

Mogućnosti recikliranja i oporabe bakra iz otpadnih električnih vodiča

Mujkić, Ida

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:378442>

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

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

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ida Mujkić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Dr. sc. Irena Žmak, izv. prof.

Student:

Ida Mujkić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem svojoj mentorici dr.sc. Ireni Žmak na ukazanom povjerenju, uloženom vremenu i trudu, te pomoći u svakom trenutku izrade mog diplomskog rada.

Također zahvaljujem djelatnicima tvrtke Spectra media d.o.o. što su mi omogućili pristup potrebnim podacima i pruženoj pomoći u razumijevanju proizvodnih procesa i analizi dobivenih rezultata.

I na kraju veliko hvala mojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili oslonac i podrška tijekom cijelog studija.

Ida Mujkić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IDA MUJKIĆ** Mat. br.: 0035197682

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mogućnosti recikliranja i uporabe bakra iz otpadnih električnih vodiča**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Recycling and recovery options of copper from electrical cable waste**

Opis zadatka:

S porastom potrošnje električne i elektroničke opreme raste i količina proizvedenog električnog i elektroničkog otpada (EE-otpada), kako u svijetu, tako i u Hrvatskoj.

EE-otpad smatra se opasnim otpadom jer može sadržavati elemente kao su olovo, kadmij, krom, živa, bromirani usporivači gorenja ili poliklorirani bifenili (PCB). Stoga je EE-otpad zabranjeno odlagati u miješani komunalni otpad i potrebno ga je zbrinuti kod ovlaštenih koncesionara. Ovaj postupak je za posjednike otpada besplatan, dok država kroz Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost financijski potpomaže i potiče sakupljače i obrađivače EE-otpada.

Recikliranje vrijednih metala sadržanih u EE-otpadu, kao što je bakar, vrijedan je izvor prihoda. Bakar je jedan od metala kojeg ima u većoj količini u brojnim električnim proizvodima. S obzirom na to da je proizvodnja bakra iz primarnih izvora, tj. iz rude ekonomski i ekološki vrlo zahtjevan proces, u današnje vrijeme se nastoji bakar recuperirati iz sekundarnih izvora, npr. recikliranjem EE-otpada. U okviru ovog diplomskog rada potrebno je:

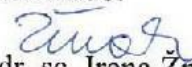
1. dati pregled najčešće korištenih vrsta električnih vodiča (kablova) i navesti od kojih su materijala sastavljeni
2. dati pregled mogućih postupaka materijalnog recikliranja i energetske uporabe električnih vodiča
3. za odabrane postupke recikliranja i uporabe opisati tehnološki postupak i primjenjivu opremu
4. usporediti odabrane postupke recikliranja i uporabe.

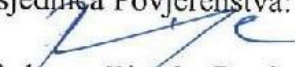
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:
28. studenog 2019.

Predvideni datum obranc:
04. prosinca 2019.
05. prosinca 2019.
06. prosinca 2019.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Irena Zmak

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO	3
2.1. Općenito o EE otpadu	4
2.1.1. Stanje EE otpada u svijetu	7
2.1.2. Stanje EE otpada u Europi	8
2.1.3. EE otpad u Hrvatskoj	9
2.2. Otpadni kablovi.....	12
2.2.1. Građa električnih kablova	13
2.2.2. Vrste električnih kablova	14
3. POSTUPCI OBRADE EE OTPADA.....	17
3.1. Fizičke metode razdvajanja.....	17
3.1.1. Rastavljanje EE otpada	19
3.1.1.1. Ručno rastavljanje.....	19
3.1.1.2. Mehaničko rastavljanje	19
3.1.2. Razdvajanje otpadnog materijala pomoću magneta.....	21
3.1.3. Razdvajanje otpadnog materijala vrtložnim strujama.....	22
3.1.4. Elektrostatičko razdvajanje otpadnog materijala	23
3.1.5. Razdvajanje na temelju gustoće i težine	24
3.2. Pirometalurški postupci izdvajanja metala iz EE otpada	25
3.2.1. Pirolitički postupak obrade EE otpada.....	27
3.2.1.1. Vakuumska piroliza	29

4. POSTUPCI I OPREMA ZA OBRADU OTPADNIH KABLOVA	30
4.1. Mehanički postupak obrade otpadnih kablova.....	32
4.1.1. Primarno usitnjavanje	32
4.1.1.1. Izračun troškova.....	34
4.1.2. Usitnjavanje	36
4.1.2.1. Postupak rada linije za usitnjavanje.....	37
4.1.2.2. Izračun troškova linije za usitnjavanje.....	44
4.1.3. Separacija.....	48
4.1.3.1. Postupak rada linije za separaciju	50
4.1.3.2. Izračun troškova linije za separaciju.....	57
4.1.4. Ukupni troškovi obrade otpadnih kablova mehaničkim putem	61
4.1.5. Analiza dobivenog bakra	62
4.2. Postupak obrade otpadnih kablova pirolizom.....	63
4.2.1. Postupak rada pirolize.....	64
4.2.1.1. Taljenje	68
4.2.2. Analiza sastava bakra dobivenog pirolizom	69
4.2.3. Izračun troškova pirolize.....	70
4.2.4. Ukupni troškovi obrade otpadnih kablova pirolizom	71
5. USPOREDBA I ANALIZA OBRADE OTPADNIH KABLOVA.....	72
5.1. Usporedba troškova nakon primarnog usitnjavanja otpadnih kablova mehaničkom i pirolitičkom metodom.....	72
5.2. Dijagram prihoda i rashoda u uporabi otpadnih kablova.....	73
6. ZAKLJUČAK.....	75
LITERATURA.....	76
PRILOZI.....	78

POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz šest kategorija električne i elektroničke opreme [8]	6
Slika 2.	Stope rasta EE otpada po kategorijama u svijetu [8].....	7
Slika 3.	Procjene ukupnih količina EE otpada po kategorijama.....	8
Slika 4.	Količina sakupljenog EE otpada po stanovniku u Europi u 2016. godini [8]	9
Slika 5.	Prikaz EE opreme stavljene na tržište, sakupljene i oporabljene količine EE otpada [11].....	11
Slika 6.	Stopa sakupljanja EE otpada iz kućanstava i registriranih poslovnih subjekata [11]	11
Slika 7.	Otpadni električni kablovi	13
Slika 8.	Građa električnog kabela.....	14
Slika 9.	Vrste električnih kablova: 1-energetski, 2-telekomunikacijski,.....	16
Slika 10.	Dijagram toka ručnog i mehaničkog sortiranja [4]	18
Slika 11.	Usitnjivač [14].....	20
Slika 12.	Razbijač [15]	20
Slika 13.	Razdvajanje pomoću magneta [17]	21
Slika 14.	„Eddy current“ razdvajanje otpadnog materijala [4].....	22
Slika 15.	Princip elektrostatičkog razdvajanja [4].....	23
Slika 16.	Plivajuće-tonući postupak razdvajanja [4]	24
Slika 17.	Tehnika gravitacijskog odvajanja [4]	25
Slika 18.	Prvi korak usitnjavanja otpadnih kablova	33
Slika 19.	Procesna linija za usitnjavanje	36
Slika 20.	Usipni koš i uzlazna pokretna traka	37
Slika 21.	Usitnjivač proizvođača MeWa tip UG 1000	38
Slika 22.	Unutrašnjost usitnjivača, noževi.....	38
Slika 23.	Varijabilna sita od 10 mm i 30 mm.....	39
Slika 24.	Magnetni valjak na kraju pokretne trake i usisna cijev za prašinu.....	39
Slika 25.	Kosa transportna traka, zračni separator i ciklon	40
Slika 26.	Unutrašnjost zračnog separatora tipa „cik-cak“	41
Slika 27.	Princip rada ciklona [30]	41
Slika 28.	Izlazni materijal iz ciklona i izlazni materijal iz zračnog separatora	42
Slika 29.	Ventilator i filtri.....	43

Slika 30.	Dijagram toka materijala na liniji za usitnjavanje.....	43
Slika 31.	Dijagram toka materijala na liniji za separaciju.....	49
Slika 32.	Ulaz materijala na liniji za separaciju	50
Slika 33.	Unutrašnjost granulatora	51
Slika 34.	Tehničke karakteristike granulatora	51
Slika 35.	Granulator i elektromotor.....	52
Slika 36.	Presjek vibracijskog sita [29]	53
Slika 37.	Vibracijsko sito.....	53
Slika 38.	Gornja krupna mreža sita (> 3 mm) i krupna izlazna frakcija.....	54
Slika 39.	Vibracijski dozator i zračni vibroseparator	54
Slika 40.	Zračni vibracijski separator	55
Slika 41.	Pužni transporter za polimerni materijal	56
Slika 42.	Pokretna traka, magnet i izlazne frakcije	56
Slika 43.	Izlazna frakcija bakra i izlazna frakcija čelika	57
Slika 44.	Granule bakra dobivene na liniji za separaciju	62
Slika 45.	Procesna linija pirolize	63
Slika 46.	Reaktor pirolitičke peći	64
Slika 47.	Gorionik.....	64
Slika 48.	Ubacivanje materijala u reaktor	65
Slika 49.	Separatori i cijev za hlađenje.....	65
Slika 50.	Uređaj za kondenzaciju	66
Slika 51.	Spremnici i uređaj za hlađenje vode.....	66
Slika 52.	Frakcija anorganskog otpada i pirolitičko ulje	67
Slika 53.	Shematski prikaz pirolize otpadnih kablova	67
Slika 54.	Indukcijska peć.....	68
Slika 55.	Odljevnik pirolitičkog bakra.....	69
Slika 56.	Ručni XRF spektrometar i dobivena analiza.....	69
Slika 57.	Kretanje cijene bakra na burzi Kitco Metals [31]	73
Slika 58.	Grafički prikaz usporedbe prihoda i rashoda mehaničke i pirolitičke metode obrade otpadnih kablova	74

POPIS TABLICA

Tablica 1. Koncentracija glavnih elemenata oporabljenih pirometalurškim putem.....	26
Tablica 2. Fizikalna svojstva materijala važna za recikliranje kablova [27, 28].....	31
Tablica 3. Ukupni troškovi usitnjivača	35
Tablica 4. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 28. 8. 2019.	44
Tablica 5. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 25. 9. 2019.	44
Tablica 6. Radne snage dijelova linije za usitnjavanje.....	45
Tablica 7. Ukupni troškovi linije za usitnjavanje.....	47
Tablica 8. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 5. 9. 2019.	57
Tablica 9. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 27. 9. 2019.	58
Tablica 10. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 16. 10. 2019.	58
Tablica 11. Radne snage dijelova linije za separaciju.....	59
Tablica 12. Ukupni troškovi linije za separaciju.....	61
Tablica 13. Ukupni troškovi obrade otpadnih kablova mehaničkim putem.....	61
Tablica 14. Ukupni troškovi pirolize.....	71
Tablica 15. Usporedba troškova postupaka obrade	72

POPIS KRATICA

C&DW	<i>Construction and Demolition Waste</i>	otpad od gradnje i rušenja
CRT	<i>Cathode Ray Tube</i>	katodna cijev
EE otpad	električni i elektronički otpad	
ELV	<i>End of Life Vehicles</i>	vozila na kraju života
IT	<i>Information Technology</i>	informacijska tehnologija
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>	ekran temeljen na tehnologiji tekućih kristala
NN	Narodne novine	
PBB	polibromirani bifenil	
PBDE	polibromirani difenil eter	
PE	polietilen	
PKO	posebne kategorije otpada	
PVC	polivinil klorid	
RoHS	<i>The Restriction of Hazardous Substances</i>	ograničenje upotrebe opasnih tvari
SDGs	<i>Sustainable Development Goals</i>	ciljevi održivog razvoja
UN	Ujedinjeni narodi	
WEEE	<i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i>	otpadna električna i elektronička oprema

SAŽETAK

Električni i elektronički otpad je najbrže rastuća kategorija otpada uz komunalni otpad, te stoga postoji potreba za njegovim učinkovitim zbrinjavanjem. Kabeli i žice su neophodni dijelovi elektroničke opreme. Recikliranje otpadnih električnih kablova usredotočuje se na ponovno dobivanje vrijednih metala – bakra, s obzirom da je prosječni minimalni sadržaj bakra u rudi 0,5 % dok je prosječni sadržaj bakra u otpadnim kablovima 30 %. Prikazanim i opisanim metodama obrade otpadnih kablova, mehaničkom i pirolitičkom obradom, dobivene su frakcije bakra iste kvalitete i čistoće (99,0 %).

U procesu mehaničke obrade nastaju otpadni polimeri (oko 60 %) čije zbrinjavanje predstavlja problem za okoliš i veliki trošak u procesu uporabe. Pirolitički proces (vakuumska piroliza) ne stvara novonastali otpad već se dobiva pirolitičko ulje (oko 33 %) koje ima primjenu kao energent i predstavlja mogući prihod.

Ključne riječi: električni i elektronički otpad, EE otpad, uporaba otpadnih električnih kablova, bakar, mehaničko recikliranje, vakuumska piroliza, otpadni polimeri, pirolitičko ulje

SUMMARY

Electric and electronic waste is the fastest growing category of waste, along municipal waste, hence there is a need for its efficient disposal. Cables and wires are essential parts of electronic equipment. The main focus of recycling waste electrical cable is on renewing valuable metals - copper, considering that the average minimum share of copper in ore is 0.5 %, while the average share of copper in waste cables is 30 %. By implementing the described and discussed methods of processing waste cable, both mechanical and pyrolytic processing, have resulted in copper fractions of the same quality and purity (99.0 %).

In the process of mechanical treatment, waste polymers are formed (approx. 60 %) whose disposal represents a problem for the environment and a major expense in the recovery process. The pyrolytic process (vacuum pyrolysis) does not generate new waste, but instead generates pyrolytic oil (approx. 33 %) which is used as an energy source and represents a potential revenue.

Key words: waste electrical and electronic equipment, WEEE, recovery of waste electrical cables, copper, mechanical recycling, vacuum pyrolysis, waste polymers, pyrolytic oil

1. UVOD

Danas vlada sve veća zabrinutost u razvijenom svijetu zbog brzog rasta stanovništva i općenito poboljšanja životnog standarda koji doprinose povećanoj potrošnji energije, materijala i resursa. Koncept održivog korištenja resursa postao je prioritetna tema na globalnoj razini. Potražnja energije u ljudskom društvu se povećava, a istodobno se smanjuju energetske i prirodni resursi. Stoga se znanstvena zajednica fokusira na traženje novih održivih rješenja za proizvodnju energije kako bi se povećao ukupni energetske kapacitet uz minimiziranje utjecaja na okoliš. Proizvodnja energije iz alternativnih izvora kao što je otpad postala je mogućnost, a i briga za održivu budućnost [1].

Ciljevi održivog razvoja (eng. *Sustainable Development Goals - SDGs*) doneseni na Općoj skupštini Ujedinjenih naroda (UN) je skup od 17 globalnih ciljeva i 169 pridruženih podciljeva koji se odnose na razdoblje od 2015. do 2030. Ciljevi su:

1. prestanak siromaštva
2. prestanak gladi
3. dobro zdravlje i blagostanje
4. kvalitetno obrazovanje
5. jednakost spolova
6. čista voda i kanalizacija
7. pristupačna i nezagadujuća energija
8. dostojanstvena radna mjesta i gospodarski rast
9. industrija, inovacije i infrastruktura
10. smanjenje nejednakosti
11. održivi gradovi
12. odgovorna potrošnja i proizvodnja
13. klima
14. održivi život u vodama
15. održivi život na kopnu
16. mir, pravda i jake institucije („rade svoj posao”)
17. partnerstvo u održivom razvoju.

Iz gore navedenih ciljeva UN-a proizlazi da čovječanstvo treba do 2030. godine znatno smanjiti nastajanje otpada prevencijom, smanjenjem, recikliranjem i ponovnom uporabom otpada [2].

Trenutno se globalni sustav gospodarenja otpadom temelji na principima odlaganja na odlagalištima, spaljivanja i recikliranja. Međutim, potrebna su održivija rješenja kako bi se smanjili utjecaji otpada i pretvorili otpad u vrijedne resurse, s obzirom da je Europska komisija već odredila propise i izvedenice u svezi s gospodarenjem otpadom u cijeloj Europi, što trebaju slijediti europske države članice [1].

Električni i elektronički otpad (EE otpad) je nova i brzo rastuća vrsta otpada naročito zastupljena u razvijenim zemljama, budući da većina građana koristi elektroničke i električne uređaje. Trenutna rješenja za gospodarenje EE otpadom u Europi su:

- a) odlaganje i spaljivanje, što je najjednostavniji oblik zbrinjavanja otpada
- b) izvoz u regije kao što su Afrika i Azija
- c) regionalno recikliranje materijala
- d) izravna ponovna uporaba [1].

2. TEORIJSKI DIO

Električni i elektronički otpad je najbrže rastuća kategorija otpada u usporedbi s drugim vrstama otpada i stoga postoji povećana potreba za njegovim učinkovitim zbrinjavanjem [3].

Zbrinjavanje EE otpada mora se sustavno rješavati na zakonom propisani način. Zbog različitih vrsta vrijednih tvari smatra se vrijednim izvorom sekundarnih sirovina, no prisutnost opasnih tvari svrstava ovaj otpad u opasan otpad te se on istovremeno smatra i potencijalnim zagađivačem okoliša.

Odvojeno sakupljanje otpada i recikliranje temelji su modernog upravljanja otpadom. Pravilnim odvajanjem i razvrstavanjem otpada, kojeg svakodnevno proizvodimo, omogućujemo ponovnu upotrebu ovih materijala za proizvodnju novih proizvoda iste ili slične namjene [4].

Sustavi gospodarenja otpadom obuhvaćaju sve radnje koje nastoje povratiti i reciklirati materijale, gledajući na otpad kao resurs, kako bi se spriječili zdravstveni i ekološki problemi te očuvala prirodna bogatstva, smanjili troškovi proizvodnje mnogih proizvoda, kao što su metali, polimeri, staklo i papir. Nije teško reciklirati čisti i homogeni otpad, ali problemi nastaju kada se otpad sastoji od različitih materijala [5].

Značaj električnog i elektroničkog otpada proizlazi iz činjenice da se sastoji od različitih materijala i komponenti od kojih neke mogu biti opasne (azbest, teški metali, halogeni spojevi itd.). S druge strane, EE otpad sadrži mnogo korisnih materijala, uglavnom metala (čelik, bakar, aluminij itd.) iz kojih se dobivaju reciklirane sekundarne sirovine. Iako maseni sadržaj materijala ovisi o vrsti električnog i elektroničkog proizvoda, prevladavaju metali i polimeri, gdje je sadržaj metala općenito viši nego u primarnim sirovinama [3].

Po kategorijama, veliki kućanski aparati su najzastupljeniji u svim zemljama Europske unije (EU) (od 35 % u Belgiji do 70 % u Bugarskoj), dok je IT i telekomunikacijska oprema (kategorija 3) druga najveća kategorija proizvoda u većini zemalja (22 od 28 zemalja), u rasponu od 5 % na Malti do 24 % u Češkoj, prema podacima Eurostata iz 2016. [3].

Kabli i žice su neophodni dijelovi elektroničke opreme. Većina otpadnih kablova i žica predstavljaju problem kod ponovne upotrebe i recikliranja zbog različitih veličina i heterogenog sastava. Električni kabli sastoje se od provodljivih metala za prijenos informacija i električne energije, kao što su bakar i aluminij, te različitih vrsta polimera kao izolacijski i pokrovni materijal. Recikliranje kabela i žica uglavnom se usredotočuje na ponovno dobivanje vrijednih metala, bakra i aluminija [6].

2.1. Općenito o EE otpadu

Električni i elektronički otpad (EE otpad) spada u posebne kategorije otpada (PKO). On sadrži vrijedne metalne i nemetalne sirovine koje se dobivaju materijalnom oporabom (recikliranjem), a mogu se koristiti i u energetske svrhe. Izdvajaju se i dijelovi koji se koriste za ponovnu uporabu.

Električni i elektronički uređaji i oprema, prema WEEE Direktivi 2012/19/EZ Europske unije, predstavljaju sve proizvode koji su za svoje pravilno djelovanje ovisni o električnoj energiji ili elektromagnetskim poljima, kao i oprema za proizvodnju, prijenos i mjerenje struje, te je namijenjena korištenju pri naponu koji ne prelazi 1 000 V za izmjeničnu i 1 500 V za istosmjernu struju [7].

EE otpad se prema nastanku dijeli u dvije grupe:

- EE otpad iz kućanstva
- EE otpad koji nastaje u gospodarstvu.

