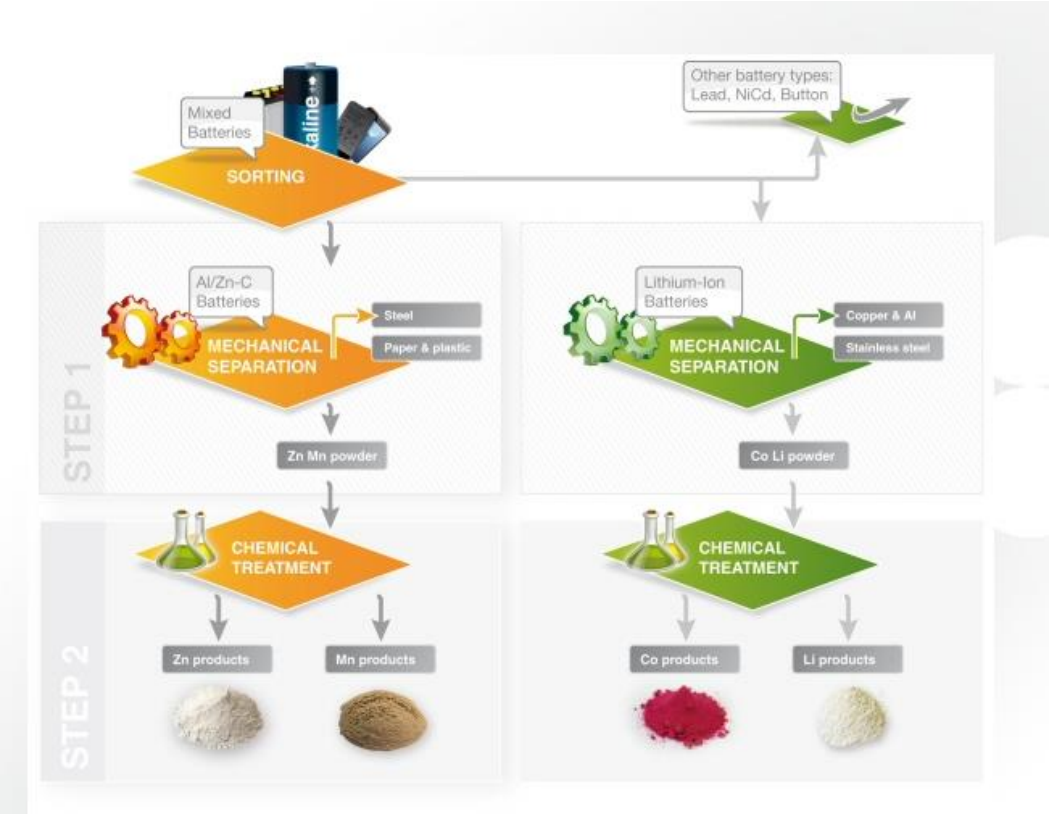
4.4.1.1 Hidrometalurška metoda

Hidrometalurške metode recikliranja potrošenih litij-ionskih baterija su najčešće korištene metode, budući da je više od polovine procesa recikliranja ovog pristupa. U usporedbi sa pirometalurškim procesom, hidrometalurški proces ima više prednosti: visoka učinkovitost recikliranja, visoka selektivnost metala, niska potrošnja energije, niske emisije štetnih plinova i niska cijena. Iako ovaj proces ima i određene izazove, koji se uglavnom odnose na kompleksne operacijske korake i emisije otpadnih voda, ipak ima veći potencijal za ostvarenje održivog razvoja u industriji (Liang, 2019).

Nakon koraka mehaničkog odvajanja nemetalnih dijelova (plastika, itd.) od metalnih, hidrometalurški postupci koriste se za pročišćavanje različitih metala sadržanih u katodi. Ti procesi uključuju korak ispiranja koji otapa metalne okside u vodenoj otopini, kao i nekoliko koraka taloženja i odvajanja radi dobivanja komponenata visoke čistoće. Budući da se hidrometalurški procesi mogu biti vrlo složeni za provođenje, obično nisu prvi izbor za recikliranje električnih akumulatora (ibid.).

Primjer: Recupyl, Francuska

Francuska tvrtka Recupyl se bavi sakupljanjem i recikliranjem otpada s ciljem zaštite okoliša. Tehnologija recikliranja im se temelji na hidrometalurškoj metodi, kojom se umanjuje utjecaj na okoliš (slika 11).



Slika 11. Proces recikliranja baterija u postrojenju Recupyl

(Recupyl, 2020)

Recikliranje baterija na bazi litija problematično je zbog zapaljivosti litija i oslobađanja štetnih plinova tijekom procesa usitnjavanja ćelija. Stoga je izuzetno važno koristiti metode kojima se mogućnost pojave požara svodi na minimum te se sprječava oslobađanje spomenutih plinova. Tijekom hidrometalurškog procesa baterije se usitnjavaju u automatiziranoj drobilici s noževima u kojem se kontrolira smjesa ugljikovog dioksida i argona, koji su teži od kisika i dušika, čime se sprječava pristup zraka. Također, ugljikov dioksid reagira s elementarnim litijem stvarajući litijev karbonat, čime se dodatno povećava zaštita od zapaljenja (Lozina, 2017).

U prvom dijelu usitnjavanja, rotor s noževima u drobilici ima nisku brzinu vrtnje, oko 11 okretaja u minuti, kako bi se umanjilo udarno opterećenje na baterijama. U drugom dijelu se broj okretaja u minuti povećava na 90, kako bi se otpad dovoljno usitnio. Baterije usitnjene na veličinu zrna do 3 mm potom se transportiraju vibracijskom trakom, gdje se odvaja visoko indukcijskim magnetskim separatorom na četiri glavne frakcije (ibid.):

- Ugljik i metalne okside,
- Nehrđajući čelik (kućišta ćelija i baterija),
- Obojene metale,
- Papir i plastiku.

Nakon usitnjavanja, ugljik i metalni oksidi se podvrgavaju daljnjim postupcima prosijavanja, odvajanja protustrujnom metodom, filtracije, elektrolize i ispiranja. Prvi korak je prosijavanje na mikronskom situ, čime se izdvajaju materijali poput kobalta i bakra. Potom slijedi postupak odvajanja protustrujnom metodom u lužnatoj otopini pri čemu se nerastaljeni ugljik odvaja filtracijom, dok se metalni oksidi otapaju. Zatim se elektrolizom dobivaju kobalt i bakar visoke čistoće. Lužnata otopina se na kraju podvrgava ispiranju vodom zasićenom ugljikovim dioksidom te se suši na 105 °C. Tijekom procesa, pH vrijednost otopine pada s početnih 12 do 13 na 8 do 9, pri čemu se litij u konačnici dobiva u talogu litijevog karbonata (ibid.).

