

Recikliranje licnastih Cu kabela

Kostel, Pavao

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:518309>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



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

RECIKLIRANJE LICNASTIH BAKRENIH KABELA

Diplomski rad

Pavao Kostel

R233

Zagreb, 2019./2020.



KLASA: 602-04/20-01/61
URBROJ: 251-70-03-20-3
U Zagrebu, 15.07.2020.

Pavao Kostel, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/20-01/61, UR. BROJ: 251-70-11-20-1 od 06.04.2020. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

RECIKLIRANJE LICNASTIH Cu KABELA

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

Voditelj

Prof. dr. sc. Gordan Bedeković
(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite**

Doc. dr. sc. Želimir Veinović
(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i
studente**

Izv. prof. dr. sc. Dalibor Kuhinek
(titula, ime i prezime)

RECIKLIRANJE LICNASTIH BAKRENIH KABELA

Pavao Kostel

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U današnje, moderno doba, bakar se koristi u kablovima i svim električnim i elektronskim uređajima. Danas gotovo da i ne postoji električni uređaj koji ne sadrži bakar u sebi. Sve više se bakar iz otpadnih kabela reciklira i skoro polovica bakra u novim kabelima ili elektroničim uređajima je dobivena kao sekundarna sirovina recikliranjem.

U radu je dan pregled i opis vrsta kabela u kojima se koristi bakar te je ispitana mogućnost recikliranja licnastih bakrenih kabela na elektrostatičkom separatoru.

Ključne riječi: Električni i elektronički otpad, kabeli, recikliranje, bakar, plastika

Završni rad sadrži: 69 stranice, 17 tablica, 40 slika, 1 priloga, i 8 referenci.

Jezik izvornika: hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. Sc. Gordan Bedeković, redoviti profesor RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Gordan Bedeković, redoviti profesor RGNF-a
Dr. sc. Dalibor Kuhinek, izvanredni profesor RGNF-a
Dr. sc. Ivan Sobota, docent RGNF-a

RECYCLING THIN COPPER CABLES

Pavao Kostel

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

In today's modern age, copper is used in cables and all electrical and electronic devices. Today, there is almost no electrical device that does not contain copper. Copper is increasingly being recycled from waste cables and almost half of the copper in new cables or electronic devices is obtained as a secondary raw material by recycling.

The thesis gives an overview and description of cable types in which copper is used and examines the possibility of recycling thin copper cables by an electrostatic separator.

Keywords: WEEE, Cables, Recycling, Copper, Plastics

Thesis contains: 69 pages, 17 tables, 40 figures, 1 appendixes, i 29 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: Full Professor Gordan Bedeković PhD

Reviewers: Full Professor Gordan Bedeković PhD
Associate Professor Dalibor Kuhinek PhD
Associate Professor Ivan Sobota PhD

SADRŽAJ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. OPĆENITO O KABELIMA | 2 |
| 3. MATERIJALI ZA IZRADU KABELA | 2 |
| 3.1. Vodiči | 3 |
| 3.1.1. Bakreni vodiči | 3 |
| 3.1.2. Aluminijski vodiči | 4 |
| 3.1.3. Aluminijski vodiči obloženi bakrom | 4 |
| 3.1.4. Olovne obloge | 4 |
| 3.1.5. Aluminijske obloge | 6 |
| 3.1.5.1. Sastav obloga i svojstva | 6 |
| 3.1.5.2. Korozija | 6 |
| 3.1.6. Zaštita kabela za prijenos električne energije | 7 |
| 3.2. Impregnirana papirnata izolacija | 7 |
| 3.2.1. Papir | 7 |
| 3.2.2. Laminirani polipropilenski papir | 8 |
| 3.2.3. Impregnirajuće tekućine i mješavine | 8 |
| 3.3. Polimerna izolacija i materijali za oblaganje | 9 |
| 3.3.1. Fizička svojstva termoplastičnih i duroplastičnih izolacijskih i obložnih materijala 10 | |
| 3.3.2. Električna svojstva termoplastičnih i duroplastičnih izolacijskih materijala | 11 |
| 3.3.3. Vrste termoplastične izolacije kabela i njihova svojstva | 12 |
| 3.3.3.1. Polivinil klorid (PVC) | 12 |
| 3.3.3.2. Polietilen (PE) | 13 |
| 3.3.3.3. Polipropilen (PP) | 14 |
| 3.3.3.4. Najlon | 15 |
| 3.3.3.5. Poliuretan | 15 |
| 3.3.3.6. Poliester blok kopolimeri (PEE) | 15 |
| 3.3.3.7. Fluorirani polimeri | 16 |
| 3.3.4. Vrste duroplastične izolacije i njihova svojstva | 16 |
| 3.3.4.1. Prirodna guma (NR) | 16 |
| 3.3.4.2. Stiren-butadienska guma (SBR) | 17 |
| 3.3.4.3. Butil guma (IIR) | 18 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.4.5. Umreženi polietilen (XLPE)..... | 19 |
| 3.3.4.6. Umrežavanje u kablovima pod pritiskom..... | 20 |
| 3.3.4.7. Kemijsko umrežavanje korištenjem silana | 20 |
| 3.3.4.8. Etil vinil acetat (EVA)..... | 20 |
| 3.3.4.9. Silikonska guma | 21 |
| 4. VRSTE KABELA | 22 |
| 4.1. Kabeli za distribuciju električne energije visokog napona | 22 |
| 4.1.1. Samostalni kabeli napunjeni sa tekućinom | 23 |
| 4.1.2. Kabeli punjeni plinom pod tlakom | 24 |
| 4.1.2.1. Kabeli sa plinom u dielektriku | 25 |
| 4.1.2.2. Kabeli s plinom pod pritiskom u membrani..... | 25 |
| 4.2. Kabeli za distribuciju električne energije kućanstvima i poslovnim prostorima..... | 26 |
| 4.2.1. Kabeli sa PVC izolacijom i oblogom | 26 |
| 4.2.1.1. Jednožilni kabeli..... | 26 |
| 4.2.1.2. Kabeli plosnatog oblika..... | 26 |
| 4.2.1.3. Okrugli višezilni kabeli | 28 |
| 4.2.2. Kabeli za industrijsku upotrebu | 28 |
| 4.2.2.1. PVC, oklopljeni kabeli za kontrolu napajanja..... | 28 |
| 4.2.2.2. Kabeli sa duroplastičnom izolacijom | 28 |
| 4.2.2.3. Kabeli za primjenu u rudarstvu | 29 |
| 4.3. Kabeli za prijenos podataka..... | 29 |
| 4.3.1. Upleteni kabeli za prijenos podataka | 29 |
| 4.3.1.1. Vodič | 30 |
| 4.3.1.2. Izolacija | 31 |
| 4.3.1.3. Montaža kabela | 31 |
| 4.3.1.4. Ispuna | 31 |
| 4.3.1.5. Omotavanje jezgre..... | 31 |
| 5. METODE RECIKLIRANJA KABELA I NJIHOVA PRIMJENA | 32 |
| 5.1. Pregled tehnologija recikliranja i obrade otpadnih kabela..... | 32 |
| 5.1.1. Metoda mehaničke obrade | 32 |
| 5.1.1.1. Tehnologija guljenja žica | 32 |
| 5.1.1.2. Tehnologija drobljenja žica..... | 33 |
| 5.1.2. Postupak smrzavanja..... | 34 |
| 5.1.3. Tehnologija visokotlačnog vodenog mlaza | 36 |

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.1.4. | Recikliranje ultrazvučnim odvajanjem | 36 |
| 5.1.5. | Tehnike kemijskog recikliranja | 37 |
| 5.1.6. | Postupci povrata topline..... | 38 |
| 5.1.6.1. | Spaljivanje..... | 38 |
| 5.1.6.2. | Termalna dekompozicija..... | 39 |
| 5.2. | Primjer odvajanja plastične izolacije od bakrene jezgre električnih kablova bubnjastim mlinom s kuglama | 40 |
| 1. | DINP ekstrakcija i čvrstoća deplastificiranog PVC-a | 43 |
| 6. | LABORATORIJSKA ISPITIVANJA..... | 48 |
| 6.1. | Opis uzorka..... | 48 |
| 6.2. | Opis uređaja | 49 |
| 6.2.1. | Rezni mlin RETSCH SM 2000..... | 49 |
| 6.2.2. | Elektromagnetsko laboratorijsko sito FRITSCH Analysette 3..... | 51 |
| 6.2.3. | Elektrostatički separator Eriez Magnetics HT-150..... | 53 |
| 6.3. | Postupak ispitivanja | 54 |
| 7. | REZULTATI I DISKUSIJA..... | 62 |
| 8. | ZAKLJUČAK | 67 |
| 9. | LITERATURA..... | 68 |
| 10. | PRILOZI..... | 69 |

POPIS SLIKA

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 3-1 Pukotine u kristalnoj rešetci olova uzorkovane zamorom materijala (Moore, 1997) | 5 |
| Slika 3-2 Strukturna formula polivinil klorida (Moore, 1997)..... | 12 |
| Slika 3-3 Strukturna formula polipropilena (Moore, 1997) | 14 |
| Slika 3-4 Strukturna formula najlona (Moore, 1997)..... | 15 |
| Slika 3-5 Strukturna formula poliuretana (Moore, 1997)..... | 15 |
| Slika 3-6 Strukturna formula fluoriranog polimera (Moore, 1997) | 16 |
| Slika 3-7 Strukturna formula prirodne gume (Moore, 1997) | 17 |
| Slika 3-8 Strukturna formula stiren-butadenske gume (SBR) (Moore, 1997) | 17 |
| Slika 3-9 Strukturna formula butil gume (IIR) (Moore, 1997) | 18 |
| Slika 3-10 Strukturna formula etilen propilen gume (EPR) (More, 1997)..... | 19 |
| Slika 3-11 Strukturna formula etil vinil acetata (EVA) (Moore, 1997) | 20 |
| Slika 3-12 Silikonska guma (Moore, 1997)..... | 21 |
| Slika 4-1 275 kV kabel punjen tekućinom pod pritiskom (Moore, 1997)..... | 23 |
| Slika 4-2 Poprečni presjeci tipičnih kabela punjenih tekućinom pod pritiskom (Moore, 1997) | 24 |
| Slika 4-3 Trožilni 33 kV kabel punjen plinom pod pritiskom (Moore, 1997) | 25 |
| Slika 4-4 Njemački tip kabela plosnatog tipa (Moore, 1997)..... | 27 |
| Slika 4-5 Poprečni presjek jednožilnog kabela plosnatog oblika (Moore, 1997)..... | 27 |
| Slika 4-6 Vrste upletenih kabela za prijenos podataka (Moore, 1997) | 30 |
| Slika 5-1 Shematski prikaz stroja za guljenje žica (Li i sur., 2017)..... | 33 |
| Slika 5-2 Shematski prikaz postupka drobljenja bakrenih žica (Li i sur., 2017)..... | 33 |
| Slika 5-3 Blok dijagram proseca smrzavanja otpadnih kabela (Li i sur., 2017)..... | 35 |
| Slika 5-4 Odnos tvrdoće kabela (Hv) i prinosa ekstrakcije Y_{ext} za različite vrste kabela (Xu i sur., 2018)..... | 44 |
| Slika 5-5 Raspodjela veličine čestica odvojenih Cu i PVC izolacije dobivenih na maksimalnom R_{sep-u} (Xu i sur., 2018) | 45 |
| Slika 5-6 odnos čistoće dobivenog bakra i prinosa ekstrakcije za različite veličine kabela (Xu i sur., 2018)..... | 46 |
| Slika 5-7 Utjecaj brzine rotacije kugličnog mlina na odvajanje PVC-a od bakra (Xu i sur., 2018)..... | 47 |
| Slika 6-1 Rezni mlin RETSCH SM 2000 (RETSCH, 2020)..... | 48 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 6-2 Rezni elemrnti reznog mlina RETSCH SM 2000 (RETSCH, 2020)..... | 49 |
| Slika 6-3 Dozatori reznog mlina RETSCH SM 2000 (RETSCH, 2020) | 50 |
| Slika 6-4 Drobljenje materijala reznim trakama (RETSCH, 2020) | 50 |
| Slika 6-5 Laboratorijsko elektromagnetsko sito FRITSCH Analysette 3 (FRITSCH, 2020) | 51 |
| Slika 6-6 Elektrostatički separator Ereiz Magnetics HT-150 (Bedeković i Salopek, 2010) | 53 |
| Slika 6-7 Shematski prikaz elektrostatičkog separatora Ereiz Magnetics HT-150 | 54 |
| Slika 6-8 Shematski prikaz postupka izvođenja ispitivanja (plan laboratorijskih pokusa) . | 55 |
| Slika 6-9 Usitnjeni kabeli (produkt reznog mlina) | 56 |
| Slika 6-10 Dijagram granulometrijske analize | 57 |
| Slika 6-11 Ručno odvojeni bakar od plastike na malom uzorku | 59 |
| Slika 6-12 Separirani uzorak u posudi za vodič nakon višestrukog propuštanja kroz elektrostatički separator | 60 |
| Slika 7-1 Promjena kvalitete koncentrata (k) i iskorištenja korisne komponente (Ik) pri promjeni potencijala elektrode | 64 |
| Slika 7-2 Promjena kvalitete koncentrata (k) i iskorištenja korisne komponente (Ik) pri promjeni brzine vrtnje bubnja..... | 64 |
| Slika 7-3 Promjena kvalitete koncentrata (k) i iskorištenja korisne komponente (Ik) pri promjeni položaja noža..... | 65 |

POPIS TABLICA

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 3-1 Električna svojstva nekih metala (Moore, 1997) | 2 |
| Tablica 3-2 Fizikalna svojstva nekih materijala (Moore, 1997)..... | 3 |
| Tablica 3-3 Fizikalna svojstva polimernih materijala (Moore, 1997)..... | 11 |
| Tablica 3-4 Električna svojstva polimernih materijala (Moore, 1997)..... | 12 |
| Tablica 4-1 Podjela kabela za prijenos električne energije viskog napona (Moore, 1997). | 23 |
| Tablica 5-1 Maseni udio i karakteristike Cu, DINP i PVC izolacije različitih kablova (Xu i sur., 2018)..... | 40 |
| Tablica 5-2 Eksperimentalni uvjeti za provedeni test (Xu i sur., 2018)..... | 42 |
| Tablica 6-1 Tehnički podaci reznog mlina RETSCH SM 2000 (RETSCH, 2020)..... | 51 |
| Tablica 6-2 Tehničke karakteristike laboratorijskog sita FRITSCH Analysette 3 (FRITSCH, 2020)..... | 52 |
| Tablica 6-4 Izgled izdvojenih klasa dobivenih nakon sitnjenja u reznom mlinu | 58 |
| Tablica 6-5 Vrijednosti varijabli praćenih kod ispitivanja | 61 |
| Tablica 7-1 Mase produkata separacije pri različitim potencijalima elektrode..... | 62 |
| Tablica 7-2 Mase produkata separacije pri različitim brzinama bubnja..... | 62 |
| Tablica 7-3 Mase produkata separacije pri različitim pozicijama noža | 62 |
| Tablica 7-4 Kvaliteta koncentrata (k) i iskorištenje korisne komponente (Im) pri različitim potencijalima elektrode..... | 63 |
| Tablica 7-5 Kvaliteta koncentrata (k) i iskorištenje korisne komponente (Im) pri različitim brzinama bubnja | 63 |
| Tablica 7-6 Kvaliteta koncentrata (k) i iskorištenje korisne komponente (Im) pri različitim položajima noža..... | 63 |

POPIS PRILOGA

Prilog 1 Rezultati elektrostatičke separacije

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

| | | |
|------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Y_{ext} | % | iskorištenje pri ekstrakciji |
| m_E | g | masa dizononil pftalata |
| m_{E0} | g | masa estrahiranog dizononil pftalata |
| H_V | N/mm ² | Vickersova tvrdoća |
| F | N | sila |
| A | mm ² | površina |
| R_{sep} | - | brzina odvajanja kabela |
| m_s | g | masa odvojenih kabela |
| m_0 | g | ukupna masa kabela |
| P_{cu} | % | čistoća bakra |
| m_{cu} | g | masa bakra |
| m_{pvc} | g | masa plastike |
| E_{bc} | J/s | udarna energija |
| m | g | masa kugli |
| v_{bc} | m/s | srednja brzina kretanja kugli |

1. UVOD

Proizvodnja električne i elektroničke opreme (EEO) u današnje vrijeme je jedna od najbrže rastućih grana industrije. Rezultat takvog brzog razvoja je povećanje količine otpadne električne i elektroničke opreme (OEEO). Recikliranje otpadne električne i elektroničke opreme važno je ne samo sa stajališta obrade otpada, nego i sa stajališta uporabe vrijednih materijala.

OEEO je različita i jako kompleksna u smislu materijala i komponenti od kojih su izrađeni, ali isto tako i proizvodnih procesa. Karakterizacija toka ovog otpada od iznimne je važnosti kako bi se razvili jeftini i ekološki prihvatljivi procesi recikliranja.

S obzirom na to da OEEO sadrže štetne materijale, može doći do problema onečišćenja okoliša ukoliko se takvi materijali nepravilno predhodno obrađuju. Mnoge zemlje u svijetu donijele su zakonske propise kako bi se poboljšala ponovna upotreba, recikliranje i drugi postupci uporabe takvog otpada, te kako bi se čim više smanjilo odlaganje takvog otpada na odlagališta.

U radu je dan pregled i opis vrsta kabela koji se danas koriste te su ispitane mogućnosti recikliranja licnastih Cu kabela korištenjem elektrostatičkog separatora (korona separator).

2. OPĆENITO O KABELIMA

Danas već postoje brojne vrste kabela koji se koriste u raznim granama industrije i domovima. Najčešće korišteni kabela danas su bakreni kabela. Oni se koriste ponajviše zbog dobrih električnih svojstava.

Od ostalih kabela postoje još i aluminijski, natrijevi, živini i čelični kabela. Svaki od ovih navedenih kabela se koristi u raznim granama industije, pa tako imamo kabele za ožičenje, fleksibilne kabele i kabele za generalnu primjenu u industriji. Od ostalih kabela tu su kabela za prijenos informacija, telefonske linije, kabela za prijenos električne energije na velike udaljenosti itd.

3. MATERIJALI ZA IZRADU KABELA

Kabela se danas najviše koriste za prijenos električne energije. Najbolja električna svojstva za prijenos električne energije ima naravno srebro. S obzirom na to da je srebro skupo, bakar u takvim kabelima se pokazao kao jako dobra zamjena, s obzirom na to da ima dobra električna svojstva, a ponajviše što je jeftiniji. Uz bakar, često se u kabelima može naći i aluminij, a nešto rijede olovo, natrij i čelik. U tablici 3-1 prikazana su neka električna svojstva navedenih materijala, a u tablici 3-2 njihova fizička svojstva.

Tablica 3-1 Električna svojstva nekih metala (Moore, 1997)

| Metal | Relativna provodljivost (bakar = 100) | Električna otpornost na 20 °C (Ωm , 10^{-8}) | Temperaturni koeficijent otpora ($\text{po } ^\circ\text{C}$) |
|----------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Srebro | 106 | 1,626 | 0,0041 |
| Bakar (HC, kaljen) | 100 | 1,724 | 0,0039 |
| Bakar (HC, čvrsto vučen) | 97 | 1,777 | 0,0039 |
| Pokositreni bakar | 95-99 | 1,741- 1,814 | 0,0039 |
| Aluminij (EC razred, mekan) | 61 | 2,803 | 0,0040 |
| Aluminij (EC razred, 1/2H- H) | 61 | 2,826 | 0,0040 |
| Natrij | 35 | 4,926 | 0,0054 |
| Mekani čelik | 12 | 13,80 | 0,0045 |
| Olovo | 8 | 21,4 | 0,0040 |

Tablica 3-2 Fizikalna svojstva nekih materijala (Moore, 1997)

| Svojstvo | Jedinica | Bakar | Aluminij | Olovo |
|-------------------------------------------|--------------------|-------|-----------|-------|
| Gustoća na 20 °C | kg/m ³ | 8890 | 2703 | 11370 |
| Koeficijent temperaturnog istezanja po °C | × 10 ⁻⁶ | 17 | 23 | 29 |
| Temperatura taljenja | °C | 1083 | 659 | 327 |
| Temperaturna provodljivost | W/cm °C | 3.8 | 2.4 | 0.34 |
| Najveće vlačno naprezanje mekih metala | MN/m ² | 225 | 70 -90 | - |
| Najveće vlačno naprezanje tvrdih metala | MN/m ² | 385 | 125 - 205 | - |
| Modul elastičnosti | MN/m ² | 26 | 14 | - |
| Tvrdoća mekih metala | DPHN | 50 | 20 - 25 | 5 |
| Tvrdoća tvrdih metala | DPHN | 115 | 30 - 40 | - |
| Zamor materijala | MN/m ² | ±65 | ±40 | ±2.8 |

3.1. Vodiči

3.1.1. Bakreni vodiči

Zbog načina na koji se mogu valjati u šipke, a potom razvući u žice, zajedno s odličnom električnom provodljivošću, bakar je gotovo nezamjenjiv kao vodič već više od 50 godina. Ocjena i kvaliteta bakra je od iznimne važnosti za provođenje električne energije. Razne nečistoće i procesi izrade bakrenih kabela imaju veliki utjecaj na provodljivost, pa se zato zahtjeva da bakar bude 99,99 % čist, što se postože elektrolizom.

Mehanička čvrstoća kaljene bakrene žice primjerena je za sve vrste izoliranih kabela. Ukoliko se dogodi neko oštećenje vodiča tijekom njegove proizvodnje, npr. prilikom kompakcije kako bi se smanjila sveukupna dimenzija, mora postojati tolerancija kod kaljenja kako bi se kompenziralo smanjenje provodljivosti. U ekstremnim slučajevima, kao što je tvrdo vučenje za postizanje velike čvrstoće za kabele koji se koriste u nadzemnim instalacijama, ta tolerancija iznosi i do 3 % (Moore, 1997).

Jedina loša značajka bakra je varijacija cijene na globalnom tržištu. Međutim, u posljednja dva desetljeća aluminij se koristi kao zamjena za bakar u kabelima za distribuciju energije, isključivo na temelju cijene.

3.1.2. Aluminijski vodiči

Za razliku od bakra, mehanička čvrstoća aluminijske je vrlo mala za meke jednostruke ili višestruke žice. U usporedbi sa bakrom, aluminij ima brojne nedostatke koji se mogu ukloniti raznim metodama kako bi se izvukla najveća korist iz njegove ekonomske prednosti.

Gustoća aluminijske iznosi jednu trećinu gustoće bakra, a njegova vodljivost iznosi 61 % vodljivosti bakra, odnosno za jednaku vodljivost masa je gotovo prepolovljena. Usprkos tome, poprečna površina vodiča mora biti povećana za 1,6 puta, a to znači korištenje dodatne izolacije, obloga te oklopnih materijala (Moore, 1997). S izolacijom od papira, oblogom od olova i oklopnim materijalima, nema neke uštede u masi kabela, ali situacija je posve drugačija ukoliko se za oblaganje koristi aluminij.

