

# Recikličnost električnog i elektroničkog otpada

---

Cuklin, Stela

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:491847>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

STELA CUKLIN

**RECIKLIČNOST ELEKTRIČNOG I ELEKTRONIČKOG OTPADA**

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2022.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva  
za 15. 09. 2022. u 9 sa  
Obranu ovog rada kandidat će izvršiti i pred  
ispitnim povjerenstvom u Varaždinu  
Varaždin, 01. 09. 2022.

Predsjednik  
ispitnog povjerenstva

*120. prof. dr. sc. Sanja Kovač*

**Članovi povjerenstva**

- 1) *Prof. dr. sc. Aleksandra Anić Vučić*
- 2) *Doc. dr. sc. Viktor Prer*
- 3) *Doc. dr. sc. Ivana Grčić*

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

**RECIKLIČNOST ELEKTRIČNOG I ELEKTRONIČKOG OTPADA**

**KANDIDAT:**

Stela Cuklin

*Stela Cuklin*

**MENTOR:**

Prof.dr.sc. Aleksandra Anić Vučinić

VARAŽDIN, 2022.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

### RECIKLIČNOST ELEKTRIČNOG I ELEKTRONIČKOG OTPADA

---

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **prof.dr.sc. Aleksandre Anić Vučinić**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 05.09.2022.

---

Stela Cuklin

(Ime i prezime)

---

*Stela Cuklin*

(Vlastoručni potpis)

**IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ  
OBJAVLJENIM RADOVIMA**

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom:

**RECIKLIČNOST ELEKTRIČNOG I ELEKTRONIČKOG OTPADA**

---

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 05.09.2022.

prof.dr.sc. Aleksandra Anić Vučinić

(Ime i prezime)



---

(Vlastoručni potpis)

## **Sažetak**

**Ime i prezime studenta:** Stela Cuklin

**Naslov rada:** Recikličnost električnog i elektroničkog otpada

Električni i elektronički otpad sastoji se od puno vrsta različitih materijala. Takvi se materijali mogu zasebno odvajati i na posljetku reciklirati. U radu je opisana što je i gdje se u svijetu ova vrsta otpada najviše proizvodi, sastavni dijelovi pojedinih uređaja koji su svrstani u 6 različitih kategorija otpadne električne i elektroničke opreme te procesi za gospodarenje te vrste otpada. Objasnjena je produžena odgovornost proizvođača te njezini zadaci i ciljevi. U radu su razrađeni kriteriji ekomodulacije i recikličnosti EE proizvoda kao alat za postizanje ciljeva kružnog gospodarstva kroz sustav proširene odgovornosti proizvođača.

**Ključne riječi:** električni i elektronički otpad, EE otpad, recikliranje, produžena odgovornost proizvođača.

## **Abstract**

**Name and surname of student:** Stela Cuklin

**Title:** WEEE recyclability

Electrical and electronic waste consists of many types of different materials. Such materials can be separated separately and eventually recycled. The paper describes what and where in the world this type of waste is produced the most, the components of individual devices that are classified into 6 different categories of waste electrical and electronic equipment and processes for managing this type of waste. Extended producer responsibility and its tasks and objectives are explained. The paper elaborates the criteria of ecomodulation and recyclability of EE products as a tool for achieving the goals of the circular economy through the system of extended producer responsibility.

**Keywords:** electrical and electronic waste, EE waste, recycling, extended producer responsibility.

## SADRŽAJ

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Količine prikupljenog električnog i elektroničkog otpada u Hrvatskoj i svijetu</b> .....	2
<b>3. Kategorije električne i elektroničke opreme</b> .....	4
3.1. Oprema za izmjenu topline .....	5
3.1.1. Hladnjaci.....	6
3.1.2. Klima uređaji .....	8
3.2. Zaslone, monitori i oprema koja sadrži zaslone površine veće od 100 cm <sup>2</sup> .....	10
3.3. Žarulje.....	15
3.3.1. Fluorescentne žarulje.....	15
3.3.2. LED žarulje.....	18
3.4. Velika oprema .....	19
3.5. Mala oprema .....	22
3.6. Mala oprema informatičke tehnike (IT) i oprema za telekomunikacije .....	23
3.6.1. Prijenosna računala .....	23
3.6.2. Pametni telefoni .....	27
<b>4. Produžena odgovornost proizvođača</b> .....	31
4.1. Produžena odgovornost proizvođača u različitim državama svijeta .....	32
4.2. Kriterij za procjenu ekomodulacije proizvoda.....	34
4.2.1. Ekomodulacija .....	34
4.2.2. Kriterij za ekomodulaciju .....	35
4.3. Prijedlog ekomodulacije EE opreme .....	37
4.4. Primjer izračuna ekomodulacije pojedinih proizvoda.....	40
<b>5. Zaključak</b> .....	42
<b>6. Popis literature</b> .....	43