4.4.1.2 Pirometalurška metoda

Pirometalurgija se prvenstveno odnosi na granu ekstraktivne metalurgije koja uključuje termičku obradu minerala, ruda i koncentrata kako bi se dobili vrijedni metali. Trenutno je pirometalurgija dominantna ekstrakcijska metoda masovne proizvodnje metala, kao što su željezo i čelici. Stoga se mnogi principi, iskustva i industrijska oprema mogu izravno preuzeti iz konvencionalnih pirometalurških polja i primijeniti na recikliranje potrošenih Li-Ion baterija. Zbog svoje jednostavnosti i visoke produktivnosti, pirometalurški se postupak obično koristi za industrijsku primjenu (Liang, 2019).

Pirometalurški putevi za recikliranje potrošenih Li-Ion baterija sastoje se od dva glavna pristupa (ibid.):

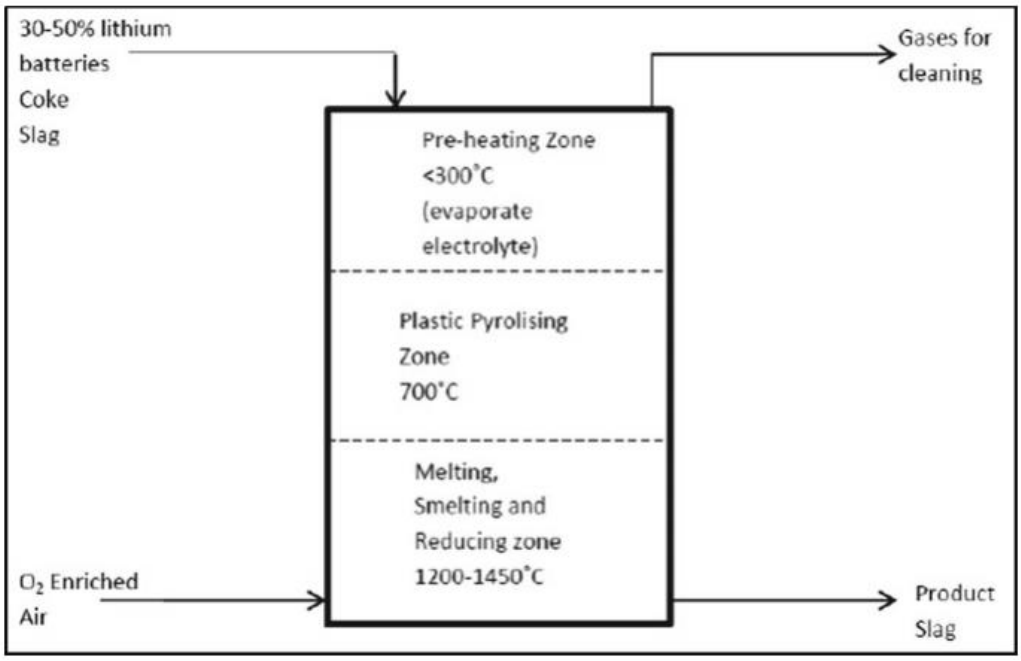
1. regeneracija materijala elektroda litizacijom ili popravkom kristala postupkom toplinske obrade,
2. pretvaranje istrošenih baterija u Fe-, Co-, Ni- i tekuće legure na bazi Mn na temperaturi višoj od 1000 °C.

Za recikliranje potrošenih litij-ionskih baterija, fizikalno-kemijska svojstva sastojaka ključna su za odabir odgovarajućih pirometalurških uvjeta. Osim od plastičnog kućišta i vanjskog lijeva, baterija se sastoji od katode, separatora, anode i elektrolita. Li-Ion baterije sadrže razne materijale poput plastike, metala, oksida, ugljika, soli i organskih otapala, stoga su zahtjevnije za obradu od minerala. Treba naglasiti da su neke komponente hlapljive, zapaljive, osjetljive na vodu, toksične i nestabilne pri visokim temperaturama (ibid.).

Primjer: Umicore, Belgija

Tvrtka Umicore u Belgiji se bavi rafiniranjem i recikliranjem plemenitih metala i proizvodnjom specijaliziranih proizvoda od plemenitih metala. Recikliranje baterija druga je poslovna jedinica koja je usmjerena na recikliranje istrošenih punjivih baterija s prijenosnih računala, mobilnih telefona i hibridnih električnih vozila (ibid.).

U postrojenju se koristi peć IsaSmelt^{TM} za čisto i povoljno taljenje visokog intenziteta (slika 12). Temperatura vrenja većine elektrolitnih otapala (najčešće organski karbonat i esteri) je ispod 250°C, stoga ona isparavaju prije reakcija pirolize. Budući da je većina otapala toksična i zapaljiva, treba biti oprezan s elektrolitom tijekom pirolize. Nakon uklanjanja otapala različitim metodama, na temperaturi iznad 300°C se topi se i razgrađuje većina litijevih soli. Razgradnjom ovih soli nastaju toksični fluoridni spojevi i litijev fluorid (LiF), stoga treba uzeti u obzir mjere predostrožnosti. Na temperaturama višim od 700°C dolazi do pirolize plastike, a na 1200 °C do 1450 °C do zone taljenja i reduciranja (ibid.).



Slika 12. Temperaturne zone peći IsaSmelt^{TM} postrojenja Umicore

(Liang, 2019)

4.4.1.3 Biohidrometalurška metoda

Biohidrometalurgija (ili *bio-ispiranje*) se može opisati kao postupak koji omogućuje otapanje metala iz njihovih mineralnih izvora od strane pojedinih prirodno naseljenih mikroba. Na temelju hranjivih izvora mikroba, bio-ispiranje se može svrstati u dvije vrste: *autotrofno ispiranje* i *heterotrofno ispiranje* (Liang, 2019).

Većina autotrofičnih ispiranja koristi acidofilne bakterije koje fiksiraju CO_2 i dobivaju energiju oksidacijom Fe^{2+} ili smanjenim sumpornim spojevima. Pri tome, u tim postupcima mogu nastati i Fe^{3+} ili H_2SO_4. Mikroorganizmi koji se koriste u autotrofnom ispiranju uključuju bakterije koje oksidiraju sumpor (SOB), bakterije koje oksidiraju željezo (IOB) i bakterije koje oksidiraju željezo i sumpor (ISOB). Te bakterije mogu u odgovarajućim uvjetima oksidirati sumpor i (ili) željezo u sustavima ispiranja i oslobađati kisele metabolite koji dodatno otapaju metalne spojeve (ibid.).

Za heterotrofno ispiranje, mikroorganizmima su potrebni izvori organskog ugljika, dok metalni spojevi ne sudjeluju u biološkim procesima. U heterotrofičnom procesu mikroorganizmi obično proizvode blage organske kiseline ili ne-kisele komplekse koji se

mogu upotrijebiti u lužnatom ispiranju. Mikroorganizmi koji se koriste u heterotrofnim ispiranjima su uglavnom nitaste gljivice i bakterije. Proizvedene organske kiseline mogu reagirati s rudama koje sadrže metal ili s industrijskim otpadom u otopini za ispiranje (ibid.).

