

Geološki aspekti zelene tranzicije i održivog razvoja na primjeru litij-ionskih baterija

Cikuš, Patricia

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:428731>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Patricia Cikuš

**GEOLOŠKI ASPEKTI ZELENE TRANZICIJE I ODRŽIVOG RAZVOJA NA
PRIMJERU LITIJ-IONSКИH BATERIJA**

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOLOŠKI ODSJEK

Patricia Cikuš

**GEOLOŠKI ASPEKTI ZELENE TRANZICIJE I ODRŽIVOG RAZVOJA NA
PRIMJERU LITIJ-IONIŠKIH BATERIJA**

Diplomski rad
predložen Geološkom odsjeku
Prirodoslovno-matematičkog fakulteta
Sveučilišta u Zagrebu
radi stjecanja akademskog stupnja
magistar/magistra geologije

Mentor:
Gordana Medunić

Zagreb, 2023.

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja, PATRICIA CIKUŠ, student/ica Prirodoslovno-matematičkog
fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, s prebivalištem na adresi
TRG KRALJA ZVONIMIRA 6, KOPRIVNICA, OIB 36149025792,
JMBAG 0119039797, ovim putem izjavljujem pod materijalnom i kaznenom
odgovornošću da je moj završni/diplomski/doktorski rad pod naslovom:
GEOLOŠKI ASPEKTI ZELENE TRANZICIJE I ODRŽIVOG RAZVOJA
NA PRIMJERU LITIJ-IONIJSKIH BATERIJA
_____, isključivo moje autorsko djelo, koje je u
potpunosti samostalno napisano uz naznaku izvora drugih autora i dokumenata korištenih u radu.

U Zagrebu, 1. 2. 2023.



Potpis

Zahvale

Hvala mojoj mentorici prof. dr. sc. Gordani Medunić na iskazanom povjerenju, strpljivosti i pruženom znanju.

Hvala i mojim dragim kolegicama i kolegama s preddiplomskog i diplomskog studija, na dijeljenim skriptama, bilješkama, znanju, hvala svima na svakom osmijehu i savjetu.

Posebno sam zahvalna kolegicama Ani Ercegovac i Antoneli Blažević, mojim dvjema gracijama koje su od prvog dana moje najbolje prijateljice i s kojima sam mogla ispijati kave, smijati se, veseliti se svakom našem uspjehu koliko god bio malen ili velik, i hvala im što su mi tijekom svih godina studiranja bile rame za plakanje i uho za slušanje.

Zahvaljujem i svim svojim prijateljima iz rodnog grada Koprivnice i ekipi iz KKC Pixel s kojima sam ispijala kave i kave satima i dijelila svoje iskustvo studiranja, ali i što sam tamo mogla satima pisati diplomski rad uz dobru glazbu i kavu i uvijek čuti riječi ohrabrenja, a hvala im i na zabavnim izlascima kad sam se trebala odmoriti od pisanja diplomskog rada.

Na kraju, najviše sam zahvalna svojoj obitelji, ocu Marijanu, majci Vesni i sestri Sonji, na podršci tijekom svih godina studiranja i što su vjerovali u mene. Bez vas ovo ne bi bilo moguće i bez vas ne bih mogla imati ovakvo divno iskustvo studiranja, hvala vam na svakoj riječi ohrabrenja i svakom pitanju „Kako ide pisanje?“ što me malo živciralo, ali najviše motiviralo.

Još jednom velika hvala svima, i onima koje nisam spomenula, a bili su uz mene svih ovih godina.

Patricia Cikuš

„Even with all our technology and the inventions that make modern life so much easier than it once was, it takes just one big natural disaster to wipe all that away and remind us that, here on Earth, we're still at the mercy of nature.“

Neil deGrasse Tyson

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Diplomski rad

GEOLOŠKI ASPEKTI ZELENE TRANZICIJE I ODRŽIVOG RAZVOJA NA PRIMJERU LITIJ-IONSKIH BATERIJA

Patricia Cikuš

Rad je izrađen u sklopu diplomskog studija Geologije zaštite okoliša na Geološkom odsjeku i Mineraloško-petrografskom zavodu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Horvatovac 95, 10000 Zagreb, Republika Hrvatska.

Sažetak:

Litij-ionske baterije (LIB) trenutno se najviše istražuju za korištenje u električnim vozilima (EV), koja slove za ekološki najprihvatljivije rješenje za smanjenje emisije CO₂ u atmosferi, a dio su zelene tranzicije, odnosno prelaska na obnovljive izvore energije ili pronalaska alternativnih rješenja trenutnim tehnologijama koje povećavaju količinu CO₂. Za sad se pretpostavlja da zapravo takvo rješenje nije idealno, odnosno industrija EV je zelena i u skladu s održivim razvojem samo kada se radi o krajnjem produktu (EV imaju nultu emisiju CO₂), a stvaran utjecaj industrije EV i LIB na okoliš je lošiji nego industrija konvencionalnih vozila, zato što je samo rudarstvo ključnih elemenata za proizvodnju LIB iznimno neodrživo i štetno za okoliš, stoga se radi na pronalasku načina kako rudarstvo učiniti što održivijim. Osim što je štetno za okoliš, rudarstvo ključnih elemenata (poput kobalta) etički je upitno zbog loših uvjeta u kojima rudari rade i žive. Činjenica je da se legislativa oko zelene tranzicije i održivog razvoja u aspektu proizvodnje LIB i EV mora urediti tako da bude što manji utjecaj na okoliš i društvo, pogotovo u državama koje su najveći proizvođači ključnih elemenata.

Ključne riječi: litij-ionske baterije, zelena tranzicija, električna vozila, održivi razvoj, ključni elementi

Rad sadrži: 76+IV stranica, 15 slika, 9 tablica, 153 literaturna navoda

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je pohranjen u: Središnja geološka knjižnica, Geološki odsjek, PMF

Mentor(i): prof. dr. sc. Gordana Medunić

Ocjenjivači: prof. dr. sc. Damir Bucković

doc. dr. sc. Zorica Petrincec

Datum završnog ispita: 24. veljače, 2023.

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Graduate Thesis

GEOLOGICAL ASPECTS OF GREEN TRANSITION AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT ON THE EXAMPLE OF LITHIUM-ION BATTERIES

Patricia Cikuš

Thesis completed as part of Environmental Geology Master's at the Institute of Mineralogy and Petrology, Department of Geology, Faculty of Science, University of Zagreb, Horvatovac 95, 10 000 Zagreb, Croatia.

Abstract: Lithium-ion batteries (LIBs) are currently mostly researched for use in electric vehicles (EVs), which are considered the most environmentally friendly solution for reducing CO₂ emissions in the atmosphere, and are part of the green transition, i.e. switching to renewable energy sources or finding alternative solutions to the current technologies that increase the amount of CO₂. It is assumed that such a solution is not ideal, i.e. the EV industry is green and sustainable only when it comes to the final product (EVs have zero CO₂ emissions), and the real impact of the EV and LIB industry on the environment is worse than the industry of conventional vehicles. The mining of key elements for the production of LIB is extremely unsustainable and harmful to the environment, so it's crucial to find ways to make mining as sustainable as possible. In addition to being harmful to the environment, the mining of key elements (such as cobalt) is ethically questionable due to the poor conditions in which miners work and live. The legislation surrounding the green transition and sustainable development in the aspect of LIB and EV production must be arranged so that there is as little impact on the environment and society as possible, especially in countries that are the largest producers of key elements.

Keywords: Li-ion batteries, green transition, electric vehicles, sustainable development, key elements

Thesis contains: 76+IV pages, 15 figures, 9 tables, 153 references

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Central Library of Geology, Department of Geology, Faculty of Science

Supervisor: Gordana Medunić, Ph.D. Full Professor, PMF, Zagreb

Reviewers: Damir Bucković, Ph.D. Full Professor, PMF, Zagreb
Zorica Petrinc, Assistant Professor, PMF, Zagreb

Date of the final exam: February 24th, 2023

Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Ključni elementi u litij-ionskim baterijama	3
2.1.	Litij	3
2.1.1.	Slanice	4
2.1.2.	Rude	7
2.1.3.	Gline	9
2.1.4.	Oceani.....	11
2.1.5.	Litij-ionske baterije	13
2.1.6.	Zalihe litija	15
2.2.	Kobalt	20
2.3.	Nikal	26
2.4.	Mangan	28
3.	Litij-ionske baterije.....	31
3.1.	Metode predtretmana za otpadne litij-ionske baterije	34
4.	Električna vozila	40
5.	Okolišni i socioekonomski problemi	42
6.	Kreiranje kružne ekonomije baterija iz električnih vozila.....	52
6.1.	Hijerarhija kružne ekonomije	53
7.	Budućnost kružne ekonomije litij-ionskih baterija	55
8.	Zaključak	58
9.	Literatura.....	60

1. Uvod

Ciljevi znanstvene zajednice posljednjih su desetljeća potraga za zamjenskim rješenjem neodrživog i nadasve lošeg linearnog modela gospodarskog rasta u kontekstu zaštite prirode i okoliša i kako održati takvo rješenje funkcionalnim, ekonomičnim i održivim. Pri tome je naglasak na brizi za opstanak čovječanstva te očuvanju globalne klime. Linearni model ekonomskog rasta, odnosno princip „uzmi-proizvedi/iskoristi-baci“ podrazumijeva da neki proizvod nakon što se proizvede i iskoristi najčešće na kraju svog životnog vijeka završi na odlagalištu otpada, zajedno s vrijednim sirovinama koji su iskorišteni za njegovu proizvodnju. Budući da je linearni model neodrživ, stvorila se potreba za zamjenskim rješenjem, a ideja je bila stvoriti kružni model gospodarstva u kojem se dizajniraju proizvodi sa što manje štetnih sastojaka, koji se daju rastaviti na dijelove i koji su lako popravljivi te imaju dugi životni vijek, sve u svrhu smanjenja količine otpada na odlagalištima i posljedičnog smanjenja utjecaja istog na okoliš, a ta je ideja trenutno u procesu realizacije u gotovo cijelom svijetu. Upravo je model kružnog gospodarstva dio Europskog zelenog plana [37], osmišljenog da potakne razvitak zelene ekonomije. Riječ je o zelenoj tranziciji u kojoj će Europska unija postati moderno, resursno učinkovito i konkurentno gospodarstvo te Europu učiniti klimatski neutralnom do 2050. godine, uvesti zelene tehnologije i stvoriti održivu industriju i promet te smanjiti onečišćenje okoliša ([30], Žeravica, 2018; Denona Bogović i Sverko Grdić, 2020). Bitna sastavnica zelenih tehnologija su električna vozila. Ona mogu biti baterijska električna vozila ili hibridna električna vozila. Potreba za električnim vozilima sve je veća jer se smatra da bi električna vozila mogla smanjiti tzv. *well-to-wheel* („od izvora do kotača“) emisiju stakleničkih plinova.

Ključna komponenta električnih vozila su litij-ionske baterije. Kada su 1976. godine Stanley Whittingham i John Goodenough, neovisno jedan o drugom, kreirali prvu litij-ionsku bateriju, koja se sastojala od litija na anodi i titanovog disulfida interkaliranog s litijevim ionima na katodi, nije se dalo naslutiti da će upravo ovo otkriće desetljećima kasnije predstavljati jedan od važnijih aspekata „zelene“ tranzicije. Goodenough je ipak znao da bi bolji bio metalni oksid na katodi umjesto metalnog sulfida te je 1979. godine sa svojim suradnicima napravio bateriju koja je na katodi imala litijeve ione između slojeva kobaltovog oksida. Nekoliko godina kasnije Yoshino Akira je poboljšao Goodenoughov dizajn tako da je napravio anodu od naftnog koksa, nusprodukt rafiniranja nafte obogaćen ugljikom. Kada se koks puni elektronima, na sebe veže litijeve ione. Tako su litijevi ioni interkalirani i u anodi i u katodi što produljuje životni vijek

baterije. Sva su trojica zbog svojih otkrića 2019. godine dobila Nobelovu nagradu iz kemije (Gregersen, 2021a; Gregersen, 2021b, Gregersen, 2021c).

Problemi s baterijama iz električnih vozila su gdje ih ponovno iskoristiti, jer se trošenjem i punjenjem smanjuje originalni kapacitet, a kada im se kapacitet smanji na 80% originalnog kapaciteta tada više nije energetski učinkovito ni financijski isplativo koristiti ju u električnom vozilu (to znači da se 20% originalnog kapaciteta više ne može napuniti, odnosno to su „mrtve“ baterijske ćelije) (Niese i sur., 2020) te što s baterijama na kraju njihovog životnog vijeka. Ako završe na odlagalištima otpada, predstavljaju veliku opasnost za okoliš, a i vrijedni resursi metala rijetkih zemalja i ostatak kapaciteta ostaju neiskorišteni. Nadalje, procjenjuje se da će do 2030. godine broj električnih vozila doseći negdje između 130 i 250 milijuna, što znači da će proizvodnja istih povećati i potrebu za kritičnim materijalima kao što su kobalt, mangan, nikal, i naravno, litij. Već sada se javljaju društveni i okolišni problemi vezani uz rudarenje i eksploataciju ključnih elemenata, pogotovo u DR Kongu i u južnoameričkim zemljama s najvećim zalihama litija. U DR Kongu i Australiji se najviše iskapaju rude litija i kobalta, dok se gotovo 60% prerade tih metala odvija u Kini.

Smanjenje rudarenja sirovina smanjilo bi mogućnosti za nestašicom i povećanjem cijena istih te bi se čak i smanjila ovisnost o jednom koncentriranom izvoru. Stoga je potrebno puno prije prevelike proizvodnje litij-ionskih baterija za električna vozila, stvoriti plan za kružnu ekonomiju baterija u kojem bi se maksimalno iskoristio njihov potencijal, a utjecaj na okoliš smanjio. Zbog navedenih razloga – potencijalne količine budućih otpadnih baterija i brzorastuća potreba za sirovinama – postoji značajna prilika za stvaranjem kružne ekonomije baterija iz električnih vozila (Shell, 2020). Također, pretpostavka je da će se stvaranjem kružne ekonomije baterija iz električnih vozila stvoriti i nova radna mjesta u svakom koraku recikliranja, primjerice sakupljanju, rastavljanju i obradi otpadnih baterija (Drabik i Rizos, 2018). U tu svrhu je 2019. objavljeno Izvješće komisije Europskom parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru, Europskom odboru regija i Europskoj investicijskoj banci o provedbi strateškog akcijskog plana za baterije: razvoj strateškog vrijednosnog lanca baterija u Europi (dalje u tekstu: Izvješće komisije) (Europska komisija, 2019; Coronelli, 2020). U ovom diplomskom radu razrađen je osvrt na ključne elemente za proizvodnju električnih vozila – litija, kobalta, nikla i mangana – njihove rude, geologiju područja s najvećim izvorima i njihovu geokemiju. Osim ključnih elemenata, razrađen je i osvrt na litij-ionske baterije i koliko su zapravo „čisto“ i „zeleno“ rješenje za emisiju CO₂, kao i na budućnost kružne ekonomije samih baterija koja je tek u razvoju.

2. Ključni elementi u litij-ionskim baterijama

2.1. Litij

Litij se dobiva iz tri glavna izvora, a ti su slanice, stijene i glina, od kojih su najvažnije slanice, ali i stijene s mineralima spodumenom i lepidolitom koji sadrže visok udio litija u svom sastavu. Litijeve soli nalazimo u podzemnim naslagama slanica, rudama i glini, kao i u morskoj vodi i geotermalnim izvorima slanica. Litij je iznimno reaktivan alkalijski metal i u prirodi ne dolazi u elementnom obliku, već samo u obliku soli i drugih spojeva poput silikata u magmatskim stijenama i glinama, ali i kloridima koje nalazimo u slanicama [1]. Najzastupljeniji oblik u kojem nalazimo litij je sol litijev karbonat (Li_2CO_3) koji je iznimno stabilan spoj koji se može iskoristiti za proizvodnju drugih soli ili kemikalija (Matos, C.T. i sur., 2020 navedeno u Gunn, 2013; British Geological Survey, 2016).

Litij je mekan metal i manje gustoće ($0,53 \text{ g/cm}^3$ [38]) od vode s kojom u doticaju burno reagira. Na Mohsovoj skali tvrdoće postiže tvrdoću od 0.6 pa se može lako rezati nožem. Njegov je potencijal zato ograničen, a ono što ga čini posebnim je činjenica da ima najviši elektrokemijski potencijal od svih metala. Zbog ovog je obilježja koristan u proizvodnji punjivih baterija koje pružaju učinkovito pohranjivanje energije i njenu laku dostupnost. Osim ovih obilježja, ima i ekstremno visok koeficijent toplinske ekspanzije, karakteristike fluksiranja i kataliziranja, ali i mogućnost modifikatora viskoznosti u staklenim taljevinama (Sterba i sur., 2019). Zbog svojih je obilježja litij koristan ne samo u proizvodnji litij-ionskih baterija, nego i u proizvodnji stakla, visokotemperaturnih lubrikanata odnosno masti za podmazivanje, kemikalija, farmaceutika, ali i u komercijalnim elektroničkim uređajima [1].

U Zemljinoj kori litij je zastupljen relativno više od prosjeka (17 mg/kg), što ga smješta na 33. mjesto po zastupljenosti u Zemljinoj kori [2]. Iako je litij prilično zastupljen i na kopnu i u moru, samo su neki izvori ekonomski isplativi, ali očekuje se značajna promjena u ovom području u nadolazećim godinama s obzirom na to da se rade istraživanja na novim načinima ekstrakcije litija iz zamjenskih izvora. Litij za komercijalne svrhe dobiva se iz dvaju glavnih izvora: podzemnih slanica i iz nalazišta mineralnih ruda. Drugi izvori litija uključuju glinu hektorit, morsku (oceansku) vodu, reciklirane slanice iz energetske postrojenja, prikupljene slanice iz naftnih polja i iz recikliranih elektroničkih uređaja [3].

2.1.1. Slanice

Većina litija danas dobiva se ekstrakcijom iz slanica. Kontinentalne slanice su 2017. godine dale 65% sveg proizvedenog litija. Približno 60% od toga dobiva se iz slanih polja u Čileu, 20% iz Kine i 14% iz Argentine (Meng i sur., 2019 navedeno u Peiró, Villalba Méndez i Ayres, 2013). Slanice se klasificiraju u tri kategorije: geotermalne slanice, slanice u naftnim poljima (relativno nov izvor – projekti u Sjevernoj Americi rade na razvitku ekstrakcije litija iz otpadnih voda naftnih polja, i iako su manje kvalitetni, s razvitkom odgovarajuće tehnologije mogu postati dodatni izvor (Azevedo i sur., 2022)) i kontinentalne slanice, od kojih su kontinentalne najveći izvor litija na svijetu. Uspoređujući sve ove izvore litija, izgledno je da bi pridobivanje litija iz geotermalnih slanica moglo biti brže i jeftinije, dakle ekonomski isplativije, nego iz slanih polja prirodnom evaporacijom slanica, način koji je danas rašireniji i komercijaliziraniji (Pennel, 2018).

Glavni procesi za dobivanje litija iz slanica su proces isparavanja smjese natrijeva hidroksida i vapna (CaHNaO_2), koji se općenito sastoji od faza koje počinju koncentriranjem slanice evaporacijom, nakon toga se uklanjanju nečistoće, i precipitacija pomoću karbonizacije. Dobivanje litija iz slanica je od 30 do 50 posto jeftinije nego dobivanje iz ruda, stijena ili minerala (Meng i sur., 2019 navedeno u Tran i Luong, 2015). Zbog sporosti prirodne evaporacije u slanicama, ovaj je proces najbrži u klimatskim uvjetima s malo padalina i pri niskoj vlažnosti, kao i s jakim vjetrovima i dobroj solarnoj ekspoziciji (Meng i sur., 2019 navedeno u Peiró, Villalba Méndez i Ayres, 2013).

U većini slanica procjenjuje se da je sadržaj litija između 200 i 700 mg/kg, s malim brojem slanica u kojima je sadržaj nešto više od 1000 mg/kg (Meng i sur. 2019 navedeno u Kamienski i sur. 2004 i Kesler i sur. 2012). Slanice također sadrže i velik udio manje poželjnih elemenata koji smanjuju čistoću krajnjeg produkta, poput magnezija, kalcija, kalija i natrija. Da bi se neželjeni elementi uklonili, potrebno je koristiti tehnologije poput ionskih membrana, ekstrakcije otapalom i ionske zamjene (Meng i sur. 2019 navedeno u An i sur., 2012; Chitrakar i sur. 2012; Garret, D. E., 2004; Hoshino, T. 2013a; Hoshino, T. 2013b; Nishisama i sur. 2011 i Xiang i sur. 2016). Pod ekstrakcijom litija podrazumijevamo više kemijskih procesa koji služe za izolaciju litija iz uzorka i pretvorbu u oblik litija koji se može prodati za daljnju uporabu u industriji, a taj je oblik relativno stabilan, primjerice litijev karbonat. Većina procesa ekstrakcije litija uključuje neki oblik rudarenja jer je potrebno doći do podzemnih nalazišta litijem bogatih minerala ili slanica [3].

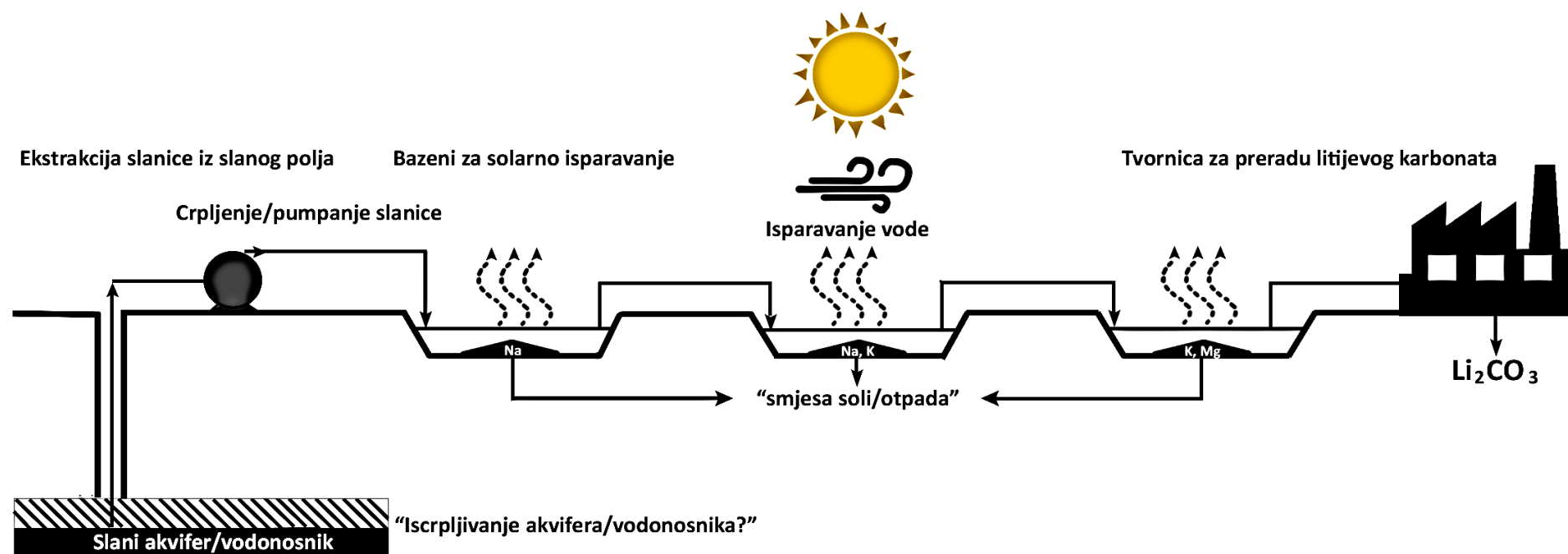
Prilikom ekstrakcije litija iz slanica, najprije se voda crpi iz akvifera na površinu u plitka koncentrirana jezera, da bi se solarnom evaporacijom (slika 2.) uklonila voda tijekom više mjeseci ili čak godina (jedna do dvije godine [3]) (Bell, 2020). Redoslijed precipitacije je uobičajeno halit (NaCl), silvit (KCl), silvinit (KCl.NaCl), magnezijeve soli, i druge alkalijske soli prisutne u malim količinama (Meng i sur., 2019; Meng i sur. 2019 navedeno u Tran i Luong, 2015). Kako voda isparava i soli se precipitiraju, raste koncentracija litija u slanici. Kada se koncentracija litija popne na 6%, tada se iz otopine uklanjanju magnezij, kalcij i bor (Meng i sur., 2019). U nekim slučajevima se pomoću reverzne osmoze povećava koncentracija kako bi se ubrzao proces evaporacije. Kada se dosegne ta optimalna koncentracija litijevog klorida, otopina se uvodi u postrojenje za oporabu na ekstrakciju i filtriranje. Ovaj proces najčešće varira ovisno o sastavu slanih polja, ali obično uključuje sljedeće korake:

- Predtretman: uključuje filtraciju i/ili pročišćavanje ionskom zamjenom kako bi se uklonili neželjeni sastojci iz slanice, poput mangana i bora.
- Kemijski tretman: niz kemijskih otapala i reagensa dodaje se kako bi se željeni produkti i nusprodukti izolirali kroz precipitaciju.
- Filtracija: slanica je konačno tretirana reagensom, primjerice natrijevim karbonatom, da bi se formirao litijev karbonat. Tada se produkt filtrira i suši te priprema za prodaju. Određeni reagensi dodaju se ovisno o željenom produktu, odnosno uobičajenom obliku litija za prodaju, poput litijevog hidroksida, litijevog klorida, litijevog bromida i butil-litija.