Postoji deset kategorija EE uređaja i opreme, a prema tome se i klasificira EE otpad:

1. veliki kućanski uređaji: električni štednjaci, strojevi za pranje rublja, hladnjaci, kuhinjske peći, sušilice rublja, hladnjaci, klima uređaji
2. mali kućanski uređaji: usisivači, glačala, tosteri, uređaji za sušenje kose, pržilice, vage
3. oprema informatičke tehnike (IT) i oprema za telekomunikacije: računala, pisari, kopirna oprema, kalkulatori, telefoni, mobiteli
4. oprema široke potrošnje i fotonaponske ploče: radioaparati, televizijski aparati, hi-fi uređaji, audio pojačala, glazbeni instrumenti

5. rasvjetna oprema
6. električni i elektronički alati (osim velikih nepokretnih industrijskih alata): bušilice, pile, šivaći strojevi
7. igračke, oprema za razonodu i sportska oprema
8. medicinski proizvodi (osim svih implantiranih i inficiranih proizvoda)
9. instrumenti za praćenje i kontrolu: detektori dima, termostati, regulatori grijanja
10. automatski samoposlužni uređaji: automatski uređaji za izdavanje toplih napitaka, za izdavanje novca i sl. [7].

Gore navedenih deset kategorija se od 2019. godine prema Izmjenama i dopunama Pravilnika o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom regrupiraju u sljedećih šest kategorija:

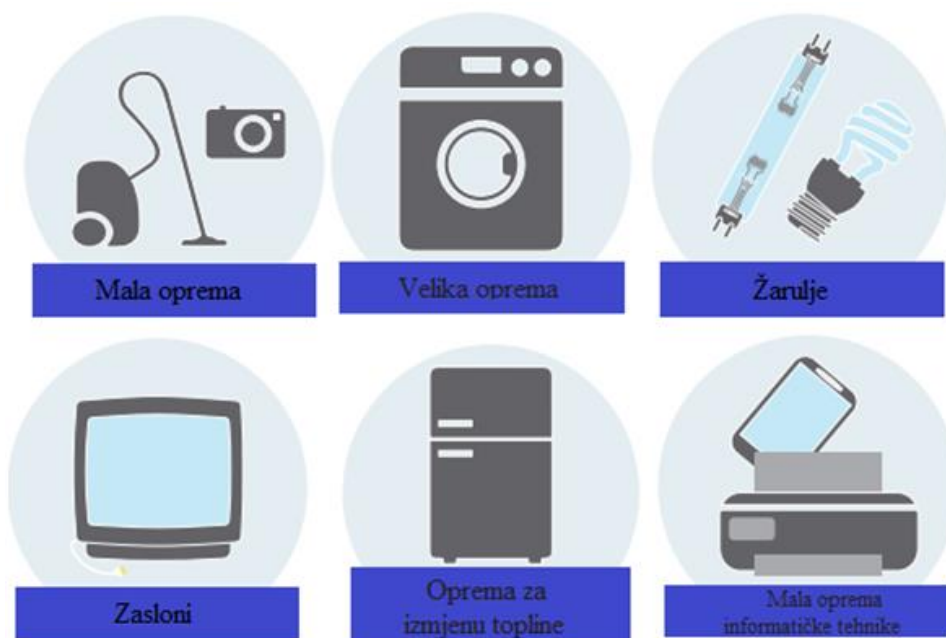
1. oprema za izmjenu topline (hladnjaci, ledenice, klima uređaji i ostali uređaji za ventilaciju, odzračivanje i kondicioniranje zraka, toplinske pumpe, uljni radijatori i dr.)
2. zasloni, monitori i oprema koja sadrži zaslone površine veće od 100 cm² (zasloni, televizori, LCD fotookviri, monitori, računala „laptop“ i „notebook“)
3. žarulje (fluorescentne žarulje, žarulje s izbijanjem, LED, ostale žarulje)
4. velika oprema (bilo koja vanjska dimenzija veća od 50 cm) koja uključuje, ali se ne ograničava na:

kućanske uređaje; opremu informatičke tehnike (IT) i opremu za telekomunikacije; potrošačku opremu; rasvjetna tijela; opremu za reprodukciju zvuka ili slike, glazbenu opremu; električne i elektroničke alate; igračke, opremu za razonodu i sportove; medicinske proizvode; instrumente za praćenje i kontrolu; automatske samoposlužne uređaje; opremu za proizvodnju električne struje. Ova kategorija ne obuhvaća opremu iz kategorija 1., 2. i 3.

5. mala oprema (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm) koja uključuje, ali se ne ograničava na:

kućanske uređaje; potrošačku opremu; rasvjetna tijela; opremu za reprodukciju zvuka ili slike, glazbenu opremu; električne i elektroničke alate; igračke, opremu za razonodu i sportove; medicinske proizvode; instrumente za praćenje i kontrolu; automatske samoposlužne uređaje; opremu za proizvodnju električne struje. Ova kategorija ne obuhvaća opremu iz kategorija 1. do 3. i 6.

6. mala oprema informatičke tehnike (IT) i oprema za telekomunikacije (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm) [7].



Slika 1. Prikaz šest kategorija električne i elektroničke opreme [8]

Prema svojstvima otpad se može podijeliti na:

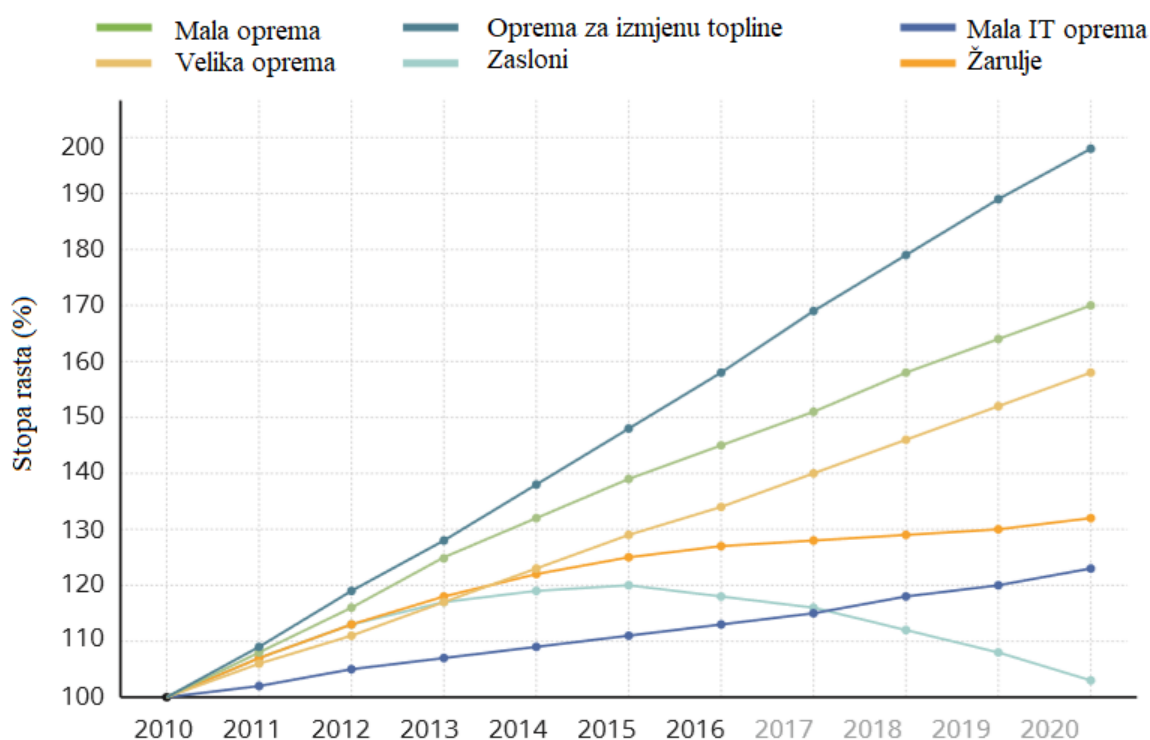
- opasni
- neopasni
- inertni [7].

Cjelokupni EE otpad svrstava se u red opasnog otpada zbog opasnih komponenti kao što su toksični metali: živa, kadmij, krom(IV), bromirani usporivači gorenja: polibromirani bifenili (PBB), polibromirani difenil eteri (PBDE) te ostale opasne supstance: brom, azbest, arsen, fosfor, spojevi silicija i drugi.

Zbog opasnih komponenti koje EE otpad sadrži, ovaj otpad ne smije nikako završiti niti u glomaznom, niti u komunalnom otpadu, te se mora sakupljati odvojeno od ostalih vrsta otpada, kako bi se opasni dijelovi izdvojili i zbrinuli na odgovarajući način, a neopasni dijelovi (metal, polimeri, drvo i sl.) ponovno upotrijebili [9].

2.1.1. Stanje EE otpada u svijetu

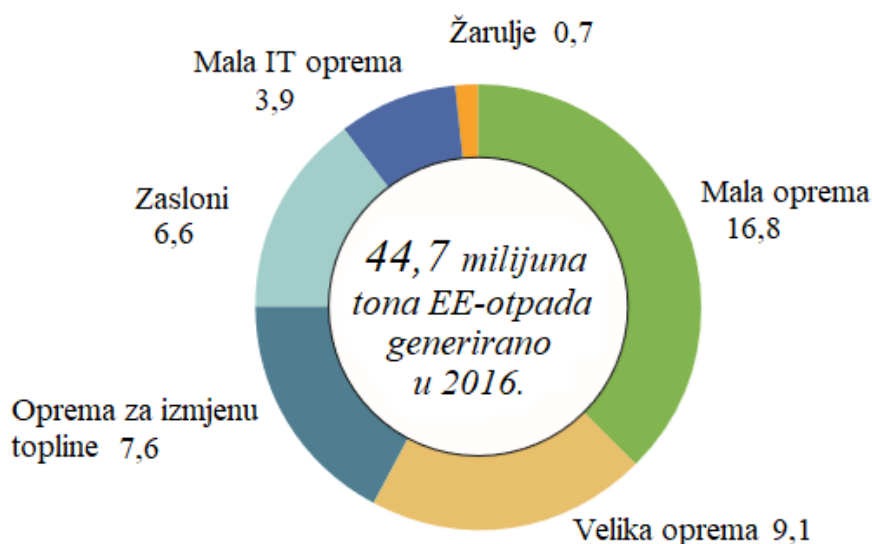
Ukupna količina generiranog EE otpada u svijetu u 2016. godini iznosila je oko 44,7 milijuna tona ili 6,1 kg po stanovniku. Procjenjuje se da je u 2017. godini svjetska proizvodnja EE otpada premašila 46 milijuna tona. Očekuje se da će količina EE otpada rasti s godišnjom stopom od 3 % do 4 %. Međutim, godišnja stopa rasta razlikuje se po kategorijama otpada, što se može vidjeti na Slici 2 [8].



Slika 2. Stope rasta EE otpada po kategorijama u svijetu [8]

Pretpostavlja se da će najveće stope rasta imati otpad iz opreme za izmjenu topline i male i velike opreme, dok će se otpadni ekrani smanjivati u nadolazećim godinama, zbog zamjene teških CRT zaslona s ravnim ekranima. IT otpad će usporeno rasti zbog učinka minijaturizacije [8].

Globalna količina EE otpada u 2016. godini uglavnom se sastoji od male opreme (16,8 mil. t), velike opreme (9,1 mil. t), opreme za izmjenu topline (7,6 mil. t) i zaslona (6,6 mil. t). Žarulje i mala IT oprema predstavljaju manji udio u ukupnoj količini proizvedenog EE otpada u 2016. godini, 0,7 mil. t odnosno 3,9 mil. t prikazano na Slici 3 [8].

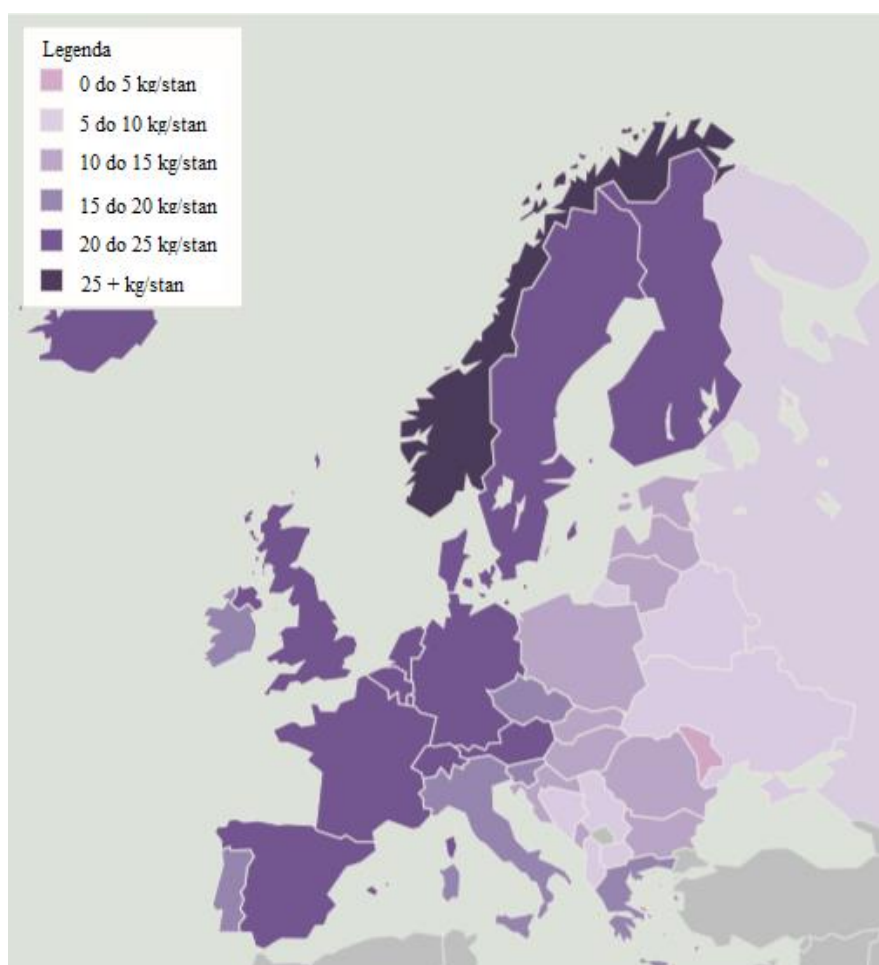


Slika 3. Procjene ukupnih količina EE otpada po kategorijama (milijuni tona) u 2016. godini u svijetu [8]

2.1.2. Stanje EE otpada u Europi

Stanovništvo Europe generiralo je 12,3 milijuna tona EE otpada u 2016. godini, što je prosječno 16,6 kg po stanovniku. U Njemačkoj je u 2016. generirano 1,9 milijuna tona, što je najveća količina u Europi, a slijede Velika Britanija s 1,6 i Rusija s 1,4 milijuna tona. Norveška proizvodi najveću količinu EE otpada po stanovniku u Europi (28,5 kg / stanovniku), Velika Britanija i Danska svaka 24,9 kg po stanovniku [8].

U Europi, Švicarska, Norveška i Švedska pokazuju najnaprednije modele upravljanja EE otpadom. Njihova stopa naknade iznosi 49 %, što predstavlja najveći postotak u svijetu. Međutim, druge zemlje još uvijek sustižu zemlje sjeverne Europe [8].



Slika 4. Količina sakupljenog EE otpada po stanovniku u Europi u 2016. godini [8]

2.1.3. EE otpad u Hrvatskoj

Ulaskom Hrvatske u Europsku uniju prihvaćeni su i europski standardi očuvanja okoliša, među kojima je i zakonska odgovornost posjednika otpada da vodi brigu o njegovom ekološkom zbrinjavanju. Hrvatska je kao i sve države EU prenijela Direktive o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi (eng. *WEEE Directive 2012/19/EU*) i Direktive za ograničenje opasnih tvari (eng. *RoHS Directive 2002/95/EC*) u nacionalno zakonodavstvo [10].

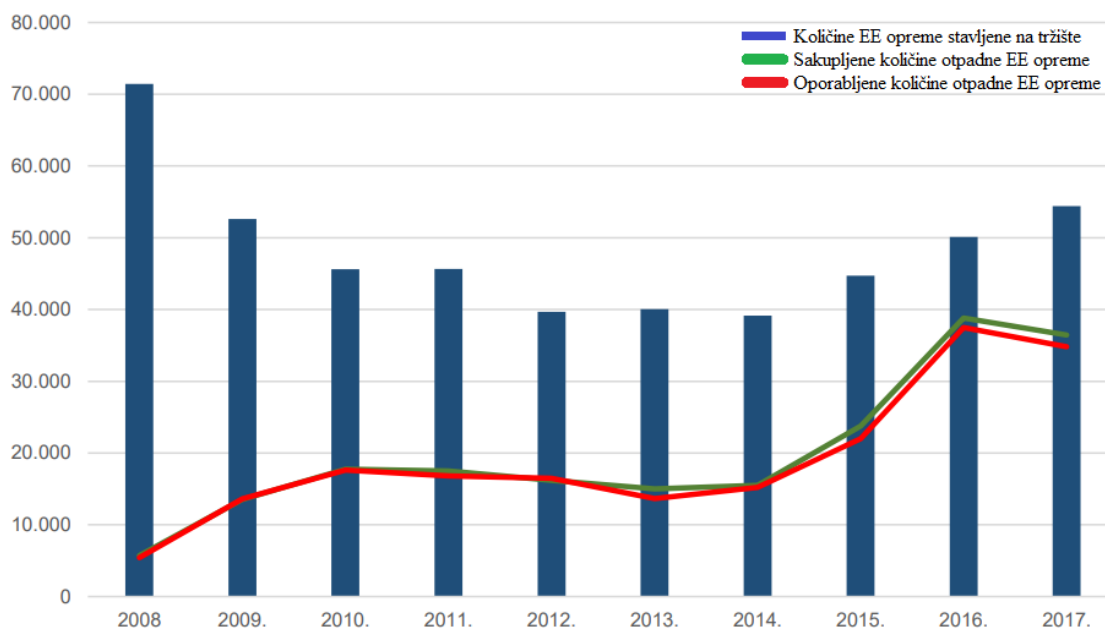
U Republici Hrvatskoj gospodarenje EE otpadom regulira *Ministarstvo zaštite okoliša i energetike* kao krovna državna institucija koja donosi zakone i pravilnike i *Fond za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost* koji regulira sva plaćanja vezana za naknade u gospodarenju otpadom te vodi očevidnike obveznika plaćanja [10].

Gospodarenje EE otpadom organizirano je kroz dva sustava:

- sustav za sakupljanje EE otpada
- sustav za oporabu/recikliranje EE otpada [10].

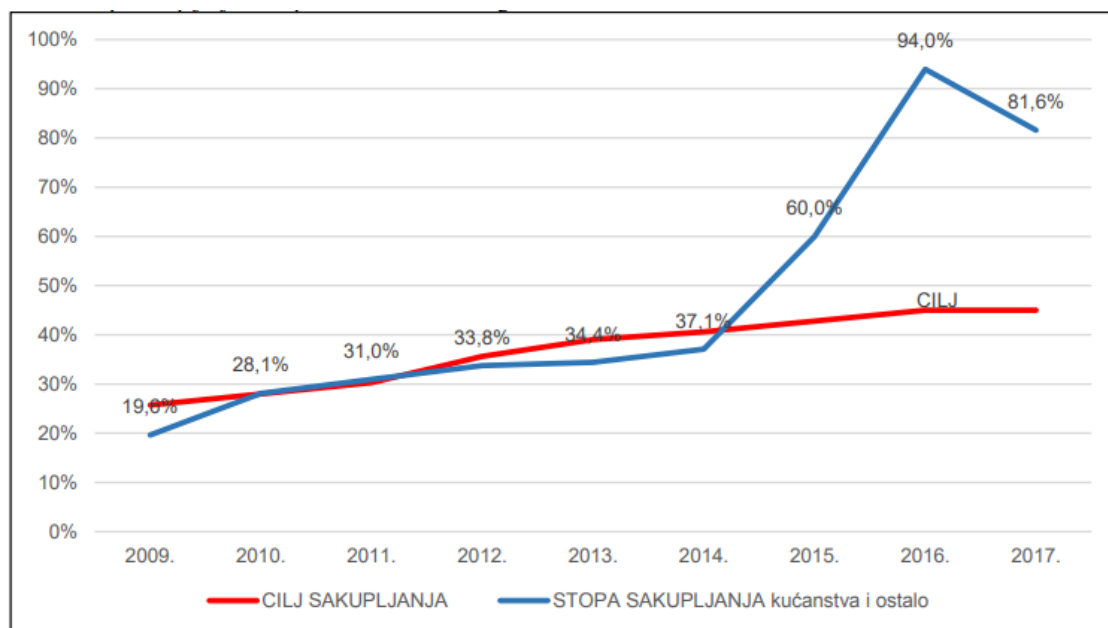
Do 2015. godine Direktiva o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi propisivala je cilj sakupljanja otpadne EE opreme od 4 kg po stanovniku godišnje za EE otpad sakupljen iz kućanstava. Od 2016. godine cilj odvojenog sakupljanja je postizanje stope od 45 % i to na temelju ukupne mase sakupljenog EE otpada iz kućanstava i registriranih poslovnih subjekata u Republici Hrvatskoj. Spomenuta stopa računa se kao omjer sakupljenih količina u promatranoj godini podijeljen s prosječnom masom EE opreme stavljene na tržište u prethodne tri godine (izraženo u postocima) [11].