Pored toga, postupci biološkog ispiranja metala iz sulfida mogu se klasificirati u kontaktno (direktno/izravno) i beskontaktno (indirektno/neizravno) ispiranje. Kod direktnog ispiranja mikroorganizmi izravno stupaju u kontakt s metalnim sulfidom. Razvoj mikroorganizama i otapanje metala odvijaju se istovremeno. Indirektni postupak uključuje tvorbu kiselina od strane mikroorganizama te kemijsko ispiranje. Na početku ispiranja mikroorganizmi obično prestaju rasti (ibid.).

U usporedbi s tradicionalnom hidrometalurgijom, biohidrometalurgija je jednostavnija i ekonomičnija, ali ju je teže kontrolirati zbog korištenja žive biomase, pa je samim time i proces sporiji. Fizikalni, kemijski i biološki parametri u sustavu ispiranja imaju značajan utjecaj na učinkovitost ispiranja. U posljednjem desetljeću hidrometalurške i biohidrometalurške metode privlače više pažnje nego pirometalurške zbog svoje male potrošnje energije i manjeg onečišćenja okoliša. Prvo, za razliku od tradicionalnih pirometalurških metoda, biohidrometalurški postupci ne ispuštaju opasne plinove (npr. dioksini, furani itd.). Drugo, biohidrometalurški procesi mogu izvući sve metale iz otpadnih elektroda, dok pirometalurške metode teško mogu obnoviti litij i aluminij. Treće, u usporedbi s tradicionalnom hidrometalurgijom, biohidrometalurgijske metode ne koriste puno anorganskih kiselina koje predstavljaju visoki sigurnosni rizik. Četvrto, biohidrometalurgija ima manju potrošnju energije i manji utjecaj na okoliš od tradicionalne hidrometalurgije. Pored toga, bio-metalurgija je prikladnija za rude nižeg razreda, rudarske jame i onečišćena tla. Međutim, zbog uporabe živih mikroorganizama, biohidrometalurgija ima neke jedinstvene nedostatke. Prvo, postupci biološkog ispiranja obično zahtijevaju stroge uvjete jer su mikroorganizmi osjetljivi na promjene u okolini, kulturnih medija. Drugo, kao i tradicionalna hidrometalurgija, biohidrometalurgija zahtijeva zamorne postupke oporavka, uključujući uzgoj mikroba, biološki ispiranje, ekstrakciju otapala, odvajanje i taloženje. Treće, neki mikroorganizmi proizvode organske kiseline kao blaga i ekološka ispirajuća sredstva; međutim, organske kiseline mogu dovesti do poteškoća u odvajanju i obnavljanju metala iz otopine za ispiranje (ibid.).

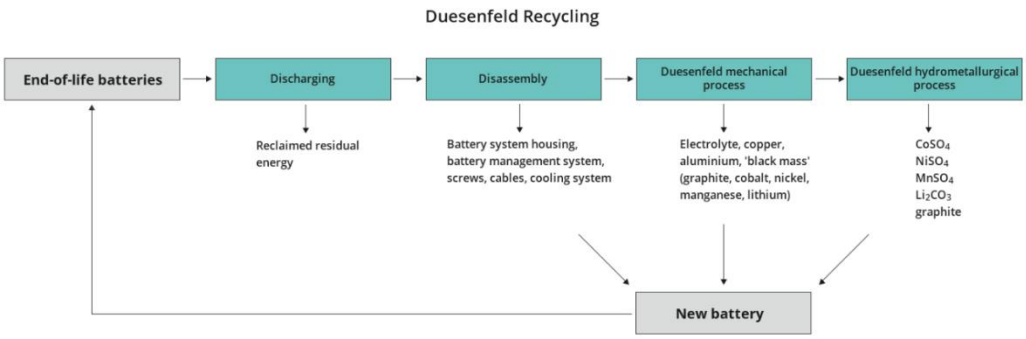
4.4.1.4 Metoda postrojenja Duesenfeld

Duesenfeld GmbH je postrojenje za recikliranje baterija osnovano 2017. godine u Braunschweigu u Njemačkoj. Ono slovi za ekološki najprihvatljivije postrojenje za recikliranje litij-ionskih baterija na svijetu, zahvaljujući nekonvencionalnim metodama kojima se sakupljaju metali, elektroliti i grafit te znatno umanjuju otisak ugljika u odnosu na klasičan pristup (Duesenfeld, 2020).

Metode

Inovativni Duesenfeld procesni lanac razvijen je posebno za litij-ionske baterije i zaštićen je velikim brojem patenata. Duesenfeld koristi patentiranu metodu koja kombinira mehaničke, termodinamičke i hidrometalurške procese, umjesto korištenja konvencionalnog taljenja, pirolize ili grijanja akumulatora. Njihova metoda recikliranja zahtijeva manje energije i ne stvara nikakve pare, a omogućuje izvanredne stope povrata materijala, odnosno oporavlja više sirovina. To je moguće samo zato što se u njemu ne upotrebljava taljenje, što je tehnika koja se obično koristi pri recikliranju baterija (ibid.).

Duesenfeld vodi svoj vlastiti postupak koji reciklira ne samo uobičajene metale, već i grafit, elektrolit i litij (slika 13). Recikliranje materijala znači da, umjesto da su materijali namijenjeni za uporabu u cestovnim radovima i drugoj gradnji, svi metali imaju visoku stopu iskorištavanja i mogu biti ponovno upotrebljeni u obliku visokokvalitetnih sekundarnih sirovina (ibid.).

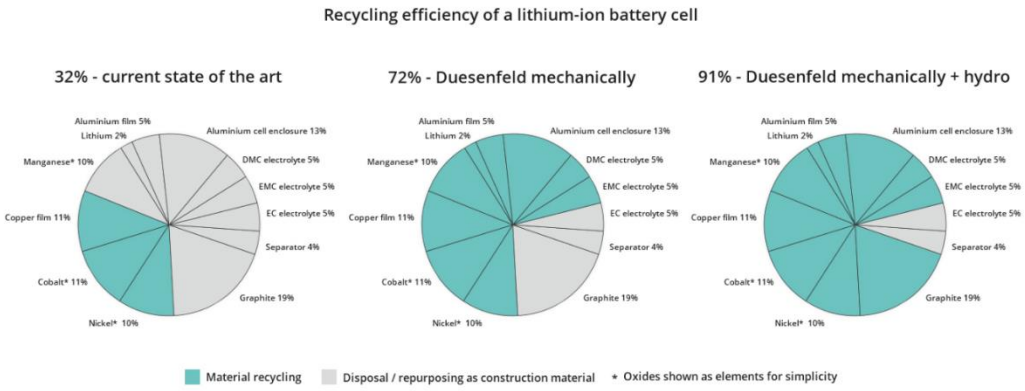


Slika 13. Duesenfeld metoda recikliranja

(Duesenfeld, 2020)

S litij-ionskim baterijama, ova metoda postiže stopu povrata materijala koja je gotovo dvostruko veća od uobičajene metode recikliranja. Uz hidrometalurške postupke moguća je skoro 100 % stopa recikliranja. Mehanički postupak recikliranja može se izvesti u stacionarnoj i mobilnoj konfiguraciji na zbirnim mjestima. Ispunjene baterije obično se klasificiraju kao opasna roba i transportiraju se u kontejnerima za prijevoz baterija. Mehanička obrada in situ odvaja elektrolit od ostalih materijala i za dobivene proizvode nije potreban poseban spremnik za akumulator. Ti se međuprodukti prevoze u standardnim kontejnerima, što znači da prosječni kamion može prevesti sedam puta više materijala nego što bi bilo moguće bez in situ mehaničke obrade. Ovo smanjenje prijevoza opasne robe uklanja većinu troškova za cijeli proces recikliranja akumulatora (ibid.).