Glavni nedostatak korištenja aluminijske kao vodiča u kabelima je tanka čvrsta oksidna prevlaka koja štiti aluminij od korozije.

3.1.3. Aluminijski vodiči obloženi bakrom

Aluminij obložen bakrom sastoji se od aluminijske jezgre sa debelom oblogom bakra koja je metalurški spojena sa aluminijem. Debljina bakrene obloge može varirati, ali ona u prosjeku iznosi oko 10 % volumena, odnosno oko 27 % mase samog kabela.

Svrha oblaganja aluminijske sa bakrom je otklanjanje problema kod spojeva kabela koji su obično vijčani.

3.1.4. Olovne obloge

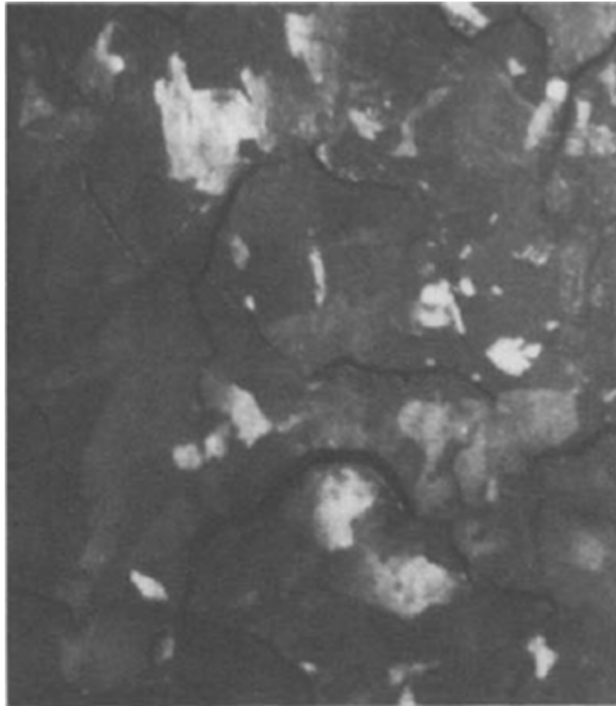
Olovo se u industriji proizvodnje kabela koristi još od kraja prošlog stoljeća. Nedostaci povezani s olovnim oblogama se mogu podijeliti u 4 kategorije (Moore, 1997):

- a) Zamor materijala;
- b) Nedostaci prilikom ekstruzije;
- c) Pukotine uzrokovane unutarnjim napreznjima;
- d) Korozija;

- a) Zamor materijala

Olovo ima relativno malu otpornost na zamor materijala što se može vidjeti na slici 3-1 koja prikazuje tipične pukotine obloge povezane sa pukotinama u kristalnoj rešetci. Većina pukotina olovnih obloga se događa zbog vibracija koje nastaju ili prilikom transporta na velike udaljenosti ili prilikom instalacija na mostovima, željezničkim prugama ili nadzemnim vodovima. U takvim slučajevima frekvencija vibracija je uglavnom visoka dok

je amplituda vibracija niska. Mogu se javiti slučajevi u kojima je frekvencija vibracija niska, a amplituda vibracija visoka što dovodi do stalnog ponavljanja savijanja zbog temperaturnog istežanja i savijanja sa longitudinalnim pomacima. To se može dogoditi kod spajanja šahtova za kabele u kanalima ili sa kabelima na stalcima koji nisu propisano učvršćeni te su izloženi solarnom grijanju.



Slika 3-1 Pukotine u kristalnoj rešetci olova uzorkovane zamorom materijala (Moore, 1997)

Kako bi se takve pukotine spriječile potrebno je koristiti legure olova i nekih drugih metala kao što su kositar, antimon, bizmut, telurij, bakar i dr. u malim postocima.

Različite zemlje svijeta koriste različite mješavine metala koje su ispitivanjima pokazale dobra mehanička svojstva i dobru otpornost na zamor materijala.

b) Nedostaci prilikom ekstruzije

Prilikom izrade olovnih obloga na hidrauličnim valjcima defekti mogu biti uzrokovani nečistoćama prilikom punjenja cilindra tekućim olovom. To se može izbjeći koristeći Glover tray princip kod kojeg se cilindar za ekstruziju puni automatski sa olovom iz posude koja je iznad cilindra.

c) Pukotine uzrokovane unutarnjim pritiskom

Olovo nema granicu elasticiteta i deformirat će se polagano uz malo naprezanje. Kompleksan odnos naprezanja i deformacija ima važnu ulogu u zahtjevima sastava obloga kabela u kojima se lučno naprezanje javlja kao rezultat unutarnjeg pritiska.

Iako su obloge u kabelima punjenim sa plinom ili tekućinom ojačane kako bi izdržale dodatna naprezanja, obloga sama po sebi može kroz duže vrijeme biti pod djelovanjem naprezanja te će se morati proširiti za mali iznos. Ukoliko su olovne obloge pod velikim pritiskom one će se raspuknuti.

Kako bi se spriječile bilo kakve pukotine uzrokovane unutarnjim pritiskom, potrebno je odabrati točno određenu kombinaciju metala za svaki iznos unutarnjeg pritiska koji se može javiti. Kako bi se odabrala točna kombinacija metala moraju se provesti opsežna ispitivanja u laboratorijima i na terenu.

d) Korozija

Iako su pronađene olovne cijevi iz Rimskog doba, olovo će korodirati u jako lužnatim tlima. Olovne obloge se od korozije najčešće štite bitumenom ili bitumenoznom trakom uz dodatak čistog bitumena.

3.1.5. Aluminijske obloge

Kabeli su se počeli oblagati aluminijem u ranim 1950-im godinama prošlog stoljeća kako bi smanjila upotreba olova koje je samo po sebi štetno kako za okoliš pa tako i za ljude.

3.1.5.1. *Sastav obloga i svojstva*

Temperatura (oko 500 °C) i tlak ekstruzije su najvažniji čimbenik zbog velikog naprezanja na valjcima. Kako bi se naprezanja svela na najmanju moguću vrijednost, mora se koristiti aluminij čistoće 99,7 %.

U usporedbi sa olovom, najveća razlika u svojstvima aluminija je u većoj sili koja se može pojaviti prilikom temperaturnog istezanja koju može podnijeti bez vidljivih oštećenja.

3.1.5.2. *Korozija*

Ukoliko je nezaštićen, aluminij je jako podložan koroziji. Pojava korozije na nezaštićenim aluminijskim oblogama kabela je vrlo kompleksna te se može pojaviti u raznim oblicima. Kako bi se spriječilo korodiranje aluminijskih obloga kabela, kabele je potrebno

zaštiti odgovarajućim materijalima. Za zaštitu se najčešće koriste razne vrste plastike kao što su polivinil klorid (PVC), polietilen (PE) i polietilen visoke gustoće (HDPE).

3.1.6. Zaštita kabela za prijenos električne energije

Kabeli korišteni za prijenos električne energije obično su ukopani u zemlju. Takvi kabeli su zaštićeni od lutajućih struja i također od mehaničkih oštećenja prilikom polaganja takvih kabela ili prilikom popravka.

Jako je teško predvidjeti koliki bi trebao biti optimalan vijek trajanja zaštitnog materijala prije nego se uništi djelovanjem korozije. U svijetu se obično za zaštitu od korozije uglavnom koriste čelične trake i galvanizirane čelične žice.

Debljina čelične trake za zaštitu od korozije ovisi o promjeru kabela i ona iznosi između 0,5 mm i 0,8 mm. Trake su prilikom proizvodnje ili prilikom instalacije presvučene bitumenom.

Galvanizirana čelična žica se koristi kod kabela koji nemaju metalnu oblogu. Ukoliko je potrebna veća vlačna čvrstoća koristi se čelična žica sa dodatkom ugljika.

3.2. Impregnirana papirnata izolacija

3.2.1. Papir

Papir za kabele sastoji se od papirnato filca koji se sastoji od jako dugih celuloznih vlakana dobivenih kemijskom obradom drvene pulpe koja uglavnom dolazi iz Sjeverne Amerike i Skandinavije. Digestija natrijevim sulfidom i kaustičnom sodom pri velikim temperaturama i tlaku uklanja nečistoće kao što su lignin i smola. Izolacija od papira za kabele se obično sastoji od dva sloja, ali za više napone se koristi i izolacija sa tri sloja. Potrebna fizikalna svojstva papira su kontrolirana mlaćenjem drvene pulpe zajedno sa debljinom pulpe sa sadržajem vode od 93 % do 95 %, te se dovodi na rotirajuću žičanu mrežu na kojoj se formira papir te se po potrebi dodatno cijedi. Ti čimbenici određuju debljinu, prividnu gustoću i nepropusnost i moraju se prilagoditi određenoj vrsti i naponu kabela.

Debljina papira za izolaciju kabela se obično kreće u rasponu od 65 μm do 190 μm . Gustoća gotovog papira varira između 650 kg/m^3 do 1000 kg/m^3 , a kako je gustoća samih celuloznih vlakana oko 1500 kg/m^3 volumen koji ostane između vlakana popunjava se impregnirajućim vezivom (Moore, 1997).

Nepropusnost, odnosno porozitet papira se može regulirati nezavisno o gustoći i može imati veliki utjecaj na mehanička i električna svojstva gotovog papira.

Kvaliteta vode je još jedan od važnih čimbenika pri proizvodnji papira, što znači da ukoliko se ne koristi voda točno određene kvalitete, to može utjecati na električna svojstva papira.

Potrebna svojstva papira bira proizvođač kabela, te se moraju poštovati određeni zahtjevi. Debljina papirnate izolacije ovisi o naponu električne energije koja se prenosi kroz kabel, ali isto tako ovisi i o električnom napreznju i ona može varirati između 0,6 mm do 30 mm. Povećanjem debljine izolacije javlja se još i problem savijanja kabela jer celulozna vlakna prilikom savijanja moraju prelaziti jedna preko drugih.

3.2.2. Laminirani polipropilenski papir

Laminirani polipropilenski papir je papir u formi traka. Sastoji se od sloja polipropilena na koji se sa svake strane lijepe dva tanka sloja izolirajućeg papira. Traka polipropilena izvana izgleda kao papirnata traka, te se može primjeniti na kabel koristeći iste metode kao i kod izolirajućeg papira.

Polipropilen u laminiranom polipropilenskom izolirajućem papiru ima sljedeća svojstva:

- a) Niski dielektrički faktor rasipanja
- b) Niska permitivnost
- c) Visoka radna temperatura
- d) Visoka mehanička čvrstoća

Papir u laminiranom polipropilenskom izolirajućem papiru ima sljedeća svojstva:

- a) Niska elastičnost i visoka tlačna čvrstoća djeluju tako da kompenziraju termalnu ekspanziju polipropilena;
- b) Vlaknasti sastav osigurava prolaz kabela tekućine prilikom održavanja;
- c) Visoka otpornost na parcijalno pražnjenje na krajevima punjenim uljem kako bi izdržao velika napreznja.

3.2.3. Impregnirajuće tekućine i mješavine

Papir ima dobra električna svojstva samo kada je suh i impregniran sa odgovarajućim tekućinama i mješavinama, što je važno i kako bi se smanjilo upijanje vlage. Početni postotak vlage u papiru iznosi od 2 % do 7 %, te je kasnije smanjen na od 0,01 % do 0,5 % ovisno o naponu kabela (Moore, 1997).

Impregnacija čvrstih distribucijskih kabela je na bazi mineralnog ulja koje se dobiva kao derivat preradom sirove nafte. U konvencionalnim ulje-smola impregnatima, ulje se

stvrđnjava dodatkom gumene smole kako bi se povećala viskoznost u radnom rasponu temperatura kabela. Gumena smola je materijal koji se izlučuje iz stabla bora i nakon prvobitne destilacije se razdvaja po boji prije obrade u visoku kvalitetu. Povećanje viskoznosti koje se može dobiti dodatkom smole još uvijek nije dovoljno velika kako bi se spriječilo otjecanje impregnata iz kabela koji su postavljeni na vrlo strmim nagibima. U svrhu spriječavanja toga koriste se mješavine dovoljno velike viskoznosti.

Temeljna karakteristika masno impregiranih nedrenažnih spojeva (MIND) je da, iako imaju isti viskozitet kao i uljno-smolasti spojevi na temperaturama od 120 °C, i stoga dobra impregnirajuća svojstva, oni se stvrđavaju u čvrstu voštanu strukturu na maksimalnoj radnoj temperaturi kabela. Sastav je strogo kontroliran za dobivanje plastične konzistencije koja omogućuje dobro savijanje kabela. Nešto veća krutost MIND spojeva pri vrlo maloj temperaturi ne predstavlja prepreku normalnoj ugradnji, već bi pretjerano jaka savijanja pri takvim temperaturama nanijele više štete nego kod uljno-smolaste impregnacije.

Želiranje mineralnog ulja do konzistencije slične onoj vazelina postiže se dodavanjem materijala kao što su mikrokristalni voskovi, polietilen, poliizobutilen i mala količina smole. Ti sastojci imaju visoku električnu čvrstoću i svojstva su odabrana za povišenu temperaturu omekšavanja uz odgovarajuću plastičnost u području radne temperature.

3.3. Polimerna izolacija i materijali za oblaganje

Sintetički polimeri su zamjenili prirodne materijale, kao što su papir, mineralna ulja i guma, kao izolaciju u kabelima za prijenos električne energije i podataka. Danas postoje brojne vrste polimera koji se koriste kao izolacija u kabelima.

Polimer je molekula, odnosno tvar koja se sastoji od jedne ili niza ponovljenih strukturnih jedinica. Međutim, ova definicija ne uključuje samo sintetičke materijale, već i materijale poput papira (celuloze). U industriji kabela pod pojmom polimerni materijal se zapravo misli na polimere koji su poznati pod komercijalnim nazivima „plastika“ (duromeri i plastomeri) ili „guma“ (elastomeri i elastoplastomeri). Britanski standardi definiraju plastiku kao materijale koji se baziraju na sintetičkim ili modificiranim prirodnim polimerima koji se u određenoj fazi proizvodnje mogu oblikovati tečenjem, potpomognuti u mnogim slučajevima toplinom i tlakom.

Smatra se da su gume kruti materijal, s elastičnim svojstvima, koji se izrađuju od lateksa dobivenog od biljaka ili sintetički i koriste se u proizvodnji gumenih proizvoda. Elastomer je materijal koji se brzo vraća, svojem početnom obliku nakon značajne deformacije na sobnoj temperaturi djelovanjem slabog naprezanja. U industriji kabela pojmovi guma i

elastomer se upotrebljavaju kao sinonimi, iako se gotovo uvijek pod pojmom guma misli na prirodnu gumu.

Plastika se nadalje može podijeliti na termoplastiku i duroplastiku. Termoplastika je materijal u kojem se molekule drže zajedno fizičkim umjesto kemijskim vezama. To znači da nakon što se materijal zagrije iznad svoje temperature taljenja, on počinje teći. Taj proces je reverzibilan i nakon hlađenja, materijal se stvrdne. Tipičan primjer takvog materijala je polivinilklorid (PVC). Molekule u duroplastici su za razliku od termoplastike povezane jakim kemijskim vezama koje je teško razbiti. To zapravo znači da prilikom zagrijavanja takvog materijala, taj materijal ne omekša do dovoljne razine da bi ga se moglo preoblikovati u neki drugi oblik. Tipični primjeri duroplastike su umreženi polietilen (XLPE) i elastomeri. Za razliku od termoplastike, duroplastika je netopiva i nespojiva, što znači da se neće spojiti sa drugim vrstama plastike.

Mnoge vrste termoplastike mogu se pretvoriti u duroplastiku određenim procesima tako da se inducira "umrežavanje", npr. dodavanjem pogodnog kemijskog umrežavajućeg sredstva ili zračenjem.

3.3.1. Fizička svojstva termoplastičnih i duroplastičnih izolacijskih i obložnih materijala

Tablica 3-3 prikazuje tipična fizička svojstva nekih plastičnih materijala korištenih za izolaciju kabela.

Uz to, svojstva kao što su otpornost na abraziju, otpor tečenju ili usporavanje plamena često su potrebna za materijale za oblaganje.

Tablica 3-3 Fizikalna svojstva polimernih materijala (Moore, 1997)

| Materijal | Primjena | Tip | Vlačna čvrstoća (min) (N/mm ²) | Produljenje prilikom loma (min) (%) | Granična temperatura | |
|-------------------------|-----------|-------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------|-----------------|
| | | | | | Procjena (°C) | Montaža (°C) |
| <i>Termoplastika</i> | | | | | | |
| Polivinil klorid | izolacija | TI 1 | 12,5 | 125 | 70 | 5 |
| Polivinil klorid | obloga | TM 1 | 12,5 | 125 | 70 | 5 |
| Polivinil klorid | izolacija | TI 2 | 10 | 150 | 70 | 5 |
| Polivinil klorid | obloga | TM 2 | 10 | 150 | 70 | 5 |
| Polivinil klorid | izolacija | TI 3 | 15 | 150 | 90 | 5 |
| Polivinil klorid | izolacija | TI 4 | 12,5 | 125 | 70 | -25 |
| Polivinil klorid | obloga | TM 3 | 10 | 150 | 85 | 5 |
| Polivinil klorid | obloga | 5 | 12,5 | 125 | 85 | 5 |
| Polietilen | izolacija | PE 03 | 7 | 300 | 70 | -60 |
| Polietilen | izolacija | PE 2 | 7 | 300 | 70 | -60 |
| Polietilen | obloga | TS 2 | 12,5 | 300 | 90 | |
| <i>Obični elastomer</i> | | | | | | |
| Guma | izolacija | EI 4 | 5 | 200 | 60 | -25 |
| Guma | obloga | EM 1 | 7 | 300 | 60 | -25 |
| Otporan na temperaturu | izolacija | GP 4 | 6,5 | 200 | 90 | -25 |
| Tvrđ | izolacija | GP 6 | 8-5 | 200 | 90 | -25 |
| Niska temperatura | izolacija | EI 6 | 5 | 200 | 90 | -40 |
| Otporan na plamen | izolacija | OR 1 | 7 | 200 | 85 | -30 |
| Otporan na ulje | obloga | EM 2 | 10 | 300 | 60 | -25 |
| Silikonska guma | izolacija | EI 1 | 5 | 150 | 180 | 5 |
| Etilen vinil acetat | izolacija | EI 3 | 6,5 | 200 | 110 | -25 |
| Umreženi polietilen | izolacija | GP 8 | 12,5 | 200 | 90 | -40 |

3.3.2. Električna svojstva termoplastičnih i duroplastičnih izolacijskih materijala

Tablica 3-4 prikazuje električna svojstva tipičnih izolacijskih materijala korištenih u industriji kabela.

Smjese za poboljšanim električnim svojstvima potrebne su kod kabela za prijenos električne energije napona iznad 3 kV. IEC502 zahtjeva da permitivnost i kut gubitka u dielektriku (DLA) bude ispod 0,75 u zadanom temperaturnom području od sobne temperature u iznosu od 20 °C do 85 °C. Pored toga DLA na 80 °C ne smije prelaziti vrijednost na 60 °C (Moore, 1997). Glavni razlog zašto su potrebna takva električna svojstva je to što ukoliko je dovoljno veliki napon u kabelu u otvorenom krugu, izolacija kabela će se početi zagrijavati bez obzira na to što kroz kabel ne prolazi struja. Taj efekt je uzrokovan dielektričnim zagrijavanjem. Toplina koja se stvara ovim putem disipira se kroz okolinu

samog kabela. Međutim, ako se napon poveća ili ako kroz vodič prolazi prevelika struja, tada neće biti moguće održati tu ravnotežu, a posljedica toga će biti rast temperature dielektrika sve dok dielektrik ne podbaci.

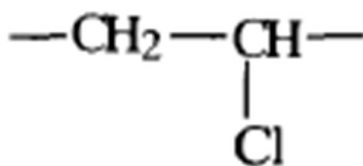
Tablica 3-4 Električna svojstva polimernih materijala (Moore, 1997)

| Materijal | Tip | Otpornost na promjenu volumena (min) na 20 °C (nm) | Permitivnost na 50 Hz | Tan δ na 50 Hz |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------------------------|-----------------------|----------------|
| <i>Termoplastika</i> | | | | |
| Polivinil klorid | TI 1 | 2×10^{11} | 6 - 7 | 0,1 |
| Polivinil klorid | 2 | 1×10^{12} | 4 - 6 | 0,03 - 0,1 |
| Polivinil klorid | TI 2 | 1×10^{11} | 6 - 7 | 0,09 - 0,1 |
| Polivinil klorid | 4 | 1×10^9 | 5 - 6 | 0,07 - 0,13 |
| Polivinil klorid | 5 | 5×10^{11} | 6 | 0,9 |
| Polietilen LD | PE 03 | 1×10^{16} | 2,35 | 0,0003 |
| Polietilen LD | PE 2 | 1×10^{16} | 2,35 | 0,0003 |
| Polietilen HD | | 1×10^{16} | 2,35 | 0,0006 |
| Polipropilen | | 1×10^{16} | 2,25 | 0,0005 |
| <i>Elastomeri</i> | | | | |
| Guma za općenitu upotrebu | EI 1 | 1×10^{12} | 4 - 4,5 | 0,01 - 0,03 |
| Temperaturno otporna guma (NIEPR) | GP 4 | 1×10^{12} | 3 - 4 | 0,01 - 0,02 |
| Guma otporna na plamen | FR 1 | 1×10^{12} | 4,5 - 5 | 0,02 - 0,04 |
| Guma otporna na plamen | FR 2 | 1×10^{13} | 4 - 5 | 0,015 - 0,035 |
| OFR guma | OR 1 | 1×10^{10} | 3 - 11 | 0,05 - 0,10 |
| Silikonska guma | EI 2 | 1×10^{12} | 2,9 - 3,5 | 0,002 - 0,02 |
| Etilen vinil acetat | EI 3 | 1×10^{12} | 2,5 - 3,5 | 0,002 - 0,02 |
| Tvrđi etilen vinil acetat | GP 6 | 1×10^{13} | 3,2 | 0,01 |
| Umrženi polietilen | GP 3 | 1×10^{14} | 2,3 - 5,2 | 0,0004 - 0,005 |

3.3.3. Vrste termoplastične izolacije kabela i njihova svojstva

3.3.3.1. Polivinil klorid (PVC)

Osnovna građevna jedinica polivinil klorida (PVC) prikazana je na slici 3-2.



Slika 3-2 Strukturna formula polivinil klorida (Moore, 1997)

Polivinil klorid (PVC) se ne može obraditi ekstruzijom bez dodavanja materijala, npr. plastifikatora i maziva, koji između ostalog, djeluju kao pomoćna sredstva za obradu. PVC je također jako polaran, zbog C-Cl dipolnog momenta te dodavanje plastifikatora pomiče maksimum električnih gubitaka u kabelu na nižu temperaturu s konstantnom frekvencijom. Svojstva PVC-a su takva da su neke vrste prikladne kao izolacijski materijali do 6 kV (Moore, 1997).

Osim plastifikatora pri proizvodnji polivinil kloridne smole dodaju se još i punila i stabilizatori kako bi PVC bio prikladan za električne instalacije. Sama smola je karakterizirana svojom težinom i odsutnosti nečistoća. Najčešći plastifikator koje se koristi je dioktil ftalat i on se često koristi zajedno sa sekundarnim plastifikatorom.