Višak preostale otopine odvodi se natrag u slano polje. Litijev karbonat (slika 1.) je stabilan bijeli prah koji je vrijedan međuprodukt jer se može pretvoriti u specijalizirane industrijske soli ili kemikalije, ali i procesuirati u čisti litij [3]. Ekonomski isplativi izvori iz slanih jezera sadrže između nekoliko stotina dijelova na milijun (ppm) i čak 7000 mg/kg litija (Bell, 2020). Ovaj proces je nepogodan za okoliš s obzirom na to da se koriste velike količine vode i to u području gdje je voda oskudna (Drabik i Rizos, 2018, navedeno u Shankleman i sur., 2017).



Slika 1. Litijev karbonat (Li_2CO_3) [39].



Slika 2. Shematski prikaz dobivanja litijeovog karbonata iz slanica u slanim poljima pomoću solarne evaporacije, što potencijalno može dovesti do osiromašivanja vodonosnika (prilagođeno prema Flexer, Baspineiro i Galli, 2018).

2.1.2. Rude

Ekstrakcija litija iz ruda je složenija i uključuje širi spektar procesa, i iako ovi minerali iz ruda imaju viši sadržaj litija, ekstrakcija iz tih minerala je ipak dva puta skuplja od ekstrakcije iz slanih jezera, ponajviše zbog količine energije, kemikalija i materijala koji se koriste tijekom tih procesa i globalno se relativno malo litija proizvodi na ovaj način, otprilike 20 tona godišnje [3]. Otprilike 35% svjetske opskrbe litijevih proizvoda dolazi iz ruda i glina, a najviše od njih (85%) se trenutno vadi u Greenbushes, Australiji, gdje se vadi spodumen, kao nusprodukt elemenata rijetkih zemalja. Ostatak svjetske opskrbe otpada na gline i druge minerale bogate litijem (Meng i sur., 2019). Minerali koji sadrže litij uglavnom se dijele na dvije skupine – fosfati i kompleksni alumosilikati. Čak 131 mineral sadrži neki oblik litija [1] međutim, samo ih se pet aktivno koristi u komercijalne svrhe i vadi za potrebe proizvodnje litija, a to su spodumen, lepidolit, petalit, ambligonit i eukriptit, koji je vrlo rijedak mineral [3], a osim njih koristi se i zinwalidit (Choubey i sur., 2016). Spodumen je od ovih pet navedenih najčešći u upotrebi. U Tablici 1. je prikazan pregled tih minerala i njihove kemijske formule.

Tablica 1. Minerali važni za dobivanje litija i njihove kemijske formule [1], [3].

Mineral	Kemijska formula
Spodumen	$\text{LiAl}(\text{SiO}_3)_2$
Lepidolit	$\text{K}(\text{Li},\text{Al})_3(\text{Al},\text{Si},\text{Rb})_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$
Petalit	$\text{LiAlSi}_4\text{O}_{10}$
Ambligonit	$\text{LiAl}(\text{F},\text{OH})\text{PO}_4$
Eukriptit	LiAlSiO_4
Zinwalidit	$\text{KLiFeAl}(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$

Spodumen je stabilan litijev alumosilikat, najvažniji komercijalni mineral za ekstrakciju litija na industrijskoj razini. Karakterizira ga visok udio litija (udio Li_2O je 6-9% (Choubey i sur., 2016)), široko rasprostranjena nalazišta i komercijalno izvediva obrada [3]. Spodumen je silikatni mineral (inosilikat), piroksenskog tipa, sa silicijevim dioksidom u tetraedarskom obliku. Čini 90% svjetske proizvodnje litijevog karbonata koji se ne dobiva iz slanica. Prerađivački procesi ovih ruda vrlo su slični i mogu se podijeliti u tri opće kategorije: procesi prerađivanja kiselinama, alkalni prerađivački procesi i procesi kloriranjem. Uglavnom je za sve tipove ruda jednak početak prerade koji uključuje drobljenje, mljevenje i zagrijavanje (Meng i sur., 2019).

2.1.2.1. Prerada upotrebom kiseline

Izvađena ruda spodumena se zagrije na 1100 °C (Rioyo i sur., 2020). Tijekom tog procesa α -spodumen se pretvara u β -spodumen, oblik spodumena koji je podložniji kemijskim procesima, odnosno reaktivniji je sa sumpornom kiselinom (Rioyo i sur., 2020 navedeno u Talens Peiró, Villalba i Ayres, 2013; Dessemond i sur., 2019; Meng i sur., 2019), te se potom ohladi na 65 °C, zatim se drobi i miješa, dodaje se koncentrirana sumporna kiselina i smjesa se ponovno zagrijava na 200-250°C. Tako nastaju Li_2SO_4 koji je topiv u vodi i netopivi ostaci rude (Rioyo i sur., 2020 navedeno u Talens Peiró, Villalba, i Ayres, 2013; Rioyo i sur., 2020 navedeno u Mishra i Majumdar, 2017, Meng i sur., 2019).

Višak sumporne kiseline se neutralizira s kalcijevim karbonatom (CaCO_3). Nečistoće poput magnezija, kalcija, aluminija i željeza uklanjaju se kontroliranom promjenom pH. Dodaje se vapno (CaO) kako bi se precipitirao magnezij u obliku magnezijevog oksida/hidroksida. Otopini se zatim povećava koncentracija pomoću ionske zamjene ili višestrukog isparavanja, a onda se dodaje natrijev karbonat (Na_2CO_3) i zagrijava se na 90-100°C kako bi nastali kristali litijevog karbonata i otopljeni natrijev sulfat (Na_2SO_4). Nastala otopina se centrifugira, tada se precipitira litijev karbonat koji se ispire i suši prije transporta i prodaje (Meng i sur., 2019 navedeno u Salakjani, Singh i Nikoloski 2019; British Geological Survey, 2016; Meshram, Pandey i Mankhand 2014; Forster, 2011; Bell, 2020; Rioyo i sur., 2020 navedeno u Talens Peiró, Villalba i Ayres, 2013).

Nadalje, proizvodnja čistog litija u obliku metala radi se metodom elektrolize taljene soli (Rioyo i sur., 2020). Tijekom ovog procesa potrebna je taljevina koja sadrži smjesu s otprilike jednakom količinom litijevog klorida i kalijevog klorida radi proizvodnje rastaljenog eutektičkog elektrolita (Rioyo i sur., 2020 navedeno u Mishra i Majumdar, 2017). Litijev klorid miješa se s kalijevim kloridom u omjeru 55% prema 45%. Kalijev klorid se dodaje iz dva razloga: 1) da bi se povećao konduktivitet litija i 2) smanjila fuzijska temperatura (Bell, 2020). Elektrolitička ćelija radi u temperaturnom rasponu od 400°C do 420°C. Ćelija ima čeličnu katodu s kućištima od lijevanog željeza, i grafitnu anodu (Rioyo i sur., 2020 navedeno u Mishra i Majumdar, 2017). Tijekom ovog procesa oslobađa se klor, rastaljeni litij se diže na površinu i skuplja se u kućišta od lijevanog željeza. Taj čisti litij proizveden ovakvim postupkom omata se parafinskim voskom kako bi se spriječila oksidacija. Omjer konverzije litijevog karbonata u litij u metalnom obliku je oko 5,3 prema 1 (Bell, 2020).

2.1.3. Gline

Proces dobivanja litija iz gline donedavno se smatrao preteškim i vrlo skupim, ali zbog sve veće potražnje litija sve se više istraživanja usredotočuje na pronalazak učinkovitog i jeftinog načina dobivanja litija iz glina. Neki projekti su pokazali dobre rezultate i objavili preliminarne rezultate izvedivosti, pokazujući da takav način dobivanja litija ima dobre izgleda u budućnosti [4]. Nekoliko tvrtki u američkoj saveznoj državi Nevadi (Bell, 2020) provodi istraživanja više različitih procesa ekstrakcije litija iz gline, a osim u Nevadi provode se projekti i u Meksiku, Peruu, Španjolskoj i Portugalu (Tablica 3). Gline koje sadrže litij smatraju se potencijalnim izvorom litija, koje se uobičajeno mogu naći na zapadu SAD-a. Sadrže smektite, hektorite i kaolinite koji sadrže od 0,3 do 0,6% litija (Meng i sur., 2019 navedeno u Kamienski i sur. 2004). U Tablici 2. je prikazan pregled glina i njihove formule.

Tablica 2. Pregled minerala i njihovih kemijskih formula.

Grupa smektita [40]	Kemijska formula
hektorit	$\text{Na}_{0.3}(\text{Mg},\text{Li})_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{F},\text{OH})_2$
salitotit	$(\text{Li},\text{Na})\text{Al}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_5$
swinefordit	$\text{Li}(\text{Al},\text{Li},\text{Mg})_3((\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10})_2(\text{OH},\text{F})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Grupa kaolinita-serpentina [41]	Kemijska formula
manandonit	$\text{Li}_2\text{Al}_4(\text{Si}_2\text{AlB})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Nakon kopnenih slanica, minerali su drugi najveći izvor litija na svijetu – 25% svjetskog litija dobiva se iz minerala. Gline koje sadrže litij poput hektorita se još uvijek ne koriste za dobivanje litija, ali imaju potencijal biti jedan od važnijih izvora litija u bliskoj budućnosti (Meng i sur. 2019 navedeno u Bacanora Minerals, 2016 i Western Lithium, 2016). Smatra se da ovo relativno novo područje dobivanja litija iz glina nudi visoke nagrade uz visoke rizike (eng. *high risk high reward*), a za sad se pokazalo da ovaj način dobivanja litija daje veće količine i puno je brži od dobivanja litija iz slanica, no mora se uzeti u obzir da neki od projekata (Tablica 3.) imaju kvalitetnije gline, neki manje kvalitetne, a razlikuju se i po količini gline [4].

Tablica 3. Pregled projekata koji istražuju dobivanje litija iz gline [4].

PROJEKT	Litologija i mineralogija	Izvor:
Bacanora Lithium (Meksiko) – Sonora Lithium Project	Oligocenski do miocenski riolitni tufovi, ignimbriti i breče gornjeg vulkanskog kompleksa, polugrabeni ispunjeni fluvijalno-lakustričnim sedimentima i interkaliranim tufovima, sadrže litij i druge alkalijske metale - jedini mineral glina za sad potvrđen je polilitionit - gornja i donja glinena jedinica – Li bogate gline	[5]
ioneer Ltd. (prijašnji naziv Global Geoscience Limited) (Nevada, SAD) – The Rhyolite Ridge Lithium-Boron Project	Formacija Cave Springs - lapori bogati karbonatnom glinom – visokokvalitetni Li, nisko do umjereno kvalitetan B - lapori – visokokvalitetan B, umjereno kvalitetan Li (sirlezit)	[6]
Cypress Development Corp. (Nevada, SAD) – Clayton Valley Lithium Project	Formacija Esmeralda - silt, glinenci (tri zone), tufni madston (<i>tuffaceous mudstone</i>) – grupa smektita (montmorillonita)	[7]
Lithium Nevada Corp. (Lithium Americas, Nevada, SAD) – Thacker Pass Project	McDermitt vulkansko polje (<i>volcanic field</i>) - vulkanski kompleks s četiri riolitne kaldere iz srednjeg miocena, Thacker Pass projekt u jednoj od njih četiri, tzv. McDermitt kalderi u kojoj se nalaze Thacker Pass naslage - sedimentni slojevi Thacker Pass naslaga uglavnom se sastoje od debljih slojeva glinenca i tanjih slojeva vulkanskog pepela koji se izmjenjuju - u glinencima i vulkanskom pepelu – od 100 do 4000 ppm Li, sporadično i s više od 8000 ppm Li - smektit i ilit, potvrđeni i hektorit (minerali glina), ostali minerali: kalcit, kvarc, K-feldspati, plagioklasi, dolomit, fluorit; analcim, pirit	[8]
American Lithium (od 2021.; prije zaseban projekt tvrtke Plateau Energy Metals Inc. [11] – projekti: TLC Lithium (Nevada, SAD), Falchani Lithium (Peru)	TLC Lithium – glina, silt, vulkanski pepeo i dijatomejska zemlja uslojeni između pješčenjaka i konglomerata – litij > 1000 ppm Falchani Lithium – Li-bogati tufovi	[9]
Silver Valley Metals Corp. (prije Alset Minerals Corp., pa OrganiMax Nutrient Corp) – Projekt MexiCan (Meksiko)	Santa Clara, Caligüey, La Salada slana polja - nekonsolidirani jezerski sedimenti koji se sastoje od terigenog, transportiranog i kemijski istaloženog evaporitnog sedimenta, oni sadrže količine kalija, litija i bora od ekonomskog interesa - jezerski sedimenti – hektoritna glina	[10]
Infinity Lithium Corp. (Španjolska) – San José Lithium Project	- zamjensko ležište tinjca zinnwaldita u pelitnim slejtovima središnje Iberijske zone - mineralizacija Li – unutar slejtova i u manjoj mjeri u kvarcnim karbonatnim žilama (povijesno korišteno za rudarenje kositra i volframa) - otprilike jednaki dijelovi tinjaca, kvarca i turmalina	[12]
Novo Litio Ltd. (prije Dakota Minerals; Portugal) – Sepeda Lithium Project	obustavljeno – pravni problemi zbog nedostatka odgovarajućih dozvola	Goclawska, 2022
Savannah Resources Plc. (Portugal) – Mina do Barroso Lithium Project	spodumen	Goclawska, 2022
Lepidico Ltd. (Portugal)	Alvarroes rudnik pegmatita u središnjoj Iberijskoj zoni – cilj izdvajanje litijevog karbonata iz lepidolita i zinnwaldita	Goclawska, 2022

2.1.4. Oceani

Oceani, odnosno morska voda, u posljednje se vrijeme razmatraju kao potencijalni dodatni izvor litija. Morska voda sadrži ogromne količine litija, ali količina natrijevih, magnezijevih i drugih iona predstavlja veliki izazov ekstrakciji litija iz morske vode. Objavljeni su mnogi radovi u kojima su rađena istraživanja na koji način najučinkovitije i najisplativije izolirati litij iz morske vode, ali još je neizvjesno koji će od trenutnih ili budućih načina biti dovoljno isplativ za komercijalnu upotrebu.

Yang i sur. (2018) predlažu metodu izoliranja litija iz morske vode temeljenu na elektrolizi. Tijekom svog istraživanja koristili su čvrsti elektrolit NASICON tipa (superionski litijski vodič) kao selektivnu membranu za litijeve ione i aprotični elektrolit (bez pokretnih vodikovih iona koji bi se mogli otpustiti u otopinu (Takač, 2018)) umjesto vodene otopine na strani anode ćelije kako bi stvorili odjeljak bez protona. Taj prototip može se napajati solarnim pločama pomoću posebno dizajniranog podesivog strujnog kruga, te se litij u obliku metala može izravno stvarati tijekom procesa ekstrakcije litija.

Tang i sur. (2020) razvili su film, koji osim što je obnovljiv, može se i reciklirati. Zove se vodikov mangan oksid/modificirani celulozni film (HMO/celulozni film). Omogućuje ekstrakciju litija iz vodenih otopina koje sadrže litij. HMO je oksid koji služi kao ionsko sito sa specifičnim karakteristikama hvatanja iona, a dobiva se iz odgovarajuće preteče, litij-manganovog oksida. Litijev ion se uklanja s kristalnog mjesta klorovodičnom kiselinom te se tako stvara prazno mjesto, odnosno šupljina koja može primiti litijev ion iz otopina. HMO se uglavnom koristi u obliku čestica, a s obzirom na to da imaju lošu disperzivnost i nedovoljnu propusnost teško ih je reciklirati u industrijskim primjenama (Tang i sur., 2020 navedeno u Park i sur., 2015). Napravljena su brojna istraživanja kako prevladati ovo loše svojstvo HMO-a – granulacijom, membrinizacijom, formiranjem vlakana, magnetizacijom i sl., a u ovom radu autori su iskoristili prirodni polimer – celulozu – kao okvir na koji su ugradili HMO i tako hvatali Li^+ iz otopina.

Liu i sur. (2020) tvrde da je poželjno smisliti učinkovit proces dobivanja litija iz morske vode kako bi se osigurala sigurna opskrba litijem. Međutim, zbog visoke koncentracije natrija u morskoj vodi prilično je teško izdvojiti litij. U svom su radu koristili FePO_4 elektrode obložene TiO_2 kako bi izdvojili litij tzv. *pulse-rest* i *pulse-rest-reverse* metodama elektrokemijske interkalacije. Autori tvrde da ova metoda uspješno povećava selektivnost litija istovremeno smanjujući interkalacijski prenapon. Istim metodama postiže se povećanje

stabilnosti kristalne strukture elektrode tijekom interkalacije između litija i natrija te produljenje životnog vijeka elektrode.

2.1.5. Litij-ionske baterije

Sve se više istraživanja usredotočuje na pronalazak učinkovitog i ekonomski isplativog načina recikliranja iskorištenih litij-ionskih baterija, kako bi se što više ključnih elemenata oporavilo iz njih i ponovno iskoristilo u proizvodnji novih litij-ionskih baterija. Recikliranje litij-ionskih baterija istražuje se još od 1990.-ih godina, ali u zadnje vrijeme istraživanja fokusirana na recikliranje sve više dobivaju na važnosti (Bae i Kim, 2021). Postoji nekoliko shema prerade predloženih za preradu iskorištenih baterija. Kako postoje različite vrste litij-ionskih baterija, tako variraju i tipovi prerade koji su za svaku vrstu baterije specifični. Većina procesa nakon rastavljanja i primarnih procesa prerade je vrlo slična preradi mineralnih ruda i/ili slanica, ali se razlikuju ovisno o specifičnom sastavu i kemizmu baterija (Meng i sur., 2019). Međutim, s obzirom na to da litij još uvijek ima relativno nisku cijenu na tržištu, istraživanja se fokusiraju na skuplje elemente poput kobalta, stoga je manje istraživanja bazirano na ekstrakciji litija iz iskorištenih litij-ionskih baterija. Kobalt je najskuplji ključni element u litij-ionskim baterijama, a sve više se radi na tome da se komercijaliziraju litij-ionske baterije koje umjesto kobalta koriste ili LiFePO_4 (LFP) ili $\text{LiNi}_{0.3}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$ (Bae i Kim, 2021). Zbog njegovog obilja te relativno niske cijene, recikliranje i uporaba litija je preskupa te nije ekonomski isplativa, iako je tehnički moguća.

U praksi su gotovo svi procesi recikliranja litij-ionskih baterija hibridni te se sastoje od barem jednog mehaničkog i pirometalurškog predtretmana prije dobivanja metala putem hidrometalurških procesa. Mehanički predtretman uključuje fizičko mljevenje praznih litij-ionskih baterija, čiji dijelovi imaju različita mehanička svojstva. Pirometalurškim procesima se na visokim temperaturama uklanjaju organski materijali pomoću evaporacije što uzrokuje reakcije u katodi i anodi kako bi litij postao topljiv u vodi. Hidrometalurški proces su najčešće korištena metoda za ekstrakciju litija. Ionizira se litij u predtretiranim aktivnim materijalima upotrebom kiselina i lužina, zatim se ispire kako bi se dobila otopina Li^+ iz koje se može ekstrahirati litij, najčešće se koriste sumporna kiselina, klorovodična ili dušična kiselina (Bae i Kim, 2021).

Elektrolit, vezivo i plastična kućišta mogu se ukloniti jedino termičkom obradom ili mehaničkim putem s bilo kakvom učinkovitošću (Meng i sur., 2019 navedeno u Xu i sur., 2008), a trenutno je praksa u industriji da se baterije tale, ali se litij takvim načinom gubi u šljaku, a dobivaju se osnovni metali (Ni, Co, Cu, Mn) (Meng i sur., 2019 navedeno u Al-Thyabat i sur., 2013). Litij se izdvaja iz litij-ionskih baterija dvama glavnim procesima: najprije predtretmanima kojima se odvajaju aktivni materijali koji sadrže litij (katoda, anoda) od

perifernih dijelova (plastika, polimer), a zatim se litij kemijski odvaja iz aktivnih materijala pirometalurškim i hidrometalurškim metodama te metodama kemijske ekstrakcije (Bae i Kim, 2021). Ako bi se reciklirali svi metali iz litij-ionskih baterija, potrebno je primijeniti više hidrometalurških i pirometalurških procesa za svaku određenu frakciju. Nekoliko je takvih procesa recikliranja litij-ionskih baterija komercijalizirano, ali su drukčiji za svaki specifičan kemizam baterija, stoga nisu primjenjivi za svaku vrstu litij-ionskih baterija. Kasnije u radu ukratko je objašnjeno nekoliko postupaka recikliranja baterija.

2.1.6. Zalihe litija

Litij je najbitniji element u baterijama za električna vozila te se pretpostavlja da će potreba za njim znatnije porasti, čak trostruko do 2025. (Drabik i Rizos, 2018, navedeno u Roskill, 2017). Prema podacima USGS-a (2022), svjetska proizvodnja litija povećala se na 100 tisuća tona u 2021. godini sa 82 500 tona u 2020. godini (21%) zbog povećanih zahtjeva industrije litij-ionskih baterija. Usprkos velikim nalazištima litija, cijena raste, a i očekuje se daljnji rast cijene zbog veće potrebe za litijem, zato se smatra da će s vremenom i recikliranje postati isplativije (Drabik i Rizos, 2018; USGS, 2022).

Značajne zalihe u slanicama nalaze se u Južnoj Americi u tzv. „litijskom trokutu“, i u Kini, kao i u naslagama spodumena u Australiji (Simon, Ziemann i Weil, 2015). „Litijski trokut“ čine Argentina, Bolivija i Čile, gdje se nalaze najveće zalihe litija na svijetu u slanicama. Ove tri države imaju različite povijesti vezane uz litij i regulatorni okvir iskorištavanja prirodnih resursa općenito. U Čileu i Argentini većina je prirodnih resursa privatizirano, ali ne i litij, a dok Čile i Argentina već desetljećima eksploatiraju litij, Bolivija tek započinje komercijalizaciju velikih razmjera. Trenutno je u Boliviji stanje takvo da bolivijska vlada zahtijeva državno vlasništvo nad svim prirodnim resursima, a posebno litija. Litij bi mogao biti ili 1) banalna tržišna roba, 2) strateški resurs ili 3) subjekt sociotehnološkog imaginarija kojim bi se moglo pokazati kako bi rudarstvo moglo poslužiti postizanju razvojnih ciljeva (Barandiaran, 2019). Sociotehnološki imaginarij je relativno novi pojam istraživanja koji ujedinjuje sociologiju i politiku sa znanostima i tehnologijom, a radi se o zamišljenim ishodima primjene tehnoloških i znanstvenih dostignuća u zakone određene države koji bi mogli stvoriti održiv sustav i društveni poredak i pozitivno utjecati na društvo i okoliš, odnosno kako bi ta dostignuća mogla pozitivno utjecati na razvojne ciljeve države u pogledu društva, politike i gospodarstva. Imaginarij je po svojoj gruboj definiciji zamišljena budućnost koja pomaže donositeljima zakona i pravilnika odlučiti u koje područje znanosti i tehnologije je potrebno investirati da bi se ta buduća dostignuća mogla primijeniti na cjelokupni društveni poredak i stvoriti određenu količinu geopolitičke moći [35] (Jasanoff, Kim i Sperling, 2007; Dorn i Ruiz Peyré, 2020 i Chateau, Devine-Wright i Wills, 2021). Iznenadujuća je činjenica da su sve tri ove južnoameričke države, usprkos različitim povijesnim tokovima eksploatacije litija, zapravo krenule u jednakom smjeru, a to je upravo treći navedeni mogući smjer, odnosno mogućnost da eksploatacija litija bude održiva, pouzdana i pravedna.

