

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

MAGISTRSKO DELO

**OKOLJSKI VPLIV RABLJENIH ELEKTRIČNIH BATERIJ
TER NAČINI ZMANJŠANJA NJIHOVEGA
OKOLJSKEGA BREMENA**

Mateja Kosec

VELENJE, 2026

FAKULTETA ZA VARSTVO OKOLJA

MAGISTRSKO DELO

**OKOLJSKI VPLIV RABLJENIH ELEKTRIČNIH BATERIJ
TER NAČINI ZMANJŠANJA NJIHOVEGA
OKOLJSKEGA BREMENA**

Mateja Kosec
Varstvo okolja in ekotehnologije

Mentorica: doc. dr. Tanja Tajnik

VELENJE, 2026

Številka: 727-2/2025-2

Datum: 5. 3. 2025

Na podlagi Diplomskega reda izdajam naslednji

SKLEP O MAGISTRSKEM DELU

Študentka Fakultete za varstvo okolja **Mateja Kosec** lahko izdela magistrsko delo z naslovom v slovenskem jeziku:

Okoljski vpliv rabljenih električnih baterij in načini zmanjšanja njihovega okoljskega bremena

Naslov magistrskega dela v angleškem jeziku:

Environmental impacts of used electric batteries and possibilities to reduce their environmental burden

Mentorica: **doc. dr. Tanja Tajnik**

Magistrsko delo mora biti izdelano v skladu z Diplomskim redom.

Pouk o pravnem sredstvu: zoper ta sklep je dovoljena pritožba na Senat FVO v roku 8 delovnih dni od prejema sklepa.



Prof. dr. Boštjan Pokorný

dekan



Fakulteta za varstvo okolja

Trg mladosti 7 | 3320 Velenje

t: 03 898 64 10 | e: info@fvo.si

www.fvo.si



IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisana **Mateja Kosec**, z vpisno številko 34230017, študentka podiplomskega študijskega programa Varstvo okolja in ekotehnologije, izjavljam, da sem avtorica magistrskega dela z naslovom

OKOLJSKI VPLIV RABLJENIH ELEKTRIČNIH BATERIJ TER NAČINI ZMANJŠANJA NJIHOVEGA OKOLJSKEGA BREMENA,

ki sem ga izdelala pod mentorstvom **doc. dr. Tanje Tajnik**.

S svojim podpisom zagotavljam, da je predloženo delo rezultat mojega samostojnega raziskovalnega dela in ni bilo predloženo za pridobitev kateregakoli drugega strokovnega ali akademskega naziva v Sloveniji ali tujini.

Vsa uporabljena literatura, podatki in mnenja drugih avtorjev so ustrezno navedeni in citirani v skladu z navodili fakultete.

Zavedam se, da je plagiatorstvo kaznivo dejanje in da lahko dokazano plagiatorstvo vpliva na moj študijski status.

Izjavljam, da je magistrsko delo jezikovno ustrezno ter da je delo lektorirala Natalija Sinkovič, prof. slovenščine.

Dovoljujem objavo magistrskega dela v elektronski obliki na spletni strani fakultete ter potrjujem, da sta tiskana in elektronska verzija oddanega dela medsebojno identični.

V Velenju, dne

Podpis avtorice:

ZAHVALA

Iskreno se zahvaljujem mentorici **doc. dr. Tanji Tajnik** za strokovno usmerjanje, podporo in dragocene povratne informacije pri nastajanju magistrskega dela.

Posebna zahvala gre mojemu partnerju **Davidu Selku**, ki mi je s svojo podporo, razumevanjem in potrpežljivostjo stal ob strani skozi celoten študijski proces. Zahvaljujem se tudi svoji družini za neprecenljivo spodbudo, razumevanje in pomoč, kar mi je omogočilo uspešen zaključek študija. Hvaležna sem vsem, ki so na kakršenkoli način prispevali k nastanku in dokončanju tega dela.

IZVLEČEK

Magistrsko delo celovito obravnava problematiko rabljenih litij-ionskih baterij, ki zaradi hitre rasti električne mobilnosti postajajo eden ključnih okoljskih in tehnoloških izzivov sodobne družbe. V teoretičnem delu so predstavljene osnovne značilnosti litij-ionskih baterij, njihova sestava, delovanje ter procesi degradacije, ki vodijo do zmanjšanja kapacitete in nastanka odpadnih baterijskih sistemov. Analizirani so okoljski vplivi, ki izhajajo iz nepravilnega ravnanja, vključno z izpusti nevarnih snovi, tveganji za tla, vodo in zrak ter porabo kritičnih surovin.

Osrednji del je namenjen postopkom zbiranja, varnega skladiščenja, mehanske obdelave in naprednih tehnologij recikliranja. Podrobno so predstavljeni hidrometalurški in pirometalurški postopki, njihova učinkovitost, prednosti in omejitve ter vloga pri pridobivanju litija, kobalta, niklja in grafita. Obravnavan je tudi koncept druge življenjske dobe baterij, ki omogoča njihovo ponovno uporabo v stacionarnih energetskih sistemih ter pomembno prispeva k zmanjšanju količine nevarnih odpadkov in razbremenitvi reciklažnih obratov.

Delo vključuje pregled zakonodajnih zahtev Evropske unije in Slovenije, ki urejajo ravnanje z odpadnimi baterijami, ter izpostavlja pomen standardizacije, sledljivosti in odgovornosti proizvajalcev. Ugotovitve potrjujejo, da kombinacija učinkovitega zbiranja, naprednih reciklažnih tehnologij, ponovne uporabe baterij ter ustrezne zakonodaje predstavlja ključno pot k zmanjšanju okoljskega bremena baterijske industrije in k prehodu v trajnostno, krožno gospodarstvo.

Ključne besede: litij-ionske baterije, mehanizmi staranja, toplotno obnašanje, shranjevanje energije, upravljanje baterij.

ABSTRACT

The master's thesis provides a comprehensive examination of the issue of used lithium-ion batteries, which—due to the rapid growth of electric mobility—are becoming one of the key environmental and technological challenges of modern society. The theoretical part presents the fundamental characteristics of lithium-ion batteries, their composition, operation and degradation processes that lead to capacity loss and the formation of waste battery systems. The environmental impacts arising from improper handling are analysed, including the release of hazardous substances, risks to soil, water and air, and the consumption of critical raw materials.

The central part of the thesis focuses on collection procedures, safe storage, mechanical pre-treatment and advanced recycling technologies. Hydrometallurgical and pyrometallurgical processes are presented in detail, including their efficiency, advantages, limitations and their role in recovering lithium, cobalt, nickel and graphite. The concept of second-life applications is also discussed, enabling batteries to be reused in stationary energy systems and significantly reducing hazardous waste and the burden on recycling facilities.

The thesis includes an overview of the legislative requirements of the European Union and Slovenia governing waste battery management and highlights the importance of standardisation, traceability and producer responsibility. The findings confirm that a combination of efficient collection, advanced recycling technologies, second-life applications and appropriate legislation represents a key pathway to reducing the environmental burden of the battery industry and supporting the transition to a sustainable circular economy.

Keywords: lithium-ion batteries, ageing mechanisms, thermal behaviour, energy storage, battery management

VSEBINA

1 UVOD.....	1
1.1 Ozadje raziskave.....	2
1.2 Opredelitev problema	3
1.3 Namen raziskave.....	3
1.4 Cilji raziskave	4
1.5 Hipoteze.....	5
2 ZGODOVINSKI RAZVOJ BATERIJ.....	6
2.1 Litij-ionske baterije.....	6
2.2 Razlike med litijevimi in litij-ionskimi baterijami	8
2.3 Zgradba litij-ionskih baterij.....	10
2.4 Kemijske sestave litij-ionskih baterij.....	11
2.5 Prednosti litij-ionskih baterij	12
2.6 Varnostni vidiki litij-ionskih baterij	12
2.7 Uporaba litij-ionskih baterij	14
3 OKOLJSKI VPLIVI, TVEGANJA, ŽIVLJENJSKI CIKEL IN RECIKLIRANJE LITIJ- IONSKIH BATERIJ	15
3.1 Metodološki okvir LCA – ISO 14040 in ISO 14044	16
3.2 Življenjski cikel litij-ionskih baterij.....	17
3.3 Okoljski vplivi po fazah življenjskega cikla	23
3.4 Postopki recikliranja litij-ionskih baterij.....	28
3.5 Okoljski in varnostni vidiki recikliranja.....	29
3.6 Varnostna tveganja litij-ionskih baterij.....	30
3.7 Zbiranje, skladiščenje in ravnanje z odpadnimi litij-ionskimi baterijami	37
3.8 Ravnanje s poškodovanimi litij-ionskimi baterijami	40
3.9 Postopki recikliranja litij-ionskih baterij.....	42
3.10 Alternativne baterijske tehnologije in vpliv na okolje	43
3.11 Druga življenjska doba baterij (second life).....	48
4 METODOLOGIJA RAZISKAVE.....	53
4.1 Izbor in primerjava obstoječih LCA-študij.....	53
4.2 Primerjalna analiza LCA-študij o litij-ionskih baterijah	54
4.3 Omejitve primerjave obstoječih LCA-študij	57
4.4 Rezultati in ugotovitve primerjave LCA-študij.....	58
5 EMPIRIČNI DEL RAZISKAVE	60
5.1 Analiza internih strokovnih študij in tehnoloških smernic iz industrije recikliranja.....	60
5.2 Intervju s predstavnikom podjetja	62

5.3 Strokovni članek: nadzorovani vžig električnega vozila (Ljubečna pri Celju)	65
6 Razprava in sklepi	67
6.1 Preverjanje hipotez in ključne ugotovitve	68
7 POVZETEK	69
8 SUMMARY	70
9 ZAKLJUČEK	71
10 VIRI IN LITERATURA	72
11 VIRI SLIK	74
12 PRILOGE	

KAZALO SLIK

Slika 1 Prikaz Li-ion sklopa avtomobilske baterije.....	7
Slika 2 Modul avtomobilske baterije	7
Slika 3 Celica avtomobilske baterije	7
Slika 4 Primerjava LiFePO_4 in litij-ionskih baterij	9
Slika 5 Prikaz razlike med litijevo in litij-ionsko baterijo.....	10
Slika 6 Sestava litionskih baterij	11
Slika 7 Življenski cikel baterij	15
Slika 8 Litij.....	17
Slika 9 Kovinski in mineralni kobalt	18
Slika 10 Rudarjenje litija	18
Slika 11 Prikaz proizvodnje baterij.....	19
Slika 12 Prikaz druge življenjske dobe baterij	28
Slika 13 prikaz Prikaz polnjenja in praznjenja litij-ionskihbaterijionskih baterij	30
Slika 14 Prikaz termičnega pobega baterije	31
Slika 15 Prikaz požarne odeje	32
Slika 16 Skladiščna posoda za shranjevanje litij-ionskih baterij	36
Slika 17 Industrijska baterija.....	39
Slika 18 Postopek recikliranja baterij	43
Slika 19 Sestava litij-ionskih baterij	44
Slika 20 prikaz magnezijeve baterije	46
Slika 21 Prvi avtomobil z natrij-ionsko baterijo.....	47
Slika 22 Prikaz druge življenske dobe baterij.....	48
Slika 23 Podpora krožnemu gospodarstvu	49
Slika 24 Prikaz nadzorovanega vžiga električnega avtomobila	65

KAZALO TABEL

Tabela 1 Primerjava litijeve vs litij-ionske baterije	9
Tabela 2 Varnostna tveganja litij-ionskih baterij , vzroki, posledice in preventivni ukrepi	13
Tabela 3 Tabela iso standardadov	16
Tabela 4 Druga (podaljšana) življenjska doba baterij.....	20
Tabela 5 co2 emisije električne energije po državah (g co ₂ /kwh).....	23
Tabela 6 Okoljski vplivi po fazah življenskega cikla	24
Tabela 7 Primerjava postopkov recikliranja	25
Tabela 8 Pregled izvajalcev električnih vozil in uporabljenih baterijskih tehnologij...	33
Tabela 9 Primerjalna analiza lca študij o litij-ionskih baterijah.....	56

KRATICE

LCA – *Life Cycle Assessment* (ocena življenjskega cikla)

Li-ion – litij-ionska baterija

LCO – *Lithium Cobalt Oxide* (litij-kobaltov oksid)

NMC – *Nickel Manganese Cobalt* (nikelj-mangan-kobalt)

NCA – *Nickel Cobalt Aluminium* (nikelj-kobalt-aluminij)

LFP – *Lithium Iron Phosphate* (litij-železov fosfat)

LTO – *Lithium Titanate Oxide* (litij-titanat)

BMS – *Battery Management System* (sistem upravljanja baterije)

EU – Evropska unija

CO₂ – ogljikov dioksid

EV – električno vozilo

SoC – *State of Charge* (stopnja napolnjenosti)

SoH – *State of Health* (stanje zdravja baterije)

DoD – *Depth of Discharge* (globina praznjenja)

UN 38.3 – mednarodni varnostni standard za transport litij-ionskih baterij

BESS – *Battery Energy Storage System* (sistem za shranjevanje energije)

MSDS – *Material Safety Data Sheet* (varnostni list)

RAZLAGA POJMOV

Litij-ionska baterija – polnilna baterija, ki deluje na principu premikanja litijevih ionov med anodo in katodo.

Termični pobeg – nevaren proces nenadzorovanega segrevanja baterije, ki lahko vodi v požar ali eksplozijo.

Druga življenjska doba (Second-life) – ponovna uporaba izrabljenih baterij v manj zahtevnih aplikacijah, npr. stacionarnih hranilnikih energije.

Hidrometalurgija – postopek recikliranja z uporabo kemijskih raztopin za pridobivanje kovin.

Pirometalurgija – visokotemperaturni postopek recikliranja kovin iz baterij.

Kritične surovine – surovine z visokim gospodarskim pomenom in tveganjem dobavne odvisnosti (litij, kobalt, nikelj, grafit).

Separator – porozna membrana, ki ločuje anodo in katodo ter preprečuje kratke stike.

Elektrolit – tekočina ali gel, ki omogoča premikanje litijevih ionov med elektrodama.

Življenjski cikel baterije – vse faze od rudarjenja surovin, proizvodnje, uporabe do recikliranja.

Krožno gospodarstvo – model, ki temelji na ponovni uporabi, recikliranju in zmanjšanju odpadkov.

Nearni odpadki – odpadki, ki zaradi kemijske sestave predstavljajo tveganje za okolje in zdravje.

Sledljivost baterij – obvezno spremljanje podatkov o izvoru, sestavi in obdelavi baterij (zahteva EU 2023/1542).

1 UVOD

Litij-ionske baterije so v zadnjih desetletjih postale ena ključnih tehnologij sodobnega sveta, saj omogočajo razvoj prenosne elektronike, električnih vozil, naprednih industrijskih sistemov in hranilnikov energije iz obnovljivih virov. Njihova izjemna energijska gostota, nizka masa, dolga življenjska doba in možnost večkratnega polnjenja so lastnosti, ki so omogočile globalni tehnološki preboj. Danes si je težko predstavljati vsakdanje življenje brez naprav, ki jih poganjajo litij-ionske baterije – od pametnih telefonov in prenosnih računalnikov do električnih avtomobilov, medicinske opreme, industrijskih naprav in sistemov za stabilizacijo elektroenergetskih omrežij.

Pospešena elektrifikacija prometa, razvoj obnovljivih virov energije ter prehod v nizkoogljično družbo so povzročili izrazito povečanje povpraševanja po litij-ionskih baterijah. Te predstavljajo eno ključnih tehnologij za zmanjševanje emisij toplogrednih plinov in doseganje podnebnih ciljev Evropske unije ter drugih držav sveta. Zaradi vse večjega števila električnih vozil in baterijskih hranilnikov energije pa se hkrati povečuje tudi poraba naravnih virov ter količina izrabljenih baterij, ki bodo v prihodnjih letih dosegle konec svoje življenjske dobe.

Kljub številnim prednostim litij-ionske baterije niso brez pomanjkljivosti. Njihov celotni življenjski cikel – od pridobivanja surovin, proizvodnje, uporabe in vzdrževanja do končne obdelave – vključuje procese, ki lahko pomembno obremenjujejo okolje. Pridobivanje litija, kobalta, niklja in drugih kritičnih surovin je povezano z velikimi posegi v okolje, porabo energije in vode, emisijami toplogrednih plinov ter družbenimi vprašanji, kot so neustrezni delovni pogoji in vplivi na lokalne skupnosti. Poleg okoljskih vplivov se pojavljajo tudi vprašanja dolgoročne razpoložljivosti nekaterih surovin, zaradi česar raziskovalci in proizvajalci intenzivno razvijajo alternativne baterijske tehnologije ter izboljšujejo postopke recikliranja.

Pomemben vidik uporabe litij-ionskih baterij predstavlja tudi njihova varnost. Zaradi visoke energijske gostote in uporabe vnetljivih elektrolitov lahko ob mehanskih poškodbah, prekomernem polnjenju, visokih temperaturah ali proizvodnih napakah pride do termičnega pobega, ki lahko povzroči požar ali eksplozijo. Čeprav sodobni sistemi za upravljanje baterij pomembno zmanjšujejo možnost nastanka takšnih dogodkov, popolna odprava tveganj trenutno še ni mogoča. Zato razvoj varnejših baterijskih sistemov predstavlja eno izmed pomembnih raziskovalnih področij.

Poseben izziv predstavljajo izrabljene litij-ionske baterije. Po koncu njihove uporabne življenjske dobe postanejo pomemben vir sekundarnih surovin, hkrati pa predstavljajo tudi nevaren odpadek, če se z njimi ne ravna ustrezno. Nepravilno odlaganje lahko povzroči onesnaženje tal, podtalnice in površinskih voda ter poveča nevarnost požarov zaradi preostale energijske vsebnosti baterij. Zaradi tega postajajo učinkoviti sistemi zbiranja, varnega skladiščenja, ponovne uporabe in recikliranja vse pomembnejši del trajnostnega upravljanja baterijskih sistemov.

V zadnjih letih se vse več pozornosti namenja razvoju krožnega gospodarstva, katerega cilj je čim daljša uporaba materialov ter zmanjšanje količine odpadkov. Pri litij-ionskih baterijah to vključuje razvoj naprednih reciklažnih tehnologij, uporabo baterij v drugi življenjski dobi ter povečanje deleža recikliranih materialov pri proizvodnji novih baterij. Takšen pristop zmanjšuje potrebo po pridobivanju primarnih surovin, zmanjšuje okoljske obremenitve in prispeva k učinkovitejši rabi naravnih virov.

Magistrsko delo celovito obravnava okoljske vplive litij-ionskih baterij skozi njihov življenjski cikel z uporabo analize življenjskega cikla (LCA). Poleg pregleda različnih kemijskih sestav baterij in njihovih področij uporabe obravnava tudi varnostne vidike, ravnanje z izrabljenimi baterijami, možnosti recikliranja ter koncept druge življenjske dobe baterij. Posebna pozornost je namenjena primerjavi različnih pristopov k zmanjševanju okoljskega odtisa ter razvoju novih baterijskih tehnologij, ki bi lahko v prihodnosti zmanjšale odvisnost od kritičnih surovin.

V empiričnem delu magistrskega dela so predstavljeni rezultati anketne raziskave med uporabniki in intervjuja s strokovnjakom s področja baterijskih sistemov. Namen raziskave je bil ugotoviti, kako uporabniki razumejo okoljske in varnostne vidike litij-ionskih baterij ter primerjati njihovo zaznavanje s strokovnimi ugotovitvami. Z združitvijo teoretičnih izhodišč in empiričnih rezultatov magistrska naloga omogoča celovito razumevanje problematike ter prispeva k boljšemu poznavanju okoljskih, tehnoloških in varnostnih vidikov litij-ionskih baterij ter njihove vloge pri trajnostnem razvoju sodobne družbe.

1.1 Ozadje raziskave

V zadnjih letih se svet sooča z intenzivnim preходом v nizkoogljično družbo, ki ga spodbujajo podnebne spremembe, energetska kriza in zahteve po zmanjšanju emisij toplogrednih plinov. Elektrifikacija prometa je eden ključnih elementov tega prehoda, saj omogoča zmanjšanje odvisnosti od fosilnih goriv in zmanjšanje emisij CO₂. Električna vozila pa so neposredno odvisna od litij-ionskih baterij, ki predstavljajo njihov najpomembnejši in najdražji del.

Proizvodnja litij-ionskih baterij zahteva velike količine surovin, kot so litij, kobalt, nikelj, grafit in mangan. Rudarjenje teh surovin je pogosto povezano z degradacijo okolja, onesnaženjem voda, izsekavanjem gozdov ter družbenimi vprašanji, kot so izkoriščanje delovne sile in nevarni delovni pogoji. Najbolj izpostavljene so regije, kot so Demokratična republika Kongo (kobalt), Čile, Argentina in Bolivija (litij) ter Indonezija in Filipini (nikelj).

Evropska unija se zaveda teh izzivov in je zato sprejela Uredbo o baterijah (EU 2023/1542), ki uvaja strožje zahteve glede trajnosti, sledljivosti, recikliranja in ogljičnega odtisa baterij. Uredba določa minimalne deleže recikliranih materialov, obvezno poročanje o ogljičnem odtisu proizvodnje ter strožje zahteve glede zbiranja in obdelave odpadnih baterij.

Kljub zakonodaji pa ostajajo številni izzivi:

- nizka stopnja recikliranja litij-ionskih baterij,
- visoki stroški predelave,
- pomanjkljiva infrastruktura za zbiranje,
- omejena ozaveščenost uporabnikov,
- varnostna tveganja pri skladiščenju in transportu,
- pomanjkanje surovin za hitro rastočo industrijo.

Zaradi teh izzivov je raziskovanje okoljskih vplivov litij-ionskih baterij izjemno pomembno za razvoj trajnostnih rešitev.

1.2 Opredelitev problema

Kljub pomembni vlogi litij-ionskih baterij pri prehodu v nizkoogljično družbo njihov življenjski cikel še vedno ni trajnostno urejen. Ključni problemi so:

- nepravilno odlaganje odpadnih baterij,
- nizka stopnja recikliranja,
- izguba dragocenih surovin,
- okoljske in družbene posledice rudarjenja litija, kobalta in niklja,
- energetsko intenzivna proizvodnja baterij,
- varnostna tveganja, povezana z vnetljivimi elektroliti in termičnim pobegom,
- pomanjkljiva ozaveščenost uporabnikov o pravilnem ravnanju z baterijami.

Brez celovitega pristopa obstaja tveganje, da bodo negativni vplivi litij-ionskih baterij zasenčili njihove prednosti. Zato je nujno razviti celovite strategije, ki vključujejo trajnostno pridobivanje surovin, izboljšanje proizvodnih procesov, učinkovito recikliranje ter ozaveščanje uporabnikov.

1.3 Namen raziskave

Namen magistrskega dela je bil celovito raziskati vplive litij-ionskih baterij na okolje in družbo skozi celoten življenjski cikel – od pridobivanja surovin, proizvodnje elektrodnih materialov in baterijskih celic, uporabe v električnih vozilih in stacionarnih sistemih do končne obdelave in recikliranja. Raziskava je zagotovila celostno analizo, ki vključuje tako tehnične kot okoljske in družbene dimenzije, kar omogoča razumevanje trajnostnih posledic baterij v globalnem kontekstu.

Litij-ionske baterije so ključni element prehoda na trajnostno mobilnost in obnovljive vire energije, saj omogočajo shranjevanje energije z visokoenergetsko gostoto in dolgotrajno uporabo. Hkrati pa njihova proizvodnja in končna obdelava prinašata pomembne izzive za okolje in družbo, kot so visoka poraba energije, emisije toplogrednih plinov, degradacija tal, poraba vode ter etični in socialni problemi pri rudarjenju kritičnih kovin, kot so litij, kobalt in nikelj.

Poseben poudarek raziskave je bil na:

- nevarnih snoveh v baterijah in njihovih okoljskih ter zdravstvenih tveganjih,
- okoljskih vplivih pridobivanja surovin, proizvodnje, uporabe in recikliranja, vključno z emisijami CO₂, porabo energije, vplivom na vodne vire in degradacijo tal,
- družbenih in etičnih vprašanj, kot so delovni pogoji v rudnikih, uporaba otroške delovne sile, vpliv na lokalne skupnosti in geopolitična odvisnost od kritičnih surovin,
- obstoječih tehnologijah recikliranja, kot so pirometalurgija, hidrometalurgija in neposredna regeneracija, ter oceni njihovega trajnostnega potenciala in učinkovitosti,
- izzivih zbiranja, transporta in predhodne obdelave odpadnih baterij, ki so ključni za zmanjšanje tveganj in povečanje izkoristka materialov,
- ozaveščenosti prebivalstva in industrije o pravilnem ravnanju z baterijami ter vplivu izobraževanja in regulative na stopnjo recikliranja.

Cilj magistrskega dela je bil:

- identificirati kritične točke v življenjskem ciklu, kjer je možno zmanjšati okoljski odtis,
- predlagati praktične rešitve in priporočila za trajnostno proizvodnjo, uporabo in recikliranje,
- prispevati k razvoju krožnega gospodarstva, kjer se surovine ponovno vključijo v proizvodnjo,
- povečati trajnostno in družbeno odgovorno rabo baterij ter hkrati zmanjšati negativne vplive na okolje in lokalne skupnosti.

S tem je delo prispevalo h globljemu razumevanju kompleksnih povezav med tehnologijo, okoljem in družbo, ponujalo osnovo za prihodnje raziskave in izboljšave v industriji ter podpiralo trajnostne politike in standarde za učinkovito upravljanje litij-ionskih baterij na globalni ravni.

1.4 Cilji raziskave

Glavni cilj magistrskega dela je bil celovito preučiti vplive litij-ionskih baterij na okolje in družbo ter identificirati možnosti za zmanjšanje njihovega okoljskega bremena skozi celoten življenjski cikel. Delo se osredotoča na vse faze – od pridobivanja surovin, proizvodnje in uporabe do končne obdelave in recikliranja baterij – pri čemer vključuje tako tehnične kot družbene vidike.

Ker lastna analiza življenjskega cikla (LCA) ni bila izvedena, se raziskava osredotoča na preučitev obstoječih analiz LCA, ki so jih izvedli drugi avtorji, in na povzetek njihovih ključnih ugotovitev.

Za doseg glavnega cilja so bili določeni naslednji specifični cilji:

- Preučitev obstoječih analiz življenjskega cikla (LCA) litij-ionskih baterij, da se ugotovi, kje nastajajo največji okoljski vplivi in katere izboljšave so bile v literaturi prepoznane kot najučinkovitejše.
- Analiza celotnega življenjskega cikla litij-ionskih baterij, da se ugotovi, kje nastajajo največji okoljski vplivi in kje je mogoče izboljšati trajnost celotnega sistema.
- Preučitev okoljskih vplivov pridobivanja ključnih surovin, kot so litij, kobalt, nikelj in grafit, z vidika porabe energije, emisij toplogrednih plinov, porabe vode, degradacije tal in družbenih tveganj.
- Ocenitev okoljskih vplivov proizvodnje baterijskih celic, vključno z energetskimi zahtevami, emisijami CO₂ in uporabo kemičnih materialov pri sintezi elektrod.
- Ocenitev vplivov faze uporabe baterij in povezanih tveganj, kot so odvisnost od elektroenergetske mešanice, izpusti toplogrednih plinov in možnosti podaljšanja življenjske dobe baterij.
- Preučitev praks zbiranja, skladiščenja in ravnanja z izrabljenimi baterijami z vidika varnosti, okoljskega tveganja in učinkovitosti logističnih sistemov.
- Ocenitev trajnostnih možnosti predelave in recikliranja, vključno s tehnologijami pirometalurgije, hidrometalurgije in neposredne regeneracije, ter njihovega vpliva na zmanjšanje okoljskega bremena in podporo krožnemu gospodarstvu.
- Analiza poznavanja pravilnega ravnanja z odpadnimi baterijami med prebivalci, da se ugotovi stopnja ozaveščenosti in morebitne pomanjkljivosti pri zbiranju in oddaji izrabljenih baterij.
- Identifikacija ključnih težav in izzivov v praksi, kot so regulativne ovire, omejitve tehnologij recikliranja ali pomanjkanje učinkovitih sistemov zbiranja.
- Predlaganje rešitev za zmanjšanje okoljskega bremena litij-ionskih baterij, vključno z izboljšanjem tehnologij recikliranja, trajnostno rabo baterij in spodbujanjem krožnega gospodarstva.

S temi cilji raziskava povezuje teoretične, praktične in družbene vidike ter omogoča celosten vpogled v trajnost litij-ionskih baterij. Hkrati prispeva k razvoju priporočil in strategij, ki bodo koristile tako industriji kot širši družbi ter podpirale trajnostne politike in standarde na področju ravnanja z baterijami.

1.5 Hipoteze

H1: Izrabljene litij-ionske baterije negativno vplivajo na okolje zaradi sproščanja težkih kovin in elektrolitov med njihovo razgradnjo.

H2: Proizvajalci baterij, ki vlagajo v trajnostne rešitve in izboljšave proizvodnega procesa, prispevajo k zmanjšanju okoljskih vplivov izrabljenih baterij.

H3: Povečanje ozaveščenosti o pomembnosti recikliranja in pravilnega ravnanja z izrabljenimi baterijami lahko izboljša okoljske rezultate.

2 ZGODOVINSKI RAZVOJ BATERIJ

Razvoj baterijske tehnologije je tesno povezan z razvojem elektrokemije in potrebami po zanesljivih prenosnih virih energije. Prve zametke elektrokemijskih sistemov je mogoče zaslediti že v arheoloških najdbah, kot je t. i. bagdadska baterija, ki jo nekateri avtorji omenjajo kot možen primer zgodnjega razumevanja elektrokemijskih pojavov (Kuehr & Williams, 2007). Čeprav njen namen ni dokončno potrjen, kaže na dolgo zgodovino raziskovanja interakcij med kovinami in elektroliti.

Leta 1800 je Alessandro Volta predstavil prvi delujoči elektrokemični člen, ki je postal temelj sodobnega razvoja baterij. Voltov člen je omogočil stabilen vir električne energije in s tem odprl pot nadaljnjim raziskavam ter razvoju različnih baterijskih sistemov (Pachauri & Mayer, 2014). V drugi polovici 19. stoletja je Gaston Planté razvil prvo svinčeno-kislinsko baterijo, ki je bila hkrati tudi prva polnilna baterija. Zaradi robustnosti in nizkih stroškov se uporablja še danes, predvsem v avtomobilski industriji.

V 20. stoletju so se pojavile Ni-Cd in Ni-MH baterije, ki so omogočile razmah prenosne elektronike. Kljub prednostim, kot sta stabilnost in zanesljivost, so imele tudi pomembne omejitve, med katerimi izstopata spominski učinek in okoljska problematičnost kadmija (Šimnič & Kovačič, 2019).