Kao punilo se obično koristi kalcijev karbonat, obično bjelanjak, a može biti presvučen lubrikantom poput kalcijevog stearata za poticanje ekstrudibilnosti. To nije samo razrjeđivač, već on povećava otpornost smjese na vruću deformaciju. Najčešći stabilizatori opće namjene su olovni karbonat i dvobazni olovni sulfat. Čitava formulacija je optimizirana s ciljem poboljšanja mehaničkih i električnih svojstava, jednostavnosti obrade i smanjenja troškova.

Pored mješavina opće namjene, dostupni su i drugi pripravci za određene aplikacije. Tamo gdje je potrebna veća temperaturna otpornost, npr. za oblaganje kabela duroplastičnom izolacijom, koristan je manje hlapljivi plastifikator poput didecil ftalata. Za izolaciju pri visokoj temperaturi može se koristiti di-tridecil ftalat. Za primjenu na niskim temperaturama, PVC se može proizvesti tako da bude fleksibilan na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ izostavljenjem punila i nadomještanjem normalnih ftalata sebakat ili adipat ester plastifikatorima. Danas je uobičajenije koristiti gumu ili druge duroplastične materijale za takve situacije (Moore, 1997).

3.3.3.2. Polietilen (PE)

Polietilen je polukristalni polimer s ponavljajućom jedinicom $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$. Ova ponavljajuća jedinica osnova je za sve vrste polietilena s razlikama u kemijskoj strukturi, molekularnoj težini i gustoći, koje se dobivaju primjenom različitih metoda polimerizacije. Polietilen visoke gustoće (HDPE), s gustoćom od 945 kg/m^3 do 960 kg/m^3 ima manje lanaca i kraće lance od polietilena male gustoće (LDPE) koji imaju gustoću od 916 kg/m^3 do 930 kg/m^3 . Polietileni vrlo niske gustoće (VLDPE) imaju gustoću od 845 kg/m^3 do 910 kg/m^3 . Veća gustoća izravna je posljedica veće kristaliziranosti koja je rezultat smanjenog

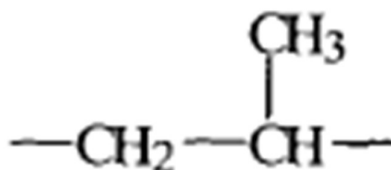
razgranavanja lanaca. Među ostalim svojstvima koja se povećavaju s kristaliziranosti su krutost i temperatura tališta. Temperatura tališta povećava se od 110 °C do 130 °C dok se gustoća povećava od 916 kg/m³ do 960 kg/m³. Kristalnost (postotak volumena materijala koji čine kristali) polietilena niske gustoće je obično od 45 % do 55 % dok kod polietilena visoke gustoće ona iznosi od 70 % do 80 % (Moore, 1997).

Dvije novije vrste polietilena koje se danas sve više koriste za oblaganje kabela su linearni polietilen niske gustoće (LLDPE), izrađen postupkom s niskim tlakom, sličnom onome koji se koristi za proizvodnju polietilena visoke gustoće i polietilena srednje gustoće (MDPE).

Iako su svojstva polietilena pogodna za oblaganje kabela, on se češće koristi kao izolacija zbog svojih odličnih električnih karakteristika s obzirom na to da je nepolarni materijal. Veći dio malih električnih gubitaka nastaje zbog nečistoća kao što su produkti oksidacije nastali tijekom prerade ili ostaci iz procesa polimerizacije. LDPE se koristi i za izolaciju i za oblaganje. HDPE ima manje primjena i uglavnom se primjenjuje za oblaganje kabela.

3.3.3.3. Polipropilen (PP)

Osnovna stukturna jedinica polipropilena prikazana je na slici 3-3.



Slika 3-3 Strukturna formula polipropilena (Moore, 1997)

Polipropilen je znatno tvrdi i krući od polietilena unatoč nedavnim napretcima u tehnologiji polimerizacije koja je omogućila proizvodnju mnogo fleksibilnijeg polipropilena, a s obzirom na to da se komercijalni razredi homopolimera ne tope sve do temperature od oko 160 °C nastao je veliki interes za njih.

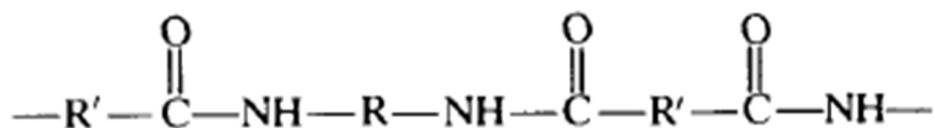
Termolastični elastomeri

Termoplastični elastomeri se mogu obrađivati na opremi za obradu termoplastike i modificirane gume. Jedinstvena svojstva uključuju izvanrednu otpornost na ulje, zamor materijala od djelovanja topline te otpornost na vremenske uvjete s dobrim općim svojstvima

gume. Dostupno je nekoliko vrsta, blok kopolimeri i fizičke mješavine termoplastike ili elastomera raspršenih u termoplastičnoj matrici.

3.3.3.4. Najlon

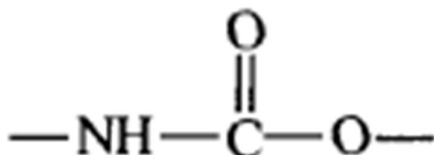
Grupa najlona sastoji se od strukturnih jedinica prikazanih na slici 3-4, gdje su R i R' grupe alkilena. Ovi kondenzacijski polimeri mogu biti formirani od dvobazne kiseline i diamina za dobivanje najlona 6, najlona 66 ili najlona 11, gdje znamenke predstavljaju broj ugljikovih atoma u polimernom lancu. Ti materijali imaju različite temperaturne točke omekšavanja, otpornost na habanje i apsorpciju vode i koriste se u područjima gdje su potrebni čvrsti materijali otporni na abraziju. Neki od njih imaju dobru otpornost na omekšavanje do oko 200 °C (Moore, 1997).



Slika 3-4 Strukturna formula najlona (Moore, 1997)

3.3.3.5. Poliuretani

Poliuretani su karakterizirani uretanskom grupom koja je prikazana na slici 3-5.



Slika 3-5 Strukturna formula poliuretana (Moore, 1997)

Poliuretani se proizvode kemijskom reakcijom poliestera koji završavaju hidroksilnom skupinom ili polieter predpolimera sa izocijanatom. Termoplastični poliuretani se uglavnom koriste za specijalna oblaganja upravo zbog svoje velike otpornosti na habanje.

3.3.3.6. Poliester blok kopolimeri (PEE)

Poliester blok kopolimeri se sastoje od čvrstih segmenata polibutilen teraftalata i mekog segmenta dugih lanaca polieter glikola. Svojstva PEE su određena omjerom čvrste i meke komponente. Jednostavni su za obradu, imaju dobru kemijsku otpornost i široku temperaturnu otpornost i zadržavanje mehaničke čvrstoće i trajnosti.

3.3.3.7. Fluorirani polimeri

Politetrafluoretilen (PTFE) je najpoznatiji i najšire primjenjeni fluorirani polimer, a njegova strukturna formula prikazana je na slici 3-6.



Slika 3-6 Strukturna formula fluoriranog polimera (Moore, 1997)

Polimer je nepolaran i ima odlična električna svojstva. Ne može se smatrati pravom termoplastikom jer je njegova viskoznost kod taljenja toliko visoka da njegova ekstruzija nije moguća. Izolacija vodiča politetrafluoretilenom se mora primjeniti hladnim postupkom oblikovanja, nakon čega slijedi postupak sinteriranja kako bi se čestice polimera spojile. Dobra električna svojstva se kombiniraju s vrlo visokom kemijskom i temperaturnom otpornošću.

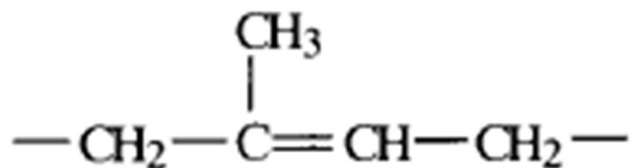
3.3.4. Vrste duroplastične izolacije i njihova svojstva

U industriji kabela duroplastični polimeri imaju primjenu u dva različita područja. Najprije, materijali od gume koji imaju unutrašnju fleksibilnost ili neko drugo zahtjevano svojstvo moraju biti umreženi kako bi se zadovoljili temperaturni uvjeti koji nastaju kada se primjenjuju određene vrste obloga kao i zbog postizanja čim lakšeg održavanja. Drugo, umrežavanje pruža veću otpornost na temperaturnu deformaciju pri višim radnim temperaturama kabela. Potreba za umrežavanjem ima tendenciju povećanja troškova, pa ukoliko se može koristiti termoplastični materijal poput PVC-a, npr. za kabele za domaćinstvo i industrijske kabele, onda se njemu daje prednost.

3.3.4.1. Prirodna guma (NR)

Prirodna guma je osušena ili koagulirana krutina dobivena iz lateksa koji se dobiva iz određenih vrsta stabala. U prošlosti metode sakupljanja i pripreme uzrokovale su varijabilnosti sastava i smjese, ali danas se prirodna guma proizvodi prema točno definiranim specifikacijama. To definira maksimalne razine nečistoća, pepela, dušika i hlapljivih sastojaka i kontrolira se plastičnost.

U kemijskom smislu prirodna guma je cis-1-4-poliizopren a njegova strukturna formula prikazana je na slici 3-7.

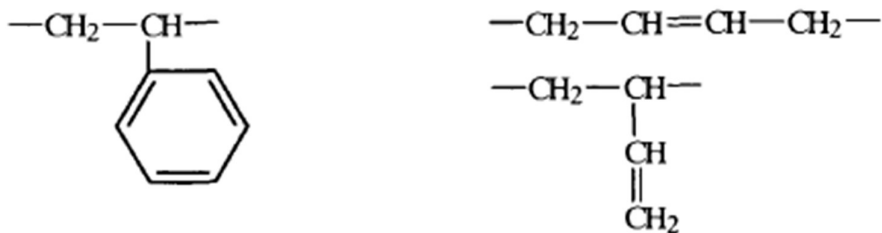


Slika 3-7 Strukturna formula prirodne gume (Moore, 1997)

Sirovu gumu je teško ekstrudirati na zadovoljavajući način. Prvo se mora usitniti do određene viskoznosti i pomiješati sa punilima i drugim aditivima. Umrežavanje prirodne gume se obično postiže upotrebom kemikalijama koje sadržavaju sumpor, a kako ti materijali mogu reagirati sa bakrom u kabelima, takvi vodiči su obično zaštićeni tankim slojem zaštite. Prirodna guma se ne može uspoređivati sa sintetičkim polimerima u smislu radnih temperatura. Prirodna guma je također osjetljiva na pucanje u prisutnosti ozona te se samim time rijetko koristi kao izolacijski ili obložni materijal. Temperaturna stabilnost na zraku ovisi o metodi umrežavanja te o korištenim oksidansima.

3.3.4.2. Stiren-butadienska guma (SBR)

Stiren-butadienska guma je amorfna guma proizvedena najčešće kopolimerizacijom emulzije stirena i butadiena. Strukturne formule stiren-butadienske gume prikazane su na slici 3-8

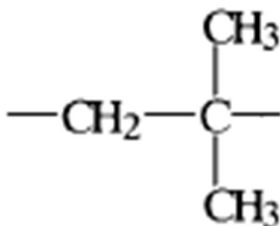


Slika 3-8 Strukturna formula stiren-butadenske gume (SBR) (Moore, 1997)

Svojstva stiren-butadienske gume ovise o omjeru miješanja stirena i butadiena, ali i o konfiguraciji butadiena. SBR ima istu primjenu kao i prirodna guma, te se ona koristi kao mješavina. U današnje vrijeme SBR se najčešće koristi kao modifikator u proizvodnji gume.

3.3.4.3. Butil guma (IIR)

Butil guma je kopolimer izobutilena (97 %) i izopropena (3 %), sa strukturnom formulom prikazanom na slici 3-9.



Slika 3-9 Strukturna formula butil gume (IIR) (Moore, 1997)

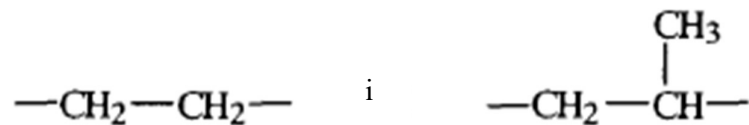
Butil guma se proizvodi u otopini s aluminij-klorid katalizatorom. Izopropen koji je prisutan u gumi osigurava pogodna mjesta za umrežavanje, a to se može učiniti ili sa sumporom koji se ponaša kao donator/ubrzič ili sa sustavom dibenzoil kinon dioksima (dibenzoyl quinone dioxime) pomiješanim sa crvenim olovom. Time se dobiva poboljšana otpornost na starenje.

Budući da je butilna guma očvrstnula bez zasićenja, ima izvrsnu otpornost na ozon.

S obzirom na to da je pogodna za rad na temperaturama do 85 °C u usporedbi s 60 °C za prirodnu gumu, butil guma je korištena za kabele s višim naponima i za kabele na brodovima. Danas je butil guma zamjenjena sa etilen-propilen gumom (EPR) zbog lakše proizvodnje i poboljšanih performansi (Moore, 1997).

3.3.4.4. Etilen propilen guma (EPR)

Etilen propilen guma obuhvaća niz polimera koji spadaju u dvije skupine. Prva skupina su zasićeni kopolimeri etilena i propilena (EPM) i oni tvore manju skupinu te se kod njih moraju koristiti organski peroksidi za umrežavanje. Njihova struktura može biti raspoređena nasumično ili u blokovima i prikazana je na slici 3-10.



Slika 3-10 Strukturna formula etilen propilen gume (EPR) (More, 1997)

Druga skupina dobiva se ugradnjom trećeg monomera, nekonjugiranog diena, radi osiguranja nezasićenosti za umrežavanje sumpornim spojevima i peroksidima. Ti materijali se nazivaju EPDM, a mogu sadržavati diklopedijadien (DCPD), ciklooktadien (COD), etiliden norbornen (ENB) i 1,4-heksadien (HD) kao komonomer.

Upotreba peroksida za umrežavanje omogućuje bolju dugoročnu otpornost na starenje i električna svojstva. Oni se pod djelovanjem topline raspadaju i daju radikale koji reagiraju s polimerom i rezultiraju stabilnim umreženjem ugljik-ugljik. Poboľšana svojstva se dobivaju primjenom koagenata s peroksidima, poput etilen glikol dimetilkrilata ili trialilcijanurata. Zbog svojih odličnih svojstava, bez pokazivanja zamora materijala pri temperaturi od 90 °C, EPR postupno zamjenjuje butilnu gumu kao izolacija i razmatra se njegova primjena za oblaganje kabela.

3.3.4.5. Umreženi polietilen (XLPE)

Unatoč izvrsnim električnim svojstvima upotreba polietilena ograničena je gornjom granicom radne temperature od oko 70 °C zbog njegove termoplastičnosti. Umrežavanjem, ovo ograničenje se uklanja te se radna temperatura povećava na 90 °C. Kod kabela niskog napona opće namjene može se ugraditi do 30 % kalcijevog karbonata u umreženi polietilen kako bi se smanjio trošak njegove proizvodnje. Ipak, za održavanje najboljih električnih svojstava, naročito ako je kabel uronjen u vodu, punjive smjese ne bi trebale biti korištene (Moore, 1997).

3.3.4.6. Umrežavanje u kablovima pod pritiskom

Najčešća metoda umrežavanja je utiskivanje peroksida u polimer nakon ekstruzije pod pritiskom pomoću topline kako bi se peroksid aktivirao. Ukoliko se para koristi za grijanje, tlak mora biti od 18 bara do 20 bara kako bi se postigla odgovarajuća temperatura od 210 °C. Ako se koristi cijev sa inertnim plinom grijana električnom strujom, tada pritisak mora biti od 5 bara do 10 bara kako bi se spriječilo stvaranje praznina raspadanjem peroksida.

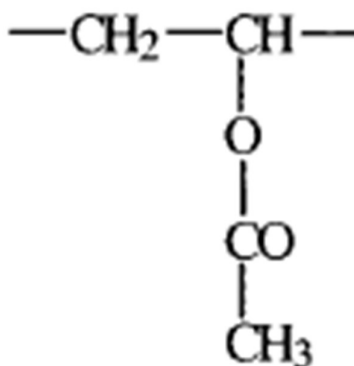
Odgovarajući peroksid se mora odabrati kako bi se osiguralo brzo umrežavanje bez očvršćivanja u ekstruderu, a najčešće korišteni peroksid za to je dikumil peroksid (Moore, 1997).

3.3.4.7. Kemijsko umrežavanje korištenjem silana

Noviji postupak, koristeći sada već dobro poznatu tehnologiju silikona, zamjenjuje uobičajen postupak umrežavanja kabela niskog napona. Osnovni sustav (Sioplas) razvio je Dow Corning u Velikoj Britaniji početkom 1970-ih godina prošlog stoljeća. Ovo je dvokomponentni sustav za koji su najprije pripremljena dva materijala. To su polimer koji se može umrežiti i glavna serija katalizatora. Oni se spajaju na posebnom stroju, a proizvod je nakon toga umrežen urananjem u vodu ili parom pod niskim tlakom.

3.3.4.8. Etil vinil acetat (EVA)

Etilen kopolimeri koji u sebi sadrže malu količinu vinil acetata poznati su već dugi niz godina. Strukturna formula etil vinil acetata prikazana je na slici 3-11.

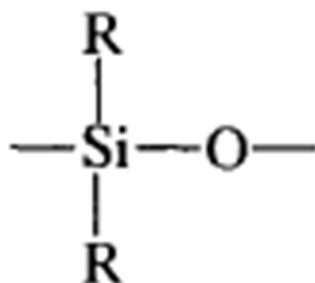


Slika 3-11 Strukturna formula etil vinil acetata (EVA) (Moore, 1997)

Polimeri se umrežavaju peroksidom ili radijacijom, a formulacija je slična onoj od etilen propilen gume (EPR). Otpornost na starenje na zraku je veća od EPR-a, radna temperatura je isto tako veća i kreće se oko 110 °C, ali električna svojstva poput permitivnost su lošija.

3.3.4.9. Silikonska guma

Strukturna formula silikonske gume prikazana je na slici 3-12 gdje R označava metil ili fenil. Mogu se koristiti i grupe vinila kako bi se poboljšalo umrežavanje peroksida.



Slika 3-12 Silikonska guma (Moore, 1997)

Silikoni imaju odličnu otpornost na temperaturu, gdje im radna temperatura može biti čak i do 180 °C.

4. VRSTE KABELA

Danas se koriste razne vrste kabela. Bilo u industriji, za prijenos električne energije, prijenos podataka, u kućanstvima ili poslovnim prostorima. Svi ti kabeli imaju jednu stvar zajedničku, a to je da se u jezgri svakog od ovih kabela nalazi vodič kroz koji protječe električna energija. Svaki od ovih kabela razlikuje se najviše po samoj konstrukciji, odnosno po području primjene. Kabeli koji se koriste za prijenos električne energije pomoću nadzemnih dalekovoda se jako razlikuju i po debljini i po vrsti izolacije od kabela koji se koriste u kućanstvima ili poslovnim prostorima.

Svi ti kabeli mogu se svrstati u nekoliko kategorija, a to su: kabeli za distribuciju električne energije dalekovodima, kabeli za distribuciju električne energije kućanstvima i poslovnim prostorima, podmorski kabeli, kabeli za prijenos podataka.

4.1. Kabeli za distribuciju električne energije visokog napona

Današnji kabeli za distribuciju električne energije visokog napona se svrstavaju u dvije grupe. To su kabeli koji se koriste za distribuciju električne energije nadzemnim putem, odnosno dalekovodima i kabeli koji se zakapaju u zemlju.

U prošlom stoljeću kao izolacija kabela kako je navedeno u prijašnjim poglavljima koristio se papir. Papir je bio odlično izolacijsko sredstvo s obzirom na to da kabeli za distribuciju električne energije u tadašnje vrijeme nisu morali prenositi struju visokog napona. Međutim, kako se s vremenom povećavao napon i potreba za sve više električne energije tako više papir nije bio dovoljno dobra izolacija za kabele.

I dan danas se papir koristi kao izolacija u takvim kabelima, ali razvojem tehnologije i mnogih puno boljih materijala, on se polako u potpunosti zamjenjuje sa tim materijalima. Ovisno o naponu struje koja prolazi kroz distribucijski kabel, kao izolacija se može koristiti papir, ali posebnim metodama pomiješan sa drugim materijalima (npr. XLPE, ERP, PVC).

Tijekom godina razvio se veliki broj kabela s izolacijom pod tlakom. Dva dizajna, oba napunjeni sa određenom vrstom tekućine, jedan pod niskim, a drugi pod visokim tlakom, sada čine veliku većinu novih instalacija u cijelom svijetu. Međutim, drugi koji koriste plin pod tlakom još uvijek nalaze određenu primjenu (Moore, 1997). Podjela tih kabela po skupinama vidljiva je u tablici 4-1.

Tablica 4-1 Podjela kabela za prijenos električne energije viskog napona (Moore, 1997)

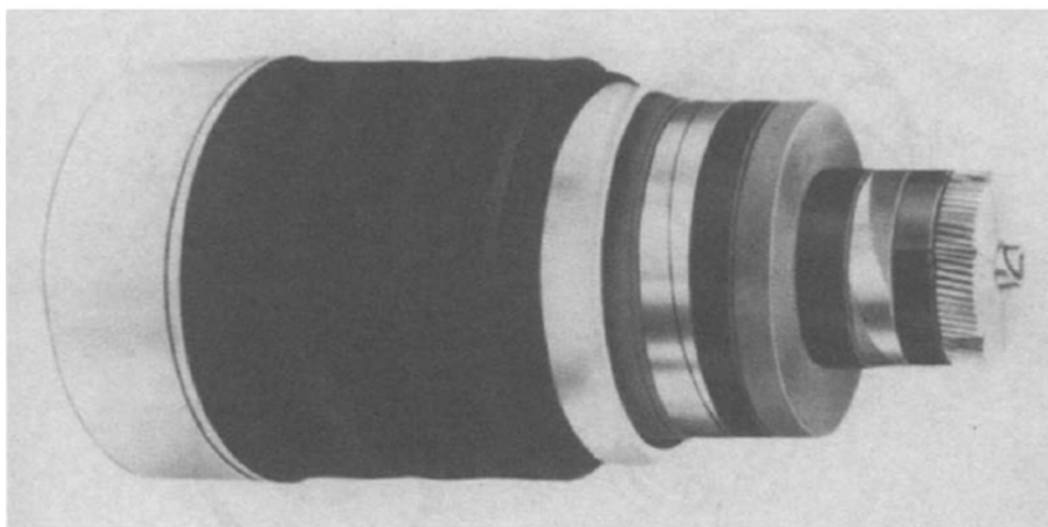
| Napunjeni tekućinom | | Plin unutar izolacije | |
|------------------------------------------|---------------|---------------------------------|---------------|
| Dizajn | Raspon napona | Dizajn | Raspon napona |
| <i>Olovna ili aluminijska obloga</i> | | | |
| FF kabele niskog pritiska | 30 - 525 | Plin pod pritiskom unutar kabla | 30 - 275 |
| Plosnati kabele | 30 - 132 | | |
| <i>Čelična cijev</i> | | | |
| FF kabele visokog pritiska | 30 - 500 | Plin pod pritiskom unutar kabla | 30 - 132 |
| Plin pod pritiskom s membranskom oblogom | 30 - 275 | | |

FF (*fluid-filled*) kabele: kabele punjen tekućinom

Svaka skupina može se još podijeliti na podskupine s obzirom na obloge koje se koriste i na način na koji se kabele uvlači u čeličnu cijev ispunjenu plinom pod tlakom. Ako se pogledaju rasponi radnih napona prikazani u tablici 4-1, može se vidjeti da su kabele napunjeni tekućinom pod tlakom prikladniji od kabela punjenih plinom pod pritiskom za korištenje do najviših napona (525 kV). Također, ti kabele imaju potencijal upotrebe na 750 kV i 1000 kV. Međutim kabele punjeni plinom pod tlakom ograničeni su na od 132 kV do 275 kV prema dizajnu (Moore, 1997).