U Europi su zabilježena nalazišta lepidolita u Portugalu (oko 60 tisuća tona lepidolita) (Simon, Ziemann i Weil, 2015 navedeno u Brown i sur., 2013; USGS, 2022), a nedavno su

utvrđene naslage bogate litijem i u Finskoj – poznata ležišta sadrže ukupno 16 milijuna tona rude koja sadrži otprilike 160 tisuća tona litijevog oksida (Li_2O), dakle 45 500 tona litija, i zalihe procijenjene na 9,3 milijuna tona koje sadrže 92 tisuće tona litijevog oksida (Törmänen i Tuomela, 2021). Osim u Portugalu i Finskoj, istraženo je i područje u Austriji u mjestu Wolfsberg (blizina Graza, slika 3.) gdje su otkriveni oblici spodumena, ali i pegmatitne žile koje sadrže litij [33], u kojima je procijenjena količina litija u sveukupno izmjerenim, indiciranim i pretpostavljenim izvorima na 13 milijuna tona s 1.00% Li_2O (Simon, Ziemann i Weil, 2015).



Slika 3. Satelitska snimka smještaja mjesta Wolsfberg, Austrija (Google Earth, 2015a)

Što se tiče sveukupne količine litija u identificiranim svjetskim resursima, prema USGS (2022), procijenjeno je da se na kopnu nalazi 89 milijuna tona litija, a procijenjena količina litija u oceanu je čak 230 milijardi tona (Mamadou S. i sur., 2015, Yang i sur., 2018). Sveukupna količina litija u poznatim zaliham na svijetu procijenjena je na 22 milijuna tona (USGS, 2022). U Tablici 2. nalazi se popis zemalja i zalihe litija u njima. Geografska raspodjela litija je vrlo neravnomjerna, stoga bi dobivanje litija iz oceana, koji čine gotovo neograničen resurs litija, omogućilo smanjenje te neravnomjernosti resursa na kopnu. Iako je količina litija u oceanima ogromna, njegova je koncentracija jako mala, svega 0,1-0,2 ppm, a smatra se da ekstrakcija litija iz oceanske vode, zbog još uvijek nedovoljno razvijenih i komercijaliziranih tehnologija, neće biti moguća u skorijoj budućnosti (Yang i sur., 2020 navedeno u Choubey i sur. 2017; Greim i sur., 2020).

Tablica 4. Zalihe litija i identificirani resursi litija u zemljama (prilagođeno prema USGS, 2022).

Zemlje	Zalihe (u tonama)	Identificirani resursi (u tonama)
Čile	9 200 000	9 800 000
Australija	5 700 000	7 300 000
Argentina	2 200 000	19 000 000
Kina	1 500 000	5 100 000
SAD	750 000	9 100 000
Zimbabve	220 000	500 000
Brazil	95 000	470 000
Portugal	60 000	270 000
Bolivija		21 000 000
Kongo (Kinshasa)		3 000 000
Kanada		2 900 000
Njemačka		2 700 000
Meksiko		1 700 000
Češka		1 300 000
Srbija		1 200 000
Rusija		1 000 000
Peru		880 000
Mali		700 000
Španjolska		300 000
Gana		130 000
Austrija		60 000
Finska		50 000
Kazahstan		50 000
Namibija		50 000

Većina svjetskih postrojenja za rafiniranje litija je u Kini, što pojačava dominaciju Kine u vrijednosnom lancu litij-ionskih baterija (Drabik i Rizos, 2018; Lebedeva, Di Persio i Boon-Brett, 2018; Baars i sur., 2020). Potrošnja litija povećala se zbog široke primjene punjivih litijevih baterija koje se sve više koriste u industriji električnih vozila, ali i prijenosnih električnih uređaja i u električnim alatima i u primjenama za pohranu u mreži, a recikliranje litija bi smanjilo potrebe za rudarenjem litija (Drabik i Rizos, 2018; USGS, 2022).

2.2. Kobalt

Jedan od važnijih elemenata u baterijama je kobalt, čija su velika nalazišta u DR Kongu i gdje se 51% svjetske proizvodnje kobalta odvija kroz rudarsku industriju bakra, a Kongo vodi i u sveukupnoj proizvodnji kobalta – odgovoran je za čak 70% svjetske proizvodnje (Drabik i Rizos, 2018; USGS, 2022). Kobalt je stabilan na zraku, umjereno reaktivan, stoga može formirati mnoge kemijske spojeve, koji su korisni i važni katalizatori u brojnim industrijskim procesima. Koristi se u legurama za dijelove motora zrakoplova i u legurama otpornima na koroziju i površinsko trošenje, kao i u baterijama i u galvanizaciji [13], [14].

U Zemljinoj kori pretpostavljena količina kobalta je 25 mg/kg, a prema količini se nalazi na 32. mjestu, odmah ispred litija [2], [15]. U prirodi dolazi samo u spojevima, u mineralnim rudama. Glavne rude kobalta su kobaltit, eritrit (hidrirani arsenat kobalta), glaukodot i skutterudit. Uobičajeno se proizvodi kao nusprodukt niklove i bakrove rudarske industrije. U tablici 5. navedene su kemijske formule minerala kobalta. Najčešće primarne rude kobalta su kobaltovi sulfidi, poput karolita, katierita i lineita te oni predstavljaju glavni izvor kobalta u DR Kongu, zatim sulfarenidi (kobaltit) u Zambiji, Kanadi i SAD-u, arsenidi (skutterudit, smaltit) koje pronalazimo u rudama bakra i kobalta u Ontariju (Kanada) i Maroku te arsenati (eritrit) koji se uglavnom javljaju u naslagama Bou Azzer u Maroku. Manje eksploatirane primarne rude kobalta uključuju kobaltove selenide poput trogtalita iz Musonoï rudnika (Kolwezi, DR Kongo) zajedno s raznim paladijevim selenidima (Dehaine i sur., 2021 navedeno u Gauthier i Deliens, 1999 i Pirard i Hatert, 2008).

Tablica 5. Glavne rude kobalta i kemijske formule prilagođeno prema Dehaine i sur., 2021.

Ruda	Kemijska formula
kobaltit	CoAsS
eritrit	$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
glaukodot	$(\text{Co,Fe})\text{AsS}$
skutterudit	$(\text{Co,Ni})\text{As}_3$
karolit	CuCo_2S_4
katierit	CoS_2
lineit	$\text{Co}^{2+}\text{Co}^{3+}_2\text{S}_4$
smaltit	CoAs_{3-x}
trogtalit	CoSe_2

Kao što je prethodno navedeno, kobalt je gotovo uvijek nus-produkt ili koprodukt rudarenja drugih metala, uglavnom nikla i bakra. Velike količine kobalta također se javljaju na morskom dnu, uz nodule mangana i kore bogate kobaltom, ali je potrebno još istraživanja kako bi se utvrdila održivost ove metode ekstrakcije. Postoji pet glavnih tipova geoloških okoliša u kojima se nalaze ekonomski zanimljive koncentracije kobalta [16]:

- a. **Cu-Co taložine unutar stratiformnog sedimenta.** Kobalt se proizvodi kao nus-produkt, iako je bakar glavni metal vađen iz ovakvih rudnika. Više od pola od sveukupne količine kobalta vađenog u svijetu vadi se iz rudnika u ovim ležištima. Minerali ruda u piritičnim šejlovima i pješčenjacima koji su bogati organskom tvari istaložili su se u lagunskom okolišu u blizini plaža u reduktivnim uvjetima te karakteriziraju glavna ležišta. Ove mineralizirane naslage uvijek se nalaze iznad oksidiranih terestričkih klastičnih slojeva. Središnji afrički pojas bakra (tzv. *Central African Copperbelt*) i europski Kupferschiefer dvije su najveće i najpoznatije naslage ove vrste [16]. Općenito postoje tri zone: zona trošnih oksida koja se proteže na dubinama od 70 do 150 metara, nakon nje slijedi zona miješanih oksida-sulfida, a naposljetku zona sulfida na dubinama većim od 250 metara (Dehaine i sur., 2021 navedeno u Crundwell i sur., 2011).
- b. **Hidrotermalne i vulkanogene naslage.** Brojni oblici naslaga i mineralnih zajednica grupirani su u ovakvom tipu okoliša. Precipitacija iz hidrotermalnih fluida koji prolaze kroz matičnu stijenu često je vulkanskog podrijetla ili potaknuta vulkanskom aktivnošću te čini ključni proces u ovim naslagama. Rude se mogu pronaći u žilama i/ili pukotinama u kojima su minerali remobilizirani duž rasjednih ploha, ali i u matičnim stijenama kada su metasomatski izmijenjene.
- c. **Magmatski sulfidi.** Magmatske naslage koncentracije su nikla, bakra i nekih elemenata iz grupe platine (PGE) nastale visokim temperaturama tijekom magmatskih procesa (Dehaine i sur., 2021 navedeno u Naldrett, 1997). Za kobalt su važne bazične i ultrabazične intruzije (Dehaine i sur., 2021 navedeno u Crockett, Chapman i Forrest, 1987) i ultrabazični vulkanski tokovi (komatiti) (Dehaine i sur., 2021 navedeno u Leshner i Keays, 2002). Bazična do ultrabazična taljevina sadržavat će tekuću sulfidnu fazu koja se ne može miješati, u koju će se nikal, kobalt i grupa elemenata platine preferencijalno podijeliti ako taljevina bude zasićena sumporom, često kao rezultat kontaminacije sumporom iz kore. Kao rezultat toga, ovi elementi su izbačeni iz ostataka magme i istaloženi u različite sulfidima bogate slojeve. Ekonomski najvažnije i najveće naslage

ove vrste nalaze se u Norilsku (Rusija), Merensky grebenu (Južna Afrika), Kambaldi (zapadna Australija) i Sudburyju (Kanada) [16]. U Europi se najčešće javljaju u nordijskim zemljama – Norveškoj, Finskoj i Švedskoj, zatim na sjeverozapadu Rusije (poluotok Kola) (Törmänen i Toumela, 2021).

- d. **Lateriti.** Izrazito trošenje ultrabazičnih stijena u tropskim i suptropskim klimama može značajno obogatiti laterite, ili površinske rezidualne naslage željezom, kobaltom i niklom. Kobalt je koncentriran kada primarni sulfidni i silikatni minerali ruda prolaze kroz fizikalne i kemijske promjene pod utjecajem atmosferilija. Kobalt koji je prethodno raspršen u silikatima i sulfidima matične stijene je zatim remobiliziran i istaložen u trošenim slojevima u obliku hidroksida i oksida blizu površine i u silikate u malo dubljim slojevima. Slojevi su starosti od srednjeg tercijara (odnosno između paleogena i neogena) do danas, debljine do 20 metara [16]. Postoje tri tipa ovih naslaga: 1) naslage hidratiziranih silikata s gornjim slojem oksidnih laterita, ispod kojih se javljaju u donjem saprolitu hidratizirani magnezij-nikal silikati, 2) naslage silikatne gline, u kojima su smektitne gline nastale u srednjem ili gornjem saprolitu i 3) naslage limonita, u kojima željezni oksihidroksidi naliježu na izmijenjenu matičnu stijenu. Glavni metali vađeni iz ovih naslaga su nikal i kobalt, gdje je kobalt nus-produkt. Limonit, goethit, eritrit i asbolit minerali su koji sadrže kobalt. Garnierit, mineral nositelj nikla, nastaje kada ultrabazične stijene prolaze kroz znatno slabije trošenje na manjim dubinama ([16]; Dehaine i sur., 2021). U Europi se javljaju u Grčkoj, Kosovu, Srbiji, Poljskoj, Rusiji i Ukrajini (Törmänen i Toumela, 2021, navedeno u Slack i sur., 2017).
- e. **Nodule mangana i kore bogate kobaltom.** Konkrecije bogate manganom, kobaltom i niklom mogu nastati oko sitnih komada krhotina i organskog materijala na dubokom oceanskom dnu gdje nedostaje sediment, obično na dubini 4-5,5 kilometara. Ove nodule koncentriraju minerale iz vodenog stupca i silikatnih uza. Zbog njihove blizine srednjeoceanskim hrptovima postoji mogućnost da je obogaćenje mineralima vulkanskog podrijetla. Mogu se pojaviti kao tijesno i gusto zbijeni slojevi koji pokrivaju velike površine i sadrže vrijednosti kobalta između jedan i dva i pol posto [16].

Obrada kobalta odvija se u Kini (više od 80% kobalta se primjenjuje u baterijskoj industriji (USGS, 2022)), a vađenje se uglavnom odvija u velikim rudnicima bakra i nikla u svijetu. Kobalt je rjeđi i skuplji od ostalih prijelaznih metala, a zbog načina na koji se vadi u Africi izaziva političku i etičku zabrinutost (Li i Lu, 2020). Predviđa se da će do 2050. potreba za njim zauzeti sva poznata nalazišta kobalta, stoga se svjetski lanac opskrbe brzo razvija – u

mnogim dijelovima svijeta otvaraju se novi rudnici, ili se postojeći šire što bi čak moglo dovesti i do potpunog iskorištenja zaliha [17] (Drabik i Rizos, 2018; Lebedeva, Di Persio i Boon-Brett. 2018; Kim i sur., 2021). Identificirani svjetski kopneni izvori kobalta procijenjeni su na 25 milijuna tona. U Tablici 6. nalazi se popis zemalja i njihovih zaliha kobalta. Većina ovih izvora nalazi se u Cu-Co taložinama unutar stratiformnog sedimenta u Kongu (Kinshasa) i Zambiji, zatim u naslagama laterita koje sadrže nikal na Kubi i u Australiji i obližnjim otočnim državama, u naslagama magmatskih nikal-bakar sulfida u bazičnim i ultrabazičnim stijenama u Australiji, Kanadi, Rusiji i SAD-u. Više od 120 milijuna tona izvora kobalta identificirano je u polimetalnim nodulama i korama na dnu Atlantskog, Indijskog i Tihog oceana (USGS, 2022).

Kobalt je jedan od najskupljih elemenata u litij-ionskim baterijama, a i neke zemlje u kojima se kobalt rudari nisu politički ni socioekonomski ni okolišno najstabilnije, zbog kršenja ljudskih prava, iskorištavanja djece za rad i uništavanja okoliša. Osim kobalta problematičan je i nikal, koji je zastupljeniji od kobalta, ali manje od petine trenutnih zaliha je prikladno za korištenje u baterijama [2], [24], [25], [26].

Tablica 6. Zalihe kobalta, prilagođeno prema USGS (2022).

Zemlja	Zalihe (u tonama)
Kongo (Kinshasa)	3 500 000
Australija	1 400 000
Indonezija	600 000
Kuba	500 000
Filipini	260 000
Rusija	250 000
Kanada	220 000
Madagaskar	100 000
Kina	80 000
SAD	69 000
Papua Nova Gvineja	47 000
Maroko	13 000
Ostale zemlje (sveukupno)	610 000
Svjetske zalihe (ukupno)	7 600 000

U LiCoO_2 katodi, koja pruža izvrsnu vodljivost i postojanu strukturnu stabilnost tijekom ciklusa punjenja, počela je primjena kobalta u litij-ionskim baterijama. Većina litij-ionskih baterija u električnim vozilima koristi NCA ($\text{LiNi}_{0.80}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$) i NMC ($\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$; x i $y < 1$), što su jeftinije katode koje koriste nikal i mangan umjesto dijela kobalta.

Primjena Li-ionskih baterija s NMC katodom najučinkovitija je u električnim vozilima, kao i u električnim alatima i biciklima, zahvaljujući njihovoj visokoj specifičnoj snazi, dugom vijeku trajanja, a osim toga imaju i najnižu stopu samozagrijavanja od drugih vrsta Li-ionskih baterija. Kobalt je ključni dio Li-ionskih baterija koji im daje velik doseg i izdržljivost te poboljšava stabilnost ciklusa [18].

Zamjene za kobalt, ovisno o primjeni, mogle bi rezultirati gubitkom performansi proizvoda ili povećanjem troškova (Li i Lu, 2020). Nedavno je u Teslinom Modelu 3 smanjenog dosega ukomponiran olivin (LiFePO_4 (LFP)) u katodu, što bi mogao biti veliki pomak u smislu cijene po snazi (80 dolara po kWh-1), međutim paritet cijena uz smanjenje dosega ne čini se kao najbolje rješenje, jer potrošači očekuju da cijena ne varira pretjerano, kao ni doseg uspoređujući električna vozila i vozila na pogon s motorom na unutarnje izgaranje.

Uspoređujući nekoliko vrsti katoda ($\text{NMC111} - \text{LiNi}_{0.333}\text{Co}_{0.333}\text{Mn}_{0.333}\text{O}_2$, LCO – LiCoO_2 , $\text{NMC622} - \text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ i $\text{NMC811} - \text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$) s katodama bez kobalta i visokim udjelom nikla, izvjesno je da su katode bez kobalta i s visokim udjelom nikla cjenovno pristupačnije, ali imaju i bolju specifičnu energiju. Takva vrsta katoda mogla bi omogućiti paritet cijena između električnih vozila i vozila na pogon s motorom na unutarnje izgaranje zbog njihove visoke specifične energije, a gustoća energije katoda sa slojevitim oksidom može se povišati povećanjem udjela nikla, i smanjenjem udjela kobalta. Iako takve katode trenutno predstavljaju zamjenu drugim vrstama, još uvijek je izazovna njihova primjena zbog brojnih problema koji se javljaju sa smanjenim udjelom kobalta u njima (Kim i sur., 2021).

Razumijevanje zašto je kobalt toliko važan u sastavima NCA i NMC katodama prvi je korak u raspravi o zamjeni kobalta. Kobalt i mangan elementi su koji su u početku dodani LiNiO_2 (LNO) katodi kako bi se stabilizirala. Teoretski, LNO katoda ima visoku gustoću energije, ali ima jako nisku stabilnost ciklusa i predstavlja potencijalnu opasnost zbog nestabilnosti rešetke. Osim toga, takve su katode nestehiometrijske, termički nestabilne, miješaju se litij i nikal, imaju nisku Coulombovu učinkovitost te se tijekom ciklusa javljaju višestruke faze tranzicije (Li i Lu, 2020; Kim i sur., 2021). Zbog toga se dodaje kobalt – on pruža rešetki stabilnost. U usporedbi s LCO, teško je sintetizirati čistu, slojevitu LNO katodu koja olakšava transport litijevih iona, a i češće se stvara neželjena struktura kamene soli. Nikal je sam po sebi nestabilan u sloju prijelaznog metala oksida zbog svog relativno značajnog magnetskog momenta. Kationi Ni^{2+} raspoređeni u trokut uvijek će imati dva magnetska momenta koji su suprotni jedan drugom, što dovodi do tzv. magnetske frustracije. Litijevi ioni preferirano stupaju u interakciju s nekim od niklovih iona jer nemaju magnetski moment.

Magnetska frustracija ublažena je gubitkom vrtnje u jednoj točki. Interakcija superizmjene koja dodatno stabilizira litijeve ione proizvodi se jakim međuslojnim antiiferomagnetskim sprežanjem između nikla u sloju prijelaznog metala i migrirajućeg nikla u sloju litija. Općenito, performansa je lošija kao rezultat miješanja litija i nikla zbog stanjenog sloja litijevog oksida između ploča. Sastav LNO katode brzo degradira zbog snažnog ometanja ovog tanjeg sloja kretanja litijevih iona. Kada se doda kobalt u LNO katodu, i tijekom sinteze i delitijskog procesa, smanjuje se miješanje litija i nikla zbog smanjenog udjela nikla. Kobaltov kation (Co^{3+}) nema magnetski moment i služi kao puferski atom u sloju prijelaznog metala, stoga kobalt sprječava miješanje litija i nikla i stvara se poželjna slojevita struktura. Kako bi se problemi vezani uz katode bez kobalta i s visokim udjelom nikla izbjegli, rade se istraživanja na katodama u kojima se većina nikla zamjenjuje ili manganom ili aluminijem, a pokazuju relativno nisku gustoću energije uspoređujući komercijalne katode NMC i NCA ($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y}\text{O}_2$) zbog smanjenog udjela nikla. Zato je neophodno razviti slojevite okside bez kobalta i s visokim udjelom nikla koji su stabilni i imaju visoku gustoću energije, pomoću dopiranja i zamjene raznih elemenata odgovarajućom količinom (Li i Lu, 2020; Kim i sur., 2021).

Iako se očekuje se prelazak na litij-ionske baterije koje sadrže litij-nikal-mangan-kobalt oksidnu katodu (NMC) koje su ekonomičnije, sadrže 10-20% kobalta, ali i dalje imaju dobre performanse [18], raspravlja se o istraživačkim inicijativama koje bi mogle dodatno smanjiti ili potpuno eliminirati kobalt iz litij-ionskih baterija, kako bi se smanjili troškovi litij-ionskih baterija uz zadržavanje dobrih performansi (Li i Lu, 2020; Kim i sur., 2021). Korištenje kobalta vodeće je u proizvodnji Li-ionskih baterija, ali se postupno smanjuje [18], ponajviše zbog kontroverznih političkih nestabilnosti i etički upitne industrije u jednom od najvećih proizvođača kobalta, DR Kongu (Kim i sur., 2021). Moguća je i potpuna zamjena kobalta željezom i fosforom (USGS, 2022; Li i Lu, 2020; Drabik i Rizos, 2018, navedeno u Battery University, 2018). Također, cijena kobalta mogla bi utjecati na cijenu baterija u električnim vozilima čak i više nego litij, a također je zapaženo da su na cijenu kobalta utjecali i neočekivani svjetski sukobi. Čak i nedostatak sumporne kiseline potrebne za proizvodnju kobalta može utjecati na njegovu cijenu (Shankleman i sur., 2017, Kim i sur., 2021).

2.3. Nikal

Nikal je ključna komponenta u litij-ionskim baterijama s najvećim postotkom u katodama. S očekivanim brojem električnih vozila na cestama, povećat će se i potreba za niklom i njegova cijena. Nikal je tvrdi, srebrno-bijeli metal, savitljiv, rastezljiv, otporan na koroziju i oksidaciju, ima feromagnetska svojstva. Također, ima različite primjene u industriji, osim u baterijama koristi se u kovanicama, metalnim oplatama, katalizatorima [19], [20]. Važan je jednako kao čist metal i u legurama. Nikal ima visoku električnu i toplinsku vodljivost. Više od pola proizvedenog nikla koristi se u legurama sa željezom (naročito u nehrđajućem čeliku), a velik dio ostatka proizvedenog nikla koristi se u legurama s bakrom i u toplinski otpornim legurama s kromom. Osim ovih legura, nikal se koristi i u legurama otpornima na elektricitet, magnetskim legurama i mnogim drugim legurama [31].

Elementni nikal oskudno se javlja zajedno sa željezom u kopnenim naslagama i meteoritima. Čini 0,007% Zemljine kore, odnosno 84 mg/kg, što ga smješta na 24. mjesto po količini u Zemljinoj kori [2], a u cjelokupnom sastavu Zemlje je na petom mjestu [21]. Čest je u magmatskim stijenama. Međutim, samo mali broj naslaga ispunjava zahtjeve za ekonomsku isplativost, poput koncentracije, veličine i pristupačnosti. Najvažniji izvori nikla uključuju pentlandit, koji dolazi zajedno s halkopiritom i niklonosnim lateritima, poput garnierita, magnezijevog-niklovog silikata s različitim sastavima, ali i pirotit, čiji varijeteti mogu sadržavati između tri i pet posto nikla [20], [31].