Količina EE opreme stavljene na tržište RH u 2017. godini iznosila je 54 395 tona električne i elektroničke opreme što ukazuje na povećanje potrošnje za 9 % u odnosu na 2016. godinu. Ukupna količina sakupljene otpadne električne i elektroničke opreme u 2017. godini iznosila je 36 434 tona što je u odnosu na prethodnu godinu pad od 6 % [Slika 5]. Godišnja količina sakupljenog EE otpada iznosi 8,8 kg po stanovniku svrstavajući Hrvatsku u sredinu ljestvice zemalja članica EU (koja se kreće od 1,6 kg po stanovniku u Rumunjskoj do 16,5 kg po stanovniku u Švedskoj, prema podacima iz 2016. godine). Sukladno članku 3. Uredbe 2017/699 postignuta je stopa sakupljanja od 82 % što znači da je u 2017. godini Republika Hrvatska postigla cilj sakupljanja EE otpada koji iznosi 45 % (izraženo kao odnos godišnje masene količine sakupljenog EE otpada i prosjeka masenih količina stavljenih na tržište u prethodne tri godine). Od sakupljenih količina oporabljeno je 34 812 tona EE otpada (95,5 %), od čega recikliranjem 34 697 tona [11].



Slika 5. Prikaz EE opreme stavljene na tržište, sakupljene i oporabljene količine EE otpada [11]

U 2017. godini ostvareni su svi propisani minimalni ciljevi za uporabu i recikliranje koji se primjenjuju po kategorijama EE uređaja i opreme iz priloga V. Direktive 2012/19/EU, a koji iznose od 70 do 80 % za uporabu i 50 do 80 % za recikliranje, ovisno o kategoriji EE opreme prema prilogu I. Pravilnika što prikazuje Slika 6 [11].



Slika 6. Stopa sakupljanja EE otpada iz kućanstava i registriranih poslovnih subjekata [11]

Dozvolu za finalni postupak uporabe ove vrste otpada posjeduju dvije tvrtke (tvrtka CE-ZA-R d.o.o. koja je ovlaštena obrađivač 1. kategorije EE otpada i tvrtka Spectra media d.o.o. koja je ovlaštena obrađivač 2. do 10. kategorije EE otpada). U 2017. godini oporabljeno je ukupno 34 812 tona odvojeno sakupljenog otpadnog EE otpada. Od toga je materijalno oporabljeno (reciklirano) 34 697 tona, dok je energetski oporabljeno (spaljivanje uz dobivanje energije) 115 tona iz razloga što u Hrvatskoj nema spalionica. Tijekom 2017. godine nije bilo izvoza cjelovite EE opreme dok je izvoz obrađenog EE otpada iznosio 8 769 tona od čega 8 224 tona u zemlje članice Europske unije [11].

2.2. Otpadni kablovi

Prema Pravilniku o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom (NN 42/14, 48/14, 107/14, 139/14 i 11/19) u članku 3. točki 3. definiran je pojam EE opreme:

„EE oprema (električni i elektronički uređaji i oprema) predstavlja sve proizvode i njihove sastavne dijelove koji su za svoje primarno i pravilno djelovanje ovisni o električnoj energiji ili elektromagnetskim poljima kao primarnom izvoru energije kao i proizvode za proizvodnju, prijenos i mjerenje struje ili jakosti elektromagnetskog polja, a koji se mogu svrstati u popis vrsta proizvoda iz Dodatka 2. i Dodatka 4. ovog pravilnika ili su im po svojoj svrsi i namjeni slični i koji su namijenjeni za korištenje pri naponu koji ne prelazi 1 000 V za izmjeničnu i 1 500 V za istosmjernu struju” [7].

Otpadni kablovi se klasificiraju kao komponente EE opreme odvojeno sakupljenog EE otpada. U Dodatku 7. istog Pravilnika propisani su Zahtjevi za posebnu obradu materijala i komponenata iz EE otpada:

- Točka 1. Dodatka određuje da se iz odvojeno sakupljenog EE otpada trebaju odstraniti vanjski električni kablovi, te se isti uporabiti i zbrinuti u skladu sa Zakonom.
- Točka 3. Dodatka određuje da se materijali i komponente iz Točke 1. i 2. moraju uporabiti na način koji će omogućiti ponovnu uporabu i za okoliš prihvatljivo recikliranje komponenata i cijelih uređaja [7].



Slika 7. Otpadni električni kablovi

2.2.1. Grada električnih kablova

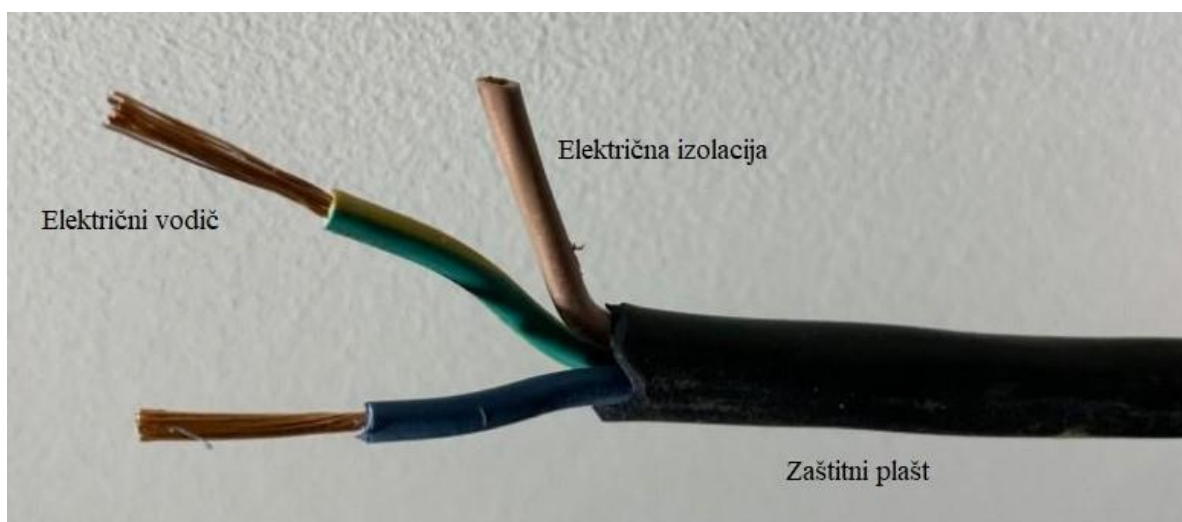
Električni kabel je električni vod koji sadrži dva ili više vodiča povezanih ili isprepletenih zajedno čineći jedan sklop. Vodiči su od dobro vodljivog materijala električni izolirani te smješteni u zajednički vanjski omotač za zaštitu od vanjskih utjecaja [12].

Kabel se sastoji od jednog ili više vodiča, izolacije oko svakoga vodiča, plašta od kovine ili polimera te zaštitnog plašta radi mehaničke, električne ili antikorozijske zaštite. Vodiči kabela izrađuju se od elektrotehničkoga bakra ili aluminijske (materijali visoke čistoće), najčešće kao uža od više žica. Za prijenos iznimno velikih snaga (>100 MVA) vodiči su od materijala velike električne provodnosti, a za telekomunikacijske svrhe se rabe i svjetlo vodi [12].

Kabeli koji sadrže bakar sastoje se od sklopa izolacijskog sloja od PVC-a ili PE-a, zaštitnog sloja s negativnim učinkom i vodljive bakrene jezgre. Industrijski čisti bakar ili bakar bez kisika čistoće iznad 99,90 % često se koristi za vodljivu bakrenu jezgru koja pokazuje izvrsnu električnu provodljivost, toplinsku provodljivost i izvrsnu kemijsku stabilnost te čini 58,3 % ukupne mase kabela [13].

Izolacija oko vodiča općenito je od polimernih materijala (polivinil-klorid), polietilen, poliamid, polipropilen, guma), papira ili slojevitih materijala (polipropilen/papir).

Plast kabela zaštićuje izolaciju od prodora vlage i vode te kemijskih utjecaja iz okoline. Izrađuje se također od polimernih materijala, katkad uz dodatke za sprječavanje širenja plamena, te kao kovinski plašt od bakrene, aluminijske i čelične cijevi. Kao zaštita od vanjskih elektromagnetskih utjecaja, odnosno radi sprječavanja njihova širenja na susjedne električne instalacije, oko žile se postavlja zaslon od bakrene vrpce, žice, opleta od bakrenih žica i sl. Kao zaštita od mehaničkih naprezanja rabi se oklop od čelične vrpce, žice ili žičanog opleta [12].



Slika 8. Građa električnog kabela

2.2.2. Vrste električnih kablova

Vanjski električni kablovi vrlo su raznoliki i mogu se podijeliti u pet glavnih kategorija: magnetsku žicu, neizoliranu žicu, električne žice i kabele, energetske kabele i komunikacijske kabele, sukladno njihovoj strukturi, proizvodnom procesu, funkciji i karakteristikama uporabe [13].

Kablovi koji mogu spojiti dva uređaja omogućuju prijenos električnih signala s jednog uređaja na drugi. Kabeli se mogu koristiti u različite svrhe te svaki od njih mora biti prilagođen svrsi. Koriste se u elektroničkim uređajima za napajanje i u signalnim krugovima; podmorski kabeli se koriste za odvijanje komunikacije između udaljenih područja; energetske kabeli se koriste za prijenos izmjenične i istosmjerne struje; električni kabeli se intenzivno koriste u izgradnji ožičenja za rasvjetu te u strujnim i upravljačkim krugovima koji su trajno instalirani u zgradama itd. [12].

Energetski kabel

Energetski kabel upotrebljava se za prijenos električne energije na kraće udaljenosti, za njezinu raspodjelu te za energetske industrijske i kućne priključke, u naponskom području do 750 kV izmjenične te za napone više od 400 kV istosmjerne struje.

Niskonaponski kabel za napone do 1 kV ima jednu do pet žila, a mehanička je zaštita smještena ispod vanjskoga plašta. Distributivni kabel za napone od 6 do 35 kV trožilni je ili jednožilni, bez dodatne mehaničke zaštite.

Visokonaponski i ekstra visokonaponski kabeli za napone veće od 46 kV pa do 750 kV općenito su jednožilni, polietilenske izolacije (do 400 kV) ili izolacije od sloja polipropilen/papir (do 750 kV) [12].

Telekomunikacijski kabel

Telekomunikacijski kabel upotrebljava se za prijenos zvuka, slike i informacija na velike udaljenosti te za izgradnju pristupne i pretplatničke telekomunikacijske mreže.

Niskofrekvencijski telekomunikacijski kabel primjenjuje se za izgradnju distribucijske i pretplatničke analogne i digitalne telekomunikacijske mreže, izgradnju zatvorenih poslovnih i drugih mreža te za kućne instalacije [12].

Vodič telekomunikacijskog kabla je od bakrene žice promjera 0,4 do 1,2 mm, a najčešća je izolacija polietilen, rjeđe poli(vinil-klorid) i poliamid. Dva ili četiri izolirana vodiča čine element (tzv. parica, četvorka) koji se dalje udružuje skupno ili u slojevima u kabelsku jezgru. Svaki element i svaka skupina kodnom su bojom posebno označeni radi lakšega raspoznavanja u primjeni. U kabelu može biti do 2000 parica.

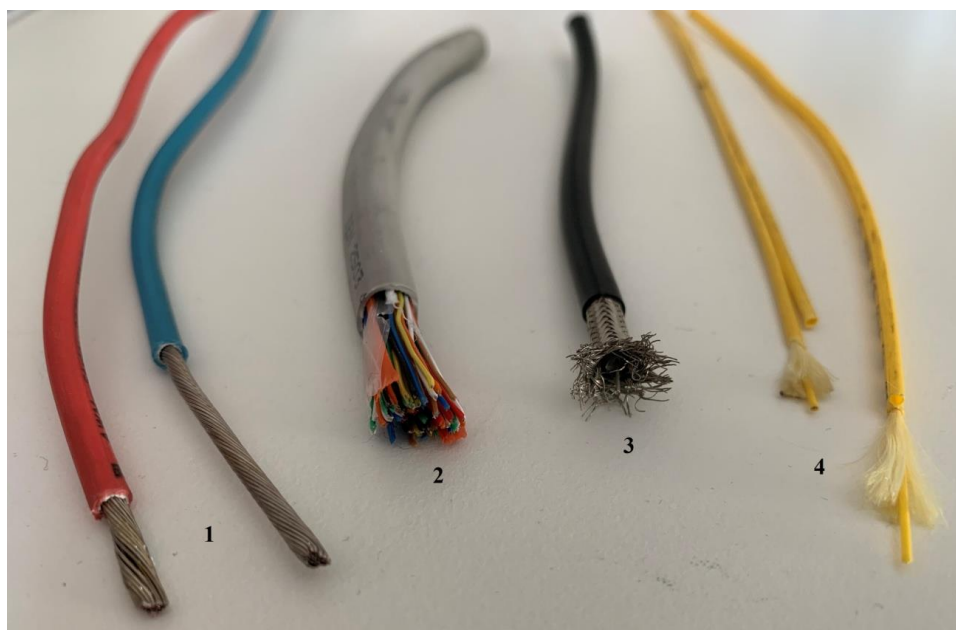
Kabelska jezgra zaštićuje se od prodora vode punjenjem vodonepropusnom smjesom i posebnom slojevitom izvedbom uzdužne aluminijske vrpce i vanjskog polietilenskog plašta. Telekomunikacijski kabel je predviđen za polaganje u zemlju, u cijevi od polimera, za postavljanje nad zemlju (samonosivi kabel) te u vodu (podmorski kabel) [12].

Visokofrekvencijski telekomunikacijski kabel upotrebljava se za prijenos električne struje s frekvencijama do 10 GHz, a s obzirom na konstrukciju i vrstu vodiča razlikuju se koaksijalni i svjetlovodni kabel [12].

Koaksijalni telekomunikacijski kabel sastoji se od unutarnjega vodiča od bakrene žice i balonske ili prstenaste polietilenske izolacije te od vanjskoga vodiča (oplet od bakrenih žica, bakrene vrpce ili rebrasto oblikovane bakrene cijevi). Vanjski je plašt u pravilu od poli(vinil-klorida) ili polietilena. Za veće kapacitete prijenosa moguće je do osam koaksijalnih kabela međusobno užasto spojiti u jedan kabel sa zajedničkim zaštitnim plaštem. Koaksijalni kabel najčešće se upotrebljava za izgradnju mreže za kabelsku televiziju, u radarskoj i visokonaponskoj mjernoj tehnici [12].

Svjetlovodni kabel sastoji se od jednog ili više svjetlovoda. Primjenjuje se u optičkim telekomunikacijama za prijenos signala staklenim vlaknima i danas je gotovo istisnuo visokofrekvencijski koaksijalni kabel i niskofrekvencijski kabel za pretplatničke mreže [12].

Na Slici 9 su prikazani gore opisani električni kablovi.



Slika 9. Vrste električnih kablova: 1-energetski, 2-telekomunikacijski, 3-koaksijalni, 4-svjetlovodni kabel

3. POSTUPCI OBRADE EE OTPADA

U skladu s fizičkim i fizičko-kemijskim svojstvima različitih materijala prisutnih u EE otpadu, postupci fizičkog razvrstavanja omogućuju odvajanje za ponovnu uporabu, prikladnu obradu ili odlaganje. Većina tih postupaka koristi se u industriji recikliranja za odvajanje polimera, metala i drva, te za pročišćavanje otpadnih voda.

Osnovne metode obrade EE otpada su fizičke metode razdvajanja u koju spada ručno rastavljanje i sortiranje, mehanička obrada i metalurški procesi obrade.

Mehaničko-fizička obrada je nezamjenjiva tehnologija u praksi recikliranja EE otpada. Mehanički procesi, kao što su usitnjavanje, prosijavanje, razdvajanje, magnetska separacija, razdvajanje pomoću vrtložnih struja i elektrostatičko odvajanje, široko se koriste u industriji recikliranja [4].

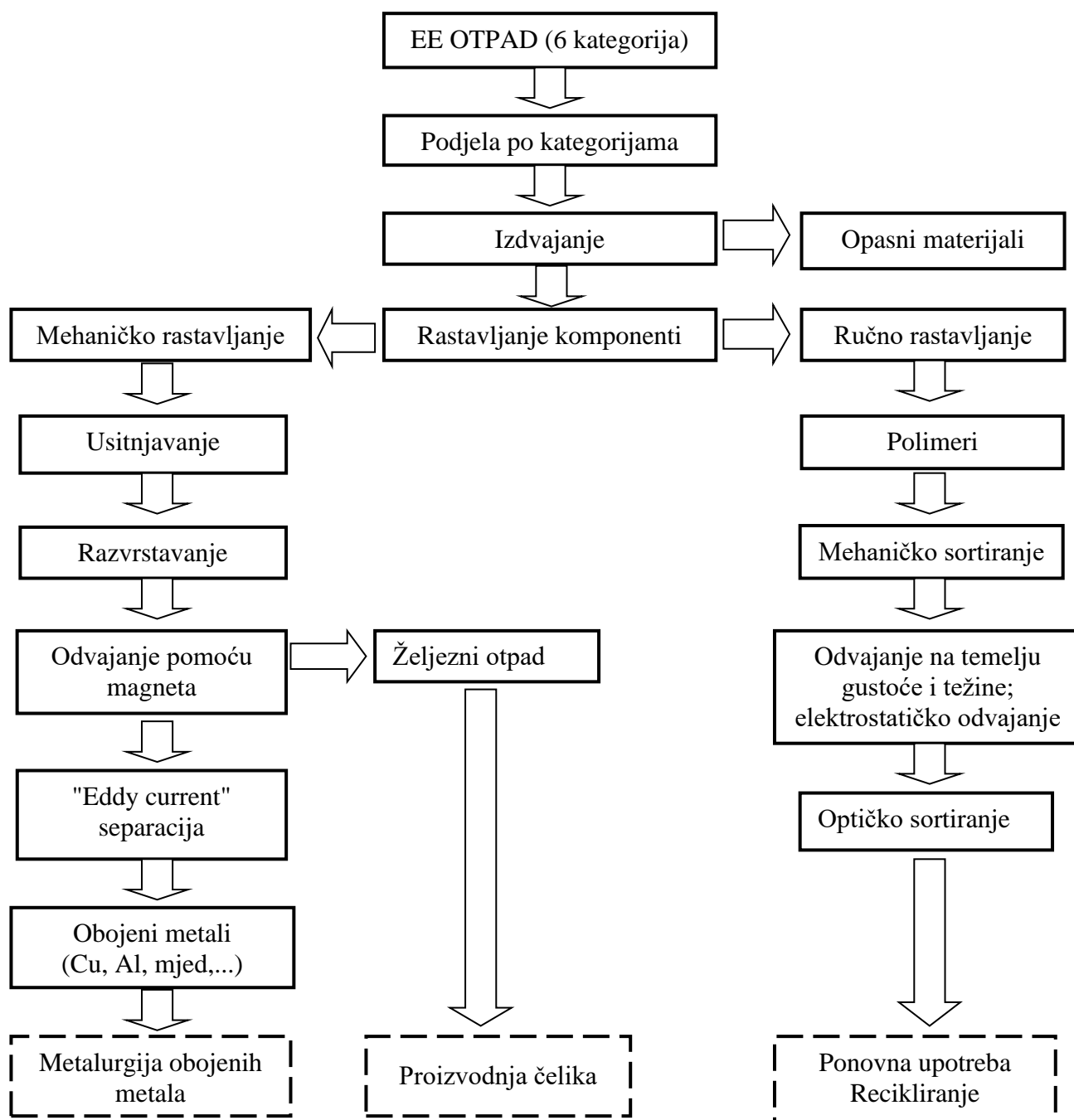
3.1. Fizičke metode razdvajanja

Fizičke metode razdvajanja mogu se podijeliti u dvije kategorije: suhi postupak i mokri postupak.

Suhi postupak

Kao što je prikazano na Slici 10, uspostavljeni postupak recikliranja EE otpada uključuje sljedeće korake:

1. ručno rastavljanje kako bi se odvojile sve opasne komponente (npr. živa u baterijama, klorofluorougljik u hladnjacima). Ovaj korak bavi se uklanjanjem onečišćenja i vraća neke vrijedne komponente prije operacije usitnjavanja.
2. usitnjavanje EE otpada u male čestice radi odvajanja metala iz polimera i drva.
3. magnetsko odvajanje niskog intenziteta za izdvajanje željeznih metala.
4. odvajanje vrtložnim strujama za dobivanje obojenih metala.
5. optičko sortiranje štampanih pločica ili odvajanje bromiranih od nebromiranih polimera.
6. ostale tehnike odvajanja: zračni separator, prosijavanje, separacija fluidiziranim slojem, sortiranje rendgenskim zrakama i dr.