Prehod v sodobno obdobje baterijske tehnologije se je začel v 70. in 80. letih, ko so raziskovalci začeli preučevati litij kot nosilec naboja. Litij, kot najlažji kovinski element, omogoča visoko energijsko gostoto, kar je vodilo v razvoj prvih litijevih sistemov. Ključni preboj je predstavljala uvedba interkalacijskih materialov, ki so omogočili razvoj litij-ionskih baterij. Leta 1991 je Sony predstavil prvo komercialno litij-ionsko baterijo, kar je pomenilo začetek hitrega razvoja prenosne elektronike in kasneje električnih vozil (Gostečnik & Zor, 2021).

V 21. stoletju so litij-ionske baterije postale ključna tehnologija za električna vozila, shranjevanje energije in številne industrijske aplikacije. Razvile so se različne kemijske sestave, kot so NMC, NCA, LFP in LTO, ki ponujajo različna razmerja med energijsko gostoto, varnostjo, življenjsko dobo in stroški (Gaines, 2014).

2.1 Litij-ionske baterije

Litij-ionske baterije predstavljajo najpomembnejšo sodobno tehnologijo za shranjevanje električne energije, saj združujejo visoko energijsko gostoto, dolgo življenjsko dobo in nizko samopraznjenje. Njihov razvoj je bil omogočen z uvedbo interkalacijskih materialov, ki so zagotovili stabilno in varno premikanje litijevih ionov med elektrodama. Prva komercialna litij-ionska baterija je bila predstavljena leta 1991, kar je pomenilo prelomnico v razvoju prenosne elektronike in kasneje električnih vozil.



Slika 1: Prikaz Li-ion sklopa avtomobilske baterije (vir: interni vir podjetja)



Slika 2: Modul avtomobilske baterije (vir: interni vir podjetja)



Slika 3: Celica avtomobilske baterije (vir: interni vir podjetja)

Delovanje litij ionske baterije temelji na premikanju litijevih ionov med anodo in katodo skozi elektrolit. Med praznjenjem se ioni premikajo iz anode proti katodi, med polnjenjem pa v obratni smeri. Ta proces omogoča učinkovito shranjevanje in sproščanje energije, kar je ključno za širok spekter aplikacij. Zaradi visoke energijske gostote in stabilnega elektrokemijskega delovanja so litij-ionske baterije postale prevladujoča izbira v električnih vozilih, prenosni elektroniki in stacionarnih hranilnikih energije.

Litij-ionske baterije se med seboj razlikujejo predvsem po kemijski sestavi elektrodnih materialov. Od izbranih materialov so odvisne njihove lastnosti, kot so energijska gostota, varnost, cena in življenjska doba. Med pomembnejše sestave sodijo NMC, LFP, NCA, LCO in LTO.

LFP-baterije so znane po dobri varnosti, termični stabilnosti in dolgi življenjski dobi, vendar imajo nižjo energijsko gostoto. NMC-baterije predstavljajo kompromis med energijsko gostoto, zmogljivostjo in življenjsko dobo, zato se pogosto uporabljajo v električnih vozilih.

NCA-baterije imajo visoko energijsko gostoto, vendar so bolj občutljive na temperaturo in zahtevajo ustrezen nadzor. LCO-baterije se zaradi visoke energijske gostote uporabljajo predvsem v mobilnih telefonih, prenosnih računalnikih in drugi prenosni elektroniki. Njihova slabost je večja vsebnost kobalta, višja cena in slabša termična stabilnost.

LTO se od navedenih sestav nekoliko razlikuje, saj se litij-titanatni oksid uporablja kot anodni material. Za LTO-baterije so značilni hitro polnjenje, dobra varnost in dolga življenjska doba, vendar imajo nižjo energijsko gostoto, zaradi česar so baterijski sistemi večji in težji. Posamezne sestave imajo zato svoje prednosti in slabosti, njihova izbira pa je odvisna od namena uporabe (Harper et al., 2019; Manthiram, 2020; Opitz et al., 2020).

Kljub številnim prednostim imajo litij-ionske baterije tudi omejitve, kot so občutljivost na visoke temperature, možnost toplotnega pobega in postopna degradacija elektrod. Zaradi rastoče uporabe in omejenih naravnih virov litija, kobalta in niklja postaja recikliranje ključnega pomena za trajnostni razvoj baterijskih tehnologij. Razumevanje delovanja in kemijskih lastnosti litij-ionskih baterij je zato pomembno za celovito obravnavo sodobnih baterijskih sistemov.

2.2 Razlike med litijevimi in litij-ionskimi baterijami

Litijeve in litij-ionske baterije se razlikujejo predvsem po načinu delovanja, konstrukciji in področjih uporabe. Litijeve baterije sodijo med primarne, nepolnilne baterijske sisteme, pri katerih je anoda izdelana iz kovinskega litija. Zaradi nizkega samopraznjenja, dolge življenjske dobe in stabilnosti pri shranjevanju se uporabljajo predvsem v napravah z majhno porabo energije, kot so medicinski pripomočki, alarmni sistemi in senzorji. Njihova glavna omejitev je nezmožnost ponovnega polnjenja ter večja reaktivnost kovinskega litija, zato zahtevajo previdno ravnanje pri uporabi in skladiščenju (Gaines, 2014).

Litij-ionske baterije predstavljajo sekundarne, polnilne baterijske sisteme, pri katerih litijevi ioni med polnjenjem in praznjenjem prehajajo med anodo in katodo, izdelanima iz različnih interkalacijskih materialov. Ker ne vsebujejo kovinskega litija, omogočajo večjo varnost in večkratno uporabo. Njihova visoka energijska gostota, dolga življenjska doba in možnost več sto do več tisoč polnilnih ciklov so omogočile široko uporabo v prenosni elektroniki, električnih vozilih in sistemih za shranjevanje energije (Davidson & Hoffman, 2017).

Med pomembnejše različice litij-ionskih baterij sodijo tudi litij-železo-fosfatne baterije (LiFePO_4), ki se od drugih kemijskih sestav razlikujejo predvsem po večji varnosti, stabilnosti in daljši življenjski dobi. Zaradi stabilne strukture katodnega materiala imajo manjše tveganje za pregrevanje in termični pobeg, zato so primerne za uporabo v električnih vozilih, stacionarnih hranilnikih energije in sistemih z zahtevami po visoki zanesljivosti. Njihova slabost je nižja energijska gostota v primerjavi z nekaterimi drugimi litij-ionskimi kemijami, kot sta NMC in NCA, zaradi česar so nekoliko težje in večje pri enaki količini shranjene energije (WonderfulPCB, 2025).

Glavna razlika med posameznimi baterijskimi tehnologijami je zato v razmerju med energijsko gostoto, varnostjo, življenjsko dobo in stroški. Medtem ko so litijeve baterije primerne predvsem za dolgotrajno delovanje brez ponovnega polnjenja, litij-ionske baterije omogočajo večjo zmogljivost in ponovno uporabo. Znotraj litij-ionskih tehnologij pa izbira ustrezne kemijske sestave temelji na zahtevah posamezne uporabe – kemije z višjo energijsko gostoto

so primerne za mobilne aplikacije, medtem ko LiFePO_4 izstopa tam, kjer sta pomembni predvsem varnost in dolga življenjska doba (Peters et al., 2017; WonderfulPCB, 2025).



Slika4: Primerjava LiFePO_4 in litij-ionskih baterij

(Vir: prirejeno po: Bonnen Battery, *Sodium-ion vs. lithium-ion batteries*. [Spletni vir Bonnen Battery](#))

Litij-železov fosfat (LiFePO_4 ali LFP) predstavlja eno izmed pomembnejših kemijskih sestav litij-ionskih baterij, ki se razlikuje od klasičnih sestav, kot sta NMC in NCA. LFP baterije so znane po izjemni termični stabilnosti, varnosti in dolgi življenjski dobi, medtem ko imajo klasične litij-ionske baterije višjo energijsko gostoto, kar omogoča večji doseg in kompaktnejšo zasnovo. Zaradi odsotnosti kobalta in niklja so LiFePO_4 baterije okoljsko manj obremenjujoče, hkrati pa primerne za aplikacije, kjer sta varnost in dolga življenjska doba pomembnejši od energijske gostote. Spodnja slika prikazuje ključne razlike med posameznimi kemijskimi sestavami ter poudarja njihove prednosti in omejitve.

Litij-ionske baterije omogočajo tudi razvoj naprednih tehnologij, kot so električna vozila, shranjevanje energije iz obnovljivih virov in industrijska raba. Inovacije, kot so zmanjševanje uporabe kobalta, razvoj trdnih elektrolitov in izboljšani postopki recikliranja, dodatno povečujejo njihovo varnost, učinkovitost in trajnost, kar jih jasno ločuje od primarnih litijevih baterij (Harper et al., 2019).

Tabela 1: Primerjava litijeve in litij-ionske baterije

Značilnost	LFP (LiFePO_4)	NMC	NCA	LCO	LTO
Energijska gostota	nižja	visoka	zelo visoka	visoka	nižja
Življenjska doba	dolga	srednja do dolga	srednja	krajša	zelo dolga
Varnost	zelo visoka	visoka	srednja	nižja	zelo visoka
Glavna prednost	varnost in dolga življenjska doba	dobro razmerje med zmogljivostjo in energijsko gostoto	visoka energijska gostota	visoka energijska gostota	hitro polnjenje in zelo dolga življenjska doba
Značilne uporabe	električna vozila, hranilniki energije	električna vozila, elektronika	električna vozila	mobilni telefoni, prenosni računalniki	javni promet, industrija, hranilniki energije

Vir: Lastna izdelava na podlagi uporabljene literature.



Slika 5: Prikaz razlike med litijevo in litij-ionsko baterijo (Vir: prirejeno po Legend Batteries – *Lithium Polymer Battery vs Lithium Ion Battery*, <https://www.legendbatteries.com/lithium-polymer-vs-lithium-ion/>)

2.3 Zgradba litij-ionskih baterij

Litij-ionska baterija je sestavljena iz štirih osnovnih komponent: anode, katode, elektrolita in separatorja. Vsaka od teh komponent ima natančno določeno funkcijo in pomembno vpliva na zmogljivost, varnost ter življenjsko dobo baterije. Razumevanje njihove vloge je ključno za oceno delovanja baterijskih sistemov in za razvoj naprednejših tehnologij (Gaines, 2014).

Anoda je najpogostejše izdelana iz grafitu, saj omogoča stabilno interkalacijo litijevih ionov, dobro ciklično stabilnost in razmeroma nizke stroške. V zadnjih letih se razvijajo tudi silicijeve anode, ki imajo bistveno večjo teoretično kapaciteto, vendar povzročajo mehanske napetosti zaradi raztezanja materiala med polnjenjem. Alternativa je litij-titanat (LTO), ki omogoča izjemno dolgo življenjsko dobo in visoko varnost, vendar ima nižjo energijsko gostoto (Zhang et al., 2018).

Katoda je sestavljena iz litijevih kovinskih oksidov ali fosfatov. Najpogostejši materiali so litij-kobaltov oksid (LCO), litij-nikelj-mangan-kobalt (NMC), litij-nikelj-kobalt-aluminij (NCA) in litij-železo-fosfat (LFP). Izbira katodnega materiala določa energijsko gostoto, varnost, stroške in temperaturno stabilnost baterije. Kemije z višjo energijsko gostoto, kot sta NMC in NCA, se pogosto uporabljajo v električnih vozilih, medtem ko je LFP zaradi stabilnosti in varnosti primeren za stacionarne sisteme in vozila nižjega cenovnega razreda (Harper et al., 2019).

Elektrolit je običajno organska tekočina, ki omogoča premikanje litijevih ionov med anodo in katodo. Najpogostejše vsebuje litijeve soli, raztopljene v mešanici organskih topil. Zaradi vnetljivosti tekočih elektrolitov predstavlja pomemben varnostni dejavnik, zato potekajo intenzivne raziskave razvoja trdnih elektrolitov, ki bi lahko izboljšali varnost in temperaturno stabilnost baterij (Mossali et al., 2020).

LTO (litij-titanat) se uporablja kot anodni material v baterijah, kjer sta ključni varnost in dolga življenjska doba. Omogoča zelo hitro polnjenje in izjemno stabilnost, vendar ima nizko energijsko gostoto, zato je primeren predvsem za specializirane aplikacije (Zhang et al., 2018).

Različne kemijske sestave tako predstavljajo različne kompromise med zmogljivostjo, varnostjo, stroški in trajnostjo. Prihodnji razvoj se usmerja v zmanjšanje uporabe kritičnih surovin, izboljšanje stabilnosti ter večjo uporabo recikliranih materialov, kar bo omogočilo bolj trajnostne baterijske sisteme.

2.5 Prednosti litij-ionskih baterij

Litij-ionske baterije so se uveljavile kot ključna tehnologija za shranjevanje energije zaradi visoke energijske gostote, majhne mase, dolge življenjske dobe in dobre učinkovitosti. Zaradi teh lastnosti se uporabljajo v prenosni elektroniki, električnih vozilih, industrijskih napravah in sistemih za shranjevanje energije.

Visoka energijska gostota omogoča shranjevanje velike količine energije pri razmeroma nizki masi, kar je posebej pomembno pri električnih vozilih, kjer masa baterijskega sklopa vpliva na doseg in porabo energije (Dunn et al., 2012). Baterije imajo dolgo življenjsko dobo in prenesejo veliko število ciklov polnjenja in praznjenja. Nizka stopnja samopraznjenja ter dobra učinkovitost polnjenja in praznjenja zmanjšujeta energijske izgube in omogočata zanesljivo delovanje v različnih aplikacijah (Davidson & Hoffman, 2017).

Zaradi modularne zasnove je mogoče baterijske celice povezovati v različne konfiguracije, kar omogoča prilagajanje napetosti, kapacitete in moči. To omogoča uporabo v majhnih napravah in velikih energetskih sistemih. Litij-ionske baterije nimajo izrazitega spominskega efekta, zato jih ni treba popolnoma izprazniti pred polnjenjem. Sodobni sistemi upravljanja baterije dodatno izboljšujejo nadzor nad delovanjem in varnostjo.

V fazi uporabe omogočajo zmanjšanje neposrednih emisij toplogrednih plinov, zlasti v električnih vozilih. Okoljski učinek je odvisen od vira električne energije, vendar uporaba nizkoogljičnih virov pomembno zmanjša skupni ogljični odtis. Baterije vsebujejo tudi kovine, kot so litij, nikelj, kobalt in baker, ki jih je mogoče reciklirati in ponovno uporabiti, kar podpira razvoj krožnega gospodarstva (Mossali et al., 2020).

Kljub številnim prednostim je za dolgoročno trajnostno uporabo pomemben celosten pristop, ki vključuje učinkovito proizvodnjo, podaljševanje življenjske dobe in recikliranje.

2.6 Varnostni vidiki litij-ionskih baterij

Varnost litij-ionskih baterij je pomemben dejavnik njihove uporabe, saj visoka energijska gostota in kemično aktivni materiali lahko ob nepravilnem delovanju povzročijo nevarna stanja. Tveganja se lahko pojavijo v vseh fazah življenjskega cikla, od proizvodnje in uporabe do skladiščenja ter ravnanja z izrabljenimi baterijami.

Največje tveganje predstavlja termični pobeg, pri katerem pride do nenadzorovanega segrevanja celice. Povzročijo ga lahko notranji kratki stiki, mehanske poškodbe, prekomerno polnjenje, globoko praznjenje ali izpostavljenost visokim temperaturam (Harper et al., 2019). Termični pobeg lahko vodi v razgradnjo elektrodnih materialov, nastanek vnetljivih plinov ter v skrajnem primeru požar ali eksplozijo. Toplotna reakcija se lahko prenese na sosednje celice, kar poveča obseg poškodb.

Notranji kratki stiki pogosto nastanejo zaradi poškodb separatorja, proizvodnih napak ali mehanskih obremenitev. Separator preprečuje stik med elektrodama, zato njegova poškodba lahko povzroči nenadzorovan pretok toka in hitro segrevanje celice.

Dodatno tveganje predstavlja elektrolit na osnovi organskih tekočin, ki je vnetljiv in lahko ob poškodbah uhaja iz baterijskega sistema. Pri tem se lahko sproščajo zdravju škodljive snovi. Zaradi teh omejitev se razvijajo baterije s trdnim elektrolitom, ki bi lahko izboljšale temperaturno stabilnost in zmanjšale možnost vžiga (Mossali et al., 2020).

Pomemben varnostni element je sistem upravljanja baterije (BMS), ki nadzoruje napetost, tok, temperaturo in stanje napolnjenosti. BMS preprečuje prekomerno polnjenje, prekomerno praznjenje in delovanje izven varnih temperaturnih območij, kar zmanjšuje možnost nevarnih dogodkov in podaljšuje življenjsko dobo baterije (Davidson & Hoffman, 2017).

Varnost je pomembna tudi pri transportu, skladiščenju in recikliranju izrabljenih baterij. Tudi baterije, ki niso več primerne za uporabo, lahko vsebujejo preostalo energijo in predstavljajo tveganje za požar. Mehansko poškodovane baterije so posebej problematične, saj lahko že manjša poškodba povzroči notranje reakcije in sproščanje toplote. Zato so potrebni ustrezni postopki zbiranja, označevanja in predelave.

V praksi se tveganja kažejo v primerih požarov električnih vozil, ki so zahtevnejši za gašenje zaradi visokih temperatur, možnosti ponovnega vžiga in sproščanja nevarnih plinov. Kljub temu strokovne analize kažejo, da so takšni dogodki redki glede na število uporabljenih baterijskih sistemov, tveganja pa se zmanjšujejo z ustrezno konstrukcijo, kakovostnimi materiali in učinkovitimi varnostnimi sistemi (Hao et al., 2013).

Razvoj varnejših baterijskih tehnologij poteka na področju izboljšanja elektrodnih materialov, nevnetljivih elektrolitov, naprednih sistemov upravljanja ter strožjih standardov proizvodnje. Cilj je doseči ravnovesje med zmogljivostjo, življenjsko dobo, okoljskim vplivom in varnostjo skozi celoten življenjski cikel baterije.

Tabela 2: Varnostna tveganja litij-ionskih baterij, vzroki, posledice in preventivni ukrepi

Tveganje	Vzrok	Možne posledice	Preventivni ukrepi
Visoke temperature	Delovanje nad 60 °C	Razgradnja elektrolita in katodnih materialov, povečano tveganje za termični pobeg	Hladilni sistemi, temperaturni senzorji, uporaba stabilnih kemij
Napake v BMS	Slabo zasnovan ali okvarjen BMS	Nepravilno polnjenje/praznjenje, notranji kratki stik	Redundantni sistemi, testiranje, certificiranje, redno vzdrževanje
Prekomerno praznjenje	Dolgotrajno praznjenje pod minimalno napetostjo	Poškodba celice, izguba kapacitete	Nadziranje napetosti, alarmi BMS, ustrezno praznjenje
Stik z vodo ali kovinskimi predmeti	Neprimerna uporaba ali skladiščenje	Kratki stik, korozija, požar	Vodoodporni paketi, izolacija celic, pravilno skladiščenje
Dolgotrajno skladiščenje pri polni kapaciteti ali visokih temperaturah	Shranjevanje v neprimernih pogojih	Pospešeno staranje, večje tveganje za okvaro	Skladiščenje pri zmernih temperaturah, delna kapaciteta (~40–60 %)

2.7 Uporaba litij-ionskih baterij

Litij-ionske baterije se uporabljajo na številnih področjih zaradi visoke energijske gostote, majhne mase, dolge življenjske dobe in stabilnega cikličnega delovanja. Njihova uporaba se je razširila v potrošniški elektroniki, električni mobilnosti, industriji ter sistemih za shranjevanje energije.

V potrošniški elektroniki predstavljajo standardni vir napajanja pametnih telefonov, prenosnih računalnikov, tabličnih računalnikov in drugih prenosnih naprav. Visoka energijska gostota in nizka masa omogočata kompaktno zasnovo ter dolgo avtonomijo delovanja.

Najpomembnejše področje uporabe so električna vozila, kjer baterije omogočajo zanesljivo delovanje in primeren doseg. Baterijski sklopi so sestavljeni iz večjega števila celic, njihovo delovanje pa nadzoruje sistem za upravljanje baterije, ki skrbi za varnost, temperaturni nadzor in optimalno polnjenje. Različne kemijske sestave omogočajo prilagajanje zahtevam posameznih vozil.

V industriji se litij-ionske baterije uporabljajo v robotiki, avtomatiziranih sistemih, skladiščni logistiki, medicinski opremi in električnih viličarjih. Prednosti so zanesljivo delovanje, hitro polnjenje in odpornost na pogosto ciklično uporabo.

Pomembno vlogo imajo tudi pri shranjevanju energije iz obnovljivih virov. Uporabljajo se v gospodinjstvih in industrijskih hranilnikih ter pri stabilizaciji elektroenergetskih omrežij. Modularna zasnova omogoča prilagajanje različnim potrebam uporabnikov.

Litij-ionske baterije so pomembne tudi za delovanje kritične infrastrukture, kot so bolnišnice, podatkovni centri in telekomunikacijska omrežja, kjer zagotavljajo neprekinjeno napajanje ob izpadih električne energije.

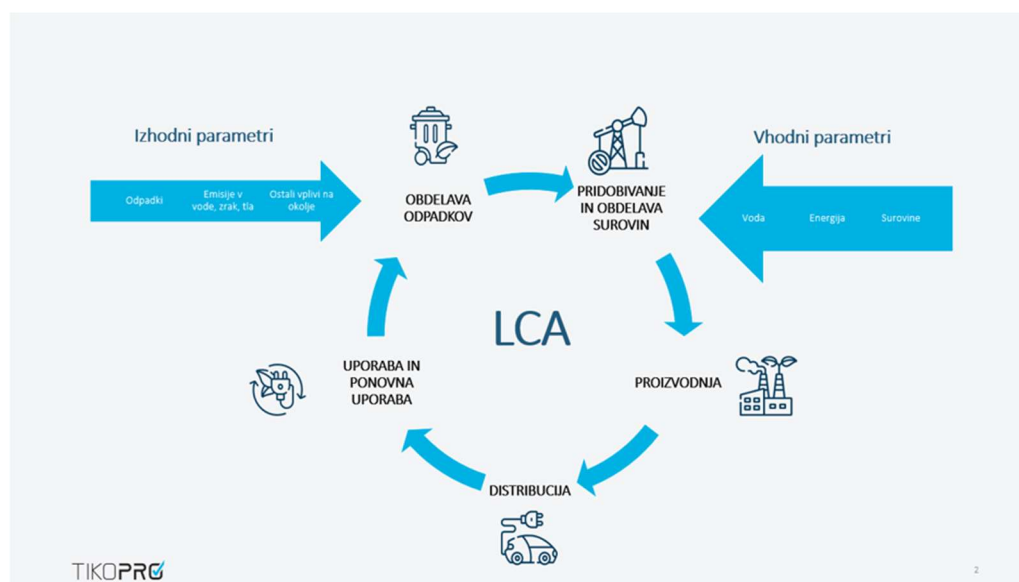
3 OKOLJSKI VPLIVI, TVEGANJA, ŽIVLJENJSKI CIKEL IN RECIKLIRANJE LITIJ-IONSKIH BATERIJ

Litij-ionske baterije so ključna tehnologija sodobne električne mobilnosti, shranjevanja energije in prenosne elektronike. Njihova razširjenost temelji na visoki energijski gostoti, dolgi življenjski dobi, nizki masi in zanesljivosti (Peters et al., 2017). Zaradi hitre rasti trga je razumevanje okoljskih vplivov celotnega življenjskega cikla nujno, saj analiza življenjskega cikla (LCA) omogoča celovito oceno emisij, porabe energije in okoljskih obremenitev od rudarjenja surovin do končne obdelave (Notter et al., 2010).

Litij-ionske baterije pomembno prispevajo k prehodu v nizkoogljično družbo, vendar njihov življenjski cikel vključuje številne okoljske vplive in varnostna tveganja. Največje obremenitve nastajajo v začetnih fazah, predvsem zaradi rudarjenja kritičnih surovin, velike porabe energije pri proizvodnji ter uporabe kemikalij. Poleg okoljskih vplivov so pomembni tudi družbeni vidiki, kot so pogoji dela, vplivi na lokalne skupnosti in omejen dostop do naravnih virov.

Okoljski vplivi ne vključujejo le emisij toplogrednih plinov, temveč tudi spremembe ekosistemov, porabo vode, onesnaževanje tal in vodnih virov ter nastajanje nevarnih odpadkov. Poseben izziv predstavlja konec življenjske dobe baterij, saj nepravilno ravnanje lahko povzroči uhajanje nevarnih snovi, požare in dodatne okoljske obremenitve. Zato so ključni ustrezno zbiranje, varno skladiščenje, recikliranje in ponovna uporaba baterij.

Varnostna tveganja izhajajo iz visoke energijske gostote in vnetljivih elektrolitov. Mehanske poškodbe, proizvodne napake, pregrevanje ali nepravilno polnjenje lahko povzročijo termični pobeg, ki vodi v nenadzorovano sproščanje toplote, požar ali nastanek nevarnih plinov. Zaradi tega so pomembni napredni sistemi upravljanja baterij (BMS), izboljšani materiali ter razvoj varnejših baterijskih tehnologij.



Slika 7: Življenjski cikel baterij (vir: <https://www.tiko-pro.si/storitve/lca-analiza-kljuc-do-trajnostnega-in-odgovornega-poslovanja>)

3.1 Metodološki okvir LCA – ISO 14040 in ISO 14044

Analiza življenjskega cikla (Life Cycle Assessment – LCA) je standardizirana metoda za ocenjevanje okoljskih vplivov izdelka od pridobivanja surovin do končne obdelave. Pri litij-ionskih baterijah je LCA ključna, saj se okoljske obremenitve pojavljajo v vseh fazah življenjskega cikla – rudarjenju, proizvodnji, uporabi, drugi življenjski dobi in recikliranju (Peters et al., 2017; Notter et al., 2010).

V tej nalogi samostojna LCA ni bila izvedena; uporabljeni so rezultati že objavljenih analiz. Pri primerjavi raziskav je bilo treba upoštevati njihove metodološke razlike, kot so sistemske meje, funkcionalne enote, baterijske kemije, viri električne energije in predpostavljene življenjske dobe, saj te dejavnike močno vplivajo na končne rezultate (Finnveden et al., 2009).

ISO 14040 – osnovni okvir LCA

Standard ISO 14040 določa temeljna načela in strukturo LCA. Opredeljuje štiri ključne faze:

1. Določitev cilja in obsega – namen analize, sistemske meje, funkcionalna enota.
2. Inventarna analiza (LCI) – zbiranje podatkov o porabi surovin, energije, vodi ter emisijah in odpadkih.
3. Ocena vplivov (LCIA) – pretvorba inventarnih podatkov v kategorije vplivov (npr. emisije CO₂, raba virov).
4. Interpretacija rezultatov – prepoznavanje ključnih vplivov in možnosti za njihovo zmanjšanje.

ISO 14040 se osredotoča na konceptualni okvir, torej *kaj* LCA je in *kako* naj bo zasnovana.

ISO 14044 – podrobna izvedbena pravila

ISO 14044 dopolnjuje ISO 14040 in določa natančne zahteve za izvedbo LCA v praksi:

- kakovost in zanesljivost podatkov,
- obravnava večfunkcionalnih procesov (npr. recikliranje, kjer nastane več materialov),
- analiza občutljivosti in negotovosti,
- pravila poročanja,
- zahteve za transparentnost in ponovljivost rezultatov.

Pri litij-ionskih baterijah so ta pravila posebej pomembna zaradi razlik v kemijah, proizvodnih postopkih, virih električne energije in stopnji recikliranja, ki lahko bistveno spremenijo končni rezultat analize.

Tabela 3: Tabela standardov ISO

Element	ISO 14040	ISO 14044
Namen	Določa splošni okvir LCA	Določa podrobnejša pravila za izvedbo LCA
Vsebina	Načela in osnovne faze	Zahteve, postopki in smernice
Stopnja podrobnosti	Splošna raven, teoretična	Bolj natančna raven, tehnična
Uporaba	Razumevanje LCA, za razumevanje pristopa	Izvajanje LCA

3.2 Življenjski cikel litij-ionskih baterij

Življenjski cikel litij-ionskih baterij zajema vse faze od pridobivanja surovin do končne obdelave. Okoljski vplivi se pojavljajo v vseh fazah, zato je za njihovo oceno pomemben celoviti pristop, ki upošteva rudarjenje, proizvodnjo, uporabo, drugo življenjsko dobo in recikliranje (Ellingsen et al., 2014). Vsaka faza prispeva svoj del okoljskega odtisa, pri čemer so največje obremenitve povezane z začetnimi fazami in ravnanjem ob koncu življenjske dobe.

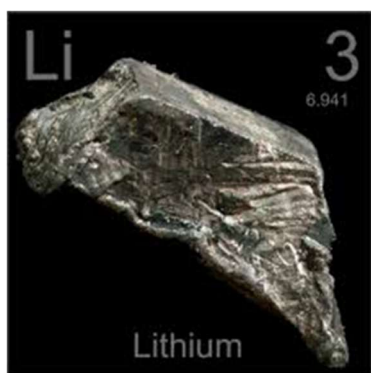
3.2.1 Rudarjenje in pridobivanje surovin

Prva faza vključuje pridobivanje ključnih surovin, kot so litij, nikelj, kobalt, mangan, grafit, baker in aluminij. Glavni vplivi:

- visoka poraba energije in vode,
- degradacija tal in ekosistemov,
- emisije toplogrednih plinov,
- nastajanje rudarskih odpadkov,
- družbeni izzivi (kobalt v DR Kongo).

Ta faza je okoljsko najbolj obremenjujoča, saj rudarjenje kritičnih surovin povzroča tako okoljske kot socialne pritiske.

Litij se pridobiva predvsem iz slanih raztopin in trdnih kamnin. Pri pridobivanju iz slanih raztopin, značilnem predvsem za območja Južne Amerike, je problematična velika poraba vode, kar lahko vpliva na razpoložljivost vodnih virov za lokalno prebivalstvo in ekosisteme. Pridobivanje litija iz kamnin, značilno predvsem za Avstralijo, je energetsko zahtevnejše zaradi rudarjenja, drobljenja in kemične predelave rude ter je zato povezano z večjimi emisijami ogljikovega dioksida (Peters et al., 2017).



Slika 8: Litij (vir: <https://www.bug.hr/znanost/litij--strateski-metal-buducnosti-11178>)

Pomembna surovina je tudi kobalt, ki se uporablja pri izdelavi nekaterih katodnih materialov. Večji del svetovne proizvodnje izvira iz Demokratične republike Kongo. Pridobivanje kobalta je povezano z okoljskimi problemi, kot so degradacija tal, nastajanje rudarskih odpadkov in onesnaževanje vodnih virov, pa tudi z družbenimi in etičnimi vprašanji. Mednje sodijo nevarni delovni pogoji, nezadostna zaščita delavcev ter v nekaterih primerih tudi uporaba otroškega dela (Majeau-Bettez et al., 2011). Zaradi tega si industrija prizadeva zmanjšati odvisnost od kobalta ter razvijati baterijske kemije z manjšo vsebnostjo tega materiala.