Identificirani kopneni izvori nikla procijenjeni su na 300 milijuna tona. U Tablici 7. navedene su zemlje i njihove zalihe nikla. Više od 50% svjetskih izvora nikla nalaze se u Australiji, Indoneziji, Južnoj Africi, Rusiji i Kanadi, a ekonomski važne koncentracije nikla javljaju se u naslagama magmatskih sulfida (40%) u kojima je glavni mineral rude pentlandit ($(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_8$) i rudnim naslagama lateritnog tipa (60%), u kojima su glavni minerali ruda niklonosni limonit ($(\text{Fe,Ni})\text{O}(\text{OH})$) i garnierit (hidrirani niklov silikat). Naslage niklovog sulfida se povezuju sa željezom i magnezijem bogatim ultrabazičnim stijenama u vulkanskim i plutonskim smjesticima koje se uobičajeno javljaju na velikim dubinama, a lateriti nastaju trošenjem ultrabazičnih stijena. Također se vjeruje da se značajne naslage nikla nalaze i u dubokom oceanu, poput nodula mangana na oceanskom dnu, a procjenjuje se da je u takvim naslagama više od milijun tona nikla, a razvoj tehnologija dubokomorskog rudarstva imat će utjecaj na dobivanje nikla iz takvih izvora. Na kraju, vjeruje se da je većina nikla na Zemlji koncentrirana u Zemljinoj jezgri [21], [22] (USGS, 2022).

Tablica 7. Zalihe nikla, prilagođeno prema USGS (2022).

Zemlja	Zalihe (u tonama)
Australija	21 000 000
Indonezija	21 000 000
Brazil	16 000 000
Rusija	7 500 000
Filipini	4 800 000
Kina	2 800 000
Kanada	2 000 000
SAD	340 000
Ostale zemlje	20 000 000
Sveukupno	>95 000 000

Povijesno, nikal je imao veliku važnost u razvitku i primjeni u sekundarnim ili punjivim baterijama. Baterije poput nikal-kadmijevih (NiCd) i dugotrajnijih nikal-metal hidridnih (NiMH) punjivih baterija imaju dugu povijest, a do izražaja dolaze u osamdesetim godinama prošlog stoljeća. Nikal-metal hidridne baterije prvu značajniju ulogu dobile su sredinom 1990.-ih godina, kada su implementirane u hibridni model automobila Toyota Prius. Istovremeno su se pojavile i prve litij-ionske baterije, u videokamerama, a kasnije i u pametnim telefonima, prijenosnim računalima i brojnim drugim uređajima koji nam danas olakšavaju svakodnevni život. Niklova ogromna prednost u baterijama je što uz niže troškove proizvodnje omogućuje povećanje gustoće energije i veći kapacitet skladištenja energije, što je kritično u električnim vozilima jer su to parametri o kojima ovisi doseg električnog vozila, ali i brzina punjenja. Tehnologija baterija koje sadrže nikal i dalje će napredovati, imajući sve veću ulogu u sustavima za pohranu energije i smanjujući cijenu po kWh pohrane baterije. Nikal povećava održivost i mogućnosti zamjene fosilnih goriva obnovljivim izvorima energije [23].

2.4. Mangan

Mangan je također jedan od ključnih elemenata u litij-ionskim baterijama. Koristi se kao stabilizator u strukturi katoda globalno vrlo raširenih nikal-mangan-kobaltovih (NMC) baterija, ali i u litij-ionskim-manganovim-oksidskim baterijama (LMO). U LMO baterijama mangan čini čak 61% katode. Na Zemlji je jedan od najzastupljenijih metala, smješten je na čak 12. mjestu s 1000 mg/kg u Zemljinoj kori, a zbog te činjenice smatra se jednom od najboljih zamjena kobalta o kojoj ovise trenutne vrste litij-ionskih baterija na tržištu.

Najvažnije manganove rude su oksidi romanečit, manganit, piroluzit (koji se smatra glavnim izvorom mangana i njegovih spojeva), hausmanit i karbonatna ruda rodokrozit, čije se kemijske formule mogu pročitati u Tablici 8.

Tablica 8. Rude mangana i kemijske formule.

Ruda	Kemijska formula	Izvor:
romanečit	$(\text{Ba}, \text{H}_2\text{O})_2(\text{Mn}^{4+}, \text{Mn}^{3+})_5\text{O}_{10}$	[42]
manganit	$\text{Mn}^{3+}\text{O}(\text{OH})$	[43]
piroluzit	Mn^{4+}O_2	[44]
hausmanit	$\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_2\text{O}_4$	[45]
rodokrozit	MnCO_3	[46]

Zajedno s oksidima se često javljaju i rodonit i braunit, oba silikatne rude. Ekonomski isplativim rudama smatraju se samo one koje imaju više od 35 posto mangana. U rudama se uobičajeno javljaju nečistoće poput oksida drugih metala, primjerice željeza, koje se reduciraju zajedno s manganom prilikom taljenja. U nečistoće se ubrajaju i elementi nemetala poput fosfora, sumpora i arsena, metalni oksidi jalovine – silicijev dioksid, aluminijev(III) oksid, vapno (kalcijev oksid, kalcijev hidroksid), magnezijev dioksid – od kojih svi osim silicijevog dioksida zaostaju u troski nakon taljenja [34] (Downing, 2013). Kopneni izvori mangana globalno su nepravilno rasprostranjeni, ali veliki. U Tablici 9. nalaze se zemlje i njihove zalihe mangana (USGS, 2022).

Tablica 9. Zalihe mangana u nekim zemljama (prilagođeno prema USGS, 2022).

Zemlja	Zalihe mangana (u tonama)
Južna Afrika	640 000 000
SAD	270 000 000
Australija	270 000 000*
Ukrajina (koncentrat)	140 000 000
Gabon	61 000 000
Kina	54 000 000
Indija	34 000 000
Gana	13 000 000
Kazahstan (koncentrat)	5 000 000
Meksiko	5 000 000
sveukupne svjetske zalihe:	1 500 000 000

*Za Australiju je JORC (tzv. *Joint Ore Reserves Committee*, odnosno Zajednički odbor za rudne zalihe odredio 91 milijun tona usklađenih ili ekvivalentnih zaliha.

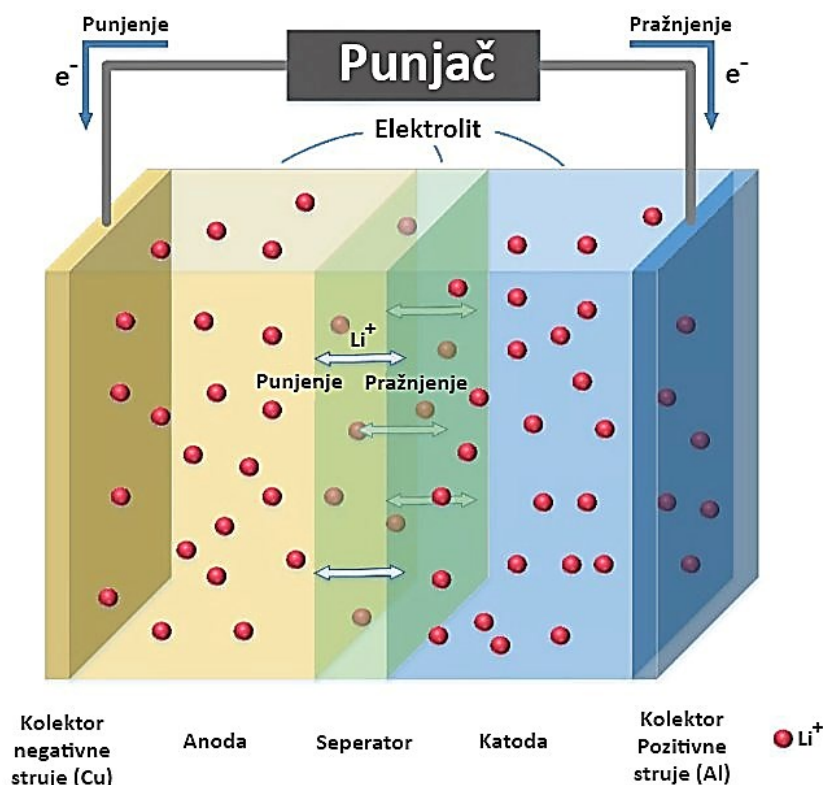
Brojna novija znanstvena istraživanja temelje se na otkrivanju novih tehnologija koje se oslanjaju na mangan. Cilj istraživanja je razviti katodu koja će sadržavati manji udio nikla i kobalta ili njihovu potpunu eliminaciju i veći, ako ne i stopostotni udio mangana. Takva katoda je jeftinija, sigurnija od one s visokim udjelom nikla, ali ipak manje stabilna. Zato svako novo istraživanje pokušava naći najbolja rješenja za smanjenu stabilnost manganom bogatih katoda i baterija. Mangan se također razmatra kao zamjena kobaltu čija je industrija etički upitna zato što je većinski koncentrirana u Kongu gdje se javljaju brojni socioekonomski problemi. [25], [27]. Primjerice, američki znanstvenici smislili su katodu s manganom kao glavnim materijalom u katodi, što ju čini jeftinijom jer ne sadrži ni nikal ni kobalt [28]. Ta dva metala pružaju stabilnost strukturi katode, ali su 2014. godine znanstvenici na MIT-u dokazali da se stabilnost može povećati ako se u litij-ionskim baterijama poveća udio litija [28]. Znanstvenici sa Sveučilišta u Kaliforniji i Nacionalnog laboratorija Lawrence Berkeley razvili su litij-ionsku bateriju s nesređenom katodom baziranom na manganu koja bi potencijalno mogla pohranjivati više energija od one s kobaltom ili niklom [28]. U Japanu su razvili bateriju s manganovim oksidom na pozitivnoj elektrodi i magnezijem na negativnoj koja se smatra obećavajućom, a istraživačke organizacije i inženjerski fakulteti u Danskoj, Španjolskoj, Njemačkoj i Izraelu zajedno su se udružili u tzv. *European Magnesium Interactive Battery Community*, čiji je cilj razviti bateriju temeljenu na magneziju s gustoćom energije većom od trenutno dostupnih

tehnologija. Ako se ijedna od tehnologija koje se još uvijek razvijaju uspiju dokazati boljima od litij-ionskih, procijenjeno je da svoje mjesto na tržištu neće dobiti sve do 2030. godine .

3. Litij-ionske baterije

Postoji mnoštvo podjela baterija, a najčešće ih se dijeli na primarne ili nepunjive i sekundarne ili punjive baterije. Litij-ionske baterije se svrstavaju u sekundarne ili punjive. U njima je kemijska reakcija reverzibilna i čine osnovu funkcioniranja većine električnih uređaja. U električnim i hibridnim vozilima najčešće se upotrebljavaju litij-ionske, nikal-kadmijeve i nikal-metalne hidridne baterije. Litij-ionske baterije su danas najčešći odabir većine proizvođača električnih uređaja zbog svoje visoke specifične energije, dugog životnog vijeka, male mase, prihvatljivosti za okoliš te zbog mogućnosti punjenja bez potrebe za periodičkim pražnjenjem. Mane su im osjetljivost na prepunjavanje i pretjerano pražnjenje, ali i ograničene su radnom temperaturom i naponom, zato što prekoračenjem tih ograničenja učinkovitost baterija brzo slabi, ali i dolazi do ugrožavanja sigurnosti. Postoji nekoliko različitih podtipova litij-ionskih baterija, ovisno o materijalu od kojeg se izrađuje pozitivna elektroda: Li-Co-oksidi (LCO), Li-Mn-oksidi (LMO), Li-Ni-Co-Mn-oksidi (NCM), Li-Ni-Co-Al-oksidi (NCA), Li-Fe-fosfat (LFP) (Novosel, 2016, Pagliaro i Meneguzzo, 2019, Niese i sur., 2020, Coronelli, 2020).

Litij-ionske baterije sastoje se od anode, katode, elektrolita i separatora, a funkcioniraju na principu kretanja litijevih iona i elektrona. Na slici 4 nalazi se shematski prikaz litij-ionske baterije. Katoda sadrži spojeve s litijem, poput LiFePO_4 ili $\text{LiNi}_{0.3}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.3}\text{O}_2$, a anoda sadrži ugljikove spojeve poput grafitu koji mogu primiti litijeve ione. Katoda i anoda spojene su na aluminijsku ili bakrenu foliju s polimerskim vezivom, npr. poliviniliden fluoridom (PVDF) kako bi se postigli električni konduktivitet i stabilnost. Elektroliti su uglavnom tekućine i služe kao sredstvo za transport litijevih iona između katode i anode, a to su najčešće otopine litijevih soli u organskim otapalima, primjerice etilen karbonat (EC) ili dimetil karbonat (DMC). Polimeri kao što su polipropilen (PP) ili polietilen (PE) koriste se kao separatori kako bi se spriječio fizički kontakt i direktan prijenos elektrona između katode i anode (Bae i Kim, 2021).



Slika 4. Shematski prikaz litij-ionske baterije (prilagođeno prema Zhang i sur., 2018).

U posljednjem desetljeću litij-ionske baterije su značajno poboljšane. Najviše tehnoloških dostignuća je bilo u aspektu gustoće energije (kapaciteta energije po masi i veličini), cijeni i utjecaju na okoliš te izdržljivosti. Tradicionalno se u uređajima poput mobilnih telefona, laptopa i digitalnih kamera koriste litij-ionske baterije s katodom od litij-kobaltovog oksida. Iako su najviše korištene, automobilska industrija razvija druge vrste litij-ionskih baterija koje koriste manje kobalta i imaju značajke specificirane za svoju ulogu u automobilima (Drabik i Rizos, 2018). Još jedan pomak u održivosti baterija postignula je tvrtka Stora Enso, koja je pronašla način kako zamijeniti grafit u baterijama s nečim održivim – umjesto grafita koriste lignin u anodi. Lignin se u drveću ponaša kao vezivo i daje drveću čvrstoću i otpornost na truljenje. Lignin se izdvaja iz drveća i zatim se rafinira u prah koji služi kao aktivni materijal u negativnoj anodi baterije [36].

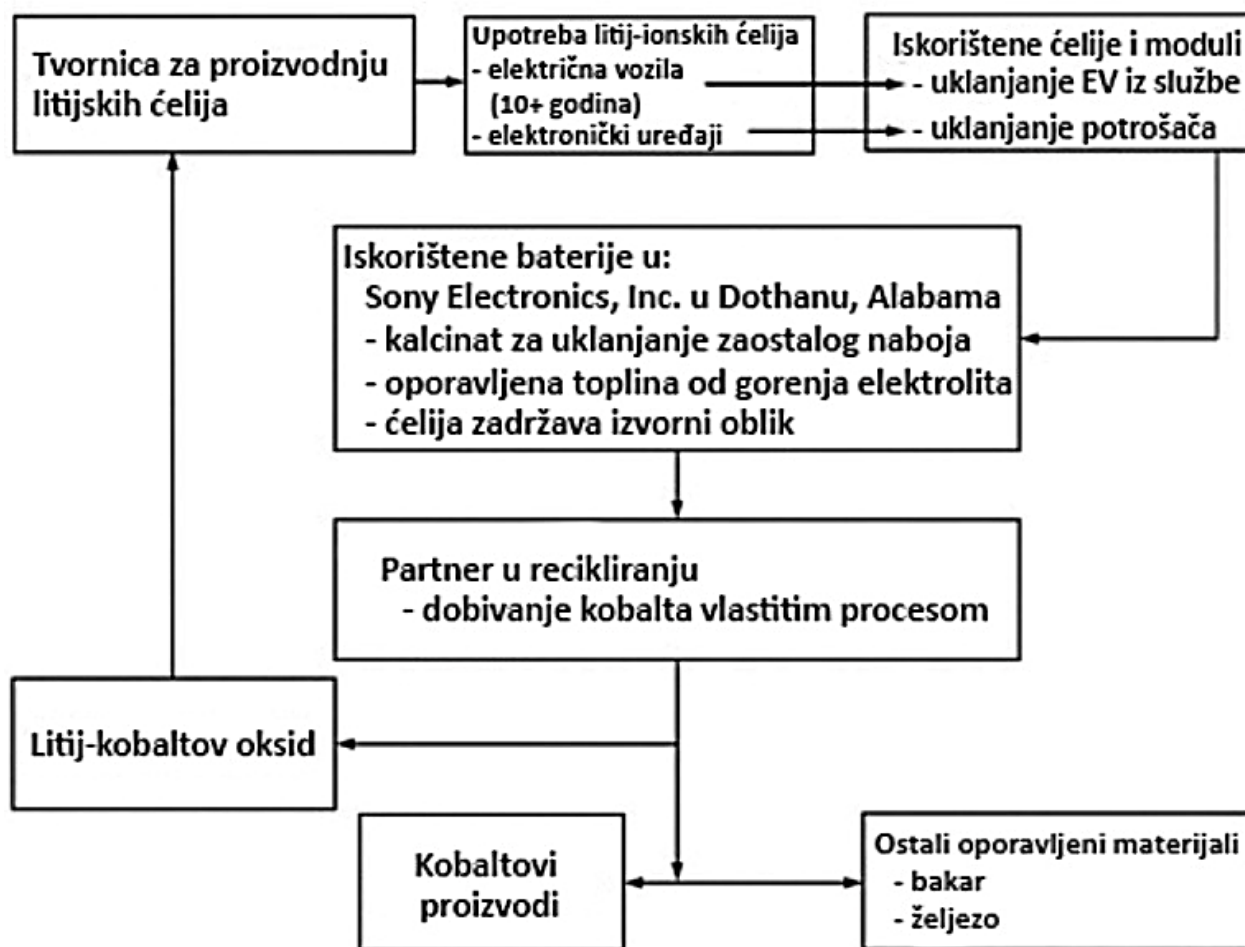
U usporedbi s drugim baterijama, litij-ionske baterije imaju rok trajanja do tri godine u malim elektroničkim uređajima, a u većima od pet do deset godina. Olovno-kiselinske baterije imaju vijek trajanja od pet do deset godina, a nikal-kadmijeve od 15 do 20 godina. Trenutno se više od 80% litij-ionskih baterija koristi u malim elektroničkim uređajima, a manje od 20% se koristi u električnim vozilima i sustavima za pohranu energije (ESS, eng. *energy storage system*). Procjenjuje se da je 2012. godine odloženo čak 10 700 tona litij-ionskih baterija, a

količina odbačenih baterija svake se godine polako povećava. Za sakupljanje iskorištenih litij-ionskih baterija odgovorne su određene vladine organizacije i ovlaštene tvrtke. Uobičajena je praksa da se iskorištene litij-ionske baterije sakupljaju tako da potrošači donose baterije na mjesta odobrena za prikupljanje od strane vlade ili ih dobrovoljno prikuplja odgovarajuća organizacija. Usprkos razvitku takve prakse, u Europskoj uniji, SAD-u i Australiji se prikuplja tek 2-5% litij-ionskih baterija. Neznanje potrošača i sklonost preprodaji elektroničkih uređaja umjesto recikliranja smatraju se krivima za slabu stopu prikupljanja. Iako postoje razlike od države do države, ne postoji dovoljna fizička i pravna infrastruktura koja bi osigurala široko rasprostranjeno prikupljanje iskorištenih baterija, kao i njihov učinkovit, siguran i financijski isplativ transport, stoga je za poboljšanje stope prikupljanja potrebno napraviti značajne promjene (Bae i Kim, 2021).

3.1. Metode predtretmana za otpadne litij-ionske baterije

Prije predtretmana se mora utvrditi količina snage otpadnih litij-ionskih baterija, što je dosta zahtjevno. Osim toga, budući da se litij-ionske baterije sastoje od više različitih vrsta materijala ne mogu se izravno uključiti u obradu zato što to nije učinkovito. Iznimno je važno prije bilo kakve vrste obrade baterije u potpunosti isprazniti, jer bi moglo doći do eksplozija i/ili ispuštanja otrovnih plinova zbog kratkog spoja. Najčešće se baterije prazne potapanjem u vodljivu otopinu, poput otopine NaCl. Aktivni materijali odvajaju se metodama mehaničke separacije, separacije otopinom i separacije kalciniranjem (Bae i Kim, 2021). Ukratko su u sljedećim ulomcima opisani neki od komercijaliziranih procesa recikliranja litij-ionskih baterija.

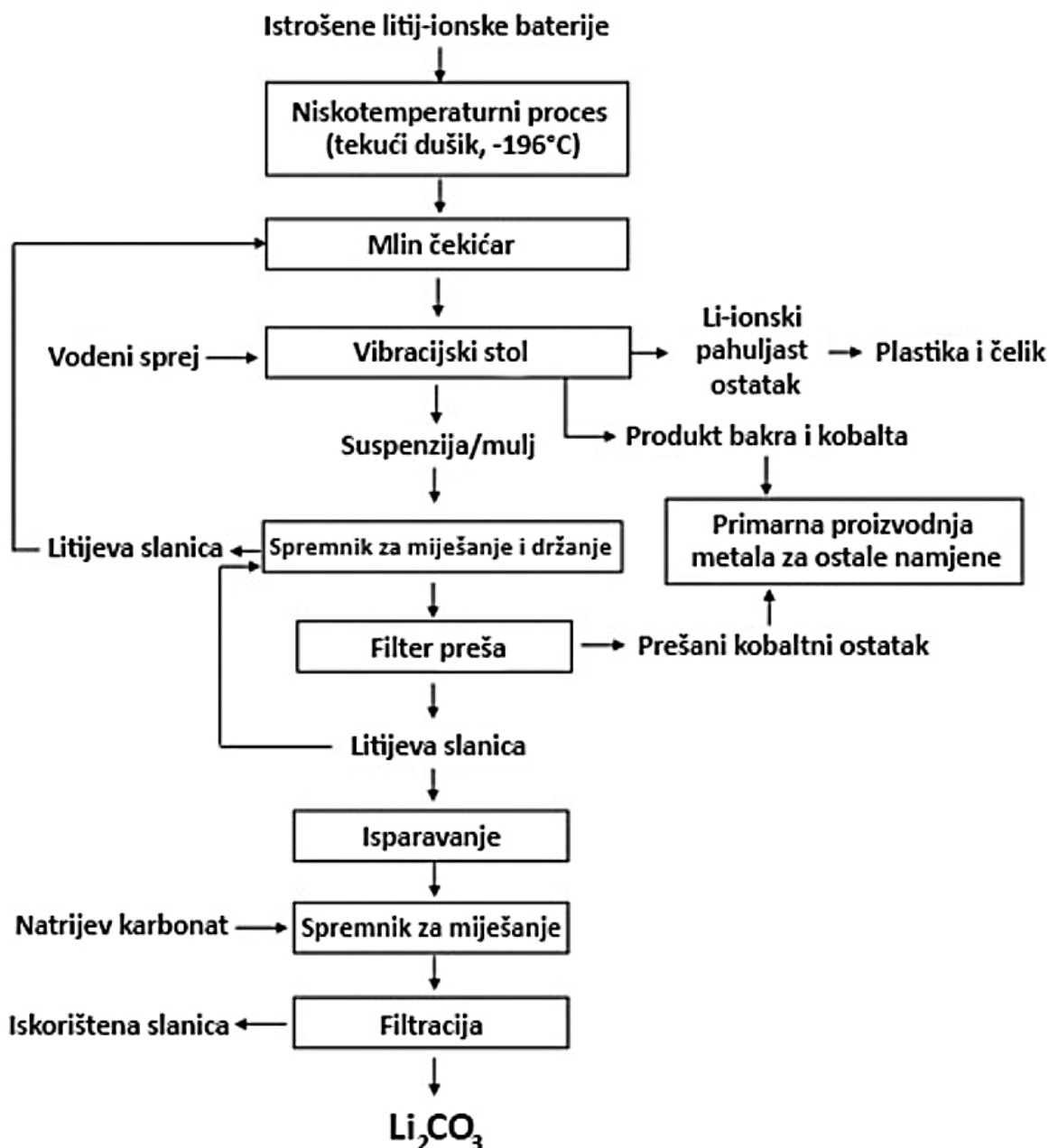
Sony/sumitomo proces. Korporacija Sony istražuje načine recikliranja za više različitih kemizama baterija koji su korišteni u elektroničkim uređajima za široke mase, a trenutno koristi kombinirani piro- i hidrometalurški proces. Litij-ionske baterije se kalciniraju na 1000 °C kako bi izgorjeli organski elektrolit i plastika u strukturi. Takva suha smjesa mehanički se obrađuje kako bi se izolirali željezo, bakar i aluminij za ponovnu upotrebu, a prah koji ostaje, koji se uglavnom sastoji od kobalta, litija i ugljika, obrađuje se hidrometalurškim procesom koji je patentiran i zove se Sumitomo proces. Nakon toga se izdvaja litij iz tog praha te se ponovno koristi u proizvodnji LIB (Meng i sur., 2019 navedeno u Lupi, Pasquali i Dell'era, 2005). Primjer procesa recikliranja prikazan je na slici 5.



