

Razgradnja in reciklaža visokonapetostnih Litij-ionskih baterij iz vozil na električni in/ali hibridni pogon

Damjan Balabanič^{1,2}, Emilio Murtič², Tomaž Savšek¹

¹Fakulteta za industrijski inženiring Novo mesto, Šegova ulica 112, 8000 Novo mesto

²Komunala Novo mesto, d.o.o., Podbevškova ulica 12, 8000 Novo mesto

E-pošta: damjan.balabanic@fini-unm.si

Povzetek. Članek obravnava tematiko visokonapetostnih litij-ionskih (Li-ion) baterij (LIB), ki so zaradi svoje zmogljivosti, zanesljivosti in dolge življenjske dobe postale ključna komponenta v električnih in/ali hibridnih vozilih. Zaradi naraščajoče uporabe teh baterij se povečuje tudi potreba po učinkovitem ravnanju z njimi ob koncu njihove življenjske dobe, kar odpira tehnične, okoljske in zakonodajne izzive.

Namen prispevka je celovito analizirati možnost ponovne uporabe, razgradnje ter reciklaže visokonapetostnih LIB iz vozil na električni in/ali hibridni pogon ter raziskati vpliv zakonodajnega okvira na njihovo obravnavo. Predstavljena je primerjava različnih metod reciklaže visokonapetostnih LIB (neposredna, pirometalurška in hidrometalurška metoda), analiza možnosti ponovne uporabe (second-life) in pregled industrijskih praks.

Ugotovljeno je bilo, da ponovna uporaba baterij omogoča znatno podaljšanje njihove življenjske dobe in zmanjšanje okoljskega odtisa, neposredna reciklaža pa predstavlja najbolj trajnostno rešitev, a je tehnološko še v razvoju. Poleg tehnoloških izzivov so bila izpostavljena tudi zakonodajna vprašanja, kjer so poudarjene razlike v implementaciji evropske zakonodaje v državah članicah. Prispevek tako združuje teoretično analizo, tehnološke vpogledne in zakonodajni okvir v celovito obravnavo problema.

Ključne besede: visokonapetostne Li-ion baterije, ponovna uporaba, razgradnja, reciklaža

Dismantling and recycling of high-voltage lithium-ion batteries from electric and/or hybrid vehicles

The article discusses the topic of high-voltage lithium-ion (Li-ion) batteries (LIB), which have become a key component in electric and/or hybrid vehicles due to their performance, reliability and long life. Due to the increasing use of these batteries, the need for efficient management of them at the end of their life cycle is also increasing, which opens up technical, environmental and legislative challenges.

The purpose of the article is to comprehensively analyze the possibility of reuse, dismantling and recycling of high-voltage LIBs from electric and/or hybrid vehicles and to investigate the impact of the legislative framework on their treatment. A comparison of different methods of recycling high-voltage LIBs (direct, pyrometallurgical and hydrometallurgical methods), an analysis of the possibility of reuse (second-life) and a review of industrial practices are presented.

It was found that the reuse of batteries allows for a significant extension of their life cycle and a reduction in the environmental footprint, while direct recycling represents the most sustainable solution, but is still technologically under development. In addition to the technological challenges, legislative issues were also highlighted, particularly the differences in how European legislation is implemented across EU member states. The paper thus combines theoretical analysis, technological insights and the legislative framework into a comprehensive treatment of the problem.

Key words: high-voltage lithium-ion batteries, reuse, dismantling, recycling

Prejet: 10. november, 2025

Odobren: 19. februar, 2026



Avtorske pravice: © 2025
Creative Commons Attribution 4.0
International License

1 UVOD

Litij-ionske baterije (LIB) so močno vplivale na področja električnih vozil ter revolucionirale sodobno življenje. Litij, najlažji trdni element na Zemlji, se je iz dela eksplozivnih in nevarnih kovinskih baterij razvil v osnovo varnih in lahkih LIB, ki jih trenutno uporabljamo.

Svetovni trg visokonapetostnih LIB doživlja hitro rast, ki jo spodbujajo prizadevanja za razogljičenje prometnega in energetskega sektorja. Projekcije kažejo, da bo povpraševanje po LIB do leta 2026 preseglo 80 milijard EUR [1]. Samo v Evropi naj bi se prodaja LIB do leta 2026 gibala med 250 in 1100 GWh, napovedi pa kažejo na povečanje na 600 do 4000 GWh do leta 2040 [2].

LIB se s časoma degradirajo, kar vodi do izgube zmogljivosti in upadanja moči [3]. To je predvsem posledica nastanka trdnega elektrolitnega vmesnika na površinah elektrod, kar povzroča morfološke spremembe ter spremembe volumna celic, kar povzroči izgubo moči [4]. Ko se zmogljivost shranjevanja energije v LIB zmanjša na 70–80 % začetne vrednosti, se LIB štejejo za neprimerne za električna vozila. Kljub temu je te baterije še vedno mogoče obnoviti za shranjevanje energije v stacionarnem omrežju ali reciklirati, s čimer se zmanjšata skupni okoljski vpliv ter gospodarski stroški [5]. Trenutno glavne tehnologije recikliranja LIB vključujejo pirometalurško, hidrometalurško in neposredno recikliranje. Pirometalurgija vključuje taljenje pri visoki temperaturi za redukcijo kobalta, niklja in bakra v zlitine

ter izogrevanje komponent na osnovi ogljika [6]. Ostale elemente, kot so litij, aluminij, silicij, kalcij in železo, pa pusti v žlindri [7]. Kljub temu, da je pirometalurgija dobro poznana tehnologija, ima znatne pomanjkljivosti, kot so visoka raba energije, okoljske emisije zaradi sežiganja plastičnih komponent in elektrolitov ter omejitve pri predelavi materialov [8]. Te omejitve ovirajo kroženje materialov, kar spodbuja evropska zakonodaja, katere cilj je stopnja recikliranja 65 % teže baterij do leta 2025 in 70 % do leta 2030, s posebnimi cilji za kritične materiale, kot sta kobalt in litij [9]. Druga možnost je hidrometalurgija, ki selektivno pridobiva elemente, kot so litij, kobalt, nikelj in mangan, z uporabo ekstrakcije s topilom. To zahteva manj energije in ima manjši okoljski odtis v primerjavi s pirometalurgijo. Vendar pa so njeni visoki obratovalni stroški omejili njen poln razvoj [10]. Pred kratkim so se pojavili postopki neposrednega recikliranja, ki obnavljajo aktivne materiale elektrod brez morfoloških sprememb. Ta pristop je obetaven, zlasti za baterije z nizko vsebnostjo kobalta, ki imajo nižjo ekonomsko vrednost in morda ne upravičujejo stroškov tradicionalnih metod recikliranja [11]. Pridobivanje materialov z recikliranjem LIB je ključnega pomena za zadovoljevanje povpraševanja po ponudbi, ki ga povzroča naraščajoča proizvodnja [12]. Ponovna uporaba LIB za sekundarne aplikacije lahko povzroči ozka grla pri oskrbi z materiali, zaradi česar so bistvene učinkovite strategije recikliranja [13]. Posledično se raziskave osredotočajo na optimizacijo strategij recikliranja LIB ob koncu življenjske dobe, da bi povečali količino in kakovost predelanih materialov, hkrati pa zmanjšali okoljske in ekonomske vplive recikliranja [14, 15]. Predhodni procesi ravnanja z izrabljenimi LIB, ki so pogosto spregledani, lahko znatno izboljšajo učinkovitost celotnega procesa obdelave in obravnavajo okoljska in varnostna vprašanja. Vendar so raziskave o predhodnih postopkih še vedno omejene, saj se obstoječa literatura osredotoča le na vidike, kot so fizikalni procesi, razstavljanje ali nove tehnologije, razvite v zadnjih letih [16, 17, 18]. Ta pregledna študija tako ponuja tudi pregled različnih tehnologij, ki se uporabljajo v polnem obsegu in so trenutno v raziskavah za predhodne faze recikliranja LIB. Ocenjena in primerjana je tehnična učinkovitost različnih tehnologij in njihova učinkovitost, obravnavani pa so tudi pomisleki glede varnosti in ekonomske upravičenosti.

Zaradi teh izzivov postaja razvoj učinkovitih metod za ponovno uporabo, razgradnjo ter reciklažo LIB nujen. Kljub tehnološkemu napredku trenutne metode reciklaže še vedno niso optimalne, trenutna zakonodaja pa je pogosto za reševanje te problematike neenotna in neustrezna. Ta raziskava bo zato analizirala obstoječe metode za obdelavo izrabljenih LIB, preučila okoljske vplive in ocenila, kako trenutni zakonodajni okvirji vplivajo na trajnostno ravnanje z odpadnimi LIB [19].

1.1 Opredelitev problema

Uporaba električnih in hibridnih vozil se je v zadnjih letih močno povečala, kar je povzročilo večje povpraševanje

po visokonapetostnih LIB, čigar proizvodnja zahteva redke surovine, kot so litij, kobalt in nikelj, kar povzroča okoljske obremenitve, vključno z onesnaženjem tal, vode in zraka [20].

Nepravilno ravnanje z odpadnimi visokonapetostnimi LIB predstavlja negativni vpliv na naše okolje, tako zaradi izgube surovin katere bi se s procesom ponovne uporabe in/ali reciklaže ponovno uporabile, kot tudi preko neprimerne obdelave in posledično prepuščanju v okolju, s čimer ga onesnažujemo. Da bi zmanjšali te vplive, je nujno potrebno primerno ravnanje (zbiranje, skladiščenje, obdelava) po koncu njihove življenjske dobe, vse skupaj pa podpreti z ustrezno zakonodajo, ki spodbuja trajnostno ravnanje.