<b>7. Popis slika.....</b>	<b>48</b>
<b>8. Popis tablica .....</b>	<b>49</b>
<b>9. Popis i objašnjenje kratica korištenih u radu.....</b>	<b>50</b>

## 1. Uvod

„EE oprema (električni i elektronički uređaji i oprema) predstavlja sve proizvode i njihove sastavne dijelove koji su za svoje primarno i pravilno djelovanje ovisni o električnoj energiji ili elektromagnetskim poljima kao primarnom izvoru energije kao i proizvode za proizvodnju, prijenos i mjerenje struje ili jakosti elektromagnetskog polja“ (1).

„EE otpad (električni i elektronički otpad) je EE oprema koja je otpad u smislu zakona kojim se uređuje održivo gospodarenje otpadom u Republici Hrvatskoj, uključujući sve komponente, podsklopove i potrošne materijale koji u trenutku odbacivanja čine dio proizvoda“ (1).

„Gospodarenje EE otpadom su djelatnosti sakupljanja, prijevoza, uporabe i zbrinjavanja i druge obrade EE otpada, uključujući nadzor nad tim postupcima te nadzor i mjere koje se provode na lokacijama nakon zbrinjavanja ostataka od uporabe EE otpada, te radnje koje poduzimaju posrednik ili trgovac EE otpadom“ (1).

Električni i elektronički otpad svrstava se u posebne kategorije otpada. Ova vrsta otpada sadrži vrijedne metalne i nemetalne sirovine koje se mogu koristiti u energetske svrhe i izdvojiti se iz uređaja prilikom obrade otpada (2).

U ovom radu opisan će se kategorije električnog i elektroničkog otpada te na koji se način svaka od njih može sa što većom učinkovitošću reciklirati.

## 2. Količine prikupljenog električnog i elektroničkog otpada u Hrvatskoj i svijetu

Električni i elektronički otpad najbrže je rastuća vrsta otpada na području Europske Unije. Iako se kontinuirano uvode novi ciljevi smanjenja količine istog te povećanje postotka njegovog recikliranja i dalje se reciklira manje od 40% ove vrste otpada. Bez obzira na relativno nisku stopu recikliranja električnog i elektroničkog otpada na području Europske Unije, Hrvatska je jedna od zemalja koja ima najveći postotak recikliranja ove vrste otpada, a on je veći od 80 posto (3).

Zemlje Europe, Azije i Sjeverne i Južne Amerike zajedno proizvode većinu svjetskog električnog i elektroničkog otpada, dok Europa uvelike prednjači pred ostatkom svijeta u stopi prikupljanja i recikliranja istog što je vidljivo u Tablici 1 (4).

Tablica 1: Proizvodnja, prikupljanje i recikliranje električnog i elektroničkog otpada u svijetu u