Slika 5. Shema Sony/Sumitomo proces dobivanja kobalta iz istrošenih litij-ionskih baterija (prilagođeno prema Meng i sur., 2019 prema Gaines i Cuenca, 2000).

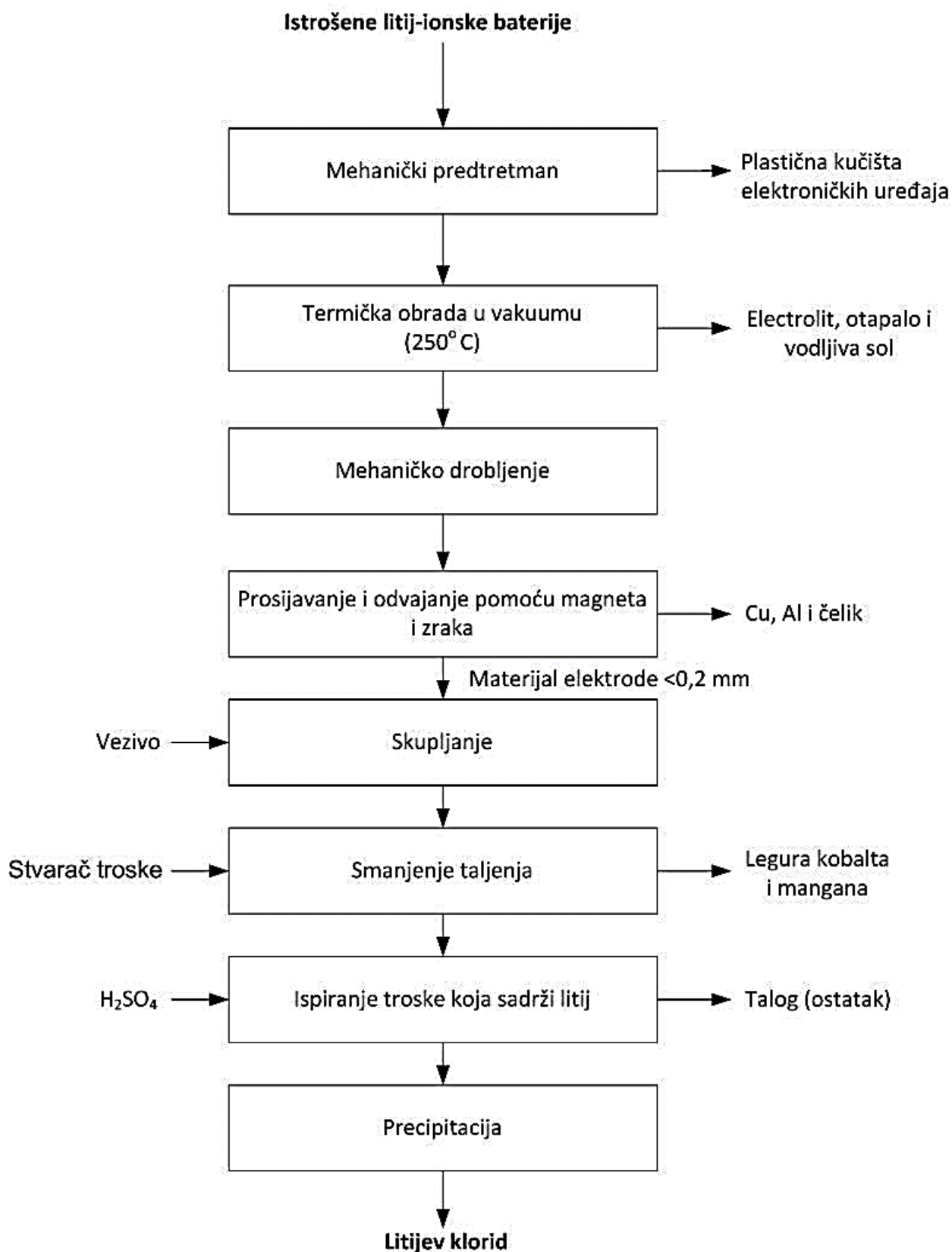
Retriev proces. *Retriev Technologies* reciklira sve vrste litij-ionskih baterija kombiniranim procesom koji uključuje kriogeni, fizički i hidrometalurški tretman. Svi metali u katodi, uključujući i litij, mogu se izdvojiti ovom metodom. Baterije koje veličinom odgovaraju onima iz mobilnih telefona u proces ulaze direktno, a one veće se rastavljaju kako bi se sigurno mogle uključiti u proces (Meng i sur., 2019 navedeno u *Retriev Technologies*, 2017). Kako bi se uklonili ostaci reaktivnosti u litij-ionskim baterijama, metoda započinje tako da se napunjene baterije potapaju u tekući dušik ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Meng i sur., 2019 navedeno u *Knights i Salooje*, 2015), na takvoj izrazito niskoj temperaturi plastično kućište baterija je krhko i podložno pucanju. Zatim se usitnjavaju prije drobljenja s otopinom litija u mlinu čekićaru. U ovom koraku organske supstance i vodik proizveden u reakciji s litijem izgaraju, a litij se istovremeno otapa u LiCl i LiSO_3 . Nakon toga se drobljeni materijal na vodom sprejanom vibracijskom stolu trese i na taj način se izdvajaju tri različite frakcije: suspenzija, produkt bakar-kobalt i litij-ionski pahuljast ostatak. Sljedeći korak je filtriranje, nakon čega se suspenzija dovodi u

spremnik, što rezultira muljem s kobaltom, manganom, niklom, bakrom i željezom (Meng i sur., 2019 navedeno u McLaughlin and Adams, 1999). Kobalt-mangan koncentrat nastao od mulja može se procesuirati i prodati talionicama. Litijev karbonat se taloži iz preostale otopine uporabom natrijevog karbonata kako bi se mogao isprati i prodavati (Meng i sur., 2019 navedeno u (McLaughlin i Adams, 1999 i Meshram, Pandey i Mankhand 2014). Slika 6 prikazuje shemu ovog procesa.



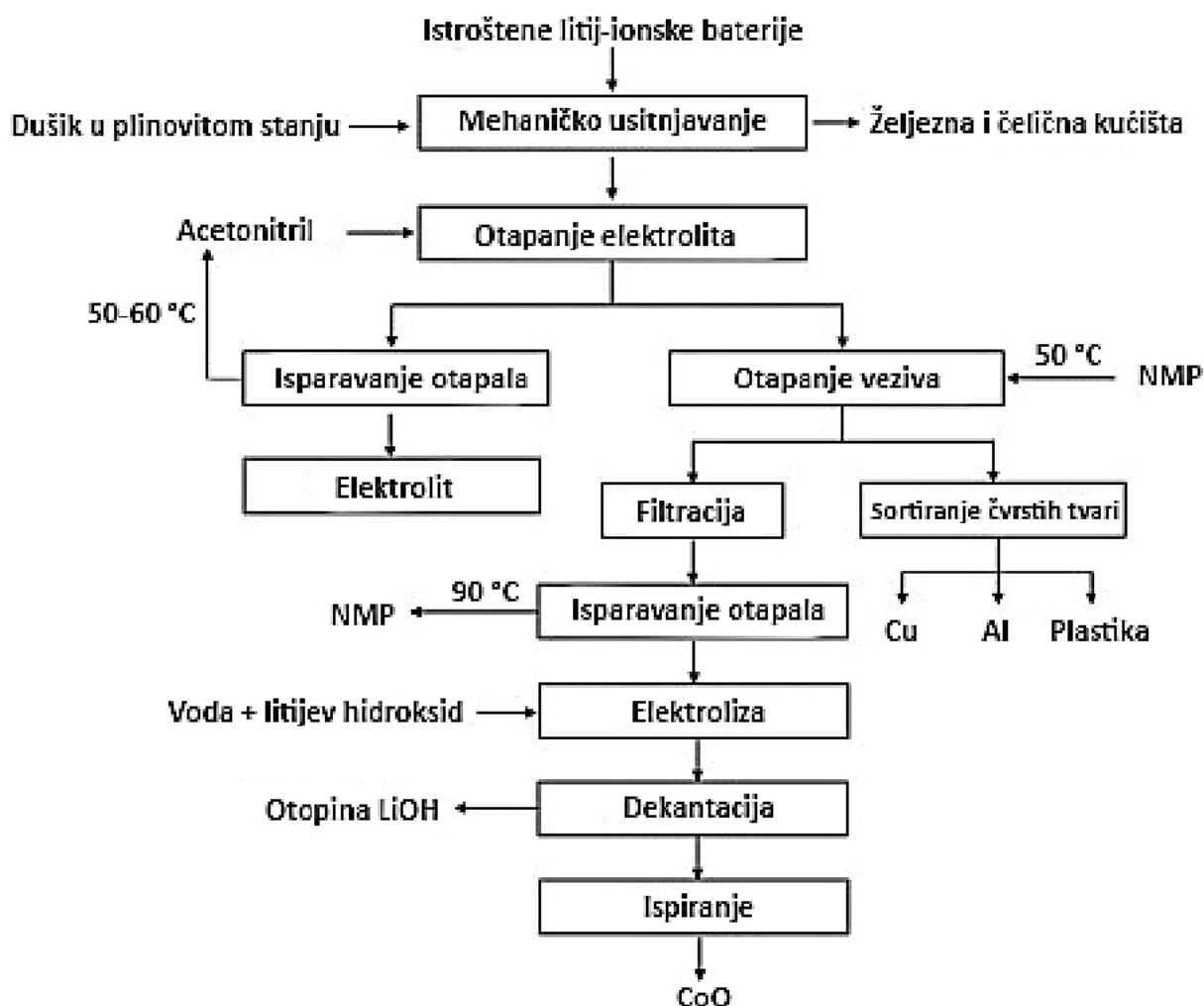
Slika 6. Shema Retrieval procesa recikliranja litij-ionskih baterija, prilagođeno prema Meng i sur., 2019.

Proces Accurec GmbH. Kombinira mehaničke, pirometalurške i hidrometalurške metode, a shema je prikazana na slici 7. (Meng i sur., 2019 navedeno u Meshram, Pandey i Mankhand, 2014). Najprije se, koliko god je moguće, mehaničkim putem uklanja plastično kućište baterija. Baterije se pirolizom u vakuumskoj komori na 250 °C učine inertnima, a tim putem se također uklanjaju i elektrolit i solvent. Ostatak je usitnjen u prah. Smjesa metala je zatim smanjena na veličinu veću od 200 µm, tada se osnovni metali izdvajaju prosijavanjem, magnetskom separacijom i separacijom zrakom. Preostali materijal iz elektrode se zatim miješa s vezivom, aglomerira i komprimira kako bi se stvorili briketi. Oni se tada stavljaju u peć za taljenje radi redukcije. Iz peći se izdvajaju dva dijela, metalna legura kobalta i mangana i troska koja sadrži litij (Meng i sur., 2019 navedeno u Sojka, 1998). Litij se taloži iz troske kao litijev klorid nakon ispiranja sumpornom kiselinom (Meng i sur., 2019 navedeno u Ekermo, 2009).



Slika 7. Shema Accurec procesa za dobivanje litija, kobalta i mangana iz istrošenih litij-ionskih baterija (prilagođeno prema Meng i sur., 2019 prema Meshram, Pandey i Mankhand, 2014).

AEA proces. Lain (2001) opisuje četiri koraka u ovoj proceduri: 1) nakon uklanjanja plastičnog kućišta, baterije se rastavljaju i usitnjavaju; 2) elektrolit i solvent se ispuštaju u acetonitril (C_2H_3N) na $50\text{ }^{\circ}C$, slijedi evaporacija organske smjese kako bi se izdvojili acetonitril i elektrolit; 3) ostatak čvrstih tvari uvodi se u NMP (N-metil-2-pirolidon) da se rastopi vezivo i omogući većim frakcijama (čeliku, bakru i aluminiju) da se filtriraju i mehanički odvoje. Sličnim postupkom se evaporacijom iz organske smjese odvajaju suspenzija litij-kobaltne katode i karbonske anode; 4) Litij se oslobađa iz čvrste strukture dok je ostatak u LiOH kao elektrolitu elektroliziran, tako stvarajući CoO, a $LiCoO_2$ je reduciran uz katodu, a kisik se oslobađa na suprotnoj elektrodi. Dekantacijom se izdvaja CoO. Na slici 8 je prikazana shema AEA procesa (Meng i sur., 2019).



Slika 8. AEA proces (prilagođeno prema Meng i sur., 2019 prema Meshram, Pandey i Mankhand, 2014).

4. Električna vozila

Kao što je spomenuto u uvodu, to su vozila koja se mogu podijeliti na dva osnovna tipa: baterijska električna vozila (*Battery Electric Vehicle*, BEV) i hibridna električna vozila (*Hybrid Electric Vehicle*, HEV). BEV koriste električnu energiju pohranjenu u baterijama, dok su HEV vozila koja se pune na gradskoj mreži ili koja se pune kočenjem automobila. Prednost električnih automobila je u njihovoj jednostavnoj koncepciji koja omogućuje lakši popravak i dijagnostiku vozila. Imaju puno manje pokretnih dijelova što skraćuje vrijeme održavanja i smanjuje mogućnost pojave kvara, a time i smanjuje ukupne troškove. Električna energija se smatra sveprisutnom, lako dobavljivom. Nema emisije stakleničkih plinova. Neke države daju porezne olakšice na kupnju električnih vozila. Također, stupanj iskorištenja električnih vozila je veći, dakle imaju bolju energetska učinkovitost. Važno je napomenuti i da je prednost tiši rad motora što smanjuje zagađenje okoliša bukom i vibracijom.

Najvažniji nedostaci električnih vozila su autonomija i kapacitet, odnosno vijek trajanja baterije. Jedno punjenje omogućuje domet između 160 i 400 km, a trajanje punjenja ovisi o punjaču, pa u prosjeku traje od dva i pol do čak osam sati. Problem je i električna infrastruktura koja još uvijek, barem u Hrvatskoj, nije najbolje razvijena, to jest nema dovoljno punionica uz važnije državne ceste i autoceste. Na kraju, električna vozila su uglavnom skuplja od konvencionalnih ponajviše zbog cijene akumulatora (Coronelli, 2020, Turčinović 2019). Istraživanja su pokazala da proizvodnja električnog vozila može stvoriti i do 60% više emisije ugljikovog dioksida u usporedbi s konvencionalnim vozilom s motorom s unutarnjim izgaranjem. Međutim, jednom kad uđu u upotrebu, do svog kraja životnog vijeka, električna vozila ipak imaju bolje *well-to-wheel* emisije („od izvora do kotača“) (Mosquet i sur., 2020). To znači da je LCA metodom utvrđeno da se više energije i sirovina iskoristi za proizvodnju električnog vozila nego za konvencionalno vozilo s motorom s unutarnjim izgaranjem, ali i u proizvodnji samih baterija i motora, te se tako i emitira više ugljikovog dioksida u atmosferu. Općenito, tijekom korištenja električna vozila emitiraju manje stakleničkih plinova od automobila s motorom s unutarnjim izgaranjem, ali je 1,3 do 2,0 puta veća emisija u fazi proizvodnje električnih vozila nego konvencionalnih automobila (Lattanzio i Clark, 2020). Ukratko, u standardiziranoj metodi LCA procjena životnog ciklusa analizira se sveukupni okolišni otisak nekog proizvoda, od procesa ekstrakcije sirovina iz zemlje i zatim korištenja istih u proizvodnji, pa sve sirovine korištene tijekom životnog ciklusa proizvoda, sve do kraja

njegovog životnog ciklusa (Leš i sur., 2019). Tri su glavne faze LCA metode kad se radi o električnim vozilima:

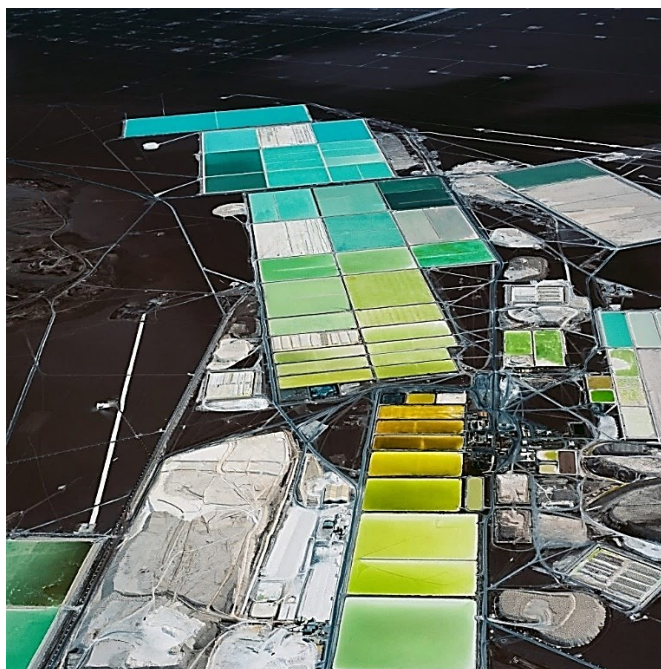
1. *cradle to gate*, odnosno od kolijevke do vrata, misleći pritom na proizvodnju električnog vozila od proizvodnje sirovina (kolijevka) do gotovog proizvoda prije nego stigne do kupca (vrata tvornice).
2. *cradle to grave*, od proizvodnje sirovina (kolijevka) do kraja životnog ciklusa vozila kada se dijelovi vozila i/ili materijali odlažu na odlagališta otpada (grobље), analiziraju se i sastavljanje, održavanje i punjenje električnog vozila, ali i rastavljanje i recikliranje dijelova vozila na kraju njihovog životnog vijeka.
3. *cradle to cradle*, zatvoreni ciklus metode od proizvodnje sirovina do ponovnog iskorištavanja sirovina iz električnog vozila nakon recikliranja.

Dio LCA je *well-to-wheel* metoda koja se koristi pri analiziranju učinkovitosti vozila pri pretvorbi energije, ukupne pretvorbe energije, ugljičnog otiska i utjecaja emisije za transportna goriva (benzin, dizel i električna struja) i vozila (Leš i sur., 2019; Verma, Dwivedi i Verma, 2021).

5. Okolišni i socioekonomski problemi

Već je nekoliko puta spomenuto u ovom radu kakvi se problemi javljaju i prije same proizvodnje litij-ionskih baterija i električnih vozila. Sve veći pritisak na razvijene zemlje, ali i one u razvoju na prelazak s fosilnih goriva na obnovljive izvore energije radi smanjenja emisija stakleničkih plinova uvjetuje bržu proizvodnju električnih vozila koja se smatraju najboljim rješenjem tog problema, a to za sobom povlači i veću potrebu za ključnim elementima, traženje zamjenskih izvora trenutnima jer nisu neiscrpn i brži razvoj novih tehnologija kojima bi se skuplji elementi zamijenili ili potpuno eliminirali. Bez obzira na činjenicu da su klimatske promjene već jako dugo veliki globalni problem i krajnje je vrijeme da se naprave promjene i u gospodarstvu i u društvu, ne smije se zaboraviti da je za prelazak na obnovljive izvore energije i zelene tehnologije potrebno istražiti utjecaj na okoliš i društvo od samih izvora ključnih elemenata do krajnjeg proizvoda, u ovom slučaju litij-ionskih baterija i električnih vozila.

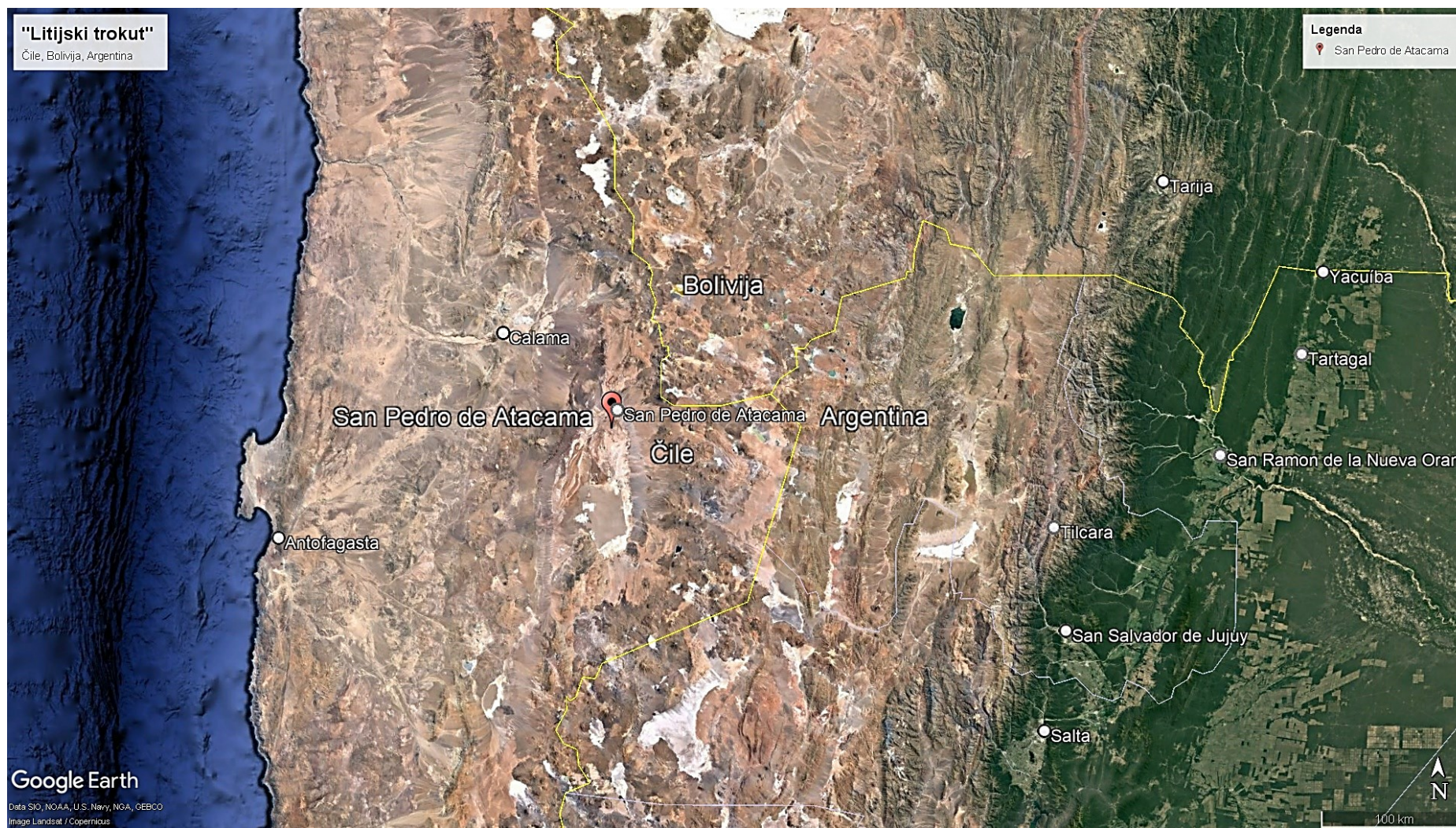
Eksploatacija ključnih elemenata može imati loš utjecaj na okoliš i društvo ukoliko se ne vrši u skladu s propisima i obzir ne uzmu potencijalni problemi koji se javljaju prilikom eksploatacije. Uzmimo za prvi primjer eksploataciju litija. Većina zaliha nalazi se u „litijskom trokutu“ koji obuhvaća dijelove Čilea, Bolivije i Argentine. Tamo je većina zaliha litija u obliku slanica, odnosno slanih polja u izrazito suhoj klimi s jako malo padalina i općenito oskudnih zaliha vode. Slika 9 prikazuje evaporacijske bazene u pustinji Atacama gdje se dobiva litij.