4.1.1. Samostalni kabele napunjeni sa tekućinom

Kabele napunjen tekućinom je najrasprostranjenija vrsta kabela za prijenos električne energije i dugo vremena je u Velikoj Britaniji bio jedini dizajn za nove instalacije na 275 kV i 400 kV. Sam kabele je vidljiv na slici 4-1.

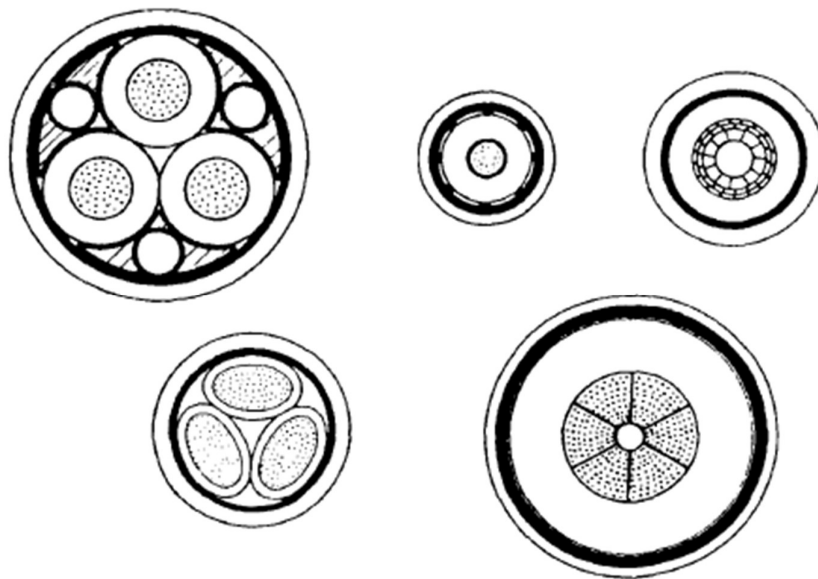


Slika 4-1 275 kV kabele punjen tekućinom pod pritiskom (Moore, 1997)

Izvorno je poznat kao kabel punjen uljem, a ime mu je promijenjeno u kabel punjen tekućinom kako bi se u obzir uzela činjenica da se danas najčešće koriste sintetičke tekućine.

Prvi put je uveden 1920-ih, a njegov razvoj je kontinuiran još od tada kako bi se zadovoljili progresivni zahtjevi za povećanjem napona i jakosti struje. To je i danas tako, s mogućnošću ispunjavanja budućih potreba za kabelima od 750 kV do 1100 kV (Moore, 1997).

Standardni dizajn sastoji se od bakrenog ili aluminijskog vodiča, papirnate izolacije i aluminijskih obloga, čiji se presjek može vidjeti na slici 4-2. Izrađeni su tako da izdrže postojani unutarnji tlak do 5,25 bara, s prolaznim pritiscima do 8 bara. Općenito veći pritisci mogu omogućiti uštedu energije kod punjenja tekućinom, ali obično nedovoljnu za opravdanje povećanja troškova izrade kabela. Međutim, u posebnim slučajevima, kao što su kabeli ugrađeni na rutama s naglim promjenama nadmorske visine, projektiranje do maksimalnog tlaka od odprilike 30 bara može biti ekonomično.



Slika 4-2 Poprečni presjeci tipičnih kabela punjenih tekućinom pod pritiskom (Moore, 1997)

4.1.2. Kabeli punjeni plinom pod tlakom

Postoje dvije osnovne vrste kabela punjenih plinom pod tlakom i izoliranih papirom, od kojih jedna koristi plin u dielektriku za suzbijanje ionizacije, a druga vrsta primjenjuje plin pod pritiskom na membranu kako bi dielektrik bio pod konstantnim pritiskom u svim

uvjetima. Kabeli koji primjenjuju plin pod tlakom van dijafragme su kompresijski kablovi i visokotlačni kabeli ispunjeni plinovima (HPGF).

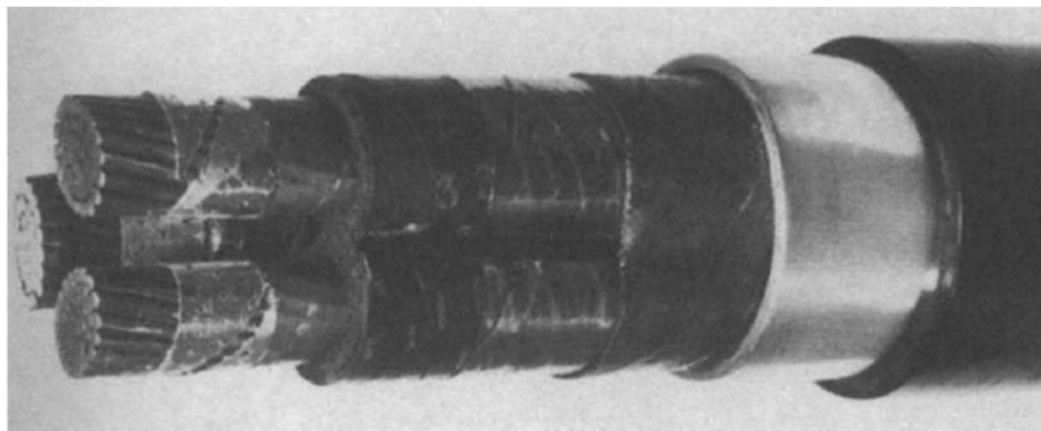
4.1.2.1. *Kabeli sa plinom u dielektriku*

Kod ove vrste kabela izolacija je saturirana sa dušikovim plinom pod nominalnim tlakom od 14 bara, što smanjuje električno pražnjenje koje bi se inače moglo dogoditi u bilo kojim šupljinama unutar izolacije. Za ovu vrstu kabela koriste se dvije metode proizvodnje, a to su impregnacija osušene papirnate izolacije viskoznom impregnantom i primjena papirnatih vrpca prethodno impregniranih vazelinom.

Osnovni princip kabela napunjenog plinom je da je vodič izoliran prethodno impregniranim papirnatim vrpcama koje se obrađuju kako bi se osiguralo da krajevi kabela ne ostanu bez impregnanta i da se prije puštanja u rad, dielektrik napuni sa dušikom do nazivnog tlaka od 14 bara radi suzbijanja ionizacije. Stoga je plin sastavni dio kompozitnog dielektrika.

Značajne duljine jednožilnih i trožilnih kabela punjenih plinom (slika 4-3) koriste se u rasponu napona od 33 do 138 kV (Moore, 1997).

Glavna prednost ove vrste kabela je relativna jednostavnost pomoćne opreme i postupaka spajanja.



Slika 4-3 Trožilni 33 kV kabel punjen plinom pod pritiskom (Moore, 1997)

4.1.2.2. *Kabeli s plinom pod pritiskom u membrani*

Kabel s komprimiranim plinom dizajniran je tako da olakša korištenje visokih električnih naprežanja održavajući dielektrik u potpuno impregniranom stanju primjenom plina pod

visokim tlakom na membranu kako bi se spriječilo stvaranje praznina u dielektriku. Prvo je uveden kao samostalni kabel, pri čemu se se tlak plina primjenjuje između omotača membrane, nanesenog direktno preko kabela i vanjske ojačane potporne obloge plina. Posljednjih godina kabeli s komprimiranim plinom koriste se samo u cijevnim kabelskim sustavima. Tri pojedinačne jezgre, odnosno trožilni kabel uvlači se u unaprijed postavljenu čeličnu cijev, koja se zatim puni dušikom do pritiska od oko 14 bara.

Vodiči ovalnog oblika koriste se za jednostruke jezgre. Vodič je obično oklopljen papirnatim vrpcama, a jezgra je oklopljena metaliziranim papirima ili trakama od obojenih metala. Jednožilni ili trožilni kabel suši se i impregnira u uobičajenoj kabelskoj posudi, pri čemu je impregnat viskoznan.

Budući da kabeli s komprimiranim plinom zahtjevaju i membranu i oblogu otpornu na pritisak, općenito je nekonkurentan ostalim tipovima kabela pod pritiskom. Kabel s plinom pod pritiskom je u prilično ograničenoj upotrebi (Moore, 1997).

4.2. Kabeli za distribuciju električne energije kućanstvima i poslovnim prostorima

Kabeli za distribuciju električne energije u kućanstvima i poslovnim prostorima se koriste još od 19. stoljeća. Prvi kabeli koristili su se za telegraf i kao i današnji kabeli imali su bakrenu jezgru, ali razlika je bila u izolaciji te jezgre. U prošlosti se koristila jednostavna izolacija kao što je pamuk, prirodna guma i dr. Kroz vrijeme se pokazala potreba za razvijanjem bolje izolacije kabela pa se sredinom prošlog stoljeća razvila i proširila upotreba plastike kao najraširenijeg izolatora za kabele.

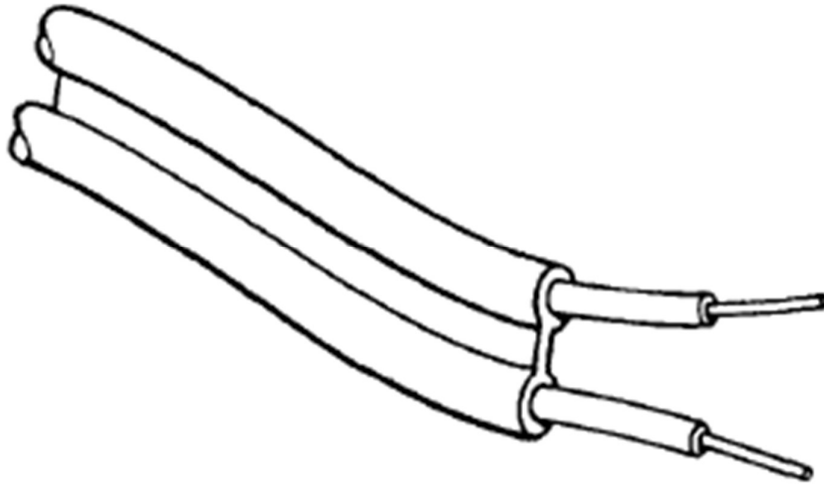
4.2.1. Kabeli sa PVC izolacijom i oblogom

4.2.1.1. Jednožilni kabeli

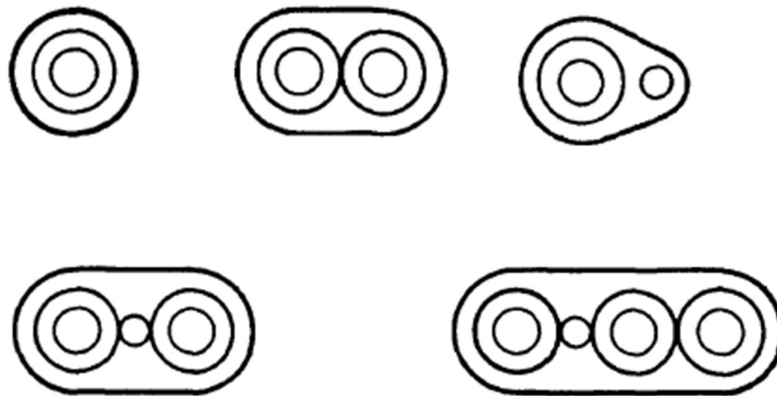
Jednožilni kabeli obično se isporučuju u rasponu površina poprečnog presjeka vodiča od 1 mm^2 do 35 mm^2 . Pojedinačne čvrste žice koriste se za veličine vodiča od 1 mm^2 , $1,5 \text{ mm}^2$ i $2,5 \text{ mm}^2$, a upleteni vodiči za veće veličine (Moore, 1997).

4.2.1.2. Kabeli plosnatog oblika

Kabeli plosnatog oblika (Slika 4-4 i 4-5) pokazali su se vrlo prikladnima za pričvršćivanje na građevinske površine zbog svoje male dubine koja olakšava prikriivanje.



Slika 4-4 Njemački tip kabela plosnatog tipa (Moore, 1997)



Slika 4-5 Poprečni presjek jednožilnog kabela plosnatog oblika (Moore, 1997)

Kabeli ravnog oblika se uglavnom koriste u Velikoj Britaniji iako se slični kabeli koriste i u Njemačkoj i SAD-u. Ovaj tip kabela osvojio je svoju poziciju u odnosu na konkurentne tipove zbog tehničkih performansi i ekonomske prednosti, kako u uporabi tako i u proizvodnji. Dostupan je u dva oblika, tj. sa ili bez vodiča za zaštitu električnog kruga (CPC). CPC nije izoliran i nalazi se između dva izolirana vodiča što se može vidjeti na slici 4-5. Raspon površina poprečnog presjeka za dvožilne i trožilne kablove je od 1 mm^2 do 16 mm^2 .

Debljina izolacije i obloga različitih veličina kabela tijekom godina primjene je znatno varirala. Na njih je najviše utjecao spoj praktičnog iskustva i ispitivanja u odnosu na potrebe

za uslugama, poboljšanja proizvodnog procesa, napretcima u tehnologiji proizvodnje PVC-a, te primjena tehnika osiguranja kvalitete na svim aspektima izrade kabela (Moore, 1997).

4.2.1.3. *Okrugli višezilni kabeli*

Asortiman lakih PVC izoliranih i obloženih okruglih od dvo do peterožilnih kabela spada u ovu kategoriju. Kabeli ovog tipa mogu imati čvrste žičane vodiče do 10 mm² ili upletene vodiče iznad 10 mm². Ukupan raspon iznosi od 1,0 mm² do 35 mm². Dodatni ekstrudirani, mekani nevulkanizirani unutarnji omotač koristi se za ispunjavanje praznog prostora između jezgre. Najčešće se primjenjuju u većim instalacijama, osobito u vlažnim uvjetima, za montažne kuće, poslovne, industrijske i poljoprivredne prostore.

4.2.2. Kabeli za industrijsku upotrebu

Tipovi industrijskih kabela koji se danas najčešće koriste su višezilni kabeli s bakrenim vodičima izoliranim s PVC, EPR ili XPLE izolacijom. Oni se obično klasificiraju kao 300 V / 500 V ili 600 V / 1000 V. S obzirom na veličinu vodiča industrijski kabeli imaju svakojaku primjenu od grijanja, ventilacije, pogon elektro motora u pogonima itd. (Moore, 1997).

4.2.2.1. *PVC, oklopljeni kabeli za kontrolu napajanja*

U slučajevima gdje postoji značajan rizik od mehaničkih oštećenja, uobičajeno je koristiti kabele manjih presjeka (do 16 mm²) od 600 V / 1000 V prema BS6346 ili BS5467 koji imaju XLPE izolaciju. Ovaj standard obuhvaća kabele s oklopom od pocinčane čelične žice.

U kabelima presjeka do 16 mm² vodiči su od bakra sa okruglim žicama za vodiče manjeg presjeka i upleteni za vodiče većeg presjeka. Takvi kabeli koriste se za napajanja ili kontrolu u industrijskim i drugim okruženjima, bilo na otvorenom, ili podzemnom okruženju. U britanskom standardu 6121 (BS 6121) specificirane su određene brtve koje osiguravaju odgovarajući prekid za oklopljene žice kako bi se osiguralo adekvatno uzemljenje.

4.2.2.2. *Kabeli sa duroplastičnom izolacijom*

PVC kabeli bili su istaknuti u sustavima distribucije i upravljanja napajanjem u industrijskim okruženjima. No, termoplastičnost PVC-a je ograničenje koje utječe na trajnu strujnu vrijednost, preopterećenje i ocjenu kratkog spoja kabela. Ovo ograničenje je naglašeno kod visokih temperatura okoliša. XLPE i EPR izolirani kabeli, s odgovarajućim

zaštitnim omotačima, imaju prednost što vodiči mogu raditi do maksimalne radne temperature od 90 °C, s maksimalnom temperaturom kratkog spoja od 250 °C.

Kabeli sa EPR izolacijom i CSP oblogom izvorno korišteni kao brodski kabeli, često se koriste u postrojenjima za proizvodnju čelika i ljevaonicama, gdje temperatura okoliša može biti visoka.

XLPE izolirani oklopljeni kabeli LSF oblogom koji ispuštaju manje plinova i korozivnih sastojaka kada su izloženi vatri, sve se više koriste u industrijskim i drugim okruženjima gdje je njihova požarna učinkovitost prednost, a mogu se koristiti i pri temperaturi vodiča od 90 °C.

4.2.2.3. *Kabeli za primjenu u rudarstvu*

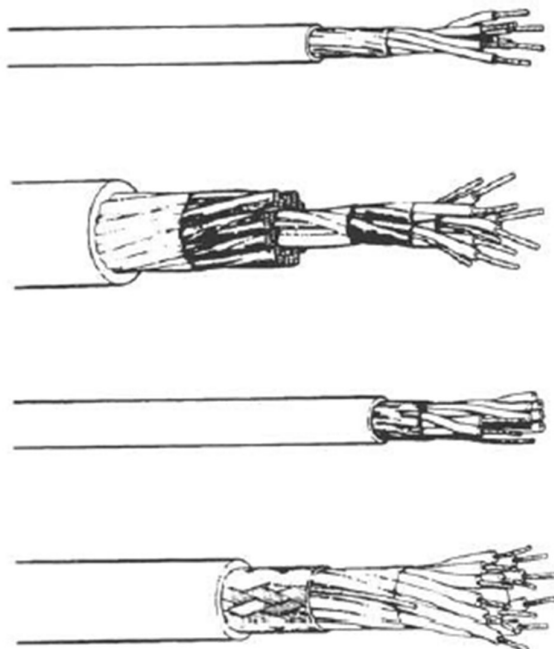
Fiksni kabeli za rudarstvo slijede sličan obrazac kao i za opću industrijsku distribuciju. Za napone do 1,9 kV / 3,3 kV najčešća izvedba tih kabela je s PVC izolacijom i oklopom od čelične žice. Neki kabeli s PVC izolacijom su korišteni za 3,8 kV / 6,6 kV i za 6,35 kV / 11 kV. Trenutno, rudarska industrija zahtjeva da se za ove navedene napone koristi EPR ili XLPE izolacija kabela. Oklop kabela je uglavnom jednoslojni, ali dvostruki oklop koristi se za kabele koji se postavljaju u rudarska okna (Moore, 1997).

4.3. **Kabeli za prijenos podataka**

Današnji kabeli za prijenos podataka uglavnom sadrže optička vlakna radi većih brzina prijenosa podataka. Prije izuma optičkih vlakana u kablovima za prijenos podataka se redovito koristio bakar kao vodič. Bakar se i dan danas koristi u brojnim zemljama u kablovima za prijenos podataka, ali sve više ga zamjenjuju optička vlakna koja omogućavaju veće brzine prijenosa podataka uz manje troškove.

4.3.1. Upleteni kabeli za prijenos podataka

Danas postoji više vrsta upletenih kabela za prijenos podataka koje su prikazane na slici 4-6.



Slika 4-6 Vrste upletenih kabela za prijenos podataka (Moore, 1997)

Površina poprečnog presjeka vodiča korištenih u takvim kabelima kreće se obično od $0,2 \text{ mm}^2$ do $0,8 \text{ mm}^2$ a mogu biti čvrsti ili namotani. PVC izolacija se koristi u kabelima za prijenos podataka na male udaljenosti i za male brzine prijenosa podataka, dok se kod kabela za prijenos podataka na velike udaljenosti i velike brzine prijenosa podataka koristi izolacija od polietilena (PE) ili polipropilena (PP).

Između pojedinih parova vodiča u kabelu stavlja se laminirana mreža folija kako bi se smanjile smetnje. U cjelini, mreže pružaju zaštitu od vanjskih utjecaja i one mogu biti laminirane folije sa ili bez pletenica.

Vanjske obloge su obično izrađene od polivinil klorida prema specifičnoj primjeni, uključujući visoke i niske radne temperature i kako bi pružale otpornost na plamen.

4.3.1.1. Vodič

Kao vodič kod upletenih kabela za prijenos podataka se obično koristi čvrsti bakar. U prošlosti se koristio aluminij jer je cijena bakra bila veća od aluminija. Još jedan od razloga napuštanja korištenja aluminija u kabelima za prijenos podataka je korozija vodiča.

Promjer vodiča koji se koristi u tim kabelima ovisi ponajviše o sustavu u kojem se kabel koristi. Promjeri korištenih vodiča su obično 0,32 mm, 0,4 mm, 0,5 mm, 0,6 mm i 0,9 mm.

4.3.1.2. *Izolacija*

Polietilen ima mnoga poželjna svojstva, uključujući visoku izolacijsku otpornost, nisku relativnu dielektričku konstantu, stabilnost vokalnih frekvencija i niske troškove održavanja, što ga čini posebno pogodnim za vanjske telekomunikacijske kabele. Polietilenska izolacija može biti čvrsta ili spužvasta. Izolacija u obliku spužve je omogućila uvođenje ispunjenog kabela bez povećanja promjera samog kabela u usporedbi s čvrstim kabelom polietilenske zračne jezgre. Iako spužvasta izolacija nije robustna kao čvrsta izolacija, kroz dulji period korištenja, pokazala se više nego adekvatna.

4.3.1.3. *Montaža kabela*

Dva ili četiri izolirana vodiča se omotavaju jedan oko drugoga kako bi tvorili dva para. Obično se 10 ili 25 parova grupiraju i tvore jednu jedinicu kabela. Boja izolacije mora biti različita kako bi se svaki od tih parova mogao zasebno odrediti. Jedinice kabela se dalje grupiraju u veće skupine koje zajedno tvore jezgru kabela s određenim brojem parova. Jedinice i grupe jedinica imaju obojene vezivne vrpce koje se omotavaju oko njih što omogućava da se svaka jedinica pojedinačno indentificira.