Osnovni cilj postrojenja je reciklirati što više materijala u bateriji. U svom procesu mehaničkog recikliranja, Duesenfeld može postići stopu recikliranja materijala od 72 %, dok tretiranje crne mase (mješavina kobalta, litija, nikla, mangana i drugih materijala dobivena sitnjenjem i sortiranjem) pomoću hidrometalurškog postupka Duesenfeld povećava stopu recikliranja materijala na 91 % (slika 14). Trenutno se ne može povratiti samo separacijski film i komponente elektrolita s visokim vrelištima. Ovim stopama Duesenfeld donekle nadmašuje trenutne zahtjeve EU 2006/66 / EZ Direktive o baterijama (ibid.).



Slika 14. Učinkovitost Duesenfeld metode

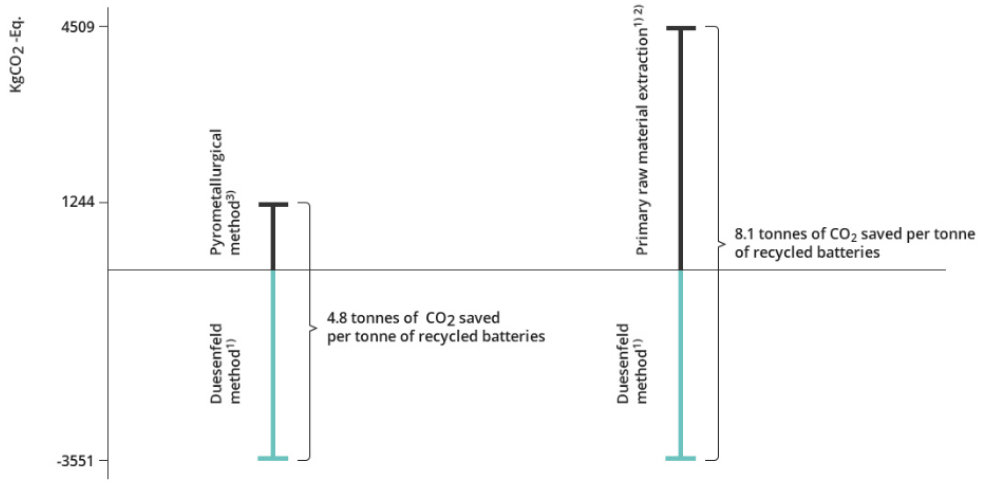
(Duesenfeld, 2020)

Ušteda energije

U usporedbi s pogonima konvencionalnih tvrtki za reciklažu, Duesenfeld postiže mnogo bolju ekološku ravnotežu (ibid.):

- Recikliranjem se štedi 4,8 tona CO_2 po toni reciklirane baterije u odnosu na pirometalurške procese, pri čemu grafit i elektrolit nisu spaljeni;
- Stopa recikliranja baterijskih ćelija iznosi 91 %, u usporedbi sa samo 32 % za pirometalurške procese;
- Mobilni uređaji za recikliranje smanjuju emisiju CO_2 kroz uštedu u prijevozu, izbjegavajući potrebu za skupim transportom opasne robe i uklanjajući potencijalne opasnosti tijekom skladištenja istrošenih baterija;
- Pouzdano uklanjanje fluora pomoću patentirane tehnologije;
- Oko 50 % energije potrebne za rad postrojenja dolazi iz energije zaostale u starim baterijama, koje je u svakom slučaju potrebno isprazniti prije procesa recikliranja.

S materijalima iz postupka recikliranja Duesenfelda, litij-ionske baterije mogu se proizvesti s otiskom ugljika do 40 % nižim od standardnog. Proizvodnja sekundarnih sirovina primjenom postupka recikliranja Duesenfeld štedi 8,1 tona CO_2 po toni recikliranih baterija u odnosu na primarnu ekstrakciju sirovina. U usporedbi s konvencionalnim postupcima topljenja, Duesenfeld metodom štedi 4,8 tona CO_2 po toni recikliranih baterija (ibid.) (slika 15).



Slika 15. Ušteda CO_2 u usporedbi s pirometalurškom metodom i primarnom ekstrakcijom
(Duesenfeld, 2020)

Mehanička priprema

Litij-ionske baterije mogu predstavljati različite električne i kemijske rizike, zbog čega je neophodno da se sa starim baterijama rukuje odgovorno kako bi se spriječili požari i ispuštanje opasnih tvari. Istrošene baterije se ponekad mogu samozapaliti, a ostale baterije u blizini mogu se zapaliti zbog naglog oslobađanja energije i rezultirajućim visokim temperaturama. Stoga skladištenje istrošenih baterija može biti visoko rizično i dovesti do gubitka čitavog skladišta, zgrade i osoblja. Da bi se osigurala sigurna priprema, Duesenfeld je razvio i patentirao metodu koja eliminira rizike specifične za postupak (ibid.).

Za pouzdano sprječavanje stvaranja otrovnih plinova tijekom mehaničke pripreme baterija, Duesenfeld koristi patentiranu kombinaciju različitih sigurnosnih mjera. Baterije se najprije prazni na kontrolirani način kako bi se preostala energija svela na minimum. Baterije se zatim deaktiviraju u atmosferi dušika na niskim temperaturama, što eliminira mogućnost samozapaljenja, dok se otapalo u elektrolitu dobiva iz drobljenog materijala vakuumskom destilacijom. Dakle, ova metoda ne uključuje termičku predobradu, budući da niska temperatura procesa sprječava stvaranje otrovnih plinova. Izdvojeno otapalo se šalje kemijskoj industriji na daljnju pripremu (ibid.).

Osušeni izdrobljeni materijal se odvaja na različite frakcije materijala na temelju fizičkih karakteristika kao što su veličina čestica, gustoća kao i magnetska i električna svojstva; te se zatim podvrgavaju daljnjoj metalurškoj obradi. Frakcije željeza, bakra i aluminija šalju se na standardno recikliranje. Duesenfeld je razvio hidrometaluršku metodu za obradu crne mase koja sadrži elektrode aktivne materijale i vodljivu sol. Ovom patentiranom metodom dobiva se kobalt, litij, nikal, mangan i grafit iz crne mase (ibid.).