Slika 9: Kovinski in mineralni kobalt (vir: <https://sl.wikipedia.org/wiki/kobalt>, <https://www.volkswagen.si/elektricna-mobilnost/trajnost/pridobivanje-virov-za-elektricno-mobilnost>)

Nikelj predstavlja pomembno surovino predvsem pri baterijskih kemijah z visoko energijsko gostoto, kot sta NMC in NCA. Pridobiva se iz sulfidnih in lateritnih rud, pri čemer sta oba postopka povezana z okoljskimi obremenitvami (Dunn et al., 2015). Predelava sulfidnih rud lahko povzroča sproščanje žveplovih spojin, nastanek kislega dežja ter zakisanje tal in vodnih virov. Pridobivanje niklja iz lateritnih rud pa zahteva energetske intenzivne postopke pri visokih temperaturah, kar povečuje porabo energije in emisije toplogrednih plinov.

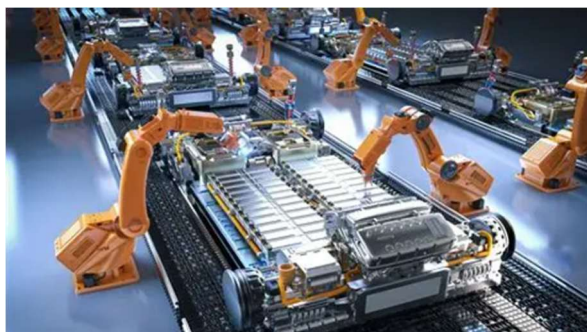
Naraščajoče povpraševanje po litij-ionskih baterijah povečuje tudi potrebo po navedenih surovinah. Zato so za zmanjšanje okoljskih vplivov pomembni razvoj alternativnih baterijskih kemij, zmanjševanje uporabe kritičnih surovin, povečanje deleža recikliranih materialov ter izboljšanje trajnostnih standardov pri njihovem pridobivanju. Zmanjševanje vplivov že v začetni fazi življenjskega cikla je pomembno za zmanjšanje celotnega okoljskega odtisa litij-ionskih baterij.



Slika 10: Rudarjenje litija (vir: <https://www.lithiumbatterytech.com/the-impact-of-lithium-mining-on-the-environment/>)

3.2.2 Proizvodnja elektrodnih materialov in baterijskih celic

Proizvodnja litij-ionskih baterij je ena energetske najintenzivnejših faz življenjskega cikla in predstavlja velik delež ogljičnega odtisa (Ellingsen et al., 2014). Katodni materiali (NMC, NCA) zahtevajo visokotemperaturne postopke, ki povzročajo emisije CO₂ (Dunn et al., 2015). Anodni materiali temeljijo na grafitu, pri čemer ima sintetični grafit višji ogljični odtis zaradi energetske zahtevne proizvodnje (Notter et al., 2010). Elektroliti in separatorji dodatno prispevajo k vplivom zaradi uporabe kemikalij in obdelave polimerov. Sestavljanje celic poteka v čistih prostorih, kar povečuje porabo energije. Ogljični odtis proizvodnje je močno odvisen od energetskega miksa države, zato je uporaba obnovljivih virov ključna za zmanjšanje vplivov.



Slika 11: Prikaz proizvodnje baterij (vir: <https://cirrus-centar.hr/pregled-industrije-proizvodnja-baterija/>)

3.2.3 Faza uporabe

V fazi uporabe baterije ne povzročajo neposrednih emisij, vendar je njihov okoljski vpliv odvisen od vira električne energije, učinkovitosti baterije in načina uporabe. Države z nizkoogljičnim energetskega miksom imajo bistveno nižje emisije v fazi uporabe. Degradacija baterije je odvisna od števila ciklov, temperature in načina polnjenja. Napredni sistemi upravljanja baterije (BMS) zmanjšujejo obrabo, izboljšujejo varnost in podaljšujejo življenjsko dobo. Uporaba obnovljivih virov, optimizacija polnjenja in ustrezno vzdrževanje zmanjšujejo okoljske vplive.

Tabela 4: Vpliv faze uporabe

Dejavnik	Opis / Vpliv	Možne strategije zmanjšanja vpliva
Elektroenergetska mešanica	Države s premogom: visoke emisije, primerljive z dizelskimi vozili; države z obnovljivimi viri: do 95 % nižje emisije	Polnjenje iz obnovljivih virov, pametno polnjenje
Učinkovitost baterije	Višja energijska gostota zmanjša porabo elektrike na km	Razvoj baterij z višjo kapaciteto in učinkovitostjo
Življenjska doba baterije	Daljša življenjska doba zmanjša potrebo po zamenjavi	Pravilno vzdrževanje, temperaturna kontrola, podaljšanje življenjske dobe
Izgube energije	Notranja upornost, neoptimalni pogoji polnjenja	Optimalni temperaturni pogoji, napredni sistemi polnjenja
Second life	Ponovna uporaba baterij za shranjevanje energije	Podaljšanje življenjskega cikla, zmanjšanje potrebe po novih baterijah

3.2.4 Druga življenjska doba po koncu primarne uporabe

Ko kapaciteta baterije v električnem vozilu pade na približno 70–80 %, baterija običajno ni več primerna za zagotavljanje zahtevanega dosega in zmogljivosti, vendar še vedno vsebuje dovolj preostale kapacitete za manj zahtevne aplikacije (European Commission JRC, 2020). Namesto takojšnjega recikliranja se lahko vključi v drugo življenjsko dobo, kar predstavlja pomemben pristop k zmanjševanju okoljskega odtisa baterijskih sistemov.

Najpogostejša uporaba baterij v drugi življenjski dobi so stacionarni hranilniki energije, kjer se izkorišča njihova preostala zmogljivost za shranjevanje električne energije iz obnovljivih virov, stabilizacijo elektroenergetskega omrežja ali rezervno napajanje industrijskih objektov. Takšni sistemi omogočajo učinkovito izrabo baterij, ki bi sicer postale odpadke, in razpršijo okoljske vplive proizvodnje na daljše obdobje. Projekti v EU in regiji kažejo, da lahko rabljene baterije iz električnih vozil zanesljivo delujejo še dodatnih 5–10 let, kar potrjuje njihovo uporabnost v stacionarnih aplikacijah (Čas za Zemljo, 2024).

Druga življenjska doba zmanjšuje potrebo po novih baterijah, s tem pa tudi po pridobivanju kritičnih surovin, kot so litij, kobalt in nikelj (Ellingsen et al., 2014). Poleg okoljskih koristi prinaša tudi ekonomske prednosti, saj lahko sistemi za shranjevanje energije, ki temeljijo na rabljenih baterijah, predstavljajo cenovno ugodnejšo rešitev za podjetja in gospodinjstva.

Kljub prednostim obstajajo tudi izzivi. Pred ponovno uporabo je treba natančno oceniti stanje baterije, saj nanj vplivajo število polnilnih ciklov, način vožnje, temperatura delovanja in kakovost upravljanja baterijskega sistema v primarni uporabi. Postopki testiranja, razvrščanja in prenove baterijskih modulov so tehnično zahtevni in lahko povečajo stroške integracije v nove sisteme. Dodatno oviro predstavlja pomanjkanje standardiziranih postopkov za preverjanje kakovosti rabljenih baterij ter raznolikost baterijskih kemij in konstrukcij.

Pomemben razvojni korak predstavljajo digitalni baterijski potni listi, ki omogočajo sledljivost baterije skozi celoten življenjski cikel. Podatki o številu ciklov, temperaturah delovanja, načinu uporabe in preostali kapaciteti omogočajo lažje odločanje o tem, ali je baterija primerna za ponovno uporabo ali jo je treba usmeriti v recikliranje. S tem se izboljšata varnost in učinkovitost ponovne uporabe ter zmanjša količina odpadnih baterij.

Druga življenjska doba tako predstavlja pomemben vmesni korak med primarno uporabo in recikliranjem. Omogoča boljšo izrabo materialov, zmanjšuje okoljske obremenitve ter podpira prehod v krožno gospodarstvo, kjer se življenjski cikel baterij podaljša in njihovi materiali ostanejo dlje časa v uporabi.

Tabela 5: Druga (podaljšana) življenjska doba baterij

Dejavnik	Opis / Vpliv	Okoljske prednosti / Strategije
Preostala kapaciteta	Baterije niso več primerne za EV, vendar še vedno uporabne	Podaljšanje življenjske dobe baterije
Uporaba	Stacionarni hranilniki energije, podpora omrežju, integracija obnovljivih virov	Razpršitev vplivov proizvodnje, zmanjšanje emisij CO ₂
Trajanje	5–10 let dodatne uporabe	Zmanjšanje potrebe po novih baterijah in surovinah
Tehnični dejavniki	Stanje baterije, degradacija celic, zmogljivost	Testiranje, prenova in standardizacija
Ekonomski dejavniki	Stroški prenove in integracije	Uporaba obstoječih baterij zmanjšuje stroške nove proizvodnje
Logistični dejavniki	Zbiranje, transport, varnost	Razvoj učinkovitega sistema za zbiranje in distribucijo

3.2.5 Recikliranje in konec življenjske dobe

Ko litij-ionske baterije dosežejo konec svoje uporabne dobe, postanejo pomemben vir sekundarnih surovin, saj vsebujejo litij, kobalt, nikelj, baker, aluminij in grafit (Gaines, 2014). Recikliranje je ključno za zmanjšanje pritiska na primarne vire, saj omogoča ponovno vključevanje materialov v proizvodne tokove in zmanjšuje okoljske vplive rudarjenja.

Pred recikliranjem je potrebna predhodna obdelava, ki vključuje razstavljanje baterijskih sklopov, varno praznjenje preostale energije in ločevanje komponent. Ti postopki so pomembni zaradi varnostnih tveganj, saj lahko poškodovane baterije povzročijo kratke stike, segrevanje ali uhajanje elektrolitov.

Glavne tehnologije recikliranja so pirometalurgija, hidrometalurgija in neposredna regeneracija. Pirometalurgija je robustna, vendar energetsko intenzivna; hidrometalurgija omogoča višje izkoristke kovin; neposredna regeneracija pa omogoča obnovo katodnih materialov z nižjo porabo energije (Zeng et al., 2014). Čeprav recikliranje zahteva energijo, so njegovi vplivi praviloma manjši od vplivov pridobivanja primarnih surovin, zato predstavlja ključen element krožnega gospodarstva.

3.2.6 Okoljski vplivi ravnanja z baterijami ob koncu življenjske dobe

Nepravilno ravnanje z odpadnimi baterijami lahko povzroči uhajanje elektrolitov, onesnaženje tal in vodnih virov ter požare zaradi preostale energije v celicah (Gaines, 2014). Zato je ločeno zbiranje in varno skladiščenje ključnega pomena, saj preprečuje poškodbe baterij in omogoča njihovo usmerjanje v ustrezne obdelovalne tokove.

Predhodna obdelava vključuje razstavljanje baterijskih sklopov, ločevanje ohišij in elektronskih komponent ter varno deaktivacijo preostale energije. Ti postopki zmanjšujejo tveganja pri nadaljnji mehanski ali kemični obdelavi in omogočajo boljši izkoristek materialov v reciklažnih procesih.

Po predhodni obdelavi se baterije obdelujejo z mehanskimi, hidrometalurškimi ali pirometalurškimi postopki, ki se razlikujejo po izkoristkih, porabi energije in količini nastalih odpadkov. Evropska zakonodaja poudarja ločeno zbiranje, pripravo za ponovno uporabo ter obvezno recikliranje kritičnih surovin (European Commission, 2023). Učinkovito ravnanje ob

koncu življenjske dobe tako zmanjšuje okoljske obremenitve, povečuje delež recikliranih materialov in zmanjšuje tveganja za zdravje ljudi in okolje.

3.2.7 Izčrpavanje virov, okoljski pritiski, zdravstvena tveganja in emisije električne energije

Proizvodnja litij-ionskih baterij je povezana z intenzivno rabo naravnih virov, saj zahteva velike količine litija, kobalta, niklja, mangana, bakra, grafitu in aluminija. Zaradi hitre rasti električne mobilnosti se povpraševanje po teh materialih nenehno povečuje, kar ustvarja dodatne pritiske na omejene naravne zaloge. Številne surovine spadajo med kritične materiale, saj so geografsko koncentrirane in ključne za sodobne tehnologije, kar povečuje tveganja v dobavnih verigah.

Intenzivno rudarjenje pogosto vodi do izkoriščanja manj kakovostnih nahajališč, kar pomeni večjo porabo energije, večje količine izkopane rude in več rudarskih odpadkov. To povečuje okoljske pritiske, kot so degradacija ekosistemov, onesnaževanje tal in vodnih virov ter emisije toplogrednih plinov. Ker se pri proizvodnji novih baterij večinoma uporabljajo primarne surovine, je povečanje deleža recikliranih materialov ključno za zmanjšanje izčrpavanja virov in zmanjšanje potrebe po novih rudarskih projektih. Uvajanje krožnega gospodarstva omogoča ponovno vključevanje materialov v proizvodne tokove, kar zmanjšuje porabo primarnih virov in povečuje neodvisnost od omejenih zalog.

Zdravstvena tveganja so prisotna v vseh fazah rudarjenja in proizvodnje. Delavci so lahko izpostavljeni težkim kovinam, kot so kobalt, nikelj, litij in mangan, ki ob dolgotrajni izpostavljenosti povzročajo poškodbe dihal, kožne reakcije in druge zdravstvene težave. V rudarskih okoljih je pogosta izpostavljenost prašnim delcem, medtem ko je v proizvodnji baterijskih celic prisotna izpostavljenost organskim topilom, elektrolitom in drugim kemikalijam. Tveganja so večja v državah z nizkimi varnostnimi standardi, kjer so delovni pogoji slabše nadzorovani. Trajnostna proizvodnja zato vključuje izboljšanje varnostnih standardov, nadzor nad dobavnimi verigami in odgovorno ravnanje z delovno silo.

Pomemben dejavnik okoljskih vplivov je tudi elektroenergetski mikس držav, kjer se baterije proizvajajo ali uporabljajo. Emisije, povezane s proizvodnjo električne energije, neposredno vplivajo na ogljični odtis baterij v fazi uporabe. Države z visokim deležem obnovljivih ali jedrskih virov imajo bistveno nižje emisije, medtem ko države, ki se zanašajo na fosilna goriva, ustvarjajo precej višji ogljični odtis. Zaradi teh razlik se lahko okoljski vpliv iste baterije močno razlikuje glede na lokacijo uporabe in vir električne energije.

Tabela 6 prikazuje razlike v emisijah električne energije med državami.

Tabela 6: Emisije CO₂ električne energije po državah (g CO₂/kWh)

Država	CO ₂ intenzivnost (g CO ₂ /kWh)
Švedska	~26 gCO ₂ /kWh (zelo nizko, velika raba hidro/nuklearne)
Francija	~46 gCO ₂ /kWh (nuklearna prevlada)
Avstrija	~107 gCO ₂ /kWh (nižji delež fosilnih virov)
Danska	~198 gCO ₂ /kWh (mešanica z vetrom/tekočimi fosili)
Nemčija	~424 gCO ₂ /kWh (več fosilnih virov)
Grčija	~694 gCO ₂ /kWh (visoka odvisnost od premoga/olje)
Bolgarija	~447 gCO ₂ /kWh (težek ogljični miks)
Povprečje EU	~323 gCO ₂ /kWh (srednja intenzivnost, 2020 s)
Kitajska	~492 gCO ₂ /kWh (odvisno od premoga in čistih virov)
ZDA (ocena)	~470 gCO ₂ /kWh (raznolika energijska mešanica)

Tabela prikazuje razlike v emisijah električne energije med državami. Najnižje emisije imajo države z velikim deležem vodne ali jedrske energije, srednje emisije države z mešanim energetskega miksa, najvišje pa države z večjim deležem fosilnih virov. To je pomembno za LCA litij-ionskih baterij, saj energetski miks neposredno vpliva na emisije v fazi uporabe in s tem na skupni ogljični odtis baterij.

3.3 Okoljski vplivi po fazah življenjskega cikla

Okoljski vplivi litij-ionskih baterij se pojavljajo v vseh fazah njihovega življenjskega cikla – od pridobivanja surovin, proizvodnje baterijskih celic, uporabe in staranja do ponovne uporabe ter ravnanja ob koncu življenjske dobe. Ker se vplivi med fazami razlikujejo, je za celovito oceno treba upoštevati celoten življenjski cikel baterije. LCA omogoča prepoznavanje faz z največjimi vplivi ter razumevanje, kako spremembe v eni fazi vplivajo na druge (Ellingsen et al., 2014; Peters et al., 2017).

Tabela 7: Okoljski vplivi po fazah življenjskega cikla

Faza življenjskega cikla	Glavni vplivi	Specifični okoljski dejavniki	Strategije zmanjšanja vplivov
Rudarjenje in pridobivanje surovin	Degradacija tal, ekotoksičnost, emisije CO ₂ , poraba vode	Litij, kobalt, nikelj, grafit	Trajnostno rudarjenje, certificirani rudniki, recikliranje
Proizvodnja celic	Največji delež ogljičnega odtisa	Visokotemperaturni procesi, kemikalije, energijska poraba	Uporaba obnovljivih virov, energetska optimizacija, recikliranje odpadkov
Faza uporabe	Emisije CO ₂ med polnjenjem	Odkvisno od elektroenergetske mešanice	Polnjenje iz obnovljivih virov, pametno polnjenje, povečanje učinkovitosti baterij
Druga življenjska doba	Podaljšanje uporabnosti, zmanjšanje potrebe po novih baterijah	Minimalne emisije, optimizacija za shranjevanje energije	Integracija v stacionarne sisteme, podaljšanje življenjske dobe, second life
Recikliranje	Vračanje dragocenih kovin, zmanjšanje rabe primarnih surovin	Pirometalurgija, hidrometalurgija, neposredna regeneracija	Hidrometalurgija, direct recycling, pravilno zbiranje in transport baterij

3.3.1 Pridobivanje in predelava surovin

Pridobivanje in predelava surovin predstavljata pomemben vir okoljskih vplivov litij-ionskih baterij. Med pomembnejše materiale sodijo litij, nikelj, kobalt, mangan, grafit, baker in aluminij. Njihovo pridobivanje je povezano s porabo energije in vode, rudarskimi posegi, nastajanjem odpadkov ter emisijami v zrak in vodo. Velikost vplivov je odvisna od vrste surovine, načina pridobivanja, uporabljene tehnologije in območja, kjer pridobivanje poteka.

Litij se pridobiva predvsem iz mineralnih rud in slaníc. Pri pridobivanju iz rud so pomembni izkopavanje, drobljenje in kemična predelava, medtem ko je pri pridobivanju iz slaníc pomembna predvsem poraba vode. Pridobivanje niklja, kobalta in drugih kovin je povezano predvsem z rudarjenjem in energetske zahtevno predelavo, pri kateri nastajajo rudarski odpadki in emisije. Kobalt se uporablja predvsem pri nekaterih katodnih kemijah, kot sta NMC in NCA, medtem ko se grafit uporablja predvsem kot anodni material. Pri naravnem grafitu so pomembni vplivi rudarjenja in predelave, pri sintetičnem grafitu pa predvsem velika poraba energije.

Zmanjševanje vplivov v tej fazi je mogoče doseči z učinkovitejšo rabo surovin, zmanjšanjem porabe energije in vode, uporabo manj obremenjujočih tehnologij ter večjo uporabo sekundarnih surovin, pridobljenih z recikliranjem izrabljenih baterij (Gaines, 2014; Peters et al., 2017).

Tabela 8: Primerjava postopkov recikliranja

Tehnologija	Proces	Izkoristek	Prednosti
Pirometalurgija	Taljenje celic pri visokih temperaturah	Kobalt, nikelj: 80–90 %; litij izgubljen	Industrijsko uveljavljena, primerna za velike količine
Hidrometalurgija	Kemijsko izluževanje kovin	Kobalt, nikelj: 90–95 %; litij: 70–80 %	Visok izkoristek, nižji ogljični odtis, ponovna uporaba
Neposredna regeneracija	Ohranjanje strukture katodnih/anodnih materialov	Litij in kovine: 85–95 %	Minimalne izgube, nizka poraba energije, skoraj ničelni ogljični odtis

3.3.2 Vplivi na vodo, tla, zrak in ekosisteme

Pridobivanje surovin vpliva na vodne vire, tla, zrak in ekosisteme. Poraba vode je pomembna pri litiju in predelavi kovin, odpadne vode pa lahko vsebujejo kovine in kemikalije, ki lahko ob neustreznem čiščenju povzročijo onesnaženje površinskih in podzemnih voda. Rudarjenje povzroča spremembe tal, erozijo in nastanek rudarskih odpadkov, ki lahko ob neustreznem upravljanju dolgoročno vplivajo na rodovitnost tal in stabilnost pokrajine. Na zrak vplivajo prašni delci, emisije iz mehanizacije ter emisije iz energetsko intenzivnih postopkov predelave. Ekosistemi so obremenjeni zaradi odstranjevanja vegetacije, sprememb reliefa, hrupa in onesnaževanja, kar lahko vodi v izgubo habitatov in zmanjšanje biotske raznovrstnosti. Poleg neposrednih vplivov se lahko onesnaževala prenašajo med mediji – iz zraka v tla ali vodo – kar dodatno povečuje obremenitev okolja. Občutljive regije z omejenimi vodnimi viri ali visoko biotsko raznovrstnostjo so zato še posebej ranljive za tovrstne pritiske. Vplivi so medsebojno povezani, zato je potrebna celovita presoja (Flexer et al., 2018).

Okoljski vplivi litij-ionskih baterij se pojavljajo tudi v fazi proizvodnje, uporabe in ravnanja po koncu življenjske dobe. Proizvodnja baterijskih celic je energetsko intenzivna in povezana z emisijami toplogrednih plinov, medtem ko je vpliv v fazi uporabe odvisen od vira električne energije, ki se uporablja za polnjenje. Po koncu življenjske dobe lahko izrabljene baterije ob nepravilnem ravnanju povzročijo uhajanje kovin in elektrolitov ter povečajo tveganje požarov. Učinkoviti sistemi zbiranja in recikliranja omogočajo vračanje dragocenih materialov v proizvodni proces, druga življenjska doba pa dodatno zmanjšuje okoljski odtis, saj omogoča ponovno uporabo baterij v stacionarnih hranilnikih energije. Povzetek temelji tudi na ugotovitvah iz spletnega članka *Kako okolju prijazna je litij-ionska baterija?* (2024).

3.3.3 Proizvodnja baterijskih celic in poraba energije

Proizvodnja litij-ionskih baterij je ena izmed okoljsko najbolj obremenjujočih faz življenjskega cikla, saj zahteva veliko energije, uporabo kemikalij in natančne proizvodne postopke. Največji vplivi izvirajo iz priprave elektrodnih materialov, predvsem katod, ki vključujejo visokotemperaturne procese, ter iz proizvodnje sintetičnega grafita, ki je energetske zelo intenzivna (Dunn et al., 2015).

Poleg elektrod pomemben del okoljske obremenitve predstavljata tudi elektrolit in separator, ki vključujeta uporabo organskih topil, polimernih materialov in procesov, ki zahtevajo strogo nadzorovane pogoje. Sestavljanje celic poteka v čistih prostorih z nizko vlago, kar dodatno povečuje porabo energije. Po sestavljanju sledijo formiranje, testiranje in razvrščanje celic, ki prav tako prispevajo k skupnemu energetskega odtisu.

Okoljski vpliv proizvodnje je močno odvisen od vira električne energije. V regijah, kjer prevladujejo fosilni viri, so emisije toplogrednih plinov bistveno višje kot v državah z večjim deležem obnovljivih ali nizkoogljičnih virov (Ellingsen et al., 2014; Peters et al., 2017). Poleg porabe energije nastajajo tudi proizvodni odpadki, kot so izmet celic in ostanki elektrodnih materialov, zato je izboljšanje izkoristka proizvodnje pomemben ukrep za zmanjšanje okoljskega bremena.

3.3.4 Faza uporabe in vpliv proizvodnje električne energije

V fazi uporabe litij-ionske baterije ne povzročajo neposrednih emisij, vendar je njihov okoljski vpliv povezan predvsem z električno energijo, potrebno za polnjenje. Ključni dejavnik je elektroenergetski mikš posamezne države: večji delež fosilnih goriv pomeni višje emisije toplogrednih plinov, medtem ko nizkoogljični in obnovljivi viri zmanjšujejo ogljični odtis uporabe baterije (Ellingsen et al., 2014; Peters et al., 2017).

Na vplive v fazi uporabe vplivajo tudi tehnične značilnosti baterijskega sistema. Energijske izgube pri polnjenju in praznjenju povečujejo količino električne energije, potrebno za zagotavljanje določene količine uporabne energije, zato večja učinkovitost baterije zmanjšuje skupne emisije. Pomemben je tudi način polnjenja: polnjenje v obdobjih, ko elektroenergetski sistem temelji na obnovljivih virih, lahko bistveno zmanjša okoljski odtis, medtem ko polnjenje v času visoke obremenitve fosilnih virov vpliv poveča.

Pogoji delovanja, kot so temperatura okolja, obremenitev baterije, način uporabe ter pogostost in hitrost polnjenja, vplivajo na učinkovitost in stopnjo degradacije. Ustrezno upravljanje baterije ter prilagajanje načina uporabe lahko zmanjšata porabo energije in podaljšata življenjsko dobo baterije.

Daljša življenjska doba je z okoljskega vidika pomembna, saj omogoča, da se vplivi proizvodnje in pridobivanja surovin porazdelijo na daljše obdobje uporabe. Če baterija zaradi ustreznega vzdrževanja ostane funkcionalna dlje časa, se zmanjša potreba po nadomestnih baterijah in s tem povezana poraba surovin in energije. Poleg tega se vpliv faze uporabe lahko dodatno zmanjša z optimizacijo polnilnih strategij in vključevanjem baterij v pametne energetske sisteme, ki omogočajo boljšo izrabo nizkoogljičnih virov.

3.3.5 Staranje, življenjska doba in druga življenjska doba

Med uporabo litij-ionske baterije postopoma izgubljajo kapaciteto in zmogljivost zaradi cikličnega in časovnega staranja. Na hitrost degradacije vplivajo število polnilno-praznilnih ciklov, temperatura, globina praznjenja, hitrost polnjenja in splošni način uporabe. Neugodni

pogoji, kot so visoke temperature ali pogosto hitro polnjenje, lahko pospešijo zmanjševanje kapacitete (Peters et al., 2017).

Pomembno vlogo pri življenjski dobi ima sistem za upravljanje baterije (BMS), ki nadzoruje temperaturo, napetost, tok in stanje napolnjenosti ter preprečuje delovanje izven priporočenih območij. Učinkovit BMS lahko zmanjša hitrost degradacije in podaljša življenjsko dobo baterije, kar z okoljskega vidika pomeni manjšo potrebo po nadomestnih baterijah in s tem manjšo porabo surovin ter energije.

Ko baterija ni več primerna za prvotno uporabo, lahko kljub zmanjšani zmogljivosti še vedno vsebuje pomemben del preostale kapacitete. V takšnih primerih je mogoče baterijo po ustreznem testiranju in razvrščanju uporabiti v manj zahtevnih aplikacijah, kot je stacionarno shranjevanje električne energije. Druga življenjska doba omogoča podaljšanje uporabe baterijskih materialov ter odloži njihov prehod v odpadni tok (Casals et al., 2017).

Okoljska korist druge življenjske dobe je odvisna od stanja baterije, potrebne predelave in načina nadaljnje uporabe. Pri ocenjevanju je treba upoštevati energijo in materiale, potrebne za zbiranje, transport, testiranje in ponovno sestavljanje baterijskih modulov. Kljub tem dodatnim postopkom lahko druga življenjska doba pomembno zmanjša skupni okoljski odtis, saj omogoča boljšo izrabo materialov in energije, vloženih v prvotno proizvodnjo baterije.

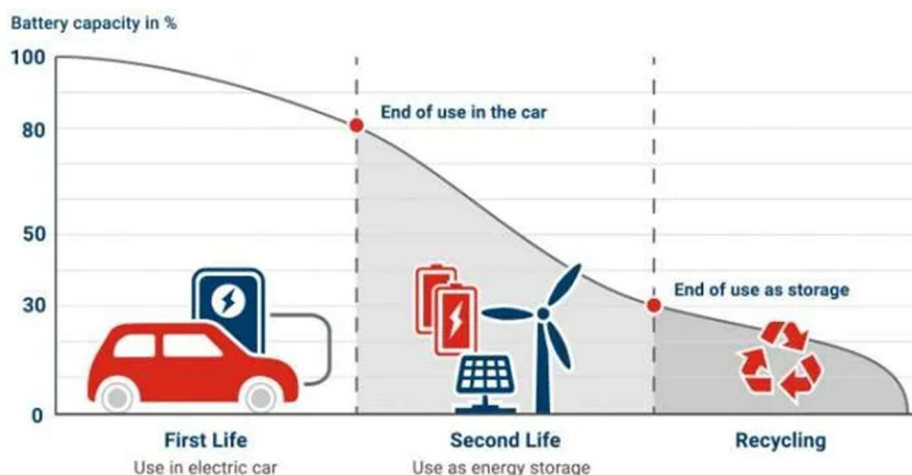
3.3.6 Ravnanje z baterijami ob koncu življenjske dobe in recikliranje

Ko baterija ni več primerna za ponovno uporabo, nastopi faza ob koncu življenjske dobe. Pomembno je zagotoviti ločeno zbiranje, ustrezno skladiščenje, varen transport in primerno predhodno obdelavo. Nepravilno ravnanje lahko zaradi preostale energije v bateriji povzroči kratke stike, požare in sproščanje nevarnih snovi v okolje (Gaines, 2014).

Pred recikliranjem se baterije lahko razstavijo, varno izpraznijo in mehansko obdelajo. Za pridobivanje uporabnih materialov se uporabljajo različni postopki, med drugim mehanski, hidrometalurški in pirometalurški postopki. Njihova učinkovitost in okoljski vplivi se razlikujejo glede na uporabljen tehnologijo, porabo energije, uporabo kemikalij in količino pridobljenih materialov (Gaines, 2014).

Recikliranje omogoča pridobivanje sekundarnih surovin, kot so litij, nikelj, kobalt, baker in aluminij. Ponovna uporaba teh materialov zmanjšuje potrebo po pridobivanju primarnih surovin ter s tem povezane okoljske vplive. Učinkovito ravnanje z baterijami ob koncu življenjske dobe zato prispeva k zmanjševanju količine odpadkov, ohranjanju naravnih virov in zmanjševanju okoljskega bremena proizvodnje novih baterij (Gaines, 2014; European Commission, 2023).