4.3.1.4. *Ispuna*

Ulazak vode u kabel može povećati kapacitet upletenih parova do 125 %, povećavajući pritom prigušenje i do 60 %, ali ulazak vode nije poželjan. Nadalje, rupice u izolaciji mogu dovesti do kratkih spojeva unutar žica u takvim uvjetima. Ispuna praznog prostora unutar kabela ograničava ulazak vode u kabel bilo kroz oštećeni omotač ili zglob. Ulazak vode u kablove se može spriječiti tlačenjem kabela. Kabel je zapečaćen na jednom dijelu i zrak pod tlakom se upuhuje u prazan prostor u kabelu. Tlak na kraju kabela se mora pratiti i ukoliko dođe do pada tlaka, to znači da je izolacija kabela oštećena. Kabeli koji se zakapaju u zemlju se ispunjavaju bez pritiska. Mješavine za ispunu takvih kabela su uglavnom na bazi vazelina i formulirane su tako da su kompatibilne s izolacijom.

4.3.1.5. *Omotavanje jezgre*

Jezgra se omotava jednom ili više puta, prvenstveno da ne dođe do omekšavanja izolacije uslijed topline od ekstruzije obloga. Ostala poželjna svojstva omotača jezgre su osigurati otpor između napona vodiča i metalne prepreke za vlagu, kao i spriječiti ulazak vode u područje između obloge i jezgre. Vrpce za omotavanje jezgre mogu biti plastične, papirnate ili od materijala koji bubri u kontaktu s vodom, što ovisi o području primjene kabela (Moore, 1997).

5. METODE RECIKLIRANJA KABELA I NJIHOVA PRIMJENA

Zbog visokog sadržaja bakra, niskih toškova recikliranja, malog utjecaja na okoliš, jednostavnih postupaka oporabe i niske potrošnje energije bakar dobiven iz otpadnih kabela kao sirovina postao je proizvod visoke vrijednosti.

Tradicionalne metode recikliranja otpadnih kabela oslanjaju se na otvoreno spaljivanje kako bi se dobio bakar. Budući da zaštitni sloj bakrenog kabela sadrži halogen, proces spaljivanja će stvoriti veliku količinu otrovnih plinova i prašine, uzrokujući ekstremno pogoršanje stanja okoliša i ozbiljnu štetu ljudskom zdravlju. Uz to, plastika u kabelima se isto tako može reciklirati i prenamjeniti u druge svrhe, te se ona ukoliko se spaljuje gubi u potpunosti, a i kvaliteta bakra se smanjuje zbog samog gorenja.

5.1. Pregled tehnologija recikliranja i obrade otpadnih kabela

Glave metode obrade otpadnih kabela, ovdje navedene, uključuju metodu mehaničke obrade, postupke smrzavanja, recikliranje ultrazvučnim odvajanjem, odvajanje vodenim mlazom pod visokim tlakom, toplinskom obradom te kemijskom obradom.

Otpadni kabel podijeljen je u tri kategorije kabela. Prva kategorija su kabeli velikog promjera, stabilnog sastava i jedinstvenih specifikacija. Druga kategorija kabela su otpadni kabeli s različitim sastavima izolacijskih slojeva, srednjeg promjera i miješanih vrsta. Treća kategorija je otpadni kabel koji sadrži bakar malog promjera i miješanih vrsta (Li i sur., 2017).

5.1.1. Metoda mehaničke obrade

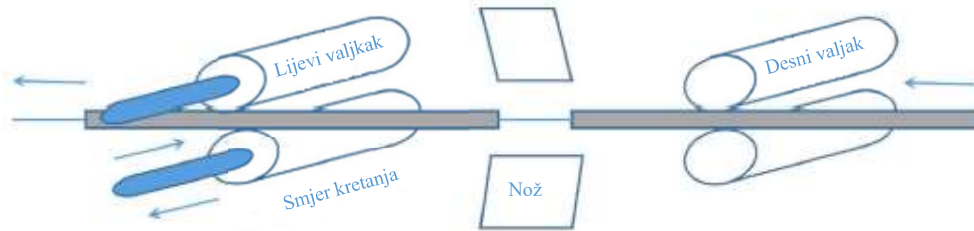
Metoda mehaničke obrade otpadnih kabela je tehnologija fizikalne obrade koja se široko koristi kako u laboratorijskim istraživanjima, tako i u velikim poduzećima za reciklažu otpadnih kabela.

Prva faza mehaničke obrade uključuje ručno grubo razvrstavanje otpadnih kabela 1., 2. i 3. kategorije. Zatim se odvaja bakrena jezgra i plastični omotač. Na kraju, odvojena bakrena jezgra i plastični omotač se zasebno recikliraju.

Najčešće korištene metode mehaničke obrade otpadnih kabela uključuju uklanjanje i drobljenje žica, a za to se koriste uređaji za uklanjanje žica i drobilice.

5.1.1.1. Tehnologija guljenja žica

Guljenje žica prikladno je za odstranjivanje otpadnih kabela velikih dimenzija. Jedan od mehaničkih automatskih strojeva za guljenje, pokretan programabilnim logičkim kontrolerom, čini jezgru kontrolnog sustava te je prikazan na slici 5-1.



Slika 5-1 Shematski prikaz stroja za guljenje žica (Li i sur., 2017)

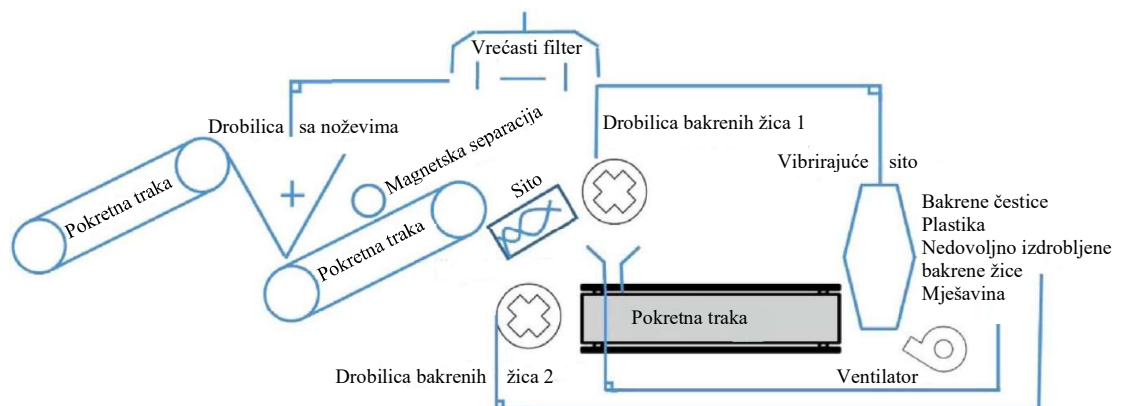
Guljenje kabela obavlja se "steper" motorom koji pokreće valjak koji s drugim valjkom čvrsto drži kabel te ga gura prema nožu koji se nalazi u nastavku. Prolaskom kroz nož oguljeni kabel dolazi do sljedeća dva valjka koji prihvaća oguljeni kabel i vuče ga.

Ovakva vrsta guljenja žica prikladna je za samo kabele određenih promjera, odnosno, može se guliti bilo koji promjer otpadnog kabela, ali se za svaki kabel posebno nož mora ručno namještati.

Posljednjih godina, istraživači i poduzeća za obradu otpadnih kabela iz Kine i inozemstva postigli su značajno poboljšanje u pogledu tehnologije guljenja otpadnih kabela. Dizajnirani su uređaji koji su u mogućnosti automatski namještati nož za guljenje kabela bez obzira na promjer otpadnog kabela.

5.1.1.2. Tehnologija drobljenja žica

Drobljenje žica uključuje drobljenje i sortiranje. Shematski prikaz postupka drobljenja i sortiranja žica prikazan je na slici 5-2.



Slika 5-2 Shematski prikaz postupka drobljenja bakrenih žica (Li i sur., 2017)

Otpadni kabeli drobe se u zrna određenih veličina. Iz izdrobljenih zrna odvaja se plastika i bakar opremom za sortiranje. Uređaji za drobljenje i sortiranje se skupa nazivaju „uređaj za bakrenu rižu“.

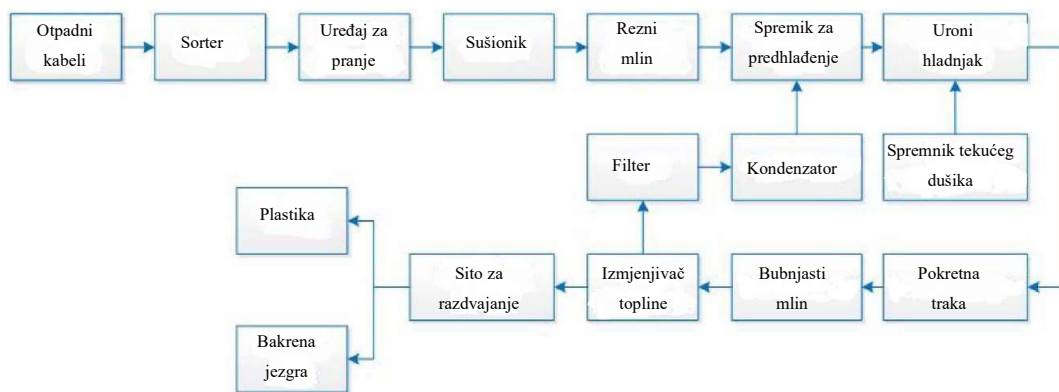
Otpadni kabeli se preko pokretne trake dovode u primarnu drobilicu (drobilica sa noževima). Nakon magnetske separacije, izdrobljeni proizvodi idu na sita sa kojih se zrna promjera većeg od promjera sita (odsjev) odvoje u sekundarnu drobilicu (drobilica bakrenih žica 1). Zrna veličine manje od promjera otvora sita (prosjev) idu na tercijarnu drobilicu (drobilica bakrenih žica 2). Proizvodi obaju drobilica dovode se pomoću pužnog transportera na vibracijska sita koja sa donje strane imaju ventilator te se razdvajaju na 4 proizvoda (bakar, plastika, nedovoljno izdrobljena bakrena žica i mješavina bakra i plastike). Bakar i plastika se skupljaju odvojeno, dok se nedovoljno izdrobljeni bakar i mješavina bakra i plastike vraćaju natrag u proces drobljenja i separiranja.

Na temelju veličine i kategorije (I, II, i III) obrađenih otpadnih kabela, sami režim rada i separiranja stroja za bakrenu rižu može varirati.

5.1.2. Postupak smrzavanja

Proces smrzavanja upotrebljava rashladna sredstva kako bi se smanjila lomna žilavost plastike, olakšavajući njezino lomljenje, dok bakrena jezgra zadržava svoju čvrstoću. Lomljenje plastičnog omotača obavlja se upotrebom vanjskih sila. Fiziklane metode (magnetska separacija, elektrostatička separacija, sijanje i gravitacijska koncentracija) se potom koriste za odvajanje vodljive bakrene jezgre od plastike. Ključ metode je pronalazak odgovarajućeg rashladnog sredstva. Tekući dušik je tipično rashladno sredstvo koje se koristi za smrzavanje otpadnih kabela (Li i sur., 2017). Vrelište tekućeg dušika je na temperaturi od $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, pa je lako postići temperaturu ispod $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Metoda koja koristi smrzavanje tekućim dušikom kako bi se plastični omotač odstranio iz otpadnog kabela prikazana je dijagramom toka na slici 5-3.



Slika 5-3 Blok dijagram proceca smrzavanja otpadnih kabela (Li i sur., 2017)

Otpadni kabele su razvrstani, isprani vodom, osušeni i rezani na blokove dužine od 5 cm do 10 cm na sobnoj temperaturi. Blokovi su prethodno ohlađeni u spremniku za predhlađenje, te su potom hlađeni uranjanjem u tekući dušik u vremenu od 10 do 15 min. Ohlađeni blokovi kabela izdrobljeni su drobilicom s valjcima, a plastika i bakrena jezgra su odvojene sijanjem. Novina ove metode je to da tekući dušik ulazi u potopni hladnjak iz spremnika tekućeg dušika. Tekući dušik uronjen u materijale pretvara se u plin u izmjenjivaču topline, a plin se potom ponovno pretvara u tekućinu nakon prolaska kroz filter i kondenzator, te se vraća u spremnik za predhlađenje kako bi se mogao ponovo koristiti.

Tehnologija smrzavanja za recikliranje bakra iz otpadnih kabela sastoji se u tome da se otpadni kabele nakon sortiranja i ukljanjanja nečistoća izrezuju na komadiće, a zatim zamrzavaju u hermetički zatvorenoj posudi s tekućim dušikom 10 minuta kako bi plastična izolacija na kabele postala krhka (Li i sur., 2017). Otpadni kabele su lomljeni čekićem kako bi se oslobodila plastika. Plastika zajedno sa bakrom se tada odvodi na vibracijska sita kako bi se međusobno odvojili.

Postupci smrzavanja pogodni su za otpadne kabele koji se ne mogu lako drobiti na sobnoj temperaturi. Istovremeno, zbog prednosti kao što su niske emisije prašine, niska sila drobljena, kao i činjenica da materijali osjetljivi na toplinu neće oksidirati i propadati, postupci smrzavanja imaju široku primjenu u raznim područjima.

Trenutno, tehnologija smrzavanja zahtjeva skupu opremu za smrzavanje otpadnih kablova (Li i sur., 2017). Zbog toga je iznimno važno razvijanje efikasnih postupaka hlađenja kao i optimizacija same tehnologije hlađenja kako bi se troškovi smanjili na minimum.

5.1.3. Tehnologija visokotlačnog vodenog mlaza

Tehnologija vodenog mlaza pod visokim tlakom nova je tehnologija "zelenog" recikliranja koja ne mijenja fizička i kemijska svojstva obrađivanog materijala. Ova tehnologija nudi izvrsne prednosti u pogledu utjecaja na okoliš i također se može upotrijebiti u industriji recikliranja otpadnih kabela (Li i sur., 2017).

Primjena visokotlačnog mlaza vode u recikliranju otpadnih kabela temelji se na tehnici rezanja visokotlačnim vodenim mlazom. Kada se otpadni kabel kreće jednoliko u odnosu na mlaz vode pod visokim tlakom, ogromna energija koju stvara mlaz vode uzrokuje kratkotrajan pritisak na površini plastičnog omotača otpadnog kabela, što rezultira njegovim kidanjem u vrlo kratkom vremenu. Visokotlačno rezanje vodenim mlazom je hladno rezanje, što znači da ne dolazi do termalne deformacije obrađivanog otpadnog kabela. Stoga ne utječe na kvalitetu bakrene jezgre.

Na temelju tehnike rezanja visokotlačnim vodenim mlazom, razvijena je tehnologija rezanja otpadnih kabela uz niske troškove i visoku učinkovitost recikliranja bakra. Glavni proces bio je umotavanje otpadnih kabela na kolut. Pritisak visokotlačnog mlaza vode (obično veći od 55 Mpa) i brzina puštanja kabela odabrani su na temelju veličine obrađivanog otpadnog kabela. Vodeni mlaz pod visokim pritiskom primjenjen je jednolikom brzinom kako bi se plastični omotač otkinuo. Nakon toga za odvajanje bakrene jezgre i plastičnog omotača, korištena je jednostavna separacijska oprema (Li i sur., 2017).

Iako je ovom tehnologijom jednostavno upravljati, ona ima nizak stupanj automatizacije. Stoga radnici moraju nadzirati proces rada. Osim toga, glavna putanja vodenog mlaza usmjerena je od kablova. Drugim riječima, pravi učinak se postiže tek od trenutka kada mlaz pogodi kabel, što rezultira gubitkom znatnog dijela energije.

Na osnovu navedenog, provedena su sveobuhvatna istraživanja obrade otpadnih kabela visokotlačnim vodenim mlazom (Li i sur., 2017). Poboljšanjem radne platforme i upravljačkog sustava, te povećanjem broja kao i promjenom položaja mlaznica vodenog mlaza, poboljšali su i izumili veliki broj opreme i postupaka za obradu otpadnih kabela korištenjem tehnologije visokotlačnog vodenog mlaza.

5.1.4. Recikliranje ultrazvučnim odvajanjem

Posljednjih godina postupno se primjenjuju ultrazvučne tehnologije za recikliranje elektroničkog otpada. Zbog izvrsne ekološke koristi i činjenice da ultrazvučni valovi ne

mijenjaju fizikalna i kemijska svojstva obrađivanih materijala, industrija za recikliranje otpadnih kabela uspješno primjenjuje ultrazvučnu tehnologiju.

Učinak ultrazvučne kavitacije odnosi se na rast i kolaps termodinamičkih osciliranih mikroskopskih mjehurića (šupljina) u tekućini pod ultrazvukom kada ultrazvučni tlak dosegne određenu vrijednost. Ovaj učinak primijenjen je na recikliranje otpadnih kabela u kojima efekt ultrazvučne kavitacije uzrokuje da otpadni kabeli uronjeni u vodu vibriraju kako bi se postiglo odvajanje bakrene jezgre od plastičnog omotača (Li i sur., 2017). Analizirajući utjecaj temperature vode, duljine rezanih kabela i omjera tekuće-čvrsto na učinkovitost razdvajanja jedno- i višežilnih kabela, autori su došli do zaključka da pod dvostrukim učinkom toplinskog širenja i sužavanja te efekta ultrazvučne kavitacije, učinkovitost odvajanja je optimalna kada je ultrazvučna frekvencija 20 kHz, vrijeme obrade kabela 5 minuta, a temperatura vode 60 °C. Duljina kabela je gotovo obrnuto proporcionalna učinkovitosti odvajanja.

Tehnologija odvajanja metala od nemetala u otpadnim kabelima pomoću ultrazvučnih valova, također je istraživana i patentirana. Prethodno obrađeni otpadni kabeli (sortirani, isprani i usitnjeni) ohlađeni su na temperaturu od -10°C u trajanju od 6 h. Cilj hlađenja bio je promijeniti fizikalna svojstva plastičnog omotača kako bi se odvajanje olakšalo. Nakon uranjanja u ultrazvučnu opremu sa omjerom tekućina-čvrsto od 10 do 20:1 tijekom 30 minuta do 2 h na temperaturi od 40 °C do 60 °C, otpadne kabele su obrađivali ultrazvukom 2 puta na temperaturi od 40 °C do 50 °C, ultrazvukom snage 500 W i gustoće energije 0,3 W/cm² s vremenom obrade od 5 sekundi do 5 minuta. Učinkovitost uklanjanja plastične obloge od bakrene jezgre iznosila je preko 90 % (Li i sur., 2017).

Recikliranjem ultrazvučnim odvajanjem smanjuje se vjerojatnost da će bakrene jezgre u otpadnom kابلu biti izdrobljene u prah, što znači da se gubitak bakra smanjuje. Ova tehnologija prikladna je za obradu otpadnih kabela I. i II. kategorije velikih promjera, ima veliku prilagodljivost te osigurava učinkovito uklanjanje plastične izolacije od bakrene jezgre. Uz to, u procesu kavitacije fizikalna i kemijska svojstva bakra se ne mijenjaju, pružajući odlične uvjete za recikliranje bakra.

5.1.5. Tehnike kemijskog recikliranja

Otpadne kablove II. i III. kategorije najteže je obraditi od svih otpadnih kabela zbog rasporeda bakrenih žica i neujednačenog promjera kabela. Stoga je te vrste otpadnih kabela teško reciklirati. U skladu s tim, predložene su tehnike kemijske obrade. Uobičajeni postupak kemijske obrade je postupak u kojem su kruti materijali uronjeni u niz otopina za luženje

kako bi se izlužio metal. Metal se nakon luženja iz otopine dobiva kristalizacijom, ekstrakcijom ili elektrolizom otopine za luženje. Najčešće se za luženje koriste amonijeve soli, kloridi, dušične kiseline ili biološko luženje. Međutim takve tehnike kemijske obrade nisu prikladne za obradu otpadnih kabela. Budući da otpadni kabel ima vrlo visok sadržaj bakra, izluženi bakreni ioni zahtjevaju velike količine otopina za luženje i mogu lako uzrokovati onečišćenje okoliša. Stoga, ukoliko se za obradu otpadnih kabela koriste kemijski postupci, potrebno je koristiti otopine soli ili organska otapala koja ne reagiraju s bakrenim jezgrama, ali otapaju plastičnu izolaciju, čime se postiže oslobađanje metalne jezgre od plastike (Li i sur., 2017).

Za otpadne kablove kategorije III koji imaju neujednačen raspored i promjer i koje je teško obrađivati mehaničkim metodama, razvijen je sustav za recikliranje upravo takvih kabela (Li i sur., 2017). Kataliziran sa TiO_2 (titanijev oksid) plastična izolacija otpadnih kabela brzo se razgrađuje u mješavinu plinova i prašine koja se sastoji od CO_2 i vodene pare kao glavne komponente, te kiselih i toksičnih plinova kao sekundarne komponente, što dovodi do oslobađanja plastične izolacije od bakrene jezgre. Vrući zrak se mora stalno upumpavati u spremnik kako bi se održavala temperatura od $400\text{ }^\circ\text{C}$ do $500\text{ }^\circ\text{C}$, osiguravajući na taj način učinkovitu razgradnju plastične izolacije otpadnog kabela. 100 kg TiO_2 može svakih sat vremena razgraditi od 10 kg do 50 kg plastične izolacije kabela.

Plastična izolacija dobivena fizikalnim postupcima odvajanja otpadnih kabela još uvijek sadrži malu količinu bakra. Kako bi se bakar dovoljno izdvojio iz ovih nisko kvalitetnih ostataka, ispitivana je biohidrometalurška metoda za izluživanje bakra iz otpadnih kabela. Bakterije *Acidithiobacillus ferrooxidans* su se prvenstveno koristile za luženje bakra preostalog u plastičnoj izolaciji (pri čemu je sadržaj bakra bio 4,9 %) dobivenog mehaničkom obradom otpadnih električnih kabela. Pri optimalnim uvjetima od $35\text{ }^\circ\text{C}$ i početnoj koncentraciji Fe^{3+} iona od 7,0 g/L postignuta je učinkovitost ekstrakcije bakra iznad 90 %. Rezultati eksperimenta pokazali su da se biokemijski procesi mogu koristiti za luženje bakra iz nekvalitetnih plastičnih ostataka izolacije, čime se ostvaruje maksimalni učinak recikliranja bakra iz otpadnih kabela (Li i sur., 2017).

5.1.6. Postupci povrata topline

5.1.6.1. *Spaljivanje*

U počecima recikliranja otpadnih kabela, glavni postupak dobivanja topline bilo je spaljivanje, koje je prikladno za obradu svih vrsta otpadnih kabela. Ova metoda je jednostavna i široko primijenjena. Plastična izolacija otpadnih kabela spaljuje se izravno u

spalionici kako bi se dobio bakar iz kabela. Međutim, u procesu spaljivanja površina bakra se u velikoj mjeri oksidira, što rezultira smanjenom čistoćom bakra. Zbog toga se reciklirani bakar ne može direktno upotrijebiti u drugim proizvodima, već mora proći dodatno čišćenje taljenjem i elektrolizom, što povećava korake prerade i troškove recikliranja. Izvješća su pokazala da je korištenjem ove metode recikliranja bakra, potrebno dodatnih 634,5 kg ugljena za obradu jedne tone otpadnih kabela. Uz to se smanjuje učinkovitost recikliranja bakra. Za spaljivanje jedne tone otpadnih kabela gubi se od 20 kg do 30 kg bakra (Li i sur., 2017). Istovremeno, s obzirom na to da glavne komponente plastične izolacije otpadnih kabela uključuju PVC (polivinilklorid), PE (polietilen) i usporivače plamena, dim i plinovi proizvedeni postupkom spaljivanja sadrže otrovne plinove i prašinu, uzrokujući štetne posljedice na okoliš i ljudsko zdravlje.