Decentralizacija

Također, kako bi se prijevoz rabljenih litij-ionskih baterija sveo na najmanju moguću mjeru, Duesenfeld je razvio koncept mobilnog, decentraliziranog sustava koji omogućava najkraći mogući put baterije do postrojenja za recikliranje. Pomoću mobilnih spremnika za recikliranje, litij-ionske baterije drobe se na licu mjesta na zbirnim mjestima, a elektrolit se izvlači bez emisija. U mobilnom postupku recikliranja, litij-ionske baterije u prvom spremniku se deaktiviraju na licu mjesta i izolira se elektrolit. U drugom se spremniku izdrobljena roba razvrstava. Okupljene sekundarne sirovine mogu se transportirati na daljnju preradu uz puno manje stroge odredbe i mnogo jeftinije. Iako se većina frakcija poput bakra, aluminija, elektrolita itd. može prerađivati na lokalnim tržištima, crna masa se transportira u središnju hidrometalurško tvornicu i podvrgava se daljnjoj obradi kako bi se stvorile kemikalije potrebne za izradu baterija (ibid.).

Hidrometalurgija

Sol koja sadrži fluor predstavlja poseban izazov u hidrometalurškoj obradi crne mase jer može uzrokovati stvaranje fluorovodične kiseline tijekom vlažne kemijske obrade. U patentiranom, specifičnom koraku prethodne obrade, Duesenfeld u potpunosti uklanja fluor prije ispiranja, što pouzdano sprječava stvaranje fluorovodične kiseline. Nakon što je fluorid uklonjen, metali se isperu i, kao rezultat, odvajaju od grafita, koji se zatim šalje na recikliranje materijala. Litij, kobalt, nikal i mangan odvojeni su jedan od drugog raznim metodama ekstrakcije, očiste se i obnavljaju u obliku soli. Soli djeluju kao osnovni materijal za proizvodnju novih katodno aktivnih materijala (ibid.).

4.5 Recikliranje baterija u Hrvatskoj

4.5.1 Zakonski okvir

Direktiva 2006/66/EZ u Europskoj uniji donesena je s ciljem kontrole zbrinjavanja i recikliranja otpada koji sadrži opasne tvari, a odnosi se na sve vrste baterija i akumulatora te time obuhvaća široki spektar proizvoda. Ovom direktivom se regulira upravljanje baterijama na kraju njihovog radnog vijeka, što znači da je zabranjeno otpadne industrijske i automobilske baterije i akumulatore odlagati na odlagalištima otpada ili spaljivati. Ovaj zakonodavni okvir obvezuje proizvođače i trgovce svih vrsta baterija da prihvate istrošene baterije i osiguraju vrhunski tretman i recikliranje.

Direktiva 2013/56/EU obvezuje sve države članice da pronađu mogućnost lakog i sigurnog uklanjanja baterija i akumulatora te uspostave i provedu programe koji će smanjiti sadržaj teških metala u baterijama, ali i potaknu odvojeno sakupljanje s ciljem mogućeg recikliranja. Proizvođači su dužni na takvim proizvodima istaknuti oznaku za odvojeno sakupljanje i recikliranje istrošenih baterija i akumulatora (slika 16) te priložiti upute za pravilnu i bezopasnu upotrebu. Ukoliko ispod prikazanog simbola postoji otisnuta oznaka teškog metala to naznačuje da je u postotku iznad prihvatljive granice od onih navedenih u Direktivi.



Slika 16. Oznaka za odvojeno sakupljanje istrošenih baterija i akumulatora

(Lozina, 2017)

U Republici Hrvatskoj 2015. godine je na temelju članka 53. stavka 3. Zakona o održivom gospodarenju otpadom (»Narodne novine«, broj 94/13) ministar zaštite okoliša i prirode donio *Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima.* Ovim pravilnikom se propisuju: „postupci i ciljevi gospodarenja s otpadnim baterijama i akumulatorima, uvjeti gospodarenja s otpadnim baterijama i akumulatorima, zahtjevi u pogledu odvojenog sakupljanja i obrade otpadnih baterija i akumulatora, sadržaj programa za obavljanje usluge sakupljanja otpadnih prijenosnih baterija i akumulatora, obveze vođenja evidencija i dostave izvješća, zahtjevi u pogledu baterija i akumulatora koji su proizvod, način i uvjeti označavanja baterija i akumulatora te ambalaže, obveze i način ispunjavanja obveza proizvođača proizvoda, vrste proizvoda za koje je obvezna registracija u Registar gospodarenja posebnim kategorijama otpada i način obveznog postupanja proizvođača proizvoda i posjednika otpada, te druga pitanja u svezi gospodarenja otpadnim baterijama i akumulatorima a sve u svrhu postizanja ciljeva propisanih ovim Pravilnikom.“

Cilj sustava gospodarenja otpadnim baterijama i akumulatorima je smanjiti negativni utjecaj tog otpada na okoliš. Sukladno tome, propisano je da je dužnost proizvođača osigurati da baterija i akumulator, koje stavlja na tržište, bude dizajnirana i proizvedena tako da je:

- uporaba opasnih tvari u bateriji i akumulatoru smanjena na najmanju moguću mjeru, poštujući ograničenja uporabe određenih opasnih tvari u Europskoj uniji propisana posebnim propisom,
- moguće rastavljanje i oporaba otpadne baterije i akumulatora kao i recikliranje sastavnih dijelova i materijala baterije i akumulatora,
- u skladu s tehničkim zahtjevima za ekološki dizajn proizvoda koji olakšava obradu otpadnih baterija i akumulatora;
- u najvećoj mogućoj mjeri uporabljen reciklirani materijal u proizvodnji baterija i akumulatora.

Ovim pravilnikom se također zabranjuje otpadnu bateriju ili akumulator odbaciti u miješani komunalni otpad, odbaciti i miješati s drugom vrstom otpada te miješati s drugim tvarima ili materijalima koji nisu otpad. Posjednik iz kućanstva dužan je otpadnu prijenosnu bateriju ili akumulator predati prodavatelju, serviseru prilikom održavanja uređaja koji sadrži prijenosnu bateriju i akumulator, osobi koja upravlja reciklažnim dvorištem ili ugovornom sakupljaču.

Prodavatelj je dužan osigurati preuzimanje otpadnih prijenosnih baterija i akumulatora od krajnjeg korisnika na lokaciji prodajnog prostora u kojem prodaje prijenosne baterije ili akumulatore, bez troškova po krajnjeg korisnika i bez obveze kupnje nove prijenosne baterije ili akumulatora. Prodavatelj i proizvođač su dužni osigurati prostor za smještaj spremnika za skladištenje otpadnih baterija i akumulatora, skladištiti ih u spremnicima odvojeno od druge vrste otpada i odvojeno od materijala i tvari koje nisu otpad, te osigurati da oznaka spremnika u kojem skladišti preuzete otpadne baterije i akumulatore sadrži sljedeće informacije: naziv posjednika otpada, odgovarajući ključni broj i naziv otpada sukladno posebnom propisu koji uređuje Katalog otpada, datum početka skladištenja otpada u tom spremniku i u slučaju opasnog otpada, oznaku odgovarajućeg

opasnog svojstva otpada. Na vidnom mjestu na ulazu u prodajni prostor ili na blagajni, prodavatelj je dužan postaviti obavijest krajnjem korisniku o mogućnosti predaje odnosno o obvezi preuzimanja otpadnih baterija ili akumulatora oznakom sadržaja »PREUZIMAMO OTPADNE BATERIJE« (slika 17).