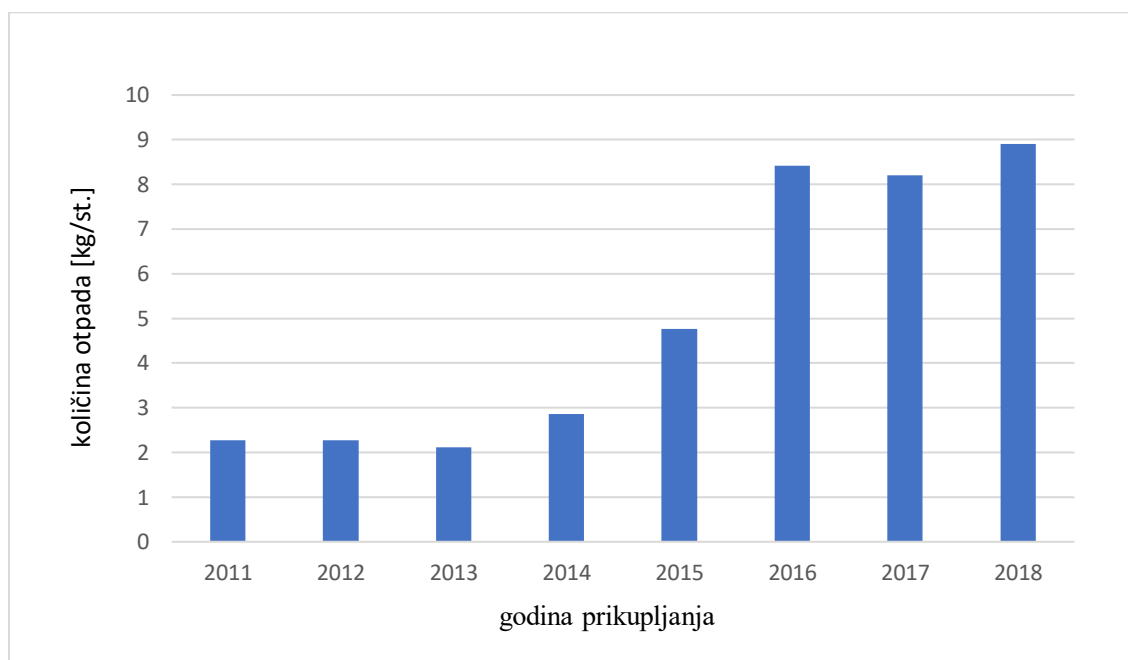
Pokazatelji		Europa	Azija	Sjeverna i Južna Amerika	Afrika	Oceanija
Proizvedeni električni i elektronički otpad	Ukupno/ milijuni tona	12	24,9	13,1	2,9	0,7
	Po glavi stanovnika/ kg	16,2	5,6	13,3	2,5	16,1
Električni i elektronički otpad koji je prikupljen i propisno recikliran	Ukupno/ milijuni tona	5,1	2,9	1,2	0,03	0,06
	Udio u ukupnom proizvedenom otpadu/ %	42,5	11,7	9,4	0,9	8,8

2019. godini (4)

Prema posljednje prikupljenim informacijama iz 2019. godine, količina prikupljenog električnog i elektroničkog otpada na području Europske Unije iznosila je 4.482.337 tona. Količina istog

otpada prikupljenog u Hrvatskoj te godine iznosila je 40.292 tona što je svrstava u skupinu zemalja s manjom količinom otpada u odnosu na prosjek Europske Unije (5).

Isto tako, podaci iz 2018. godine pokazuju da je količina prikupljenog električnog i elektroničkog otpada iznosila 8,9 kilograma po stanovniku. Značajan je porast prikupljene mase ovog otpada po stanovniku zabilježen 2015. godine kada se ista udvostručila, dok se 2016. godine učetverostručila u odnosu na prijašnje godine, što je vidljivo u grafikonu ispod teksta (Slika 1) (6).



Slika 1: Prikupljene količine EE otpada u Hrvatskoj(6)

### 3. Kategorije električne i elektroničke opreme

Otpadna električna i elektronička oprema (OEEO) (engl. Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE) složena je mješavina materijala i komponenti koje zbog svog opasnog sadržaja, ukoliko se njima ne gospodari na odgovarajući način, mogu uzrokovati velike ekološke i zdravstvene probleme. Štoviše, proizvodnja moderne elektronike zahtijeva korištenje oskudnih i skupih resursa. Kako bi se poboljšalo gospodarenje OEEO, doprinijelo kružnom gospodarstvu i povećala učinkovitost resursa, neophodno je poboljšati prikupljanje, obradu i recikliranje OEEO na kraju njihovog vijeka trajanja. Upravljanje OEEO regulirano je Direktivom 2012/19/EU Europskog parlamenta i Vijeća od 4. srpnja 2012. o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi (WEEE Direktiva) koja utvrđuje pravila i ciljeve za prikupljanje, obradu i oporabu OEEO (7).

U slučaju električnog i elektroničkog otpada postoji 6 kategorija opreme i to su:

1. Oprema za izmjenu topline,
2. Zaslone, monitori i oprema koja sadrži zaslone površine veće od 100 cm<sup>2</sup>,
3. Žarulje,
4. Velika oprema (bilo koja vanjska dimenzija veća od 50 cm) koja uključuje, ali se ne ograničava na: kućanske uređaje; opremu informatičke tehnike (IT) i opremu za telekomunikacije; potrošačku opremu; rasvjetna tijela, opremu za reprodukciju zvuka ili slike, glazbenu opremu; električne i elektroničke alate; igračke, opremu za razonodu i sportove; medicinske proizvode; instrumente za praćenje i kontrolu; automatske samoposlužne uređaje; opremu za proizvodnju električne struje. Ova kategorija ne obuhvaća opremu iz kategorije 1., 2. i 3.,
5. Mala oprema (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm) koja uključuje, ali se ne ograničava: na kućanske uređaje; potrošačku opremu; rasvjetna tijela; opremu za reprodukciju zvuka ili slike, glazbenu opremu; električne i elektroničke alate; igračke, opremu za razonodu i sportove; medicinske proizvode; instrumente za praćenje i kontrolu; automatske samoposlužne uređaje; opremu za proizvodnju električne struje. Ova kategorija ne obuhvaća opremu iz kategorije 1., do 3. i 6.,
6. Mala oprema informatičke tehnike (IT) i oprema za telekomunikacije (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm) (8).