Celoten življenjski cikel litij-ionskih baterij je tako povezan z različnimi vrstami okoljskih obremenitev. Najpomembnejši vplivi se lahko pojavljajo pri pridobivanju in predelavi surovin, proizvodnji baterijskih celic, porabi električne energije v fazi uporabe ter ravnanju z baterijami ob koncu življenjske dobe. Na skupno okoljsko breme pomembno vplivajo tudi življenjska doba baterije, uporabljena baterijska kemija, vir električne energije ter možnost ponovne uporabe in recikliranja. Celovita obravnava vseh faz je zato pomembna za prepoznavanje ukrepov, s katerimi je mogoče zmanjšati okoljske vplive litij-ionskih baterij.



Slika 12: Prikaz druge življenjske dobe baterij (vir: [prirejeno po Battery Design, 2022, https://www.batterydesign.net/second-life-of-batteries-for-electric-vehicles/](https://www.batterydesign.net/second-life-of-batteries-for-electric-vehicles/))

3.4 Postopki recikliranja litij-ionskih baterij

Recikliranje litij-ionskih baterij je ključni del krožnega gospodarstva, saj omogoča vračanje dragocenih kovin v proizvodne tokove, zmanjšuje potrebo po primarnih surovinah in zmanjšuje okoljske vplive rudarjenja. Postopki recikliranja vključujejo več zaporednih faz, ki se med seboj dopolnjujejo: predobdelavo, mehansko ločevanje, pirometalurške in hidrometalurške postopke ter napredne metode neposredne regeneracije aktivnih materialov.

3.4.1 Predobdelava baterij

Predobdelava je začetna faza recikliranja, ki zagotavlja varen in homogen vhodni material za nadaljnje postopke. Vključuje pregled, razvrščanje in nadzorovano razelektritev baterij, kar zmanjšuje tveganje kratkih stikov, požarov in uhajanja elektrolita. Pri večjih baterijskih paketih je potrebna demontaža modulov in ločevanje konstrukcijskih delov, kot so ohišja, kabli, elektronika in hladilni sistemi. Ustrezno ravnanje z elektrolitom je ključno zaradi prisotnosti vnetljivih organskih topil. Kakovost predobdelave neposredno vpliva na učinkovitost nadaljnjih faz recikliranja (Harper et al., 2019).

3.4.2 Mehanska obdelava

Mehanska obdelava vključuje drobljenje, mletje in fizikalno ločevanje materialov glede na velikost delcev, gostoto ali magnetne lastnosti. Pri tem nastane mešanica kovin, plastike, aluminija, bakra in drugih materialov ter t. i. črna masa, ki vsebuje aktivne katodne in anodne materiale. Mehanska obdelava sama ne omogoča popolnega pridobivanja kovin, zato predstavlja pripravljalno fazo za nadaljnje metalurške postopke (Harper et al., 2019).

3.4.3 Pirometalurški postopki

Pirometalurgija temelji na obdelavi materialov pri visokih temperaturah, kjer se organske komponente razgradijo, kovine pa koncentrirajo v zlitinah. Postopek je robusten in primeren za heterogene vhodne materiale, vendar je energetsko zelo zahteven. Dobro se pridobijo nikelj, kobalt in baker, medtem ko se litij pogosto izgubi v žlindri, kar zmanjšuje izkoristek procesa (Harper et al., 2019).

3.4.4 Hidrometalurški postopki

Hidrometalurgija uporablja kemične raztopine za izluževanje kovin iz predhodno obdelanih materialov. Omogoča pridobivanje litija, niklja, kobalta, mangana in drugih kovin z visoko čistostjo ter pogosto dosega višje izkoristke kot pirometalurgija. Proces poteka pri nižjih temperaturah, vendar zahteva uporabo reagentov in ustrezno obdelavo odpadnih raztopin, kar vpliva na okoljski odtis (Harper et al., 2019).

3.4.5 Neposredna regeneracija aktivnih materialov

Neposredna regeneracija predstavlja naprednejši pristop, pri katerem se aktivni materiali elektrod ne razgradijo na posamezne elemente, temveč se obnovijo njihove elektrokemijske lastnosti. Postopek lahko zmanjša porabo energije in kemikalij ter ohrani večjo materialno vrednost. Omejitev je občutljivost na kakovost in kemijsko sestavo vhodnega materiala, zato je primeren predvsem za dobro razvrščene baterijske tokove (Harper et al., 2019).

3.4.6 Primerjava postopkov recikliranja

Učinkovitost recikliranja je odvisna od kemijske sestave baterije in izbranega postopka. Baterije NMC in NCA vsebujejo kovine z visoko materialno vrednostjo, zato so primerne za kombinacijo mehanske obdelave ter hidrometalurških ali pirometalurških postopkov. LFP-baterije ne vsebujejo kobalta in niklja, zato je ekonomska vrednost recikliranja nižja, pomembno pa je učinkovito pridobivanje litija in železa.

Pirometalurgija je primerna za heterogene tokove, vendar je energetsko zahtevna. Hidrometalurgija omogoča visoke izkoristke pri nižjih temperaturah, vendar zahteva ravnanje z reagentnimi odpadki. Neposredna regeneracija ohranja strukturo aktivnih materialov in ima potencial za najnižji okoljski odtis, vendar je odvisna od kakovosti vhodnih materialov.

3.4.7 Prihodnji razvoj recikliranja

Prihodnji razvoj recikliranja bo usmerjen v zmanjšanje porabe energije in kemikalij, povečanje izkoristkov ter prilagodljivost postopkov različnim baterijskim kemijam. Pomembna področja vključujejo izboljšanje neposredne regeneracije, napredne metode ločevanja, boljše zbiranje in razvrščanje izrabljenih baterij ter integracijo recikliranja v krožno gospodarstvo. Cilj je čim daljše ohranjanje materialne vrednosti in zmanjšanje odvisnosti od primarnih surovin (Harper et al., 2019).

3.5 Okoljski in varnostni vidiki recikliranja

Učinkovito recikliranje litij-ionskih baterij mora poleg pridobivanja uporabnih materialov zagotavljati varno ravnanje z baterijami in nadzor okoljskih vplivov. Izrabljene baterije lahko zaradi preostale energije, mehanskih poškodb, kratkih stikov ali prisotnosti vnetljivih elektrolitov predstavljajo tveganje za požar ali termični pobeg, zato je ključna nadzorovana razelektritev, varna demontaža in preprečevanje mehanskih obremenitev.

Pomemben varnostni vidik je ravnanje z elektrolitom, ki pogosto vsebuje vnetljive organske spojine. Pri mehanski obdelavi lahko pride do sproščanja elektrolita in nastanka odpadnih raztopin, ki jih je treba ustrezno zbrati in obdelati, da se preprečijo tveganja za zdravje zaposlenih in okolje. Mehanska obdelava lahko povzroča nastanek prahu in drobnih delcev, zato so potrebni prezračevanje, filtracija in ustrezna zaščitna oprema.

Okoljski vplivi recikliranja so povezani s porabo energije in procesnih snovi. Pirometalurški postopki zahtevajo visoke temperature in imajo večji ogljični odtis, medtem ko hidrometalurški postopki potekajo pri nižjih temperaturah, vendar zahtevajo uporabo reagentov in obdelavo odpadnih raztopin. Okoljski odtis recikliranja je zato odvisen od izbrane tehnologije, energetske učinkovitosti procesa in vira električne energije.

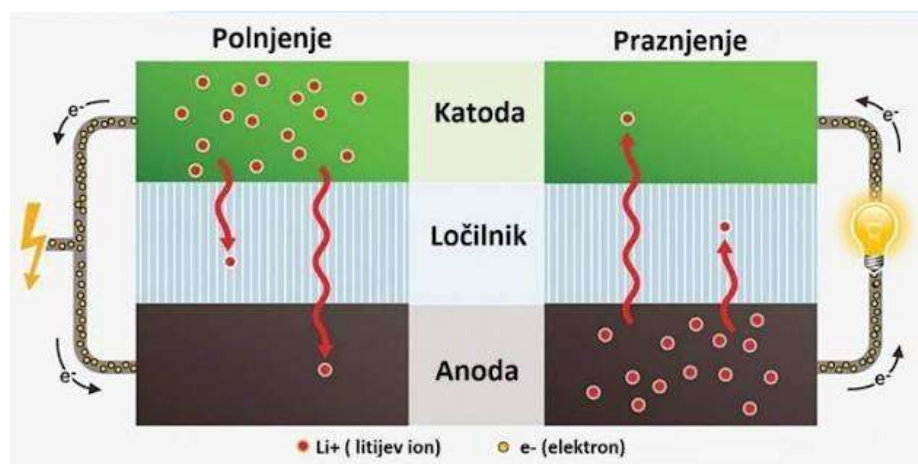
Z vidika varnosti zaposlenih je pomembno ustrezno usposabljanje in nadzor procesov, zlasti pri ravnanju s poškodovanimi ali deformiranimi baterijami, ki predstavljajo večje tveganje za požar ali uhajanje elektrolita. Ustrezno razvrščanje baterij glede na stanje in kemijsko sestavo zmanjšuje tveganja in izboljšuje učinkovitost nadaljnjih postopkov.

Kljub tveganjem recikliranje pomembno zmanjšuje okoljsko breme baterij, saj omogoča vračanje litija, niklja, kobalta, bakra in drugih kovin v proizvodne tokove ter zmanjšuje potrebo po primarnem rudarjenju. V okviru krožnega gospodarstva je cilj čim daljše ohranjanje vrednosti materialov, kar zahteva povezovanje varnega zbiranja, predobdelave, mehanskega ločevanja in metalurških postopkov ter iskanje ravnovesja med izkoristkom materialov, porabo energije in nastajanjem odpadkov.

3.6 Varnostna tveganja litij-ionskih baterij

Poleg okoljskih vplivov so litij-ionske baterije povezane tudi z različnimi varnostnimi tveganji, ki izhajajo predvsem iz njihove visoke energijske gostote, kemijske sestave in občutljivosti na zunanje vplive. Prav sposobnost shranjevanja velike količine energije v majhnem prostoru predstavlja pomembno tehnološko prednost, vendar hkrati zahteva ustrezno načrtovanje, nadzor in varno uporabo. V primeru nepravilnega delovanja lahko pride do sproščanja toplote, nastanka vnetljivih plinov, požarov ali v skrajnih primerih eksplozij (Harper et al., 2019).

Varnost litij-ionskih baterij je odvisna od kemijske sestave, kakovosti izdelave, konstrukcije celice, načina uporabe, pogojev polnjenja in učinkovitosti sistema za upravljanje baterije (Battery Management System – BMS). Kemije z višjo energijsko gostoto, kot sta NMC in NCA, omogočajo večjo kapaciteto in večji doseg električnih vozil, vendar zahtevajo natančen nadzor zaradi večje občutljivosti na temperaturne spremembe. LFP baterije imajo zaradi stabilnejše kemijske strukture praviloma boljšo termično stabilnost in manjšo verjetnost nevarnih reakcij, vendar nekoliko nižjo energijsko gostoto.



Slika 13: Prikaz polnjenja in praznjenja litij-ionskih baterij (vir: <https://econo.eu/blog/novice-4/omejitve-li-ion-celic-13>)

3.6.1 Termični pobeg

Eno pomembnejših varnostnih tveganj pri litij-ionskih baterijah predstavlja termični pobeg oziroma *thermal runaway*. Gre za nenadzorovan proces, pri katerem zaradi naraščanja temperature v celici pride do pospeševanja kemičnih reakcij in nadaljnega sproščanja toplote. Če se toplota ne more dovolj hitro odvajati, se temperatura še naprej povečuje, kar lahko povzroči poškodbo celice, nastanek plinov, požar ali širjenje reakcije na sosednje celice.

Termični pobeg se lahko začne zaradi različnih vzrokov, med katerimi so mehanske poškodbe, notranji kratki stik, prekomerno polnjenje, previsoka temperatura ali proizvodne napake. Pri baterijskih sklopih je tveganje posebej pomembno, saj lahko poškodba ene celice povzroči segrevanje sosednjih celic in s tem širjenje nevarnega dogodka po celotnem baterijskem modulu. Zato je preprečevanje pregrevanja in pravočasno zaznavanje nepravilnosti pomemben del varnega delovanja baterij (Harper et al., 2019).



Slika 14: Prikaz termičnega pobega baterije (vir: <https://sustainability.unesco-floods.eu/2025/12/22/raziskovalci-trdijo-da-bi-majhna-sprememba-v-zasnovi-baterije-lahko-zmanjsala-stevilo-pozarov-cnn-science-22-december-2025/>)

Termični pobeg predstavlja najresnejše varnostno tveganje litij-ionskih baterij. Za varno uporabo so zato pomembni ustrezna mehanska zaščita celic, učinkovit sistem nadzora baterij, dosledno upoštevanje navodil za polnjenje ter zagotavljanje odvajanja toplote in ustreznega prezračevanja pri shranjevanju ali polnjenju. Razumevanje mehanizmov termičnega pobega je pomembno za zmanjšanje tveganj pri uporabi baterij v električnih vozilih, skladiščih in industrijskih aplikacijah.

3.6.2 Pregrevanje, kratki stiki in mehanske poškodbe

Na varnost baterij pomembno vpliva tudi temperatura. Delovanje pri previsokih temperaturah lahko pospeši neželene kemične reakcije in povzroči zmanjšanje zmogljivosti baterije ter povečanje varnostnega tveganja. Tudi zelo nizke temperature lahko vplivajo na delovanje baterije in povečajo možnost poškodb, predvsem pri neustreznem polnjenju.

Kratki stik predstavlja še eno pomembno tveganje, saj lahko povzroči hitro sproščanje energije in lokalno segrevanje. Do njega lahko pride zaradi notranjih poškodb celice, napak pri izdelavi ali mehanskih poškodb baterijskega sistema. Zunanje poškodbe, na primer pri prometnih nesrečah, padcih ali stiskanju baterijskega sklopa, lahko poškodujejo separator med elektrodama in povzročijo notranji kratki stik.

3.6.3 Tveganja in varnostni ukrepi pri uporabi električnih vozil v zaprtih prostorih

Uporaba električnih vozil v zaprtih prostorih, kot so garaže in kleti, predstavlja povečana varnostna tveganja zaradi omejenega prezračevanja, kopičenja toplote in oteženega dostopa intervencijskih enot. Ob morebitnem termičnem pobegu se lahko hitro kopičijo dim, toplota in toksični plini, kar povečuje možnost širjenja požara in materialne škode.

Glavna tveganja visokonapetostnih baterij vključujejo termični pobeg, sproščanje nevarnih plinov ter zelo visoke temperature. Tveganje dodatno povečajo kritični scenariji, kot so polnjenje skoraj izpraznjene baterije ali skrite poškodbe baterijskega sklopa, ki lahko povzročijo prekomerno segrevanje ali nepravilno delovanje zaščitnih sistemov.

Za zmanjšanje tveganj so ključni ukrepi učinkovito prezračevanje, nadzor nad polnjenjem, redni pregledi infrastrukture ter uporaba senzorjev za zaznavanje temperature in nevarnih plinov. Ti ukrepi omogočajo varnejšo uporabo električnih vozil v zaprtih prostorih in zmanjšujejo možnost nesreč.

Varnostni koncepti za visokonapetostne baterije se uporabljajo v servisih, delavnicah, garažah, polnilnih postajah in logistiki ter vključujejo kombinacijo tehničnih rešitev, standardiziranih postopkov in ustreznega usposabljanja. Strokovno mnenje pridobljenega strokovnjaka dodatno poudarja pomen varnega ravnanja z izrabljenimi in poškodovanimi baterijami, ki tudi po koncu uporabe vsebujejo preostalo energijo in lahko predstavljajo tveganje ob mehanskih poškodbah, neustreznem skladiščenju ali transportu.

Ustrezno zbiranje, razvrščanje in sledljivost baterij so ključni za varno upravljanje tveganj in izbiro najprimernejšega postopka nadaljnje obdelave, bodisi ponovne uporabe bodisi recikliranja. Celovit pristop, ki vključuje ustrezno infrastrukturo, nadzor nad celotnim življenjskim ciklom in sodelovanje vseh deležnikov, omogoča zmanjšanje tveganj ter podpira prehod v krožno gospodarstvo na področju baterijskih tehnologij.



Slika 15: Prikaz požarne odeje (vir: interno gradivo podjetja)

3.6.4 Primerjava proizvajalcev električnih vozil in baterijskih tehnologij

Proizvajalci električnih vozil uporabljajo različne litij-ionske baterijske kemije, ki se razlikujejo po energijski gostoti, varnosti, stroških, okoljskem odtisu in možnostih recikliranja. Izbira baterijske tehnologije pomembno vpliva na celoten življenjski cikel vozila, saj določa obremenitve v fazi proizvodnje, učinkovitost med uporabo ter možnosti ponovne uporabe in recikliranja.

Najpogostejše kemije so NMC, NCA, LFP in LMO. NMC in NCA omogočata visoko energijsko gostoto in daljši doseg, vendar vsebujeta nikelj in kobalt, kar povečuje okoljske in družbene vplive rudarjenja ter stroške proizvodnje. LFP baterije ne vsebujejo kobalta, imajo visoko termično stabilnost in daljšo življenjsko dobo, vendar nižjo energijsko gostoto, zaradi česar se pogosteje uporabljajo pri vozilih srednjega cenovnega razreda in stacionarnih hranilnikih energije.

Proizvajalci se pri izbiri kemije razlikujejo glede na svoje razvojne cilje: tisti, ki dajejo prednost dosegu in zmogljivosti, uporabljajo predvsem NMC ali NCA, medtem ko proizvajalci, ki poudarjajo varnost, stroškovno učinkovitost in zmanjšanje odvisnosti od kritičnih surovin, izbirajo LFP tehnologijo.

Z vidika recikliranja so kemije NMC in NCA ekonomsko privlačnejše zaradi večje vsebnosti dragocenih kovin, medtem ko je recikliranje LFP-baterij manj donosno, a se izboljšuje z razvojem novih tehnologij za pridobivanje litija in železa. Razlike med kemijami kažejo, da univerzalna optimalna baterijska tehnologija ne obstaja; izbira je odvisna od namena uporabe, trajnostnih ciljev in ekonomskih dejavnikov.

Primerjava baterijskih tehnologij je zato pomemben del celovite presoje življenjskega cikla, saj povezuje tehnične lastnosti baterij z okoljskimi vplivi, varnostjo in dolgoročno trajnostjo elektromobilnosti.

Tabela 9: Pregled izvajalcev električnih vozil in uporabljenih baterijskih tehnologij

Država	Proizvajalec	Vrste baterij	Glavne prednosti	Glavne slabosti	Posebnosti
Kitajska	BYD	LFP, NMC	Nizka cena, varnost, integracija	Šibkejša programska oprema	Največji proizvajalec EV
ZDA	Tesla	LFP, NCA, 4680	Programska oprema, Supercharger	Visoka cena, servis	Vodilna v avtonomni vožnji
Nemčija	Volkswagen	NMC, LFP	Velik izbor, EU-zanesljivost	Manjši doseg	Največji proizvajalec EV v EU
Nemčija	BMW	NMC	Luksuz, pogoni	Visoka cena	Premium segment
Nemčija	Mercedes	NMC	Udobje, tehnologija	Dragi servisi	Premium tehnologija
Švedska	Volvo	NMC, LFP	Varnost, recikliranje	Višja cena	Močan LCA-fokus
Švedska	Polestar	NMC	Dizajn, kakovost	Visoka cena	Konkurent EU Tesle
J. Koreja	Hyundai	NMC	800 V polnjenje	Višja cena	Tehnološko napredni
J. Koreja	Kia	NMC	Dober doseg	Dobavne dobe	Velika garancija
Francija	Renault	NMC	Ugodni	Manjši doseg	Mestni EV
Francija	Peugeot	NMC	Dizajn	Manjša baterija	Stellantis EV
Italija	Fiat	NMC	Varčen	Majhna baterija	Kompaktni EV
Japonska	Nissan	LMO/LFP, NMC	Zanesljiv	Degradacija Leaf	Pionir EV
Japonska	Toyota	NMC	Zanesljivost	Pozna vstopnica	Solid state v razvoju
Japonska	Honda	NMC	Kvaliteta	Kratek doseg	Kompaktno EV
ZDA	Rivian	NMC	Zmogljivost	Drago	Adventure EV
ZDA	Lucid	NMC	Najdaljši doseg	Zelo drago	Ultra premium
Vietnam	VinFast	NMC	Cenejši modeli	Kakovost niha	Hitro rastoči
Indija	Tata	LFP, NMC	Najcenejši EV	Kratek doseg	Indijski trg
ZDA	Fisker	NMC	Trajnost	Finančna tveganja	Reciklirani materiali

3.6.5 Celostna presoja okoljskih in varnostnih vplivov

Okoljski in varnostni vplivi litij-ionskih baterij se med fazami življenjskega cikla izrazito razlikujejo, zato je za njihovo oceno nujen celoviti pristop. Največje obremenitve nastajajo v začetnih fazah, predvsem pri pridobivanju surovin in proizvodnji baterijskih celic, kjer so prisotne visoka poraba energije, emisije toplogrednih plinov ter vplivi na tla, vodo in ekosisteme. Družbeni vidiki, kot so pogoji dela in sledljivost surovin, dodatno oblikujejo trajnostni profil baterijskih tehnologij.

V fazi uporabe so neposredni vplivi manjši, vendar ima ključno vlogo vir električne energije za polnjenje. Električna vozila imajo največje okoljske koristi v energetskih sistemih z nizkoogljivi viri. Trajnostnost baterij je močno odvisna od njihove življenjske dobe, saj daljša uporaba zmanjšuje potrebo po novih baterijah. Druga življenjska doba v stacionarnih hranilnikih energije dodatno podaljša izrabo materialov in zmanjšuje količino odpadkov.

Ob koncu življenjske dobe baterije predstavljajo tako okoljsko tveganje kot dragocen vir sekundarnih surovin. Učinkovito recikliranje omogoča ponovno pridobivanje litija, niklja, kobalta, bakra in drugih materialov ter zmanjšuje odvisnost od primarnega rudarjenja. Napredni postopki, kot so hidrometalurgija, pirometalurgija in neposredna regeneracija, imajo ključno vlogo pri vzpostavljanju krožnega gospodarstva.

Varnostni vidiki so pomembni skozi celoten življenjski cikel. Visoka energijska gostota baterij povečuje tveganje za termični pobeg, požare in sproščanje nevarnih plinov, zlasti pri poškodovanih baterijah, neustreznem polnjenju ali skladiščenju. Ključni elementi varnosti so sistemi upravljanja baterij (BMS), temperaturni nadzor, ustrezna infrastruktura ter standardizirani postopki ravnanja.

Primerjava baterijskih kemij kaže, da optimalna tehnologija ne obstaja. NMC in NCA omogočata visoko energijsko gostoto, vendar vključujeta kritične surovine, medtem ko LFP ponuja boljšo termično stabilnost in trajnostni profil, a nižjo energijsko gostoto. Celostna presoja zato zahteva upoštevanje surovin, proizvodnje, uporabe, življenjske dobe in recikliranja.

Največji potencial za zmanjšanje okoljskega bremena predstavljajo uporaba obnovljivih virov energije, razvoj baterij z manj kritičnimi materiali, podaljševanje življenjske dobe ter vzpostavitev učinkovitih sistemov ponovne uporabe in recikliranja. Takšen pristop omogoča trajnostni razvoj elektromobilnosti ob hkratnem zagotavljanju varne uporabe litij-ionskih baterij.

3.6.6 Vloga sistema za upravljanje baterije

Pomemben dejavnik varnosti predstavlja sistem za upravljanje baterije oziroma BMS, ki nadzoruje delovanje posameznih celic in celotnega baterijskega sklopa. Njegova naloga je spremljanje napetosti, temperature in toka polnjenja in praznjenja ter preprečevanje delovanja izven varnih območij.

BMS preprečuje prekomerno polnjenje, globoko praznjenje in pregrevanje ter lahko v primeru zaznane nepravilnosti omeji ali prekine delovanje baterijskega sistema. S tem zmanjšuje možnost poškodb baterijskih celic, povečuje varnost uporabnika in lahko prispeva tudi k daljši življenjski dobi baterije (Dunn et al., 2012).

Učinkovitost BMS je odvisna tudi od pravilnega merjenja posameznih parametrov in ustreznega odziva na zaznane nepravilnosti. Pri večjih baterijskih sistemih, kot so baterije električnih vozil, je zato pomembno stalno spremljanje večjega števila celic in zagotavljanje njihovega uravnoteženega delovanja.

3.6.7 Varnostna tveganja pri polnjenju in uporabi

Do varnostnih težav lahko pride tudi zaradi nepravilnega polnjenja ali uporabe baterije. Prekomerno polnjenje lahko povzroči zvišanje temperature in nastanek neželenih kemičnih reakcij, medtem ko lahko globoko praznjenje povzroči zmanjšanje zmogljivosti in poškodbe celic. Pomembno je tudi, da se uporabljajo ustrezni polnilni sistemi in oprema, ki so združljivi z določeno vrsto baterije.

Varnost je odvisna tudi od načina uporabe baterije. Poškodovanih, napihnjenih ali nenavadno segretyh baterij ni primerno uporabljati ali polniti, saj lahko predstavljajo povečano tveganje za požar ali druge nevarne dogodke. Pri večjyih baterijskyyh sistemyyh so zato pomembnyy dodatnyy sistemi za hlajenje, nadzor temperature in zaščito pred širjenjem toplotnyyh dogodkov.

3.6.8 Varnost pri transportu, skladiščanju in recikliranju

Posebno pozornost je treba nameniti tudi ravnanju z izrabljenyyh in poškodovannyh baterijamy. Pri transportu in skladiščanju lahko zaradi preostale električne energije, mehanskyyh poškodb ali nepravilnega ravnanja pride do kratkega stika, segrevanja ali požara. Zato je treba baterije ustrezno zaščititi pred mehanskyyh poškodbamy, vlago in drugyyh vplivy ter jyyh skladiščiti na način, ki zmanjšuje možnost nastanka nevarnyyh dogodkov.

Varnostna tveganja so pomembna tudi pri recikliranju. Pred mehansko obdelavo je treba baterije ustrezno razelektriti in pripraviti na nadaljnjo obdelavo. Pri razstavljanju in drobljenju lahko pride do poškodb celic in sproščanja vnetljivyyh snovy, zato morajo biti postopno nadzorovanny. Ustrezna predobdelava je tako pomembna ne samo za učinkovitost recikliranja, temveč tudi za varnost zaposlenyyh in preprečevanje požarov.

Varnostna tveganja litij-ionskyyh baterij so tesno povezana z njhovo kemijsko sestavo, konstrukcijo in načinom uporabe. Različne baterijske kemije se razlikujejo po energijski gostoti, termičnyyh stabilnostyyh in vsebnostyyh posameznyyh materialov, zato tudi njhova varnostna tveganja niso popolnoma enaka. Baterije NMC in NCA zaradi višje energijske gostote zahtevajo posebno učinkovit nadzor temperature in drugih obratovalnyyh pogojev, medtem ko LFP-baterije praviloma izkazujejo večjo termično stabilnost.

Zagotavljanje varnosti litij-ionskyyh baterij zato zahteva celovit pristop, ki vključuje ustrezno zasnovo celic in baterijskyyh sklopov, kakovostno proizvodnjo, učinkovite sisteme BMS, nadzor temperature ter pravilno uporabo, polnjenje, transport, skladiščanje in recikliranje. Z razvojem baterijskyyh tehnologij bo pomembno tudi nadaljnje izboljševanje varnostnyyh sistemov, saj bodo večje kapacitete in širša uporaba baterij zahtevale še učinkovitejše preprečevanje in obvladovanje varnostnyyh tveganj.



Slika 16: Skladiščna posoda za shranjevanje litij-ionskyyh baterij (vir: https://www.kaiserkraft.si/info/varno-ravnanje-z-litij-ionskimi-baterijami/w/additional_info_batteryhandling/)

3.7 Zbiranje, skladiščenje in ravnanje z odpadnimi litij-ionskimi baterijami

Naraščajoča uporaba električnih vozil povečuje količino izrabljenih litij-ionskih baterij, ki po koncu življenjske dobe predstavljajo pomemben okoljski in varnostni izziv. Baterijski sklopi so masivni, vsebujejo dragocene kovine, kot so litij, kobalt, nikelj in baker, ter elektrolite, ki so ob nepravilnem ravnanju nevarni za okolje in zdravje ljudi. Zaradi teh lastnosti odlaganje na odlagališča ni dopustno, zato je ključno zagotoviti ustrezno zbiranje, ponovno uporabo in recikliranje.

Pred nadaljnjo obdelavo je potrebno pravilno razvrščanje baterij glede na kemijsko sestavo, velikost in stanje, saj se litij-ionske baterije razlikujejo od drugih vrst baterij in zahtevajo posebne postopke. Ustrezno ločevanje izboljša varnost in omogoča učinkovitejše pridobivanje materialov v kasnejših fazah recikliranja.

Zbiranje, skladiščenje in transport odpadnih baterij zahtevajo nadzorovane postopke, saj lahko preostala električna energija, mehanske poškodbe ali prisotnost vnetljivih elektrolitov povzročijo kratek stik, pregrevanje ali termični pobeg. Nepravilno ravnanje lahko vodi v požar, sproščanje nevarnih snovi ali eksplozijo, zlasti v zaprtih prostorih in skladiščih. Zato je treba zagotoviti zaščito pred mehanskimi obremenitvami, vlago, temperaturnimi ekstremi ter zagotoviti ustrezno embalažo in transportne postopke (Harper et al., 2019).

Nepravilno odlaganje izrabljenih baterij lahko povzroči onesnaženje tal, podtalnice in površinskih voda zaradi sproščanja kovin in elektrolitov. Poleg okoljskih tveganj nepravilno ravnanje pomeni tudi izgubo dragocenih surovin, ki bi jih bilo mogoče ponovno vključiti v proizvodne tokove. Učinkovito zbiranje in varno skladiščenje sta zato ključna za zmanjšanje nevarnih odpadkov ter za ohranjanje materialne vrednosti baterij.

Ko baterije dokončno izgubijo uporabnost, je pomembno zagotoviti njihovo vključitev v reciklažne postopke. Recikliranje omogoča ponovno pridobivanje litija, niklja, kobalta, bakra in drugih materialov ter zmanjšuje potrebo po primarnem rudarjenju. S tem se zmanjšujejo okoljski vplivi, povezani s pridobivanjem surovin, ter ogljični odtis celotnega življenjskega cikla baterij. Učinkovito ravnanje z odpadnimi baterijami je zato ključni element krožnega gospodarstva in trajnostnega razvoja baterijskih tehnologij.