Slika 17. Oznaka *Preuzimamo otpadne baterije*

(FZOEU, 2020)

Uslugu sakupljanja otpadnih prijenosnih baterija i akumulatora na određenom području Republike Hrvatske obavlja sakupljač s kojim je po provedenom postupku sklopljen Ugovor o obavljanju usluge sakupljanja otpadnih prijenosnih baterija i akumulatora. U tablici 2. vidimo popis ovlaštenih sakupljača u RH:

Tablica 2. Ovlašteni sakupljači otpadnih baterija i akumulatora u RH u 2019. godini

Broj	Naziv tvrtke	Sjedište tvrtke
1.	FRIŠ d.o.o.	Križevci, Koprivnička 43
2.	C.I.A.K. d.o.o.	Donji Stupnik, Stupničke šipkovine 1
3.	S.T.R. AKUMULATOR	Đurđevac, Basaričekova 43
4.	METIS d.d.	Kukuljanovo, Kukuljanovo 414
5.	ODLAGALIŠTE SIROVINA	Zadar, Ive Dulčića 6
6.	FLORA-VTC d.o.o.	Virovitica, Vukovarska 5
7.	UNIVERSAL d.o.o. - Varaždin	Varaždin, Cehovska 10

Tablica 3. Ovlašteni oporabitelji otpadnih baterija i akumulatora u RH u 2019. godini

Broj	Naziv tvrtke	Sjedište tvrtke

1.	C.I.A.K. d.o.o.	Donji Stupnik, Stupničke šipkovine 1
2.	FRIŠ d.o.o.	Križevci, Koprivnička 43

4.5.2 Trenutno stanje

U dokumentu *Pregled podataka za posebne kategorije otpada za razdoblje od 2008. do 2015. godine* Hrvatske agencije za okoliš i prirodu (2016), klasificiraju se četiri vrste otpada:

- ambalažni otpad,
- otpadna motorna i jestiva ulja,
- električni i elektronički otpad,
- otpadne baterije i akumulatori.

U navedenom se dokumentu prema *Pravilniku o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima (NN 111/2015)* razlikuju tri vrste baterija i akumulatora:

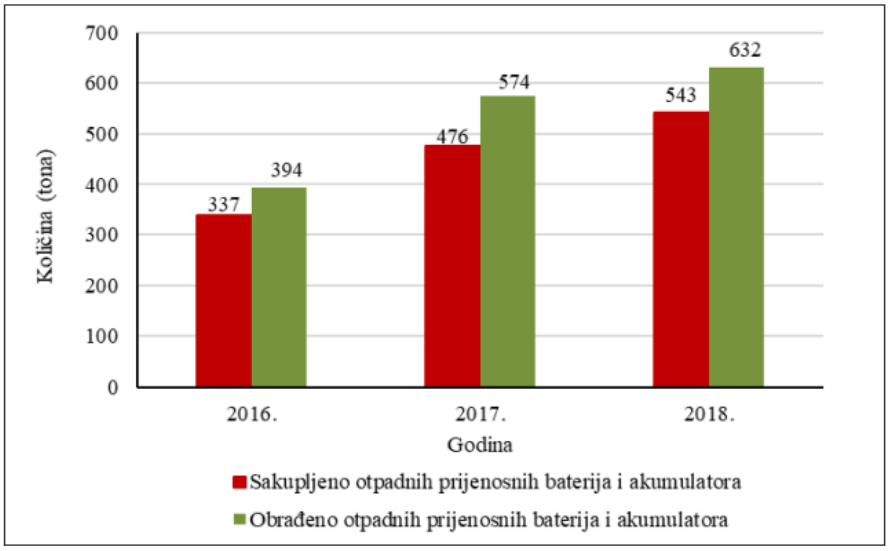
- Prijenosne baterije i akumulatori – gumbasta baterija ili baterijski sklop ili akumulator koji je zapečaćen i može se prenositi u ruci, a nije ni industrijska baterija ili akumulator niti automobilska baterija ili akumulator;
- Industrijske baterije i akumulatori – baterija i akumulator namijenjen isključivo za industrijsku ili profesionalnu uporabu ili za korištenje u bilo kojoj vrsti električnog vozila;
- Automobilske baterije i akumulatori (starteri) – baterija i akumulator koji se koristi za pokretanje, kretanje ili osvjetljavanje vozila.

Podaci iz navedenog dokumenta pokazuju da je na tržište Republike Hrvatske u 2018. godini stavljeno 13289 t baterija i akumulatora, od čega je bilo 10057 t automobilskih akumulatora (startera). U tablici 4. možemo vidjeti količine svih vrsta baterija na tržištu u razdoblju između 2007. i 2018. godine:

Tablica 4. Količine baterija ili akumulatora stavljene na tržište po vrstama

Stavljeno na tržište RH (t)	2007.	2008.	2009.	2010.	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.	2016.	2017.	2018.
Prijenosne baterije i akumulatori	707	454	398	401	332	407	394	347	266	395	568	674
Starteri	7.049	7.256	6.768	6.884	5.854	6.157	6.896	6.835	7.729	9.410	12.519	10.057
Industrijske baterije i akumulatori	1.504	1.286	1.109	1.129	1.158	1.132	1.034	1.615	1.576	1.819	2.570	2.558
UKUPNO (t):	**9.259**	**8.997**	**8.276**	**8.414**	**7.344**	**7.696**	**8.323**	**8.797**	**9.570**	**12.019**	**15.657**	**13.289**

Iste godine je prijavljena količina sakupljenih otpadnih baterija i akumulatora iznosila 543 t, dok je oporabljena količina iznosila 632 t. Količine oporabljenih baterija nadmašuju sakupljene količine zbog privremenog skladištenja i oporabe u sljedećoj kalendarskoj godini. Na sljedećem grafu možemo vidjeti količine sakupljenih i oporabljenih baterija u razdoblju od 2016. do 2018. godine (slika 18):



Slika 18. Količina sakupljenih i oporabljenih baterija (2016. - 2018.)

(Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, 2020a)

Veliku većinu otpadnih baterija i akumulatora u Republici Hrvatskoj (72,58 %) u 2013. godini oporabio je jedan koncesionar, CIAK d.o.o. (tablica 5).