### 3.1. Oprema za izmjenu topline

U opremu za izmjenu topline spadaju: hladnjaci, ledenice, oprema za automatsko izdavanje hladnih proizvoda, klima uređaji i ostali uređaji za ventilaciju, odzračivanje i kondicioniranje zraka, oprema za odvlaživanje, toplinske pumpe, uljni radijatori i druga oprema za izmjenu topline u kojoj se za izmjenu temperature koriste druge tekućine osim vode, ostala oprema za izmjenu topline (8).

Rashladni sektor jedan je od najvećih koji rabe tvari koje oštećuju ozonski omotač koristeći se klorofluorouglicima (CFC) kao najraširenijom radnom tvari. Rashladni je sektor jedinstven i po tome što se tvari koje oštećuju ozonski omotač ne rabe isključivo u novim uređajima nego i za servisiranje postojeće opreme (9). Klorofluorugljici (CFC) su tvari koje imaju najveći utjecaj na razgradnju ozona. Djelomično halogenirani klorofluorouglikovodici (HCFC) su slični CFC-ima te su se u velikoj mjeri proizvodili kao zamjenske radne tvari u uređajima za hlađenje i za ekspanziranje. HCFC-i manje uništavaju ozon od CFC-a, jer ih atom vodika čini manje stabilnim i podložnijim razgradnji u donjim slojevima atmosfere, sprečavajući da većina njihovog klora dopre do stratosfere. Freoni iz skupine fluoriranih ugljikovodika (HFC) ne sadrže klor i nemaju štetan utjecaj na razgradnju ozonskog sloja (10).

S obzirom da radne tvari iz skupine HFC-a imaju značajan utjecaj na efekt staklenika, F-gas regulativa (EU 842/2006) današnja istraživanja u rashladnoj i klima tehnici sve više usmjerava na primjenu prirodnih radnih tvari kao što su amonijak, ugljični dioksid, ugljikovodici te R 1234yf. F-gas regulativa donosi novo doba u istraživanju i primjeni radnih tvari. Radne tvari osim što ne smiju imati utjecaj na razgradnju ozona, trebaju imati što manji potencijal globalnog zagrijavanja (GWP). U novim automobilskim rashladnim uređajima, granica za primjenu radnih tvari od 2011. godine jest  $GWP < 150$  (10).

Uredbom o tvarima koje oštećuju ozonski sloj i fluoriranim stakleničkim plinovima (NN 83/2021) zabranjuje se ispuštanje u zrak kontroliranih tvari i fluoriranih stakleničkih plinova za vrijeme obavljanja aktivnosti prikupljanja, provjere propuštanja, održavanja ili servisiranja uređaja i opreme. Ovlašteni serviser zadužen je za prikupljanje kontroliranih tvari i fluoriranih stakleničkih plinova u za to namijenjene spremnike, za vrijeme obavljanja djelatnosti servisiranja rashladnih i klimatizacijskih uređaja i opreme, dizalica topline, protupožarnih sustava i aparata za

gašenje požara koji sadrže kontrolirane tvari ili fluorirane stakleničke plinove ili o njima ovise, kako bi se obnovili, oporabili ili uništili. Prikupljene tvar koje se ne mogu obnoviti ovlaštenu servisera predaje Centru za prikupljanje, obnavljanje i uporabu kontroliranih tvari i fluoriranih stakleničkih plinova (11).