Slika 10. Dijagram toka ručnog i mehaničkog sortiranja [4]

Postupak mokrog odvajanja

Postupak mokrog odvajanja uključuje:

1. plivajuće-tonući postupak odvajanja različitih vrsta polimera i metala
2. flotacijske postupke za razdvajanje različitih vrsta polimera
3. hidrocikloni teških komponenata i vibracijski stolovi za razdvajanje metala od polimera [4].

Nakon odvajanja, otpad se dalje izravno obrađuje ili pročišćava uporabom drugih postupaka obrade prije recikliranja. Tok materijala EE otpada prolazi kroz nekoliko koraka sortiranja. Najveći udio nastaje iz ručnog razvrstavanja (29 %), magnetskog odvajanja niskog intenziteta za razdvajanje željezne frakcije (33 %), frakcije polimerne mješavine i drugih (2 – 3 %).

U nastavku su opisani različiti koraci koji su uključeni u suhe i mokre fizičke procese razdvajanja [4].

3.1.1. Rastavljanje EE otpada

Rastavljanje EE otpada se uglavnom obavlja ručno, ali ponekad i mehanički. Glavni mu je cilj izdvajanje vrijednih tvari uz istovremeno uklanjanje nevrijednih i opasnih tvari iz otpada.

3.1.1.1. Ručno rastavljanje

EE otpad se najprije ručno sortira u nekoliko kategorija. Često je prije mehaničke obrade potrebno ukloniti otrovne komponente kao što su živa, baterije i klorofluorouglicji, prisutne u uređajima. Ručno rastavljanje i sortiranje se koristi za izdvajanje vrijednih homogenih dijelova koji se mogu ponovno upotrijebiti ili reciklirati. Često su to čitave komponente od metala, polimera ili stakla [4].

3.1.1.2. Mehaničko rastavljanje

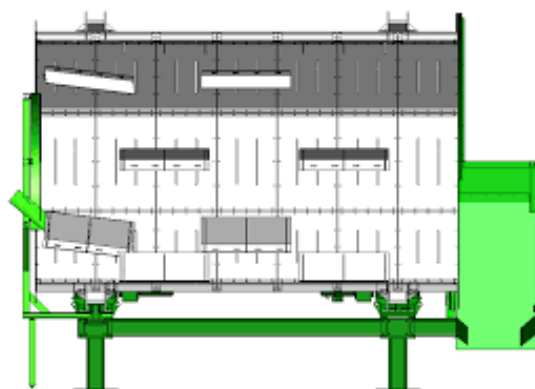
Proces mehaničkog rastavljanja razvijen je kako bi se ručno rastavljanje smanjilo na minimum. Mehaničko rastavljanje se odvija na dva načina: drobljenjem i razbijanjem u strojevima za usitnjavanje.

Usitnjivač (eng. *shredder*) je stroj namijenjen grubom usitnjavanju otpada, karakterizira ga velika snaga te mali broj okretaja. Usitnjavanje se obavlja uz pomoć horizontalno postavljenih paralelnih vratila uzduž kojih su uklinjene ploče s fiksnim zubima velike tvrdoće. Ubačeni otpad prolazi između vratila koji rotiraju u suprotnim smjerovima. Rezne ploče, smještene na jednom vratilu, prolaze međuprostorom između reznih ploča drugog vratila i obratno [Slika 11], te na principu škara režu otpad usitnjavajući ga na manje komade.



Slika 11. Usitnjivač [14]

Kako bi se izbjeglo uništenje vrijednih komponenti iz procesa usitnjavanja, razvijen je razbijač za početno razdvajanje električnih i elektroničkih uređaja i odvajanje komponenti [Slika 12]. Otpad ili dijelovi otpada koji ne sadrže opasne tvari mogu se dodatno smanjiti odgovarajućim usitnjivačima, granulatorima ili sličnim strojevima.

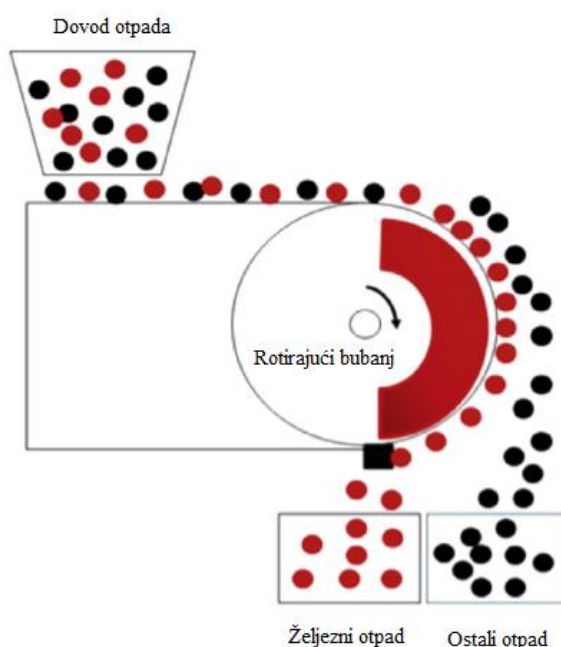


Slika 12. Razbijač [15]

3.1.2. Razdvajanje otpadnog materijala pomoću magneta

Razdvajanje pomoću magneta je moguće budući da EE otpad sadrži materijale s različitim magnetskim svojstvima. Materijali imaju jedno od sljedećih magnetskih svojstava: feromagnetsko (željezni ostaci), paramagnetsko (neke legure) i dijamagnetsko (drugi kompoziti) svojstvo [4].

Magnetsko odvajanje [Slika 13] može se smatrati ekološki prihvatljivom tehnikom. Magnetskim odvajanjem upravljaju dva čimbenika: ponašanje čestica različitih materijala pri izlaganju istom magnetskom polju i magnetske sile koje na njih djeluju. Odgovori različitih čestica na primijenjeno polje rezultiraju privlačenjem ili odbijanjem magnetskog polja [16].

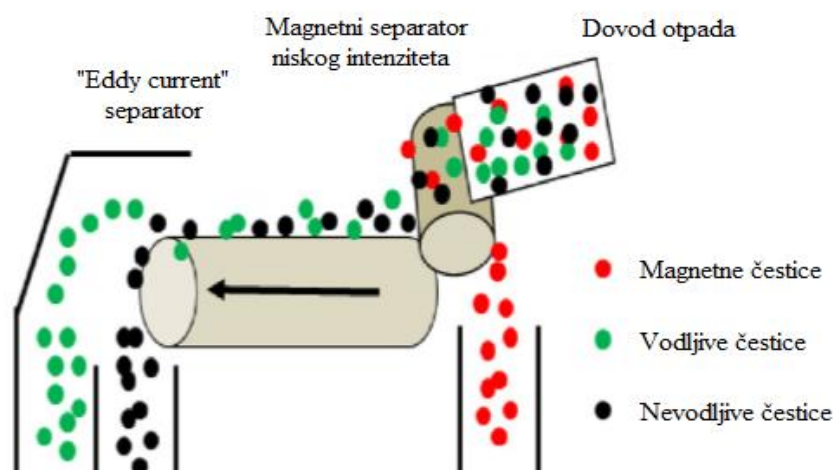


Slika 13. Razdvajanje pomoću magneta [17]

3.1.3. Razdvajanje otpadnog materijala vrtložnim strujama

Vrtložno-strujno razdvajanje (eng. *Eddy Current*) je najprikladnija tehnologija za recikliranje metala kao što su bakar, aluminij te ostali nemetali dobiveni iz industrijskog i komunalnog krutog otpada. Danas se vrtložno-strujna separacija učestalo koristi u industriji za recikliranje automobila (ELV, eng. *End of Life Vehicles Directive 2000/53/EC*), recikliranje elektronike (WEEE, eng. *The Waste Electrical and Electronic Equipment Directive 2012/19/EU*), rušenje (C&DW, engl. *Construction and Demolition Waste, The Waste Framework Directive 2008/98/EC*), te za obradu nemetalnih materijala [4].

Željezni i neželjezni materijali ili neželjezni materijali sami se mogu odvajati temeljem električke vodljivosti materijala. Kada se električki vodljivi materijal nalazi u promjenjivom magnetnom polju, dolazi do induciranja vrtložnih struja u njemu. Vodljive se čestice zakreću od smjera struje dok se nevodljive ne zakreću što je prikazano na Slici 14 [18].



Slika 14. „Eddy current“ razdvajanje otpadnog materijala [4]

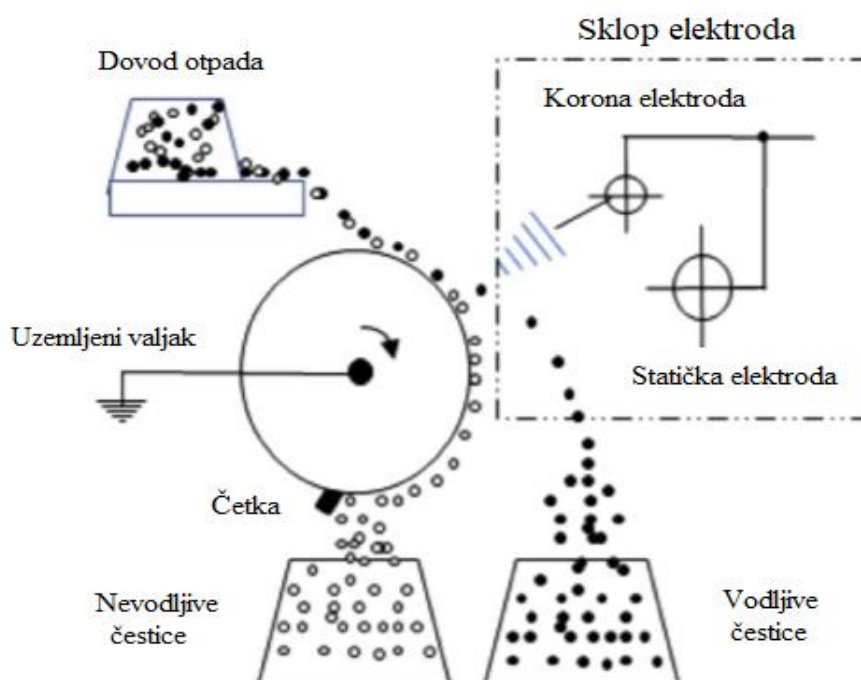
Princip razdvajanja pomoću vrtložnih struja je u tome što se električna struja inducira u materijalu koji je električni vodič, promjenom magnetskog toka kroz njega. Takve promjene magnetskog toka mogu se postići pomoću rotirajućeg stalnog magneta, a intenzitet magnetskog toka može se kontrolirati pomoću električnog vodiča. Učinak takvih struja je induciranje sekundarnog magnetskog polja oko čestica npr. obojenih metala. Ovo polje reagira s magnetskim poljem rotora, što rezultira kombiniranom silom pokretanja i odbijanja koja doslovno izbacuje provedenu česticu iz toka pomiješanih materijala [4].

3.1.4. Elektrostatičko razdvajanje otpadnog materijala

Elektrostatičko razdvajanje je metoda odvajanja ili koncentriranja materijala na temelju razlike u električnoj vodljivosti (otpornosti) između komponenti mješavine čestica pod djelovanjem električnog polja [16].

Slika 15 prikazuje princip postupka elektrostatskog odvajanja. Materijali različitih površinskih naboja dovode se na rotirajući bubanj od mekog čelika, koji je uzemljen. Električno polje se stvara između dvije elektrode spojene na visokonaponski generator i rotirajuću uzemljenu elektrodu (bubanj) [4].

Usitnjene čestice materijala se elektrostatički nabijaju i propuštaju između različito nabijenih ploha. Vodljivi materijali će se pritom odbiti od elektrode jer imaju isti naboj kao što je na pločama, dok će se nevodljive čestice privući na bubanj [18].



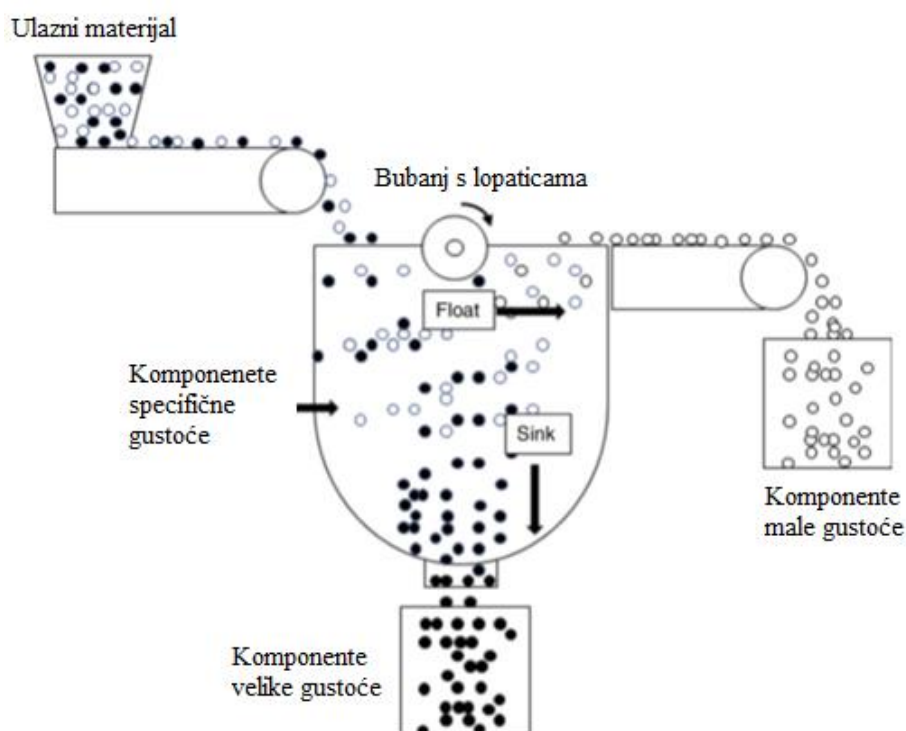
Slika 15. Princip elektrostatskog razdvajanja [4]

3.1.5. Razdvajanje na temelju gustoće i težine

Tehnika odvajanja prema gustoći je fizički proces čiji je princip odvajanje materijala na temelju njihovih razlika u gustoći, veličini i obliku.

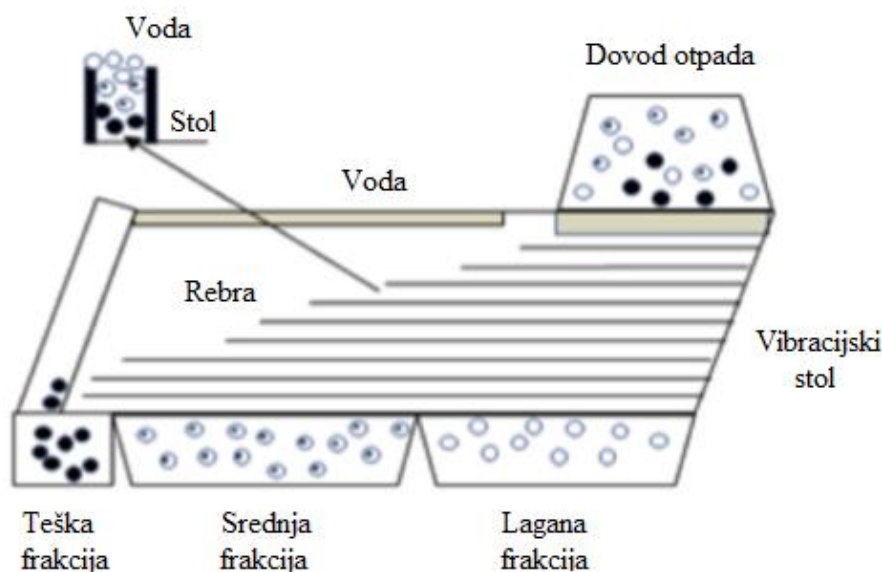
Ovaj postupak se uspješno primjenjuje u recikliranju EE otpada koji se uglavnom sastoji od polimera s gustoćom ispod $2,0 \text{ g/cm}^3$, lakih metala, uglavnom aluminija, gustoće od $2,7 \text{ g/cm}^3$ i teških metala, pretežno Cu, Fe, Ni i Pb, s gustoćama većim od 7 g/cm^3 [16].

Najprikladniji pristup takvog odvajanja je plivajuće-tonući postupak [Slika 16]. Riječ je o postupku vodenog odvajanja pri kojem se krute čestice odvajaju zavisno o njihovoj gustoći. Teže čestice padaju na dno, dok lakše plutaju na površini. Obično se koristi za razdvajanje različitih vrsta polimera na temelju njihovih gustoća, kao i za odvajanje metala od polimera [4].



Slika 16. Plivajuće-tonući postupak razdvajanja [4]

Postupak gravitacijskog odvajanja ili vibracijskog stola, prikazan na Slici 17, može se koristiti za odvajanje obojenih metala (npr. bakra) sadržanih u EE otpadu. Vibracijski stol je sastavljen od nekoliko rebara. Odvajanje materijala vrši se zahvaljujući vibraciji stola i protoku vode. Vibracijski vodeni stol puni se miješanim otpadnim materijalom s određenom veličinom čestica. Otpad se pomiče u smjeru dijagonale ploče: teže čestice ostaju na stolu i kreću se u smjeru rebara, dok lakše čestice teku vodom preko rebara [4].



Slika 17. Tehnika gravitacijskog odvajanja [4]

3.2. Pirometalurški postupci izdvajanja metala iz EE otpada

U posljednjih nekoliko godina uložen je veliki trud u poboljšanje životnog ciklusa električne i elektroničke opreme. Otpad električne i elektroničke opreme postao je globalno pitanje; stoga se provodi više istraživanja za poboljšanje učinkovitosti recikliranja s obzirom da EE otpad obuhvaća složenu mješavinu različitih organskih materijala, stakla te željeznih, obojenih i plemenitih metala (npr. Au, Ag, Pd i Pt). Postupci pirometalurgije noviji su postupci koji se koriste za izdvajanje metala pri recikliranju EE otpada. U pirometalurške postupke spada taljenje, izgaranje, piroliza i procesi rastaljenih soli [4].

Pirometalurški postupci za ekstrahiranje metala se odvijaju na povišenim temperaturama, te stoga zahtijevaju veliku količinu unesene energije. Međutim, potrošnja energije i ugljični otisak pirometalurških postupaka su niži nego u primarnoj proizvodnji metala. Isto vrijedi i za utjecaj na okoliš zbog eliminacije rudarskog otpada. Na primjer, za dobivanje bakra iz EE otpada potrebna je energija oko 6,3 MJ po kilogramu bakra, a ispušta se 0,44 kg CO₂ po kilogramu recikliranog bakra. Ove vrijednosti su mnogo niže nego u preradi rude bakra. Obično je koncentracija metala u EE otpadu nekoliko puta veća u usporedbi s njezinom rudom, kao što je prikazano u Tablici 1. Ova činjenica čini EE otpad vrlo vrijednom sirovinom.

Tablica 1. Koncentracija glavnih elemenata oporabljenih pirometalurškim putem iz EE otpada u odnosu na prosječni sadržaj njihove rude [4]

Element	Prosječni minimalni sadržaj rude (%)	Prosječni sadržaj u EE otpadu^a (%)
Bakar (Cu)	0,5	10 - 20
Željezo (Fe)	30	1 - 5
Aluminij (Al)	30	2 - 6
Cink (Zn)	4	0,5 - 6
Nikal (Ni)	1	0,1 – 2,5
Kositar (Sn)	0,5	1,5 - 8
Olovo (Pb)	4	0,3 - 5
Antimon (Sb)	3	0,2 – 1,8
Zlato (Au)	0,0001	0,002 – 0,03
Srebro (Ag)	0,01	0,03 – 0,3
Paladij (Pd)	0,0001	0,001 – 0,02
Indij (In)	0,001 (u rudama cinka)	0,02 – 0,04 ^b

^a Minimalne i maksimalne vrijednosti heterogenog EE otpadnog toka, tiskanih pločica iz osobnih računala, mobilnih telefona i druge elektronike.

^b Sadržaj indija na zaslonima s tekućim kristalima (LCD).

U nastavku će biti opisan postupak pirolize kao jedan od mogućih postupaka obrade otpadnih kablova koji su u procesu recikliranja odvojeni iz sakupljenog EE otpada.