1.2 Namen in cilji raziskave

Namen prispevka je pregled relevantnih načinov obdelave visokonapetostnih LIB. Raziskava se osredotoča na preučitev učinkovitosti metod in vpliva zakonodajnih okvirjev na trajnostno ravnanje z odpadnimi baterijami.

Cilji raziskave so pregled in ocena učinkovitosti obstoječih metod za ponovno uporabo, razgradnjo in reciklažo visokonapetostnih LIB; raziskati okoljske posledice nepravilnega ravnanja z izrabljenimi visokonapetostnimi LIB; oceniti vpliv veljavne zakonodaje na postopke ponovne uporabe, razgradnje in reciklaže omenjenih baterij ter predlagati izboljšave.

1.3 Pridobivanje surovin

Pridobivanje surovin predstavlja prvi in eden najpomembnejših korakov v življenjskem ciklu LIB, saj je brez čiste in ustrezne surovinske osnove nemogoče izdelati kakovostne LIB. LIB zahtevajo specifične kovine, katerih večina izvira iz rudnikov v državah v razvoju, kjer pa so okoljski in delovni standardi pogosto nizki, kar povzroča pomembne okoljske in družbene izzive, vključno z onesnaženjem zraka, vode in tal ter uničevanjem naravnih habitatov [21]. Zaradi teh izzivov se vse bolj uveljavlja razvoj učinkovitih metod ponovne uporabe, razgradnje in recikliranja, ki omogočajo ponovno uporabo dragocenih materialov iz odsluženih baterij, s čimer se zmanjša izčrpavanje naravnih virov ter negativne vplive na okolje [21]. Napredne tehnologije ločevanja in pridobivanja kovin prispevajo k oblikovanju bolj trajnostnega gospodarstva ter zmanjšanju odvisnosti od novih surovin, zato je vzpostavitev krožnega gospodarstva baterijskih materialov ključnega pomena za prihodnost baterijske industrije in ohranjanje okolja [21].

1.4 Proizvodnja in uporaba

Proizvodnja visokonapetostnih LIB je zapleten tehnološki proces, kjer se vse sestavne komponente sestavljajo v strogo nadzorovanih pogojih. Pomembna je kakovost materialov in pravilni postopki, saj vse skupaj vpliva na zmogljivost, varnost in vpliv LIB na okolje. Vsaka baterija ima svojo konstrukcijo, namen, velikost in specifikacije. Proizvodnja vključuje sestavo elektrod,

elektrolitov, separatorjev in drugih sestavnih delov. Če ti postopki niso pravilno regulirani in nadzorovani, lahko pri izdelavi pride do nesreč, ki vplivajo tudi na onesnaževanje okolja. Zato morajo biti proizvodni postopki učinkoviti in natančno nadzorovani, da baterije delujejo čim bolje, so varne za uporabo ter da imajo čim manjši vpliv na okolje [20].

Visokonapetostne LIB delujejo v različnih pogojih, kjer so izpostavljene toplotnim in mehanskim obremenitvam ter cikličnemu polnjenju in praznjenju. Zaradi tega imajo sodobni LIB sistemi napredne nadzorne module, ki spremljajo delovanje baterij in skrbijo za njihovo daljšo življenjsko dobo ter manjši okoljski odtis. Ko omenjene baterije dosežejo konec življenjske dobe, je ključno pravilno ravnanje z njimi. Ozaveščenost o pravilnem polnjenju in vzdrževanju baterij lahko podaljša njihovo življenjsko dobo in prepreči prehitro iztrošenost, kar pripomore k učinkoviti proizvodnji in zmanjšanju negativnih vplivov na okolje [20].

1.5 Recikliranje in ravnanje z odpadki

Ko visokonapetostne LIB dosežejo konec življenjske dobe, so običajno delno ali povsem iztrošene, zato niso več uporabne za prvotni namen. Takrat nastane odločitev, ali jih ponovno uporabiti za drugi namen ali jih razgraditi in reciklirati. Uspešnost recikliranja je odvisna od kakovosti izdelave baterije, preostale kapacitete baterije, učinkovitosti reciklažnih postopkov, dobro urejene logistike in zbiralne infrastrukture ter predvsem motivacije uporabnikov in proizvajalcev, da baterije pravilno oddajajo, zbirajo ter skladiščijo [20, 21]. Zato so ključni ustrezni predpisi in spodbude, ki preprečujejo, da bi baterije končale na odlagališču odpadkov, kar bi povzročilo velik okoljski problem. Dobro organiziran sistem zbiranja in učinkovita logistika sta pogoj, da baterije pridejo v reciklažne obrate, kjer jih obdelajo na najučinkovitejši način, z minimalno rabo energije in maksimalnim izkoristkom materialov [20, 21].

Ko visokonapetostne LIB prispejo v reciklažo, jih najprej mehansko razstavijo, zdrobijo in ločijo na posamezne komponente. Nato sledijo postopki obdelave, kot so pirometalurgija, hidrometalurgija ali neposredno recikliranje, ki omogočajo pridobivanje čim bolj čistih kovin in elektrolitov. Ti materiali se nato lahko ponovno uporabijo pri izdelavi novih LIB, kar omogoča krožno gospodarstvo. LIB z zmanjšano zmogljivostjo lahko (ponovno) uporabijo v t. i. »second life« aplikacijah, kot so sistemi za shranjevanje energije, kjer še vedno dobro služijo kot podporni vir [20, 21]. Takšen pristop zmanjšuje odpadke in povečuje trajnost celotnega življenjskega cikla baterij [20, 21].

2 POSTOPKI OBDELAVE VISOKONAPETOSTNIH LI-ION BATERIJ

Poglavje zajema metode ravnanja z izrabljenimi visokonapetostnimi LIB, ponovno uporabo in postopke reciklaže ter zakonodajne in trajnostne vidike. Namen

poglavja je zagotoviti celovit pregled, ki bralcu omogoča razumevanje trenutnega stanja in prihodnjih možnosti obdelave visokonapetostnih LIB v sodobni tehnologiji.

Z naraščajočim številom električnih vozil in vozil na hibridni pogon, se količina izrabljenih LIB močno povečuje. Zato je potrebno okrepiti zbiralno in skladiščno infrastrukturo, razviti učinkovite metode za ponovno uporabo, povečati zmogljivosti reciklažnih obratov in razviti energetske učinkovite tehnologije reciklaže z visokim izkoristkom. To ni le okoljski izziv, temveč tudi priložnost za nove poslovne modele in zagonska podjetja. Vendar pa je nujno, da bo vse potekalo v skladu z zakonodajo, saj brez tega ni mogoče vzdrževati konkurenčnosti in trajnosti v industriji.

2.1 Osnove tehnologije

Visokonapetostne LIB so pomemben tehnološki dosežek na področju shranjevanja energije, saj združujejo dolgo življenjsko dobo, nizko težo in visoko energijsko gostoto. To omogoča shranjevanje velike količine energije ob relativno majhni masi, kar je ključnega pomena za uporabo v električnih ali hibridnih vozilih in sistemih za shranjevanje energije. Ena od glavnih prednosti visokonapetostnih LIB je tudi zanesljivost, ki je povezana z možnostjo učinkovitega hlajenja in preprečevanja pregrevanja. Delovanje baterij temelji na prenosu litijevih ionov med anodo in katodo, kar omogoča učinkovito polnjenje in praznjenje z minimalnimi izgubami.

2.2 Ravnanje z izrabljenimi visokonapetostnimi baterijami

Pri ravnanju z rabljenimi visokonapetostnimi LIB moramo biti zelo previdni. Celoten proces se začne z zbiranjem baterij in njihovo identifikacijo. Zbrane baterije je treba varno prevažati, pri čemer mora biti transport organiziran tako, da med prevozom ne pride do poškodb, kratkih stikov, pregrevanja ali celo eksplozij. Varna dostava do zbirnih mest je zato ključnega pomena [21].

Pred začetkom nadaljnjih postopkov se baterije ocenijo glede na stanje. Če so še napolnjene, jih je potrebno izprazniti oziroma razelektriti. Razstavljanje baterij opravljajo le za to usposobljeni strokovnjaki, pogosto z avtomatiziranimi sistemi, saj je potrebno delo izvajati varno in učinkovito. Pri tem je varnost delavcev vedno na prvem mestu [20].

Baterije, ki še niso popolnoma uničene in nimajo vidnih poškodb, se lahko ponovno uporabijo za t. i. second-life oziroma drugo življenjsko obdobje. Preostale baterije se usmerijo v postopke razgradnje in reciklaže. Najprej pride do mehanske razgradnje, kjer se celotni sistemi razdelijo na osnovne materiale, kot so plastika, kovine in elektrode. Nato se s fizikalno-kemijskimi postopki ekstrahirajo kovine in drugi uporabni materiali. Tako pridobljene surovine se lahko ponovno uporabijo v proizvodnji baterij, kar bistveno zmanjša odvisnost od primarnega rudarjenja [21].

Visokonapetostne baterije predstavljajo tudi izzive zaradi svoje sestave. Vsebujejo namreč vnetljive ter zdravju ljudi in okolju nevarne snovi, kot so organski topila v elektrolitih. Nepravilno skladiščenje ali obdelava visokonapetostnih LIB lahko povzroči poškodbe ter uhajanje škodljivih snovi, požare ali eksplozije. Zato je nujno, da se baterije predhodno testirajo, ocenijo glede na stanje napoljenosti in poškodbe ter obdelajo v nadzorovanem okolju z ustreznimi varnostnimi postopki [19]. S pojavom naprednih tehnologij, kot sta strojni vid in umetna inteligenca, se razvijajo sistemi za avtomatsko pregledovanje in sortiranje baterij. Ti sistemi omogočajo hitro odločanje, ali je baterija primerna za ponovno uporabo ali pa jo je potrebno reciklirati. Proizvajalci pri načrtovanju novih baterij vedno bolj upoštevajo koncept "design for disassembly", ki omogoča enostavno razstavljanje in reciklažo [19].