### 3.1.1. Hladnjaci

Osnovna je namjena hladnjaka osigurati odgovarajuće uvjete za kratkotrajno skladištenje različitih vrsta namirnica pri sniženoj temperaturi koja iznosi 4 do 6 °C i posebnim uvjetima vlažnosti u cilju održavanja kvalitete i produljenju roka trajanja namirnica. Osnovna funkcija obično se nadopunjuje s nekoliko drugih istodobnih mogućnosti kao što su hlađenje pića i vode, izrada leda, smrznuta hrana, skladištenje, itd. Prema tome u mnogim slučajevima moderni hladnjaci imaju dodatne uređaje kao što su automatski ledomati, drobilice leda, dispenceri ohlađene vode i/ili sokova, mogućnosti brzog zamrzavanja i brzog odmrzavanja. Osim toga, hladnjaci mogu biti samostojeći, ugradbeni i podpultni, a dodatno se još dijele na hladnjake s jednim vratima, kombinirane i *side by side* hladnjake. Procjenjuje se da je prosječni radni vijek hladnjaka 10 do 15 godina (12)(13).

Hladnjaci se pretežno sastoje od željeza, bakra, aluminijske, mjedi i plastike, koji zajedno čine približno 80% težine. Sukladno tome, dominantni dijelovi glede težine su metali, kompresor, plastika i poliuretanske pjene (PUR). Detaljnija podjela različitih komponenti hladnjaka prema težini nalazi se u Tablici 2, pri kojoj se razmatraju stari uređaji koji sadrže klorofluorouglikove (engl. chlorofluorocarbons, CFC). Iako kontrolirana tvar CFC-12 i sredstvo za ekspanziju CFC-11 zajedno čine manje od 2% masenog udjela, predstavljaju veliku opasnost s ekološke perspektive i klasificirani su kao opasni otpad (14).

Tablica 2: Prosječni materijalni sastav 1000 hladnjaka u Europi isporučenih postrojenju za obradu OEEO (14)

Komponenta	Masa (hladnjak s CFC) [kg/hladnjak]	Maseni udio [%]
Metali bez kompresora	17	43
Kompresor	9	23
Plastika bez PUR-a	6,2	16
PUR	4	10
Ne-željezna frakcija iz kućišta	2	5
CFC-11	0,34	0,9
Voda	0,25	0,6
Staklo	0,25	0,6
Ulje	0,2	0,5
Kablovi	0,15	0,4
CFC-12	0,115	0,3
Ostalo	0,1	0,3
<b>Ukupno</b>	<b>39,6</b>	<b>100</b>

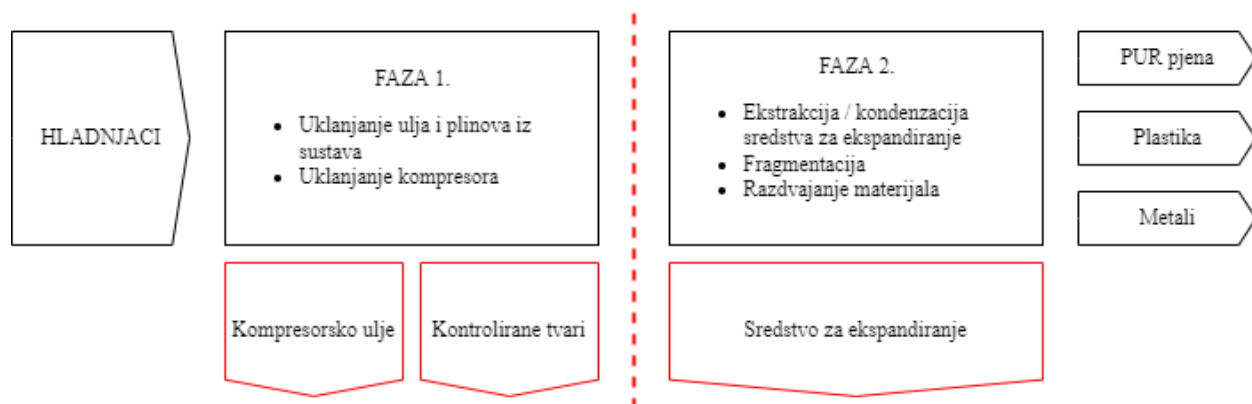
Tipičan kućanski hladnjak sadrži između 5 do 10 kg plastike, a uglavnom se koristi: polistiren (PS), polipropilen (PP), akrilonitril butadien stiren (ABS) i ponekad polivinil klorid (PVC). Najčešće korištena plastika za hladnjake je PS, koja se koristi za unutarnje obloge. Posude za voće i povrće izrađuju se od PP-a, rjeđe od ABS-a. Ponekad se PVC nalazi na vrhu hladnjaka kao dio kućišta, ali to je rijetkost. ABS i PP koji se danas koriste za kućne hladnjake više ne sadrže usporivače gorenja i stoga su vrijedne komponente za daljnju upotrebu. Plastika starih hladnjaka još uvijek može sadržavati usporivače plamena kao što su bromirani spojevi, ali to je vrlo rijetko (14).