3.2.1. *Pirolitički postupak obrade EE otpada*

Piroliza je toplinska razgradnja organskog materijala na povišenim temperaturama bez prisustva kisika. Tijekom pirolize odvijaju se nepovratne reakcije, što rezultira istovremenom promjenom kemijskog sastava i agregatnog stanja. Riječ „piroliza” dolazi od grčke riječi „πυρ“ (*pyr*) što znači požar i grčke riječi „λύσις“ (*liza*) što znači slom i razdvajanje, naglašavajući na taj način raspadanje tvari zbog djelovanja topline [4].

Općenite karakteristike pirolize su sljedeće:

- odsustvo ili smanjeno prisustvo kisika (kisik može biti prisutan u gorivu)
- temperature procesa 300 – 1 200 °C
- produkti su plinovi, pirolitičko ulje i kruti ostatak (čaća)
- visoka ogrjevna moć plina dobivenog pirolizom 22 – 30 MJ/m³ [19].

Piroliza se prema rasponu temperatura može kategorizirati kao niskotemperaturna (< 400 °C), srednjetemperaturna (400 – 600 °C) i visokotemperaturna (> 600 °C). Također, piroliza se u odnosu na vrijeme može kategorizirati kao brza i spora piroliza. Brza piroliza događa se za manje od dvije sekunde s temperaturnim rasponom od 350 °C do 600 °C, dok spora piroliza može trajati nekoliko sati ili dana [20]. Temperatura potrebna za pirolizu može se ostvariti indirektnim zagrijavanjem metalnih ili vatrostalnih zidova, direktnim odvojenim zagrijavanjem i direktno električnom energijom [21].

Produkti nastali pirolizom dijele se u tri faze u odnosu na agregatno stanje pri sobnoj temperaturi, a to su plinovi (plinovita faza), pirolitičko ulje (tekuća faza) i čaća (kruta faza). Plinovi nastali pirolizom su uglavnom vodik (H₂), ugljikov monoksid (CO), ugljikov dioksid (CO₂) te alkani i alkeni čija molekularna formula nema više od četiri atoma ugljika. U pirolitičko ulje spadaju tekućine koje nastanu kondenzacijom plina nakon procesa pirolize, a čiji raspon broja atoma ugljika u molekularnoj formuli iznosi od 5 do 21. Osim njih, u sastavu pirolitičkog ulja nalaze se teški katran i rastopljeni vosak, čiji je broj atoma ugljika veći od 22. Iako je pirolitičko ulje najpoželjniji produkt pirolize, vrlo je teško odrediti svaku komponentu u smjesi.

Čađa je porozna i tvrda struktura ugljika nastala iz nepotpune organske pirolize. Takva čađa je uglavnom nakon pirolize onečišćena drugim komponentama iz otpadnih polimera zajedno s neizreagiranim polimerima [20].

Postoji nekoliko čimbenika koji utječu i na organske i na anorganske komponente proizvoda pirolize, te ih treba pažljivo uzeti u obzir za učinkovito oblikovanje procesa. Najznačajniji čimbenici su vrsta polimera u EE otpadu, temperatura pirolize i brzina grijanja, trajanje pirolize, tip reaktora, radni tlak i prisutnost katalizatora [4].

Reaktor je važna komponenta procesa pirolize zbog velikih količina topline koje je potrebno prenijeti preko stijenke reaktora kako bi se osigurala što bolja razgradnja materijala. Konstrukcija reaktora važna je za brzi proces pirolize te za dobivanje što veće količine i veće kvalitete produkata. Karakteristike koje su bitne za reaktore pirolize su vrlo visoka brzina prijenosa topline, lako kontroliranje zagrijavanja i hlađenja reaktora te jednostavan rad. Tipovi reaktora koji se mogu koristiti za pirolizu su: reaktori s fiksnim slojem, šaržni i polušaržni reaktor, reaktori s fluidiziranim slojem, rotacijske peći, reaktori s mikrovalovima i plazma reaktori [22].

Upotrebom pirolize za obradu otpadnih polimera u svrhu proizvodnje goriva i vrijednih kemikalija mogu se ublažiti utjecaji crpljenja i korištenja fosilnih goriva.

Ključna prednost pirolize je da se različite komponente EE otpada mogu odvojiti i da se svi korisni materijali mogu reciklirati. U usporedbi s izravnim izgaranjem, proces pirolize ima prednost u slučaju otpada visoke ogrjevne vrijednosti, a volumen proizvedenih plinova uvelike se smanjuje. Osim toga, proces pirolize ne zahtijeva sveobuhvatnu predobradu EE otpada, te značajno smanjuje masu otpada za 50 - 90 %, uz minimiziranje emisija onečišćujućih tvari jer se postupak provodi u okruženju bez kisika [23].

Minerali i metali se daljnjom obradom izdvajaju iz ostataka pirolize, a manje se pepela proizvodi u usporedbi sa spaljivanjem. Istaknuta prednost pirolize je iskorištavanje krutih organskih komponenti transformacijom u homogeni sastav tekućih i plinskih proizvoda, što posebno omogućuje uporabu energije kao skladišnog goriva. Proces pirolize povoljniji je za okoliš u odnosu na druge postupke s obzirom na dobivene krute ostatke i plinove koji se mogu kontrolirati [4].

3.2.1.1. Vakuumska piroliza

Pod vakuumom se razumijeva prostor u kojem se plin ili para nalaze pod tlakom nižim od atmosferskoga koji iznosi 101 325 Pa. Naziv potječe od latinske riječi *vacuum* što znači praznina ili prazan prostor [24].

Vakuumska piroliza je metoda pri kojoj se organske molekule sa složenom strukturom, rastavljaju na jednostavnije, pod visokom temperaturom i kontroliranim tlakom. Dva ključna parametra su temperatura i trajanje procesa. Polimeri koji se metodom vakumske pirolize rastavljaju u monomere, uz pomoću vakuuma se uklanjaju iz reaktora, te se prikupljaju u kondenzatoru u obliku pirolitičkog ulja. Kada je u unutrašnjosti reaktora vakuum, nastali plinovi se brzo uklanjaju, a materijal na kojem se odvija piroliza ostaje unutar reaktora. Kod vakumske pirolize, reakcije se odvijaju znatno brže u odnosu na pirolizu pod atmosferskim tlakom. Vakuumska piroliza je relativno nova tehnologija u obradi otpada, a koristi se za pretvaranje različitih organskih materijala (otpadna guma, otpadni polimeri, otpadni mulj i dr.) u vrijedne sirovine, kao što su pirolitičko ulje i visoke ogrjevne vrijednosti [25].

4. POSTUPCI I OPREMA ZA OBRADU OTPADNIH KABLOVA

Brzim razvojem energetike i stalnim unapređenjem električnih i elektroničkih proizvoda povećava se količina EE otpada pa tako i količina otpadnih kablova. Budući da je bakar, koji je sadržan u otpadnim kablovima, visoke čistoće i da je potrošnja energije recikliranja niska, otpadni kablovi postali su važan izvor sirovina za industriju bakra. Stoga je recikliranje otpadnih kablova postalo važna komponenta razvoja „urbanih ruda” [13].

Električni kablovi bi trebali biti pravovremeno zamijenjeni zbog utjecaja starenja, mehaničkih oštećenja, opekline električnom vatrom i sl. Zbog toga proizvodnja kablova iz godine u godinu raste. Recikliranje otpadnih kablova posljednjih je godina privuklo sve veću pozornost radi njihovog sastava kojeg čini provodni metali i polimeri. Najzastupljeniji provodni metal je bakar.

Bakar (simbol Cu (lat. *cuprum*), kemijski element atomskog broja 29, relativne atomske mase 63,546), je crvenkast i mekan teški metal gustoće 8,94 g/cm³, tališta 1 085 °C, nakon srebra najbolji vodič topline i elektriciteta, otporan prema koroziji, lako se prerađuje i stvara slitine. Duljim stajanjem potamni zbog stvaranja oksida, a pod utjecajem atmosferilija s vremenom se prevlači zaštitnom zelenom patinom (bazični karbonat ili sulfat). Ne otapa se u razrijeđenim kiselinama, ali ga dušična kiselina nagriza. Bakar je poznat još iz prapovijesnih vremena.

U prirodi je bakar u elementarnom stanju rijedak, raspršen u stijenama, najčešće kemijski čist ili s malo primjesa srebra i bizmuta. Poznato je oko 240 bakrenih ruda. Najviše bakra ima u sulfidnim rudama, zatim u oksidnim i u karbonatnim rudama. Sulfidne i oksidne rude u prirodi se nalaze najviše sa željeznim sulfidom, a rjeđe sa sulfidima drugih metala. Udio bakra u rudama razmjerno je malen. Bogate rude sadrže 3 do 10 % bakra [26].

S obzirom na prirodne resurse i vrijednost bakra na svjetskom tržištu, recikliranje otpadnih kablova je društveno i ekološki potrebno, a nadalje i ekonomski isplativo.

U svrhu izrade ovog diplomskog rada, opisani su procesi i materijali iz pogona za recikliranje električnog i elektroničkog otpada tvrtke Spectra media d.o.o. u Virovitici i u Donjoj Bistri, ovlaštenog koncesionara za uporabu i recikliranje EE otpada u Hrvatskoj. U pogonu u Virovitici se odvija primarna obrada EE otpada koja uključuje odvajanje otpada po kategorijama i usitnjavanje u svrhu smanjenja volumena. Ovako pripremljen otpad odvozi se na završnu obradu u pogon u Donjoj Bistri.

U nastavku će biti opisani postupci obrade otpadnih kablova s ciljem izdvajanja bakra, mehanički i pirolitički postupak. Mehanički postupak je vrlo dobro razrađen i dugi niz godina je u primjeni, dok je pirolitički postupak noviji pristup recikliranju te se još unaprjeđuje, a uveden je kao alternativni postupak zbog svojih prednosti. Uz opis postupaka, za potrebu usporedbe oba procesa obrade, u odnos će se staviti usko vezani troškovi same obrade, a to su trošak električne energije, amortizacija strojeva na pet godina, trošak održavanja te troškovi ljudskog rada. Ulazni parametri za izračun troškova su radna snaga strojeva (linija) u kW i njihov kapacitet u kg/h.

Osnovna fizička svojstva materijala od kojih su načinjeni otpadni kablovi, a važna su za postupke recikliranja kablova, prikazana su u Tablici 2 [27, 28].

Tablica 2. Fizikalna svojstva materijala važna za recikliranje kablova [27, 28]

Materijal	Gustoća, g/cm ³	Talište, °C
Bakar	8,94	1 085
Čelik	7,87	1 535
Aluminij	2,70	660
PVC	1,30	154 – 213 (prosječno 179)
PE	0,940	127 - 255 (prosječno 136)

4.1. Mehanički postupak obrade otpadnih kablova

Mehanički postupak obrade otpadnih kablova se odvija u tri koraka: primarno usitnjavanje radi smanjenja volumena i lakšeg transporta, usitnjavanje na granulatoru u svrhu dobivanja željene granulacije i zadnji korak je separacija dobivenih frakcija s ciljem dobivanja čistog bakra.

4.1.1. Primarno usitnjavanje

Prvi korak obrade otpadnih kablova se odvija u pogonu u Virovitici. Sakupljeni kablovi se hidrauličnim utovarivačem („grajferom“) ubacuju u dvoosovinski usitnjivač snage 32 kW (dva motora snage 16 kW). Osovine se vrte u suprotnim smjerovima te tako dolazi do rezanja i usitnjavanja kablova na veličinu od 80 do 120 mm. Kapacitet usitnjivača je približno 2 tone na sat, što ovisi o ulaznom materijalu. Postupak je prikazan slikama u nastavku [Slika 18].



Slika 18. Prvi korak usitnjavanja otpadnih kablova

4.1.1.1. Izračun troškova

1. Izračun troška električne energije

Trošak električne energije za primarno usitnjavanje jedne tone otpadnih kablova može se izračunati na temelju snage dvoosovinskog usitnjivača, kapaciteta usitnjivača od oko 2 tone na sat i cijene industrijske radne energije koja se koristi u pogonu i iznosi 0,21 kn/kWh [29].

$$\begin{aligned} \text{snaga}[\text{kW}] \cdot \text{radna energija} \left[\frac{\text{kn}}{\text{kWh}} \right] &= \text{trošak električne energije} \left[\frac{\text{kn}}{\text{h}} \right] \\ 32 \cdot 0,21 &= 6,72 \text{ kn/h} \\ \frac{6,72}{2} &= \mathbf{3,63 \text{ kn/t}} \end{aligned}$$

2. Izračun amortizacije linije na 5 godina

Nabavna vrijednost linije iznosi 50 000 €. U jednoj godini linija radi 4 000 radnih sati u dvije smjene, što u 5 godina iznosi 20 000 radnih sati [29]. Izračuni svih troškova u kunama temelje se na prosječnom tečaju prema euru od 7,455 kn/€.

$$\begin{aligned} \frac{\text{nabavna vrijednost}[\text{€}]}{\text{radni sati u 5 godina}} &= \text{trošak stroja} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \\ \frac{50\,000}{20\,000} &= 2,5 \text{ €/h} \\ 2,5 \frac{\text{€}}{\text{h}} \left(: 2 \frac{\text{t}}{\text{h}} \right) &= 1,25 \frac{\text{€}}{\text{t}} \left(\cdot 7,455 \frac{\text{kn}}{\text{€}} \right) = \mathbf{9,32 \text{ kn/t}} \end{aligned}$$

3. Izračun troška održavanja na godišnjoj razini

Godišnji troškovi održavanja usitnjivača mogu se procijeniti na temelju podatka da je na usitnjivaču potrebno svakih 4 000 radnih sati promijeniti rezne ploče (noževe), te da cijena novih noževa iznosi oko 5 000 € [29].

$$\begin{aligned} \frac{\text{trošak novih dijelova}[\text{€}]}{\text{radni sati}[\text{h}]} &= \text{trošak održavanja} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \\ \frac{5\,000}{4\,000} &= 1,25 \frac{\text{€}}{\text{h}} \\ 1,25 \frac{\text{€}}{\text{h}} \left(: 2 \frac{\text{t}}{\text{h}} \right) &= 0,63 \frac{\text{€}}{\text{t}} \left(\cdot 7,455 \frac{\text{kn}}{\text{€}} \right) = \mathbf{4,70 \text{ kn/t}} \end{aligned}$$

4. Trošak radnika

Za usitnjivač je potreban jedan radnik čija prosječna satnica iznosi 33 kn/h [29]. Za kapacitet usitnjivača od 2 t/h, slijedi trošak radnika po toni usitnjenog kablenskog otpada:

$$\frac{33}{2} = 16,50 \text{ kn/t}$$

U Tablici 3 su prikazani ukupni troškovi za usitnjivač koji se nalazi u pogonu u Virovitici. Oni iznose 33,88 kuna po obrađenoj toni otpadnih električnih kablova.

Tablica 3. Ukupni troškovi usitnjivača

	Usitnjivač
Snaga, kW	32
Kapacitet, kg/h	2 000
Trošak el. energije, kn/t	3,36
Trošak amortizacije (5 god), kn/t	9,32
Trošak održavanja (u 1 god), kn/t	4,70
Trošak radnika, kn/t	16,50
Ukupno:	33,88 kn/t

4.1.2. Usitnjavanje

Nakon primarnog usitnjavanja u pogonu u Virovitici, drugi korak obrade otpadnih kablova se odvija u pogonu u Donjoj Bistri na procesnoj liniji za obradu žice, čija je glavna komponenta usitnjivač njemačkog proizvođača MeWa. Glavna svrha ovog stroja je usitnjavanje EE otpada na željenu granulaciju od 10 do 45 mm, ovisno o ulaznom materijalu. Procesna linija je prikazana na Slici 19.



Slika 19. Procesna linija za usitnjavanje

Osnovni dijelovi procesne linije su:

1. usipni koš i pokretna traka do usitnjivača
2. usitnjivač, tip UG 1000
3. izlazni dio usitnjivača s potresnim stolom
4. horizontalna pokretna traka s pogonskim bubnjem - magnet
5. kosa pokretna traka do zračnog separatora
6. zračni separator tipa „cik-cak“
7. sustav filtriranja prašine (ciklon, ventilator i filter).

4.1.2.1. Postupak rada linije za usitnjavanje

Na ulaznom dijelu procesne linije za usitnjavanje nalazi se radnik i/ili viličarist koji prethodno obrađene otpadne kablove na veličinu od 80 do 120 mm, ubacuju na kosu uzlaznu pokretnu traku ili se pomoću viličara ulazni materijal ubacuje u veliki usipni koš [Slika 20] iz kojeg materijal pada na manju pokretnu traku, a s nje na kosu uzlaznu traku.



Slika 20. Usipni koš i uzlazna pokretna traka

Materijal s uzlazne trake pada u usitnjivač [Slika 21, Slika 22], gdje se melje na sitniju frakciju. Mljevenje se odvija u dva koraka. Prvi korak je mljevenje materijala na veličinu do 30 mm. Materijal pada na horizontalnu transportnu traku na čijem kraju se nalazi magnet, koji je ujedno i bubanj za pokretanje trake. On odvaja magnetične metale od nemagnetičnih. Nemagnetičan materijal pada u spremnik. Takav materijal ide na drugo mljevenje, prolazi kroz sito veličine 10 mm, te prolazi dalje kroz cijelu liniju. Sita su polualjkastog oblika [Slika 23].



Slika 21. Usitnjivač proizvođača MeWa tip UG 1000



Slika 22. Unutrašnjost usitnjivača, noževi



Slika 23. Varijabilna sita od 10 mm i 30 mm

Materijal iz usitnjivača pada na vibracijski stol i ide dalje pokretnom trakom do magnetnog valjka na kraju te trake. Iznad magneta je usisna cijev za prašinu. Magnetni valjak je ujedno i pogonski bubanj [Slika 24]. Ispod magneta se odvaja čelik u košaru.



Slika 24. Magnetni valjak na kraju pokretne trake i usisna cijev za prašinu

S horizontalne trake miješani materijal (polimeri, Cu, guma) pada na kosu transportnu traku [Slika 25], te se transportira dalje do zračnog separatora tipa „cik-cak”. U gornjem dijelu zračnog separatora je propusni ventil (osovina s lopaticama) kojim se kontinuirano dozira materijal bez propuštanja zraka. Na ulazu u zračni separator je cijev kojom se usisava prašina.