Tablica 5. Udio koncesionara u ukupnoj sakupljenoj količini otpada

NAZIV KONCESIONARA	Otpadni starteri, t	Otpadne prijenosne BA*, t	Otpadne industrijske BA*, t	Ukupno po koncesionaru, t	Udio koncesionara u ukupnoj količini, %
C.I.A.K. d.o.o.	5 247,88	23,28	24,63	5 295,79	72,58
FLORA-VTC d.o.o.	4,75	5,75	0,42	10,92	0,15
FRIŠ d.o.o.	259,77	23,23	59,71	342,71	4,70
METIS d.d.	892,01	4,75	0,00	896,76	12,29
MUNJA d.d.	41,90	0,00	0,00	41,90	0,57
ODLAGALIŠTE SIROVINA d.o.o.	51,32	0,12	0,07	51,51	0,71
S.T.R. akumulator	410,00	17,89	0,48	428,37	5,87
UNIVERZAL d.o.o. - VARAŽDIN	228,24	0,65	0,00	228,89	3,14

Za razliku od drugih vrsta baterija, recikliranje baterija električnih automobila je ponešto kompleksniji zadatak. Iz intervjua s voditeljem sigurnosti i zaštite zdravlja radnika te zaštite okoliša tvrtke Rimac Automobili d.o.o. vidljivo je da je u Republici Hrvatskoj sustav za gospodarenje otpadom na državnoj razini još prilično nerazvijen. Iako tvrtka teži metodama *closed loop* (hrv. zatvoreni krug gospodarenja otpadom) i *zero waste to landfill* (hrv. nula otpada na odlagalište), što znači da što manje otpada završava na odlagalištima, ipak im 75 do 80 % neopasanog i miješanog komunalnog otpada odlazi na odlagališta otpada.

Sve tvrtke koje gospodare posebnim kategorijama otpada, kvartalno plaćaju naknade za zbrinjavanje posebnih kategorija otpada (ambalažni otpad, električni i elektronički otpad, otpadne gume, otpadna ulja, otpadna vozila, otpadne baterije i akumulatori, otpad koji sadrži azbest te ostale posebne kategorije otpada). Za litij-ionske baterije naknada za zbrinjavanje iznosi otprilike 2 kn/kg.

Ono što s obzirom na ograničene mogućnosti i iznimno kompliciran sustav birokracije u Hrvatskoj mogu, jest odabrati najjednostavnija rješenja za svoj otpad, a to je klasični otpis materijala. Njihova direktna odgovornost je zbrinuti otpad koji nastaje kao nusproizvod proizvodnog procesa. Tijekom proizvodnje se stvara otpad kojeg čini 40 % ambalaže, 30 % otpadnog materijala (strugotine, ostatak karbona i sl.), oko 20 % otpada zbog kontrole kvalitete i 10 % potrošnog materijala u proizvodnji (rukavice, maske i sl.). Potom se taj otpad selektira u odvojene spremnike (19 različitih vrsta – ključnih brojeva otpada), odnosno prolazi proces predselekcije prije predaje na daljnje zbrinjavanje.

Pri predaji otpada zbrinjavatelju s kojima imaju sklopljen ugovor, ispunjava se prateći list s detaljnim podacima o tom otpadu, kojim se on potom prati u daljnjim koracima. Ono što naglašavaju jest da većina tog otpada (pogotovo opasnog otpada koje se rijetko zbrinjava i reciklira u RH) odlazi u inozemne spalionice za dobivanje energije i dopunjavanje nedostatka otpada i/ili energenata koji im je potreban za ispunjavanje kapaciteta tih postrojenja. Iz navedenog je jasno da se većina hrvatskih tvrtki za zbrinjavanje otpada bavi isključivo posredništvom u procesu gospodarenja otpadom, budući da taj otpad izvan RH ima određeno tržište. Na primjer, za tonu papira u Hrvatskoj je moguće dobiti, a to ovisi o burzi otpada, od 20 do 30 lipa po kilogramu otpada, a u mnogim se slučajevima taj iznos pada i na 0 kuna po kilogramu, jer tržišnu cijenu određuje prethodno navedena burza otpada.

Osim samog otpada koji nastaje kao nusprodukt proizvodnje, bitno je opisati na koji način postupaju sa samim baterijama. Tvrtka proizvodi dva osnovna tipa proizvoda: električne automobile te baterijske module i pogonske baterijske pakete.

U slučaju električnih automobila, tvrtka Rimac je zadužena za održavanje automobila te zbrinjavanje baterija kad za to dođe vrijeme. Kad je riječ o baterijama, kupac nije privatna osoba već neka autoindustrijska tvrtka, koja kupovinom baterije postaje zadužena za zbrinjavanje iste.

5. ZAKLJUČAK

Električni automobili se generalno smatraju ekološki prihvatljivijom alternativom automobilima s motorom s unutarnjim izgaranjem, iz razloga što nemaju direktne emisije ispušnih plinova. Unatoč tome, ona imaju indirektan utjecaj na okoliš. Glavni čimbenici koji imaju negativan utjecaj odnose se na zagađenje okoliša zbog rudarskih i industrijskih radova nužnih za proizvodnju baterija, neobnovljive izvore električne energije potrebne za napajanje vozila, te na same baterije vozila, njihov sastav i pitanje njihovog zbrinjavanja. Baterije električnih vozila sačinjene su od različitih materijala koji mogu biti toksični, zapaljivi i onečistiti okoliš, u slučaju da ih se neadekvatno zbrinjava. Također, neprestanom eksploatacijom primarnih sirovina za nekoliko desetaka godina doći ćemo do potpunog iscrpljivanja izvora tih sirovina. Stoga je od presudne važnosti reciklirati baterije, kako iz automobila, tako i sve druge, kako bismo usporili eksploataciju i maksimalno umanjili negativan utjecaj na okoliš. Upravo iz tih razloga je u Hrvatskoj, Europi i svijetu zakonski regulirano odvajanje i recikliranje baterija.

Budući da su najvećim dijelom baterije električnih vozila litij-ionske, u radu su prikazane različite metode i tehnologije recikliranja ovog tipa baterija. Iako metode variraju od postrojenja do postrojenja, najčešće se spominju hidrometalurški, pirometalurški i biohidrometalurški procesi, odnosno njihova kombinacija. Pogon za recikliranje baterija koji je trenutno najperspektivniji je Duesenfeld, čijom se metodom uspijeva reciklirati više od 90 % baterije, znatno više nego *tradicionalnijim* postupcima. Također je važno napomenuti da je prije samog procesa recikliranja potrebno baterije maksimalno iskoristiti, što znači da ih nakon upotrebe u vozilima još uvijek možemo uporabiti u druge svrhe. Nakon pada njihovog kapaciteta potrebnog za upotrebu u električnim vozilima, ove baterije imaju još potencijala za napajanje ulične rasvjete, kućanstva i sl. Ovakva ponovna upotreba naziva se *drugi život* baterije. Kada više nisu podobne ni za te alternativne namjene, dolaze u postrojenja za recikliranje, gdje se prazne, čime daju energiju za rad. Na primjer, u pogonu Duesenfeld gotovo pola energije potrebne za napajanje postrojenja dolazi iz samih baterija.