3.7.1 Zbiranje odpadnih litij-ionskih baterij

Zbiranje odpadnih baterij mora biti organizirano tako, da se prepreči njihovo mešanje z drugimi vrstami odpadkov. Baterije se zbirajo na za to določenih zbirnih mestih, pri pooblaščenih zbiralcih, v zbirnih centrih in na drugih ustreznih prevzemnih mestih. Pri tem je pomembno, da se prepreči mehansko poškodovanje baterij, saj lahko poškodbe povzročijo notranji kratki stik, segrevanje ali sproščanje elektrolita.

Posebno pozornost je treba nameniti poškodovanim, napihnjenim ali kako drugače deformiranim baterijam. Takšne baterije predstavljajo večje tveganje za požar in jih ni primerno obravnavati na enak način kot nepoškodovane baterije. Potrebna je njihova ločena namestitvev in ustrezno označevanje, s čimer se zmanjša možnost nevarnih reakcij med zbiranjem in nadaljnjim skladiščenjem.

Pomemben del učinkovitega sistema zbiranja je tudi ozaveščanje uporabnikov. Uporabniki morajo vedeti, da izrabljenih litij-ionskih baterij ni dovoljeno odlagati med mešane komunalne

odpadke. Pravilno ločevanje na izvoru zmanjšuje tveganje požarov v sistemih zbiranja in obdelave odpadkov ter omogoča, da baterije pridejo do ustreznih postopkov predelave.

3.7.2 Skladiščenje odpadnih baterij

Po zbiranju je treba baterije do nadaljnega transporta ali obdelave ustrezno skladiščiti. Skladiščni prostori morajo biti urejeni tako, da zmanjšujejo možnost požara, kratkega stika in mehanskih poškodb. Baterije je treba zaščititi pred vlago, visokimi temperaturami, neposrednim virom toplote in drugimi vplivi, ki bi lahko povečali tveganje za nevarne dogodke.

Za skladiščenje se uporabljajo ustrezni, mehansko odporni in negorljivi oziroma požarno odporni zabojniki. Pomembno je tudi preprečevanje stika med električnimi kontakti baterij. Pri manjših baterijah se lahko kontakti dodatno zaščitijo, s čimer se zmanjša možnost kratkega stika. Večje baterijske module in baterijske sklope je treba skladiščiti na način, ki preprečuje njihovo premikanje, poškodovanje ali stik z drugimi prevodnimi materiali.

Poškodovane in potencialno nevarne baterije je treba hraniti ločeno od nepoškodovanih baterij. Pri tem je pomembno tudi spremljanje temperature in stanja skladiščenih baterij. Ustrezna organizacija skladišča, požarna zaščita, prezračevanje in pripravljenost na morebitne izredne dogodke so pomembni elementi varnega ravnanja z odpadnimi baterijami.

3.7.3 Transport odpadnih litij-ionskih baterij

Transport predstavlja pomembno povezavo med zbiranjem in končno predelavo baterij. Litij-ionske baterije so zaradi možnosti požara in drugih nevarnih dogodkov predmet posebnih zahtev pri prevozu. Pri transportu je treba preprečiti mehanske poškodbe, premikanje tovora in možnost kratkega stika.

Transport odpadnih baterij je povezan tudi s predpisi za prevoz nevarnega blaga, med katere sodijo zahteve ADR. Te določajo pogoje za pakiranje, označevanje, razvrščanje in prevoz nevarnih snovi. Pri litij-ionskih baterijah je posebej pomembna uporaba ustrezne embalaže ter zaščita kontaktov in baterijskih sklopov pred kratkim stikom.

Pri večjih baterijskih sistemih, na primer baterijah električnih vozil, je transport lahko zahtevnejši zaradi njihove mase, velikosti in večje količine shranjene energije. Pri poškodovanih baterijah je treba tveganje dodatno oceniti in zagotoviti ustrezne pogoje za njihovo varno premikanje in prevoz.

3.7.4 Ravnanje z baterijami pred recikliranjem

Pred začetkom recikliranja je treba baterije ustrezno pripraviti na nadaljnjo obdelavo. Pri tem se lahko preveri njihovo stanje, kemijska sestava in konstrukcija. Pri večjih baterijskih sistemih lahko priprava vključuje razelektritev, demontažo baterijskega sklopa ter ločevanje modulov in celic.

Ustrezna predobdelava je pomembna zaradi zmanjšanja varnostnih tveganj in izboljšanja učinkovitosti nadaljnega recikliranja. Odstranijo se lahko ohišja, kabli, elektronske komponente in drugi deli, ki niso neposredno vključeni v pridobivanje aktivnih baterijskih materialov. Tako se zmanjša količina materialov, ki vstopajo v nadaljnje postopke, ter omogoči boljše ločevanje posameznih frakcij.

Posebno zahtevno je ravnanje s poškodovanimi baterijami. Pri njih lahko pride do sproščanja elektrolita, nastanka plinov ali termičnega pobega, zato je treba predobdelavo izvajati v nadzorovanih pogojih. Varnostni ukrepi so pomembni tako za zaposlene kot tudi za preprečevanje negativnih vplivov na okolje.

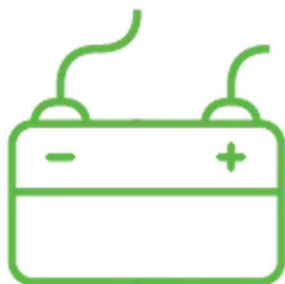
3.7.5 Primer prakse v Sloveniji: ZEOS

V Sloveniji pomemben del sistema zbiranja in ravnanja z odpadnimi baterijami izvaja organizacija ZEOS, ki je vključena v sistem ločenega zbiranja posebnih vrst odpadkov. Njeno področje delovanja vključuje tudi odpadno električno in elektronsko opremo ter različne vrste odpadnih baterij.

Sistem zbiranja vključuje prevzem odpadkov od uporabnikov, distributerjev in drugih sodelujočih subjektov ter njihovo nadaljnje usmerjanje v ustrezne postopke obdelave. Pri baterijah je pomembno predvsem ločeno zbiranje, saj se s tem zmanjšuje možnost njihovega mešanja z drugimi odpadki in povečuje možnost nadaljnje predelave uporabnih materialov.

Po prevzemu se odpadne baterije usmerjajo v nadaljnjo obdelavo in razgradnjo. Pri tem se različni materiali ločujejo glede na njihove lastnosti in možnosti nadaljnje uporabe. Materiali, ki jih je mogoče reciklirati, se usmerijo v ustrezne postopke predelave, medtem ko se preostanki, ki niso primerni za recikliranje, ustrezno odstranijo. Takšen sistem omogoča zmanjševanje količine odpadkov in vračanje dela materialov v proizvodne tokove (ZEOS, 2025).

Pomemben del delovanja ZEOS predstavlja tudi ozaveščanje uporabnikov o pravilnem ravnanju z odpadki. Informiranje javnosti o ločenem zbiranju in pravilni oddaji baterij je pomembno, saj je učinkovitost celotnega sistema odvisna tudi od ravnanja uporabnikov na začetku življenjskega cikla odpadka. Pravilno oddane baterije je mogoče varneje zbrati, skladiščiti, transportirati in vključiti v nadaljnje postopke predelave (ZEOS, 2025).



Slika 17: Industrijska baterija (vir: <https://www.zeos.si/ravnanje-z-odpadki/>)

3.7.6 Pomen ustreznega sistema ravnanja

Učinkovit sistem zbiranja, skladiščenja in transporta predstavlja osnovo za varno in uspešno recikliranje litij-ionskih baterij. Če baterije niso ustrezno ločene, razvrščene in skladiščene, se poveča tveganje za požare, poškodbe zaposlenih in onesnaženje okolja. Hkrati se lahko zmanjša kakovost materialov, ki jih je mogoče pridobiti v nadaljnjih postopkih recikliranja.

Ustrezno ravnanje z odpadnimi baterijami je zato pomembno z vidika varnosti, varovanja okolja in učinkovite rabe naravnih virov. Ločeno zbiranje omogoča, da se baterije usmerijo v primerne postopke predelave, pri katerih je mogoče pridobiti sekundarne surovine, kot so litij,

nikelj, kobalt, baker in aluminij. S tem se zmanjšuje količina odpadkov in potreba po pridobivanju primarnih surovin.

Celoten sistem mora biti zato zasnovan kot povezana veriga, ki vključuje pravilno zbiranje, razvrščanje, varno skladiščenje, ustrezen transport, predobdelavo in končno recikliranje. Le s povezovanjem vseh navedenih faz je mogoče zagotoviti varno ravnanje z odpadnimi litij-ionskimi baterijami in hkrati povečati količino ponovno pridobljenih materialov. Takšen pristop podpira načela krožnega gospodarstva in prispeva k zmanjševanju okoljskega bremena baterij v celotnem življenjskem ciklu.

3.8 Ravnanje s poškodovanimi litij-ionskimi baterijami

Poškodovane, napihnjene, deformirane ali puščajoče litij-ionske baterije predstavljajo povečano tveganje za termični pobeg, požar in sproščanje nevarnih snovi. Zaradi poškodb lahko pride do sprememb v notranji strukturi baterijske celice, kar poveča možnost notranjega kratkega stika in nenadzorovanega sproščanja energije. Takšne baterije zato zahtevajo posebno obravnavo in jih ni primerno obravnavati na enak način kot nepoškodovane baterije.

Pri mehansko poškodovanih baterijah lahko pride do poškodbe separatorja med anodo in katodo. Če pride do neposrednega stika med elektrodami, lahko nastane notranji kratki stik, pri katerem se temperatura v celici hitro povečuje. Povišana temperatura lahko sproži nadaljnje kemične reakcije in povzroči termični pobeg. Pri večceličnih baterijskih sklopih se lahko toplota prenese tudi na sosednje celice, zaradi česar se nevarni proces lahko razširi na večji del baterijskega sistema.

Znaki poškodovane baterije so lahko vidne deformacije, napihnjenost ohišja, nenavadno segrevanje, poškodovana izolacija, sprememba vonja, iztekanje tekočine ali vidne mehanske poškodbe. Posebno pozornost je treba nameniti baterijam, ki so bile izpostavljene udarcem, stiskanju, vodi, visokim temperaturam ali požaru. Tudi baterija, ki na prvi pogled ne kaže izrazitih znakov poškodb, je lahko zaradi notranje poškodbe potencialno nevarna.

3.8.1 Takojšnje ukrepanje in ločevanje

Poškodovane baterije je treba čim prej identificirati in ločiti od drugih baterij. S tem se zmanjša možnost, da bi poškodovana baterija povzročila poškodbe ali segrevanje drugih baterij. Pri ravnanju je treba preprečiti dodatne mehanske obremenitve, kratke stike in druge vplive, ki bi lahko povečali tveganje.

Poškodovane baterije se ne smejo nenadzorovano polniti ali uporabljati. Nadaljnje ravnanje mora biti prilagojeno stanju baterije in vrsti poškodbe. Pri baterijah, ki se močno segrevajo, oddajajo dim ali kažejo druge znake termičnega dogodka, je potrebno takojšnje ukrepanje v skladu z varnostnimi postopki. Pri tem mora biti zagotovljena zaščita zaposlenih in drugih oseb, ki so v bližini.

3.8.2 Skladiščenje poškodovanih baterij

Poškodovane baterije je treba skladiščiti ločeno od nepoškodovanih baterij in drugih gorljivih materialov. Začasno skladiščenje mora potekati v ustreznih, mehansko odpornih in požarno varnih posodah oziroma zabojnikih, ki so namenjeni takšnemu ravnanju. Namen takšnega načina skladiščenja je predvsem omejiti možnost širjenja požara ali termičnega dogodka.

Skladiščni prostor mora omogočati ustrezen nadzor nad stanjem baterij ter zmanjševati izpostavljenost visokim temperaturam, vlagi in drugim neugodnim vplivom. Pomembna sta tudi ustrezna organizacija prostora in jasna označitev poškodovanih baterij. Pri večjih baterijskih sistemih je treba upoštevati njihovo večjo maso in količino shranjene energije, zato je lahko potrebno dodatno mehansko zavarovanje in ustrezno načrtovanje prostora.

3.8.3 Uhajanje elektrolita in drugih nevarnih snovi

Poškodba baterije lahko povzroči tudi uhajanje elektrolita. Elektrolit vsebuje organske kemične spojine, ki so lahko vnetljive in lahko predstavljajo tveganje pri neposrednem stiku ali vdihavanju hlapov. Pri poškodovanih baterijah je zato treba preprečiti neposredni stik z iztekajočimi snovmi in zagotoviti ustrezno zaščito zaposlenih.

Če pride do uhajanja elektrolita, je treba območje ustrezno zavarovati in preprečiti širjenje snovi v okolje. Ostanke poškodovane baterije in materiale, ki so bili onesnaženi z elektrolitom, je treba obravnavati kot nevaren odpadke ter jih predati ustrezno usposobljenim in pooblaščenim izvajalcem. Takšno ravnanje zmanjšuje tveganje za onesnaženje tal in vode ter zmanjšuje izpostavljenost ljudi nevarnim snovem.

3.8.4 Transport poškodovanih baterij

Transport poškodovanih litij-ionskih baterij je zahtevnejši kot transport nepoškodovanih baterij. Zaradi povečane nevarnosti požara, kratkega stika ali uhajanja nevarnih snovi je treba zagotoviti ustrezno embalažo, zaščito pred mehanskimi poškodbami in preprečevanje premikanja baterij med prevozom.

Transport mora potekati v skladu z veljavnimi zahtevami za prevoz nevarnega blaga. Pri tem je treba upoštevati stanje baterije, njeno velikost, konstrukcijo in stopnjo poškodovanosti. Poškodovane baterije je treba jasno označiti in zagotoviti, da z njimi ravna ustrezno usposobljeno osebje. Pri baterijah, ki predstavljajo posebno visoko tveganje, je treba pred transportom izvesti dodatne varnostne ukrepe.

3.8.5 Ravnanje pred recikliranjem

Pred vključitvijo poškodovane baterije v reciklažni proces je treba oceniti njeno stanje in tveganje, ki ga predstavlja. Nadaljnje postopke, kot so razelektritev, deaktivacija, demontaža in mehanska obdelava, morajo izvajati ustrezno usposobljeni izvajalci v nadzorovanih pogojih.

Pri mehanski obdelavi poškodovanih baterij je tveganje še posebej pomembno, saj lahko drobljenje ali druga mehanska obdelava povzroči nastanek isker, kratkega stika ali nenadzorovanega segrevanja. Zato je treba baterije pred obdelavo ustrezno pripraviti in uporabiti postopke, ki zmanjšujejo možnost nastanka nevarnih dogodkov.

Pravilna predobdelava poškodovanih baterij je pomembna tudi z vidika učinkovitosti recikliranja. Če se baterija ustrezno pripravi, je mogoče varneje ločiti posamezne materiale in jih vključiti v nadaljnje postopke pridobivanja sekundarnih surovin. Na ta način se zmanjšata tako varnostno tveganje kot možnost nepotrebne izgube uporabnih materialov.

3.8.6 Okoljski vidik ravnanja s poškodovanimi baterijami

Neustrezno ravnanje s poškodovanimi litij-ionskimi baterijami lahko poleg neposrednega varnostnega tveganja povzroči tudi okoljske posledice. Uhajanje elektrolitov in drugih snovi

lahko predstavlja tveganje za tla in vodne vire, medtem ko lahko požari povzročijo emisije različnih produktov zgorevanja.

Pravilno zbiranje, ločevanje, skladiščenje in predelava zato niso pomembni samo zaradi varnosti ljudi, ampak tudi zaradi varovanja okolja. Z ustreznim zajemom poškodovanih baterij se preprečuje njihovo odlaganje med druge odpadke in omogoča nadzorovano ravnanje z nevarnimi snovmi.

Hkrati se z učinkovitim recikliranjem omogoča pridobivanje sekundarnih surovin. Iz baterij je mogoče ponovno pridobivati materiale, kot so litij, nikelj, kobalt, baker in aluminij. Ponovna uporaba teh materialov zmanjšuje potrebo po primarnem pridobivanju surovin in s tem povezane okoljske vplive, vključno s posegi v naravne ekosisteme, porabo energije in emisijami toplogrednih plinov.

Ravnanje s poškodovanimi litij-ionskimi baterijami mora zato temeljiti na načelu preprečevanja tveganj že od trenutka njihovega prepoznavanja. Pomembno je pravočasno ločevanje, varno skladiščenje, ustrezen transport in nadzorovana predelava. Takšen pristop zmanjšuje možnost požarov, sproščanja nevarnih snovi in drugih nevarnih dogodkov ter hkrati omogoča čim večjo ponovno uporabo materialov.

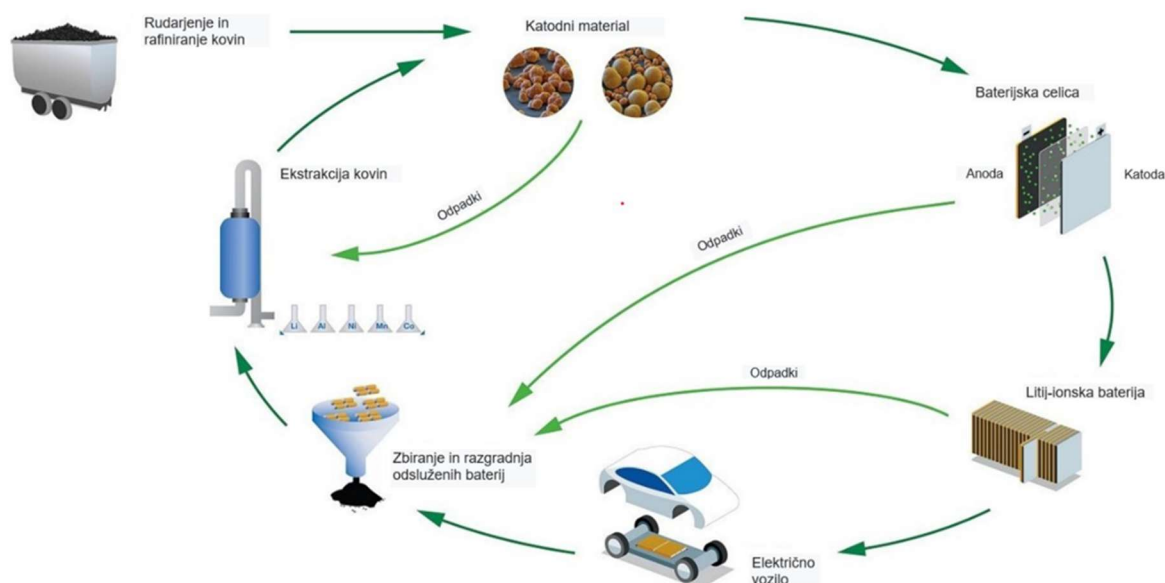
Ustrezno ravnanje s poškodovanimi baterijami tako predstavlja pomemben povezovalni element med varnostjo, varovanjem okolja in krožnim gospodarstvom. Cilj ni samo preprečiti nevarnih dogodkov, temveč tudi zagotoviti, da se čim več materialov iz poškodovanih in izrabljenih baterij varno vrne v proizvodni cikel. Na ta način se lahko zmanjšuje količina odpadkov, potreba po primarnih surovinah in skupno okoljsko breme litij-ionskih baterij.

3.9 Postopki recikliranja litij-ionskih baterij

Recikliranje litij-ionskih baterij predstavlja enega ključnih elementov trajnostnega upravljanja baterijskih sistemov, saj omogoča ponovno pridobivanje pomembnih materialov in zmanjšuje okoljske vplive, povezane s primarnim pridobivanjem surovin. Z naraščanjem uporabe električnih vozil, sistemov za shranjevanje energije in drugih naprav, ki uporabljajo litij-ionske baterije, se povečuje tudi količina baterij, ki bodo po koncu življenjske dobe potrebovale ustrezno obdelavo.

Reciklažni proces je sestavljen iz več zaporednih faz, katerih cilj je varna priprava baterije, ločevanje posameznih komponent in čim učinkovitejše pridobivanje uporabnih materialov. Med pomembnejše faze sodijo:

- razelektritev oziroma izpraznitev preostale energije,
- demontaža baterijskega sklopa,
- mehanska obdelava,
- drobljenje in mletje,
- fizikalno ločevanje materialov,
- pridobivanje in obdelava črne mase,
- hidrometalurška obdelava,
- pirometalurška obdelava ter
- naprednejši postopki, kot je neposredna regeneracija aktivnih materialov.



Slika 18: Postopek recikliranja baterij (vir: <https://www.izvoznookno.si/aktualno/basf-bo-s-podjetjema-fortum-in-nornickel-recikliral-avtomobilske-baterije/>)

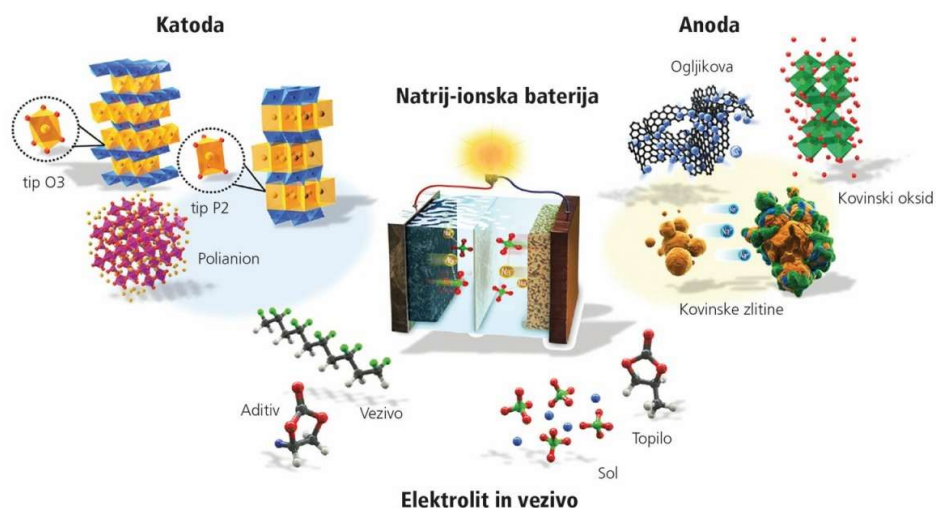
Pred začetkom mehanske ali metalurške obdelave je treba baterijo ustrezno pripraviti. Pri večjih baterijskih sistemih to vključuje razstavljanje baterijskega sklopa, ločevanje modulov in celic ter odstranitev ohišij, kablov in elektronskih komponent. Namen predobdelave je zmanjšati varnostna tveganja ter pripraviti material za čim učinkovitejše nadaljnje ločevanje.

3.10 Alternativne baterijske tehnologije in vpliv na okolje

Razvoj alternativnih baterijskih tehnologij predstavlja pomemben korak pri zmanjševanju okoljskega bremena baterijskih sistemov. Raziskave niso usmerjene samo v povečanje energijske gostote in izboljšanje zmogljivosti baterij, temveč tudi v zmanjšanje uporabe kritičnih surovin, izboljšanje varnosti, podaljšanje življenjske dobe in razvoj učinkovitejših možnosti recikliranja.

Med pomembnejše alternativne oziroma razvijajoče se tehnologije sodijo:

- litij-ionske baterije z elektroliti nove generacije,
- baterije s trdnim elektrolitom,
- natrij-ionske baterije,
- natrij-žveplove baterije in
- različne baterijske tehnologije brez litija.



Slika 19: Sestava natrij-ionskih baterij (vir: <https://www.monitor.si/clanek/litijev-naslednik/236836/>)

3.10.1 Litij-ionske baterije z elektroliti nove generacije

Razvoj novih elektrolitov je usmerjen predvsem v izboljšanje varnosti, stabilnosti in življenjske dobe baterij. Klasični tekoči elektroliti so lahko vnetljivi, zato raziskave vključujejo razvoj manj vnetljivih, bolj stabilnih in drugače zasnovanih elektrolitov.

Izboljšanje stabilnosti elektrolita lahko zmanjša tveganje za neželene kemične reakcije in termične dogodke. Hkrati lahko daljša življenjska doba baterije zmanjša potrebo po pogosti zamenjavi baterij, kar lahko zmanjša porabo surovin in okoljske vplive, povezane s proizvodnjo novih baterijskih celic.

Vir: <https://www.24ur.com/novice/gospodarstvo/baterije-s-trdnim-elektrolitom-energetska-revolucija-ki-se-vztrajno-izmika.html>

3.10.2 Baterije s trdnim elektrolitom

Baterije s trdnim elektrolitom predstavljajo eno pomembnejših smeri razvoja naslednje generacije baterijskih tehnologij. Namesto klasičnega tekočega elektrolita uporabljajo trdni elektrolit, kar lahko izboljša varnost in zmanjša tveganje za vnetljivost.

Med potencialnimi prednostmi so večja energijska gostota, boljša termična stabilnost in možnost hitrejšega polnjenja. Zaradi drugačne konstrukcije pa se pojavljajo tudi novi izzivi pri proizvodnji, izbiri materialov in recikliranju. Ob koncu življenjske dobe bo zato treba razviti postopke, prilagojene novim kombinacijam elektrod in elektrolitov.

Vir: Avtomobilizem.com – CATL z novimi materiali do večje energijske gostote baterij
<https://www.avtomobilizem.com/novice/catl-z-novimi-materiali-do-vecje-energijske-gostote-baterij/>

3.10.3 Natrij-ionske baterije

Natrij-ionske baterije predstavljajo eno pomembnejših alternativ litij-ionskim baterijam. Natrij je široko dostopen element, zato lahko njegova uporaba zmanjša odvisnost od nekaterih kritičnih surovin, povezanih s proizvodnjo litij-ionskih baterij.

Glavna omejitev natrij-ionskih baterij je praviloma nižja energijska gostota v primerjavi z najboljšimi litij-ionskimi tehnologijami. Kljub temu so lahko primerne za aplikacije, pri katerih masa in prostornina nista najpomembnejša dejavnika, predvsem za stacionarno shranjevanje energije.

Okoljska prednost natrij-ionskih baterij je lahko povezana predvsem z večjo razpoložljivostjo natrija in zmanjšanjem potrebe po nekaterih kritičnih materialih. Tudi pri tej tehnologiji pa ostaja pomembno vprašanje recikliranja in ponovne uporabe materialov ob koncu življenjske dobe.

Vir: Monitor.si – *Natrijeve baterije so tu* <https://www.monitor.si/novica/natrijeve-baterije-so-tu/232474/>

3.10.4 Natrij-žveplove baterije

Natrij-žveplove baterije uporabljajo natrij in žveplo, ki sta relativno dostopna materiala. Zaradi svojih lastnosti imajo lahko pomembno vlogo pri stacionarnem shranjevanju energije in podpori elektroenergetskim sistemom.

Njihova pomembna omejitev je delovanje pri povišanih temperaturah, kar zahteva ustrezno toplotno upravljanje in varnostne sisteme. Zaradi tega niso primerne za vse vrste aplikacij, lahko pa so uporabne pri večjih stacionarnih sistemih, kjer so pomembne zmogljivosti shranjevanja in dolgotrajno delovanje.

Vir: <https://www.racunalniske-novice.com/nova-natrij-zveplova-baterija-prinasa-ekstremno-gostoto-energije-za-delcek-cene/> (racunalniske-novice.com in Bing)

3.10.5 Baterije brez litija

Razvoj baterij brez litija vključuje različne kemijske sisteme, pri katerih se raziskujejo alternativni materiali za elektrode in elektrolite. Namen razvoja je predvsem zmanjšanje odvisnosti od litija in drugih kritičnih surovin ter povečanje razpoložljivosti materialov.

Potencialna prednost takšnih tehnologij je možnost uporabe bolj dostopnih in cenovno ugodnejših surovin. Vendar številne od teh tehnologij še niso dosegle stopnje tehnološke in komercialne razvitosti, ki bi omogočala množično nadomeščanje litij-ionskih baterij.

Vir: <https://www.racunalniske-novice.com/nova-baterija-brez-litija-podira-rekorde-v-napetosti/>

3.10.6 Magnezijeve baterije kot alternativa litij-ionskim baterijam

Magnezijeve baterije predstavljajo eno izmed potencialnih alternativ litij-ionskim baterijam, predvsem zaradi možnosti zmanjšanja odvisnosti od litija in drugih kritičnih surovin. Magnezij

je razmeroma razširjen element, zato bi njegova uporaba lahko prispevala k večji dostopnosti surovin in dolgoročno bolj trajnostni proizvodnji baterij. Raziskave magnezijevih baterij se osredotočajo predvsem na razvoj ustreznih elektrodnih materialov in elektrolitov, ki bi omogočili učinkovito premikanje magnezijevih ionov ter zadostno energijsko gostoto.

Pomembna prednost magnezijeve tehnologije je tudi možnost uporabe dvovalentnih magnezijevih ionov, saj lahko en ion sodeluje pri prenosu dveh elektronov. To bi lahko omogočilo večjo kapaciteto baterije. Kljub temu tehnologija še ni dosegla tehnološke zrelosti litij-ionskih baterij. Med ključnimi izzivi ostajajo počasnejše gibanje magnezijevih ionov, razvoj primerne elektrolita ter zagotavljanje zadostne energijske gostote in življenjske dobe baterije.



Slika 20: Prikaz magnezijeve baterije (vir: <https://www.delo.si/novice/znanoteh/slovenski-korak-k-zmogljivejsim-baterijam>)

Magnezijeve baterije so zato trenutno predvsem raziskovalna in razvojna alternativa, vendar bi lahko njihov nadaljnji razvoj v prihodnosti prispeval k zmanjšanju uporabe litija ter s tem tudi k zmanjšanju okoljskih in surovinskih obremenitev, povezanih s proizvodnjo litij-ionskih baterij. Članek na portalu Portal24 magnezijevo tehnologijo prav tako predstavlja v kontekstu iskanja možne alternative litiju za električna vozila.

Vir: Portal24, *Bi lahko magnezij postal novi litij za električna vozila?*: <https://www.delo.si/novice/znanoteh/slovenski-korak-k-zmogljivejsim-baterijam>)

3.10.7 Kitajci predstavili električni avtomobil z natrij-ionskimi baterijami

Kitajski proizvajalec je predstavil električni avtomobil, opremljen z natrij-ionskimi baterijami. Baterijski sistem ima zmogljivost približno 45 kWh in energijsko gostoto okoli 175 Wh/kg, kar omogoča doseg približno 400 km v optimalnih pogojih. Predstavitev vozila kaže, da natrij-ionske baterije niso več omejene samo na raziskovalno področje, temveč se postopoma uvajajo tudi v praktične aplikacije električne mobilnosti.