Slika 9. David Maisel: „The Devastating Environmental Impact of Technological Progress“, (2019.)

[47]

Istraživanje objavljeno 2020. godine (Liu i Asgudinata, 2020) provedeno u San Pedro de Atacama u Čileu, najvećem slanom polju iz kojeg se već nekoliko desetljeća vadi litij iz slanica fokusiralo se na socio-ekološke probleme koji su se javili prilikom eksploatacije litija. Za početak, San Pedro de Atacama nalazi se u pustinji Atacama na približno 2400 m nadmorske visine gdje su padaline vrlo rijetke, a i izvori pitke vode ograničeni su i nerijetko neobnovljivi, a većinom se voda koristi za rudarenje, svakodnevni život i turizam. Na slici 10 je prikazana satelitska karta i smještaj San Pedra de Atacame, kao i smještaj „litijskog trokuta“. Zaključeno je da su se povećanjem rudarskih aktivnosti, povećanjem broja stanovništva i migracija stanovništva iz udaljenijih mjesta (zbog novozaposlenih u industrijskom sektoru) i razvitkom turizma povećala i potreba za vodom – smanjile su količine ukupne uskladištene vode (površinske vode, vlaga u tlu, podzemne vode) između 2010. i 2017. godine te je pretpostavljeno da će se u narednim godinama nastaviti smanjivati. Problemi s povećanim trošenjem vode bili su najčešći su razlozi za prosvjede lokalnog stanovništva jer je pretjerana potrošnja dostupne vode prijetnja ionako krhkom ekosustavu slanog polja San Pedro de Atacama, a osim njih i na regionalnoj i na nacionalnoj razini nezadovoljstvo je iskazivano i zbog korupcije, nepravilnog vođenja rudarskih djelatnosti i stranih ulaganja u industriju litija. Na slici 11 je prikazan jedan od takvih prosvjeda, blokiranjem cesta mještani su prosvjedovali protiv širenja operativnih zahvata tvrtke SQM u San Pedru de Atacami (Köppel, 2022).



Slika 10. Smještaj San Pedra de Atacame u Čileu koji je dio „litijskog trokuta“ gdje se nalazi najveća zaliha litija na svijetu (Google Earth, 2015b).



Slika 11. Mještani prosvjeduju blokiranjem cesta prema San Pedru de Atacami, Čile (Ramón Morales Balcázar, 2018).

Argentina se, kao dio „litijskog trokuta“, također susreće s problemima vezanima uz izvore vode. Kao i u Čileu, velika količina vode koristi se pri eksploataciji litija, a i regija u Argentini iz koje se eksploatira litij iz slanih polja također je karakterizirana suhom klimom, malom količinom padalina i niskim vodnim licem. U toj je regiji voda iznimno bitna lokalnom stanovništvu zbog stočarstva i poljoprivrede, stoga je povećana potreba za litijem glavni uzrok smanjenja visine vodnog lica podzemnih voda koja je neobnovljiv izvor vode. U opasnosti od nedostatka vode nisu samo stočarstvo i poljoprivreda, već i tradicionalna tekstilna industrija i turizam, ali naravno i lokalni ekosustav (Dorn i Ruiz Peyré, 2020). Još jedan od problema je legislativa vezana uz izvore vode u kontekstu rudarenja litija koja je vrlo složena. Zakoni u Argentini u okviru mineralnih i vodnih resursa nepromijenjeni su još od prije 1990.-ih godina, a pravne nesuglasice pojavile su se tek s povećanom potrebom svjetskog tržišta za litijem, jer su se slana polja i slanice iz kojih se dobiva litij počeli aktivno iskorištavati. Nesuglasice su uglavnom vezane uz pitanje trebaju li slanice u slanim poljima spadati u mineralne ili vodne resurse, ali i kako usuglasiti provincijalne zakone (koji su većinom usmjereni na vodne koncesije) i nacionalne zakone (usmjereni na rudarske koncesije) (López Steinmetz i Bing Fong, 2019). Politička i ekonomska nestabilnost – visoka inflacija, rastući strani dug, deficit

trgovinske bilance – uzrokuju slabljenje međunarodnih pregovora s potencijalnim ulagačima. Uz to se javljaju i konflikti između skupina koje se protive rudarstvu i onih koje ga podržavaju, te bez obzira što je eksploatacija litija manje štetna za okoliš od konvencionalnog rudarstva velikih razmjera, i dalje je vezano uz razne kontroverze (Dorn i Ruiz Peyré, 2020).

Za razliku od Čilea i Argentine gdje se već nekoliko desetljeća eksploatira litij, u Boliviji je tek 2008. godine predsjednik Evo Morales najavio pojačan razvoj eksploatacije litija, kao i ulaganje u nove tehnologije, laboratorije i industriju automobila. Litij je proglašen „strateškim resursom i nacionalnim prioritetom“ (Sanchez-Lopez, 2019). Ipak, deset godina kasnije, eksploatacija litija u Boliviji veže se uz mnoge probleme – ekološke i socioekonomske probleme na svim razinama, od nacionalnih do regionalnih i lokalnih. Jedno od najvećih slanih polja u „litijskom trokutu“ nalazi se upravo u Boliviji, tzv. Uyuni slano polje (slika 12). Lokalno stanovništvo (uglavnom domorodačko) u blizini Uyuni slanog polja većinski se bavi poljoprivredom, ali je dosta razvijen i turizam. U blizini se nalazi i Nacionalni rezervat Eduardo Abaroa. Uyuni slano polje s razvojem eksploatacije litija postalo je strateško područje i područje od interesa države, na štetu domorodačkom stanovništvu, ali i prirodi. Suha klima i malo padalina, prijetnje okolišu, niske plaće i produktivnost uvjetovali su iseljavanju stanovništva u Čile, Argentinu ili druge gradove u Boliviji, koje je ili stalno ili povremeno. Širenje poljoprivrednih površina na zaštićena područja sporno je jednako kao i konflikti između domorodačkih skupina i podjele zemljišta i konflikti vezanih uz prava domorodačkog stanovništva, eksploatacijskih djelatnosti i države (Sanchez-Lopez, 2019).



Slika 12. Claudia Morales (2022): Evaporacijski bazeni u slanom polju Uyuni, Bolivija [48].

Cijeli je „litijski trokut“ tako postao područje u kojem je unazad nekoliko desetljeća mnogim tvrtkama za rudarenje litija dodijeljen niz eksploatacijskih koncesija koje se preklapaju s teritorijem domorodačkog stanovništva, zaštićenih ekoloških područja i javnih zemljišta. Osim prethodno navedenih konflikata, problem je i s razvrstavanjem otpada, promjenom izgleda krajolika, onečišćenja površinskih i podzemnih voda i utjecaja na biljni i životinjski svijet, ali i korupcija i politička nestabilnost područja (Voskoboynik i Andreucci, 2021 prema Calla Ortega, 2014). Bez obzira na spomenute prijetnje okolišu i stanovništvu, Čile, Argentina i Bolivija ipak su uspješno ubrzali razvoj novih projekata i širenje na nova područja, ali i značajne promjene u legislativi, što je rezultiralo prosvjedima na različite načine, primjerice štrajkovima glađu i blokiranjem cesta (Voskoboynik i Andreucci, 2021).

Sporna je i uz eksploatacija litija u Srbiji. Naime, u Srbiji je 2004. godine otkriven mineral bogat litijem nazvan jadarit ($\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$ ili $\text{Na}_2\text{OLi}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_2(\text{B}_2\text{O}_3)_3\text{H}_2\text{O}$) po rijeci Jadar u zapadnoj Srbiji. Smatra se jednim od najznačajnijih izvora litija u svijetu zbog visoke koncentracije litija i bora po toni iskopane rude. Unatoč činjenici da se projekt britansko-australske tvrtke Rio Tinto, nazvan Rio Sava, za sad usredotočuje samo na izgradnju rudnika i pogona za preradu rude, predviđena je i izgradnja tvornice baterija u Srbiji za električne automobile u Europi. Tvrtka je uložila oko 450 milijuna dolara u projekt [29], a preliminarna

studija izvedivosti dovršena je 2020. godine (Rio Tinto, 2020). Ako projekt bude uspješan, proizvodit će se natrijev sulfat, borna kiselina i litijev karbonat. Početkom 2019. godine objavljena je Studija o procjeni utjecaja na okoliš koja je uslijedila nakon prostornog plana Područja posebne namjene Jadar. Studija je usvojena bez ikakve javne rasprave i bez potrebnih podataka koji su morali biti objavljeni u Studiji. Osim toga, usvojena je i bez potrebne registracije patenta tvrtke Rio Tinto, koji bi specificirao koje tehnologije bi se koristile pri vađenju litija. Prosvjedi lokalnog stanovništva uslijedili su ponajviše zbog prostornog plana koji je zapravo bio prvi dokument koji je javno objavljen. Istovremeno je tvrtka objavila projekt o gradnji odlagališta otpada uz rijeku Jadar, što je promptno uzrokovalo niz novih prosvjeda diljem Srbije. Nevladine organizacije organizirale su prosvjede (slika 13) tvrdeći da je trenutno premalo informacija dostupno u vezi vađenja litija na ekološki prihvatljiv način, odnosno da nitko ne zna postoji li, ni tvrtka ni vlast, ni stručnjaci, a na kraju krajeva ni javnost, ikakav loš utjecaj na okoliš, s obzirom na to da na svijetu postoje samo dva rudnika slična potencijalnom rudniku u Srbiji, jedan od njih u Kini, a drugi u SAD-u, a oba su smještena u pustinjskom okolišu te mogući loš utjecaj na okoliš ima velik domet. Spornosti vezane uz tvrtku Rio Tinto vežu se i uz optužbe iz 2020. godine da je tvrtka odgovorna za zagađenje rijeka na Papui Novoj Gvineji otpuštanjem toksičnih tvari, ali i uništenje špilja koje su proglašene mjestima svjetske kulturne baštine australskih Aboridžina, zato uopće nije čudno da su stanovnici Srbije složno stali u obranu okoliša i prirode te vlastitog zdravlja i domova [29].



Slika 13. Prosvjednih skup u Srbiji protiv aktualne srpske vlasti i tvrtke Rio Tinto za koju se tvrdi da je u nekim državama odgovorna za niz ekoloških incidenata [49] (Mateja Stanisavljević/PIXSELL)

Eksploatacija kobalta još je problematičnija od litija. Kobalt se, kao što je prethodno navedeno, smatra važnim elementom u baterijama zbog toga što stabilizira katodu. Istraživanje objavljeno 2018. godine u Kolweziju, (DR Kongo) fokusiralo se na održivost zanatskog i malog rudarstva kobalta u okrugu Kasulo, gdje su najprije započete takve djelatnosti. Na slici 14 se može vidjeti kako izgleda jedan od rudnika u kojima se vade kobalt i bakar. Zapažanja autora pokazala su koliko neregulirana eksploatacija može brzo i negativno utjecati na promjene u okolišu i izložiti stanovništvo toksičnim tvarima. Pokazalo se da je stanovništvo u blizini rudnika i postrojenja za taljenje u riziku od prevelike izloženosti kobaltu i drugim elementima u tragovima (poput urana i mangana), uglavnom putem prašine iz rudnika koja je obogaćena tim elementima više nego onečišćenom vodom. Osim povećane izloženosti kobaltu i elementima u tragovima, zabilježen je i porast oksidativnog stresa i oštećenja DNA u djece izložene takvim uvjetima u okolišu. Iako su rudarske djelatnosti vezane uz eksploataciju kobalta u Kasulu službeno zabranjene, čak i prije istraživanja, ipak se gotovo ništa nije promijenilo s obzirom na to da je jedna od rudarskih tvrtki kupila dio područja, što je dovelo do prisilnog raseljavanja preostalog stanovništva, a to je jedan od pokazatelja i korupcije koja je nažalost u Kongu prisutna na svim razinama vlasti. Izloženost toksičnim tvarima i uništavanje okoliša

samo su dio opasnosti koja je snašla stanovništvo Kasula. Prisutnost stotina kopača i pomoćnih radnika dovelo je do društvenih konflikata, visoke konzumacije droga i alkohola, prostitucije i tučnjava. Istraživanje u Kolweziju samo je jedan od primjera, vjerojatno najgori, zato se može zaključiti da je to prouzročeno lošom organizacijom i ignoriranjem važnosti održivosti ulagača i kupaca eksploatiranih elemenata. Važno je napomenuti da ovaj slučaj ne predstavlja generalno stanje rudarstva velikih razmjera u Kongu (Banza Lubaba Nkulu i sur., 2018).



Slika 14. Radnici u Shabara rudniku u blizini Kolwezija kopaju u nehumanim uvjetima, bez odgovarajuće zaštite i nerijetko bez alata [50] (Junior Kannah/AFP).

Još jedno istraživanje objavljeno 2019. godine (Sovacool, 2019) o obrtničkom i malom rudarstvu i rudarstvu na industrijskoj razini pokazalo je da je sve prethodno navedeno prisutno u gotovo cijelom Kongu. Mnogi ispitanici radnici potvrdili su da rade u nehumanim uvjetima, nerijetko bez zaštitne odjeće, čak i bez alata – kopaju golim rukama. Rade kako u legalnim, tako i u ilegalnim iskopima, osim odraslih rade i djeca u smjenama od dvanaest sati, dan i noć. Ispitanici su govorili i o prijateljima i rodbini koji su u iskopima izgubili živote, i pričali o strahu s kojim svakodnevno odlaze na posao. Mnogi kopači razviju brojne respiratorne i srčane bolesti ili tumore i imaju povišene razine toksičnih metala u organizmu. Svakodnevno im u iskopima prijete klizišta, a nerijetko bivaju tučeni ili se na njih čak i puca. U blizini iskopa žive i žene i

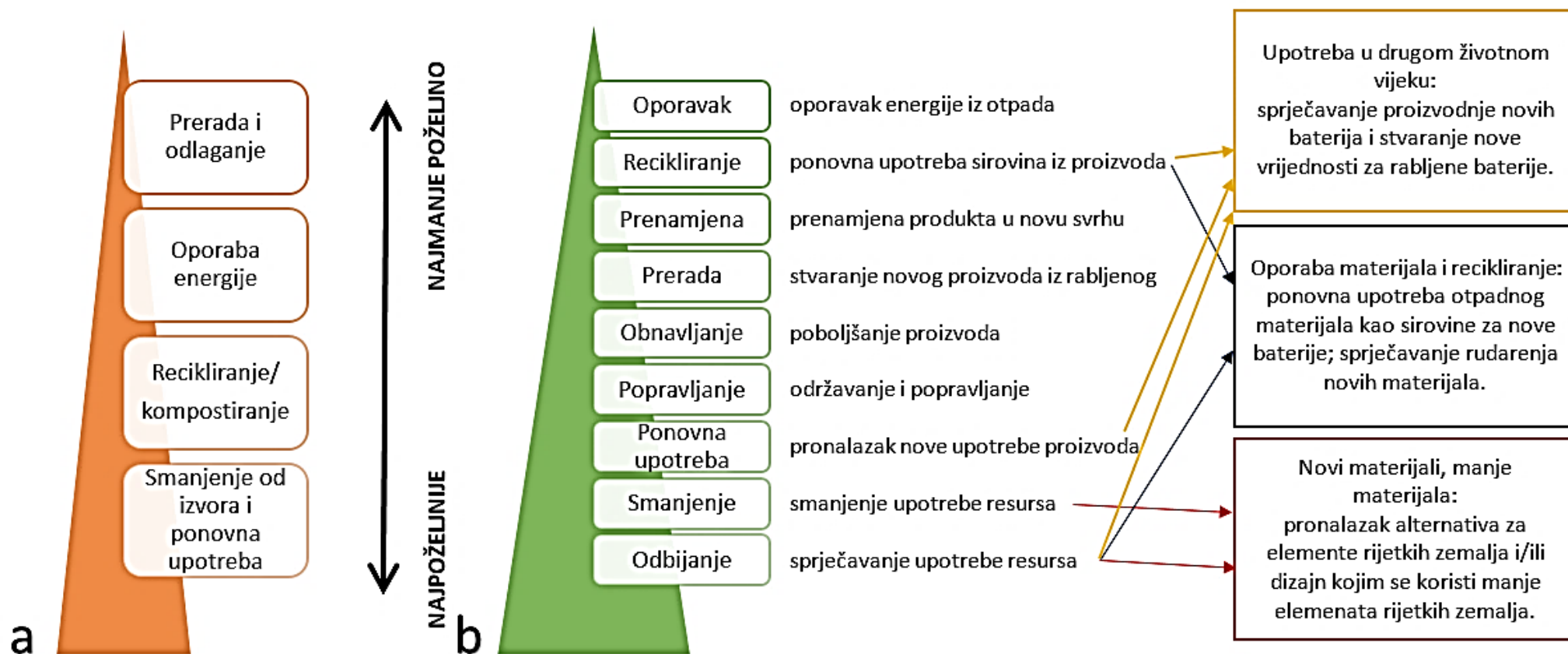
djeca nad kojima se također vrši nasilje. Rudarstvo velikih razmjera ipak je automatizirano za razliku od malog i obrtničkog rudarstva, ali oba imaju jednak utjecaj na okoliš – prašina obogaćena kobaltom, bakrom i drugim elementima u tragovima koju udišu radnici i stanovništvo u blizini, onečišćenje i zagađenje površinskih i podzemnih voda, zraka i tla te raseljavanje domorodačkog stanovništva. Zaključeno je da ako se ne naprave odgovarajuće promjene, budućnost o kojoj ovisi kobalt samo će povećati razmjere negativnog utjecaja eksploatacije kobalta.

6. Kreiranje kružne ekonomije baterija iz električnih vozila

Budući da linearna ekonomija ne predstavlja održiv model, jer prirodni resursi ipak nisu beskonačni, kružna ekonomija dobiva na značaju u okviru plana zelene tranzicije Europske unije. Teoretski, zelena ekonomija nudi rješenja tako da uskladi potrebe gospodarskih aktivnosti sa stanjem okoliša, postizanjem gospodarske, društvene i ekološke održivosti. Cilj zelene ekonomije je postići makroekonomski rast istovremeno osiguravajući razvoj u obliku zapošljavanja, smanjenja nacionalnih i regionalnih različitosti i poboljšanjem standarda života i zdravlja i ljudi i okoliša. Europska unija donijela je strateški dokument Održiva Europa do 2030. u kojem je jedan od ciljeva upravo prelazak na zelenu, dugoročno održivu i isplativu zelenu ekonomiju uključujući prelazak na kružno gospodarstvo i osiguravanje održivog razvoja sve u svrhu smanjenja negativnog utjecaja na okoliš. Europski zeleni plan je velik korak u pravom smjeru, u smjeru borbe protiv globalnih ekonomskih i okolišnih izazova i prihvaćanje održivog razvoja i zelene ekonomije kao budućnost razvoja Europske unije (Denona Bogović i Sverko Grdić, 2020). Europski zeleni plan je strategija rasta kojom se EU želi preobraziti u pravedno i prosperitetno društvo s modernim, resursno učinkovitim i konkurentnim gospodarstvom, u kojem do 2050. godine neće biti neto emisija stakleničkih plinova i u kojem gospodarski rast nije povezan s uporabom resursa. Uz sve to, ciljevi Europskog zelenog plana su i smanjenje stakleničkih plinova i prelazak na zeleniju elektromobilnost, odnosno povećanje broja električnih vozila na cestama, zatim ugljično neutralnu pohranu energije te održivi lanac vrijednosti baterija, čiji će se broj povećati u skorijoj budućnosti i koje imaju veliki potencijal za uključenje u održivo, kružno gospodarstvo. One su važan pokretač održivog razvoja, zelene mobilnosti, čiste energije i klimatske neutralnosti. Zato je potrebno ulagati u znanstveni i tehnički napredak te utvrditi pravila o parametrima održivosti, učinkovitosti, sigurnosti, skupljanju, recikliranju i prenamjeni baterija, kao i stvoriti usklađen regulatorni okvir za upravljanje čitavim ciklusom baterija koje se stavljaju na tržište Europske unije (Europska komisija, 2020).

6.1. Hijerarhija kružne ekonomije

Hijerarhija kružne ekonomije izgleda tako da se, idući od opcija kojima se treba više davati na važnosti, pri samom vrhu nalazi odbijanje korištenja novih sirovina i/ili smanjenje njihova korištenja, što znači da se može ići u smjeru pronalaska zamjena za trenutne materijale u proizvodnji, poput metala rijetkih zemalja, ili se nađe način za korištenje što manje rijetkih metala, ili je treća opcija recikliranje i uporaba resursa iz otpadnih baterija što opet smanjuje proizvodnju baterija iz novih sirovina. Daljnji korak je u ponovnoj upotrebi proizvoda, u ovom slučaju baterija iz vozila, tako da im se pronade upotreba u „drugom životu“, time se omogućuje daljnje korištenje baterija na novim mjestima koje u vozilima nisu više isplative ni učinkovite, a time je manja potreba za proizvodnjom novih. Treći korak u hijerarhiji bio bi popravak i održavanje baterija. Proizvodnjom baterija koje su lako popravljive i održive značilo bi produljen životni vijek baterija i posljedično odgađanje potrebe proizvodnje novih. Nadalje, obnova ili poboljšanje proizvoda nadovezuje se na prethodni korak, jer poboljšanjem baterija tako da postanu lako održive i popravljive ponovno dolazimo do istog, manje proizvodnje novih baterija i manje korištenje sirovina. Sljedeći je korak prerada proizvoda, to jest proizvodnja novog proizvoda od baterije. Zatim slijedi ponovna upotreba istog proizvoda, ali s drugom svrhom. Krajnje dvije opcije su recikliranje materijala iz baterija (time dajući „drugi život“ materijalima iz otpadne baterije) i oporavak energije, odnosno dobivanje energije iz otpada (Shell, 2020). Na slici 15 vidimo grafički prikaz ovih odnosa.



Slika 15. Hijerarhija a) gospodarenja otpadom i b) kružnog gospodarenja otpadom (prilagođeno prema Shell, 2020).

7. Budućnost kružne ekonomije litij-ionskih baterija

Prosječan životni vijek jedne baterije iz električnog vozila danas je oko deset godina, najčešće osam. U novijim modelima se nalaze baterije koje bi trebale potrajati i do dvadeset godina, ili nešto manje od petsto tisuća prijeđenih kilometara. Dakle, jedna tipična baterija iz EV danas ima domet od otprilike 200 do 250 tisuća kilometara. Broj punjenja, intenzitet punjenja i kvaliteta proizvodnje uvelike utječu na učinkovitost baterije, a ključna činjenica je da se sve litij-ionske baterije s vremenom troše. Globalno se trenutno koristi oko 32 milijuna električnih vozila, od kojih je 8 milijuna BEV-a i PHEV-a (*plug in hybrid electric vehicles*). Očekuje se da će jedan milijun vozila uskoro biti na kraju svog životnog vijeka, što bi značilo da u njihovim baterijama preostaje čak četiri GWh kapaciteta (Niese i sur., 2020).

Niese i sur. (2020) smatraju da baterije na kraju svog životnog vijeka, kad se uklone iz vozila, imaju tri krajnja cilja: ili u postrojenje za recikliranje, ili joj se nađe nova svrha, ili se odlaže na neko odlagalište otpada. Ako se reciklira, tada specijalizirana kompanija oporavlja vrijedne metale iz baterijskih ćelija – kobalt, nikal, mangan, litij – koje tada preprodaje za buduće nove baterije. Za pronalazak nove svrhe stare baterije, tada neka kompanija ne rastavlja otpadnu bateriju, već ih u kombinaciji s novim softverom, kućištem i novim skupom elektronike prenamijeni u najčešće stacionarni konačni proizvod. Treća, najmanje prihvatljiva destinacija je da se baterija odlaže na neko odlagalište otpada, što znači da se preostali kapacitet, materijali koji su korišteni u proizvodnji i mogućnost prenamjene ne iskorištavaju i time se gube vrijedne sirovine. Međutim, novi propisi i regulacije sve više nalažu da se otpadne baterije uključe u kružno gospodarstvo, upravo zbog oporavka vrijednih resursa koji bi smanjili proizvodnju novih. Primjerice, u Kini je na snagu stupila nova regulacija koja obvezuje proizvođače električnih baterija na njihovu uporabu, te se od njih zahtijeva da uspostave servisna mjesta i tokove za prikupljanje i skladištenje starih baterija da bi ih se kasnije poslalo u reciklažne centre (Pagliaro i Meneguzzo, 2019), kao što se u Republici Hrvatskoj to radi sa starim akumulatorima.