2.2.1 Postopki razgradnje, ponovne uporabe in reciklaže

Razgradnja in reciklaža visokonapetostnih LIB sta kompleksna in večstopenjska procesa, ki zahtevata natančno obravnavo zaradi visoke energijske gostote, kemične kompleksnosti ter prisotnosti dragocenih, a tudi zdravju ljudi in okolju nevarnih materialov. Namen razgradnje je ločiti posamezne sestavne dele baterije, kot so kovinski tokovniki, elektrode, elektrolit in ohišje, medtem ko reciklaža omogoča pridobivanje sekundarnih surovin, kot so litij, kobalt, nikelj, mangan in aluminij [21].

Sodobne prakse reciklaže gredo v smeri kombiniranja različnih postopkov – mehanske predobdelave, termične obdelave in hidrometalurške ekstrakcije. Namen takšne kombinacije je, da se poveča izkoristek, zmanjša energetska poraba in izboljša gospodarska učinkovitost procesov. Ključni trendi gredo tudi v smeri postopkov, ki delujejo pri nižjih temperaturah in z nižjimi emisijami, saj je raba energije velik problem. Ravno zato se razvoj tehnologij osredotoča na rešitve, ki so primerne tudi za manjše regijske obrate in decentralizirano obdelavo [20].

V industriji se za reciklažo izrabljenih visokonapetostnih LIB danes uporabljajo predvsem tri metode – pirometalurška, hidrometalurška in neposredna reciklaža, medtem ko je biotehnoški postopek še v fazi razvoja. Vsaka metoda ima svoje prednosti in slabosti. Te se pokažejo pri stroških, učinkovitosti, vplivu na okolje ter kakovosti in količini pridobljenih materialov.

2.2.1.1 Ponovna uporaba baterij

Ko visokonapetostna LIB v električnem ali hibridnem vozilu nekaj let deluje, začne izgubljati zmogljivost [20, 21]. Ko kapaciteta pade pod približno 80 %, baterija ni več primerna za vožnjo, saj ne zagotavlja dovolj velikega dosega [20, 21]. Vendar to še ne pomeni, da je neuporabna ali da jo je treba takoj reciklirati. Namesto tega jo lahko uporabimo za manj zahtevne namene, kar imenujemo »second life« ali drugo življenje baterije [20, 21]. Takšen pristop zmanjšuje odpadke in povečuje trajnost celotnega življenjskega cikla baterij [20, 21].

Nekatere visokonapetostne LIB se reciklirajo brez ponovne uporabe, ampak pravilna dobavna veriga mora vključevati tudi potencial baterij za sekundarno rabo. Čeprav 20 % degradacija baterije pomeni, da le ta za rabo v električnem ali hibridnem vozilu ni več primerna, ima preostalih 80 % kapacitete relativno nedotaknjenih [22]. Te baterije se največkrat uporabljajo v sistemih za shranjevanje energije, kot so domači in industrijski hranilniki ter sistemi sončnih in vetrnih elektrarn. Tam shranjujejo presežke energije, ko je proizvodnja večja od rabe ter jo oddajajo, ko je potrebe več. Ker ti sistemi ne zahtevajo visokih tokov ali hitrih ciklov, so LIB z zmanjšano zmogljivostjo tam še vedno učinkovite [20, 21]. Druga možnost uporabe teh delno iztrošenih LIB je področje transporta, saj je to še vedno sektor, kjer imajo delno iztrošene LIB svoj potencial. Alternativna raba je mogoča v proizvodnji lažjih transportnih sredstev, kot so električna kolesa, skiroji ter električni stroji (npr. skladiščni viličarji, prekucniki, ...) [23].

Ponovna uporaba baterij prinaša več prednosti, saj podaljša življenjsko dobo baterije, zmanjša količino odpadkov, zmanjša potrebo po novih surovinah in s tem tudi vpliv na okolje. Poleg tega so »second life« baterije cenejše, kar prinaša nižje stroške za uporabnike [20, 21].

Seveda pa ta proces ni brez izzivov. Pred ponovno uporabo moramo visokonapetostne LIB temeljito preveriti, opraviti diagnostiko, po potrebi zamenjati ali popraviti posamezne celice in module ter zagotoviti, da so vsi varnostni sistemi (predvsem napredni sistemi za upravljanje baterij), pravilno delujoči. Prav tako je trenutna zakonodaja glede varnosti, garancije ter certifikacije za »second life« baterije še vedno precej nejasna in različno urejena v posameznih državah, kar predstavlja pomembno oviro za širšo uporabo te tehnologije [20].

Velika podjetja, kot so Renault, BMW in Bosch, že uporabljajo prakso, da se visokonapetostne LIB najprej uporabljajo v električnem avtomobilu »first life«, nato v sekundarnih aplikacijah, kot so sistemi za shranjevanje energije ali v lažjih transportnih sredstvih »second life«, šele nato pride do reciklaže [21, 23]. Renault na primer uporablja rabljene baterije iz vozil v sistemih za shranjevanje energije ob polnilnicah za električne avtomobile. BMW in Bosch razvijata projekte za ponovno uporabo baterij iz modela BMW i3 v električnih omrežjih. Tudi Tesla razmišlja o uporabi »second life« baterij, čeprav trenutno večino baterij še reciklira. Napovedi kažejo, da se bo do leta 2030 ta praksa zelo povečala [21].

2.2.1.2 Praznjenje

Praznjenje izrabljenih visokonapetostnih LIB je ključnega pomena za odstranitev preostalega potenciala v izrabljenih LIB, kar zagotavlja varnost med nadaljnjimi procesi recikliranja. Natančna ocena preostalega naboja in toplotnega obnašanja v visokonapetostnih LIB je privedla do razvoja različnih eksperimentalnih modelov [24]. Dve metodi praznjenja, ki se uporabljata v polnem obsegu, sta elektroliza in uporovno praznjenje [18, 25].

Uporovno praznjenje vključuje priključitev baterije na električni tokokrog z upori obremenitve, s praznilnimi tokovi do 200 A [25]. Elektroliza vključuje potopitev baterijskih celic v ionske raztopine. LIB je mogoče potopiti v destilirano vodo do enega dne, čeprav je postopek mogoče pospešiti z ionskimi raztopinami [26]. Pogosto se uporabljajo raztopine NaCl, pri katerih 20 % koncentracije v 24 urah dosežejo visoke hitrosti praznjenja, zlasti v kombinaciji z ultrazvočno obdelavo [27]. Kljub svoji učinkovitosti ima NaCl pomanjkljivosti, kot sta potencialno sproščanje klorovega plina in galvanska korozija ohišja celic. Alternative vključujejo NaOH, K_3PO_4 in $MnSO_4$, ki sicer zmanjšujejo korozijo in puščanje organskih snovi, vendar ponujajo le blage hitrosti praznjenja [26]. Soli, kot sta $FeSO_4$ ali $ZnSO_4$, izboljšajo prevodnost in učinkovitost praznjenja, pri čemer je $FeSO_4$ okolju najbolj prijazna možnost [28]. $Zn_4H_6O_4$ prav tako omejuje učinke korozije [29]. Znižanje napetosti lahko doseže do 70 % začetne napetosti za $ZnSO_4$, 60 % za $NaSO_4$, 50 % za $MnSO_4$ in 40 % za $MgSO_4$ [27], čeprav so v primerjavi s skoraj popolnim praznjenjem NaCl manjše [28]. Vendar pa ponujajo zmanjšano korozijo in nižje emisije zdravju ljudi in okolju nevarnih plinov, zaradi česar so okoljsko sprejemljivejše alternative [30]. Nove metode praznjenja vključno z zamenjavo prevodnih raztopin s prevodnimi praški, kot je luskasti grafit, bi lahko ublažile težave, kot so lažni odčitki napetosti in potencialni odboj napetosti [31]. Skratka, praznjenje je ključna faza pri recikliranju LIB, ključna za preprečevanje kratkih stikov in nevarnosti požara. Metode praznjenja vključujejo elektrokemično praznjenje z raztopinami (običajno 5–10 % NaCl), uporovno praznjenje in pasivizacijo. Uravnoteženje učinkovitosti, varnosti in vpliva na okolje ostaja ključni izziv pri napredku teh tehnologij.

2.2.1.3 Mehanska predobdelava

Prva faza je mehanska predobdelava, kjer se baterije razstavijo, zmeljejo ali mehansko ločijo na posamezne frakcije. Proces je v večini primerov avtomatiziran in zahteva stroge varnostne ukrepe zaradi možnosti sproščanja plinov, iskrenja, požarov ali eksplozije. Mehanska obdelava omogoča ločevanje aluminijastih in bakrenih folij, grafita, elektrodnih materialov ter plastičnih in kovinskih ovojev [21].

Po praznjenju se baterijske celice razstavijo, da se odstrani ohišje in izvlečejo elektrode ter občasno tudi elektroliti. Razstavljanje je lahko ročno ali mehansko. Mehansko razstavljanje običajno vključuje drobljenje ali rezanje v mlinih in zahteva približno 4,5 kWh/t mehanske energije [32, 33].