U hladnjacima se mogu pronaći plemeniti metali, odnosno zlato i srebro, obični metali poput željeza, aluminijska, bakra i kositra te toksični metali olovo, kadmij, živa i antimon. Međutim, glavne koristi za okoliš proizlaze recikliranjem željeza, aluminijska i bakra. Nakon razdvajanja materijala, vrijedni resursi poput bakra, starog željeza, metala i plastike se prodaju tvrtkama na daljnje recikliranje, a ostali materijal male vrijednosti poput ulja, otpadnog rashladnog sredstva i poliuretana ide na daljnje recikliranje, zbrinjavanje ili spaljivanje. Kako bi se izbjegla degradacija kvalitete proizvedenog bakra, sav izdvojeni bakar koristi se kao sirovina za izradu bakrenih



katoda. Za uklanjanje željeza koristi se magnetska separacija. Zatim se obojeni metali i plastika separiraju uz pomoć zraka, a zatim se laki metali kao što je aluminij i teški metali kao što je bakar odvajaju separacijom po gustoći. Plastika se odvaja prema vrsti materijala; uglavnom PS, PP i ABS. Separacija se vrši mehanički ili uz pomoć raznih uređaja kao što su vizualni separatori. Plastika se može koristiti kao sekundarna sirovina za proizvodnju nove plastike ili se može energetski oporabiti (14,15).

Recikliranje hladnjaka proces je koji se odvija u dvije faze, pri čemu druga faza zahtijeva značajna ulaganja u infrastrukturu i skuplja je za vođenje, prikaz na Slici 2. Primarni cilj obje faze je uklanjanje tvari iz hladnjaka koje mogu oštetiti okoliš, a to su kompresorsko ulje i rashladno sredstvo u fazi 1 te plinovi koji se koriste u izolacijskoj poliuretanskoj pjeni (PUR) u fazi 2. Sekundarni cilj je recikliranje ostalih materijala poput plastike, metala i PUR pjene s vrlo niskim razinama zaostalog sredstva za ekspaniranje, odnosno 0,1% ili 0,2% ovisno o regulatorni režim(16).



Slika 2: Proces recikliranja hladnjaka

### 3.1.2. Klima uređaji

Klimatizacijski sustav sastoji od komponenti i opreme raspoređenih određenim redoslijedom kako bi se zadovoljili različiti prostorni uvjeti potrebni za udobnost i/ili industrijsku klimatizaciju. Kako bi se osigurala potpuna klimatizacija, cjelogodišnji sustav mora imati

funkcije grijanja, hlađenja, odvlaživanja, ovlaživanja, ventilaciju, filtraciju i cirkulaciju zraka. Veličina i složenost klimatizacijskog sustava može varirati od jedne unutarnje jedinice za malu prostoriju do ogromnog sustava za kompleksne zgrade, no osnovni principi rada su isti (17). Procjenjuje se da je prosječni radni vijek klima uređaja 14 do 18 godina (18).

Najčešće u primjeni klima uređaja nailazimo na pojam split sustav klima uređaja. Split sustav je izvedba klima uređaja koja se sastoji od dva osnovna dijela, vanjske i unutarnje jedinice. Vanjska jedinica sastoji se od kompresora i kondenzatora, dok se u unutarnjoj jedinici nalazi isparivač. Vanjska i unutarnja jedinica povezane su bakrenim izoliranim cijevima u kojima se nalazi radna tvar(19).

Vanjska jedinica klima uređaja sastoji se od kompresora, spremnika radne tvari, kondenzatora, aksijalnog ventilatora, termoekspanzijskog ventila i kućišta. S druge strane, unutarnja se jedinica klima uređaja sastoji od isparivača, tangencijalnog ventilatora, filtera, kućišta i upravljača - IC bežični ili žičani(19).

Za razliku od hladnjaka, kompresor klima uređaja jest najteži pojedinačni dio. Druga glavna razlika je nedostatak pjenastih ili staklenih dijelova u klima uređajima. Nakon što su različite komponente izvađene tijekom procesa rastavljanja, daljnji postupak recikliranja komponenti je isti kao i kod hladnjaka. Prosječni postotak sastava materijala prema težini klima uređaja prikazan je u Tablici 3.