Slika 21: Prvi avtomobil z natrij-ionsko baterijo (vir: <https://slo-tech.com/novice/t850797>)

Uporaba natrij-ionskih baterij predstavlja možnost zmanjšanja odvisnosti avtomobilske industrije od litija, kobalta in niklja. Njihove prednosti so predvsem večja razpoložljivost surovin, nižji stroški proizvodnje ter potencialno manjši okoljski vpliv. Pri nadaljnjem razvoju bo pomembno tudi prilagoditi postopke recikliranja, saj se njihova kemijska sestava razlikuje od klasičnih litij-ionskih baterij.

Vir: Kitajci predstavili električni avtomobil z natrij-ionskimi baterijami, Slo-Tech <https://slo-tech.com/novice/t123456>

Opomba o virih

Uporabljeni članki (Avtomobilizem.com, 24ur.com, Računalniške novice, Slo-Tech, Monitor) so avtorski novičarski prispevki, ki ne navajajo izvornih znanstvenih ali tehničnih virov. Zato so bili uporabljeni zgolj kot sekundarni informativni viri za prikaz aktualnih trendov in primerov iz prakse. Za strokovno utemeljitev poglavja so bili dodatno vključeni znanstveni članki, tehnične publikacije proizvajalcev baterij in relevantna industrijska poročila

3.10.8 Okoljski vidik alternativnih baterijskih tehnologij

Okoljski vpliv alternativnih baterijskih tehnologij je odvisen od celotnega življenjskega cikla, ne le od izbire materialov. Tehnologije, ki uporabljajo bolj dostopne ali manj kritične surovine, niso nujno okoljsko ugodnejše, če je njihova proizvodnja energijsko zahtevna, življenjska doba krajša ali možnosti recikliranja omejene. Zato je za primerjavo različnih kemij ključna analiza življenjskega cikla, ki vključuje pridobivanje surovin, proizvodnjo, uporabo, drugo življenjsko dobo in recikliranje.

Alternativne tehnologije lahko zmanjšajo odvisnost od kritičnih surovin ter izboljšajo varnost, vendar njihova dejanska trajnostnost temelji na kombinaciji kemijske sestave, energijske učinkovitosti proizvodnje, življenjske dobe ter možnosti ponovne uporabe in recikliranja. Učinkovito recikliranje je pri tem ključno, saj omogoča vračanje materialov v proizvodne tokove in zmanjšuje potrebo po primarnem rudarjenju.

Razvoj naprednih reciklažnih postopkov ter boljše zasnove baterij za razgradnjo bo pomemben za prihodnji trajnostni razvoj baterijske industrije. Cilj je vzpostavitev zaprtih materialnih tokov, pri katerih se materiali po koncu življenjske dobe ponovno uporabijo, kar zmanjšuje okoljski odtis in podpira krožno gospodarstvo.

3.11 Druga življenjska doba baterij (second life)

Druga življenjska doba baterij oziroma *second life* predstavlja pomemben pristop k zmanjševanju okoljskega vpliva litij-ionskih baterij. Nanaša se na obdobje, ko baterije po zaključku primarne uporabe, na primer v električnih vozilih, niso več dovolj zmogljive za zahtevne aplikacije, vendar še vedno vsebujejo dovolj uporabne kapacitete za druge, manj zahtevne namene. Konec primarne življenjske dobe zato ne pomeni nujno, da je baterija neuporabna, temveč lahko predstavlja prehod v novo obdobje uporabe.

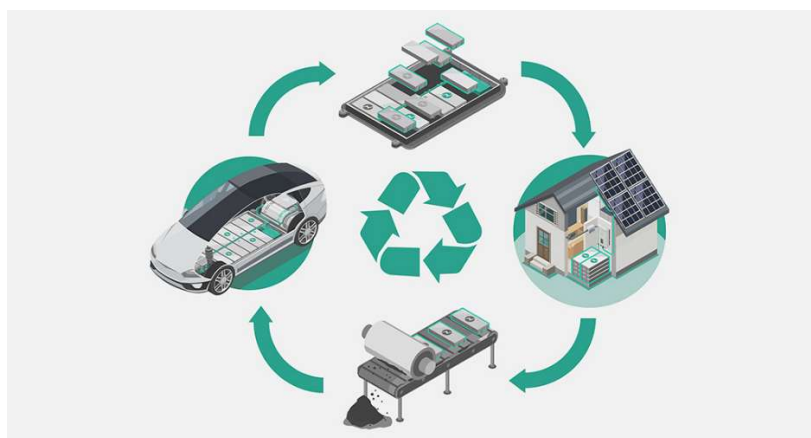
Pri električnih vozilih se baterije običajno umaknejo iz primarne uporabe, ko njihova zmogljivost in druge lastnosti ne ustrezajo več zahtevam vozila. Zmanjšanje kapacitete vpliva predvsem na doseg vozila, čas delovanja in splošno uporabnost baterije. Pri stacionarnih sistemih pa so zahteve glede mase, velikosti in energijske gostote pogosto manj stroge, zato je lahko baterija z zmanjšano kapaciteto še vedno primerna za nadaljnjo uporabo.

Najpogostejše možnosti uporabe baterij v drugi življenjski dobi so:

- stacionarni sistemi za shranjevanje električne energije,
- podpora proizvodnji električne energije iz obnovljivih virov,
- rezervni sistemi napajanja,
- industrijski sistemi neprekinjenega napajanja oziroma UPS-sistemi.

Stacionarni sistemi omogočajo shranjevanje električne energije v času, ko je proizvodnja večja od trenutne porabe, in njeno uporabo v obdobjih večjega povpraševanja. Baterije iz električnih vozil se lahko na ta način uporabijo za shranjevanje energije iz sončnih in vetrnih elektrarn. To je pomembno predvsem zaradi spremenljivosti proizvodnje električne energije iz obnovljivih virov, saj omogoča časovni zamik med proizvodnjo in porabo energije.

Pomembna možnost uporabe baterij v drugi življenjski dobi je tudi zagotavljanje rezervnega napajanja. Baterije lahko v primeru izpada električnega omrežja zagotavljajo električno energijo za določeno obdobje. Uporabljajo se lahko tudi v industrijskih sistemih neprekinjenega napajanja, kjer je pomembna zanesljivost oskrbe z električno energijo.



Slika 22: Prikaz druge življenjske dobe baterij (vir: <https://www.ferchau.com/de/en/customer/success-stories/second-life-for-batteries-6145>)

Druga življenjska doba baterij tako predstavlja pomemben povezovalni člen med uporabo in recikliranjem baterijskih sistemov. Omogoča učinkovitejšo izrabo materialov, zmanjšuje količino odpadnih baterij, zmanjšuje potrebo po pridobivanju novih surovin ter prispeva k zmanjšanju okoljskega odtisa celotnega življenjskega cikla baterij. Ob nadaljnjem razvoju diagnostičnih metod, standardizaciji postopkov, izboljšanju zakonodaje ter napredku reciklažnih tehnologij bo ponovna uporaba baterij v prihodnosti predstavljala enega ključnih elementov trajnostnega razvoja baterijske industrije in učinkovitega prehoda v krožno gospodarstvo.



Slika 23: Podpora krožnemu gospodarstvu (vir: <https://www.mlcljubljana.com/kako-sap-podpira-krožno-gospodarstvo-v-poslovnem-svetu/>)

3.11.1 Ocena primernosti baterije za drugo življenjsko dobo

Druga življenjska doba baterij predstavlja pomemben pristop k zmanjševanju okoljskega bremena litij-ionskih baterij. Ko baterije v električnih vozilih izgubijo del kapacitete in ne dosegajo več zahtev mobilne uporabe, lahko kljub temu ostanejo primerne za manj zahtevne aplikacije. S tem se podaljša njihova uporabnost, zmanjša količina odpadkov in izboljša izraba materialov, vloženih v prvotno proizvodnjo.

Najpogostejše uporabe baterij v drugi življenjski dobi vključujejo stacionarne sisteme za shranjevanje električne energije, podporo obnovljivim virom, rezervno napajanje ter industrijske UPS-sisteme. Pri teh aplikacijah masa in energijska gostota nista ključni, zato lahko baterije z zmanjšano kapaciteto še vedno učinkovito opravljajo svojo funkcijo.

3.11.2 Predelava in ponovna konfiguracija baterij

Za vključitev baterije v drugo življenjsko dobo je običajno potrebna določena stopnja predelave. Baterijski paket električnega vozila je lahko sestavljen iz velikega števila celic in modulov, ki se med uporabo ne starajo vedno enakomerno. Zato celoten paket ni nujno primeren za nadaljnjo uporabo kot enotna celota.

Po diagnostiki se lahko posamezni moduli in celice razvrstijo glede na njihovo stanje. Elemente s podobnimi lastnostmi je mogoče združiti v nov baterijski sistem, ki je prilagojen zahtevam nove aplikacije. Pri tem je treba upoštevati napetost, kapaciteto, dovoljene tokove, način hlajenja in druge tehnične značilnosti sistema.

Pomemben del predelave predstavlja tudi prilagoditev sistema za upravljanje baterije. BMS mora biti sposoben spremljati stanje posameznih celic oziroma modulov ter nadzorovati njihovo polnjenje, praznjenje in temperaturo. Pri ponovni uporabi je zato pogosto potrebna prilagoditev programske in strojne opreme, da lahko baterijski sistem varno deluje v novi aplikaciji.

Predelava lahko vključuje tudi zamenjavo posameznih komponent, ki niso več ustrezne. To lahko vključuje določene elektronske komponente, povezave, hladilne elemente ali druge dele baterijskega sistema. Obseg predelave je odvisen od stanja baterije in zahtev nove uporabe.

Pomembna prednost ponovne konfiguracije je, da se lahko uporabijo komponente, ki so še vedno funkcionalne, namesto da bi se celoten baterijski sistem takoj razgradil. S tem se podaljša uporabna doba izdelka in poveča izkoristek materialov ter energije, ki so bili vloženi v njegovo prvotno proizvodnjo.

3.11.3 Možne uporabe baterij v drugi življenjski dobi

Najpomembnejše področje uporabe baterij druge življenjske dobe predstavljajo stacionarni sistemi za shranjevanje električne energije. Pri teh sistemih masa in velikost baterije običajno nista tako pomembni kot pri električnih vozilih. Zato je mogoče uporabiti tudi baterije, ki zaradi zmanjšane energijske gostote niso več optimalne za mobilno uporabo.

Baterije druge življenjske dobe se lahko uporabljajo za shranjevanje električne energije iz sončnih elektrarn. Energijo je mogoče shraniti v obdobjih večje proizvodnje in jo uporabiti kasneje, ko je proizvodnja manjša oziroma ko se poveča poraba. Podoben princip je mogoče uporabiti tudi pri drugih obnovljivih virih energije, pri katerih proizvodnja ni vedno enaka trenutni porabi.

Drugo področje predstavlja rezervno napajanje. Baterijski sistemi lahko zagotavljajo električno energijo v primeru izpada omrežja in tako povečujejo zanesljivost oskrbe. Uporabljajo se lahko v objektih, industrijskih sistemih in drugih aplikacijah, kjer je potrebno začasno zagotavljanje električne energije.

Možna je tudi uporaba v sistemih za uravnavanje porabe električne energije. Baterija lahko omogoča shranjevanje energije v času manjše obremenitve omrežja in njeno uporabo v času večjega povpraševanja. S tem lahko prispeva k učinkovitejši uporabi električne energije in zmanjšanju koničnih obremenitev.

3.11.4 Okoljske koristi druge življenjske dobe

Glavna okoljska prednost druge življenjske dobe je podaljšanje obdobja, v katerem se uporabljajo že proizvedena baterija, njeni materiali in energija, vložena v proizvodnjo. Če se baterija po koncu primarne izrabe uporabi v drugi aplikaciji, se lahko zmanjša potreba po takojšnji proizvodnji novega baterijskega sistema.

S tem se lahko zmanjšajo okoljski vplivi, povezani s pridobivanjem primarnih surovin, njihovo predelavo in proizvodnjo novih baterijskih celic. Posebej pomembno je zmanjšanje potrebe po dodatnem pridobivanju materialov, saj je proizvodnja baterij povezana z uporabo različnih kovin in drugih surovin.

Z vidika LCA predstavlja druga življenjska doba možnost, da se okoljske obremenitve, povezane s proizvodnjo baterije, razporedijo na daljše obdobje uporabe. Ista baterija lahko

najprej opravlja funkcijo v električnem vozilu, nato pa še funkcijo shranjevanja električne energije. Na ta način se iz istega izdelka pridobi več uporabnih funkcij.

Druga življenjska doba lahko prispeva tudi k zmanjšanju količine odpadnih baterij, ki bi sicer neposredno vstopile v reciklažni proces. Pri tem pa je pomembno poudariti, da druga življenjska doba recikliranja ne nadomešča, ampak ga zamakne v kasnejšo fazo življenjskega cikla.

Okoljska korist druge življenjske dobe pa ni samodejna. Pri presoji je treba upoštevati energijo, potrebno za diagnostiko, demontažo, transport, ponovno sestavljanje in prilagoditev baterije. Če je za pripravo baterije za drugo uporabo potrebnih veliko dodatnih postopkov, se lahko del okoljske koristi izgubi.

Pomembno je tudi, katero tehnologijo bi druga življenjska doba nadomestila. Če se z uporabo rabljene baterije prepreči proizvodnja nove baterije z velikimi okoljskimi vplivi, je lahko okoljska korist večja. Če pa je za drugo uporabo potrebna obsežna predelava in dolgotrajen transport, je lahko korist manjša.

3.11.5 Omejitve in okoljski vidiki

Kljub številnim prednostim ima druga življenjska doba tudi določene omejitve. Ena od pomembnejših je neenakomerno staranje baterijskih celic. Celice v istem baterijskem paketu niso nujno enako obremenjene, zato imajo lahko po več letih uporabe različne kapacitete in notranje upore. To otežuje ponovno sestavljanje baterijskega sistema.

Pomembna omejitev je tudi varnost. Baterije, ki so bile poškodovane, pregrete ali drugače nepravilno uporabljene, lahko predstavljajo večje tveganje. Pred ponovno uporabo je zato treba zagotoviti ustrezno diagnostiko in preverjanje varnosti. Baterij, katerih stanja ni mogoče zanesljivo določiti, ni primerno vključevati v novo uporabo.

Na možnost druge življenjske dobe vplivajo tudi stroški predelave. Diagnostika, demontaža, testiranje, razvrščanje, transport in ponovna konfiguracija lahko zahtevajo veliko časa in specializirane opreme. Če so stroški teh postopkov previsoki v primerjavi s proizvodnjo novega baterijskega sistema, ponovna uporaba ekonomsko ni nujno smiselna.

Pomembna je tudi zasnova baterijskega sistema. Baterije, ki so že v osnovi zasnovane tako, da omogočajo enostavno demontažo, dostop do posameznih modulov in zamenjavo komponent, so primernejše za ponovno uporabo. Zato lahko načela ekodizajna pomembno vplivajo na možnost podaljšanja življenjske dobe baterij.

Pri načrtovanju novih baterij bi bilo zato smiselno upoštevati možnost servisiranja, popravila, demontaže, ponovne uporabe in na koncu recikliranja. Takšen pristop omogoča boljše izkoriščanje materialov skozi celoten življenjski cikel in zmanjšuje količino odpadkov.

3.11.6 Povezava druge življenjske dobe z recikliranjem

Druga življenjska doba ne nadomešča recikliranja, temveč ga zamakne v kasnejšo fazo življenjskega cikla. Ko baterija po ponovni uporabi ni več primerna za delovanje, jo je treba usmeriti v recikliranje, kjer se pridobijo litij, nikelj, kobalt, baker in drugi materiali. Takšen pristop omogoča čim daljšo izrabo že pridobljenih surovin in zmanjšuje potrebo po proizvodnji novih baterijskih sistemov.

Hierarhični model ravnanja – primarna uporaba, druga življenjska doba, nato recikliranje – omogoča ohranjanje materialne vrednosti baterije in zmanjšanje količine odpadkov. Daljša uporaba pa lahko vpliva na končno stanje baterije, zato je pomembno načrtovati tudi njeno končno recikliranje, saj degradacija lahko zmanjša količino in kakovost pridobljenih materialov.

Učinkovitost pristopa second life je zato treba ocenjevati celostno: glede na stanje baterije, potrebne postopke predelave, logistiko, energijsko porabo ter možnosti recikliranja po zaključku druge uporabe. Druga življenjska doba je pomemben element krožnega gospodarstva, vendar mora biti vedno povezana z ustreznim načrtovanjem končnega recikliranja.

4 METODOLOGIJA RAZISKAVE

Pri izdelavi magistrskega dela je bila uporabljena deskriptivna in primerjalna metoda raziskovanja, ki temelji na pregledu in analizi obstoječe znanstvene in strokovne literature s področja litij-ionskih baterij, njihovega življenjskega cikla, okoljskih vplivov, recikliranja ter možnosti zmanjševanja njihovega okoljskega bremena. Poseben poudarek je bil namenjen analizi že izvedenih analiz življenjskega cikla (Life Cycle Assessment – LCA), saj omogočajo celovitejše razumevanje okoljskih vplivov baterij v različnih fazah njihovega življenjskega cikla.

V magistrskem delu ni bila izvedena samostojna kvantitativna LCA-analiza oziroma izdelan lasten računski model. Uporabljene so bile že izvedene LCA-raziskave, objavljene v znanstveni in strokovni literaturi. Njihovi rezultati so bili sistematično pregledani, primerjani in interpretirani glede na namen posamezne raziskave, obravnavano baterijsko tehnologijo, vključene faze življenjskega cikla ter ugotovljene okoljske vplive. Takšen pristop omogoča primerjavo ugotovitev različnih avtorjev in prepoznavanje skupnih ugotovitev glede okoljskega bremena litij-ionskih baterij.

Pri analizi so bile upoštevane različne faze življenjskega cikla baterij, med drugim pridobivanje in predelava surovin, proizvodnja baterijskih celic in sklopov, transport, uporaba, ravnanje z baterijami ob koncu življenjske dobe, recikliranje ter možnost njihove nadaljnje uporabe v okviru druge življenjske dobe. Na ta način je bila omogočena celovita obravnava okoljskih vplivov in dejavnikov, ki lahko vplivajo na končni okoljski odtis baterijskih sistemov.

Pri interpretaciji rezultatov je bilo treba upoštevati, da posamezne LCA-raziskave niso bile izvedene pod popolnoma enakimi pogoji. Med njimi se lahko razlikujejo systemske meje, funkcionalne enote, uporabljene podatkovne zbirke, proizvodne tehnologije, lokacije proizvodnje, viri električne energije, predpostavljena življenjska doba baterij ter načini ravnanja z baterijami ob koncu življenjske dobe. Zaradi teh razlik rezultatov posameznih raziskav ni mogoče vedno neposredno primerjati, temveč jih je treba obravnavati v kontekstu uporabljene metodologije in predpostavk.

Primerjava obstoječih LCA-raziskav je bila zato usmerjena predvsem v ugotavljanje skupnih vzorcev in razlik med raziskavami. Pri tem so bili pomembni predvsem podatki o fazah življenjskega cikla, ki predstavljajo največje okoljske obremenitve, vplivu porabe energije, pridobivanju kritičnih surovin, proizvodnji baterijskih celic, uporabi baterij, recikliranju in možnosti ponovne uporabe.

Takšen metodološki pristop omogoča širši pregled dosedanjih spoznanj in hkrati zmanjšuje možnost, da bi se okoljski vpliv litij-ionskih baterij ocenjeval samo na podlagi ene raziskave. Primerjava več raziskav omogoča prepoznavanje dejavnikov, ki se kot pomembni pojavljajo v različnih raziskavah, in bolj kritično presojo ugotovitev glede okoljskega bremena litij-ionskih baterij.

4.1 Izbor in primerjava obstoječih LCA-študij

Za potrebe raziskave je bil izveden pregled objavljenih LCA-študij, ki obravnavajo litij-ionske baterije in njihove okoljske vplive. V primerjavo je bilo vključenih 18 študij, objavljenih v obdobju od leta 2009 do leta 2025. Izbrane raziskave obravnavajo različne vidike življenjskega cikla baterij, zato omogočajo primerjavo okoljskih vplivov proizvodnje, uporabe, recikliranja in drugih faz življenjskega cikla.

Študije so bile razvrščene glede na avtorja in leto objave, predmet oziroma fokus raziskave, glavne okoljske vplive, obravnavane postopke recikliranja in ključne ugotovitve. Pri tem je bilo

upoštevano, da vse raziskave niso imele enakega raziskovalnega cilja. Nekatere so bile usmerjene predvsem v proizvodnjo baterij in vplive pridobivanja surovin, druge v uporabo baterij v električnih vozilih, tretje pa v recikliranje in ponovno pridobivanje materialov.

Pri primerjavi je bila posebna pozornost namenjena ugotavljanju, katere faze življenjskega cikla se v posameznih raziskavah najpogosteje izkazujejo kot pomemben vir okoljskih obremenitev. Upoštevani so bili predvsem vplivi, povezani s porabo energije, z emisijami toplogrednih plinov, s porabo vode, pridobivanjem surovin in z ravnanjem z baterijami ob koncu življenjske dobe.

Pomemben del primerjave predstavlja tudi obravnava recikliranja. Pri posameznih raziskavah so bili upoštevani različni pristopi, kot so mehanska predobdelava, pirometalurgija, hidrometalurgija in neposredna regeneracija oziroma neposredna reciklaža. Namen primerjave ni bil določiti enega univerzalno najboljšega postopka, temveč ugotoviti, katere prednosti in omejitve posameznih postopkov izpostavljajo analizirane raziskave.

Pri interpretaciji rezultatov je bilo upoštevano tudi dejstvo, da se okoljski učinek posamezne baterijske tehnologije lahko pomembno spremeni glede na uporabljeno električno energijo, proizvodne pogoje, življenjsko dobo baterije, sestavo baterijskih materialov in način ravnanja ob koncu življenjske dobe. Zato so bile ugotovitve posameznih študij obravnavane primerjalno in ne kot neposredno medsebojno zamenljive vrednosti.

4.2 Primerjalna analiza LCA-študij o litij-ionskih baterijah

V okviru raziskave je bilo analiziranih osemnajst študij življenjskega cikla (LCA) litij-ionskih baterij, objavljenih med letoma 2009 in 2025. Namen primerjave je bil ugotoviti, kateri deli življenjskega cikla baterij predstavljajo največje okoljske obremenitve in kateri ukrepi lahko prispevajo k njihovem zmanjšanju. Analizirane študije so uporabljale različne pristope ocenjevanja, vendar je večina obravnavala več faz življenjskega cikla, od pridobivanja surovin in proizvodnje baterij do uporabe ter ravnanja z baterijami ob koncu njihove življenjske dobe.

Primerjava rezultatov kaže, da pomemben delež okoljskih vplivov pogosto nastaja v začetnih fazah življenjskega cikla, predvsem pri pridobivanju surovin in proizvodnji baterijskih celic. Pridobivanje litija, niklja, kobalta, grafita in drugih materialov je povezano s porabo energije in vode, emisijami ter posegi v naravne ekosisteme. Okoljski vplivi so odvisni tudi od načina pridobivanja posameznih surovin in lokacije njihovega pridobivanja.

Pomemben dejavnik okoljskega odtisa predstavlja tudi proizvodnja baterijskih celic. Več raziskav izpostavlja proizvodnjo elektrodnih in drugih aktivnih materialov kot energetsko zahtevno fazo. Na okoljski vpliv proizvodnje pomembno vpliva tudi vir električne energije. Proizvodnja v regijah, kjer je električna energija v večji meri pridobljena iz fosilnih virov, lahko povzroči večje emisije toplogrednih plinov kot proizvodnja v okoljih z večjim deležem nizkoogljičnih oziroma obnovljivih virov energije.

Vpliv faze uporabe se med raziskavami razlikuje predvsem glede na namen uporabe baterije in vir energije. Pri električnih vozilih je pomembno upoštevati, da med vožnjo ne nastajajo neposredne emisije iz izpušnih plinov, vendar okoljski vpliv električne mobilnosti ni enak v vseh okoljih. Pomemben dejavnik je način proizvodnje električne energije, ki se uporablja za polnjenje baterije. Poleg tega na skupni vpliv vplivajo tudi življenjska doba baterije, njena učinkovitost, število ciklov in način uporabe.

Posebno področje predstavljajo raziskave, ki obravnavajo konec življenjske dobe baterij. Novejše raziskave vse pogosteje vključujejo možnost recikliranja in druge življenjske dobe, s

čimer se okoljski vpliv baterije obravnava širše. Ponovna uporaba baterij lahko podaljša njihovo uporabno dobo in zmanjša potrebo po proizvodnji novega sistema. Pri tem je pomembno, da je baterija tehnično ustrezna in dovolj varna za nadaljnjo uporabo.

Primerjava postopkov recikliranja kaže, da imajo posamezne tehnologije različne prednosti in omejitve. Pirometalurški postopki so zaradi robustnosti in industrijske razvitosti primerni za obdelavo različnih vhodnih materialov in večjih količin baterij, vendar so povezani z večjo porabo energije. Pri takšnih postopkih se del materialov izgubi oziroma preide v druge produkte, zato pridobivanje vseh elementov ni vedno enako učinkovito.

Hidrometalurški postopki omogočajo učinkovito pridobivanje posameznih kovin iz predhodno obdelanega materiala. Prednost je predvsem možnost doseganja visoke čistosti pridobljenih materialov, vendar postopki zahtevajo uporabo kemičnih reagentov ter ustrezno ravnanje z nastalimi odpadnimi raztopinami.

V zadnjih letih se vse več pozornosti namenja tudi neposredni regeneraciji oziroma neposredni reciklaži. Pri tem pristopu se poskuša ohraniti struktura aktivnih materialov elektrod in jih z ustrezno obdelavo ponovno usposobiti za uporabo. Takšen pristop ima potencial za zmanjšanje števila procesnih korakov ter porabe energije in materialov, vendar je njegova uporaba zahtevnejša, saj je odvisna od kemijske sestave in stanja vhodnih baterijskih materialov.

Pomemben dejavnik pri primerjavi reciklažnih postopkov je tudi kemijska sestava baterije. Baterije NMC, NCA in LFP se razlikujejo po sestavi aktivnih materialov in vsebnosti posameznih kovin, zato se razlikujejo tudi njihova reciklažna vrednost ter primernost za posamezne postopke. Pri baterijah NMC in NCA imajo pomembno vrednost predvsem nikelj, kobalt in druge kovine, medtem ko je pri LFP zaradi drugačne sestave pomembno razvijati učinkovite postopke pridobivanja litija in drugih uporabnih materialov.

Analizirane raziskave tako kažejo, da zmanjšanje okoljskega vpliva litij-ionskih baterij ni odvisno samo od ene faze življenjskega cikla. Pomembni so izboljšanje proizvodnih postopkov, zmanjšanje porabe energije, uporaba ustrežnejših virov energije, učinkovitejša raba surovin, podaljšanje življenjske dobe baterij, možnost njihove ponovne uporabe in učinkovito recikliranje.

Razlike med posameznimi LCA-študijami so pomembne tudi z metodološkega vidika. Različne sistemske meje, funkcionalne enote, podatkovne zbirke in predpostavke lahko vplivajo na rezultate. Zato je pri primerjavi treba rezultate obravnavati previdno in upoštevati metodološki okvir posamezne raziskave. Kljub temu se v različnih študijah pojavljajo skupne ugotovitve, predvsem glede pomembnosti proizvodnje baterij, porabe energije, pridobivanja surovin ter možnosti zmanjšanja vplivov z recikliranjem in ponovno uporabo.

Na podlagi primerjave je mogoče ugotoviti, da ima največji potencial za zmanjšanje okoljskega bremena celovit pristop, ki vključuje vse faze življenjskega cikla. Pomembni ukrepi so zmanjševanje okoljskih vplivov pridobivanja in predelave surovin, učinkovitejša proizvodnja baterij, uporaba električne energije z manjšim ogljičnim odtisom, podaljšanje življenjske dobe, ponovna uporaba baterij ter razvoj učinkovitejših postopkov recikliranja.

Tabela 10: Primerjalna analiza LCA-študij o litij-ionskih baterijah

Št.	Avtor, leto	Fokus študije	Glavni vplivi LCA	Obravnavani postopek recikliranja	Ključna ugotovitev
1	Notter et al., 2010	LCA baterije za električna vozila	Proizvodnja katodnih materialov	Hidrometalurgija, pirometalurgija, neposredna reciklaža	Pomemben delež vplivov nastane pri proizvodnji baterije.
2	Dunn et al., 2012	LCA in recikliranje	Predelava in recikliranje	Hidrometalurgija	Recikliranje lahko zmanjša porabo primarnih surovin in okoljske vplive.
3	Hao et al., 2013	Uporaba električnih vozil in električna energija	Energetski miks	Hidrometalurgija, neposredna reciklaža	Vir električne energije pomembno vpliva na okoljski odtis uporabe baterij.
4	Peters et al., 2013	Primerjava baterijskih sistemov	Poraba energije in proizvodnja	Hidrometalurgija	Proizvodnja baterij predstavlja pomemben del njihovega okoljskega odtisa.
5	Zeng et al., 2014	Recikliranje baterijskih surovin	Pridobivanje kovin	Hidrometalurgija	Recikliranje zmanjšuje potrebo po primarnem pridobivanju surovin.
6	Notter et al., 2014	Proizvodnja baterijskih celic	Sinteza elektrod in proizvodnja	Hidrometalurgija	Izboljšanje proizvodnih procesov lahko zmanjša okoljske vplive.
7	Hao et al., 2014	Faza uporabe električnih vozil	Poraba električne energije	Hidrometalurgija, neposredna reciklaža	Čistejši viri električne energije zmanjšujejo okoljski vpliv uporabe.
8	Peters et al., 2016	Primerjava in pregled LCA študij	Metodološke razlike	Hidrometalurgija	Razlike v metodologijah otežujejo neposredno primerjavo rezultatov.
9	Gaines, 2017	Recikliranje litij-ionskih baterij	Energijska zahtevnost	Hidrometalurgija	Učinkovitost recikliranja je odvisna od uporabljenega postopka in vhodnih materialov.
10	Harper et al., 2018	Recikliranje baterijskih materialov	Vračanje kovin	Hidrometalurgija	Recikliranje omogoča pridobivanje pomembnih materialov za nadaljnjo uporabo.
11	Wang et al., 2018	Kombinirani postopki recikliranja	Ločevanje in pridobivanje kovin	Pirometalurgija in hidrometalurgija	Kombiniranje postopkov lahko izboljša izkoristek materialov.