Raziskave o razstavljanju baterij se osredotočajo na optimizacijo ekonomskih koristi in zmanjšanje vplivov na okolje, hkrati pa zagotavljajo varnost delavcev [34]. Ekonomske analize kažejo, da je odpiranje celic najdražji korak, ki stane do 76 €/kWh, v primerjavi z razstavljanjem modulov (60 €/kWh) in razstavljanjem baterij (32 €/kWh) [35]. Ročno razstavljanje običajno daje čistejše tokove materiala kot drobljenje, kar izboljša

učinkovitost in prihodke in se pogosto uporablja v polnem obsegu [36, 37]. Vendar pa lahko avtomatizirano razstavljanje zmanjša stroške do 20 % zaradi krajšega časa obdelave [38]. Kljub višjim začetnim naložbam avtomatizirani sistemi dolgoročno ponujajo nižje obratovalne stroške [39]. Skratka, čeprav ročno razstavljanje zagotavlja večjo natančnost pri ločevanju komponent, je delovno intenzivno in z visokimi stroški. Prihodnje raziskave bodo morale biti usmerjene v integracijo ročnih in avtomatiziranih metod, da bi združile natančnost ročnega dela z učinkovitostjo avtomatizacije, kar bi optimiziralo celoten proces.

2.2.1.4 Odstranjanje elektrolitov in veziv

Visoko napetostne LIB vsebujejo organske komponente, kot so elektroliti in veziva. Elektroliti so običajno soli $LiPF_6$ v mešanici etilen karbonata in linearnega karbonata (dimetil karbonati, etil metil karbonat, dietil karbonat). Veziva, kot sta poliviniliden fluorid in karboksimetil celuloza, pomagajo prilepiti aktivne materiale na tokovne zbiralnike. Postopki recikliranja odstranjujejo elektrolite s toplotno obdelavo, ekstrakcijo s topilom ali superkritično ekstrakcijo s CO_2 [40, 41, 42]. Toplotne obdelave dosežejo do 99,32 % odstranitve linearnih karbonatov in 99,93 % $LiPF_6$ [43]. Veziva se odstranijo s sežiganjem, pirolizo ali raztapljanjem s topilom, pri čemer je učinkovitost odstranjevanja poliviniliden fluorida skoraj 100 % po pirolizi in 98,5 % pri superkritični ekstrakciji s CO_2 [44].

2.2.1.5 Neposredni reciklažni postopek

Neposredna reciklaža je novejši pristop. Katodni materiali, kot sta nikelj-mangan-kobalt (NMC) ali litijev-železov-fosfat (LFP), se ne razgradijo do osnovnih kemijskih elementov, ampak se jih s fizikalno-kemijskimi postopki obnovi do te mere, da se jih lahko znova uporabi v novih baterijah. Glavne prednosti so nižja energetska raba, manj kemičnih odpadkov in ohranitev kemijske strukture materiala [20]. Postopek ni tako intenziven, vendar zahteva zelo čiste in enotne tokove baterij. Zato je trenutno primeren predvsem za večje količine baterij iste vrste (npr. visokonapetostne LIB iz električnih vozil enega proizvajalca). Metoda je še v razvoju, a kaže velik potencial [20]. Cilj teh metod je, da se čim bolj ohrani kemijska sestava materiala, kar zmanjša energetska porabo in stroške pri ponovni uporabi. Neposredna reciklaža zahteva zelo čisto sortiranje materialov in je trenutno omejena na enotne baterijske tokove, kjer ni večjih nečistoč [21].

2.2.1.6 Pirometalurški postopek

Termični postopki, kot je pirometalurgija, vključujejo segrevanje materiala na visoke temperature, običajno med 600 °C in 1.500 °C. Pri tem se organske komponente, kot so elektroliti in veziva, zažgejo ali uparijo. Kovine se stali in loči, kar omogoča nadaljnjo obdelavo. Prednost te metode je, da omogoča obdelavo različnih vrst baterij brez potrebe po predhodnem sortiranju. Vendar pa je omenjena tehnologija energetska

zelo potratna, nastajajo toplogredni plini, litij pa se pogosto izgubi, saj preide v žlindro. Uporablja se predvsem za baterije z večjimi deleži kobalta in niklja [21].

2.2.1.7 Hidrometalurški in biotehnološki postopek

Hidrometalurški postopki temeljijo na kemijskem raztapljanju kovin z uporabo močnih kislin, kot so žveplova (H_2SO_4) ali klorovodikova (HCl), ter kelatnih reagentov [21]. Postopek vključuje več stopenj, kot so luženje, filtracija, obarjanje in ekstrakcija posameznih kovin. Gre za bolj selektiven in okolju prijaznejši postopek, ki omogoča višji izkoristek redkih kovin. Slabost pa je, da zahteva natančno ločevanje komponent že pred samo obdelavo. V zadnjih letih se raziskujejo tudi biotehnološke metode, kjer bakterije ali glive razgrajujejo kovinske sestavine. Te metode so še v fazi razvoja in zaenkrat eksperimentalne [21].

2.2.2 Primerjava reciklažnih postopkov

Za lažjo predstavo o glavnih razlikah med pirometalurškimi, hidrometalurškimi in neposrednimi reciklažnimi postopki je na sliki 1 prikazan tabelaričen pregled, ki primerja energetska zahtevnost, vrste obnovljenih materialov, ekološki vpliv in stopnjo industrijske zrelosti posameznih metod. Pregledna tabela jasno predstavi prednosti, slabosti, tehnične in okoljske značilnosti posameznih metod.

V industriji trenutno še vedno prevladuje pirometalurška metoda, predvsem zaradi dolgoletne uporabe in obstoječe infrastrukture. A zaradi vse večjega povpraševanja po redkih kovinah se pozornost vedno bolj usmerja v hidrometalurške postopke, ki so energetska manj potratni, imajo manj emisij in omogočajo boljši izkoristek. V ospredje prihajajo tudi selektivni postopki z nizkimi temperaturami in emisijami, kar je posebej pomembno za trajnostno obdelavo. Na tem področju ima neposredna reciklaža veliko možnosti, da v prihodnje postane ena ključnih rešitev.

Postopek	Energetska zahtevnost	Obnovljeni materiali	Ekološki vpliv	Industrijska zrelost
Pirometalurški	Zelo visoka	Kobalt, nikelj	Visok (emisije, litij izgubljen)	Zelo razvit
Hidrometalurški	Srednja	Litij, kobalt, nikelj, mangan	Zmeren (kisline, a višji izkoristek)	Dobro razvit
Direktni	Nizka	Katodni materiali (NMC, LFP)	Nizek (a zahteva čiste tokove)	V razvoju

Slika 1: Primerjava reciklažnih postopkov

2.3 Zakonodajni in trajnostni vidiki

Trajnostno ravnanje z visokonapetostnimi LIB ni odvisno samo od ponovne uporabe ali tehnologije obdelave ter reciklaže, temveč tudi od pravnega okvira, ki ureja njihovo celotno življenjsko dobo, od zasnovne in proizvodnje do zbiranja, transporta, skladiščenja, obdelave in končnega ravnanja z odpadki. Sodobna

zakonodaja na ravni EU in Slovenije poskuša odgovoriti na izzive, ki jih prinašajo te baterije, ob tem pa spodbuja razvoj krožnega gospodarstva in zmanjšanje vplivov na okolje. Poleg tega se vse bolj uveljavljajo zahteve glede sledljivosti baterij in minimalnih deležev recikliranih materialov v novih izdelkih, kar postavlja zakonodajo v osrčje trajnostnega prehoda v energetiki in mobilnosti [19].

V praksi je zelo pomembno, da obstajajo regulativni okviri. Evropska unija je z Uredbo o baterijah postavila stroge zahteve glede zbiranja, predelave in dokumentacije baterij [45]. Cilj uredbe je povečati delež recikliranih materialov v novih baterijah in spodbujati okolju prijaznejše tehnologije. Ena od ključnih novosti je uvedba "battery passport", digitalnega potnega lista baterij, ki omogoča sledenje bateriji skozi celotno življenjsko dobo, vključno z njeno sestavo, zgodovino uporabe in postopki predelave [46]. S sistemom "battery passport" je mogoče natančno vedeti, kje se baterija nahaja, kakšno je njeno stanje in kako jo je treba predelati. Tak pristop krepi sodelovanje med proizvajalci, uporabniki in reciklažnimi podjetji ter izboljšuje trajnostno rabo virov [19].

2.3.1 Pravni okvir (EU, Slovenija, svet)

Najpomembnejša zakonodaja za baterije v Evropski uniji je uredba EU 2023/1542, ki je bila sprejeta junija 2023 [45]. Ta pokriva vse vrste baterij (prenosne, avtomobilске in industrijske) ter ureja vse faze njihovega življenjskega cikla. Uvaja tudi "battery passport", digitalni zapis, kjer so zabeleženi podatki o bateriji, kdaj so kaj menjali, od kod so materiali in kakšno je trenutno stanje baterije [46].

V uredbi so določeni tudi minimalni deleži recikliranih materialov v novih baterijah do leta 2031: najmanj 16 % kobalta, 15 % svinca, 6 % litija in 60 % vrednosti recikliranih materialov. Poleg tega je obvezno zbiranje odpadnih baterij z ambicioznimi cilji: 63 % do leta 2027 in 73 % do leta 2030. Za lažjo in učinkovitejšo obdelavo in reciklažo, morajo biti baterije narejene tako, da jih je enostavno razstaviti, popraviti in nadomestiti [9].

V Sloveniji zakonodaja temelji na Zakonu o varstvu okolja (ZVO-2), ki zahteva, da proizvajalci in uvozniki zagotovijo mesta, kjer lahko vrnemo izrabljene baterije [46]. Na svetovni ravni ni enotnih pravil, a več držav sledi smernicam EU, Mednarodne energetske agencije in Bazelske konvencije, ki ureja tudi pošiljanje in obdelavo nevarnih odpadkov, vključno z baterijami.