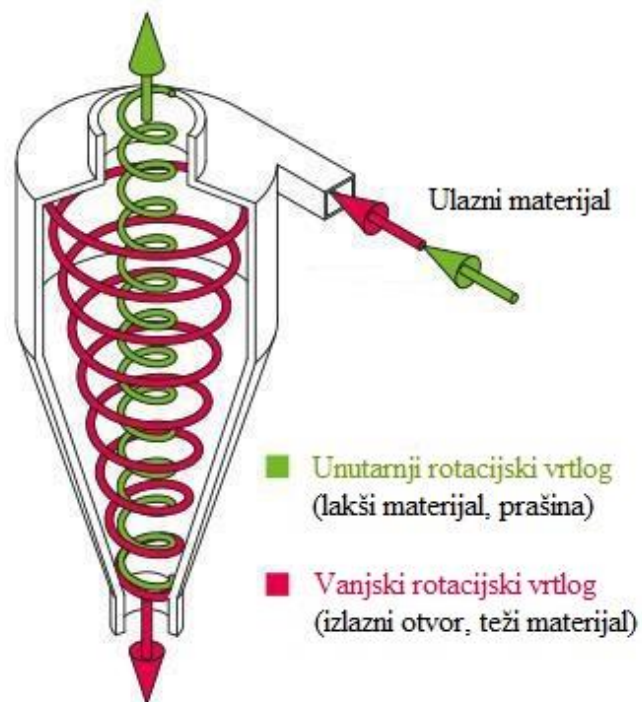


Slika 25. Kosa transportna traka, zračni separator i ciklon

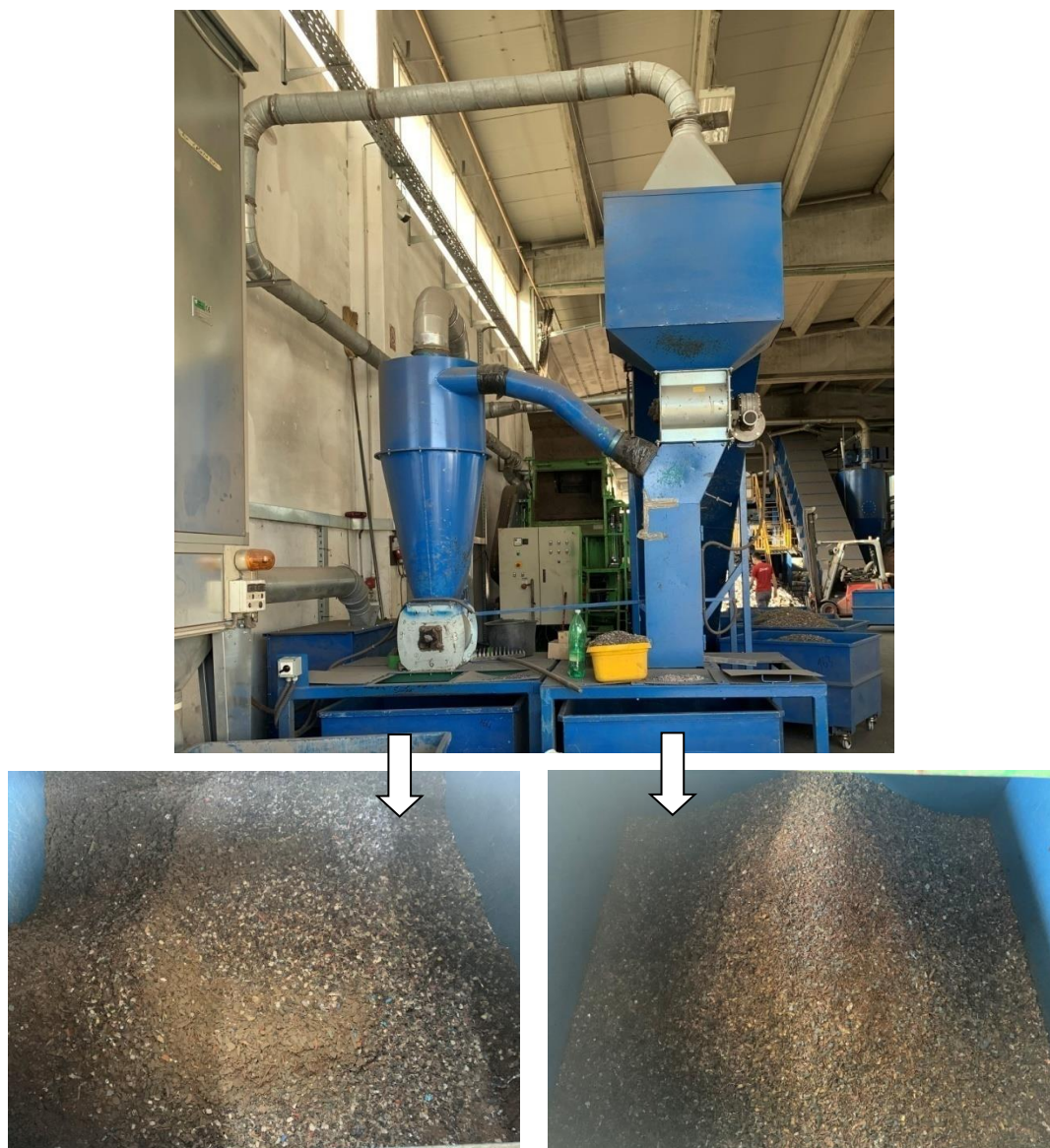
Osnovna namjena „cik-cak” separatora je odvajanje materijala, čije su čestice iste veličine i različite gustoće, pomoću strujanja zraka. Unutrašnjost separatora čine pregrade koje služe za razdvajanje slijepljenoga materijala i prašine [Slika 26]. Na vrhu separatora se nalazi zaklopka („klapna“) kojom se mijenja ulazni poprečni presjek, a time se regulira brzina strujanja zraka ovisno o veličini čestica koje želimo izdvojiti iz materijala. Teži materijal (čestice bakra) pada ispod separatora u spremnik i takav je spreman za tržište, dok se lakši materijal usisava i odvodi dalje na separator zračnim vrtlogom („ciklon“).



Slika 26. Unutrašnjost zračnog separatora tipa „cik-cak”



Slika 27. Princip rada ciklona [30]



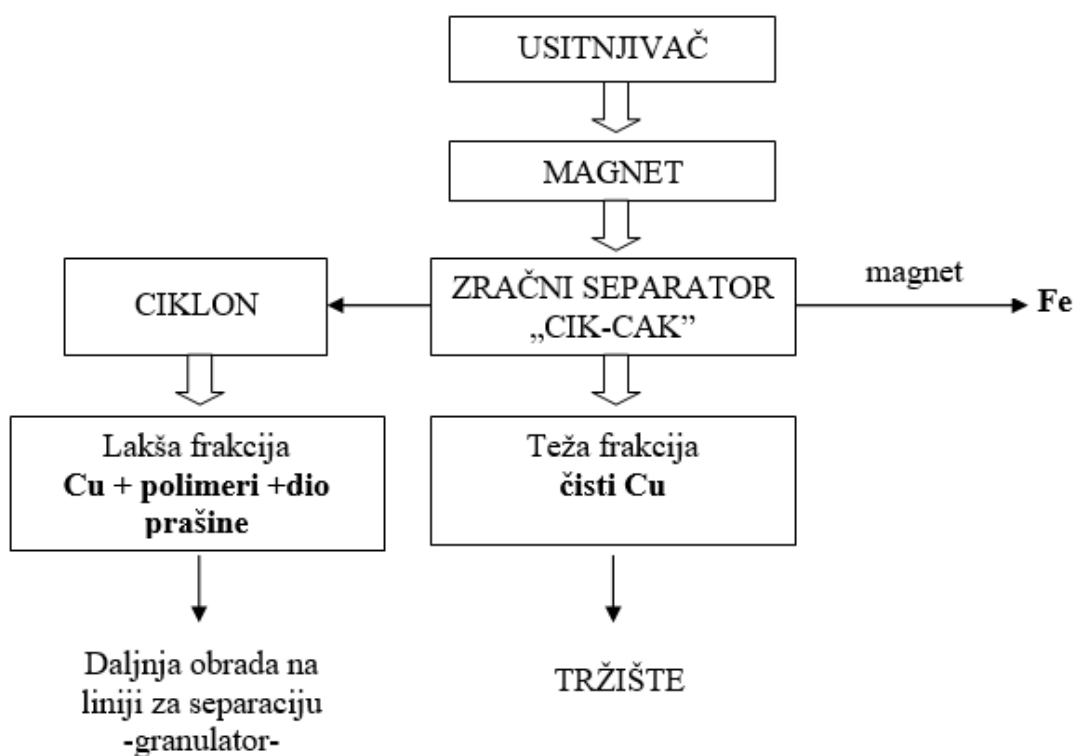
Slika 28. Izlazni materijal iz ciklona i izlazni materijal iz zračnog separatora

Zrak se usisava pomoću ventilatora i ciklona, koji u separatoru podiže sitne čestice prema usisnoj cijevi. U gornjem dijelu cijevi nalazi se pomična zaklopka kojom se regulira usisavanje u ciklon i padajući materijal. U ciklonu dolazi do kovitlanja lakšeg materijala prema gore i njegovog izdvajanja pomoću zračne struje [Slika 27], koja se stvara preko ventilatora. Iz ciklona se usisava prašina, odakle se zrak s prašinom odvodi na filter (na tzv. „čarape“), te se prašina taloži u podnožju filtra u dvije vreće [Slika 28]. Učinkovitost ciklona iznosi oko 95 %.

Mješavina polimera, bakra i zaostale prašine (oko 5 – 10 %) iz ciklona pomoću kontinuiranog ventila pada u spremnik i dalje se obrađuje na procesnoj liniji za separaciju.



Slika 29. Ventilator i filtri



Slika 30. Dijagram toka materijala na liniji za usitnjavanje

4.1.2.2. *Izračun troškova linije za usitnjavanje*

Kako bi se izračunao udio dobivenog bakra nakon obrade otpadnih kablova na liniji za usitnjavanje, prikazane su masene analize obrađenih otpadnih kablova - količina ulaznog materijala i izlazne frakcije (Tablica 4 i Tablica 5).

Tablica 4. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 28. 8. 2019.

Ulazni materijal, kg	Dobivene frakcije		
	Frakcija	Količina, kg	Udio, %
76 220 kg	Žica 10 mm	66 670	87,50
	Cu nakon „cik-caka”	4 144	5,44
	Fe	4 353	5,70
	prašina	944	1,20
	gubitak	109	0,14

Tablica 5. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 25. 9. 2019.

Ulazni materijal, kg	Dobivene frakcije		
	Frakcija	Količina, kg	Udio, %
24 348 kg	Žica 10 mm	20 800	85,40
	Cu nakon „cik-caka”	562	2,30
	Fe	1 966	8,10
	prašina	718	3,0
	gubitak	302	1,20

Iz masenih analiza se izračunom došlo do zaključka da samljevene žice na 10 mm ima oko 86 %. Ta frakcija ide na daljnju obradu na liniju za separaciju. Bakar nakon zračnog separatora i čelik nakon magnetskog separatora su spremni za tržište, dok se prašina šalje na zbrinjavanje.

Za izračun troška obrade otpadnih kablova, potrebno je poznavati snage pojedinih linija i njihov kapacitet. Kapacitet linije za usitnjavanje iznosi 540 kg/h. U Tablici 6 su prikazane radne snage pojedinih dijelova linije. Ukupna radna snaga iznosi 86 kW.

Tablica 6. Radne snage dijelova linije za usitnjavanje

Dio linije	Snaga, kW
Ulazna traka	1,5
Dozator	1
Granulator	75
Horizontalna traka	0,75
Transportna traka	0,50
Zračni separator + ciklon	2
Ventilator	5
Filter	0,25
Ukupna snaga linije	86 kW

1. Izračun troška električne energije linije za usitnjavanje

Za procjenu troška električne energije za liniju za usitnjavanje snage 86 kW i kapaciteta od 540 kg/h, potreban je i podatak o cijeni industrijske radne energije koja se koristi u pogonu, a koja iznosi 0,21 kn/kWh [29].

$$\begin{aligned}
 \text{snaga [kW]} \cdot \text{radna energija} \left[\frac{\text{kn}}{\text{kWh}} \right] &= \text{trošak električne energije} \left[\frac{\text{kn}}{\text{h}} \right] \\
 86 \cdot 0,21 &= 13,76 \text{ kn/h} \\
 \frac{13,76 \text{ kn/h}}{0,540 \text{ t/h}} &= \mathbf{33,44 \text{ kn/t}}
 \end{aligned}$$

2. Izračun amortizacije linije za usitnjavanje na 5 godina

Nabavna vrijednost linije za usitnjavanje iznosi približno 200 000 €. U jednoj godini linija radi oko 4 000 radnih sati (radom u dvije smjene), što u 5 godina iznosi 20 000 radnih sati [29].

$$\frac{\text{nabavna vrijednost}[\text{€}]}{\text{radni sati u 5 godina}} = \text{trošak stroja} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right]$$

$$\frac{200\,000}{20\,000} = 10 \text{ €/h}$$

Godišnji trošak amortizacije linije za usitnjavanje, amortizirane na pet godina, kapaciteta od 540 kg/h, može se stoga procijeniti na:

$$\frac{10 \text{ €/h}}{0,540 \text{ t/h}} = 18,50 \frac{\text{€}}{\text{t}} \left(\cdot 7,455 \frac{\text{kn}}{\text{€}} \right) = \mathbf{137,92 \text{ kn/h}}$$

3. Izračun troška održavanja linije za usitnjavanje na godišnjoj razini

Na usitnjivaču je potrebno svakih 4 000 radnih sati (jednom godišnje) promijeniti rezne pločice (noževe). Cijena novih noževa iznosi oko 2 000 € [29].

$$\frac{\text{trošak novih dijelova}[\text{€}]}{\text{radni sati}[\text{h}]} = \text{trošak održavanja} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right]$$

$$\frac{2\,000}{4\,000} = 0,5 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

Nadalje, trošak godišnjeg održavanja linije za usitnjavanje koja ima kapacitet od 540 kg/h biti će:

$$\frac{0,5}{0,540} = 0,93 \frac{\text{€}}{\text{t}} \left(\cdot 7,455 \frac{\text{kn}}{\text{€}} \right) = \mathbf{6,93 \text{ kn/t}}$$

4. Trošak radnika

Za rad na liniji za usitnjavanje potreban je jedan radnik čija prosječna satnica iznosi 33 kn/h [29], odnosno podijeljeno s kapacitetom linije od 540 kg/h:

$$\frac{33}{0,540} = \mathbf{61 \text{ kn/t}}$$

Ukupni trošak rada linije za usitnjavanje iznosi 239,29 kuna po toni obrađenog materijala prikazan je u Tablici 7.

Tablica 7. Ukupni troškovi linije za usitnjavanje

	Linija za usitnjavanje
Snaga, kW	86
Kapacitet, kg/h	540
Trošak el. energije, kn/t	33,44
Trošak amortizacije (godišnje), kn/t	137,92
Trošak održavanja (godišnje), kn/t	6,93
Trošak radnika, kn/t	61
Ukupno:	239,29 kn/t

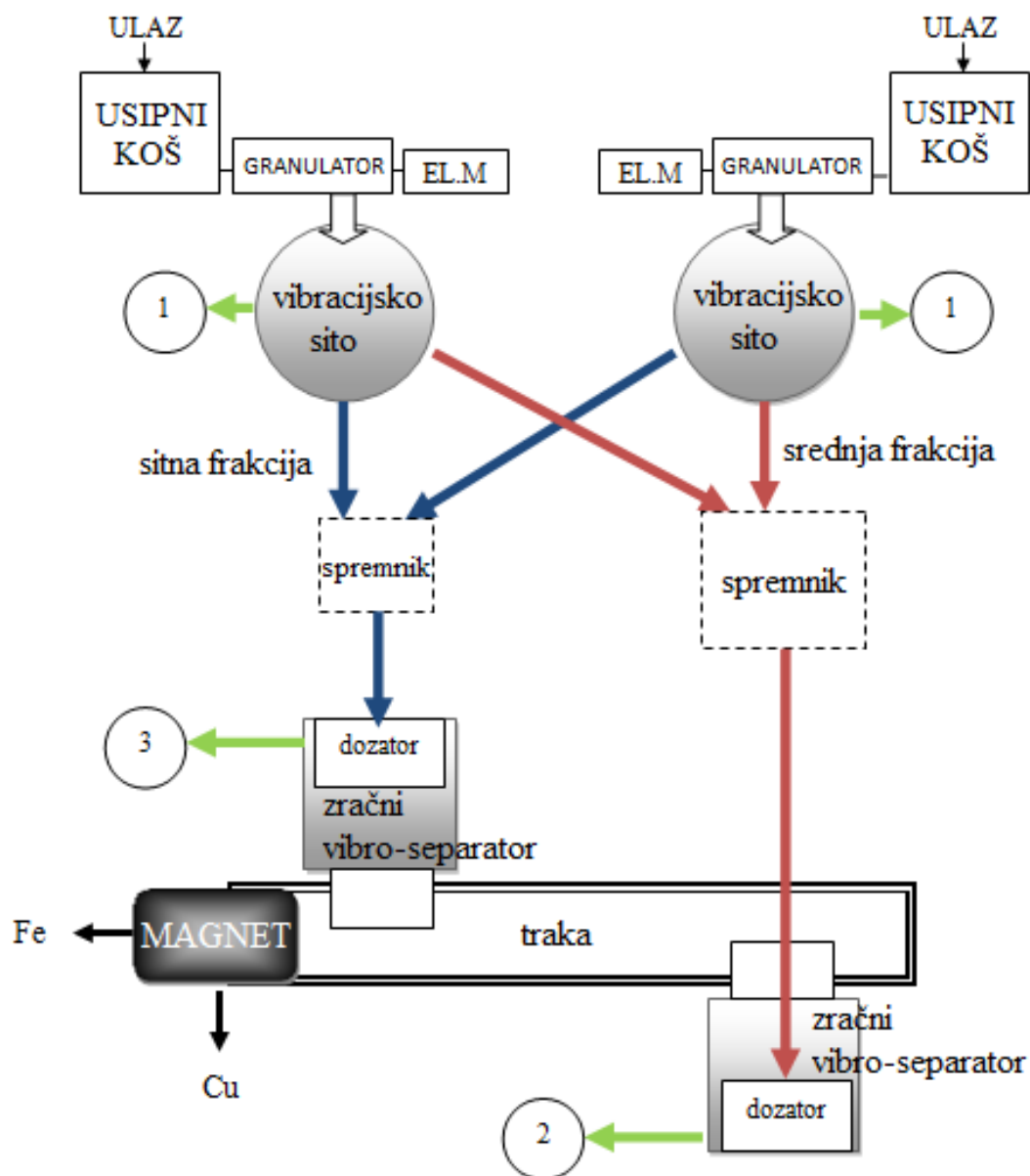
4.1.3. Separacija

Treći korak obrade se također odvija u pogonu u Donjoj Bistri. Frakcija bakra i polimera nastala nakon zračnog separatora i ciklona, dolazi na liniju za odvajanje bakra talijanskog proizvođača Guidetti.

Osnovni dijelovi procesne linije za separaciju bakra su:

- dva dozatora i dvije pokretne trake
- dva granulatora
- dva vibracijska sita sa usisnim cijevima
- horizontalna pokretna traka
- pužni transporter
- spremnici
- dva zračna vibroseparatora
- izlazna pokretna traka s magnetom
- sustav filtriranja prašine (ciklon, ventilator i filter).

Radi povećanja kapaciteta linija se sastoji od dva ulazna dozatora, dva granulatora i dva vibracijska sita nakon kojih se frakcije, ovisno o veličini čestica, skupljaju u dva spremnika. U jednom spremniku je sitna frakcija, a u drugom srednja. Tako odvojene frakcije se pužnim transporterima odvoje na zasebne zračno-vibracijske separatore. Slikom 31 je prikazan pojednostavljeni tok materijala kroz liniju.



Slika 31. Dijagram toka materijala na liniji za separaciju

Vreća 1 → izlaz krupne frakcije polimera

Vreća 2 → izlaz srednje frakcije polimera

Vreća 3 → izlaz sitne frakcije polimera

4.1.3.1. Postupak rada linije za separaciju

Ulazni materijal na liniju za separaciju je izlazni materijal s linije za usitnjavanje, nastao poslije ciklona. Materijal se viličarem ubacuje u dozator (usipni koš) (1). Ispod dozatora je pokretna traka (2) kojom materijal pada kroz dozirni otvor u manji koš u usisnu cijev (3) koja materijal dovlači do granulatora (4) [Slika 32].



Slika 32. Ulaz materijala na liniji za separaciju

Ulazni materijal iz dozatora pada na pokretnu traku do ulaza u usipni koš granulatora. Na granulatoru se nalaze pločice koje uslijed trenja i rotacije materijal dodatno usitnjavaju. Od siline udaraca odvojeni komadići bakrene žice se deformiraju u oblik kuglice (granule) [Slika 33]. Granulator također čisti materijal od prašine, vlage i laka s izolacije kako bi odvajanje na zračnom separatoru bilo učinkovitije.

Tehničke karakteristike granulatora [Slika 34]:

Snaga: 55 kW

Napon: 400 V

Maksimalna struja: 136 A

Frekvencija: 50 Hz



Slika 33. Unutrašnjost granulatora



Slika 34. Tehničke karakteristike granulatora



Slika 35. Granulator i elektromotor

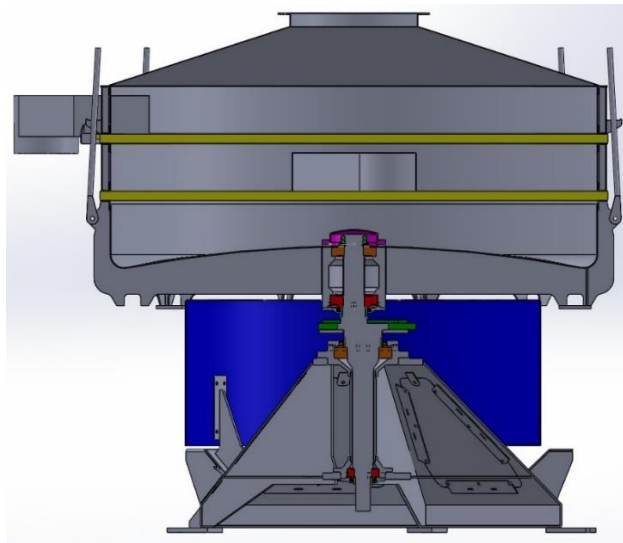
Granulator je pokretan elektromotorom:

Snaga: 9,2 kW

Brzina vrtnje: 2 900 o/min

Prašina se odvodi usisnim cijevima, dok ostali teži materijal pada na stroj za prosijavanje, vibracijsko sito [Slika 36]. Vibracijsko sito se sastoji od dviju žičanih mreža smještenih u unutrašnjosti: krupnija mreža za odvajanje čestica većih od 3 mm i mreža srednje veličine otvora za čestice veličine od 0,5 do 3 mm. Vibriranjem sita prosijava se materijal koji je doveden s granulatora. Na gornjoj mreži (3 mm) ostaje najkrupnija frakcija. Srednja frakcija ostaje na donjoj mreži (0,5 mm), a najsitnija pada u donju posudu. Na gornjem dijelu separatora nalazi se usisna cijev za prašinu.