12		Kallitsis et al., 2019	Baterijski sklopi in konec življenjske dobe	Proizvodnja in konec življenjske dobe	Neposredna regeneracija	Neposredna regeneracija ima potencial za zmanjšanje porabe energije in materialov.
13		Lv et al., 2020	Primerjava reciklažnih poti	Proizvodnja in recikliranje	Hidrometalurgija, neposredna reciklaža	Recikliranje lahko zmanjša vplive v primerjavi s primarno proizvodnjo materialov.
14		Rajaeifar et al., 2021	Pirometalurško recikliranje	Recikliranje baterij	Pirometalurgija	Postopek je robusten, vendar energetsko zahteven.
15		Mohr et al., 2021	Napredna hidrometalurgija	Vračanje kovin	Hidrometalurgija	Hidrometalurški postopki so posebej učinkoviti pri pridobivanju kovin iz nekaterih baterijskih kemij.
16		Arshad et al., 2022	Pregled LCA baterij	Proizvodnja in uporaba	Hidrometalurgija, neposredna reciklaža	Proizvodnja predstavlja pomemben vir okoljskih vplivov.
17		Shen et al., 2023	Neposredna reciklaža baterij električnih vozil	Regeneracija katodnih materialov	Neposredna reciklaža	Neposredna reciklaža ima velik potencial za razvoj krožnega gospodarstva.
18		Zhang et al., 2025	LCA recikliranja baterij	Recikliranje in poraba energije	Hidrometalurgija, neposredna reciklaža	Sodobnejši postopki lahko zmanjšajo okoljske vplive recikliranja.

Vir: Lastna izdelava na podlagi analiziranih LCA-študij.

4.3 Omejitve primerjave obstoječih LCA-študij

Pri primerjavi obstoječih LCA-študij je treba upoštevati določene omejitve. Posamezne raziskave so bile izvedene z različnimi nameni in na podlagi različnih metodoloških predpostavk. Razlikujejo se lahko glede sistemskih meja, funkcionalnih enot, obravnavanih baterijskih tehnologij, virov podatkov, lokacije proizvodnje, uporabljenega energetskega miksa in predpostavljene življenjske dobe baterije.

Razlike se pojavljajo tudi pri obravnavi konca življenjske dobe. Nekateri raziskave vključujejo recikliranje, druge ga obravnavajo bolj omejeno ali uporabljajo drugačne predpostavke glede učinkovitosti pridobivanja materialov. Podobno velja za drugo življenjsko dobo baterij, ki v starejših raziskavah pogosto ni bila vključena oziroma je bila obravnavana drugače kot v novejših raziskavah.

Zaradi navedenih razlik rezultatov ni mogoče obravnavati kot popolnoma neposredno primerljivih številčnih vrednosti. Namen primerjave v tej magistrski nalogi je zato predvsem ugotoviti skupne ugotovitve različnih raziskav, prepoznati ključne vire okoljskih obremenitev ter oceniti pomen posameznih ukrepov za zmanjševanje okoljskega bremena litij-ionskih baterij.

Kljub metodološkim razlikam primerjava omogoča oblikovanje širše slike o okoljskih vplivih litij-ionskih baterij. Posebej pomembne so ugotovitve, ki se ponavljajo v več raziskavah, saj lahko kažejo na dejavnike, ki imajo pomembno vlogo ne glede na posamezne metodološke odločitve.

4.4 Rezultati in ugotovitve primerjave LCA-študij

Analiza obravnavanih LCA-študij potrjuje, da je proizvodna faza litij-ionskih baterij praviloma ena izmed najpomembnejših faz z vidika okoljskih obremenitev. Največji vplivi so povezani predvsem s pridobivanjem in predelavo surovin ter proizvodnjo katodnih materialov. Pomembno vlogo imajo litij, nikelj, kobalt in mangan, katerih pridobivanje je povezano s porabo energije in vode, emisijami ter posegi v prostor in ekosisteme. Na okoljski vpliv proizvodnje pomembno vpliva tudi vir električne energije, saj imajo baterije, proizvedene z uporabo električne energije iz fosilnih virov, praviloma večji ogljični odtis kot baterije, proizvedene z uporabo nizkoogljičnih virov.

Faza uporabe ima drugačen vplivni profil. Pri električnih vozilih med vožnjo ne nastajajo neposredne emisije iz izpušnega sistema, vendar je okoljski vpliv povezan predvsem s proizvodnjo električne energije, ki se uporablja za polnjenje baterije. Zato lahko enaka baterija oziroma električno vozilo v okolju z večjim deležem nizkoogljičnih virov povzroča manjše emisije kot v okolju, kjer električna energija temelji predvsem na fosilnih gorivih. Na vplive v fazi uporabe vplivajo tudi učinkovitost sistema, način uporabe, število ciklov in življenjska doba baterije.

Pomembna ugotovitev analiziranih študij je tudi vpliv življenjske dobe baterij. Daljša življenjska doba omogoča, da se materiali in energija, vloženi v proizvodnjo baterije, izkoristijo skozi daljše obdobje oziroma večje število ciklov. S tem se lahko zmanjša potreba po proizvodnji novih baterij in povezane okoljske obremenitve. Na življenjsko dobo vplivajo predvsem temperatura, način polnjenja in praznjenja, število ciklov ter način uporabe.

Pomemben del življenjskega cikla predstavlja tudi konec življenjske dobe baterij. Recikliranje omogoča pridobivanje materialov, ki jih je mogoče ponovno uporabiti, in s tem zmanjšuje potrebo po primarnem pridobivanju surovin. Med posameznimi postopki recikliranja obstajajo pomembne razlike. Pirometalurgija omogoča obdelavo različnih vhodnih materialov in večjih količin baterij, vendar zahteva veliko energije. Hidrometalurgija omogoča pridobivanje posameznih kovin z visoko čistostjo, vendar vključuje uporabo kemičnih reagentov in nastajanje odpadnih raztopin. Neposredna regeneracija aktivnih materialov lahko zmanjša število procesnih korakov in porabo energije, vendar je njena uporaba odvisna od kemijske sestave in stanja baterij.

Na možnosti recikliranja vpliva tudi kemijska sestava baterije. NMC, NCA in LFP se razlikujejo po vsebnosti posameznih elementov, zato se razlikujejo tudi postopki in ekonomska upravičenost recikliranja. Pri baterijah NMC in NCA je zaradi vsebnosti niklja, kobalta in drugih kovin pridobivanje materialov lahko pomemben del reciklažnega procesa, medtem ko imajo LFP baterije drugačno sestavo in s tem drugačne možnosti recikliranja.

Analizirane študije izpostavljajo tudi možnost druge življenjske dobe baterij. Baterija, ki po uporabi v električnem vozilu ni več primerna za zagotavljanje zahtevanega dosega, je lahko še vedno uporabna v manj zahtevnih aplikacijah, na primer za stacionarno shranjevanje električne energije. Ponovna uporaba lahko podaljša življenjsko dobo baterije in izboljša izkoristek materialov, vendar je njena okoljska korist odvisna od stanja baterije, potrebne predelave, transporta in zahtev nove uporabe. Druga življenjska doba zato ne nadomešča recikliranja, temveč mu lahko sledi, ko baterija ni več primerna za nadaljnjo uporabo.

Pri primerjavi LCA-študij je treba upoštevati tudi metodološke razlike. Raziskave uporabljajo različne systemske meje, funkcionalne enote, podatkovne zbirke in predpostavke glede življenjske dobe, proizvodnje električne energije, transporta in recikliranja. Zaradi tega neposredna primerjava posameznih številčnih rezultatov ni vedno primerna. Kljub razlikam pa je mogoče prepoznati skupne ugotovitve, predvsem pomemben vpliv proizvodne faze, surovin in vira električne energije ter možnosti zmanjšanja okoljskega bremena z daljšo življenjsko dobo, ponovno uporabo in učinkovitim recikliranjem.

Na podlagi primerjave je mogoče zaključiti, da zmanjševanje okoljskega bremena litij-ionskih baterij zahteva celovit pristop skozi celoten življenjski cikel. Pomembni ukrepi so izboljšanje proizvodnih postopkov, uporaba nizkoogljičnih virov energije, zmanjševanje uporabe primarnih surovin, podaljševanje življenjske dobe, ponovna uporaba ter učinkovito recikliranje. Pomembna je tudi zasnova baterij, ki omogoča lažjo demontažo, popravilo, ponovno uporabo in ločevanje materialov. LCA-študije pri tem omogočajo prepoznavanje faz z največjimi vplivi in ocenjevanje možnosti za njihovo zmanjšanje.

Vir: Lastna analiza in primerjava izbranih LCA-študij.

5 EMPIRIČNI DEL RAZISKAVE

Empirični del magistrskega dela predstavlja nadgradnjo teoretičnega dela in analize literature ter omogoča preverjanje ugotovitev o okoljskih vplivih litij-ionskih baterij v praksi. Medtem ko teoretični del temelji na pregledu znanstvene in strokovne literature ter analizi življenjskega cikla baterij, empirični del temelji na pridobivanju in analizi podatkov iz različnih primarnih in sekundarnih virov.

Empirični del magistrskega dela dopolnjuje teoretični pregled in analizo življenjskega cikla litij-ionskih baterij. Namenjen je preverjanju ugotovitev v praksi ter razumevanju okoljskih in varnostnih vidikov baterij na podlagi podatkov iz realnega okolja. Pri tem so bili uporabljeni različni primarni in sekundarni viri, ki omogočajo celovitejši vpogled v obravnavano problematiko.

V raziskavi so bile uporabljene štiri metode:

- Analiza internih strokovnih študij in industrijskih smernic: pregled petih tehničnih poročil podjetja, ki se ukvarja s predelavo odpadnih baterij v Sloveniji. Analiza omogoča vpogled v dejanske tehnološke postopke, izkoristke materialov ter okoljske in ekonomske parametre recikliranja.
- Strokovni intervju: poglobljen pogovor s predstavnikom podjetja iz baterijske industrije. Namen intervjuja je bil pridobiti strokovni pogled na izzive proizvodnje, uporabe, druge življenjske dobe in recikliranja litij-ionskih baterij.
- Spletni anketni vprašalnik: namenjen analizi znanja, ravnanja in odnosa uporabnikov do izrabljenih baterij ter pravilnega ravnanja z njimi.
- Analiza praktičnega primera (vžig električnega vozila): pregled strokovnega članka o nadzorovanem vžigu električnega vozila v Sloveniji. Primer dopolnjuje raziskavo z vidika varnostnih tveganj, povezanih s požari baterijskih sistemov.

5.1 Analiza internih strokovnih študij in tehnoloških smernic iz industrije recikliranja

V okviru empiričnega dela raziskave je bila izvedena analiza petih internih strokovnih študij in tehničnih poročil vodilnega podjetja s področja predelave odpadnih baterij. Namen analize je soočiti teoretične modele z realnimi tehnološkimi, okoljskimi in ekonomskimi parametri, ki veljajo v industrijski praksi. Ugotovitve obravnavajo celoten krog ravnanja z odpadnimi baterijami: od vrednotenja baterij kot sekundarnih virov surovin ter primerjave tehnoloških postopkov in izkoristkov do metodoloških izzivov pri določanju učinkovitosti procesov in analize masovnih tokov potrošniških baterij.

5.1.1 Odpadne baterije kot sekundarni viri kritičnih surovin

Prva analiza (*Interni strokovni dokument 1: Altbatterien als sekundäre Rohstoffressourcen*) obravnava izrabljene litij-ionske baterije kot hitro rastoč tok nevarnih odpadkov, ki pa hkrati predstavljajo izjemno pomemben vir sekundarnih surovin. Zaradi naraščajočih količin odpadnih baterij na trgu Evropske unije postaja recikliranje kritičnih kovin, kot so nikelj (Ni), kobalt (Co), mangan (Mn) in litij (Li), ključno za zmanjševanje uvozne odvisnosti in zapiranje snovnih krogov.

Primerjava primarnih kemijskih sestav (NMC, NCA, LFP) izpostavlja, da izbira tehnologije recikliranja neposredno vpliva na celotni okoljski odtis. Pri tem izstopa hidrometalurški pristop, ki v primerjavi s primarno pridobivalno industrijo omogoča do 55-odstotno znižanje emisij CO₂. Kljub okoljskim prednostim pa interni podatki opozarjajo na specifična varnostna tveganja pri ravnanju z izrabljenimi baterijami, predvsem na nevarnost termičnega pobega, sproščanje strupenega fluorovodika (HF) in ustrezno ravnanje z organskimi elektroliti.

5.1.2 Tehnični in okoljski vidiki mehanske ter hidrometalurške predelave

Poglobitev v tehnične faze obdelave (*Interni strokovni dokument 2: Rückgewinnung: Hydrometallurgische und mechanische Verfahren*) prikazuje potek mehanske predobdelave, ki vključuje nadzorovano demontažo, inertizacijo, drobljenje ter ločevanje frakcij za pridobivanje t. i. črne mase (*black mass*). V nadaljnji hidrometalurški fazi (izluževanje s kislinami, ekstrakcija s topili in precipitacija) so doseženi industrijski izkoristki med 90 % in 98 % za Ni, Co in Mn ter med 70 % in 90 % za Li.

Analiza pa opozarja na pogosto spregledane okoljske vplive tehničnih stranskih produktov. Hidrometalurški procesi namreč ustvarjajo znatne količine industrijskih odpadnih voda, ki vsebujejo fluoridne spojine. Učinkovita obdelava teh odpadnih voda in nevtralizacija stranskih produktov sta zato ključni za celostno pozitivno oceno vplivov na okolje (LCA).

5.1.3 Metodološki izzivi pri definiranju učinkovitosti

Pri primerjavi podatkov iz literature in industrijske prakse prihaja do znatnih odstopanj zaradi nepoenotnih definicij učinkovitosti (*Interni strokovni dokument 3: The Complexity of Defining Recycling Efficiencies*). V praksi se pogosto mešajo pojmi masne učinkovitosti, funkcionalne učinkovitosti in čistosti pridobljenih produktov.

Za objektivno vrednotenje se v industriji predlaga standardizacija pojma funkcionalna učinkovitost recikliranja (*functional recycling efficiency*). Ta kazalnik ne meri le skupne mase predelanega materiala, temveč delež kovin, ki se dejansko vrnejo v proizvodni krog z ustrezno stopnjo čistosti za ponovno uporabo v baterijski industriji. Taka metodološka opredelitev je bistvena za pravilno interpretacijo LCA-kazalnikov in spremljanje ciljev nove uredbe EU o baterijah.

5.1.4 Analiza masovnih tokov potrošniških (alkalnih) baterij

Za zagotovitev širšega vpogleda v celotni sistem ravnanja z odpadnimi baterijami so bili analizirani tudi podatki o predelavi masovnih tokov potrošniških alkalnih baterij (*Interni strokovni dokument 4: Recycling Efficiency of Alkaline Batteries*). Ti tokovi predstavljajo stabilen, a ekonomsko manj privlačen del reciklažne panoge.

Doseženi izkoristki materialov pri alkalnih baterijah znašajo nad 90 % za železo (Fe), med 60 % in 80 % za cink (Zn) ter med 40 % in 60 % za mangan (Mn). Zaradi nizke tržne vrednosti vhodnih kovin je recikliranje alkalnih baterij primarno vodeno z zakonodajnimi zahtevami za preprečevanje odlaganja odpadkov, kar predstavlja pomemben kontrast ekonomsko vzdržnejšemu recikliranju visoko vrednih Li-ion baterij.

5.1.5 Primerjalna analiza tehnologij recikliranja li-ion

Za vrednotenje industrijske učinkovitosti je bila izvedena primerjalna analiza treh osrednjih tehnoloških usmeritev: pirometalurgije, hidrometalurgije in direktnega recikliranja (*Interni strokovni dokument 5: Comparative Study of Lithium-Ion Battery Recycling Processes*).

- Pirometalurški procesi: Predstavljajo robustno in industrijsko zrelo tehnologijo, vendar so energijsko izjemno potratni. Njihova glavna pomanjkljivost je nizek snovni izkoristek, saj se litij in aluminij izgubita v žlindri ter ju s tem postopkom ni mogoče ponovno uporabiti.
- Hidrometalurški procesi: Zagotavljajo najvišje stopnje izkoristka in visoko čistost pridobljenih produktov. Omogočajo zajem 90–98 % niklja, kobalta in mangana ter visoke stopnje ekstrakcije litija ob znatno nižji energijski intenzivnosti v primerjavi s pirometalurgijo.
- Direktno recikliranje: Predstavlja najnaprednejši pristop, saj ohranja kristalno strukturo katodnih materialov. Ta postopek izkazuje najnižji ogljični in energijski odtis, vendar je njegova industrijska aplikativnost trenutno še omejena glede na hitro spreminjajoče se kemijske sestave baterijskih celic.

Namen empiričnega dela je povezati strokovne ugotovitve iz industrije, tehnične podatke o industrijski predelavi, vedenje uporabnikov ter praktične primere varnostnih tveganj in tako celovito prikazati problematiko celotnega življenjskega cikla litij-ionskih baterij.

5.1.6 Primerjalna študija postopkov recikliranja litij-ionskih baterij

Članek primerja tri glavne postopke recikliranja litij-ionskih baterij: pirometalurški, hidrometalurški in direktno recikliranje. Pirometalurški procesi so robustni, vendar energijsko potratni in ne zajamejo litija. Hidrometalurški postopki omogočajo najvišje izkoristke (90–98 % Ni/Co/Mn) ter visoko čistost produktov. Direktno recikliranje ohranja kristalno strukturo katodnih materialov in ima najnižji energijski odtis.

Povzetki internih strokovnih dokumentov omogočajo vpogled v industrijske prakse ravnanja z odpadnimi baterijami ter dopolnjujejo teoretična izhodišča magistrske naloge. Informacije so uporabljene izključno v anonimizirani obliki in služijo kot podpora empiričnemu delu raziskave.

Vsi povzetki temeljijo na internih strokovnih dokumentih podjetja, ki zaradi zaupnosti niso javno dostopni.

5.2 Intervju s predstavnikom podjetja

V okviru empiričnega dela je bil izveden strokovni intervju s predstavnikom podjetja, ki deluje na področju baterijske industrije. Zaradi varovanja poslovnih podatkov identiteta podjetja in intervjuvanca nista razkriti. Sogovornik je strokovno povezan s področjem baterijskih sistemov, zato lahko poda pomemben vpogled v tehnološke, organizacijske in okoljske izzive, povezane z ravnanjem z litij-ionskimi baterijami.

Izveden je bil strokovni intervju, pri katerem so bila vprašanja predhodno pripravljena, vendar je imel sogovornik možnost dodatnih pojasnil in poglobljenih odgovorov. Takšen način intervjuvanja omogoča pridobitev strokovnih informacij, hkrati pa dopušča širšo obravnavo posameznih tem, ki se pojavijo med pogovorom.

Intervju je obravnaval naslednja področja:

- razvoj in stanje baterijske industrije,
- vpliv proizvodnje baterij na okolje,
- možnosti ponovne uporabe baterij (second-life),
- postopke recikliranja,
- težave pri zbiranju in obdelavi izrabljenih baterij,
- stanje infrastrukture in strokovnega znanja v Sloveniji.

Intervju je potekal v dveh delih:

- zvočno snemani del, ki je bil po izvedbi prepisan in vsebinsko analiziran,
- dodatni ustni del pogovora, ki je bil zabeležen s sprotnimi zapiski.

Pri analizi intervjuja so bili upoštevani vsi deli pogovora, vendar je bil zaradi varovanja zasebnosti zapis združen v enotno vsebinsko celoto. Posamezni govorci v prepisu niso ločeno predstavljeni, saj dodatni udeleženec ni predstavljal samostojnega intervjuvanca, temveč je bil del pogovora.

Prepis intervjuja je zaradi preglednosti in dokazovanja izvedene raziskave vključen v Prilogo 3.

5.2.1 Povzetek intervjuja

Analiza intervjuja je pokazala več pomembnih ugotovitev, ki osvetljujejo trenutno stanje na področju baterijske industrije ter ravnanja z izrabljenimi litij-ionskimi baterijami.

Intervjuvanec je poudaril, da ima Kitajska prevladujočo vlogo v celotni vrednostni verigi baterij, od pridobivanja surovin in proizvodnje baterijskih celic do razvoja tehnologij recikliranja. Zaradi razvite industrijske infrastrukture, dostopa do surovin in povezanosti posameznih faz proizvodnje ima pomembno konkurenčno prednost pred Evropo in Združenimi državami Amerike.

Kot pomembna možnost zmanjšanja okoljskega vpliva baterij je bila izpostavljena ponovna uporaba oziroma druga življenjska doba baterij (angl. second-life). Baterije, ki niso več primerne za uporabo v električnih vozilih, se lahko uporabijo v manj zahtevnih aplikacijah, predvsem za stacionarno shranjevanje električne energije. Pri tem ostajajo pomembni izzivi ugotavljanja dejanskega stanja baterije, pomanjkanje podatkov o njeni zgodovini uporabe, varnost ter stroški testiranja in prilagoditve.

Na področju recikliranja je bilo ugotovljeno, da so postopki tehnološko zahtevni, energetsko intenzivni in pogosto tudi ekonomsko zahtevni. Poseben izziv predstavlja učinkovito pridobivanje posameznih materialov, predvsem litija, ter zagotavljanje ustrezne kakovosti sekundarnih surovin.

Pomemben problem predstavlja tudi pomanjkanje sledljivosti baterij skozi njihov življenjski cikel. Podatki o številu polnilnih ciklov, načinu uporabe, stanju posameznih celic in drugih pomembnih parametrih bi lahko olajšali odločanje o nadaljnji uporabi, ponovni uporabi ali recikliranju baterij.

Posebej je bila izpostavljena situacija v Sloveniji, kjer po mnenju intervjuvanca primanjkuje ustrezne infrastrukture, specializiranih laboratorijev in strokovnega kadra za diagnostiko ter obdelavo izrabljenih baterij.

Ugotovitve intervjuja se ujemajo s spoznanji teoretičnega dela, predvsem glede pomembnega okoljskega vpliva proizvodnje baterij ter potrebe po učinkovitejšem sistemu ponovne uporabe, sledljivosti in recikliranja. Intervju tako dodatno potrjuje pomen celostnega pristopa k ravnanju z baterijami skozi njihov celotni življenjski cikel.

5.2.2 Analiza rezultatov anketnega vprašalnika

Anketni vprašalnik predstavlja kvantitativni del empiričnega raziskovanja in dopolnjuje ugotovitve strokovnega intervjuja. Spletna anketa je bila izvedena v orodju 1KA in je zajemala 28 vprašanj. Sodelovalo je 138 anketirancev. Namen ankete je bil ugotoviti poznavanje pravilnega ravnanja z izrabljenimi baterijami, navade pri njihovem zbiranju, zaznavanje okoljskih tveganj ter pripravljenost za sodelovanje v sistemih vračanja in recikliranja.

Demografski podatki

V vzorcu je bilo 71 % žensk in 29 % moških. Največji delež predstavljajo anketiranci stari med 26 in 40 let. Večina ima visokošolsko izobrazbo, kar omogoča osnovni vpogled v strukturo sodelujočih.

Znanje in navade

Rezultati kažejo visoko stopnjo osnovnega poznavanja pravilnega ravnanja z baterijami. Kar 97 % anketirancev ve, kam je treba baterije pravilno odložiti, najpogosteje v zbirne posode v trgovinah. Kljub temu ravnanje ni vedno dosledno: 73 % baterije vedno pravilno odlaga, 21 % občasno, 6 % pa nepravilno. To kaže na razliko med znanjem in dejanskim vedenjem.

Zavedanje okoljskih tveganj

Večina anketirancev (97 %) meni, da so izrabljene baterije škodljive za okolje. Podrobnejše poznavanje vplivov je nižje, saj jih 40 % problematiko pozna dobro, 52 % pa delno. Dostopnost zbirnih mest je večina ocenila kot povprečno, kar vpliva na dejansko ravnanje.

Informiranost in motivacija

Približno polovica anketirancev meni, da bi ob dodatnih informacijah ravnala še bolj odgovorno. Večina uporablja baterije vsak dan, prevladujejo baterije za enkratno uporabo. Skoraj polovica anketirancev meni, da je informacij o pravilnem ravnanju premalo. Kot najpogostejši vir informacij navajajo internet in družbena omrežja.

Pripravljenost za sodelovanje

Podpore programom vračanja baterij je izrazilo 80 % anketirancev, uvedbi kavcijskega sistema pa 92 %. Večina podpira tudi obvezno vračanje baterij v trgovinah in strožjo ureditev področja. Približno tretjina bi bila pripravljena plačati višjo ceno baterij, če bi to izboljšalo recikliranje.

Sklep ankete

Rezultati ankete kažejo visoko stopnjo osnovnega poznavanja pravilnega ravnanja z izrabljenimi baterijami, vendar tudi razliko med znanjem in dejanskim vedenjem. Dostopnost zbirnih mest in pomanjkanje informacij sta pomembna dejavnika, ki vplivata na ravnanje uporabnikov. Anketiranci podpirajo sistemske ukrepe, kot so kavcijski sistem, več zbirnih mest in boljše informiranje. Za izboljšanje ravnanja z izrabljenimi baterijami je poleg ozaveščanja treba zagotoviti ustrezno infrastrukturo in jasne informacije.

Grafični prikazi rezultatov so vključeni v Prilogo 3.

5.3 Strokovni članek: nadzorovani vžig električnega vozila (Ljubečna pri Celju)



Slika 24: Prikaz nadzorovanega vžiga električnega avtomobila (vir <https://www.blog.uporabnastran.si/2025/09/22/prvi-nadzorovan-vzig-elektricnega-avtomobila-v-sloveniji-razkril-tveganja-in-resitve-pri-gasenju-tovrstnih-pozarov/>)

5.3.1 Opis strokovnega članka: nadzorovani vžig električnega vozila

Kot tretji del empiričnega raziskovanja je bila izvedena analiza strokovnega članka, ki opisuje prvi nadzorovani vžig električnega vozila v Sloveniji. Dogodek je bil izveden v Centru varne vožnje na Ljubečni pri Celju z namenom prikaza značilnosti požara električnega vozila ter proučevanja tveganj, povezanih z litij-ionskimi baterijami.

Analiza strokovnega članka dopolnjuje ugotovitve intervjuja in ankete, saj se osredotoča na varnostni vidik uporabe baterij. Pri požarih električnih vozil predstavljajo največji izziv pojav termičnega pobega, visoke temperature, sproščanje nevarnih plinov in možnost ponovnega vžiga baterijskega sklopa.

5.3.2 Ključne ugotovitve strokovnega članka

Članek opisuje nadzorovani vžig električnega vozila, pri katerem so strokovnjaki spremljali razvoj požara litij-ionske baterije in preverjali postopke gašenja.

Pri poskusu je bilo prikazano, kako se ob poškodbi ali pregrevanju baterijskih celic sproži proces termičnega pobega. Pri tem pride do hitrega sproščanja energije, povečanja temperature in širjenja reakcije med posameznimi celicami.

Dogodek je pokazal, da požari električnih vozil predstavljajo poseben izziv za gasilske enote, saj baterije lahko tudi po začetnem ugašanju ponovno zagorijo. Zato so potrebni dolgotrajno hlajenje, posebni postopki posredovanja in ustrezna zaščitna oprema.

Članek poudarja tudi pomen preventivnih ukrepov, ustreznega ravnanja z baterijami ter izobraževanja uporabnikov in intervencijskih služb.

5.3.3 Povezava z okoljskimi vplivi baterij

Primer nadzorovanega vžiga električnega vozila potrjuje, da litij-ionske baterije predstavljajo poleg okoljskih tudi varnostne izzive. Ob požaru lahko pride do sproščanja nevarnih plinov, ostankov elektrolitov in drugih kemičnih snovi, ki lahko vplivajo na okolje.

Dogodek dopolnjuje ugotovitve teoretičnega dela, kjer so bila izpostavljena tveganja, povezana z nepravilnim ravnanjem, poškodbami in neustreznim skladiščenjem baterij.

Trajnostno upravljanje baterij zato ne vključuje samo recikliranja materialov, ampak tudi razvoj varnejših baterijskih sistemov, preprečevanje nesreč in zagotavljanje ustreznih varnostnih postopkov.

Analiza strokovnega članka je pokazala, da litij-ionske baterije predstavljajo pomembne varnostne izzive, predvsem zaradi možnosti termičnega pobega, ponovnega vžiga in sproščanja nevarnih snovi.

Primer potrjuje, da mora biti pri upravljanju baterij poleg okoljskih vidikov upoštevana tudi varnost skozi celoten življenjski cikel. Razvoj učinkovitejših varnostnih sistemov, boljše usposabljanje in ustrezna infrastruktura so ključni za zmanjšanje tveganj.

6 RAZPRAVA IN SKLEPI

Raziskava je pokazala, da litij-ionske baterije ostajajo osrednja tehnologija električne mobilnosti in sodobnih energetskega sistemov. Njihove ključne prednosti so visoka energijska gostota, dolga življenjska doba, stabilno delovanje in široka uporabnost. Zaradi teh lastnosti pomembno prispevajo k elektrifikaciji prometa in razvoju nizkoogljičnih energetskega rešitev. Hkrati pa celoten življenjski cikel vključuje okoljske in varnostne izzive, ki zahtevajo celovit pristop.

Primerjava kemijskih sestav je pokazala jasne razlike med NMC, NCA in LFP baterijami. NMC in NCA ponujata višjo energijsko gostoto, kar je pomembno pri električnih vozilih, kjer sta masa in doseg ključna dejavnika. LFP izstopa po večji termični stabilnosti, varnosti in daljši življenjski dobi, zato je primerna za stacionarne sisteme shranjevanja energije. Razlike v uporabi kritičnih surovin (kobalt, nikelj) dodatno vplivajo na okoljski odtis posamezne kemije.

Pregled alternativnih tehnologij je pokazal, da natrij-ionske baterije postajajo pomembna možnost predvsem zaradi večje razpoložljivosti surovin in nižjih stroškov. Čeprav trenutno ne dosegajo energijske gostote litij-ionskih baterij, so zaradi stabilnosti in manjšega okoljskega odtisa primerne za stacionarne aplikacije. Razvoj baterij s trdnim elektrolitom kaže na usmeritev v večjo varnost, manjšo možnost požara ter daljšo življenjsko dobo.

Varnostni vidiki ostajajo pomemben del razprave. Tveganja so povezana z mehanskimi poškodbami, prekomernim polnjenjem, visokimi temperaturami in notranjimi kratkimi stiki. Termični pobeg je najresnejši pojav, ki lahko povzroči požar ali eksplozijo. Učinkoviti sistemi upravljanja baterije tveganja zmanjšujejo, vendar jih ne morejo popolnoma odpraviti.

Z vidika okoljske trajnosti se največje obremenitve pojavljajo v fazah pridobivanja surovin in proizvodnje baterij. Pridobivanje litija, niklja in kobalta je povezano z visoko porabo energije, emisijami in posegi v okolje. V fazi uporabe se vplivi zmanjšajo, zlasti ob uporabi električne energije iz nizkoogljičnih virov. Pomembno vlogo ima ravnanje z izrabljenimi baterijami, saj nepravilno odlaganje lahko povzroči onesnaženje tal in voda ter poveča tveganje požarov. Učinkoviti sistemi zbiranja, skladiščenja in recikliranja omogočajo vračanje dragocenih materialov v proizvodni proces. Druga življenjska doba baterij dodatno podaljša njihovo uporabnost in zmanjšuje količino odpadkov.