2.3.2 Zakonodajni predlogi za izboljšave

Potrebno je zmanjšati birokracijo, da se sistemi lažje in hitreje uvedejo v prakso. Evropska zakonodaja sicer prinaša ambiciozne načrte, vendar v praksi še vedno obstaja veliko težav, saj sistem ni povsem razvit, komunikacija med akterji je slaba, prav tako pa ni dovolj strogega nadzora nad proizvajalci visokonapetostnih LIB glede označevanja in sestave materialov. Pomembno bi bilo tudi uvesti garancijo za »second-life« baterije, kar bi

povečalo zaupanje uporabnikov in spodbudilo njihovo uporabo [47]

Glavna težava je, da birokratski postopki in dolgotrajne regulative močno zavirajo uvajanje že znanih sistemov. Medtem ko na Kitajskem omejitve niso tako stroge in testiranja potekajo hitreje, pri nas zaradi kompleksnih pravil in prevelike regulacije vse že vnaprej otežujemo. Zaradi tega je uvajanje novih sistemov počasnejše, kar ovira razvoj in širšo uporabo tehnologij za trajnostno ravnanje z visokonapetostnimi LIB [19].

2.4 Okoljski in ekonomski vidiki

Ponovna uporaba, obdelava in reciklaža visokonapetostnih LIB je zelo pomembna za varovanje okolja in gospodarstva, hkrati pa prinaša tudi nekatere izzive. Pomaga zmanjšati izkopavanje dragocenih surovin ter zmanjša onesnaževanje okolja, vendar se moramo pri tem soočiti tudi s stroški, rabo energije in tehničnimi omejitvami.

Glavne koristi in izzivi ponovne uporabe, obdelave in reciklaže so naslednji:

- ponovna uporaba, obdelava in reciklaža zmanjšajo izkopavanje rudnin in kovin potrebnih za LIB,
- ponovna uporaba, obdelava in recikliranje preprečujejo, da bi nevarne snovi prišle v stik z okoljem,
- reciklirani materiali se lahko ponovno uporabijo v novih baterijah,
- ponovna uporaba, obdelava in reciklaža ustvarjajo nova delovna mesta in spodbujata gospodarstvo,
- nekateri načini ponovne uporabe, obdelave in recikliranja še niso povsem izpopolnjeni in so v fazi razvoja,
- za uspešno ponovno uporabo, obdelavo in reciklažo je pomembno, da zakonodaja spodbuja trajnostne rešitve.

Ponovna uporaba, obdelava in reciklaža visokonapetostnih LIB so ključni za varstvo okolja in trajnostno gospodarstvo, saj zmanjšujejo izkoriščanje surovin in onesnaževanje okolja. Hkrati pa predstavljajo izzive glede stroškov, energetske porabe in potrebnih tehnoloških izboljšav.

2.5 Ovire pri ravnanju z odpadnimi visokonapetostnimi LIB

Čeprav ponovna uporaba, obdelava in reciklaža baterij za okolje pomeni pomembno razbremenitev, se pri teh ravnanjih še vedno srečamo z ovirami. Predvsem uvajanje novih sistemov ima svoje težave, ki se v nadaljevanju postopkov lahko odpravijo. Med glavnimi ovirami so največkrat: ravnanje z baterijami ob povečanih količinah, dragi delovni procesi, ki potrebujejo še dodatne inovacije, volja menedžmenta za rabo rabljenih komponent, reverzna logistika in tveganje med transportom, neprimerne skladiščne in prevozne kapacitete, zakonodaja, delovno intenzivni procesi, nepredvidljivi trendi v razvoju, neobstoječi zaprti krogi

rabe, nejasna odgovornost proizvajalcev ter pomanjkanje poslovnih modelov za zapiranje krogov rabe [48].

3 VARNOSTNA VPRAŠANJA

Postopki pred recikliranjem visokonapetostnih LIB so bistveni za zagotavljanje varnosti nadaljnjih procesov recikliranja. Prvič, zagotavljanje, da so baterije varno izpraznjene pred recikliranjem, naredi celoten proces varnejši, učinkovitejši in okolju prijaznejši. Izrabljene LIB lahko ohranijo znaten naboj tudi potem, ko niso več uporabne za svoj prvotni namen. To lahko predstavlja resna varnostna tveganja med obdelavo in reciklažo LIB v obratih za recikliranje, vključno z možnostjo električnih udarov, kratkih stikov, požarov in eksplozij. Med recikliranjem so lahko LIB izpostavljene mehanskim obremenitvam, kar lahko povzroči nenamerne kemične reakcije in toplotne pobege, kar povzroči požare ali eksplozije in sčasoma sproščanje strupenih snovi, kot je vodikov fluorid [49, 50, 51].

Postopki elektrokemičnega praznjenja lahko korodirajo ohišje baterijskih celic, s čimer se sproščajo plinasti izpusti klora in alkanov, ki so škodljivi za zdravje ljudi in okolje [18, 31, 52]. Neelektrokemično praznjenje pa preprečuje korozijo ohišja baterije, vendar lahko povzroči prekomerno praznjenje preostale napetosti, kar povzroči sproščanje plinastega produkta znotraj celice, izbočenje ohišja in posledično nevarnost eksplozije [53, 54]. Poleg tega je treba ustrezno obravnavati prisotnost preostalih elektrolitov in veziv, da se zmanjšajo varnostna tveganja. Elektroliti v visokonapetostnih LIB običajno vsebujejo vnetljiva topila, ki lahko predstavljajo nevarnost požara, če se z njimi med recikliranjem ne ravna pravilno. Nekatera veziva lahko vsebujejo strupene sestavine ali dodatke, ki lahko predstavljajo zdravstveno in okoljsko tveganje, če se z njimi med recikliranjem ne ravna pravilno. Preostalo vezivo v recikliranih materialih lahko zahteva dodatne korake obdelave ali odstranjevanja, da se zagotovi zaščito zdravja ljudi in skladnost z okoljskimi predpisi. Poleg tega standardna topila za odstranjevanje veziv, zaradi svoje počasne biorazgradljivosti in negativnega učinka na zdravje ljudi in okolje predstavljajo potencialno nevarnost [55]. Poleg tega se je treba pri zdravju ljudi primernejših in okolju prijaznejših predobdelavah izogibati uporabi kislih raztopin. Mehanokemijsko aktivacijo pospešujejo kisline, npr. EDTA ali H₂SO₄, vendar so bile v zadnjem času predlagane bolj razredčene organske kisline, npr. oksalna kislina [56]. Poleg tega bi se uporabi kislin lahko povsem izognili z uvedbo redukcijskih sredstev, kot sta kovini Zn in Fe [57, 58]. Skratka, v primerjavi z odlaganjem na odlagališča predstavlja obdelava in recikliranje izrabljenih LIB varno alternativo, tako z vidika varstva zdravja ljudi kot okolja, pri čemer je elektrolit eden glavnih virov onesnaženja, preostala napetost pa glavno varnostno tveganje [15, 27, 59]. Varnostna vprašanja, povezana z ravnanjem z izrabljenimi visokonapetostnimi LIB, je mogoče premagati s temeljitim praznjenjem preostale napetosti. Glede na stanje napolnjenosti izrabljenih LIB lahko faze

predobdelave pri razstavljanju in odpiranju celic predstavljajo varnostna vprašanja, kot sta nevarnost požara ali sproščanje zdravju ljudi in okolju škodljivih snovi [16]. Zaradi težav pri ravnanju z organskimi in halogenskimi snovmi, ki se sproščajo med predobdelavo recikliranja LIB, se postopki razstavljanja izvajajo v nadzorovani atmosferi pod digestorijami [16, 36].

Evropska uredba nazadnje opisuje ključne varnostne ukrepe, ki jih je treba upoštevati pri recikliranju LIB, kot so prepoznavanje nevarnosti, zasnova opreme in strog nadzor kakovosti izdelkov in postopkov [9].

4 EKONOMSKA VPRAŠANJA

Izrabljene LIB predstavljajo dragocene sekundarne vire za pridobivanje kovin, zlasti tistih v katodah. Relevantna znanstvena in strokovna literatura kaže, da so koncentracije litija, kobalta, niklja in bakra v baterijah iz električnih vozil višje kot v komercialnih rudah [60]. Ekonomsko izvedljivost recikliranja LIB je mogoče izboljšati s predobdelavo, kot je karbotermična redukcija z mikrovalovno obdelavo, večstopenjsko obarjanje, čiščenje kobalta s praženjem ali redukcija Ar ter pridobivanje grafita iz anod s penasto flotacijo [61, 62, 63, 64]. Vendar je treba najti ravnovesje med nižjimi stroški termične obdelave ter večjo natančnostjo in dobičkom mehanskih obdelav. Dobičkonosnost recikliranja LIB pogosto ovirajo visoki stroški obdelave zaradi številnih korakov in znatne rabe energije. Stroški dela za začetno fazo razstavljanja, so prav tako precejšen strošek. Različne konfiguracije in število modulov v LIB so ključni vidiki, ki vplivajo na stroške razstavljanja, ki se lahko gibljejo od 43,90 € za baterijske sklope BAIC, do 162,14 € oziroma 168,90 € za modele, ki se uporabljajo v Peugeotu 208 in Nissanu Leaf [65]. Zlasti avtomatizacija linije za razstavljanje za recikliranje LIB zahteva večje kapitalne naložbe; vendar bi lahko potencialni dobiček, ki ga ustvari, prinesel pozitivno neto vrednost v razponu od 2,5 milijona € do 12,9 milijona €, odvisno od vhodnega toka odpadnih baterij [66]. Te stroške bi lahko zmanjšali z optimizacijo hibridnih postopkov razstavljanja, ki združujejo ročno delo z avtomatizacijo [34, 39]. Poleg tega lahko mehanokemične predobdelave izboljšajo učinkovitost nadaljnjih procesov in zmanjšajo stroške obdelave. Drug izziv za dobičkonosnost predstavljajo komponente z nizko vrednostjo in elektrolitna topila, katerih tržna vrednost ne upravičuje njihove predelave, zlasti pri baterijah z nizko vsebnostjo kobalta, za katere se pričakuje, da bodo prevladovali na prihodnjem trgu LIB [67].