Vibracijsko sito se nalazi na ekscentričnom vratilu koji omogućuje gibanje čestica u vertikalnom i horizontalnom smjeru što uslijed inercije pospješuje njihovo odvajanje. Na Slici 36 je prikazan presjek unutrašnjosti sita i ekscentrično vratilo.



Slika 36. Presjek vibracijskog sita [29]



Slika 37. Vibracijsko sito

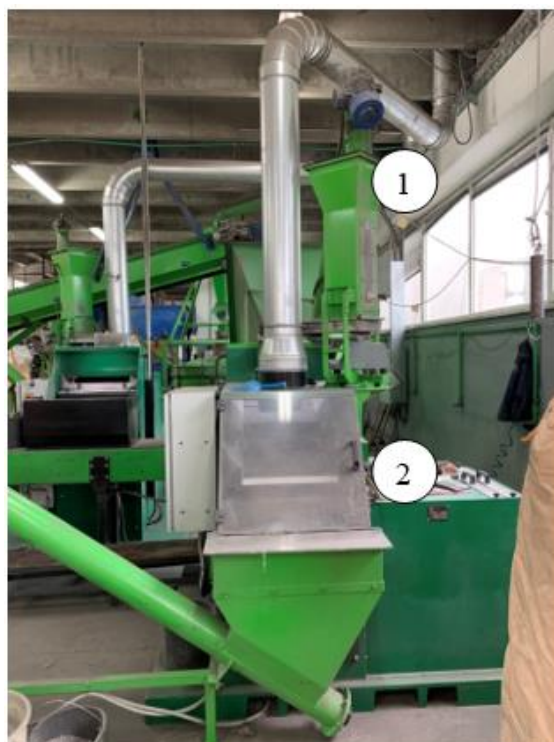
Sitna frakcija materijala iz donje posude s oba vibracijska sita se pužnim transporterima (1) odvodi u veliki međuspremnik. U paralelni međuspremnik transportnim trakama ulazi srednja frakcija sa srednje mreže (velične otvora 0,5 mm) također iz oba vibracijska sita.

S gornje mreže odvaja se najkrupniji materijal te se pužnim transporterom (3) odvodi u vreću. Ta frakcija sadrži najviše polimernog materijala i nešto malo bakra, ovisno o ulaznom materijalu [Slika 38].



Slika 38. Gornja krupna mreža sita (> 3 mm) i krupna izlazna frakcija

Srednja i sitna frakcija se iz međuspremnika pužnim transporterima dovode do vibracijskog dozatora (1) iz kojeg materijal ulazi u zračni vibroseparator (2) [Slika 39]. Zračni vibroseparator je vibracijski stol sa zračnom strujom (odozdo) koji vibracijama odvaja bakar, aluminij i sitni miješani polimer.



Slika 39. Vibracijski dozator i zračni vibroseparator

Kroz sitne otvore vibracijskog stola odozdo struji zrak i podiže lagane čestice koje usisava gornja cijev (velika metalna cijev iznad). Uslijed vibracija, zračne struje i razlike u masi, bakrene granule se prenose na gornji dio stola i padaju na pokretnu traku s druge strane vibracijskog stola [Slika 40].



Slika 40. Zračni vibracijski separator

Preostali miješani materijal polimera (uz vrlo malo bakra i aluminija), uslijed vibracija i razlike u masi se prenosi na donji dio vibracijskog stola i pada u usipni koš te se pužnim transporterom odvodi u vreću [Slika 41].

Miješani materijal preostalog bakra i aluminija te polimera sa sredine zračnog separatora se odvaja ručno te ponovno propušta kroz liniju za separaciju.



Slika 41. Pužni transporter za polimerni materijal

Bakrene granule, neznatno pomiješane s drugim materijalima, iz separatora padaju na pokretnu horizontalnu traku. Na kraju trake i iznad nje se nalazi magnet koji podiže i odvaja sitne magnetne čestice (Fe) dok bakreni materijal pada u spremnik [Slika 42, Slika 43].



Slika 42. Pokretna traka, magnet i izlazne frakcije



Slika 43. Izlazna frakcija bakra i izlazna frakcija čelika

4.1.3.2. Izračun troškova linije za separaciju

Kako bi se izračunao udio dobivenog bakra nakon obrade otpadnih kablova na liniji za separaciju, u Tablici 8, 9 i 10 prikazane su masene analize s količinom ulaznog materijala i izlaznih frakcija.

Tablica 8. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 5. 9. 2019.

Ulazni materijal, kg	Dobivene frakcije		
	Frakcija	Količina, kg	Udio, %
9 454 kg	Cu	3 141	33,22
	Cu + Al	25	0,26
	Fe	36	0,38
	polimeri - sitni	510	5,39
	polimeri - srednji	2 578	27,27
	polimeri - krupni	2 775	29,35
	prašina	320	3,38
	ostatak (gubitak)	69	0,73

Tablica 9. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 27. 9. 2019.

Ulazni materijal, kg	Dobivene frakcije		
	<i>Frakcija</i>	<i>Količina, kg</i>	<i>Udio, %</i>
14 322 kg	Cu	4 525	31,59
	Cu + Al	93	0,65
	Fe	48	0,34
	polimeri - sitni	911	6,36
	polimeri - srednji	4 092	28,57
	polimeri - krupni	3 940	27,51
	prašina	524	3,66
	ostatak (gubitak)	189	1,32

Tablica 10. Masena analiza obrađenih otpadnih kablova dana 16. 10. 2019.

Ulazni materijal, kg	Dobivene frakcije		
	<i>Frakcija</i>	<i>Količina, kg</i>	<i>Udio, %</i>
11 183 kg	Cu	3 283	29,36
	Cu + Al	16	0,14
	Fe	33	0,30
	polimeri - sitni	469	4,19
	polimeri - srednji	3 466	30,99
	polimeri - krupni	3 604	32,23
	prašina	300	2,68
	ostatak (gubitak)	12	0,11

Udio čistog bakra dobivenog na liniji za separaciju iznosi oko 30 % i odmah je spreman za tržište. Mješavina bakra i malih količina aluminija te frakcije polimera se propuštaju još jednom kroz liniju za separaciju kako bi se izdvojile zaostale granule bakra. Prašina se šalje na zbrinjavanje, a čelik i aluminij su također spremni za tržište.

Kapacitet linije za separaciju iznosi 571 kg/h. U Tablici 11 su prikazane radne snage pojedinih dijelova linije. Ukupna snaga linije iznosi 122,50 kW.

Tablica 11. Radne snage dijelova linije za separaciju

Dijelovi linije	Broj dijelova	Snaga, kW	Ukupna snaga, kW
Dozator	2	0,5	1
Granulator	2	55	110
Vibracijsko sito	2	1,5	3
Transportni puž	3	0,5	1,50
Transportna traka	1	0,75	0,75
Zračni vibracijski stol	2	0,25	0,50
Magnet	1	0,75	0,75
Ventilator	1	1	1
Usisni sustav	1	4	4
Ukupna snaga linije:			122,50 kW

1. Izračun troška električne energije linije za separaciju

Cijena industrijske radne energije koja se koristi u pogonu iznosi 0,21 kn/kWh [29] pa za ukupnu snagu linije za separaciju, slijedi trošak električne energije po satu rada linije:

$$snaga[kW] \cdot radna\ energija\left[\frac{kn}{kWh}\right] = trošak\ električne\ energije\left[\frac{kn}{h}\right]$$

$$122,50 \cdot 0,21 = 25,73\ kn/h$$

Uzevši u obzir da je kapacitet linije za separaciju 571 kg/h, slijedi:

$$\frac{25,73}{0,571} = 45,06\ kn/t$$

2. Izračun amortizacije linije za separaciju na 5 godina

Nabavna vrijednost linije za separaciju iznosi približno 250 000 €. U jednoj godini linija radi 4 000 radnih sati (radom u dvije smjene), što u 5 godina iznosi 20 000 radnih sati [29].

$$\frac{\text{nabavna vrijednost}[\text{€}]}{\text{radni sati u 5 godina}} = \text{trošak stroja} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right]$$

$$\frac{250\,000}{20\,000} = 12,50 \text{ €/h}$$

Uz podatak o kapacitetu linije za separaciju od 571 kg/h, slijede troškovi amortizacije linije po toni obrađenog otpada:

$$\frac{12,50}{0,571} = 21,90 \frac{\text{€}}{\text{t}} \left(\cdot 7,455 \frac{\text{kn}}{\text{€}} \right) = \mathbf{163,27 \text{ kn/t}}$$

3. Izračun troška održavanja linije za separaciju na godišnjoj razini

Na granulatoru je potrebno svakih 500 radnih sati promijeniti pločice za granuliranje. Cijena novih pločica iznosi približno 500 € [29].

$$\frac{\text{trošak novih dijelova}[\text{€}]}{\text{radni sati}[\text{h}]} = \text{trošak održavanja} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right]$$

$$\frac{500}{500} = 1 \frac{\text{€}}{\text{h}}$$

Trošak godišnjeg održavanja linije kapaciteta 571 kg/h po toni obrađenog otpada iznosi:

$$\frac{1}{0,571} = 1,57 \frac{\text{€}}{\text{t}} \left(\cdot 7,455 \frac{\text{kn}}{\text{€}} \right) = \mathbf{11,70 \text{ kn/t}}$$

4. Trošak radnika

Za rad na liniji za separaciju potreban je jedan radnik čija prosječna satnica iznosi 33 kn/h [29], odnosno podijeljeno sa kapacitetom linije od 571 kg/h:

$$\frac{33}{0,571} = \mathbf{57,80 \text{ kn/t}}$$

Ukupni trošak rada linije za separaciju bakra iznosi 277,83 kune po toni obrađenog otpadnog materijala, što je prikazano Tablicom 12.

Tablica 12. Ukupni troškovi linije za separaciju

	Linija za separaciju
Snaga, kW	122,50
Kapacitet, kg/h	571
Trošak el. energije, kn/t	45,06
Trošak amortizacije (5 god), kn/t	163,27
Trošak održavanja (u 1 god), kn/t	11,70
Trošak radnika, kn/t	57,80
Ukupno:	277,83 kn/t

4.1.4. Ukupni troškovi obrade otpadnih kablova mehaničkim putem

Ukupni troškovi su prikazani u Tablici 13 i iznose 551 kunu po toni obrađenih otpadnih kablova.

Tablica 13. Ukupni troškovi obrade otpadnih kablova mehaničkim putem

	Usitnjivač	Linija za usitnjavanje	Linija za separaciju
Snaga, kW	32	86	122,50
Kapacitet, kg/h	2 000	540	571
Trošak el. energije, kn/t	3,36	33,44	45,06
Trošak amortizacije (5 god), kn/t	9,32	137,92	163,27
Trošak održavanja (u 1 god), kn/t	4,70	6,93	6,93
Trošak radnika, kn/t	16,50	61	57,80
Ukupno po liniji:	33,88 kn/t	239,29 kn/t	277,83 kn/t
Ukupni trošak obrade:	551 kn/t		

4.1.5. Analiza dobivenog bakra

Analizu čistoće dobivene frakcije bakra je napravila austrijska tvrtka Montanwerke Brixlegg AG. Čistoća bakra dobivenog mehaničkim putem je 99,020 %.

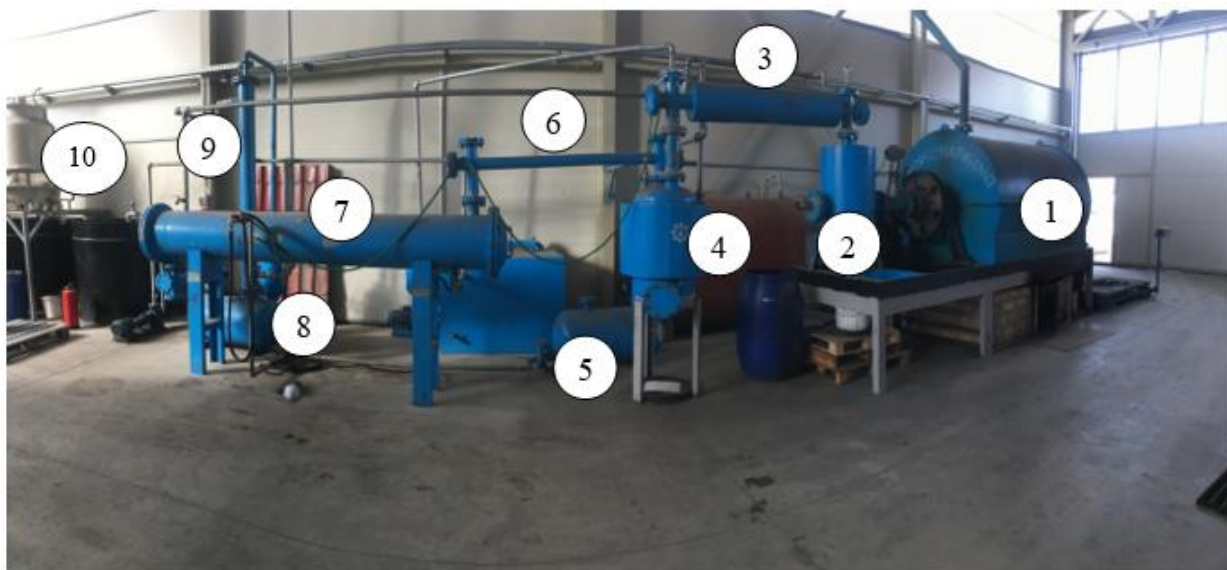


Slika 44. Granule bakra dobivene na liniji za separaciju

4.2. Postupak obrade otpadnih kablova pirolizom

Piroliza je toplinska razgradnja organskog materijala pri povišenoj temperaturi, odsutnosti kisika i niskim tlakom što uključuje istodobnu promjenu kemijskog sastava i stanja te nepovratnost procesa. Materijal se zagrijava u vakuumskoj peći do određene temperature te kada se zadana temperatura dosegne slijedi proces hlađenja. U procesu dolazi do destilacije organskog dijela otpadnog materijala u pirolitičko ulje.

Postupak vakuumske pirolize je mogući alternativni postupak obrade otpadnih kablova te će u nastavku biti opisan princip rada. Postupak se odvija pod niskim tlakom (vakuumom) od 10^{-4} do 10^{-3} bara (10 do 100 Pa) i pod temperaturom od 200 do 400 °C. Na Slici 45 prikazana je procesna linija pirolize i označeni njezini osnovni dijelovi.



Slika 45. Procesna linija pirolize

Osnovni dijelovi pirolitičke peći:

1. pirolitički reaktor/peć
2. separator ulja i vode
3. cijev za hlađenje plinova
4. separator ulja i vode
5. spremnik za ulje
6. cijev za hlađenje plinova
7. uređaj za kondenzaciju/hlađenje
8. spremnik za ulje
9. sustav za pročišćavanje plinova
10. spremnici i uređaj za hlađenje vode.

Pirolitičkoj obradi prethodi primarno usitnjavanje otpadnih kablova kao i kod mehaničke obrade. Tako pripremljeni materijal iz pogona u Virovitici ulazi u pirolitički proces.

4.2.1. Postupak rada pirolize

Oporaba otpadnih kablova u uređaju za vakuumsku pirolizu odvija se na način da se materijal ubacuje u reaktor pirolitičke peći [Slika 46] gdje se zagrijava na radnu temperaturu od 120 do 200 °C. U prostoru reaktora kontinuirano se održava vakuum. Pri zagrijavanju materijala odvija se proces razgradnje organskih molekula (polimera, gume) pri čemu ove molekule prelaze u plinsku fazu. Proces je zatvoren, a kao pogonsko gorivo za zagrijavanje reaktora koristi se gradski plin. Nakon nekog vremena u reaktor se dovode nastali pirolitički plinovi koji imaju visoku toplinsku vrijednost izgaranja.



Slika 46. Reaktor pirolitičke peći



Slika 47. Gorionik



Slika 48. Ubacivanje materijala u reaktor

Nastali pirolitički plinovi ulaze u prvi separator u kojem se odvajaju voda i uljna frakcija. Dio mješavine vode i pirolitičkog ulja ispušta se otvaranjem ventila na dnu separatora. Ostali plinovi prolaze kroz cijev za hlađenje i dolaze u sljedeći separator, u kojem se također odvaja dio pirolitičkog ulja te se sprema u spremnik [Slika 49].



Slika 49. Separatori i cijev za hlađenje

Vodena para i plinovi prolaze dalje drugom cijevi za hlađenje do uređaja za kondenzaciju [Slika 50]. Kondenzat pirolitičkog ulja ulazi u spremnik za ulje, dok se nekondenzirani dimni plinovi vraćaju u gorionik. Prije ispuštanja u okoliš, plinovi se neutraliziraju i pročišćuju u sustavu za pročišćivanje, gdje prolaze kroz vodeni filtar i filtar s aktivnim ugljenom. Plin iz procesa sadrži vodik (H_2), metan (CH_4), ugljični monoksid (CO) i ugljični dioksid (CO_2).



Slika 50. Uređaj za kondenzaciju

Topla voda iz sustava se skuplja u dva spremnika, a pumpa potiskuje vodu u uređaj za hlađenje te ohlađena voda ponovno cirkulira u sustav. U sustavu je 2 000 litara vode.



Slika 51. Spremnici i uređaj za hlađenje vode

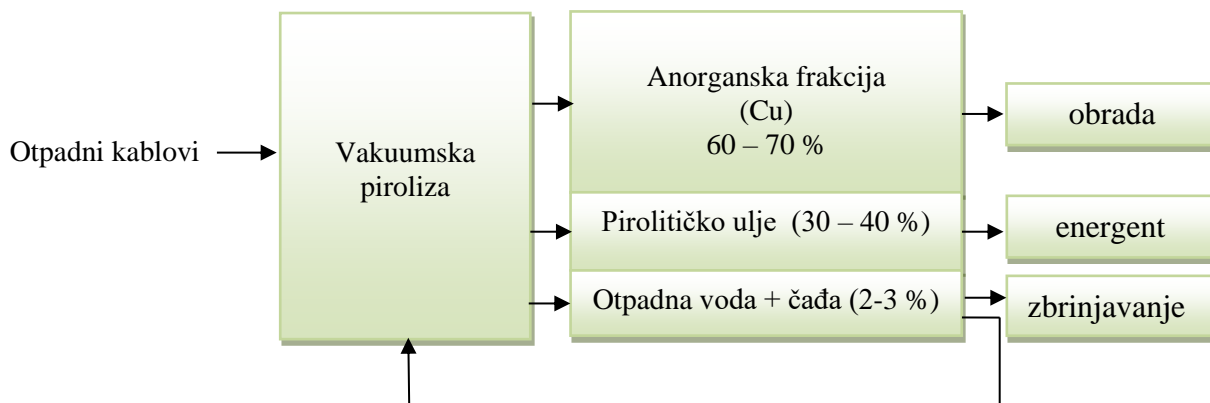
U pirolitičkom reaktoru ostaje anorganska frakcija (Cu) koja se nakon završenog procesa podvrgava daljnjoj obradi taljenjem. Frakcija nastalog pirolitičkog ulja se koristi kao energent u cementnoj industriji. Gustoća ulja iznosi $1,015 \text{ g/cm}^3$.



Slika 52. Frakcija anorganskog otpada i pirolitičko ulje

Kapacitet instalirane pokusne pirolitičke peći iznosi 500 kg u 8 sati (jednoj smjeni), odnosno 62,5 kg/h. Iz 500 kg ulaznog materijala (otpadnih kablova) dobilo se:

- 165 kg pirolitičkog ulja → 33 %
- 320 kg anorganske komponente u reaktoru → 64 %
- Gubici (otpadna voda, čađa) → 3 %



Slika 53. Shematski prikaz pirolize otpadnih kablova

4.2.1.1. Taljenje

Nakon procesa pirolize dobivena anorganska frakcija šalje se na daljnju obradu u rafineriju u austrijsku tvrtku Montanwerke Brixlegg AG. Nakon obrade anorganske frakcije u rafineriji, izdvojen je uzorak materijala u svrhu izrade ovog rada. Uzorak je rastaljen u niskofrekventnoj laboratorijskoj indukcijskoj peći u Spectra mediji. Indukcijska peć je talijanskog proizvođača C.E.I.A. SpA [Slika 54].