Baars i sur. (2020) u svom znanstvenom članku predlažu četiri strategije kružnog gospodarstva baterija iz električnih vozila. Prva i druga u središte stavljaju kobalt jer je, kao što je već prije spomenuto, većina prirodnih zaliha smještena u DR Kongo. Osim toga, pronaći odgovarajuću zamjenu kobaltu je dugotrajan i kemijski izazovan proces, zato što je potrebno naći dovoljno dobru zamjenu da se održe performanse proizvoda u primjenama poput tvrdih materijala, pigmenata, katalizatora, superlegura, i na kraju krajeva, i litij-ionskih baterija. Što

se njih tiče, nove inovacije koje djelomično zamjenjuju kobalt niklom, relativno su brzo komercijalizirane, čak brže nego što se očekivalo. Međutim, automobilska industrija zahtijeva visoku gustoću energije i stabilne baterije, kao i sigurnost i dobre performanse koje kobalt nudi, a relativno dug put između laboratorijskih inovacija i komercijalizacije u elektrokemijskoj energetskej industriji i bitne uloge koju ima kobalt, čine malo vjerojatnim da će u potpunosti biti zamijenjen iz litij-ionskih baterija u skoroj budućnosti. Stoga prva i druga strategija kružnog gospodarstva nalažu smanjenje ili čak eliminaciju kobalta iz trenutnih kemija, i to pomoću komercijalizacije novih, prijelomnih inovacija u kemiji baterija, ili povećanjem udjela nikla. Treća je strategija promocija ponovnog iskorištavanja baterija iz EV u nekim stacionarnim primjenama. Četvrta strategija je prijedlog zatvorenog kružnog gospodarstva u kojem bi se otpadne baterije reciklirale i koristile kao sekundarna sirovina za nove baterije.

Kao što je prethodno spomenuto, jedno od mogućih zamjenskih rješenja recikliranju baterija je prerada baterija iz vozila tako da im se pruži nova svrha, primjerice za skladištenje električne energije u nekom uređaju što im produljuje životni vijek, a i iskorištava se preostali kapacitet. Međutim, mnogi izvori tvrde da će ovaj način ponovne upotrebe baterija teško zaživjeti. Sve ovisi o mnogo čimbenika, neki od njih su cijena prerade baterija iz EV za skladištenje električne energije, vrijednost materijala koje bi se moglo izvući iz njih i cijena samog recikliranja. Recikliranje je učinkovitije što se više materijala uspije izvući iz baterija iz EV, koji se tada prodaju kao sekundarne sirovine, a ono je skuplje i kompliciranije od, primjerice, recikliranja olovno-kiselinskih baterija, to jest akumulatora. Uz sve to, industrija recikliranja se još neko vrijeme ne može krenuti bolje razvijati jer većina baterija koje su danas u opticaju još uvijek nisu na kraju svog životnog vijeka. Isto tako, preskupo je jer cijena za oporavljene materijale nije dovoljna za plaćanje rada koji je potreban za recikliranje (Drabik i Rizos, 2018).

Što se tiče situacije u Europskoj uniji, u Izvješću komisije (2019) navedeno je da Europska unija ima velik potencijal za stvaranje vodeće industrije za sigurno i ekološki prihvatljivo i odgovorno postupanje s baterijama na kraju životnog vijeka. Očekuje se rast količine baterija iz električnih vozila koje su na kraju svog životnog vijeka te se zbog toga moraju uvesti pravilni tokovi uporaba ovakve vrste otpada. Primjerice, recikliranje baterija može znatno pomoći u osiguravanju pristupa sirovinama za baterije. Ako bude postojao odgovarajući regulatorni okvir, doprinos recikliranja baterija električnih vozila u zadovoljavanju potrebe za kobaltom u EU bi mogao do 2030. dosegnuti približno 10%, bolje od doprinosa rudarskog sektora EU. Recikliranje i ponovno iskorištavanje baterija iz električnih

vozila ima veliki potencijal s obzirom na to da je time omogućeno učinkovitije iskorištavanje resursa i smanjena emisija ugljikovog dioksida. Problem je u pronalasku učinkovitih načina za „drugi život“ baterija iz vozila. Najviši prioritet je prema tome, imajući na umu važnost kružne ekonomije u ovom slučaju, smanjiti i prevenirati korištenje resursa, posebice metala rijetkih zemalja i naći odgovarajuće nove načine za iskorištavanje baterija iz vozila. (Shell, 2020; Mosquet i sur., 2020). Recikliranje litij-ionskih baterija trenutačno gotovo i ne postoji, ali Komisija već neko vrijeme procjenjuje mogućnosti da se za takvu vrstu baterija uspostavi kružno gospodarstvo. Razmatraju i mogućnost ponovne uporabe baterija iz vozila u stacionarnim primjenama kao jedno od rješenja da se smanji utjecaj na okoliš. Zbog toga je Komisija potpisala Sporazum o inovacijama u području baterija, kako bi ispitala mogu li se na temelju sadašnjeg zakonodavstva na razini EU-a ili država članica baterije ponovno upotrebljavati. Nastavno na Izvješće, u Prijedlogu Uredbe Europskog parlamenta i vijeća o otpadnim baterijama, stavljanju izvan snage Direktive 2006/66/EZ i izmjeni Uredbe (EU) br. 2019/1020 (dalje u tekstu Prijedlog Uredbe) s kraja 2020. godine navode se tri cilja koja su međusobno usko povezana:

- a. osiguravanjem jednakih uvjeta tržišnog natjecanja pomoću zajedničkog skupa pravila uspostavilo bi se bolje funkcioniranje unutarnjeg tržišta (koje bi uključilo proizvode, procese, otpadne baterije i reciklate)
- b. promicanje kružnog gospodarstva
- c. smanjenje učinaka na okoliš i društvo u svim fazama životnog ciklusa baterija.

Budući da postojeće regulacije obuhvaćaju samo završnu fazu životnog ciklusa baterija putem Direktive o baterijama, u EU ne postoje pravne odredbe kojima bi se obuhvatili drugi aspekti faza proizvodnje i uporabe baterija. Ovaj je prijedlog u potpunosti u skladu s postojećim regulatornim okvirom EU-a o okolišu i otpadu te se njime to zakonodavstvo nadopunjuje. Predanost provedbi strateškog akcijskog plana za baterije Komisija potvrđuje predlaganjem zakonodavstva kojim bi se osigurao siguran, kružan i održiv lanac vrijednosti baterija za sve baterije, čime se podržava vađenje sirovina, održiva nabava i obrada, održivi materijali za baterije, proizvodnja ćelija te ponovna uporaba i recikliranje baterija, među ostalim i kako bi se opskrbilo rastuće tržište električnih vozila.

8. Zaključak

Klimatske promjene stvaraju velik pritisak na čovječanstvo i prirodu, stoga se pokušavaju pronaći rješenja za uzroke klimatskih promjena. Jedan od velikih izazova je kako smanjiti emisije ugljikovog dioksida u atmosferu koji je jedan od glavnih uzroka efekta staklenika i globalnog zagrijavanja atmosfere. Električna vozila predstavljaju jedno od boljih rješenja za smanjenje emisije ugljikovog dioksida u atmosferu zato što imaju nultu emisiju prilikom korištenja. Međutim, dokazano je da se više CO₂ ispusti u atmosferu prilikom proizvodnje samih litij-ionskih baterija i električnih vozila, nego pri proizvodnji konvencionalnog vozila s motorom s unutarnjim izgaranjem, ali se više CO₂ ispusti tijekom životnog vijeka konvencionalnog vozila.

Neki od ključnih elemenata u baterijama su litij, kobalt, nikal i mangan. Procesi vađenja i proizvodnje ključnih elemenata iznimno su zahtjevni i imaju golem utjecaj na okoliš. Litij se dobiva iz tri glavna izvora, a to su slanice, stijene s mineralima spodumenom i lepidolitom, ali i iz glina koje sadrže smektite, hektorit i kaolinite. Brojna istraživanja rade se na dobivanju litija iz oceana, odnosno morske vode, koja bi mogla postati dodatni izvor litija zbog njegove goleme količine u oceanima. Najveće zalihe litija imaju Čile, Argentina i Bolivija u obliku slanica, odnosno slanih polja. Proces dobivanja litija zahtijeva korištenje velikih količina voda koja je ionako oskudna u tim zemljama. Australija sadrži velike količine litija u obliku spodumena, a u Europi se značajne količine litija nalaze u Portugalu (lepidolit) i u Srbiji (jadarit). U Finskoj se također nalaze velika nalazišta litija. Osim utjecaja na okoliš, javljaju se i društveni i politički problemi zbog nezadovoljstva stanovništva načinom na koji se korporacije odnose prema ljudima i prirodi. Kobalt je jedan od najskupljih ključnih elemenata u baterijama, glavne rude kobalta su kobaltit, eritrit, glaukodot i skutterudit. Velike količine kobalta pronalaze se i na morskom dnu, uz nodule mangana, zatim u Cu-Co taložinama unutar stratiformnog sedimenta, u hidrotermalnim i vulkanogenim naslagama, magmatskim sulfidima i lateritima. Kobalt se najviše vadi u DR Kongu, a industrija je iznimno prljava i korumpirana. Rudari rade u nehumanim uvjetima, prisutno je sveopće zagađenje okoliša, a njime su zahvaćeni i djeca i žene koji žive u blizini rudnika. Kao i u „litijском trokutu“, i u Kongu se javljaju problemi na svim razinama, od društvenih do političkih, a sveprisutna korupcija vlasti usporava mogućnosti napretka industrije kobalta u smjeru održivosti i smanjenog utjecaja na okoliš. Niklove glavne rude su pentlandit i rude lateritnog tipa u kojima se javljaju niklonosni limonit i garnierit. Mangan je jedan od najzastupljenijih metala na Zemlji, a njegove rude su romanečit, manganit,

piroluzit, hausmanit i rodokrozit. Nisu sve ekonomski isplative zbog njihovih zastupljenosti na Zemlji, ali i količini nečistoća koje se javljaju u njima, a njegova je industrija jednako etički upitna kao i industrija kobalta.

Litij-ionske baterije danas se koriste u gotovo svim malim elektroničkim uređajima, a sve više se koriste i u električnim vozilima. Postoji mnogo vrsta ovisno o vrsti katode. Uglavnom se sastoje od velikog udjela litija, nikla i kobalta, ali sve se više traži zamjena za kobalt koji je jedan od najskupljih elemenata u litij-ionskim baterijama, a osim što je skup, sporna je i rudarska industrija kobalta. S razvojem tehnologije sve je veća potreba za litij-ionskim baterijama, što znači i sve veću potrebu za rudarenjem elemenata. S obzirom na to da se litij-ionske baterije proizvode tek nekoliko desetljeća, još uvijek je financijski isplativije dobiti sirovine za proizvodnju iz prirode nego recikliranjem starih, iskorištenih baterija. Bez obzira na to, brojni znanstvenici rade na istraživanjima o najučinkovitijim načinima recikliranja litij-ionskih baterija. Ako se ijedan od tih mogućih načina komercijalizira, postoji mogućnost za stvaranjem novih radnih mjesta i smanjenjem pritiska na okoliš.

Europska unija stoga već neko vrijeme razmatra mogućnost stvaranja kružne ekonomije baterija iz električnih vozila. Rade se novi regulatorni okviri koji bi omogućili odgovarajuće načine za skupljanje, obradu i recikliranje starih litij-ionskih baterija. Najbolji primjer danas predstavljaju olovno-kiselinske baterije iz vozila, odnosno akumulatori, za koje već postoji riješen sustav skupljanja i obrade i na kraju recikliranja materijala iz istih. Budući da gotovo sve današnje litij-ionske baterije iz električnih vozila još uvijek nisu na kraju svog životnog vijeka, ne može se sa sigurnošću odrediti najbolji način za recikliranje istih, ali vjeruje se da će se s vremenom budućnost kružne ekonomije razvijati u smjeru učinkovitosti i održivosti za sve vrste baterija, samo onda ako se usuglase politika i znanstvena zajednica i nova tehnološka dostignuća.

9. Literatura

- Al-Thyabat, S., T. Nakamura, E. Shibata, and A. Iizuka. (2013). Adaptation of minerals processing operations for lithium-ion (LiBs) and nickel metal hydride (NiMH) batteries recycling: Critical review. *Minerals Engineering*, 45, 4–17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.12.005>
- An, J. W., Kang, D. J., Tran, K. T., Kim, M. J., Lim, T. Tran., T. (2012). Recovery of lithium from Uyuni salar brine. *Hydrometallurgy* 117–118, 64–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.02.008>.
- Azevedo, M., Baczyńska, M., Hoffman, K. i Krauze, A. (2022). Lithium mining: How new production technologies could fuel the global EV revolution. McKinsey & Company. Preuzeto s: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/lithium-mining-how-new-production-technologies-could-fuel-the-global-ev-revolution>. (pristupljeno 1. lipnja 2022.)
- Baars, J., Domenech, T., Bleischwitz, R., Melin, H. E. i Heidrich, O. (2020). Circular economy strategies for electric vehicle batteries reduce reliance on raw materials. *Nature Sustainability*. 4, 71–79. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-020-00607-0> (pristupljeno 8. siječnja 2022.)
- Bacanora Minerals (2016). Technical report on the pre-feasibility study for the Sonora Lithium project, Mexico. Dostupno na: https://bacanoralithium.com/_userfiles/pages/files/documents/technicalreportontheprefeasibilitystudyforthesonorolithiumprojectmexico_compressed.pdf (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Bae, H. i Kim, Y. (2021). Technologies of Lithium Recycling from Waste Lithium Ion Batteries: A Review. *Mater. Adv.* 2, 3234–3250. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1MA00216C>. Preuzeto s: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/MA/D1MA00216C>. (pristupljeno 29. rujna 2022.)
- Banza Lubaba Nkulu, C., Casas, L., Haufröid, V., De Putter, T., D. Saenen, N., Kayembe-Kitenge, T., Musa Obadia, P., Kyanika Wa Mukoma, D., Lunda Ilunga, J., S. Nawrot, T., Luboya Numbi, O., Smolders, E. i Nemery, B. (2018). Sustainability of artisanal

- mining of cobalt in DR Congo. *Nat Sustain* 1, 495–504. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0139-4>. (pristupljeno 21. studenog 2022.)
- Barandiarán, J. (2019). Lithium and development imaginaries in Chile, Argentina and Bolivia. *World Development*, 113, 381–391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.09.019>. Preuzeto s: <https://escholarship.org/uc/item/6x78d1jp> (pristupljeno 29. studenog 2022.)
- Battery University (2018). BU-205: Types of Lithium-ion [online]. Battery University. Dostupno na: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion> (pristupljeno 7. siječnja 2022.)
- Bell, Terence (2020). An Overview of Commercial Lithium Production [online]. ThoughtCo. Dostupno na: <https://www.thoughtco.com/lithium-production-2340123> (pristupljeno 31. svibnja 2022.)
- British Geological Survey (2016). Mineral profile – Lithium. Dostupno na: https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/mineralProfiles/lithium_profile.pdf?_ga=2.252470158.642332009.1669367716-478955233.1669367716 (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Brown, T.J., Hobbs, S.F., Mills, A.J., Petavratzi, E., Raycraft, E.R., Shaw, R.A., Bide, T. (2013). European Mineral Statistics 2007–11. British Geological Survey, Keyworth, Nottingham. Preuzeto s: <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/download/ems/EMS20072011.pdf> (pristupljeno 26. svibnja 2022.)
- Calla Ortega, R. (2014). Impactos de la producción industrial del carbonato de litio y del cloruro de potasio en el salar de Uyuni. U: *Guzma'n Salina J* (ur.) Un presente sin futuro: El proyecto de industrialización del litio en Bolivia. La Paz, Bolivia: CEDLA, 25–63.
- Chateau, Z., Devine-Wright, P. i Wills, J. (2021). Integrating sociotechnical and spatial imaginaries in researching energy futures. *Energy Research and Social Science* 80, 102207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102207>. Preuzeto s: <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/127234> (pristupljeno 29. studenog 2022.)

- Chitrakar, R., Y. Makita, Y., Ooi, K. i A. Sonoda, A. (2012). Selective uptake of lithium ion from brine by $H_{1.33}Mn_{1.67}O_4$ and $H_{1.6}Mn_{1.6}O_4$. *Chemistry Letters* 41, 1647–1649. DOI: <https://doi.org/10.1246/cl.2012.1647>. (pristupljeno 17. listopada 2022.)
- Choubey, P. K., Kim, Min-seuk., Srivastava, R. R., Lee, Jae-chun i Lee, J. Y. (2016). Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources, *Minerals Engineering* 89, 19–137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.010>. (pristupljeno 17. listopada 2022.)
- Choubey, P.K., Chung, K.-S., Kim, M.-s., Lee, J.-c. i Srivastava, R.R. (2017). Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element lithium. Part II: from sea water and spent lithium ion batteries (LIBs). *Miner. Eng.* 110, 104–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.04.008>. (pristupljeno 17. listopada 2022.)
- Coronelli, E. (2020). Recikliranje baterija iz električnih automobila. Diplomski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- Crockett, R.N., Chapman, G.R. i Forrest, M.D. (1987). In: International Strategic Minerals Inventory Summary Report – Cobalt. US Geological Survey Circular 930 - F. US Geological Survey, Denver.
- Crundwell, F.K., Moats, M.S., Ramachandran, V., Robinson, T.G. i Davenport, W.G. (2011). Production of Cobalt from the Copper–Cobalt Ores of the Central African Copperbelt, in: Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. 377–391. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096809-4.10030-9>.
- Dehaine, Q., Tijsseling, L. T., Glass, H. J., Törmänen, T., Butcher, A. R. (2021). Geometallurgy of cobalt ores: A review. *Minerals Engineering* 160, 106656, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106656> (pristupljeno 5. studenog 2022.)
- Denona Bogović, N. i Sverko Grdić, Z. (2020). Transitioning to a Green Economy – Possible Effects on the Croatian Economy. *Sustainability*, 12, 9342. Preuzeto s: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/22/9342>. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12229342> (pristupljeno 5. siječnja 2022.)
- Dessemond, C., Lajoie-Leroux, F., Soucy, G., Laroche, N. i Magnan, J. F. (2019). Spodumene: The Lithium Market, Resources and Processes. *Minerals*, 9, 334.

- Preuzeto s : <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/6/334>. DOI: <https://doi.org/10.3390/min9060334> (pristupljeno 28. rujna 2022.)
- Diallo, Mamadou S., Madhusudhana R. K. i Manki C. (2015). Mining Critical Metals and Elements from Seawater: Opportunities and Challenges. *Environmental Science & Technology* 49, 9390–9399. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00463>. Preuzeto s: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b00463> (pristupljeno 26. svibnja 2022.)
- Dorn, F.M. i Ruiz Peyré, F. (2020). Lithium as a Strategic Resource: Geopolitics, Industrialization, and Mining in Argentina. *Journal of Latin American Geography* 19, 68–90. DOI: <https://doi.org/10.1353/lag.2020.0101> (pristupljeno 29. lipnja 2022.)
- Downing, James H. (2013). "manganese processing". Encyclopedia Britannica. Dostupno na: <https://www.britannica.com/technology/manganese-processing> (pristupljeno 19. studenog 2022.)
- Drabik, E. i Rizos, V. (2018). Prospects for electric vehicle batteries in a circular economy. Research Report, Burxelles, Centre for European Policy Studies, 2018/05. Preuzeto s: <https://www.ceps.eu/ceps-publications/prospects-end-life-electric-vehicle-batteries-circular-economy/> (pristupljeno 13. siječnja 2022.)
- Ekermo, V. (2009). Recycling opportunities for Li-ion batteries from hybrid electric vehicles. Diplomski rad. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- Europska komisija (2019): Izvješće Komisije Europskom parlamentu, Vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru, Europskom odboru regija i Europskoj investicijskoj banci o provedbi strateškog akcijskog plana za baterije: razvoj strateškog vrijednosnog lanca baterija u Europi. Ured za publikacije Europske unije. Dostupno na: <https://op.europa.eu/hr/publication-detail/-/publication/72b1e42b-5ab2-11e9-9151-01aa75ed71a1> (pristupljeno 6. siječnja 2022.)
- Europska Komisija (2020): Prijedlog Uredbe Europskog parlamenta i vijeća o otpadnim baterijama, stavljanju izvan snage Direktive 2006/66/EZ i izmjeni Uredbe (EU) br. 2019/1020. Europska komisija. Bruxelles. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/ALL/?uri=CELEX%3A52020PC0798> (pristupljeno 14. siječnja 2022.)

- Flexer, V., Baspineiro, C. F. i Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*, 639, 1188–1204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>. Preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718318746?via%3Dihub> (pristupljeno 25. siječnja 2023.)
- Forster, J. (2011). A Lithium Shortage: Are Electric Vehicles Under Threat? Lithium: A Resource With Many Applications. Dostupno na: <https://www.files.ethz.ch/cepe/top10/forster.pdf> (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Gaines, L. L. i Cuenca, R. M. (2000). Costs of lithium-ion batteries for vehicles. Argonne, IL USA: Argonne National Laboratory.
- Gauthier, G. i Deliens, M., (1999). Cobalt minerals of the Katanga Crescent, Congo. *The Mineralogical Record*, 30, 255–256.
- Goclawska, J. A. (2022). 2017-2018 Minerals Yearbook. The Mineral Industry of Portugal. USGS Minerals Yearbook, US Department of the Interior. Preuzeto s: <https://pubs.usgs.gov/myb/vol3/2017-18/myb3-2017-18-portugal.pdf> (pristupljeno 30. listopada 2022.)
- Google Earth (2015a). Wolsfberg, Austrija. Dostupno na: <https://earth.google.com/web/> (pristupljeno 27. siječnja 2023.)
- Google Earth (2015b). San Pedro de Atacama. Dostupno na: <https://earth.google.com/web/> (pristupljeno 29. siječnja 2023.)
- Gregersen, E. (2021a): M. Stanley Whittingham. Enciklopedija Britannica. Dostupno na: <https://www.britannica.com/biography/M-Stanley-Whittingham> (pristupljeno 12. siječnja 2022.)
- Gregersen, E. (2021b): John B. Goodenough. Enciklopedija Britannica. Dostupno na: <https://www.britannica.com/biography/John-B-Goodenough> (pristupljeno 6. siječnja 2022.)
- Gregersen, E. (2021c): Yoshino Akira. Enciklopedija Britannica. Dostupno na: <https://www.britannica.com/biography/Yoshino-Akira> (pristupljeno 6. siječnja 2022.)

- Greim, P., Solomon, A.A., Breyer, C. (2020). Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation. *Nature Communications*, 11, 4570. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18402-y>.
Preuzeto s: <https://www.nature.com/articles/s41467-020-18402-y#citeas> (pristupljeno 29. svibnja 2022.)
- Gunn, G. (ur). (2013). Critical Metals Handbook. Critical Metals Handbook. Oxford: John Wiley & Sons.
- Hoshino, T. (2013a). Preliminary studies of lithium recovery technology from seawater by electrodialysis using ionic liquid membrane. *Desalination* 317, 11–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.02.014>
- Hoshino, T. (2013b). Development of technology for recovering lithium from seawater by electrodialysis using ionic liquid membrane. *Fusion Engineering and Design*, 88, 2956–2959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.06.009>
- Jasanoff, S., Kim, S.H. i Sperling, S. (2007). Sociotechnical Imaginaries and Science and Technology Policy: A Cross-National Comparison. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/265664653_Sociotechnical_Imaginaries_and_Science_and_Technology_Policy_A_Cross-National_Comparison (pristupljeno 29. studenog 2022.)
- Kamienski, C. W., McDonald, D. P., Stark, M. W. i Papcun, J. R. (2004). Lithium and lithium compounds, u Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. Kirk-Othmer ed., 30. UK: John Wiley & Sons, Inc.
- Kesler, S. E., Gruber, P. W., Medina, P. A., Keoleian, G. A., Everson, M. P. i Wallington, T. J. (2012). Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews* 48, 55–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>.
- Kim, Y., Seong, W. M. i Manthiram, A. (2021). Cobalt-free, high-nickel layered oxide cathodes for lithium-ion batteries: Progress, challenges, and perspectives. *Energy Storage Materials*, 34, 250–259, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.09.020> (pristupljeno 17. svibnja 2022.)