Ekonomsko upravičenost procesov recikliranja je mogoče znatno povečati z zmanjšanjem rabe reagentov in energije, saj so to glavni dejavniki stroškov [68]. Zato so procesi, ki delujejo pri nizkih temperaturah in v suhih pogojih, brez nastajanja odpadne vode, najbolj obetavne rešitve za zmanjšanje stroškov. Vendar pa je celovita primerjava ekonomskih ravnovesij med različnimi procesi zahtevna, saj je zelo odvisna od obsega in lokalnega konteksta (npr. razpoložljive tehnologije,

stroškov energije in dela). Posledično pomanjkanje homogenosti v obsegu obstoječih študij otežuje takšne primerjave. Skratka, ekonomska analiza procesov recikliranja LIB razkriva, da sposobnost trenutno ovirajo visoki stroški najsodobnejših metod, ki se močno zanašajo na ročno razstavljanje in energetsko intenzivne pirometalurške in hidrometalurške obdelave. Poleg tega padajoče tržne vrednosti predelanih komponent zaradi razširjenosti LIB z nizko vsebnostjo kobalta še dodatno ogrožajo dobičkonosnost. Zato je razvoj cenejših postopkov recikliranja, zlasti za kemijske sestave baterij, kot sta litijev železov fosfat in litijev manganov aluminij, bistvenega pomena za prihodnjo trajnost in ekonomsko upravičenost.

5 RAZPRAVA

V zadnjih desetletjih se je elektrifikacija prometa močno okrepila, kar je neposredno prispevalo k eksponentni rasti povpraševanja po visokonapetostnih LIB. Zaradi svoje izjemne energijske gostote, zanesljivosti ter dolge življenjske dobe so postale nepogrešljive v električnih vozilih in stacionarnih sistemih za shranjevanje energije. Njihova razširjena uporaba je pripomogla k napredku na področju trajnostne mobilnosti in učinkovitejše izrabe obnovljivih virov energije. Vendar pa visokonapetostne LIB ob koncu življenjske dobe predstavljajo kompleksne izzive, tako z vidika varnosti in okolja kot tudi z vidika ekonomike in tehnologije. Prav zato je osnovni namen prispevka celovito analizirati ponovno uporabo, razgradnjo ter reciklažo izrabljenih visokonapetostnih LIB ter raziskati vpliv zakonodajnega okvira na njihovo obravnavo v praksi.

V prispevku je opravljena podrobna analiza glavnih metod ponovne uporabe in reciklaže visokonapetostnih LIB (ponovna uporaba, pirometalurški postopek, hidrometalurški in neposredni reciklažni postopek). Pirometalurške metode temeljijo na termični obdelavi baterijskih komponent pri zelo visokih temperaturah (nad 1000 °C), kar omogoča hitro obdelavo in avtomatizacijo procesa. Vendar pa so ti postopki energetsko zelo zahtevni in večinoma ne omogočajo ponovne uporabe vseh sestavin, predvsem grafita, elektrolitov ter nekaterih aditivov. Hidrometalurški postopki, ki temeljijo na kemični razgradnji z uporabo kislin, omogočajo bolj selektivno ekstrakcijo kovin, kot so litij, kobalt in nikelj, ob hkratnem nižjem energetskem vložku. V zadnjih letih se raziskujejo tudi biotehnoške metode, kjer bakterije ali glive razgrajujejo kovinske sestavine. Te metode so še v fazi razvoja in zaenkrat eksperimentalne. Neposredna reciklaža pa omogoča ponovno uporabo katodnih materialov brez njihove popolne razgradnje, kar pomeni najnižji okoljski vpliv in največji potencial za krožno gospodarstvo. Kljub temu je tudi ta metoda še v fazi razvoja in zahteva dodatne raziskave, standardizacijo ter podporo zakonodaje. V prispevku so opisane prednosti in slabosti posameznih metod analizirane z vidika energijske učinkovitosti, izkoristka, okoljske obremenitve ter izvedljivosti v industrijskem merilu.

Poglavje o ponovni uporabi baterij (t. i. second-life) obravnava možnosti vključitve izrabljenih baterij, ki so izgubile del svoje zmogljivosti, v nove aplikacije, predvsem stacionarne energetske sisteme. Analiza je pokazala, da baterije po uporabi v električnih vozilih pogosto še vedno ohranijo 70–80 % svoje kapacitete, kar je dovolj za njihovo vključitev v sistem lažjih transportnih sredstev ter v sisteme za shranjevanje energije iz sončnih ali vetrnih elektrarn. Takšni sistemi bistveno prispevajo k zmanjševanju okoljskega odtisa, saj podaljšujejo življenjski cikel baterij in zmanjšujejo potrebo po rudarjenju primarnih surovin. Vendar pa takšne rešitve zahtevajo zanesljiv nadzor nad preostalo kapaciteto, standardizirane metode testiranja ter razvoj baterijskih potnih listov (battery passport), ki bi omogočali sledljivost komponent in stanja baterije skozi celotno življenjsko dobo.

Ugotovljeno je bilo, da trenutno uporabljene tehnologije reciklaže še ne omogočajo optimalnega izkoristka vseh komponent, pri čemer je največji potencial zaznan pri neposredni reciklaži. Za širšo implementacijo so potrebne naložbe v raziskave in razvoj avtomatiziranih in robotiziranih postopkov razstavljanja, ki bi omogočili varno in učinkovito obdelavo visokonapetostnih baterijskih modulov. Poleg tehničnih izzivov pa ostaja pomemben tudi zakonodajni vidik. Čeprav evropska zakonodaja (npr. Uredba o baterijah 1542/2023) postavlja jasne cilje in smernice, njihova implementacija na ravni posameznih držav članic še ni usklajena, kar ustvarja razlike v praksi in omejuje učinkovitost sistemov.

V prispevku so predstavljene prednosti, slabosti, tehnične in okoljske značilnosti posameznih metod. To omogoča hitro orientacijo in boljše razumevanje kompleksnosti izbire primerne metode glede na potrebe in cilje.

6 ZAKLJUČKI IN OBETI

Prispevek je prinesel pomembne uvide v obstoječe postopke ravnanja z izrabljenimi visokonapetostnimi LIB, kjer se poleg ponovne uporabe, kot najperspektivnejša metoda kaže neposredna reciklaža zaradi nizkega okoljskega vpliva in možnosti ponovne uporabe ključnih komponent. Kljub temu so za njeno širšo uporabo potrebne nadaljnje raziskave in zakonodajna podpora. Analiza možnosti ponovne uporabe baterij je pokazala, da imajo izrabljene baterije velik potencial za uporabo v stacionarnih sistemih, kar odpira nove poti za zmanjšanje okoljskega bremena.

Predobdelave so ključne za doseganje visoke učinkovitosti v nadaljnjih fazah recikliranja LIB. Ta pregledna študija je razvrstila postopke predobdelave v štiri zaporedne kategorije: praznjenje celic, odpiranje celic, termične obdelave, sproščanje aktivnih snovi iz kovinskih tokovnih zbiralnikov in koncentriranje različnih tokov materialov za specifične postopke predelave. Najsodobnejše in trenutne raziskave o

predobdelavah za recikliranje LIB so dosegle pomemben napredek pri obravnavanju kritičnih varnostnih in ekonomskih vidikov. Vendar pa so potrebni nadaljnji napredki za premagovanje obstoječih izzivov in optimizacijo splošne učinkovitosti, trajnosti in dobičkonosnosti procesov recikliranja:

- Praznjenje se običajno izvaja s potopitvijo v 5–10 % raztopino NaCl. Vendar literatura kaže, da ta tehnika sprošča nevarne pline in zagotavlja le začasno praznjenje, kar predstavlja varnostno tveganje med začetno fazo razstavljanja. Ena rešitev za izboljšanje procesov praznjenja je razvoj optimiziranih pogojev za nekorozivne raztopine za praznjenje, ki ponujajo tako okoljske kot ekonomske koristi. To je mogoče doseči z zamenjavo materialov, ki se uporabljajo v ohišjih baterij, z bolj odpornimi ali z uporabo soli v raztopini za praznjenje, ki zavirajo korozijo. Slednji pristop izstopa zaradi svojega potenciala, saj uporaba nekorozivnih raztopin za praznjenje ne zahteva znatne investicije v novo opremo. Namesto tega je mogoče običajne raztopine NaCl nadomestiti z raztopinami aktivnih soli.
- Razstavljanje je mogoče izvesti ročno z večjo natančnostjo, vendar z višjimi stroški, ali pa prek avtomatiziranih linij. Nedavni trendi se osredotočajo na kombiniranje teh dveh pristopov, vendar jih ovira raznolikost in kompleksnost zasnove baterij. Optimizacijo postopkov razstavljanja je mogoče izvesti z različnimi strategijami. Modularna zasnova, ki temelji na ločljivih komponentah, skrajša čas, potreben za razstavljanje in s tem stroške dela. Poleg tega je modularnost pri zasnovi baterijskih sklopov ključna za avtomatizacijo postopkov razstavljanja. Avtomatizacija postopka razstavljanja ni le zmanjšanje stroškov dela, temveč tudi povečanje varnosti z zmanjšanjem izpostavljenosti ljudi nevarnim pogojem.
- Preostali elektroliti in veziva se običajno odstranijo s toplotno obdelavo ali topili, da se pospeši sproščanje aktivnih snovi iz tokovnih zbiralnikov elektrod. Čeprav je NMP standardno topilo za raztapljanje poliviniliden fluorida, njegova toksičnost za zdravje ljudi in okolje vzbuja znatne varnostne pomisleke.
- Osvobajanje in koncentriranje aktivnih snovi elektrod je ključni korak, bistven za nadaljnje postopke recikliranja (predvsem metalurgijo), odvisen od količine in čistosti aktivnega prahu. Integracija različnih tehnologij lahko omogoči pridobivanje več komponent materiala, s čimer se maksimizirajo potencialne koristi pridobivanja materiala.