Tablica 3: Prosječni materijalni sastav klima uređaja (14)

<b>Komponenta</b>	<b>Maseni udio [%]</b>
Željezo	5,3
Kompresor	39,3
Obojeni metali (12,7% bakar, 8,3% aluminij)	21
Plastika	26,4
Matična ploča	1
Radna tvar	2,4
Ostalo	4,6
<b>Ukupno</b>	<b>100</b>

Klima uređaji pretežno se sastoje od PP, ali mogu sadržavati i ABS. U klima uređajima češće se nalaze usporivači gorenja. Osim usporivača gorenja, mogu se naći anorganski spojevi poput antimonovog trioksida i organskih spojeva fosfora bez halogena. Drugi mogući kritični spojevi su anorganski pigmenti titanijev oksid, željezni oksid, olovni kromat, organski pigmenti ftalocijanin, kinakridon, aditivi teških metala kroma, kadmija i žive te plastifikator poput ftalata(14).

Program Ujedinjenih naroda za okoliš (UNEP) utvrdio je da tiskane ploče čine približno 0,3% težine bijele tehnike. Tiskane ploče u elektroničkim komponentama sadrže manje količine metala i tvari kao što su antimon, berilij, kadmij i klor. Bromirani usporivači gorenja i olovo također mogu biti prisutni u lemu. Hladnjaci i klima uređaji imaju jednu ili više tiskanih pločica, osobito novi moderniji uređaji.

Najkritičnije i najopasnije tvari u hladnjacima i klima uređajima su rashladna sredstva CFC-12, HCFC-22, HFC-134a, R-410A koji je mješavina HFC-a, HFC-32, druge smjese na bazi HCFC-a ili HFC-a i otopine amonijaka koje sadrže krom (VI). Najvažnija kritična sredstva za ekspaniranje pronađena u PUR-u hladnjaka su CFC-11 i HCFC-141b. Ostale opasne tvari su živa u zamrzivačima, komponente tiskanih pločica u klima uređajima i hladnjacima, odnosno olovo, kadmij i krom (VI), PCB u kondenzatorima, polibromirani bifenili (PBB) i polibromirani difenil esteri (PBDE) u plastici kao usporivači gorenja (14).

### 3.2. Zaslone, monitori i oprema koja sadrži zaslone površine veće od 100 cm<sup>2</sup>

U ovu kategoriju EE opreme spadaju zaslone, televizori, LCD fotookviri, monitori, računala »laptop« i »notebook« (8).

U prošlosti, zaslonima je dominirala CRT (engl. cathode ray tube) tehnologija koja za prikaz slike koristi katodnu cijev, a od oko 2000. godine ravni zaslone počeli su osvajati tržišni udio. (20) Ravni zaslone velikih dimenzija prvenstveno se koriste u području TV uređaja i računalnih monitora. Dodatna područja primjene uključuju digitalne zaslone, digitalne okvire za slike, tablet računala te u uređajima manjih formata kao što su mobilni telefoni, pametni telefoni, čitači e-

knjiga i brojni drugi uređaji. Trenutno se koriste tri različite tehnologije prikaza za ravne zaslone, prikaz u Tablici 4 (21).

Tablica 4: Tehnologije zaslona i područja primjene(20)

Tehnologija zaslona	Glavno područje primjene	Pozadinsko osvjetljenje
LCD (engl. Liquid Crystal Display)	Monitori, prijenosna računala, televizori	Da
PDP (engl. Plasma Display Panel)	Televizori	Ne
OLED (engl. Organic Light Emitting Diode)	Mobilni uređaji, prijenosna računala, televizori	Ne

Postoji razlika između ukupnog vremena korištenja i ukupnog životnog vijeka zbog pohranjivanja nekorištenih zaslona od strane zadnjeg korisnika prije konačnog odbacivanja proizvoda. Iz tog razloga ukupni je životni vijek otprilike dvostruko veći od vremena prve uporabe proizvoda sa zaslonom. Distribucija životnog vijeka modelirana je korištenjem funkcije normalne distribucije, uz pretpostavku prosječnog životnog vijeka na temelju literaturnih podataka i standardne devijacije od 30 % prosječnog životnog vijeka, a prikaz se nalazi u Tablici 5.