Tehničke karakteristike peći:

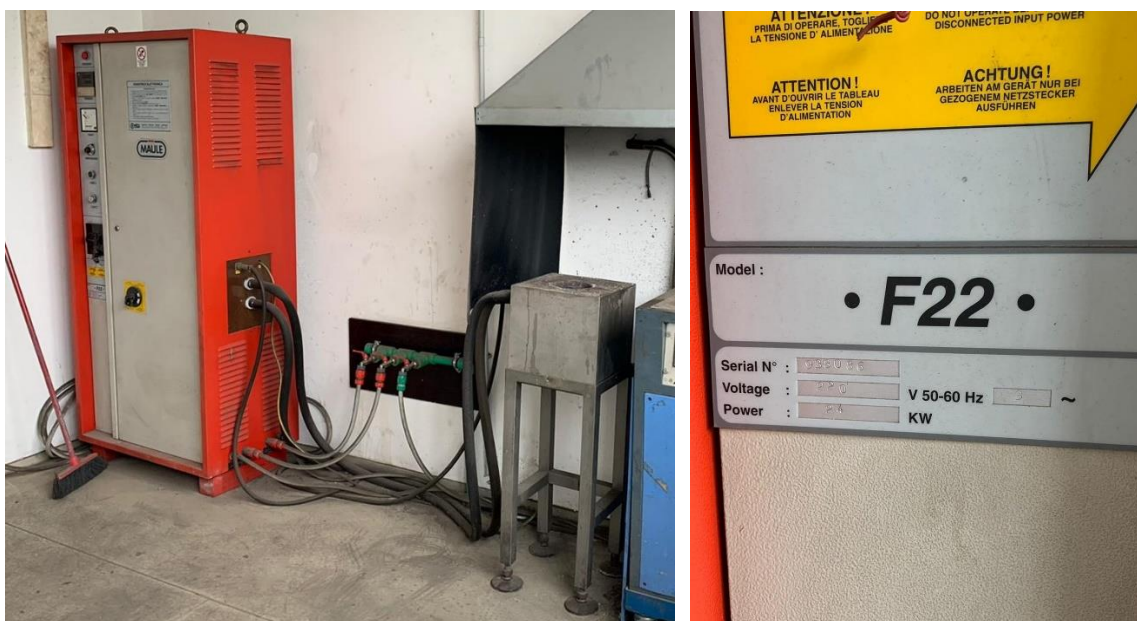
Model: F 22

Napon: 220 V

Snaga: 24 kW

Frekvencija: 50 – 60 Hz

Materijal dobiven pirolizom i rafinacijom se tali na 1 150 °C, dok talište čistog bakra iznosi 1 085 °C.



Slika 54. Indukcijska peć

Rastaljeni metal se izljeva u kalup te se dobiva odljevak bakra [Slika 55].



Slika 55. Odljevak pirolitičkog bakra

4.2.2. Analiza sastava bakra dobivenog pirolizom

Pomoću uređaja za rendgensku fluorescentnu analizu – XRF (eng. *X-ray Fluorescence Analysis*), ručnog XRF spektrometra tipa S1 TITAN njemačke tvrtke Bruker, napravljena je analiza kemijskog sastava dobivenog odljevka [Slika 56].

Dobiveni odljevak bakra se sastoji od: 98,59 % bakra (Cu), 0,93 % iridija (Ir), 0,17 % željeza (Fe), 0,11 % cinka (Zn), 0,07 % kroma (Cr) i ostalih elemenata s vrlo malim udjelom.

Izmjerena čistoća bakra odgovara mjernom etalonu uređaja za bakar čistoće Cu 99,5 %.



Slika 56. Ručni XRF spektrometar i dobivena analiza

4.2.3. Izračun troškova pirolize

1. Izračun troška električne energije za pirolitički postupak

Cijena industrijske radne energije koja se koristi u pogonu iznosi 0,21 kn/kWh [29]. U procesu pirolize je potrebna električna energija snage 10 kW za pogon pumpe i elektromotora. Kapacitet pirolitičke peći iznosi 62,5 kg/h.

$$\begin{aligned} \text{snaga [kW]} \cdot \text{radna energija} \left[\frac{\text{kn}}{\text{kWh}} \right] &= \text{trošak električne energije} \left[\frac{\text{kn}}{\text{h}} \right] \\ 10 \cdot 0,21 &= 2,1 \text{ kn/h} \\ \frac{2,1}{0,0625} &= \mathbf{33,60 \text{ kn/t}} \end{aligned}$$

2. Izračun amortizacije linije na 5 godina

Nabavna vrijednost linije iznosi oko 50 000 €. U jednoj godini linija bi mogla raditi 4 000 radnih sati u dvije smjene, što bi u 5 godina iznosilo 20 000 radnih sati [29].

$$\begin{aligned} \frac{\text{nabavna vrijednost [€]}}{\text{radni sati u 5 godina}} &= \text{trošak stroja} \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right] \\ \frac{50\,000}{20\,000} &= 2,50 \text{ €/h} \\ \frac{2,50}{0,0625} &= 40 \frac{\text{€}}{\text{t}} \left(\cdot 7,455 \frac{\text{kn}}{\text{€}} \right) = \mathbf{298,20 \text{ kn/t}} \end{aligned}$$

3. Izračun troška potrošnje plina

Za obradu 500 kg usitnjenih otpadnih kablova potrebna je jedna boca plina od 30 litara. Cijena jedne boce iznosi 160,20 kn. Za obradu 1 tone otpada trošak plina je 320,40 kn [29].

4. Trošak radnika

Za postupak obrade pirolizom potreban je jedan radnik čija prosječna satnica iznosi 33 kn/h [29], odnosno podijeljeno s kapacitetom:

$$\frac{33}{0,0625} = \mathbf{528 \text{ kn/t}}$$

4.2.4. Ukupni troškovi obrade otpadnih kablova pirolizom

Ukupni trošak dobivanja bakra pirolitičkim putem iznosi 1 214,80 kuna po toni obrađenog otpadnog materijala, s uključenim troškom primarnog usitnjavanja (poglavlje 4.2.), što je prikazano Tablicom 14.

Tablica 14. Ukupni troškovi pirolize

	Usitnjivač	Piroliza
Snaga, kW	32	10
Kapacitet, kg/h	2 000	62,50
Trošak el. energije, kn/t	3,36	33,60
Trošak amortizacije (5 god), kn/t	9,32	298,20
Trošak plina, kn/t	-	320,40
Trošak održavanja, kn/t	4,70	-
Trošak radnika, kn/t	16,50	528
Ukupno po liniji:	33,88 kn/t	1 180,20 kn/t
Ukupni trošak obrade:	1 214,80 kn/t	

5. USPOREDBA I ANALIZA OBRADNE OTPADNIH KABLOVA

5.1. Usporedba troškova nakon primarnog usitnjavanja otpadnih kablova mehaničkom i pirolitičkom metodom

U Tablici 15 su prikazani svi relevantni troškovi koji se pojavljuju u obje metode (mehaničkom i pirolitičkom) izdvajanja bakra iz otpadnih kablova, nakon grubog primarnog usitnjavanja. Otpadni kablovi se primarno usitnjavaju u Virovitici radi smanjenja volumena i lakšeg transporta do Donje Bistre. Ukupni troškovi po jedinici mase obrade pirolizom su dvostruko veći u odnosu na mehaničku obradu. Glavni razlog tome je taj što je instalirana pokusna pirolitička peć znatno manjeg kapaciteta nego instalirana mehanička linija za separaciju, što dovodi do toga da su ukupni troškovi pirolize relativno visoki u svim kategorijama (trošak električne energije, amortizacija opreme i trošak radnika).

Tablica 15. Usporedba troškova postupaka obrade

	Mehanička obrada	Piroliza
Snaga, kW	208,50	10
Kapacitet, kg/h	571	62,50
Trošak el. energije, kn/t	78,50	33,60
Trošak amortizacije (5 god), kn/t	301,19	298,20
Trošak održavanja, kn/t	13,86	-
Trošak plina, kn/t	-	320,40
Trošak radnika, kn/t	118,80	528
Ukupno po metodama:	517,12 kn/t	1 180,20 kn/t

Za optimalnu usporedbu bilo bi dobro razmotriti investiciju u pirolitičku peć kapaciteta usporedivog s kapacitetom mehaničke obrade otpadnih kablova, te pripadajuće troškove vezane uz veću cijenu pirolitičke peći.

5.2. Dijagram prihoda i rashoda u uporabi otpadnih kablova

Glavna razlika u uporabi otpadnih kablova prikazanom mehaničkom i pirolitičkom metodom je frakcija polimera nastala mehaničkom obradom, dok kod pirolitičke metode toga nema. Novonastali otpad polimera potrebno je zbrinuti nakon mehaničke obrade otpadnih kablova. Mogućnost zbrinjavanja je ovisna o zakonskoj regulativi u RH, koja trenutno propisuje da se inertni otpad (izlazna frakcija polimera) smije odlagati na zakonom predviđena odlagališta. U europskim zemljama koje imaju svoja energetska postrojenja za uporabu otpada (spalionice) takav materijal smije se koristiti kao energent. Zbrinjavanje otpadnih polimera iz mehaničkog procesa obrade otpadnih kablova predstavlja dodatni trošak, koji u vrijeme izrade ovog rada iznosi 110 kn/t [29].

Pirolitičko ulje nastalo u procesu pirolize ima svoju uporabnu vrijednost, ali se u ovom trenutku ne može uspješno prodati. Naime, cementnim industrijama je potrebna kontinuirana količina dobave pirolitičkog ulja, pa se stoga ono trenutno daje cementarama na uporabu bez naknade. Procijenjena tržišna vrijednost pirolitičkog ulja bila bi 1 kn/kg [29].

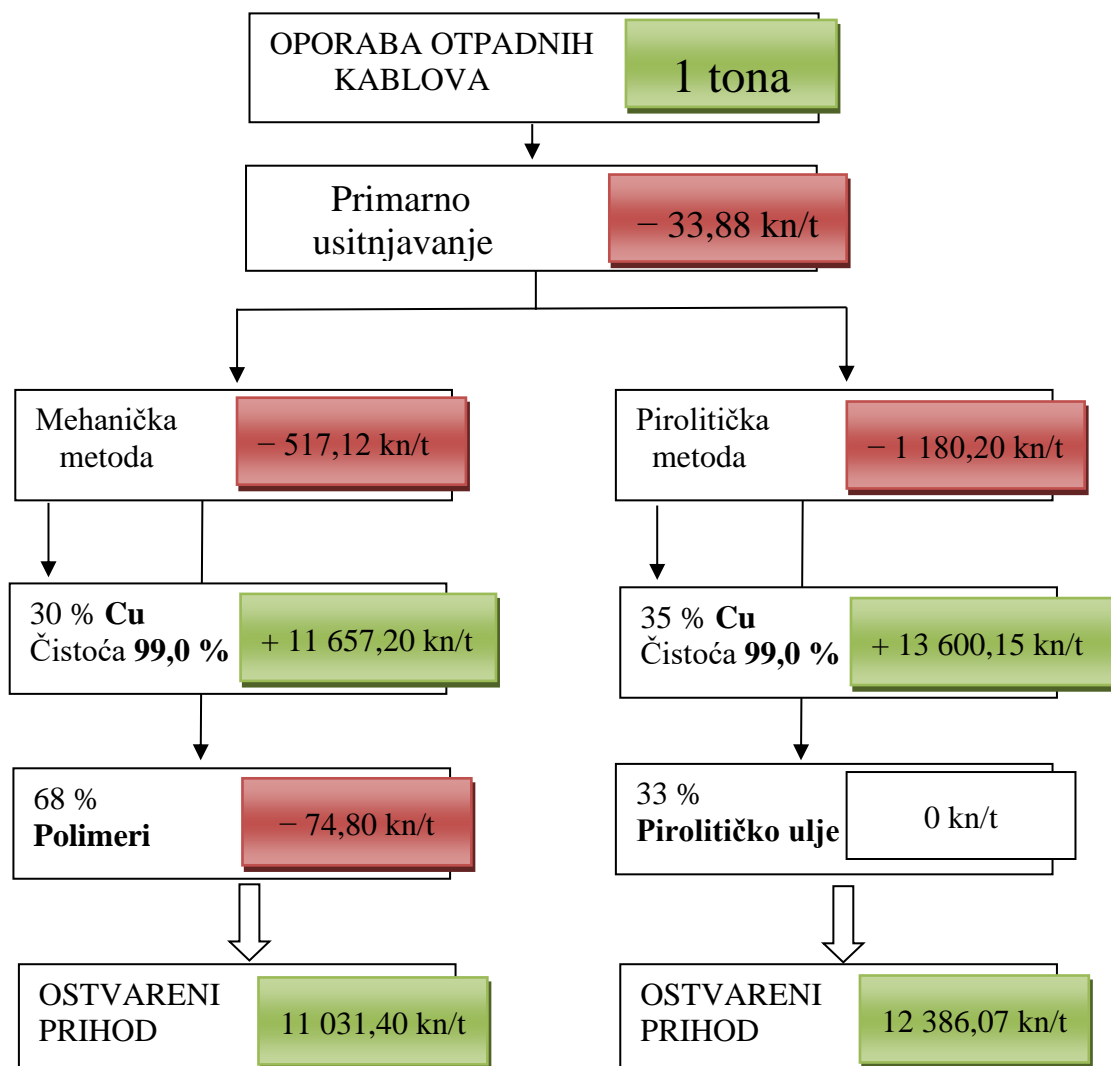
Cijena bakra na tržištu dana 3. 11. 2019. u razdoblju od proteklih 60 dana prema burzi metala Kitco Metals Inc. [31] je:

- najviša cijena = 5 933,88 USD/t (39 811,58 kn/t)
- najniža cijena = 5 590,26 USD/t (37 506,16 kn/t)

U daljnjem izračunu je korištena prosječna cijena bakra 5 762,07 USD/t (38 857,56 kn/t).



Slika 57. Kretanje cijene bakra na burzi Kitco Metals [31]



Slika 58. Grafički prikaz usporedbe prihoda i rashoda mehaničke i pirolitičke metode obrade otpadnih kablova

Dijagram prikazuje prihode i rashode mehaničke i pirolitičke obrade otpadnih kablova [Slika 58]. Pirolitička obrada je skuplja po toni obrađenog otpada iz razloga malog kapaciteta peći. Međutim, ovom metodom dobiva se veći udio bakra po obrađenoj toni otpada. Razlog tome je što u pirolitičkom procesu nema gubitaka kao kod mehaničke obrade gdje oni iznose 2 do 3 % po toni.

Naknada za odlaganje otpadnih polimera za pretpostaviti je da će s vremenom značajno rasti s obzirom da je Europskom Direktivom određeno da odlaganje nastalog otpada u procesima recikliranja treba biti iznimka.

6. ZAKLJUČAK

Cilj svake uporabe električnog i elektroničkog otpada je iskorištavanje metalnih komponenti s obzirom da su udjeli metala puno veći u toni otpada nego u toni pripadajuće rude. Prosječni minimalni sadržaj bakra u rudi je 0,5 % dok je prosječni sadržaj bakra u otpadnim kablovima iz elektroničkih i elektroničkih uređaja 30 %. U ovom radu su prezentirana i uspoređena dva moguća postupka recikliranja i uporabe električnih kablova - mehanički i pirolitički postupak obrade.

Prezentirana mehanička i pirolitička obrada otpadnih električnih kablova koristi se u tvrtki Spectra media d.o.o., ovlaštenog koncesionara za uporabu i recikliranje EE otpada u RH. Mehanička obrada u tvrtki Spectra media koristi se od samog početka uporabe EE otpada u Hrvatskoj, što datira od 2008. godine, te je do danas usavršena do visokih europskih standarda. Metoda pirolize uvedena je kao moguća alternativna metoda uporabe EE otpada. S obzirom da je riječ o uvođenju nove metode, u tvrtki je instalirana pokusna pirolitička linija manjeg kapaciteta.

Prikazanim i opisanim metodama obrade otpadnih kablova dobivene su frakcije bakra iste kvalitete i čistoće, što je bio glavni cilj ovog istraživanja, kako bi se išlo u daljnju razradu i ekonomsku analizu pojedinog postupka obrade otpadnih kablova u okviru ovog diplomskog rada.

Razlozi uvođenja pirolitičke metode leže u problemu zbrinjavanja otpadnih polimera. Naime, veliki nedostatak u mehaničkoj obradi su otpadni polimeri – novonastali otpad, čije zbrinjavanje predstavlja problem i trošak. Nadalje, troškovi održavanja uslijed mehaničkog trošenja strojeva direktno utječu na povećanje cijene obrade ovim postupkom.

Prednosti pirolitičkog postupka kao nove tehnologije u obradi otpadnih električnih kablova očituju se u dobivanju pirolitičkog ulja kao potencijalnog izvora prihoda, nestvaranju dodatnog otpada koji se odlaže na odlagališta te zadovoljavanju svih postojećih standarda i zahtjeva iz područja zaštite okoliša, očuvanja zdravlja ljudi i očuvanja prirodnih resursa.

LITERATURA

- [1] Evangelopoulos P. Pyrolysis of WEEE for Energy Production and Material Recovery, Master of Science Thesis. Stockholm, 2014.
- [2] Žmak I. Recikliranje materijala, podloge za predavanja, FSB, Zagreb 2018.
- [3] Bedeković G, Sobota I, Lasić J. Separation of Copper from Telephone Cables by Gravity Concentration. Journal of the Polish Mineral Engineering Society. 2018; 67 - 72
- [4] Chagnes A, Cote G, Ekberg C, Nilsson M, Retegan T. Research, Development and Policies. Elsevier. 2016.
- [5] Castilho A, Pita F. Separation of Copper from Electric Cable Waste Based on Mineral Processing Methods. Faculty of Sciences and Technology, University of Coimbra. Portugal, 2018.
- [6] Suresh S S, Mohanty S, Nayak K S. Composition analysis and characterization of waste polyvinyl chloride (PVC) recovered from data cables. Waste Management. Elsevier. 2016.
- [7] Pravilnik o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničnom opremom (NN 42/14, 48/14, 107/14, 139/14 i 11/19)
- [8] Baldé C P, Forti V, Gray V, Kuehr R, Stegmann P. Flows and Resources. The Global E - waste Monitor. 2017.
- [9] Lohse S, Allison T, Osmanson T A, Barbakadze K, Brostow W, Granowski G, Hnatchuk N. Resources, Conservation and Recycling. Elsevier. 2018.
- [10] Pravilnik o katalogu otpada (NN 90/15)
- [11] Izvješće o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom u 2017. godini. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. Zagreb 2017.
- [12] Kabel općenito. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Kabel>, (Datum pristupa: 3. 9. 2019)
- [13] Li L, Liu G, Pan D, Wang W, Wu Y, Zuo T. Overview of the recycling technology for copper-containing cables. Resources, Conservation and Recycling. Elsevier 2017.
- [14] Usitnjivač. <https://global-recycling.info/archives/2337>, (Datum pristupa: 15. 9. 2019.)
- [15] Razbijač. <https://www.alanross.biz/equipment/33599>, (Datum pristupa: 15. 9. 2019.)
- [16] Veit H M, Bernardes A M. Electronic Waste. Recycling Tehniques. 2015.

- [17] Razdvajanje pomoću magneta.
<https://www.google.com/search?q=magnetic+separation+diagram>, (Datum pristupa: 15. 9. 2019.)
- [18] Kljajin M, Opalić M, Pintarić A. Recikliranje elektroničnih i elektroničkih proizvoda. Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu 2006.
- [19] Moya D, Aldás C, López G, Kaparaju P. Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. *Energy Procedia*. 2017. 134: 286 - 295
- [20] ScienceDirect. Pyrolysis Reactor. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/pyrolysis-reactor>, (Datum pristupa: 4. 8. 2019.)
- [21] Mwila-Chomba E. Pyrolysis of waste plastics into chemicals as an alternative to landfilling or incineration. Faculty of Engineering at Stellenbosch University. 2018.
- [22] Min Ju Y, Cheol Oh K, Yol Lee K, Hyun Kim D. Performance Analysis of a Vacuum Pyrolysis System. *Journal of Biosystems Engineering*. 2018. 43(1): 14 - 20
- [23] The Vacuum Technology and Know How book. Volume II. Asslar: Pfeiffer Vacuum GmbH; 2013. <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/>, (Datum pristupa: 5. 10. 2019.)
- [24] Zorc H. Vakuumske tehnologije i njihov značaj u 21. stoljeću. Institut Ruđer Bošković. Zagreb. 2001.
- [25] Rabe R C. A Model for the Vacuum Pyrolysis of Biomass. University of Stellenbosch. 2005.
- [26] Bakar općenito. <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=5344>. (Datum pristupa: 6. 10. 2019.)
- [27] Challoner J. The Elements. Carlton. 2013.
- [28] Online Materials Information Resource–MatWeb, <http://www.matweb.com/>, (Datum pristupa: 16. 11. 2019.)
- [29] Podaci dobiveni u tvrtki Spectra media d.o.o.
- [30] Ciklon. <http://srla.cn-rockcrusher.com/mineral-processing-equipment/hydro-cyclone.html>, (Datum pristupa: 7. 10. 2019.)
- [31] Cijena bakra na burzi. Kitco Metals Inc. <http://www.kitcometals.com/>, (Datum pristupa: 3. 11. 2019.)

PRILOZI

I. CD-R disk