Procesi spaljivanja otpadnih kabela zabranjeni su u mnogim zemljama upravo iz navedenih razloga. Stoga se krenulo u istraživanje ekološki prihvatljivih rješenja spaljivanja otpadnih kabela. Ekološko spaljivanje otpadnih kabela koristi tehnologiju spaljivanja u kupki u kojoj otpadni kablovi direktno ulaze u zonu visokih temperatura (iznad 850 °C) radi spaljivanja. U tom procesu organske tvari se brzo razgrađuju kako bi se izbjeglo stvaranje dioksina (temperatura grijanja od 260 °C do 430 °C). Brzo hlađenje plina izgaranja može spriječiti stvaranje dioksina (Li i sur., 2017).

5.1.6.2. Termalna dekompozicija

S postupnim napuštanjem metoda spaljivanja, glavna tehnologija termičke obrade recikliranja otpadnih kabela je termička dekompozicija. Toplinsko raspadanje je pogodno za obradu otpadnih kabela II. i III. kategorije sa srednjim i malim promjerima.

Postupak obrade sastoji se u tome da se otpadni kabeli zatvaraju u hermetički zatvoren spremnik na temperaturu od 500 °C do 900 °C. U nedostatku kisika, plastična izolacija se može pretvoriti u organska goriva nakon destilacije, čime se postiže učinkovito odvajanje bakra i organskih tvari. Termička obrada se provodi bez prisustva kisika kako bi se izbjegla oksidacija bakra i stvaranje toksičnih plinova poput dioksina izgaranjem organskih tvari.

Ključ metode toplinskog raspada je kontrola temperature tijekom razgradnje. Prevelika ili preniska temperatura ne utječe samo na učinkovitost recikliranja, već rezultira i stvaranjem otrovnih plinova. Tehnologija recikliranja bakra iz otpadnih kabela metodom indukcijskog grijanja oslanja se na jedinstvenu karakteristiku da elektromagnetskom spektru treba manje energije nego infracrvenom ili radiofrekvencijskom (RF) za zagrijavanje otpadnih kabela radi povezivanja, stvrdnjavanja ili omekšavanja bakrene jezgre. U usporedbi

s tradicionalnim tehnologijama termičke obrade, ova metoda posjeduje prednost visoke čistoće, visoke učinkovitosti, jednostavne kontrole temperature grijanja, uštede vremena i također ima veliku primjenu. Međutim, najveći nedostaci ove tehnologije su visoki troškovi u usporedbi sa drugim metodama termičke obrade i njezina neprikladnost za obradu otpadnih kabela s debelim izolacijskim slojem (nekoliko mm) (Li i sur., 2017).

5.2. Primjer odvajanja plastične izolacije od bakrene jezgre električnih kablova bubnjastim mlinom s kuglama

Polivinilklorid (PVC) se široko koristi kao izolacija na bakrenim žicama, koje su postale sveprisutne u svim vrstama suvremenih vozila te u električnoj i elektroničkoj opremi (EEE). To je stvorilo značajne izazove u recikliranju zastarjelih vozila (ELV) i otpadne EEE (WEEE) (Cui i Forssberg, 2003). Procjenjuje se da će broj zastarjelih vozila u zemljama Europske unije do 2030. godine biti oko 50 % veći nego u 2005. godini, a da se u Japanu godišnje proizvede preko 3 milijuna zastarjelih vozila (Xu i sur., 2018). Sva ta vozila i otpadnu električnu i elektronsku opremu će trebati reciklirati.

Istraživanjima je utvrđeno da su ELV i WEEE značajni izvori sekundarnih sirovina (Xu i sur., 2018). Demontažom i podvrgavajući ih zračnom klasiranju, magnetskoj separaciji moguće je izdvojiti plastičnu frakciju (PU, PP, PVC, ABS) i nemagnetične metale (Al, Cu, Zn, mjed) (Xu i sur., 2018).

Xu i sur. (2018) proveli su ispitivanja sa tri različite vrste komercijalnih kablova (KV-0.3-W-100, KV-0.75-W-100 i KV-1.25-W-100, promjera: 1,5; 2,1 i 2,7 mm), nabavljenih od tvrtke MISUMI Group Inc. (Tokyo, Japan). Dietileter korišten za ekstrakciju plastifikatora iz PVC izolacije dobiven je od strane Kanto Chemical Co., Inc. (Tokyo, Japan). Karakteristike dobivenih kablova prikazane su u tablici 5-1.

Tablica 5-1 Maseni udio i karakteristike Cu, DINP i PVC izolacije različitih kablova (Xu i sur., 2018)

| Promjer kabela (mm) | Cu (wt%) | DINP (wt%) | PVC (wt%) | Promjer Cu (mm) | Debljina Cu (mm) | Površina PVC-a (mm ²) |
|---------------------|----------|------------|-----------|-----------------|------------------|-----------------------------------|
| 1,5 | 53,0 | 8,5 | 38,5 | 0,7 | 0,4 | 1,4 |
| 2,1 | 63,0 | 7,0 | 30,0 | 1,1 | 0,5 | 2,5 |
| 2,7 | 63,0 | 7,0 | 30,0 | 1,5 | 0,6 | 4,0 |

Ispitivanja (Xu i sur., 2018) su se sastojala od sljedećih faza:

1. Ekstrakcija plastifikatora

Plastifikator dizononil ftalat (DINP) ekstrahiran je iz uzorka pomoću Soxhlet-ekstrakcije. Kablovi su stavljani u Soxhlet-ekstraktor zajedno sa 150 ml dietiletera te su zagrijani na 75 °C. Proces ekstrakcije trajao je maksimalno 300 min. Da bi se dobio uzorak sa malim ekstrakcijskim prinosom koristeći dietileter, ista količina kabela potopljena je u dietileter pri sobnoj temperaturi (od 24°C do 26°C) tijekom vremenskog perioda od maksimalno 60 minuta. Nakon ekstrakcije, uzorci su sušeni u vakuumskoj posudi pri temperaturi od 40 °C. Iskorištenje pri ekstrakciji (Y_{ext}) može se izračunati pomoću sljedeće jednadžbe 5-1:

$$Y_{ext} = \frac{m_E}{m_{E0}} \times 100\% \quad (5-1)$$

gdje je m_{E0} masa dizononil pftalata, a m_E je masa ekstrahiranog dizononil pftalata.

2. Test tvrdoće PVC izolacije

Električni kablovi s različitim vrijednostima iskorištenja ekstrakcije Y_{ext} rezani su na male komadiće, a tvrdoća PVC izolacije određena je pomoću Vickersovog ispitivača mikrotvrdoće (HMV-1/2, Shimadzu Co., Kyoto, Japan). Tvrdoća je procijenjena korištenjem udarne sile od 98,07 mN i vremena punjenja od 10 sekundi. Vickersova tvrdoća (H_v) [N/mm^2] se definira kao odnos primjenjenog opterećenja i piramidalne dodirne površine (Xi i sur., 2018.), a može se izračunati prema 5-2:

$$H_v = \frac{F}{A} \quad (5-2)$$

gdje je F [N] primjenjena sila, a A [mm^2] dodirna površina.

3. Mljevenje u bubnjastom mlinu s kuglama

Ispitivanja u mlinu s kuglama provedena su na deplastificiranim uzorcima koristeći kugle od nehrđajućeg čelika (AS ONE Co., Japan) (Xu i sur., 2018.) i kugle načinjene od volframovog karbida (AS ONE Co., Japan). Kugle su bile promjera 10 mm, 15mm i 20 mm, a težile su 7,8 g, 26 g i 62 g. Eksperimentalni uvjeti za ovaj test sažeti su u tablici 5-2.

Usitnjeni kabeli razdvojeni su u 12 klasa od 0,1 mm do 4,75 mm pomoću elektromagnetskog sita u trajanju od jednog sata, nakon čega se izračunao granulometrijski sastav. Brzina odvajanja kabela (R_{sep}) izračunata je prema jednadžbi 5-3:

$$R_{sep} = \frac{m_s}{m_0} \quad (5-3)$$

gdje je m_s [g] masa odvojenih kabela, a m_0 [g] je ukupna masa kabela nakon mljevenja u mlinu s kuglama.

Čistoća izdvojenog bakra izračunala se prema jednadžbi 5-4:

$$P_{Cu} = \frac{m_{Cu}}{m_{PVC}} \times 100\% \quad (5-4)$$

gdje su m_{PVC} [g] masa dobivene PVC plastike iz kabela, a m_{Cu} [g] masa dobivenog bakra iz kabela prosijane na sitima veličina otvora od 0,1 mm do 0,6 mm.

Tablica 5-2 Eksperimentalni uvjeti za provedeni test (Xu i sur., 2018)

| Broj testa | Promjer kabela (mm) | Duljina kabela (mm) | Težina kabela (g) | Broj kabela | Y_{ext} (%) | Veličina kugli (mm) | Broj kugli | Vrijeme mljevenja (min) | Brzina vrtnje bubnja (okr./min) |
|------------|---------------------|---------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 1,5 | 10 | 12 | 120 | 27, 36, 57, 71, 84, 91, 100 | 10 | 20 | 180 | 45,0 |
| 2 | 2,1 | | | | | | | | |
| 3 | 2,7 | 10 | 12 | 120 | 18, 34, 53, 74, 90, 100 | 10 | 20 | 1800 | 45,0 |
| 4 | 2,1 | 10 | 12 | 120 | 100 | 15 | 20 | 60, 90, 105, 120 | 37,5 |
| 5 | 2,1 | 10 | 12 | 120 | 100 | 15 | 20 | 20, 30, 40, 50 | 45,0 |
| 6 | 2,1 | 10 | 12 | 120 | 100 | 15 | 20 | 20, 30, 40, 50 | 25,5 |
| 7 | 2,1 | 10 | 12 | 120 | 100 | 15 | 5, 10, 15, 20 | 60 | 45,0 |
| 8 | 2,1 | 10 | 6, 12, 18, 24, 30 | 60, 120, 180, 240, 300 | 100 | 15 | 20 | 45 | 45,0 |
| 9 | 2,1 | 10, 20, 30, 40, 50 | 12 | 24, 30, 60, 120 | 100 | 15 | 20 | 60 | 45,0 |
| 10 | 1,5 | 10 | 12 | 120 | 100 | 15 | 20 | 10, 20, 30, 40 | 45,0 |
| 11 | 2,1 | 10 | 12 | 120 | 100 | 15 | 20 | 10, 20, 30, 40, 50 | 45,0 |
| 12 | 2,7 | 10 | 12 | 120 | 100 | 15 | 20 | 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 | 45,0 |
| 13 | 1,5 | 10 | 12 | 120 | 100 | 20 | 20 | 15, 30, 45, 60 | 45,0 |
| 14 | 2,1 | 10 | 12 | 120 | 100 | 20 | 20 | 15, 30, 45, 60 | 45,0 |
| 15 | 2,7 | 10 | 12 | 120 | 100 | 20 | 20 | 15, 30, 45, 60 | 45,0 |

4. DEM simulacija kabela i kugli za mljevenje

Računalni program u kojem se radila simulacija zove se Multiphase Flow sa interfaznim izmjenama (MFIK) u kojem je uključen i DEM model (Xu i sur., 2018). Međutim, kako se DEM model u MFIK-u temelji na sferičnom obliku zrna, on se ne može koristiti za predstavljanje cilindričnih kabela. Upravo je zbog toga program MFIK-DEM modificiran tako da podržava valjak-valjak (kabeli), valjak-kugla i valjak-stijenka sudare. U ovoj studiji, udarna energija između kugli i kabela izračunata je pomoću jednadžbe 5-5:

$$E_{bc} = \sum \frac{1}{2} m v_{bc}^2 \quad (5-5)$$

gdje E_{bc} [J/s] označava udarnu energiju sudara kugle i kabela u određenom vremenskom periodu, m [g] označava masu kugli, a v_{bc} [m/s] označava srednju brzinu kugli i kabela u trenutku sudara. Prema tome E_{bc} označava maksimalnu postignutu energiju čeličnih kugli prilikom mljevenja kabela, pretpostavljajući elastične udare (Xu i sur., 2018).

S druge strane budući da je simulacija DEM modela dugotrajna, teško je simulirati čitav eksperiment. Ovo je riješeno uzorkovanjem E_{bc} -a jednom u sekundi tijekom jedne minute, a zatim primjenom statističkih metoda koje opisuju mehanizme mljevenja kablova u mlinu sa kuglama.

Za 7200 uzoraka E_{bc} (120 kablova/s u 1 minuti) u jednoj simulaciji, pretpostavljeno je da gustoća vjerojatnosti slijedi log-normalnu raspodjelu. U konačnici, cijeli eksperimentalni period simuliran je u računalnom programu MATLAB. Za jedan eksperiment u zadanim uvjetima, energija udara je nasumično i pojedinačno dodijeljena 120 kablova na temelju izračunatih log-normalnih distribucija utjecaja energije iz DEM simulacije u minuti.

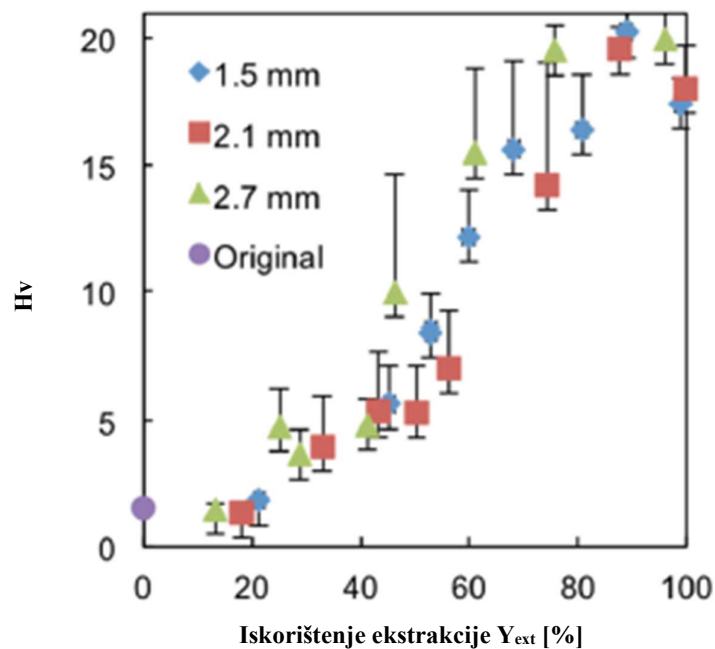
Na temelju provedenih ispitivanja dobiveni su sljedeći rezultati u pogledu DINP ekstrakcije i čvrstoće deplastificiranog PVC-a, utjecaja promjera kabela i prinosa ekstrakcije DINP-a na odvajanje PVC-a i Cu-a, te utjecaja uvjeta mljevenja na odvajanje PVC plastike i bakra (Xu i sur., 2018):

1. DINP ekstrakcija i čvrstoća deplastificiranog PVC-a

Učinkovitost ekstrakcije DINP plastifikatora iz kabela različitih promjera (1,5 mm, 2,1 mm i 2,7 mm) prikazana je na slici 5-4. Na slici se može vidjeti da se učinkovitost ekstrakcije (Y_{ext}) povećavala kako se povećavalo vrijeme ekstrakcije i potpuno deplastificirani kabeli su dobiveni kroz vremenski period od 6 sati.

Štoviše, Y_{ext} kabela različitih promjera ima istu tendenciju. Ovo ukazuje da debljina električnih kabela nije utjecala na učinkovitost ekstrakcije plastifikatora. To u konačnici znači da se uzorci s bilo kojim stupnjem deplastifikacije lako mogu dobiti jednostavnom promjenom vremena trajanja Soxhlet ekstrakcije.

Promjene tvrdoće PVC izolacije prikazane su također na slici 5-4. Kao što je prikazano, ustanovljeno je da je tvrdoća 20 % Y_{ext} uzoraka kabela u osnovi ista kao u izvornim uzorcima kabela, što znači da je djelomični gubitak plastifikatora imao mali učinak na fleksibilnost. Otkriveno je da se tvrdoća kod tri vrste kabela značajno povećala povećanjem Y_{ext} , dok je za isti Y_{ext} malo varirao za kabele različitih veličina.

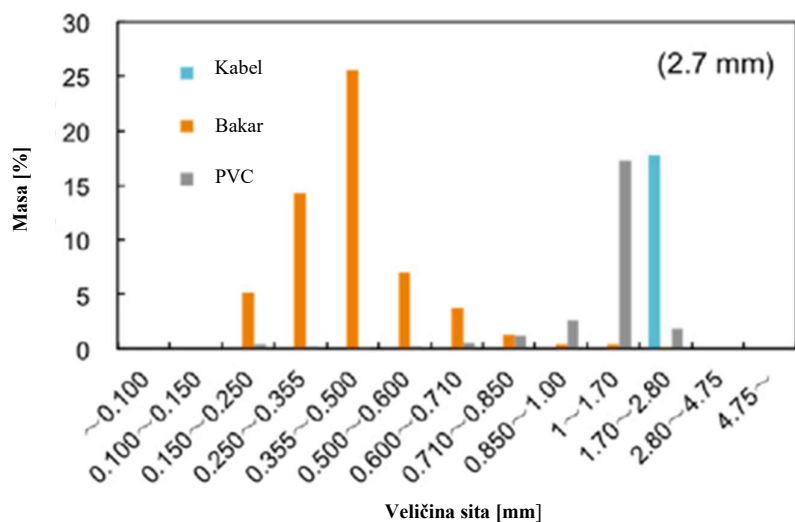
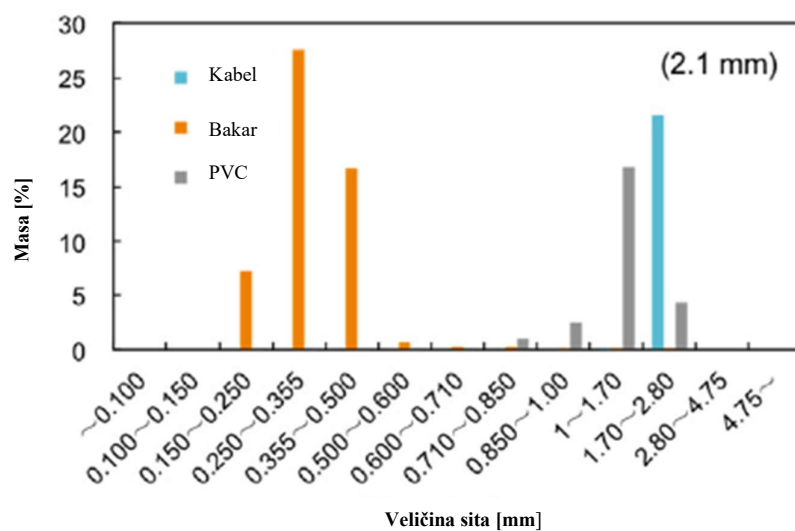
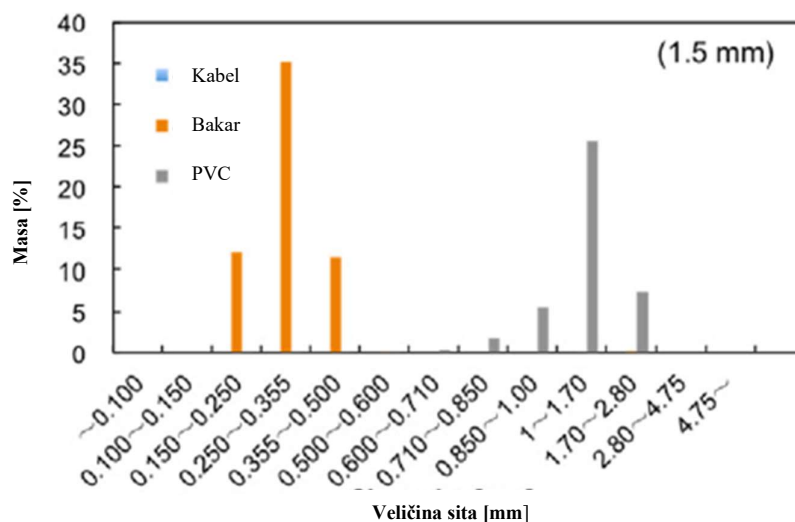


Slika 5-4 Odnos tvrdoće kabela (Hv) i prinosa ekstrakcije Y_{ext} za različite vrste kabela (Xu i sur., 2018)

2. Utjecaj promjera kabela i prinosa ekstrakcije DINP-a na odvajanje PVC-a i Cu-a

Brzina odvajanja kabela (R_{sep}) u svim uzorcima kabela se povećavala kako se povećavao Y_{ext} . Za kabel promjera 1,5 mm, kada je Y_{ext} iznosio 84 %, R_{sep} se značajno povećao. Štoviše, iako je bilo moguće postići 100 % -tno odvajanje kabela promjera 1,5 mm, to nije bilo moguće za ostale kabele.

Raspodjela veličine čestica odvojenih Cu i PVC izolacije dobivenih na maksimalnom R_{sep} -u prikazana je na slici 5-5.

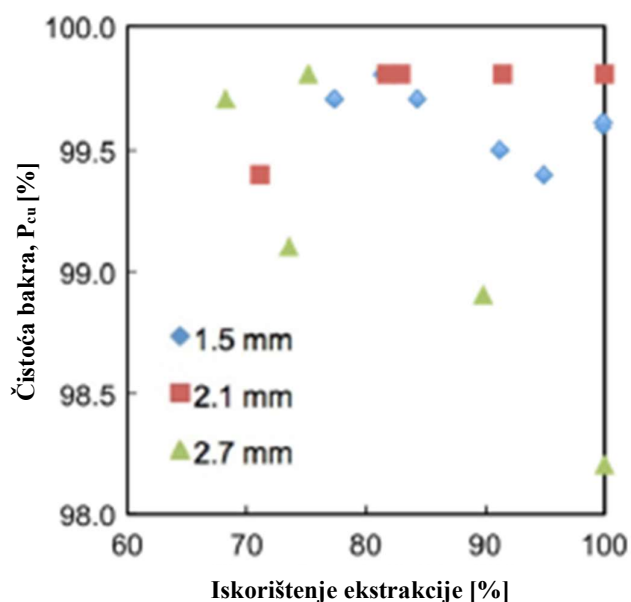


Slika 5-5 Raspodjela veličine čestica odvojenih Cu i PVC izolacije dobivenih na maksimalnom R_{sep-u} (Xu i sur., 2018)

Veličine čestica Cu koncentrirane su ispod 0,6 mm, dok je promjer Cu jezgre u kabelu iznosio 0,18 mm, a veličina čestica PVC izolacije bila je koncentrirana iznad 0,71 mm. Čistoća odvojenog bakra (P_{Cu}) veličine čestica od 0,15 mm do 0,6 mm iznosila je 99,6 % za kabele promjera 1,5 mm, 99,8 % za kabele promjera 2,1 mm, dok je za kabele promjera 2,7 mm ona iznosila 98,3 % što se može vidjeti na slici 5-6.