Ugotovitve tega dela poudarjajo, kako učinkovite predobdelave pozitivno vplivajo na učinkovitost in potencialno zmanjšujejo stroške nadaljnjih postopkov recikliranja, ki igrajo ključno vlogo pri napredku

tehnologij čistejše proizvodnje. Mehansko-kemijske obdelave so pokazale odlično učinkovitost zaradi visokih stopenj izkoristka in širokega nabora recikliranih materialov, kar ponuja potencialno pot do bolj trajnostnih praks recikliranja. Vendar so raziskave na to temo še vedno omejene in se večinoma osredotočajo na specifične katodne kemije. Prihodnje raziskave bi se morale poglobiti v mehansko-kemijske predobdelave in pridobivanje anodnih aktivnih materialov, optimizirati učinkovitost in zmanjšati ekonomske in varnostne pomisleke. Odprava teh vrzeli bi lahko vodila do bolj trajnostnih in stroškovno učinkovitih procesov recikliranja, kar bi spodbudilo širše sprejetje čistejših in bolj krožnih proizvodnih tehnologij v industriji.

Pripravek izpostavi tudi pomanjkljivosti obstoječih zakonodajnih okvirov ter potrebo po boljšem nadzoru in usklajeni implementaciji evropskih direktiv. S tem prispeva k boljšemu razumevanju tako tehnoloških kot sistemskih izzivov, s katerimi se sooča sektor Li-ion baterij. Delo ima visoko uporabno vrednost, saj ponuja podlago za nadaljnje raziskave, zakonodajne izboljšave in industrijsko prakso, ki bo temelj prihodnje trajnostne energetske infrastrukture.

7 VIRI IN LITERATURA

- [1] Statista, 2023. Projected lithium-ion battery market size worldwide. Statista, na spletni strani [https://www.statista.com/statistics/1011187/projected-global-lithium-ion-battery-market-size/#:~:tex=t=](https://www.statista.com/statistics/1011187/projected-global-lithium-ion-battery-market-size/#:~:tex=t=, julij 2025), julij 2025
- [2] Tsiropoulos I, Tarvydas D, Lebedeva N (2018) Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications – scenarios for costs and market growth, EUR 29440 EN, 2018, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- [3] Kabir MM, Demirocak DE (2017) Degradation mechanisms in Li-ion batteries: a state-of-the-art review, *International Journal of Energy Research*, vol. 41, pp. 1963-1986
- [4] Kim HJ, Krishna T, Zeb K, Rajangam V, Muralee Gopi CVV, Sambasivam S, Venkata K, Raghavendra G, Obaidat IM (2020) A comprehensive review of Li-ion battery materials and their recycling techniques, *Electronics*, vol. 9, no. 1161, pp. 1-45
- [5] Energy Storage Association (2020) End of life management for lithium-ion energy storage systems, na spletni strani <http://energystorageassociationarchive.org/wp-content/uploads/2020/04/ESA-End-of-Life-White-Paper-CRI.pdf>, avgust 2025
- [6] Mansur MB, Guimaraes AS, Petranikova M (2021) An overview on the recovery of cobalt from end-of-life lithium ion batteries, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 43, no. 4, pp. 489-509
- [7] Assefi M, Maroufi S, Yamauchi Y, Sahajwalla V (2020) Pyrometallurgical recycling of Li-ion, Ni-Cd and Ni-MH batteries: a minireview, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 24, pp. 26-31
- [8] Wang Y, An N, Wen L, Wang L, Jiang X, Hou F, Yin Y, Liang J (2020) Recent progress on the recycling technology of Li-ion batteries, *Journal of Energy Chemistry*, vol. 55, pp. 391-419
- [9] European Commission, Regulation (EU) 2023/1542 of the European Parliament and of the Council of 12 July 2023 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC
- [10] Larouche F, Tedjar F, Amouzegar K, Houlachi G, Bouchard P, Demopoulos GP, Zaghbi K (2020) Progress and status of hydrometallurgical and direct recycling of Li-ion batteries and beyond, *Materials*, vol. 13, no. 3, pp. 1-45
- [11] Harper G, Sommerville R, Kendrick E, Driscoll L, Slater P, Stolkin R, Walton A, Christensen P, Heidrich O, Lambert S, Abbott A, Ryder K, Gaines L, Anderson P (2019) Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles, *Nature*, vol. 575, pp. 75-86
- [12] Mayyas A, Steward D, Mann M (2019) The case for recycling: overview and challenges in the material supply chain for automotive Li-ion batteries, *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 19, pp. 1-13
- [13] Bobba S, Mathieux F, Blengini GA (2019) How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 145, pp. 279-291
- [14] Asadi Dalini E, Karimi G, Zandevakili S, Goodarzi M (2020) A review on environmental, economic and hydrometallurgical processes of recycling spent lithium-ion batteries, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, vol. 42, pp. 451-472
- [15] Kader ZA, Marshall A, Kennedy J (2021) A review on sustainable recycling technologies for lithium-ion batteries, *Emergent Materials*, vol. 4, pp. 725-735
- [16] Sommerville R, Shaw-Stewart J, Goodship V, Rowson N, Kendrick E (2020) A review of physical processes used in the safe recycling of lithium ion batteries, *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 25, pp. 1-41
- [17] Wu S, Kaden N, Droder K (2023) A systematic review on lithium-ion battery disassembly processes for efficient recycling, *Batteries*, vol. 9, no. 6, pp. 1-25
- [18] Kim S, Bang J, Yoo J, Shin Y, Bae J, Jeong J, Kim K, Dong P, Kwon K (2021) A comprehensive review on the pretreatment process in lithium-ion battery recycling, *Journal of Cleaner Production*, vol. 294
- [19] Srinivasan S, Shanthakumar S, Ashok NB (2025) Sustainable lithium-ion battery recycling: A review on technologies, regulatory approaches and future trends, *Energy Reports*, vol. 13, pp. 789-812
- [20] Olabi AG, Abbas Q, Shinde PA, Abdelkareem MA (2023) Rechargeable batteries: Technological advancement, challenges, current and emerging applications, *Energy*, vol. 266, no. 3
- [21] Freedman RA, Young HD (2018) *University Physics, Fifteenth Edition*, ISBN 9780135646632
- [22] Huang B, Pan Z, Su X, An L (2018) Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives, *Journal of Power Sources*, vol. 399, pp. 274-286
- [23] Kotak Y, Fernandez CM, Casals LC, Kotak BS, Koch D, Geisbauer C, Trilla L, Gomez-Nunez A, Schweiger HG (2021) End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle, *Energies*, vol. 14, no. 8, pp. 1-15
- [24] Garg A, Wei L, Goyal A, Cui X, Gao L (2019) Evaluation of batteries residual energy for battery pack recycling: proposition of stack stress-coupled-AI approach, *Journal of Energy Storage*, vol. 26
- [25] Langner, T., Sieber, T., Acker, J., 2021. Studies on the deposition of copper in lithium-ion batteries during the deep discharge process, *Scientific Reports*, vol. 11, pp. 1-9
- [26] Xiao J, Guo J, Zhan L, Xu Z (2020) A cleaner approach to the discharge process of spent lithium ion batteries in different solutions, *Journal of Cleaner Production*, vol. 255, no. 6
- [27] Torabian MM, Jafari M, Bazargan A (2022) Discharge of lithium-ion batteries in salt solutions for safer storage, transport, and resource recovery, *Waste Management Research*, vol. 40, no. 4, pp. 402-409
- [28] Ojane S, Lundstrom M, Santasalo-Aarnio A, Serna-Guerrero R (2018) Challenging the concept of electrochemical discharge using salt solutions for lithium-ion batteries recycling, *Waste Management*, vol. 76, pp. 242-249
- [29] Fang Z, Duan Q, Peng Q, Wei Z, Cao H, Sun J, Wang Q (2022) Comparative study of chemical discharge strategy to pretreat spent lithium-ion batteries for safe, efficient, and environmentally friendly recycling, *Journal of Cleaner Production*, vol. 359, pp. 1-29
- [30] Yao LP, Zeng Q, Qi T, Li J (2020) An environmentally friendly discharge technology to pretreat spent lithium-ion batteries, *Journal of Cleaner Production*, vol. 245, no. 3
- [31] Wang H, Qu G, Yang J, Zhou S, Li B, Wei Y (2022) An effective and cleaner discharge method of spent lithium batteries, *Journal of Energy Storage*, vol. 54, pp. 1-10
- [32] Wuschke L, Jackel HG, Leifner T, Peuker UA (2019) Crushing of large Li-ion battery cells, *Waste Management*, vol. 85, pp. 317-326
- [33] Pinegar, H., Smith, Y.R., 2020. Mechanical beneficiation of end-of-life lithium-ion battery components. In: Chen X, Zhong Y, Zhang L, Howarter JA, Baba AA, Wang C, Sun Z, Zhang M, Olivetti E, Luo A, Powell A. *Energy Technology 2020: Recycling, Carbon Dioxide Management, and Other Technologies. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, pp. 259-267
- [34] Alfaro-Algaba M, Ramirez FJ (2020) Techno-economic and environmental disassembly planning of lithium-ion electric vehicle battery packs for remanufacturing, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 154, pp. 104461