Iako se i dalje vode rasprave o tome jesu li uistinu električna i hibridna vozila ekološki prihvatljivija od automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem, ona nam nude mnogo prostora za napredak i usavršavanje u budućnosti. Bitno je da prepoznamo njihov

potencijal i ulažemo u tehnologije i rješenja kojima će se otisak ugljika svesti na minimum, kako u dobivanju energije potrebne za napajanje baterija, tako i u procesu izrade i recikliranja baterija.

U radu su prikazane različite metode recikliranja litij-ionskih baterija električnih automobila, koje pokazuju koliko je taj zadatak kompleksan i zahtjevan, ali i da je moguće naći ekološki i ekonomski prihvatljive solucije. Kao i u mnogim drugim područjima, Hrvatska kaska za trendovima u svijetu, ali se nadam da će se u budućnosti više ulagati u ekološka rješenja i održivi razvoj.

LITERATURA

HRVATSKA AGENCIJA ZA OKOLIŠ I PRIRODU, 2016. Pregled podataka za posebne kategorije otpada za razdoblje od 2008. do 2015. godine: Ambalažni otpad, Otpadna motorna i jestiva ulja, Električni i elektronički otpad, Otpadne baterije i akumulatori. Zagreb: Hrvatska agencija za okoliš i prirodu.

LIANG, A., 2019. Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries: Processing Methods and Environmental Impacts. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University.

LOZINA, D., 2017. Recikliranje baterija. Završni rad. Osijek: Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija.

NOVOSEL, M., 2016. Izbor baterija kod solarnih, hibridnih i električnih vozila. Završni rad. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, Strojarski odjel.

MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I ENERGETIKE, 2017. Pravilnik o gospodarenju otpadom (»Narodne novine«, broj 94/13, 73/17). Zagreb: Narodne novine.

MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I ENERGETIKE, 2020a. Pregled podataka o otpadnim baterijama i akumulatorima u 2018. godini. Izvješće. Zagreb: Ministarstvo zaštite okoliša i energetike.

MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I ENERGETIKE, 2020b. Pregled podataka o otpadnim baterijama i akumulatorima u 2019. godini. – privremeno izvješće. Zagreb: Ministarstvo zaštite okoliša i energetike.

MINISTARSTVO ZAŠTITE OKOLIŠA I PRIRODE, 2015. Pravilnik o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima (»Narodne novine«, broj 94/13). Zagreb: Narodne novine.

SHAIKH, D., 2018. Električni automobili. Diplomski rad. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet.

ŠANTEK, A., 2015. Povijest električnih automobila. Završni rad. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, Strojarski odjel.

TURČINOVIĆ, M., 2019. Tehničko eksploatacijske značajke cestovnih vozila na električni pogon. Završni rad. Zagreb: Fakultet prometnih znanosti.

Popis mrežnih izvora

BUCHMANN, I., 2019. BU-301a: Types of Battery Cells. Battery University.
https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells (1.9.2020.)

DONUT MEDIA, 2020. Are Electric Cars REALLY Better for the Environment? YouTube.
URL: https://www.youtube.com/watch?v=G67i_Z8ukD4 (1.9.2020.)

DUESENFELD, 2020.
URL: https://www.duesenfeld.com/ (1.9.2020.)

ENGINEERING EXPLAINED, 2018a. What Really Happens To Old Electric Car Batteries? YouTube.
URL: https://www.youtube.com/watch?v=1mXSMwZUiCU (1.9.2020.)

ENGINEERING EXPLAINED, 2018b. Are Electric Cars Worse For the Environment? Myth Busted. YouTube.
URL: https://www.youtube.com/watch?v=6RhtiPefVzM (1.9.2020.)

EUROPSKI PARLAMENT I VIJEĆE EUROPSKE UNIJE, 2006. Direktiva 2006/66/EZ o baterijama i akumulatorima i otpadnim baterijama i akumulatorima. Službeni list Europske Unije.
URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/66/oj?locale=hr (1.9.2020.)

EUROPSKI PARLAMENT I VIJEĆE EUROPSKE UNIJE, 2013. Direktiva 2013/56/EU o izmjeni Direktive 2006/66/EZ. Službeni list Europske Unije.

URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32013L0056 (1.9.2020.)

FOND ZA ZAŠTITU OKOLIŠA I ENERGETSKU UČINKOVITOST, 2020. Posebne kategorije otpada. FZOEU.
URL: https://www.fzoeu.hr/hr/gospodarenje_otpadom/posebne_kategorije_otpada/otpadne_baterije_i_akumulatori/ (1.9.2020.)

FULLY CHARGED SHOW, 2020. Can electric vehicle batteries be recycled? YouTube.
URL: https://www.youtube.com/watch?reload=9&reload=9&v=Bpe8HalVXFU&t=3s (1.9.2020.)

GALARRAGA, I., 2013. How to series: Power supply of wireless sensor networks. Farsens.
URL: (http://www.farsens.com/en/2013/11/22/series-introduction-batteries-wireless-sensor-networks/ (1.9.2020.)

GROUPE RENAULT, 2018. The "smart island". A glimpse of the mobility of the future? 4 questions for our expert Eric Feunteun.
URL: https://group.renault.com/en/news-on-air/news/the-smart-island-a-glimpse-of-the-mobility-of-the-future-4-questions-for-our-expert-eric-feunteun/ (1.9.2020.)

HRVATSKA ENCIKLOPEDIJA, mrežno izdanje, 2020. Leksikografski zavod Miroslav Krleža.
URL: https://www.enciklopedija.hr/ (1.9.2020.)

JANTON, M., 2019. Povijest baterija: Kako su nastale? Marketing odjel.
URL: https://www.marketing-odjel.com/povijest_baterija (1.9.2020.)

NISSAN MOTOR CORPORATION, 2018. Nissan LEAF batteries to light up Japanese town: Streetlights in Namie to be powered by used batteries as part of `The Reborn Light' project.

URL: https://global.nissannews.com/en/releases/release-487297034c80023008bd9722aa000f93-180322-01-e (1.9.2020.)

PEJOVIĆ, M., 2018. Koliko su 'zeleni' električni automobili? Al Jazeera Balkans.
URL: http://balkans.aljazeera.net/vijesti/koliko-su-zeleni-elektricni-automobili (1.9.2020.)

RECUPYL, 2020. Hydrometallurgy: Process.
URL: http://www.recupyl.com/157-process.html (1.9.2020.)

SETH, S., 2019. Reduce Reuse Recycle Recover Triangle. KindPNG.
URL: https://twitter.com/LeedsRecycles/status/934145878465630209 (1.9.2020.)

WAGNER, I., 2020. Battery electric vehicles in use - worldwide 2012-2019. Statista.
URL: https://www.statista.com/statistics/270603/worldwide-number-of-hybrid-and-electric-vehicles-since-2009/?fbclid=IwAR0SW5HnPxTsV6XHZbV0v3tEBr5rA5cN-XsFb11X_7LscO59dMgsj6fs7vg (1.9.2020.)