Kao što je prikazano na istoj slici, s Y_{ext} vrijednostima iznad 80 %, P_{Cu} za kabele promjera 2,1 mm je veći u odnosu na kabele promjera 1,5 mm i 2,7 mm.

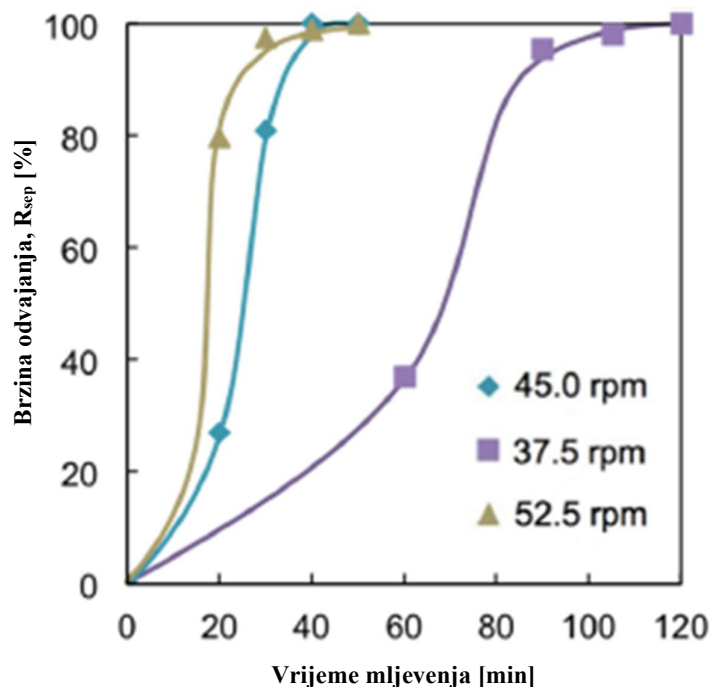
Ovim istraživanjem je utvrđeno da se PVC izolacija s visokim vrijednostima Y_{ext} -a može lako izdrobiti u prah dugim mljevenjem u mlinu sa kuglama jer je PVC izolacija postala tvrđa i krtija.



Slika 5-6 odnos čistoće dobivenog bakra i prinosa ekstrakcije za različite veličine kabela (Xu i sur., 2018)

3. Utjecaj uvjeta mljevenja na odvajanje PVC plastike i bakra

Kako bi se utvrdio utjecaj uvjeta mljevenja i samim time povećala učinkovitost mljevenja otpadnih kabela u mlinu sa kuglama, veličine kugli su povećane sa promjera od 10 mm na 15 mm. Utjecaj brzine rotacije na odvajanje PVC-a od Cu (R_{sep}) iz otpadnih kabela promjera 2,1 mm prikazan je na slici 5-7.



Slika 5-7 Utjecaj brzine rotacije kugličnog mlina na odvajanje PVC-a od bakra (Xu i sur., 2018)

Vrijeme mljevenja u trajanju od 2 sata, koje je bilo ujedno i najduže vrijeme mljevenja, bilo je potrebno kako bi se postiglo potpuno odvajanje brzinom rotacije od 37,5 o/min, dok je pri broju okretaja od 45 o/min i 52,5 o/min, R_{sep} od 100 % postignut nakon 50 min, odnosno 40 min.

Brzine rotacije kod 52,5 o/min i 45 o/min su bile bliske, samo što je R_{sep} pri 52,5 o/min bio neznatno veći od onog pri 45 o/min. Na temelju tih rezultata, za ovu metodu odabrana je brzina mljevenja mlina u iznosu od 45 o/min, koja je bila ista kao u prethodnim istraživanjima i zbog toga je usredba bila lakša.

6. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

6.1. Opis uzorka

Za ispitivanje mogućnosti recikliranja licnastih Cu kabela (separiranja plastične izolacije kabela od bakra i aluminijske) korišteni su otpadni kabele za distribuciju električne energije u kućanstvima i kabele za prijenos podataka. Na početku ispitivanja kabele su nasjeckani na duljinu od oko 10 cm te su potom usitnjeni u reznom mlinu (slika 6-1).

Za ispitivanja sveukupno je prikupljeno približno 50 kg otpadnih kabela. Kabele su se sastojali od plastične izolacije unutar koje su bili bakreni i aluminijski vodiči i kod nekih kabela aluminijska obloga.



Slika 6-1 Rezni mlin RETSCH SM 2000 (RETSCH, 2020)

6.2. Opis uređaja

6.2.1. Rezni mlin RETSCH SM 2000

Rezni mlin se sastoji od kućišta s jednim rotorom na koji je pričvršćen rezni element. Rezni element može imati razne izvedbe koje su prikazane na slici 6-2:

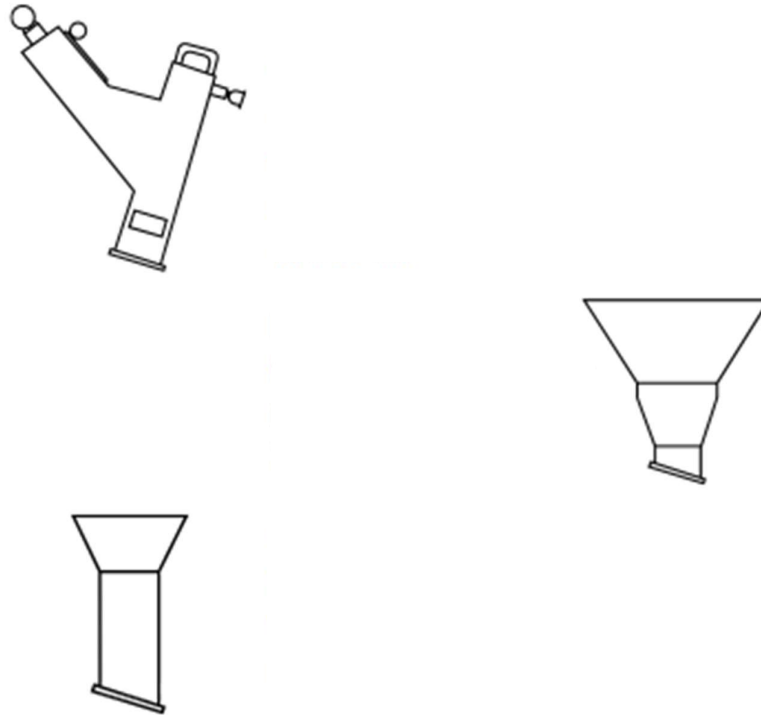
- 1) Rotor sa 6 diskova s 18 zamjenjivih reverzibilnih ploča od tvrdog metala;
- 2) Paralelno rezni rotor za strojeve s 1430 o/min posebno prikladan za meke elastične i vlaknaste materijale;
- 3) Rotor za rezanje s 18 zamjenjivih reverzibilnih reznih ploča od tvrdog metala za strojeve s brzinom vrtnje od 750 o/min, posebno prikladnim za deblje dijelove, npr. drvo, koža ili plastika.

Na vrhu reznog mlina je dozator materijala koji isto ima 3 izvedbe (slika 6-3) ovisno o materijalu koji se usitnjava:

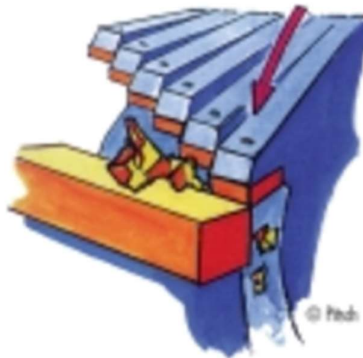
- 1) Standardni dozator za rasut i grudast materijal s otvorom veličine 80×80 mm;
- 2) Dozator za duge materijale s otvorom veličine 30×130 mm;
- 3) Stepeničasti dozator za rasute materijale sa zaštitom od odbijanja materijala i otvorom veličine 20×84 mm.



Slika 6-2 Rezni elemnti reznog mlina RETSCH SM 2000 (RETSCH, 2020)



Slika 6-3 Dozatori reznog mlina RETSCH SM 2000 (RETSCH, 2020)



Slika 6-4 Drobljenje materijala reznim trakama (RETSCH, 2020)

Rezni mlin RETSCH SM 2000 usitnjava materijal na principu rezanja. Materijal ulazi u mlin na vrhu kroz dozator i uvlači se pomoću rotora koji je pričvršćen s obje strane i drobi se reznim trakama (slika 6-4) od nehrđajućeg čelika umetnutim u kućište. Zahvaljujući dodatnoj masi zamašnjaka na vratilu motora dobiva se pogonska snaga. Kućište samog mlina je izrađeno od aluminija. Spremnik, rotor, prirubnica motora, umetak vrata, posuda za sakupljanje od 5 l su od nehrđajućeg čelika. Sigurnosna sklopka sprječava da se mlin uključi kad se otvore vrata.

Tehnički podaci reznog mlina RETSCH SM 2000 prikazani su u tablici 6-1.

Tablica 6-1 Tehnički podaci reznog mlina RETSCH SM 2000 (RETSCH, 2020)

| Primjena | Rezanje/Drobljenje |
|---------------------|-------------------------------------------------|
| Vrsta materijala | Mekan, srednje tvrd, žilav, elastičan, vlaknast |
| Veličina materijala | 60 x 80 mm maksimalno |
| Veličina produkata | 0,25 - 20 mm |
| Kapacitet | 0,2 - 50 kg/h |

6.2.2. Elektromagnetsko laboratorijsko sito FRITSCH Analysette 3

Sito FRITSCH Analysette 3, prikazano na slici 6-5, je sito s elektromagnetskim pogonom u podnožju sita koje vibrira u vertikalnom smjeru.



Slika 6-5 Laboratorijsko elektromagnetsko sito FRITSCH Analysette 3 (FRITSCH, 2020)

Materijal koji se prosijava povremeno se podiže od prosjevne površine i kroz sita s raznim veličinama otvora se dovodi do sakupljača koji se nalazi na podnožju sita.

Regulirano vertikalno vibriranje sita osigurava ravnomjernu raspodjelu materijala po cijeloj prosjevnoj površini. Kako nema centrifugalnih sila, sve sile djeluju izravno u procesu sisanja, gotovo bez obzira na amplitudu sisanja.

Sitom se može obavljati mokro sisanje za materijale visokog elektrostatičkog naboja ili vrlo visokog sadržaja sitnog materijala. Poklopac za mokro sisanje ima 3 mlaznice koje raspršuju vodu po cijeloj prosjevnoj površini i time pomažu da se materijal probije kroz prosjevnu površinu.

Tehničke karakteristike sita prikazane su u tablici 6-2

Tablica 6-2 Tehničke karakteristike laboratorijskog sita FRITSCH Analysette 3 (FRITSCH, 2020)

| | |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Primjena | Određivanje granulometrijskog sastava |
| Vrsta materijala | Sve vrste materijala |
| Način sisanja | Suho ili mokro sisanje |
| Veličina materijala | 32 μm - 63 mm |
| Kapacitet | Za sita < 100 μm: do 100 g Za sita < 63 mm: do 1 kg |

6.2.3. Elektrostatički separator Eriez Magnetics HT-150

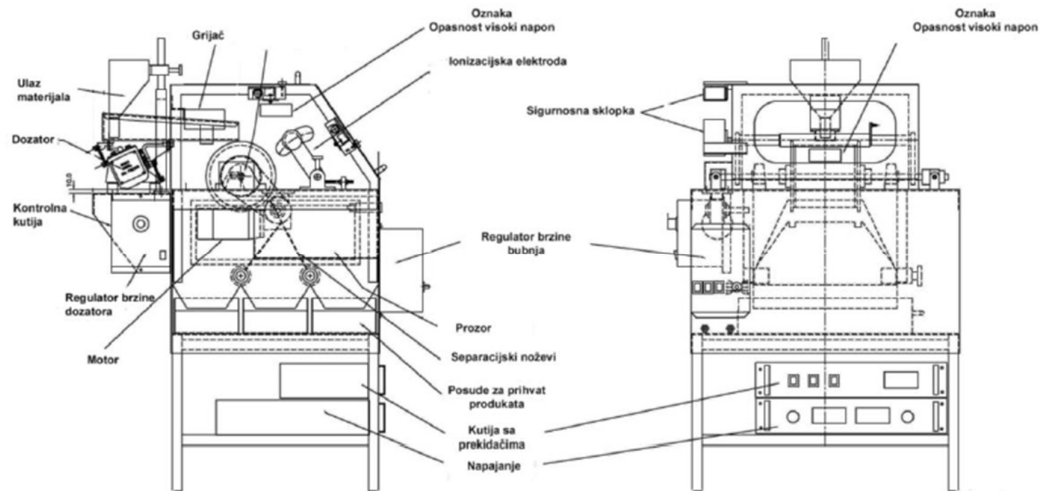
Elektrostatički separator Eriez Magnetics, model HT-150 sa glavnim dijelovima prikazan je na slici 6-6, dok je shematski prikaz na slici 6-7.



Slika 6-6 Elektrostatički separator Eriez Magnetics HT-150 (Bedeković i Salopek, 2010)

Glavni dijelovi:

1. Ulaz materijala;
2. Bubanj;
3. Separacijski noževi;
4. Regulator položaja separacijskih noževa;
5. Posude za prihvata produkata;
6. Potencijometar za regulaciju napona;
7. Voltmetar;
8. Ampermetar;
9. Potencijometar za regulaciju jakosti struje;
10. Prekidač ispravljača s regulacijom napona;
11. Pokazivač brzine bubnja;
12. Prekidač za visoki napon;
13. Prekidač grijača;
14. Glavni prekidač;
15. Regulator brzine bubnja;
16. Ionizacijska elektroda;
17. Hranilica



Slika 6-7 Shematski prikaz elektrostatskog separatora Ereiz Magnetics HT-150 (Bedeković i Salopek, 2010)

Ovaj separator namijenjen za razdvajanje minerala, metala i plastike koristeći elektrostatski naboj. Prikladan je za razdvajanje širokog spektra materijala na principu razlike u površinskoj vodljivosti. Za ovaj separator preporučena veličina čestica je u rasponu od 0,65 mm do 1,6 mm (Bedeković i Salopek, 2010).

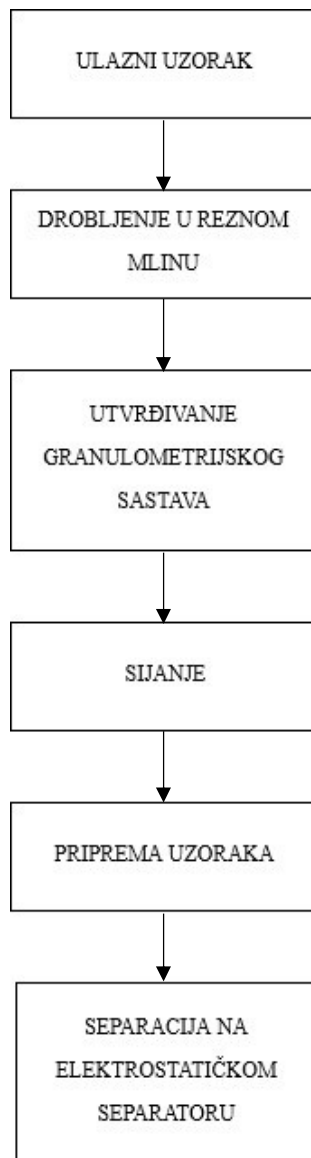
Do razdvajanja na korisnu (obično vodiči, metali) i nekorisnu (nevođiči) komponentu kod elektrostatskog separatora dolazi uslijed međudjelovanja između električnog polja i električnog naboja čestice, pri čemu dolazi do razlike u kretanju električki nabijenih čestica u električnom polju.

Elektrostatska separacija primjenjuje se u slučajevima kada se čestice razlikuju po dielektričnoj konstanti, tj. polarizacijskim svojstvima i intenzitetu površinske električne vodljivosti.

6.3. Postupak ispitivanja

Kao što je ranije navedeno u opisu uzorka, za ispitivanje mogućnosti recikliranja licnastih Cu kabela (razdvajanja plastične izolacije kabela i bakra i aluminija) korišteni su otpadni kabele za distribuciju električne energije u kućanstvima i kabele za prijenos podataka.

Shematski prikaz postupka ispitivanja prikazan je na slici 6-8.



Slika 6-8 Shematski prikaz postupka izvođenja ispitivanja (plan laboratorijskih pokusa)

Na shematskom prikazu može se vidjeti da je prvo korišten rezni mlin. U reznom mlinu su otpadni kabeli iz kućanstava i kabeli za prijenos podataka narezani na sitna zrna što se može vidjeti na slici 6-9.

Samom upotrebom reznog mlina došlo je do usitnjavanja otpadnih kabela pri čemu se postigao određeni granulometrijski sastav. Nakon usitnjavanja na reznom mlinu napravljena je granulometrijska analiza usitnjenog kabela na laboratorijskom elektromagnetskom situ FRITSCH Analysette 3. Za granulometrijsku analizu uzet je skraćen i homogenizirani uzorak mase 100 g. Rezultati granulometrijske analize prikazani su u tablici 6-3, a na temelju dobivenih rezultata granulometrijske analize napravljen je dijagram na slici 6-10. U svakoj

dobivenoj klasi uzorka, bakar i plastika su ručno razdvojeni kako bi se izvagale mase vodiča (Cu) i nevodika (izolacije) odnosno utvrdili njihovi maseni udjeli u pojedinačnim klasama uzorka. Ti podaci su također prikazani u tablici 6-3 (posljednja četiri stupca).

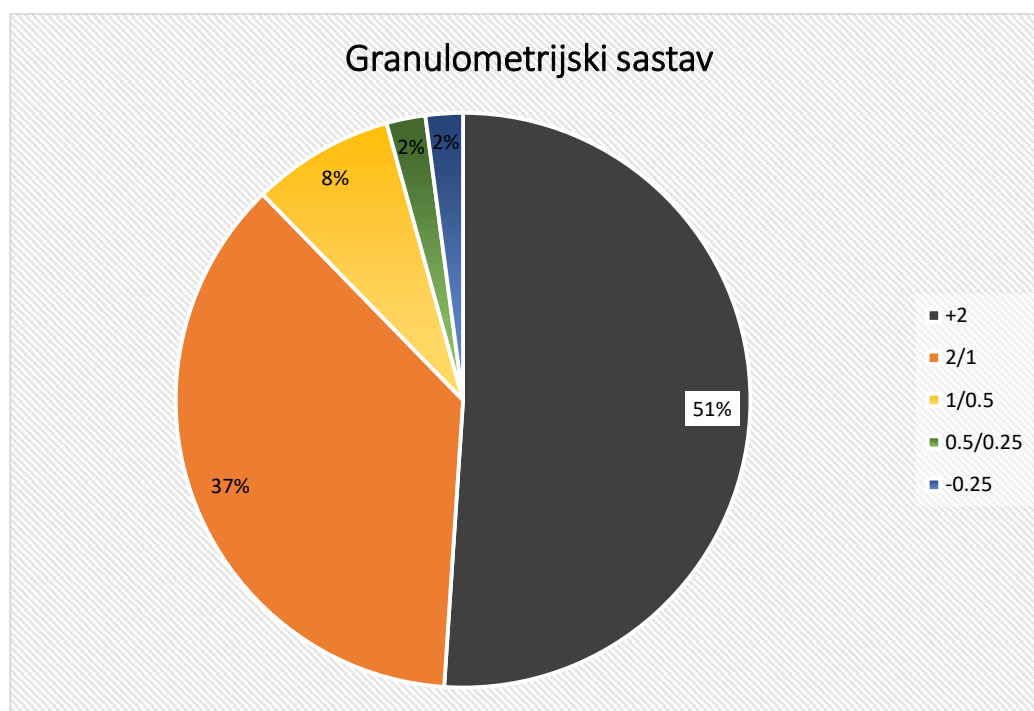


Slika 6-9 Usitnjeni kabele (produkt reznog mlina)

Tablica 6-3 Rezultati granulometrijske analize usitnjenog kabela

| KLASA mm | UKUPNI UZORAK | | SUMA % | Vodič (Cu)* | | Nevodič* | |
|-------------|------------------|-------|-----------|-------------|-------|----------|-------|
| | g | % | | g | % | g | % |
| +2 | 51,1 | 51,05 | 51,05 | 0 | 0 | 51,1 | 100 |
| 2/1 | 36,7 | 36,66 | 87,71 | 0,3 | 0,82 | 36,4 | 99,18 |
| 1/0,5 | 8,0 | 7,99 | 95,7 | 0,51 | 6,38 | 7,49 | 93,63 |
| 0,5/0,25 | 2,2 | 2,2 | 97,9 | 0,36 | 16,36 | 1,84 | 83,64 |
| -0,25 | 2,1 | 2,1 | 100 | 0,41 | 19,52 | 1,69 | 80,48 |
| SUMA | 100,1 | 100 | - | 1,58 | 1,58 | 98,52 | 98,42 |






* Maseni udio vodiča odnosno nevodiča u uzorku (po klasama i ukupno).



Slika 6-10 Dijagram granulometrijske analize

Upotrebom reznog mlina za usitnjavanje otpadnih kabela osim što je došlo do sitnjenja kabela, došlo je i do raščina korisne od nekorisne komponente kabelskog otpada, odnosno došlo je do oslobađanja bakrene jezgre od plastične izolacije. Izgled usitnjenih kabela po klasama može se vidjeti u tablici 6-4.

Tablica 6-3 Izgled izdvojenih klasa dobivenih nakon sitnjenja u reznom mlinu

| Klasa (mm) | Masa (g) | Snimka |
|---------------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| +2 | 51,1 |  |
| 2/1 | 36,7 |  |
| 1/0,5 | 8 |  |
| 0,5/0,25 | 2,2 |  |
| -0,25 | 2,1 |  |

Nakon određivanja granulometrijskog sastava usitnjenih kabela izdvojili smo klasu 1/0,5 mm zbog preporuke proizvođača o veličini zrna, budući da je u toj klasi sadržaj bakra znatno veći (6,38%) u odnosu na klasu 2/1 mm koja bi također mogla doći u obzir za ispitivanje. Iako je sadržaj bakra u dvije najsinije klase znatno veći (16,36% i 19,52%), obje klase (0,5/0,25 mm i -0,25 mm) su presitne s obzirom na preporučene veličine čestica od strane proizvođača.

S obzirom na to da bakrena jezgra nije u potpunosti bila odvojena od plastične izolacije, bilo je potrebno odvojiti ih, kako bi se mogli pripremiti uzorci točno određenih masa i sastava, kako bi ulazni uzorci bili potpuno identični i kako bi se kasnije moglo zaključivati o utjecaju pojedinih radnih varijabli na proces separacije.

Bakar od plastike je odvajan ručno i upotrebom elektrostatičkog separatora te se rezultati odvajanja mogu vidjeti na slikama 6-11 i 6-12.



Slika 6-11 Ručno odvojeni bakar od plastike na malom uzorku



Slika 6-12 Separirani uzorak u posudi za vodič nakon višestrukog propuštanja kroz elektrostatički separator

Uzorci pripremljeni za ispitivanja bili su mase 40 g, od čega je maseni udio bakra iznosio 11,59 %, odnosno 4,64 g, a maseni udio plastike je iznosio 88,41 %, odnosno 35,36 g. U elektrostatičkom separatoru napravljeno je 9 pokusa. Za provedbu ispitivanja mijenjane su vrijednosti sljedećih varijabli (Sobota, 2016):

- 1) Napon (potencijal) ionizacijske elektrode;
- 2) Brzina bubnja;
- 3) Pozicija separacijskog noža.