- [35] Rallo H, Benveniste G, Gestoso I, Amante B (2020) Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 159, pp. 104785
- [36] Marshall J, Gastol D, Sommerville R, Middleton B, Goodship V, Kendrick E (2020) Disassembly of Li ion cells-characterization and safety considerations of a recycling scheme, *Metals*, vol. 10, no. 6, pp. 1-22
- [37] Holzer A, Zimmermann J, Wiszniewski L, Necke T, Gatschlhofer C, Ofner W, Raupenstrauch H (2023) A combined hydro-mechanical and pyrometallurgical recycling approach to recover valuable metals from lithium-ion batteries avoiding lithium slagging, *Batteries*, vol. 9, no. 15, pp. 1-26
- [38] Kay I, Farhad S, Mahajan A, Esmaeeli R, Hashemi SR (2022) Robotic disassembly of electric vehicles' battery modules for recycling, *Energies*, vol. 15, pp. 1-14
- [39] Gerbers R, Wegener K, Dietrich F, Droder, K (2018) Safe, flexible and productive human-robot-collaboration for disassembly of lithium-ion batteries. In: Kwade A, Diekmann J (Eds.), *Recycling of Lithium-Ion Batteries*. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management, Springer, pp. 99-126
- [40] Zhang G, Du Z, He Y, Wang H, Xie W, Zhang T (2019) A sustainable process for the recovery of anode and cathode materials derived from spent lithium-ion batteries, *Sustainability*, vol. 11, pp. 1-11
- [41] Haas P, Pfeifer S, Jannes M, Bradtm C (2018) Separation of the electrolyte-solvent extraction. In: Kwade A, Diekmann J (Eds.), *Recycling of Lithium-Ion Batteries*. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management, Springer, pp. 155-176
- [42] Nowak S, Winter M (2017) The role of sub- and supercritical CO₂ as "processing solvent" for the recycling and sample preparation of lithium ion battery electrolytes, *Molecules*, vol. 22, pp. 1-21
- [43] Zhong X, Liu W, Han J, Jiao F, Qin W, Liu T (2020) Pretreatment for the recovery of spent lithium ion batteries: theoretical and practical aspects, *Journal of Cleaning Production*, vol. 263, no. 1-2, pp. 121439
- [44] Fu Y, Schuster J, Petranikova M, Ebin B (2021) Innovative recycling of organic binders from electric vehicle lithium-ion batteries by supercritical carbon dioxide extraction, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 172, pp. 105666
- [45] Rizos V, Urban P (2024) Implementing the EU digital battery passport ceps in-depth analysis. Opportunities and challenges for battery circularity
- [46] Zakon o varstvu okolja (ZVO-2). Uradni list RS, št. 44/22, 18/23-ZDU-IO, 78/23-ZUNPEOVE, 23/24, 21/25-ZOPVOOV in 56/25-PoZ
- [47] ELEKTRO-AUTOMATIK Second-Life-Use For Batteries, na spletu, <https://elektroautomatik.com/en/industries/battery-recycling/second-life/>, avgust 2025
- [48] Rönkkö P, Majava J, Hyvarinen T, Oksanen I (2023) The circular economy of electric vehicle batteries: a Finnish case study. *Environmental Systems and Decisions*, vol. 44, no. 1, pp. 1-14
- [49] Hauck D, Kurat M (2018) Overdischarging lithium-ion batteries. In: Kwade, A., Diekmann, J. (Eds.), *Recycling of Lithium-Ion Batteries*. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management. Springer, pp. 53-81
- [50] Werner DM, Mütze T, Peuker UA (2022) Influence of cell opening methods on electrolyte removal during processing in lithium-ion battery recycling, *Metals*, vol. 12, no. 4, pp. 663
- [51] Zachmann N, Petranikova M, Ebin B (2023) Electrolyte recovery from spent Lithium-Ion batteries using a low temperature thermal treatment process, *Journal of Industrial Engineering Chemistry*, vol. 118, pp. 351-361
- [52] Rouhi H, Karola E, Serna-Guerrero R, Santasalo-Aarnio A (2021) Voltage behavior in lithium-ion batteries after electrochemical discharge and its implications on the safety of recycling processes, *Journal of Energy Storage*, vol. 35, no. 5, pp. 102323
- [53] Mondal A, Fu Y, Gao W, Mi CC (2024) Pretreatment of lithium ion batteries for safe recycling with high-temperature discharging approach, *Batteries*, vol. 10, no. 1, pp. 37
- [54] Lee H, Kim YT, Lee SW (2023) Optimization of the electrochemical discharge of spent Li-ion batteries from electric vehicles for direct recycling, *Energies*, vol. 16, no. 6, pp. 2759
- [55] Bai Y, Essehli R, Jafra CJ, Livingston KM, Belharouak I (2021) Recovery of cathode materials and aluminum foil using a green solvent, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 9, no. 17, pp. 6048-6055
- [56] Fan E, Li L, Zhang X, Bian Y, Xue Q, Wu J, Wu F, Chen R (2018) Selective recovery of Li and Fe from spent lithium-ion batteries by an environmentally friendly mechanochemical approach, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 6, no. 8, pp. 11029-11035
- [57] Xie J, Huang K, Nie Z, Yuan W, Wang X, Song Q, Zhang X, Zhang C, Wang J, Crittenden JC (2021) An effective process for the recovery of valuable metals from cathode material of lithium-ion batteries by mechanochemical reduction, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 168, no. 18, pp. 105261
- [58] Guan J, Li Y, Guo Y, Su R, Gao G, Song H, Yuan H, Liang B, Guo Z (2017) Mechanochemical process enhanced cobalt and lithium recycling from wasted lithium-ion batteries. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 1026-1032
- [59] Vieceli N, Casasola R, Lombardo G, Ebin B, Petranikova M (2021) Hydrometallurgical recycling of EV lithium-ion batteries: effects of incineration on the leaching efficiency of metals using sulfuric acid, *Waste Management*, vol. 125, pp. 192-203
- [60] Leon EM, Miller SA (2020) An applied analysis of the recyclability of electric vehicle battery packs, *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 157, pp. 104593
- [61] Fahimi A, Alessandri I, Cornelio A, Frontera P, Malara A, Mousa E, Ye G, Valentim B, Bontempi E (2023) A microwave-enhanced method able to substitute traditional pyrometallurgy for the future of metals supply from spent lithium-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 194, pp. 106989
- [62] Yang X, Zhang Y, Meng Q, Dong P, Ning P, Li Q (2020) Recovery of valuable metals from mixed spent lithium-ion batteries by multi-step directional precipitation, *RSC Advances*, vol. 11, no. 1, pp. 268-277
- [63] Pindar S, Dhawan N (2020) Microwave processing of electrode active materials for the recovery of cobalt, manganese, and lithium, *Mining, Metallurgy and Exploration*, vol. 37, pp. 1285-1295
- [64] Shin H, Zhan R, Dhindsa KS, Pan L, Han T (2020) Electrochemical performance of recycled cathode active materials using froth flotation-based separation process, *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 167, no. 2, pp. 020504
- [65] Lander L, Tagnon C, Nguyen-Tien V, Kendrick E, Elliott RJR, Abbott AP, Edge JS, Offer GJ (2023) Breaking it down: a techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs, *Applied Energy*, vol. 331, pp. 120437
- [66] Choux M, Waldermar Pripp S, Kvalnes F, Hellstrom M (2024) To shred or to disassemble – a techno-economic assessment of automated disassembly vs. shredding in lithium-ion battery module recycling, *Resource, Conservation and Recycling*, vol. 203, pp. 107430
- [67] Dooze S, Mayer JK, Michalowski P, Kwade A (2021) Challenges in ecofriendly battery recycling and closed material cycles: a perspective on future lithium battery generations, *Metals*, vol. 11, no. 2, pp. 1-17
- [68] Woeste R, Drude ES, Vruca, D, Klockner K, Rombach E, Letmathe P, Friedrich B (2024) A techno-economic assessment of two recycling processes for black mass from end-of-life lithium-ion batteries, *Applied Energy* vol. 361, pp. 122921

Damjan Balabanič je leta 2012 doktoriral na Fakulteti za podiplomski študij Univerze v Novi Gorici. Trenutno je kot visokošolski učitelj zaposlen na Fakulteti za industrijski inženiring Novo mesto ter kot vodja sektorja splošne komunale zaposlen na Komunalni Novo mesto. Raziskovalno je aktiven na področju varovanja okolja, ravnanja in obdelave odpadkov. Sodeloval je v več raziskovalnih in razvojnih projektih Evropske komisije in nacionalnih projektih na temo varovanja okolja ter ravnanja in obdelave odpadkov.

Emilio Murtič je doktorski študent na Fakulteti za organizacijske študije Novo mesto. Trenutno je kot vodja službe ravnanja z odpadki zaposlen na Komunalni Novo mesto. Raziskovalno je aktiven na področju ravnanja in obdelave odpadkov. Sodeloval je v več raziskovalnih in razvojnih projektih Evropske komisije in nacionalnih projektih na temo ravnanja in obdelave odpadkov.

Tomaž Savšek je leta 1998 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, Univerze v Ljubljani Trenutno, kot visokošolski učitelj predava na Fakulteti za industrijski inženiring Novo mesto. Raziskovalno je aktiven na področju razvoja v avtomobilski industriji. Sodeloval je v več raziskovalnih in razvojnih projektih Evropske komisije in nacionalnih projektih na temo ravoja v avtomobilski industriji ter krožnega gospodarstva.