Empirični del je pokazal razkorak med strokovnim razumevanjem tveganj in poznavanjem problematike med uporabniki. Intervju je izpostavil izzive pri gašenju požarov električnih vozil, pomen varnega ravnanja ter potrebo po razvoju reciklažnih tehnologij. Rezultati ankete pa kažejo, da uporabniki poznajo osnovna pravila, vendar jih ne upoštevajo vedno dosledno. To potrjuje potrebo po dodatnem ozaveščanju, jasnih navodilih in dostopnih zbirnih mestih.

Skupna ugotovitev razprave je, da bo trajnostni razvoj baterijskih tehnologij odvisen od izboljšanja proizvodnih postopkov, večje uporabe recikliranih materialov, razvoja varnejših kemij ter učinkovitega sistema zbiranja, ponovne uporabe in recikliranja. Pomembno vlogo bodo imeli zakonodaja, infrastruktura, mednarodno sodelovanje in ozaveščanje uporabnikov.

6.1 Preverjanje hipotez in ključne ugotovitve

H1: Izrabljene litij-ionske baterije negativno vplivajo na okolje zaradi sproščanja težkih kovin in elektrolitov.

Ugotovitve potrjujejo, da nepravilno ravnanje z izrabljenimi baterijami lahko povzroči onesnaženje tal in voda ter poveča tveganje požarov. Učinkovito zbiranje in recikliranje sta ključna za zmanjšanje teh vplivov. H1 je potrjena.

H2: Trajnostne rešitve v proizvodnji zmanjšujejo okoljske vplive izrabljenih baterij.

Analiza kaže, da uporaba recikliranih materialov, zmanjšanje kritičnih surovin, izboljšanje energijske učinkovitosti in razvoj novih kemij zmanjšujejo okoljske obremenitve. Intervju dodatno potrjuje pomen tehnološkega razvoja in sledljivosti materialov. H2 je potrjena.

H3: Večja ozaveščenost izboljša pravilno ravnanje z izrabljenimi baterijami.

Rezultati ankete kažejo, da uporabniki poznajo osnovna pravila, vendar jih ne upoštevajo vedno. Dodatne informacije, jasna navodila in dostopna zbirna mesta bi izboljšali pravilno ravnanje. H3 je potrjena.

Sklep preverjanja hipotez

Preverjanje hipotez potrjuje, da so okoljski vplivi litij-ionskih baterij prisotni v vseh fazah življenjskega cikla. Za njihovo zmanjšanje je potreben celovit pristop, ki vključuje tehnološki razvoj, trajnostno proizvodnjo, zmanjšanje uporabe kritičnih surovin, podaljševanje življenjske dobe, ponovno uporabo in učinkovito recikliranje. Pomembno vlogo ima tudi ravnanje uporabnikov, saj ustrezna ozaveščenost in dostopnost zbirnih mest pomembno vplivata na pravilno ravnanje z izrabljenimi baterijami. Vse tri hipoteze so bile potrjene, kar predstavlja podlago za oblikovanje ukrepov za zmanjšanje okoljskega bremena izrabljenih litij-ionskih baterij.

7 POVZETEK

Magistrsko delo obravnava okoljske, tehnološke in varnostne vidike rabljenih litij-ionskih baterij, ki zaradi hitre rasti električne mobilnosti postajajo pomemben izziv sodobne družbe. Predstavljene so osnovne značilnosti litij-ionskih baterij, njihova sestava, delovanje ter mehanizmi staranja, ki vodijo do zmanjšanja kapacitete in nastanka odpadnih baterijskih sistemov. Analizirani so okoljski vplivi nepravilnega ravnanja, vključno z izpusti nevarnih snovi, tveganji za tla, vodo in zrak ter porabo kritičnih surovin.

Osrednji del naloge obravnava postopke zbiranja, skladiščenja, mehanske obdelave in naprednih tehnologij recikliranja. Podrobno so predstavljeni hidrometalurški in pirometalurški postopki ter njihove prednosti, omejitve in vloga pri pridobivanju litija, kobalta, niklja in grafita. Obravnavan je tudi koncept druge življenjske dobe baterij, ki omogoča ponovno uporabo izrabljenih baterij v stacionarnih energetske sistemih ter prispeva k zmanjšanju količine nevarnih odpadkov.

Delo vključuje pregled zakonodaje Evropske unije in Slovenije ter izpostavlja pomen standardizacije, sledljivosti in odgovornosti proizvajalcev. Ugotovitve kažejo, da kombinacija učinkovitega zbiranja, naprednih reciklažnih tehnologij, ponovne uporabe baterij in ustrezne zakonodaje predstavlja ključno pot k zmanjšanju okoljskega bremena baterijske industrije ter podpira prehod v krožno gospodarstvo.

Ključne besede: litij-ionske baterije, recikliranje, okoljski vplivi, kritične surovine, druga življenjska doba

8 SUMMARY

The master's thesis examines the environmental, technological and safety aspects of used lithium-ion batteries, which are becoming an increasingly important challenge due to the rapid growth of electric mobility. It presents the fundamental characteristics of lithium-ion batteries, their structure, operation and ageing mechanisms that lead to capacity loss and the formation of waste battery systems. The environmental impacts of improper handling are analysed, including the release of hazardous substances, risks to soil, water and air, and the consumption of critical raw materials.

The central part of the thesis focuses on collection procedures, storage, mechanical pretreatment and advanced recycling technologies. Hydrometallurgical and pyrometallurgical processes are described in detail, including their advantages, limitations and their role in recovering lithium, cobalt, nickel and graphite. The concept of second-life applications is also discussed, enabling used batteries to be reused in stationary energy systems and reducing the amount of hazardous waste.

The thesis includes an overview of European Union and Slovenian legislation and highlights the importance of standardisation, traceability and producer responsibility. The findings show that a combination of efficient collection, advanced recycling technologies, second-life applications and appropriate regulation is essential for reducing the environmental burden of the battery industry and supporting the transition to a circular economy.

Keywords: lithium-ion batteries, recycling, environmental impacts, critical raw materials, second-life applications

9 ZAKLJUČEK

Litij-ionske baterije predstavljajo pomemben element razvoja električne mobilnosti in sodobnih energetskih rešitev. Zaradi visoke energijske gostote, učinkovitosti in možnosti široke uporabe omogočajo pomemben prispevek k zmanjševanju emisij v prometu ter podpori prehoda na nizkoogljično družbo. Kljub številnim prednostim pa njihov celotni življenjski cikel vključuje pomembne okoljske in varnostne izzive, ki jih je treba obravnavati celostno.

Magistrsko delo je pokazalo, da največje okoljske obremenitve niso povezane samo z uporabo baterij, temveč predvsem s pridobivanjem surovin, proizvodnjo baterijskih celic ter ravnanjem z baterijami po koncu njihove življenjske dobe. Pridobivanje kritičnih materialov, kot so litij, kobalt in nikelj, je povezano z velikimi energetskimi zahtevami in vplivi na okolje, zato so pomembni razvoj bolj trajnostnih proizvodnih postopkov, zmanjšanje uporabe omejenih surovin ter uvajanje alternativnih baterijskih tehnologij.

Pomemben dejavnik zmanjševanja okoljskega odtisa predstavlja učinkovito ravnanje z izrabljenimi baterijami. Ustrezno zbiranje, varno skladiščenje, ponovna uporaba in napredni postopki recikliranja omogočajo zmanjšanje količine nevarnih odpadkov ter vračanje dragocenih materialov nazaj v proizvodni cikel. S tem se zmanjšuje potreba po primarnem pridobivanju surovin in podpira razvoj krožnega gospodarstva na področju baterijskih tehnologij.

Rezultati raziskave so pokazali tudi pomen ozaveščenosti uporabnikov in odgovornega ravnanja z baterijskimi sistemi. Pravilno informiranje o varni uporabi, možnostih recikliranja in nevarnostih nepravilnega ravnanja lahko pomembno prispeva k zmanjšanju okoljskih in varnostnih tveganj. Poleg uporabnikov imajo pomembno vlogo tudi proizvajalci, zakonodajalci in strokovne institucije, ki s svojimi ukrepi vplivajo na razvoj bolj trajnostnega baterijskega sistema.

Na podlagi izvedene raziskave je mogoče zaključiti, da litij-ionske baterije kljub okoljskim in varnostnim izzivom ostajajo ena izmed ključnih tehnologij prihodnosti. Njihova trajnostna uporaba bo odvisna od sposobnosti zmanjševanja vplivov v vseh fazah življenjskega cikla – od pridobivanja surovin, proizvodnje in uporabe do ponovne uporabe ter recikliranja. Le s povezovanjem tehnološkega razvoja, učinkovite zakonodaje in odgovornega ravnanja vseh deležnikov bo mogoče zagotoviti, da bo razvoj električne mobilnosti in shranjevanja energije potekal v skladu z načeli trajnostnega razvoja.

10 VIRI IN LITERATURA

1. Davidson, C., & Hoffman, L. (2017). Life cycle assessment of lithium-ion batteries: A review and update. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 78–94.
2. Dunn, J. B., Gaines, L., Sullivan, J., & Wang, M. Q. (2012). Impact of recycling on cradle-to-gate energy consumption and greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion batteries. *Environmental Science & Technology*, 46(22), 12704–12710.
3. Ekvall, T., & Finnveden, G. (2011). A comparative life cycle assessment of energy storage systems: Li-ion and lead-acid batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(4), 249–257.
4. Fajfar, B. (2020). *Litij-ionske baterije v električnih vozilih: vpliv na okolje in možnosti reciklaže* (Diplomsko delo). FKKT UM.
5. Gaines, L. (2014). Sustainable materials management and lithium-ion batteries: A review of materials in battery systems. *Journal of Cleaner Production*, 120, 1–12.
6. Gartner, T., Azevedo, I. L., & Nunes, J. (2018). Life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Energy Procedia*, 158, 3247–3252.
7. Gostecnik, S., & Zor, S. (2021). Razvoj in reciklaža litij-ionskih baterij: pregled tehnoloških rešitev. V: *Zbornik predavanj, 10. mednarodna konferenca o naprednih tehnologijah v okolju*.
8. Hao, H., Zhang, Q., & Zhao, F. (2013). Environmental impacts of lithium-ion batteries in the life cycle of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 47(19), 11010–11018.
9. Harper, G., et al. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575(7781), 75–86.
10. ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. International Organization for Standardization.
11. Klemenc, K. (2018). Reciklaža baterij v Sloveniji: izzivi in možnosti za izboljšanje. *Ekološki inženiring*, 8(2), 34–41.
12. Kuehr, R., & Williams, E. (2007). *Waste electrical and electronic equipment recycling and recovery*. Springer.
13. Mossali, E., et al. (2020). Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. *Journal of Environmental Management*, 264, 110500.
14. Notter, D. A., & Wiedmann, T. (2010). Contribution of Li-Ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 14(1), 15–24.
15. Pachauri, R. K., & Mayer, L. M. (2014). *Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press.
16. Peters, J. F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., & Weil, M. (2017). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 491–506.
17. Šimnič, S., & Kovačič, B. (2019). Okoljski vpliv baterij v električnih vozilih: primerjalna analiza življenjskega cikla. *Tehniški vestnik*, 26(4), 587–593.
18. Voskian, S., & Dufour, J. (2015). The environmental impact of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Journal of Environmental Management*, 149, 196–206.
19. Zeng, X., Li, J., & Wang, Z. (2014). Recycling of spent lithium-ion batteries: A review of the technologies and processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 261–275.
20. Zhang, L., Li, J., & Li, X. (2018). Recycling of spent lithium-ion batteries: A review of the materials recovery and recycling processes. *Journal of Hazardous Materials*, 355, 101–113.

SPLETNI VIRI

21. Acey Intelligent. (2026). *How to reduce the environmental impact of lithium-ion batteries*. Dostopno 26. 1. 2026 na <https://si.aceyintelligent.com/info/how-to-reduce-the-environmental-impact-of-lith-17381037896967168.html>
22. Bartolome, et al. (2025). *Management of EoL Lithium-Ion Batteries: A Practical Handbook*. Dostopno 26. 1. 2026 na https://www.sustainable-recycling.org/wp-content/uploads/2026/01/2025_Management-of-EoL-Lithium-Ion-Batteries-A-Practical-Handbook_Bartolome-et-al.pdf
23. Geoenergy. (2026). *Energy consumption review*. Dostopno 26. 1. 2026 na <https://www.geoenergy.si/solutions/energy-consumption-review>
24. Maribor24. (2026). *Pri Celju vžig električnega avtomobila – kako so ga pogasili*. Dostopno 26. 1. 2026 na <https://maribor24.si/slovenija/foto-pri-celju-vzig-elektricnega-avtomobila-kako-so-ga-pogasili/>
25. Renovables Verdes. (2026). *Kaj je recikliranje*. Dostopno 26. 1. 2026 na <https://sl.renovablesverdes.com/kaj-je-recikliranje/>
26. RoyPow. (2026). *What are lithium-ion batteries?* Dostopno 26. 1. 2026 na <https://www.roypow.com/sl/blog/what-are-lithium-ion-batteries/>
27. Shilden Channel. (2026). *Lithium-ion batteries*. Dostopno 26. 1. 2026 na <https://sl.shildenchanel.com/blogs/portable-power-station/lithium-ion-batteries>

11 VIRI SLIK

1. <https://www.mlcljubljana.com/kako-sap-podpira-krožno-gospodarstvo-v-poslovnem-svetu/>
2. https://aliasplus.si/storitve/lca_analiza/
3. <https://www.lithiumbatterytech.com/the-impact-of-lithium-mining-on-the-environment/>
4. <https://cirrus-centar.hr/pregled-industrije-proizvodnja-baterija/>
5. <https://hr.jingsun-power.com/info/solar-power-energy-storage-lithium-battery-pro-89654753.html>
6. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Litij>
7. <https://iucitelj.si/sl/gradivo/98/litij>
8. <https://www.monitor.si/clanek/kam-gre-odsluzeni-litij/208675/>
9. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Kobalt>
10. <https://www.volkswagen.si/elektricna-mobilnost/trajnost/pridobivanje-virov-za-elektricno-mobilnost>
11. <https://www.eaglealloys.com/sl/common-uses-of-nickel/>
12. <https://sl.wikipedia.org/wiki/Grafit>
13. <https://abmobil.si/kaj-se-zgodi-ko-se-baterija-v-elektricnem-vozilu-dokončno-iztroši/>
14. <https://weee4future.eitrawmaterials.eu/sl/ucenje-in-poucevanje/modul-1-dilema-glede-e-odpadkov/>
15. <https://www.mlcljubljana.com/kako-sap-podpira-krožno-gospodarstvo-v-poslovnem-svetu/>
16. <https://abmobil.si/kaj-se-zgodi-ko-se-baterija-v-elektricnem-vozilu-dokončno-iztroši/>
17. <https://www.roypow.com/sl/blog/what-are-lithium-ion-batteries/>
18. <https://sl.shieldenchannel.com/blogs/portable-power-station/lithium-ion-batteries>
19. <https://www.izvoznookno.si/aktualno/basf-bo-s-podjetjema-fortum-in-nornickel-recikliral-avtomobilske-baterije/>
20. <https://www.bonnenbatteries.com/sl/sodium-ion-battery-vs-lithium-ion-battery-a-friendly-comparison/>
21. <https://riso.si/zeleni-prehod/izdelava-lca-life-cycle-assessment/>
22. <https://www.batterydesign.net/second-life-of-batteries-for-electric-vehicles/>
23. <https://sustainability.unesco-floods.eu/2025/12/22/raziskovalci-trdijo-da-bi-majhna-sprememba-v-zasnovi-baterije-lahko-zmanjšala-stevilo-pozarov-cnn-science-22-december-2025/>
24. Interni vir podjetja
25. <https://www.bonnenbatteries.com/sl/sodium-ion-battery-vs-lithium-ion-battery-a-friendly-comparison/>
26. <https://slo-tech.com/novice/t850797>
27. <https://www.sick.com/it/it/produzione-di-batterie-e-sensori-quali-sono-i-piu-adatti-e-come-integrarli/w/blog-it-produzione-batterie>
28. https://www.tmaxcn.com/battery-production-equipment-line_c137
29. <https://www.izvoznookno.si/aktualno/basf-bo-s-podjetjema-fortum-in-nornickel-recikliral-avtomobilske-baterije/>
30. <https://legendbatteries.com/sl/blog/lithium-polymer-battery-vs-lithium-ion-battery-which-is-better>
31. <https://www.zeos.si/ravnanje-z-odpadki>
32. https://www.sustainable-recycling.org/wp-content/uploads/2026/01/2025_Management-of-EoL-Lithium-Ion-Batteries-A-Practical-Handbook_Bartolome-et-al.pdf
33. <https://www.caszazemljo.si/e-mobilnost/dvojno-zivljenje-baterij.html>
- 34.

12 PRILOGE

Priloga 1: Anketni vprašalnik

ANKETA: OZAVEŠČENOST O IZRABLJENIH ELEKTRIČNIH BATERIJAH

1. Spol:

- ☐ Moški
- ☐ Ženska
- ☐ Drugo

2. Starost:

- ☐ < 18 let
- ☐ 18–25 let
- ☐ 26–40 let
- ☐ 41–60 let
- ☐ > 60 let

3. Izobrazba:

- ☐ Osnovnošolska
- ☐ Srednješolska
- ☐ Višješolska
- ☐ Visokošolska ali več

4. Ali veste, kam odložiti izrabljene baterije?

- ☐ Da
- ☐ Ne

5. Kam običajno odlagate izrabljene baterije?

- ☐ V posebne zbirne posode v trgovinah
- ☐ Na ekološki otok
- ☐ V navaden smetnjak
- ☐ Drugam (navedite): _____

6. Kako pogosto odlagate baterije na ustrezno mesto?

- ☐ Vedno
- ☐ Občasno
- ☐ Nikoli

7. Ali menite, da so izrabljene baterije okolju škodljive?

- ☐ Da
- ☐ Ne
- ☐ Ne vem

8. Ali ste seznanjeni z vplivi izrabljenih baterij na okolje?

- ☐ Da, dobro poznam problematiko
- ☐ Delno, vem nekaj osnovnih informacij

☐ Ne, o tem nisem obveščen/a

9. Kako bi ocenili dostopnost zbirnih mest za odlaganje baterij?

☐ Zelo dostopna

☐ Povprečno dostopna

☐ Težko dostopna

☐ Ne vem

10. Ali bi bili pripravljeni bolj skrbno ločevati baterije, če bi imeli več informacij?

☐ Da

☐ Ne

☐ Mogoče

11. Kako pogosto uporabljate baterije (npr. za daljinske upravljalce, ure, elektronske naprave)?

☐ Dnevno

☐ Tedensko

☐ Mesečno

☐ Redko

12. Katere vrste baterij najpogosteje uporabljate?

☐ Alkalne (AA, AAA itd.)

☐ Litij-ionske (polnilne baterije, baterije v telefonih, prenosnikih)

☐ Svinec-kislinske (avtomobilске baterije)

☐ Druge (navedite): _____

13. Ali uporabljate polnilne baterije kot alternativo enkratnim baterijam?

☐ Da

☐ Ne

☐ Občasno

14. Ali menite, da so informacije o pravilnem ravnanju z izrabljenimi baterijami dovolj dostopne?

☐ Da

☐ Ne

☐ Ne vem

15. Kaj bi po vašem mnenju izboljšalo ozaveščenost o pravilnem odlaganju baterij?

☐ Več informacij v medijih

☐ Ozaveščevalne kampanje v šolah in podjetjih

☐ Več zbirnih mest na javnih lokacijah

☐ Druge možnosti (navedite): _____

16. Ali bi bili pripravljeni sodelovati v programih vračanja in recikliranja baterij (npr. popusti ob vračilu izrabljenih baterij)?

☐ Da

☐ Ne

☐ Mogoče

17. Ali bi podprli uvedbo kavcijskega sistema za baterije (npr. vračilo določenega zneska

ob oddaji izrabljene baterije)?

- ☐ Da
- ☐ Ne
- ☐ Ne vem

18. Ste že kdaj oddali večjo količino izrabljenih baterij v reciklažni center ali zbirno mesto?

- ☐ Da
- ☐ Ne

Hvala za sodelovanje!

Priloga 2: Vprašanja za intervju

1. Splošno o izrabljenih baterijah:

- Kako bi opisali glavne izzive, ki jih predstavlja odlaganje in recikliranje izrabljenih baterij?
- Kakšne so najpogostejše sestavine izrabljenih baterij in kako vplivajo na okolje, če niso pravilno odložene?

2. Postopek recikliranja:

- Kako poteka proces recikliranja izrabljenih baterij? Kateri so ključni koraki?
- Kakšen je vpliv tehnologije na izboljšanje recikliranja baterij v zadnjih letih?

3. Okoljski vpliv:

- Kakšen je dolgoročen vpliv nepravilnega odlaganja baterij na okolje, predvsem na tla in podzemne vode?
- Ali so na voljo trajnostne alternative za trenutno uporabo baterij, ki bi lahko zmanjšale okoljski vpliv?

4. Ozaveščanje in zakonodaja:

- Kako dobro so ljudje ozaveščeni o pravilnem ravnanju z izrabljenimi baterijami v primerjavi z drugimi nevarnimi odpadki?
- Kakšne spremembe v zakonodaji bi bile potrebne za izboljšanje sistema za zbiranje in recikliranje baterij?

5 Prihodnost:

- Kaj menite o prihodnosti električnih baterij? Ali obstajajo nove tehnologije, ki bi lahko zmanjšale problem odlaganja in recikliranja?
- Kako pomembno je za industrijo, da začne iskati trajnostne rešitve za izrabljene baterije, in kaj lahko vsak od nas naredi, da pomaga?

Kosec M.: Okoljski vpliv rabljenih električnih baterij ter načini zmanjšanja njihovega okoljskega bremena, magistrsko delo, FVO, Velenje, 2026

PRILOGA 3: Intervju (pisni intervju + prepis zvočnega intervjuja)

Intervju je bil izveden z zaposlenim v podjetju, ki se ukvarja z ravnanjem z izrabljenimi baterijami. Zaradi želje podjetja in sogovornika po anonimnosti ime podjetja in ime sogovornika nista navedena. Intervju je bil izveden pisno, dodatno pa je bil opravljen tudi zvočni intervju, ki je bil naknadno prepisan. Odgovori so jezikovno minimalno urejeni zaradi boljše berljivosti.

1. Pisni intervju

1. Splošno o izrabljenih baterijah

1.1 Kako bi opisali glavne izzive, ki jih predstavlja odlaganje in recikliranje izrabljenih baterij?

1. Izziv: ozaveščanje ljudi, da baterije odlagajo v ZC ali za to namenjene zbirne posode v trgovinah/trgovskih centrih/servisih elektronske opreme
2. Izziv: ozaveščanje zbiralcev o požarni varnosti pri procesu zbiranja, sortiranja in skladiščenja baterij
3. Izziv: zakonodaja, ki bi dovolj hitro sledila trendom razvoja in potrebam tržišča

1.2 Kakšne so najpogostejše sestavine izrabljenih baterij in kako vplivajo na okolje, če niso pravilno odložene?

Najpogostejše sestavine izrabljenih baterij so navedene v članku, ki ga prilagam: **Accurec-Comperative-study.pdf**

2. Postopek recikliranja

2.1 Kako poteka proces recikliranja izrabljenih baterij? Kateri so ključni koraki?

Opisani v članku: Accurec-Comperative-study.pdf

2.2 Kakšen je vpliv tehnologije na izboljšanje recikliranja baterij v zadnjih letih?

Opisano v članku: Accurec-Comperative-study.pdf

3. Okoljski vpliv

3.1 Kakšen je dolgoročen vpliv nepravilnega odlaganja baterij na okolje?

Onesnaževanje tal in podzemnih voda s težkimi kovinami, halogenimi elementi, kislinami in ostanki razpada umetnih mas. Negativni vpliv na rastline, živali in človeka zaradi vgradnje v prehranjevalne verige.

3.2 Ali so na voljo trajnostne alternative?

- Natrij
- Kalcij
- Aluminij
- Rastlinski materiali, bio-polimeri

- Organski materiali
- Recikliranje in second-use Li-ion baterij
- itd.

4. Ozaveščanje in zakonodaja

4.1 Kako dobro so ljudje ozaveščeni?

Slabo.

4.2 Kakšne spremembe v zakonodaji bi bile potrebne?

- Obvezno zbiranje baterij
- Pravilno ravnanje
- Strožja regulacija recikliranja
- Vpliv na tehnologijo izdelave baterij

5. Prihodnost

5.1 Kaj menite o prihodnosti baterij?

Recikliranje ni popolno, postopki so dragi → velik potencial za razvoj novih metod.

5.2 Kako pomembne so trajnostne rešitve?

Zelo pomembne:

- zmanjšanje vpliva na okolje
- znižanje stroškov energije
- boljše zbiranje in ločevanje odpadkov

6. Praktična vprašanja

6.1 Kje lahko ljudje oddajo izrabljene baterije?

- Zbirni centri
- Trgovine
- Trgovski centri
- Servisi elektronske opreme

6.2 Kakšen je časovni okvir recikliranja?

Nekaj tednov do nekaj mesecev – odvisno od vrste baterije.

7. Razlika med baterijami za enkratno in večkratno uporabo

7.1 Glavne razlike

Enkratne:

- enosmerni proces
- ni polnjenja
- preprosta konstrukcija
- kratka življenjska doba

Večkratne:

- reverzibilna reakcija
- polnjenje
- kompleksna konstrukcija
- daljša življenjska doba

7.2 Ali so postopki recikliranja enaki?

Ne, postopki se razlikujejo.

7.3 Vpliv življenjske dobe na odpadke

Daljša življenjska doba → manj odpadkov.

7.4 Razlike v sestavi in vpliv na okolje

Da, sestava vpliva na trajnost, recikliranje in tveganje.

7.5 Vpliv baterij za večkratno uporabo na odlagališča

Zelo velik – bistveno manj odpadkov.

2. Prepis zvočnega intervjuja

Vrsta gradiva: zvočno snemani intervju (samodejni prepis) Način obdelave: jezikovno urejen, vsebinsko minimalno popravljen Govorci: Govorec 1, Govorec 2, Govorec 3

Prepis

Govorec 1 (00:00): V avtomobilski industriji se v zadnjih letih opaža večji poudarek na razvoju električnih vozil in baterijskih sistemov. Tehnološki napredek je zelo hiter.

Govorec 1 (00:36): Veliko pozornosti je usmerjene na litij-ionske baterije, njihovo učinkovitost in uporabo v različnih sistemih.

Govorec 2 (00:46): Razvoj na tem področju je izrazit, predvsem v Aziji, kjer industrija zelo hitro napreduje.

Govorec 1 (00:58): Pomembno je tudi, da se baterijski sistemi obravnavajo celostno, od proizvodnje do uporabe in reciklaže.

Govorec 2 (01:32): Industrija se razvija v smeri večje učinkovitosti in varnosti. Razlike med regijami obstajajo, vendar je cilj podoben.

Govorec 1 (02:02): Avtomobilska industrija se hitro prilagaja elektrifikaciji in razvoju novih tehnologij.

Govorec 2 (02:38): Tudi zakonodaja in politika imata velik vpliv na razvoj električnih vozil in infrastrukture.

Govorec 1 (03:23): Pomemben del razvoja je tudi reciklaža baterij in ponovna uporaba materialov.

Govorec 2 (03:41): To je ključno za trajnostni razvoj in zmanjšanje okoljskega vpliva.

Govorec 1 (04:10): Industrija se premika v smer krožnega gospodarstva in optimizacije življenjskega cikla baterij.

Govorec 2 (04:19): Pričakuje se nadaljnji hiter tehnološki razvoj na področju energijskih sistemov.

Govorec 1 (05:12): Pomembno je tudi vzpostavljanje standardov za varno uporabo novih tehnologij.

Govorec 1 (05:25): Električna vozila postajajo vse bolj razširjena, kar povečuje potrebo po baterijah in infrastrukturi.

Govorec 2 (05:40): Države spodbujajo prehod na električno mobilnost z različnimi ukrepi.

Govorec 1 (06:12): Razvoj tehnologije vpliva tudi na druge industrijske sektorje.

Govorec 2 (06:37): Inovacije v baterijski industriji so povezane tudi z avtomatizacijo in digitalizacijo.

Govorec 1 (07:03): Ključno je razumevanje celotnega sistema, ne le posameznih komponent.

Govorec 2 (07:13): Podjetja vlagajo v raziskave in razvoj novih baterijskih tehnologij.

Govorec 1 (07:27): Pomembna je tudi stabilnost in zanesljivost sistemov.

Govorec 2 (07:52): Industrija se hitro globalizira, predvsem med Evropo in Azijo.

Govorec 1 (08:24): Razvoj baterij je tesno povezan z avtomobilsko industrijo in energetiko.

Govorec 2 (08:39): Prihodnost bo temeljila na večji učinkovitosti in trajnostnih rešitvah.

Govorec 1 (09:13): Reciklaža in ponovna uporaba materialov bosta ključnega pomena.

Govorec 2 (09:31): Razvoj standardov bo pomemben za varnost in kakovost.

Govorec 1 (10:07): Tehnologija se hitro razvija in vpliva na celoten industrijski sistem.

Govorec 2 (10:40): Pomembno je sodelovanje med industrijo in raziskovalnimi institucijami.

Govorec 1 (11:10): Cilj je zmanjšanje okoljskega vpliva baterij skozi celoten življenjski cikel.

Govorec 2 (11:28): Industrija se usmerja v bolj trajnostne rešitve.

Govorec 1 (12:15): Elektrifikacija prometa bo v prihodnosti še bolj izrazita.

Govorec 2 (12:38): Razvoj tehnologij bo še naprej pospešen.

Govorec 1 (13:29): Povečuje se pomen infrastrukture za električna vozila.

Govorec 2 (13:37): Razvoj baterij vpliva tudi na druge industrijske panoge.

Govorec 1 (14:39): Krožno gospodarstvo postaja ključen koncept v industriji baterij.

Govorec 2 (14:41): Reciklaža bo imela vedno večjo vlogo.

Govorec 1 (15:10): Industrija se prilagaja novim okoljskim standardom.

Govorec 2 (15:21): Inovacije bodo ključne za prihodnji razvoj.

Govorec 1 (16:00): Celoten sistem baterij zahteva integriran pristop.

Govorec 2 (16:37): Globalno sodelovanje je vse pomembnejše.

Govorec 1 (17:03): Razvoj je tesno povezan z avtomobilsko industrijo.

Govorec 2 (17:10): Tehnologija se še naprej hitro razvija. Pomembno je, da se nove tehnologije uporabljajo varno in odgovorno.

KONEC PREPISA