Vrijednosti navedenih varijabli za sve pokuse vidljive su u tablici 6-5.

Nakon svakog provedenog pokusa izvagani su produkti, te nakon analize produkata su izvagane su mase korisne i nekorisne komponente u svakom od produkata, odnosno mase vodiča i plastike i izračunati su parametri elektrostatičke separacije otpadnih kabela.

Tablica 6-4 Vrijednosti varijabli praćenih kod ispitivanja

| Brzina bubnja (m/min) | Potencijal elektrode (kV) | Pozicija noža (°) |
|--------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|
| 70 | 22 | 110 |
| 70 | 25 | 110 |
| 70 | 28 | 110 |
| 50 | 25 | 110 |
| 70 | 25 | 110 |
| 90 | 25 | 110 |
| 70 | 25 | 90 |
| 70 | 25 | 110 |
| 70 | 25 | 130 |

Kao što se može vidjeti u tablici 6-5, kombinacija vrijednosti u 2., 5., i 8. pokusu je identična. Ponavljanjem istog pokusa 3 puta dobiveni su slični rezultati i ti rezultati mogu se smatrati kontrolom provođenja ispitivanja i prikazani su u tablicama 7-1 do 7-3.

7. REZULTATI I DISKUSIJA

U fazi ispitivanja provedeno je 9 pokusa sa promjenjivim vrijednostima radnih parametara elektrostatičkog separatora, koje su navedene u tablici 6-5. Temeljem rezultata prikazanih u tablici 7-1, tablici 7-2 i tablici 7-3 (cijela tablica sa svim izračunatim vrijednostima nalazi se u prilogu 1), za svaku promatranu varijablu elektrostatičkog separatora posebno, može se zaključiti da je propuštanjem uzoraka došlo do određenog razdvajanja bakra i plastike iz otpadnih kabela.

Kvaliteta (čistoća) proizvoda separacije izračunata je na temelju izvaganih masa komponenti u koncentratu (vodiči i izolacija). U tablicama 7-4 do 7-6 i na slikama 7-1 do 7-3 može se vidjeti promjena kvalitete koncentrata i iskorištenje korisne komponente pri različitim kombinacijama vrijednosti promatranih varijabli elektrostatičkog separatora.

Tablica 7-1 Mase produkata separacije pri različitim potencijalima elektrode

| Test br. | Brzina bubnja (m/min) | Potencijal elektrode (kV) | Pozicija noža (°) | PRODUKT 1 (Vodič) | | | PRODUKT 2 (Nevodič) | | |
|----------|-----------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|------|----------|---------------------|------|----------|
| | | | | UKUPNO | Cu | Nevodiči | UKUPNO | Cu | Nevodiči |
| | | | | g | g | g | g | g | g |
| 1 | 70 | 22 | 110 | 9,49 | 4,64 | 4,85 | 30,51 | 0,00 | 30,51 |
| 2 | 70 | 25 | 110 | 7,81 | 4,64 | 3,17 | 32,20 | 0,00 | 32,20 |
| 3 | 70 | 28 | 110 | 7,06 | 4,64 | 2,42 | 32,94 | 0,00 | 32,94 |

Tablica 7-2 Mase produkata separacije pri različitim brzinama bubnja

| Test br. | Brzina bubnja (m/min) | Potencijal elektrode (kV) | Pozicija noža (°) | PRODUKT 1 (Vodič) | | | PRODUKT 2 (Nevodič) | | |
|----------|-----------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|------|----------|---------------------|------|----------|
| | | | | UKUPNO | Cu | Nevodiči | UKUPNO | Cu | Nevodiči |
| | | | | g | g | g | g | g | g |
| 4 | 50 | 25 | 110 | 5,96 | 4,64 | 1,32 | 34,04 | 0,00 | 34,04 |
| 5 | 70 | 25 | 110 | 7,69 | 4,64 | 3,05 | 32,31 | 0,00 | 32,31 |
| 6 | 90 | 25 | 110 | 13,29 | 4,64 | 8,65 | 26,71 | 0,00 | 26,71 |

Tablica 7-3 Mase produkata separacije pri različitim pozicijama noža

| Test br. | Brzina bubnja (m/min) | Potencijal elektrode (kV) | Pozicija noža (°) | PRODUKT 1 (Vodič) | | | PRODUKT 2 (Nevodič) | | |
|----------|-----------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|------|----------|---------------------|------|----------|
| | | | | UKUPNO | Cu | Nevodiči | UKUPNO | Cu | Nevodiči |
| | | | | g | g | g | g | g | g |
| 7 | 70 | 25 | 90 | 6,54 | 4,64 | 1,90 | 33,46 | 0,00 | 33,46 |
| 8 | 70 | 25 | 110 | 7,75 | 4,64 | 3,11 | 32,25 | 0,00 | 32,25 |
| 9 | 70 | 25 | 130 | 8,50 | 4,64 | 3,86 | 31,50 | 0,00 | 31,50 |

Tablica 7-4 Kvaliteta koncentrata (k) i iskorištenje korisne komponente (Im) pri različitim potencijalima elektrode

| Test br. | Brzina bubnja (m/min) | Potencijal elektrode (kV) | Pozicija noža (°) | Kvaliteta koncentrata (%) | Iskorištenje korisne komponente (%) |
|----------|-----------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 70 | 22 | 110 | 48,89 | 100 |
| 2 | 70 | 25 | 110 | 59,41 | 100 |
| 3 | 70 | 28 | 110 | 65,72 | 100 |

Tablica 7-5 Kvaliteta koncentrata (k) i iskorištenje korisne komponente (Im) pri različitim brzinama bubnja

| Test br. | Brzina bubnja (m/min) | Potencijal elektrode (kV) | Pozicija noža (°) | Kvaliteta koncentrata (%) | Iskorištenje korisne komponente |
|----------|-----------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 4 | 50 | 25 | 110 | 77,85 | 100 |
| 5 | 70 | 25 | 110 | 60,34 | 100 |
| 6 | 90 | 25 | 110 | 34,91 | 100 |

Tablica 7-6 Kvaliteta koncentrata (k) i iskorištenje korisne komponente (Im) pri različitim položajima noža

| Test br. | Brzina bubnja (m/min) | Potencijal elektrode (kV) | Pozicija noža (°) | Kvaliteta koncentrata (%) | Iskorištenje korisne komponente |
|----------|-----------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------------|
| 7 | 70 | 25 | 90 | 70,95 | 100 |
| 8 | 70 | 25 | 110 | 59,87 | 100 |
| 9 | 70 | 25 | 130 | 54,59 | 100 |

Kvaliteta koncentrata izračunata je prema jednadžbi 7-1:

$$k = \frac{m_k}{K} \times 100\% \quad (7-1)$$

gdje je:

m_k - masa korisne komponente u koncentratu (vodiču)

K - masa koncentrata (vodiča)

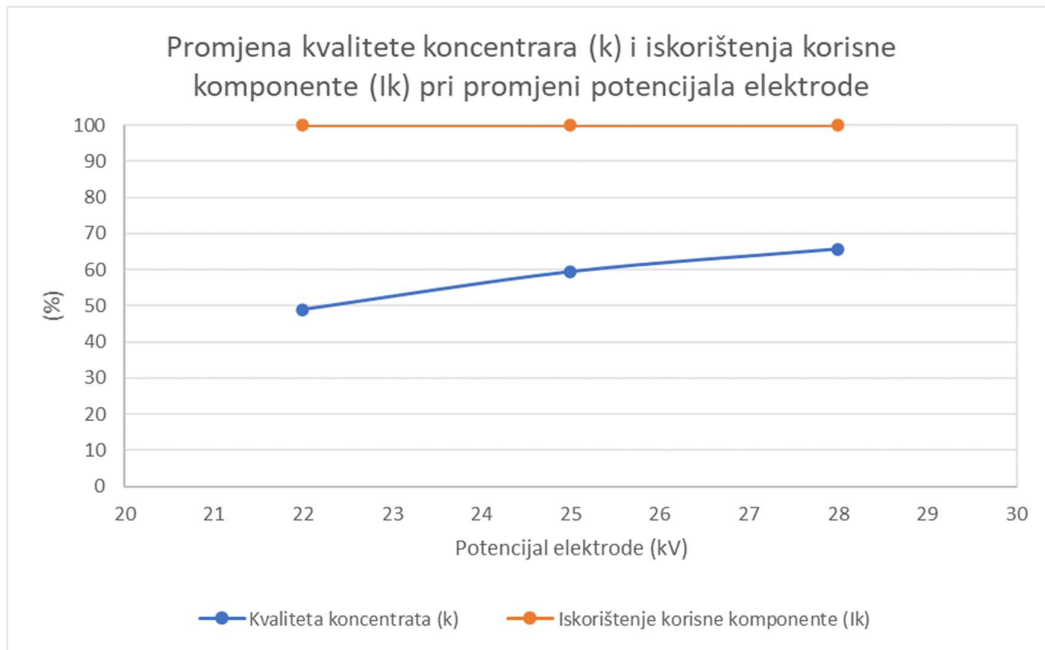
Iskorištenje korisne komponente izračunato je prema 7-2:

$$Ik = \frac{K}{U} \times \frac{k}{u} \times 100\% \quad (7-2)$$

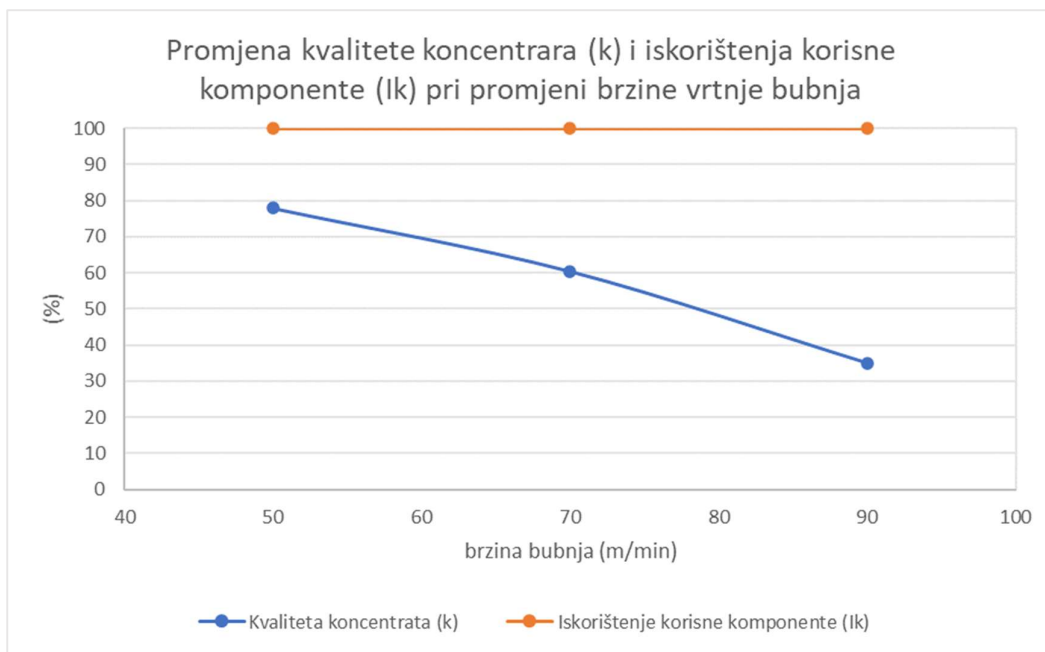
gdje je:

U - masa ulaza

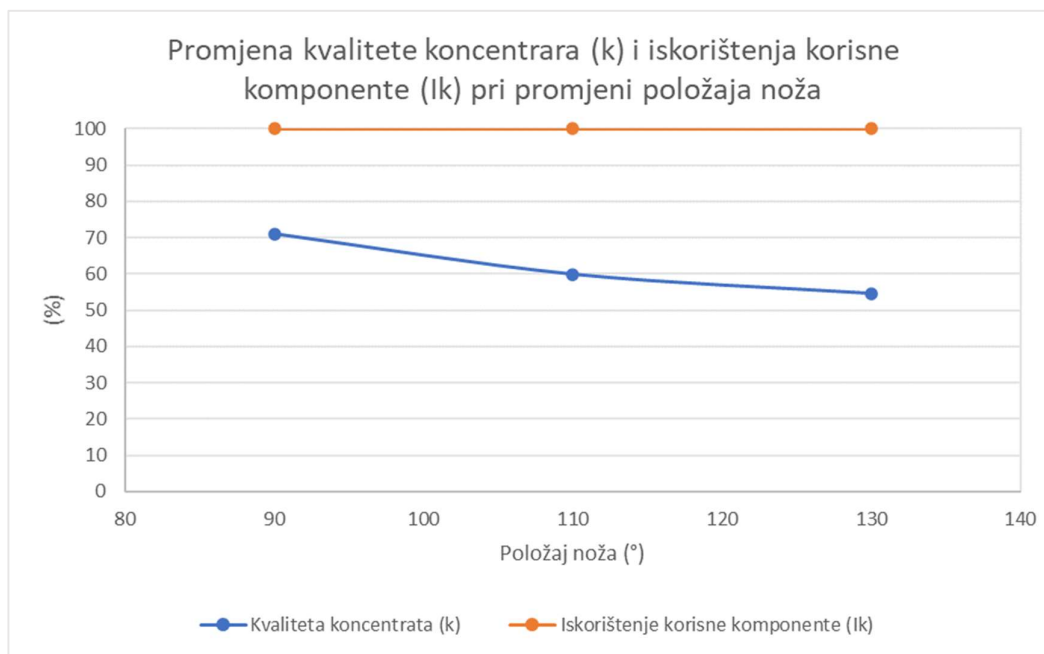
u - postotni sadržaj korisne komponente u ulazu



Slika 7-1 Promjena kvalitete koncentrata (k) i iskorištenja korisne komponente (Ik) pri promjeni potencijala elektrode



Slika 7-2 Promjena kvalitete koncentrata (k) i iskorištenja korisne komponente (Ik) pri promjeni brzine vrtnje bubnja



Slika 7-3 Promjena kvalitete koncentrata (k) i iskorištenja korisne komponente (Ik) pri promjeni položaja noža

Iz tablica 7-1 do 7-3 može se vidjeti da pri zadanim parametrima tj. potencijalu elektrode, brzini vrtnje bubnja i položaju separacijskog noža elektrostatickog separatora, niti jedna čestica bakra nije završila u posudi za nevodič, već je sav bakar završio u posudi za vodič što je bilo i očekivano. Prema tome iskorištenje korisne komponente iznosi 100 % u svim provedenim pokusima. Plastika, s druge strane, osim što je završila u posudi za nevodič, ona je završila i u posudi za vodič. Razlog tome može biti činjenica što se možda nije sva plastika u potpunosti odvojila od bakra prilikom drobljenja u reznom mlinu ili s obzirom na to da se radi vrlo sitnim i mekanim žičicama bakra koje se mogu jako lako savijati i stoga su se možda omotale oko čestica plastike pa su prilikom djelovanja električnog polja elektrostatickog separatora na bakar, tako omotane bile odbačene u posudu za vodič.

Rezultati tablica 7-4 do 7-6 prikazuju promjenu kvalitete koncentrata (k) pri različitim vrijednostima promjenjivih varijabli elektrostatickog separatora. Najveća srednja vrijednost kvalitete koncentrata bila je u pokusima 7, 8 i 9, u iznosu srednje vrijednosti iznosi 61,80 %, a iznos iskorištenja korisne komponente je kao i u svim ostalim provedenim pokusima iznosio 100 %. U pokusima 4, 5 i 6 kvaliteta koncentrata je bila najmanja, u iznosu srednje vrijednosti od 57,14%. Srednje vrijednosti kvalitete koncentrata iz pokusa 1, 2 i 3 iznosile su 58,01 %.

Ako pak gledamo kvalitetu koncentrata za svaku promatranu varijablu zasebno, vidi se da je najveća vrijednost kvalitete koncentrata bila u pokusu broj 4 (brzina bubnja od 50 m/min, potencijal elektrode od 25 kV i pozicija separacijskog noža 110°) i iznosila je 77,85 %.

8. ZAKLJUČAK

U ovom radu ispitivane su mogućnosti recikliranja licnastih Cu kabela metodom elektrostatičke separacije. Recikliranjem otpadnih kabela štedi se prostor odlagališta, spriječavaju se onečišćenja u okolišu (degradacija plastike uzrokuje stvaranje štetnih kiselina) i štede se mineralne sirovine.

Na temelju provedenih laboratorijskih ispitivanja mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- 1) Uzorak mora biti dovoljno usitnjen odnosno usko klasiran kako bi se mogla koristiti metoda elektrostatičke separacije za recikliranje licnastih Cu kabela.
- 2) Kabeli su dosta sitni i samim njihovim rezanjem u reznom mlinu nakon sijanja na određenim sitima, može se bakar odvojiti od plastike.
- 3) Kvaliteta koncentrata se povećava povećanjem potencijala elektrode, a smanjuje se povećanjem brzine vrtnje bubnja i položaja separacijskog noža. U uvjetima provedenih ispitivanja, iskorištenje korisne komponente iznosi 100%, neovisno o kombinaciji vrijednosti promatranih radnih parametara (potencijala elektrode, brzine vrtnje bubnja i položaja separacijskih noževa).
- 4) S obzirom na to da je dio plastike bio u posudi za vodič, naknadnim propuštanjem "vodiča" (koncentrata) kroz elektrostatički separator, mogla bi se postići njegova veća čistoća tj. razdvojiti više bakra od plastike, ali pitanje je da li bi se to ekonomski isplatilo.

9. LITERATURA

- 1) BEDEKOVIĆ, G., SALOPEK, B., 2010. Upute i podloge za laboratorijske vježbe iz predmeta Oplemenjivanje mineralnih sirovina 2: interna skripta. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.
- 2) CUI, J., FORSSBERG, E., 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment. A review. Journal of hazardous materials, B99, str 243-263.
- 3) FRITSCH GmbH. 2020. Vibratory sieve shaker Analisette 3. URL: <https://www.fritsch-international.com/sample-preparation/sieving/vibratory-sieve-shakers/details/product/analysette-3-pro/> (10.06.2020.)
- 4) LI, L., LIU, G., PAN, D., WANG, W., WU, Y., ZUO, T. 2017. Overview of the recycling technology for copper-containing cables. Resources, Conservation & Recycling, vol 126, str 132-140.
- 5) MOORE G. F., 1997. Electric Cables Handbook. Third Edition. Oxford: Blackwell Science.
- 6) RETSCH GmbH. 2020. Cutting mill SM 200. URL: <https://www.retsch.com/products/milling/cutting-mills/sm-200/function-features/> (10.06.2020.)
- 7) SOBOTA, I., 2016. Čišćenje tla. Predavanja. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet. (neobjavljeno)
- 8) XU, J., LU, J., KUMAGAI, S., KAMEDA, T., SAITO, Y., TAKAHASHI, K., HAYASHI, H., YOSHIOKA, T. 2018. Validation of a deplasticizer-ball milling method for separating Cu and PVC from thin electric cables: A simulation and experimental approach. Waste management, 82, str 220-230.

10. PRILOZI

Prilog 1 Rezultati elektrostatičke separacije

| Test br. | Brzina bubnja (m/min) | Jakost el. polja (kV) | Pozicija noža (°) | Kvaliteta koncentrata (%) | Iskorišćenje korisne komp. (%) | ULAZ | | | | | | PRODUKT 1 (Vodke) | | | | | | PRODUKT 2 (Nevodke) | | | | | | | | | |
|----------|-----------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------|--------|--------|------|-------|----------|-------|-------------------|-------|------|-------|----------|-------|---------------------|-------|------|------|----------|--------|------|------|-------|--------|
| | | | | | | UKUPNO | | Cu | | Nevoditi | | UKUPNO | | Cu | | Nevoditi | | UKUPNO | | Cu | | Nevoditi | | | | | |
| | | | | | | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | g | % | | |
| 1 | 70 | 22 | 110 | 48,89 | 23,73 | 40 | 100,00 | 4,64 | 11,59 | 35,36 | 88,41 | 9,49 | 23,30 | 4,64 | 48,89 | 4,85 | 51,11 | 30,51 | 76,27 | 0,00 | 0,00 | 30,51 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 30,51 | 100,00 |
| 2 | 70 | 25 | 110 | 59,41 | 19,53 | 40 | 100,00 | 4,64 | 11,59 | 35,36 | 88,41 | 7,81 | 19,53 | 4,64 | 59,41 | 3,17 | 40,59 | 32,20 | 80,47 | 0,00 | 0,00 | 32,20 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 32,20 | 100,00 |
| 3 | 70 | 28 | 110 | 65,72 | 17,65 | 40 | 100,00 | 4,64 | 11,59 | 35,36 | 88,41 | 7,06 | 17,65 | 4,64 | 65,72 | 2,42 | 34,28 | 32,94 | 82,35 | 0,00 | 0,00 | 32,94 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 32,94 | 100,00 |
| 4 | 50 | 25 | 110 | 77,85 | 14,90 | 40 | 100,00 | 4,64 | 11,59 | 35,36 | 88,41 | 5,96 | 14,90 | 4,64 | 77,85 | 1,32 | 22,15 | 34,04 | 85,10 | 0,00 | 0,00 | 34,04 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 34,04 | 100,00 |
| 5 | 70 | 25 | 110 | 60,34 | 19,23 | 40 | 100,00 | 4,64 | 11,59 | 35,36 | 88,41 | 7,69 | 19,23 | 4,64 | 60,34 | 3,05 | 39,66 | 32,31 | 80,77 | 0,00 | 0,00 | 32,31 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 32,31 | 100,00 |
| 6 | 90 | 25 | 110 | 34,91 | 33,23 | 40 | 100,00 | 4,64 | 11,59 | 35,36 | 88,41 | 13,29 | 33,23 | 4,64 | 34,91 | 8,65 | 65,09 | 26,71 | 66,77 | 0,00 | 0,00 | 26,71 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 26,71 | 100,00 |
| 7 | 70 | 25 | 90 | 70,95 | 16,35 | 40 | 100,00 | 4,64 | 11,59 | 35,36 | 88,41 | 6,54 | 16,35 | 4,64 | 70,95 | 1,90 | 29,05 | 33,46 | 83,65 | 0,00 | 0,00 | 33,46 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 33,46 | 100,00 |
| 8 | 70 | 25 | 110 | 59,87 | 19,38 | 40 | 100,00 | 4,64 | 11,59 | 35,36 | 88,41 | 7,75 | 19,38 | 4,64 | 59,87 | 3,11 | 40,13 | 32,25 | 80,62 | 0,00 | 0,00 | 32,25 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 32,25 | 100,00 |
| 9 | 70 | 25 | 130 | 60,89 | 19,05 | 40 | 100,00 | 4,64 | 11,59 | 35,36 | 88,41 | 7,62 | 19,05 | 4,64 | 60,89 | 3,86 | 39,11 | 31,50 | 80,95 | 0,00 | 0,00 | 31,50 | 100,00 | 0,00 | 0,00 | 31,50 | 100,00 |