- Knights, D. H. B., i F. Saloojee. (2015). Lithium battery recycling - Keeping the future fully charged. Research and Policy Development to Advance a Green Economy in South Africa. CM Solutions, South Africa. Dostupno na: https://silo.tips/queue/lithium-battery-recycling?&queue_id=-1&v=1669371377&u=OTMuMTM4LjcyLjExMQ.
- Köppel, Jonas (2022). Mining Indigenous Territories – Agree to disagree? Lithium Worlds. Dostupno na: <https://lithiumworlds.com/mining-indigenous-territories/> (pristupljeno 27. siječnja 2023).
- Lattanzio, R. K. i Clark, C. E. (2020). Environmental Effects of Battery Electric and Internal Combustion Engine Vehicles. Congressional Research Service. Preuzeto s: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46420> (pristupljeno 22. siječnja 2022.)
- Lebedeva, N., Di Persio, F. i Boon-Brett, L. (2017). Lithium ion battery value chain and related opportunities for Europe, EUR 28534 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg. DOI: <http://dx.doi.org/10.2760/6060> (pristupljeno 30. svibnja 2022.)
- Leshner, C.M. i Keays, R.R. (2002). Komatiite-associated Ni-Cu-PGE deposits: Geology, mineralogy, geochemistry and genesis. U: Cabri, L. (ur.), *The Geology. Geochemistry, Mineralogy and Mineral Beneficiation of the Platinum-Group Elements*, Canadian Institute Mineral Metallurgy Petroleum, 579–618.
- Leš, B., Leš, D., Merćep, M., Karasalihović Sedlar, D., Smajla, I., Šćulac Domac, M. i Zovak, G. (2020). Komparativna analiza korištenja UNP-a i klasičnih goriva kod osobnih vozila radi smanjenja emisija stakleničkih plinova u sektoru transporta.. Elaborat. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb. Dostupno na: <https://www.bib.irb.hr/1107846> (pristupljeno 22. siječnja 2022.)
- Li, M. i Lu, J. (2020). Cobalt in lithium-ion batteries. *Science*, 367, 979–980. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aba9168> (pristupljeno 12. studenog 2022.)
- Liu, C., Li, Y., Lin, D., Hsu, Po-Chun, Liu, B., Yan, G., Wu, T., Cui, Y. i Chu, S. (2020). Lithium Extraction from Seawater through Pulsed Electrochemical Intercalation. *Joule*, 4, 1459–1469. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.017> (pristupljeno 11. listopada 2022.)

- Liu, W. i Agusdinata, D. B. (2020). Interdependencies of lithium mining and communities sustainability in Salar de Atacama, Chile. *Journal of Cleaner Production*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120838>.
- López Steinmetz, R. L. i Shao Bing Fong, S. (2019). Water legislation in the context of lithium mining in Argentina *Resources Policy*, 64, 101510. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101510> (pristupljeno 29. lipnja 2022.)
- Lupi, C., Pasquali, M. i Dell'era, A. (2005). Nickel and cobalt recycling from lithium-ion batteries by electrochemical processes. *Waste Management*, 25, 215–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.12.012> (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Matos C. T., Ciacci, L., Godoy León, F., Lundhaug, M., Dewulf, J., Müller, D.B., Georgitzikis, K., Wittmer, D. i Mathieux, F. (2020). Material System Analysis of five battery-related raw materials: Cobalt, Lithium, Manganese, Natural Graphite, Nickel, EUR 30103 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, DOI: doi:10.2760/519827. Preuzeto s: <https://op.europa.eu/hr/publication-detail/-/publication/1031289f-1a68-11eb-b57e-01aa75ed71a1/language-en> (pristupljeno 25. svibnja 2022.)
- McLaughlin, W. i T. S. Adams (1999). Li reclamation process. U.S. Patent No. 5,888,463. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Dostupno na: <https://patents.google.com/patent/US5888463A/en>
- Meng, F., McNeice, J., Shirin S. Zadeh, S. S. i Ghahreman, A. (2019). Review of Lithium Production and Recovery from Minerals, Brines, and Lithium-Ion Batteries, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 42, 1–19. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/336223136_Review_of_Lithium_Production_and_Recovery_from_Minerals_Brines_and_Lithium-Ion_Batteries. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2019.1668387>. (pristupljeno 29. lipnja 2022.)
- Meshram, P., Pandey, B. D. i Mankhand, T. R. (2014). Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: A comprehensive review. *Hydrometallurgy* 150, 192–208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.012> (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Mishra, B. i Majumdar, G. (2017). Alkali metals production (Li, Na, K). *Reference module in materials science and materials engineering*, 1–2. Netherlands: Elsevier. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09228-6> (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Mosquet, X., Arora, A., Xie, A. (2020). Who Will Drive Electric Cars to the Tipping Point?. Boston Consulting Group. Dostupno na:
<https://www.bcg.com/publications/2020/drive-electric-cars-to-the-tipping-point>
(pristupljeno 10. siječnja 2022.)
- Naldrett, A.J. (1997). Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: Implications for exploration. *Aust. J. Earth Sci.* 44, 283–315. DOI: <https://doi.org/10.1080/08120099708728314>.
- Niese, N., Pieper, C., Arora, A. i Xie, A. (2020). The Case for a Circular Economy in Electric Vehicle Batteries. Boston Consulting Group. Dostupno na:
<https://www.bcg.com/publications/2020/case-for-circular-economy-in-electric-vehicle-batteries> (pristupljeno 10. siječnja 2022.)
- Nishihama, S., Onishi, K. i Yoshizuka, K. (2011). Selective Recovery Process of Lithium from Seawater Using Integrated Ion Exchange Methods, Solvent Extraction and Ion Exchange, 29:3, 421–431, DOI: 10.1080/07366299.2011.573435
- Novosel, M. (2016). Izbor baterija kod solarnih, hibridnih i električnih vozila. Završni rad. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu, Strojarski odjel.
- Obradovic, J., Djurdjevic-Colson, J., Vasic, N. (1997): Phytogenic lacustrine sedimentation – oil shales in Neogene from Serbia, Yugoslavia. *J. Palaeolimnology*, 18, str. 351–364.
- Pagliaro, M. i Meneguzzo, F. (2019). Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight. *Heliyon*, 5, E01866. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01866> (pristupljeno 6. siječnja 2022.)
- Park, H., Singhal, N. i Jho, E. H. (2015). Lithium Sorption Properties of HMnO in Seawater and Wastewater. *Water Res.*, 87, 320–327. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.09.032> (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Peiró, L., Villalba Méndez, G. i Ayres, R. U. (2013). Lithium: Sources, production, uses, and recovery outlook. *JOM* 65, 986–996. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-013-0666-4> Preuzeto s:

- https://www.researchgate.net/publication/257761787_Lithium_Sources_Production_Uses_and_Recovery_Outlook. (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Pennel, K. (2018): How Does Lithium Mining Work? GrabCAD Blog. Dostupno na: <https://blog.grabcad.com/blog/2018/02/20/how-does-lithium-mining-work/> (pristupljeno 26. rujna 2022.)
- Pirard, C. i Hatert, F. (2008). The sulfides and selenides of the Musonoï mine, Kolwezi, Katanga, Democratic Republic of Congo. *Can. Mineral.* 46, 219–231. DOI: <https://doi.org/10.3749/canmin.46.1.219> (pristupljeno 16. studenog 2022.)
- Rio Tinto (2020): Rio Tinto declares maiden Ore Reserve at Jadar. Preuzeto s: <https://www.riotinto.com/-/media/Content/Documents/Invest/Reserves-and-resources/RT-Jadar-Reserves-2020.pdf?rev=c31b0fd7047f46dcba39bc3dea49ccb6> (pristupljeno 4. studenog 2022.)
- Rioyo, J., Tuset, S., i Grau, R. (2020). Lithium Extraction from Spodumene by the Traditional Sulfuric Acid Process: A Review, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43, 97–106. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1798234>. (pristupljeno 27. rujna 2022.)
- Salakjani, N. K., Singh, P. i Nikoloski, A. N. (2019). Production of lithium – A literature review part 1: Pretreatment of spodumene. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 41, 335–348. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1643343> (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Sanchez-Lopez, D. (2019). Sustainable Governance of Strategic Minerals: Post-Neoliberalism and Lithium in Bolivia, *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 61, 18–30, DOI: <https://doi.org/10.1080/00139157.2019.1662659>. (pristupljeno 20. studenog 2022.)
- Shankleman, J., Biesheuvel, T., Ryan, J. i Merrill, D. (2017). We're Going to Need More Lithium. Bloomberg Businessweek. Dostupno na: <https://www.bloomberg.com/graphics/2017-lithium-battery-future/> (Pristupljeno 8. siječnja 2022.)

- Shell, C. (2020). EV Batteries: Creating a Circular Economy. Cleantech Group. Dostupno na: <https://www.cleantech.com/ev-batteries-creating-a-circular-economy/> (pristupljeno 6. siječnja 2022.)
- Simon, B., Ziemann, S. i Weil, M. (2015). Potential metal requirement of active materials in lithium-ion battery cells of electric vehicles and its impact on reserves: Focus on Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, Part A, 300–310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.011>, Preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344915300458> (pristupljeno 18. svibnja 2022.)
- Slack, J. F., Kimball, B. E., i Shedd, K. B. (2017). Cobalt, poglavlje F. U: Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Jr., Seal, R. R., II i Bradley, D. C. (ur.). Critical mineral resources of the United States – Economic and environmental geology and prospects for future supply. U.S. Geological Survey, Professional Paper 1802, F1– F40.
- Sojka, R. (1998). Innovative recycling technologies for rechargeable batteries. In 4th International Battery Recycling Congress. Anais. Hamburg, Alemanha, 1–3.
- Sovacool, B. K. (2019). The precarious political economy of cobalt: Balancing prosperity, poverty, and brutality in artisanal and industrial mining in the Democratic Republic of the Congo. *The Extractive Industries and Society*, 6, 915–939. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.05.018>. (pristupljeno 21. studenog 2022.)
- Stanley, C. J., Jones, G. C., Rumsey, M. S., Blake, C., Roberts, A. C., Stirling, J. A. R., Carpenter, G. J. C., Whitfield, P. S., Grice, J. D., Lepage, Y. (2007). Jadarite, $\text{LiNaSiB}_3\text{O}_7(\text{OH})$, a new mineral species from the Jadar Basin, Serbia. *Eur. J. Mineral.* 19, 575–580. DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/0935-1221/2007/0019-1741> Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/233991815_Jadarite_LiNaSiB3O7OH_a_new_lithium_sodium_borosilicate_mineral_from_the_Jadar_Basin_Serbia (pristupljeno 3. studenog 2022.)
- Sterba, J., Krzemień, A., Riesgo Fernández, P., Escanciano García-Miranda, C., Fidalgo Valverde, G. (2019). Lithium mining: Accelerating the transition to sustainable energy. *Resources Policy*, 62, str. 416-426, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.05.002> (pristupljeno 28. rujna 2022.)

- Takač, T. (2018). Usporedba DC i AC elektrokemijskih tehnika za određivanje stanja napunjenosti i stanja zdravlja Li-ion galvanskih članaka.
- Takač, T. (2018). Usporedba DC i AC elektrokemijskih tehnika za određivanje stanja napunjenosti i stanja zdravlja Li-ion galvanskih članaka. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije. Preuzeto s: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:715389> (pristupljeno 29. siječnja 2023.)
- Talens Peiró, L., Villalba, G. i Ayres, R. (2013). Lithium: sources, production, uses, and recovery outlook. *JOM* 65, 986–96. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0666-4> (pristupljeno 25. studenog 2022).
- Tang, L., Huang, S., Wang, Y., Liang, D., Li, Y., Li, J., Wang, Y., Xie, Y. i Wang, W. (2020). Highly Efficient, Stable, and Recyclable Hydrogen Manganese Oxide/Cellulose Film for the Extraction of Lithium from Seawater. *Applied Materials & Interfaces*, 12, 9775–9781. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b21612> (pristupljeno 12. listopada 2022.)
- Törmänen, T. i Tuomela, P. (2021). Analysis of Finnish battery mineral deposits with special emphasis on cobalt. Geological Survey of Finland, Open File Research Report 29/2021. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/354987022_Tormanen_T_Tuomela_P_2021_Analysis_of_Finnish_battery_mineral_deposits_with_special_emphasis_on_cobalt_Geological_Survey_of_Finland_Open_File_Research_Report_292021 (pristupljeno 25. svibnja 2022.)
- Tran, T., Van T. Luong (2015). Chapter 3 - Lithium production processes, Lithium process chemistry: Resources, extraction, batteries, and recycling. Chagnes A. i Światowska J. (ur.), prvo izdanje. Elsevier Science: str. 81–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2013-0-19081-2> (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Turčinović, M. (2019). Tehničko eksploatacijske značajke cestovnih vozila na električni pogon. Završni rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti.
- USGS (2022). Mineral Commodity Summaries: U.S. Geological Survey. DOI: <https://doi.org/10.3133/mcs2022>. Preuzeto s: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2022> (pristupljeno 25. svibnja 2022.)

- Verma, S., Dwivedi, G. i Verma, P. (2021). Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. *Materials Today: Proceedings* 49, 217–222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.666>. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/349693055_Life_cycle_assessment_of_electric_vehicles_in_comparison_to_combustion_engine_vehicles_A_review. (pristupljeno 6. prosinca 2022.)
- Voskoboynik, D. M. i Andreucci, D. (2022). Greening extractivism: Environmental discourses and resource governance in the ‘Lithium Triangle.’ *Environment and Planning E: Nature and Space*, 5, 787–809. DOI: <https://doi.org/10.1177/25148486211006345>. (pristupljeno 21. studenog 2022.)
- Western Lithium (2016). Western lithium USA corporation management's discussion and analysis for the nine months ended June 30, 2015. 1–41. Dostupno na: <https://sec.report/otc/financial-report/149691> (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Xiang, W., Liang, S., Zhou, Z., Qin, W. i Fei, W. (2016). Extraction of lithium from salt lake brine containing borate anion and high concentration of magnesium. *Hydrometallurgy* 166, 9–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.08.005> (pristupljeno 25. studenog 2022.)
- Xu, J., H. R. Thomas, R. W. Francis, K. R. Lum, J. Wang i B. Liang. (2008). A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. *Journal of Power Sources*, 177, 512–527. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.074>
- Yang, S., Zhang, F., Ding, H., He, P., Zhou, H. (2018). Lithium Metal Extraction from Seawater. *Joule*, 2, 1648–1651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.07.006>. Preuzeto s: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435118302927> (pristupljeno 27. svibnja 2022.)
- Zhang, J., Zhang, L., Sun, F. i Wang, Z. (2018). An Overview on Thermal Safety Issues of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Application. *IEEE Access*, 6, str. 23848–23863. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2824838>. Preuzeto s: https://www.researchgate.net/publication/324929541_An_Overview_on_Thermal_Safety_Issues_of_Lithium-ion_Batteries_for_Electric_Vehicle_Application (pristupljeno 27. siječnja 2023.)

Žeravica, D. (2018). Kružna ekonomija. Diplomski rad. Zagreb. Sveučilište Juraja Dobrile u Puli, Fakultet ekonomije i turizma „Dr. Mijo Mirković“.

internetski izvori:

- [1] Dostupno na: <http://webmineral.com/chem/Chem-Li.shtml#.Y016qHZBzIX> (pristupljeno 17. listopada 2022.)
- [2] Dostupno na: [https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Geology/Book%3A_Fundamentals_of_Geology_\(Schulte\)/02%3A_Rock_Forming_Minerals/2.08%3A_Abundance_of_Elements_in_Earth's_Crust](https://geo.libretexts.org/Bookshelves/Geology/Book%3A_Fundamentals_of_Geology_(Schulte)/02%3A_Rock_Forming_Minerals/2.08%3A_Abundance_of_Elements_in_Earth's_Crust) (pristupljeno 28. rujna 2022.)
- [3] Dostupno na: <https://www.samcotech.com/what-is-lithium-extraction-and-how-does-it-work/> (pristupljeno 1. lipnja 2022.)
- [4] Dostupno na: https://seekingalpha.com/article/4205681-look-lithium-clay-projects?gclid=Cj0KCQjw48OaBhDWARIsAMd966ANjUbIRXTZEvmg_MDAUSAOWffzDk4FAe6r63AwNodKY8ZO8yMF94kaAoXmEALw_wcB&internal_promotion=true&utm_campaign=16160107180&utm_medium=cpc&utm_source=google&utm_term=139302112925%5Edsa-1485125208378%5E%5E620068635556%5E%5E%5Eg (pristupljeno 18. listopada 2022.)
- [5] Dostupno na: <https://www.cadenceminerals.com/wp-content/uploads/2020/06/Bacanora-FS-Technical-Report-25-01-2018.pdf> (pristupljeno 10. studenog 2022.)
- [6] Dostupno na: https://www.ioneer.com/wp-content/uploads/2022/07/300420-dfs-executive-summary-metric_final.pdf (pristupljeno 10. studenog 2022.)
- [7] Dostupno na: <https://cypressdevelopmentcorp.com/site/assets/files/3934/2020-05-19-clayton-pre-feasibility.pdf> (pristupljeno 10. studenog 2022.)
- [8] Dostupno na: https://www.lithiumamericas.com/_resources/pdf/investors/technical-reports/thacker-pass/Technical-Report-Thacker-Pass.pdf (pristupljeno 10. studenog 2022.)
- [9] Dostupno na: <https://americanlithiumcorp.com/tlc-lithium-project/> (pristupljeno 10. studenog 2022.)

- [10] Dostupno na: <https://silvervalleymetals.com/projects/mexican-project/> (pristupljeno 10. studenog 2022.)
- [11] Dostupno na: <https://www.juniorminingnetwork.com/junior-miner-news/press-releases/1928-tsx-venture/li/98999-american-lithium-completes-merger-with-plateau.html> (pristupljeno 10. studenog 2022.)
- [12] Dostupno na: <https://minedocs.com/21/San-Jose-PFS-08222019.pdf> (pristupljeno 10. studenog 2022.)
- [13] Dostupno na: <http://webmineral.com/chem/Chem-Co.shtml#.Y2vKrXbMLIU> (pristupljeno 11. studenog 2022.)
- [14] Dostupno na: <https://www.webelements.com/cobalt/> (pristupljeno 11. studenog 2022.)
- [15] Dostupno na: <https://www.chemicool.com/elements/cobalt.html> (pristupljeno 9. studenog 2022.)
- [16] Dostupno na: <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/types-of-deposits/> (pristupljeno 11. studenog 2022.)
- [17] Dostupno na: <https://www.cobaltinstitute.org/about-cobalt/cobalt-life-cycle/> (pristupljeno 11. studenog 2022.)
- [18] Dostupno na: <https://www.cobaltinstitute.org/essential-cobalt-2/powering-the-green-economy/batteries-electric-vehicles/> (pristupljeno 11. studenog 2022.)
- [19] Dostupno na: <http://webmineral.com/chem/Chem-Ni.shtml#.Y3SxRXbMLIU> (pristupljeno 14. studenog 2022.)
- [20] Dostupno na: <https://www.chemicool.com/elements/nickel.html> (pristupljeno 14. studenog 2022.)
- [21] Dostupno na: <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/> (pristupljeno 14. studenog 2022.)
- [22] Dostupno na: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/nickel-statistics-and-information> (pristupljeno 15. studenog 2022.)
- [23] Dostupno na: <https://nickelinstitute.org/en/about-nickel-and-its-applications/nickel-in-batteries/> (pristupljeno 15. studenog 2022.)

- [24] Dostupno na: <https://www.manganesenergycorp.com/manganese-a-substitute-for-lithium-ion-batteries/> (pristupljeno 15. studenog 2022.)
- [25] Dostupno na: <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2022/03/08/2399455/0/en/Increasing-Lithium-Ion-Battery-Demand-Manganese-Industry-Expert-Report.html> (pristupljeno 15. studenog 2022.)
- [26] Dostupno na: <https://www.umicore.com/en/about/our-metals/manganese/> (pristupljeno 15. studenog 2022.)
- [27] Dostupno na: <https://www.anl.gov/article/researchers-eye-manganese-as-key-to-safer-cheaper-lithiumion-batteries> (pristupljeno 15. studenog 2022.)
- [28] Dostupno na: <https://www.chemistryworld.com/news/manganese-makeover-for-lithium-ion-batteries/3008886.article> (pristupljeno 15. studenog 2022.)
- [29] Dostupno na: <https://rs.boell.org/en/2022/01/18/rio-tinto-controversy-nutshell> (pristupljeno 18. studenog 2022.)
- [30] Dostupno na: https://ec.europa.eu/reform-support/what-we-do/green-transition_hr (pristupljeno 5. siječnja 2022.)
- [31] Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/nickel-chemical-element> (pristupljeno 7. studenog 2022.)
- [32] Dostupno na: <https://www.mindat.org/min-1407.html> (pristupljeno 11. studenog 2022.)
- [33] Dostupno na: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/wolfsberg-lithium-project/w.mining-technology.com/projects/wolfsberg-lithium-project/> (pristupljeno 4. studenog 2022.)
- [34] Dostupno na: <https://www.britannica.com/science/manganese> (pristupljeno 19. studenog 2022.)
- [35] Dostupno na: <https://steps-centre.org/pathways-methods-vignettes/methods-vignettes-sociotechnical-imaginaries/> (pristupljeno 28. studenog 2022.)
- [36] Dostupno na: <https://www.storaenso.com/en/products/lignin/lignode> (pristupljeno 6. prosinca 2022.)

- [37] Dostupno na: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (pristupljeno 25. siječnja 2023.)
- [38] Dostupno na: <https://www.lenntech.com/periodic/elements/li.htm> (pristupljeno 25. siječnja 2023.)
- [39] Dostupno na: <https://lionchemist.com/product/lithium-carbonate-for-sale/> (pristupljeno 26. siječnja 2023.)
- [40] Dostupno na: <https://www.mindat.org/min-11119.html> (pristupljeno 26. siječnja 2023.)
- [41] Dostupno na: <https://www.mindat.org/min-11136.html> (pristupljeno 26. siječnja 2023.)
- [42] Dostupno na: <https://www.mindat.org/min-3441.html> (pristupljeno 27. siječnja 2023.)
- [43] Dostupno na: <https://www.mindat.org/min-2519.html> (pristupljeno 27. siječnja 2023.)
- [44] Dostupno na: <https://www.mindat.org/min-3318.html> (pristupljeno 27. siječnja 2023.)
- [45] Dostupno na: <https://www.mindat.org/min-1832.html> (pristupljeno 27. siječnja 2023.)
- [46] Dostupno na: <https://www.mindat.org/min-3406.html> (pristupljeno 27. siječnja 2023.)
- [47] Dostupno na: <https://davidmaisel.com/press/wired-uk/> (pristupljeno 27. siječnja 2023.)
- [48] Dostupno na: <https://www.reuters.com/markets/deals/bolivia-still-evaluating-six-firms-lithium-mining-partnerships-2022-06-07/> (pristupljeno 27. siječnja 2023.)
- [49] Dostupno na: <https://www.nacional.hr/tisuce-u-prosvjedima-rio-tinto-se-cini-kao-ideal-an-akter-koruptivnog-okruzenja-kakvo-nudi-srbija/#> (pristupljeno 29. siječnja 2023.)
- [50] Dostupno na: <https://www.aljazeera.com/gallery/2022/11/4/dr-congos-faltering-fight-against-illegal-cobalt-mines> (pristupljeno 29. siječnja 2023.)