Tablica 5:Prosječno životni vijek zaslona i standardna devijacija u godinama

	Prosječni životni vijek	Standardna devijacija
CRT-TV	15	4,5
Ravni zaslon TV	10	3
CRT- Monitori	9	2,7
Ravni monitori	7	2,1

Indij se koristi u obliku indij kositrov oksid (eng. Indium tin oxide - ITO) kao elektrodni materijal u ravnim zaslonima. Prednost ITO-a je u tome što je proziran, vodljiv i uglavnom otporan na toplinu. ITO slojevi primijenjeni na zaslonima sastoje se od 90%  $In_2O_3$  (indij (III) oksid) i 10%  $SnO_2$  (kositar (IV) oksid), što odgovara težinskom postotku indija od 78%. Dok se na LCD zaslone primjenjuju dva sloja ITO-a, OLED zaslone imaju samo jedan sloj. U LCD zaslonima s LED pozadinskim osvjetljenjem, indij se također koristi kao komponenta LED poluvodičkog čipa

koji se većinom sastoji od indij galij nitrida. Aproksimacijski izračun sadržaja indija u LCD zaslonima nalazi se u Tablici 6 (21).

Tablica 6: Sadržaj indija u LCD zaslonima (21)

	Prosječna masa zaslona [g]	Prosječna masa indija po toni zaslona [g/t]	Prosječna masa indija po zaslonu [mg]	Prosječna veličina zaslona [cm <sup>2</sup> ]	Prosječni sadržaj indija po površini zaslona [mg/m <sup>2</sup> ]
Prijenosna računala	250	174	43,5	552	788
LCD monitori	300		52,2	1126	464
LCD televizori	1800		36,3	3626	864

Rijetki zemni metali koriste se u luminescentnom materijalu u jedinicama za vizualni prikaz. Ovisno o tehnologiji zaslona, rijetki zemni metali koriste se i u samim zaslonima (PDP i OLED) ili za pozadinsko osvjetljenje. Dostupni podaci o uporabi rijetkih zemnih metala u ovom kontekstu vrlo su općenite prirode, budući da su sve informacije o količinama i koncentracijama za određene proizvode obično pokrivene poslovnom tajnom, no ipak su neke činjenice poznate, a procijenjeni približni sadržaj rijetkih zemnih metala nalazi se u Tablici 7.

Za luminiscentni materijal može se napraviti razlika između matrice potpore i stvarnih luminiscentnih tvari (aktivatora). Osim spojeva bez rijetkih zemnih metala, u matrici nosača koriste se spojevi s itrijem (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), cerijem (CeMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>) i lantanom (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Također, ova tri metala pokazuju najveće udjele od svih rijetkih zemnih metala u luminiscentnim materijalima itrij (69,2%), lantana (11,0%) i cerij (8,5%), a zatim slijede europij (4,9%), terbij (4,6%) i gadolinij (1,8%). Cijevi s hladnom katodom (engl. Cold Cathode Fluorescent Lamps - CCFL) koriste se za pozadinsko osvjetljenje LCD-a, posebno kod starijih uređaja. Dok se samo jedna ili dvije lampe općenito koriste u prijenosnim računalima, televizori su opremljeni s do 82 cijevi (21).

Tablica 7: Prosječni sadržaj rijetkih metala po LCD televizoru, PC monitoru i monitoru prijenosnog računala (22)

Metal	Količina / LCD TV [mg]		Količina / LCD PC [mg]		Količina / LCD prijenosno računalo [mg]		Mjesto sadržaja
	CCFL	LED	CCFL	LED	CCFL	LED	
<b>Indij</b>	254	258	79	82	39	40	ITO + pozadinsko osvjetljenje (100%)
<b>Itrij</b>	110	4,80	16	3,20	1,80	1,60	Pozadinsko osvjetljenje (100%)
<b>Europij</b>	8,10	0,09	1,20	0,06	0,13	0,03	Pozadinsko osvjetljenje (100%)
<b>Lantan</b>	6,80	0,00	1,00	0,00	0,11	0,00	CCFL pozadinsko osvjetljenje (100%)
<b>Cerij</b>	4,50	0,30	0,68	0,20	0,08	0,10	Pozadinsko osvjetljenje (100%)
<b>Terbij</b>	2,30	0,00	0,34	0,00	0,04	0,00	CCFL Pozadinsko osvjetljenje (100%)
<b>Galij</b>	0,00	4,90	0,00	3,30	0,00	1,60	LED pozadinsko osvjetljenje (100%)
<b>Gadolinij</b>	0,63	2,30	0,10	1,50	0,01	0,75	Pozadinsko osvjetljenje (100%)
<b>Praesodimij</b>	<0,13	0,00	<0,019	0,00	<0,003	0,00	CCFL pozadinsko osvjetljenje (100%)
<b>Paladij</b>	44	44	40	40	4	4	Tiskana matična ploča i kontakti (100%) Prijenosno računalo: tiskana pločica zaslona
<b>Tantal</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	170	170	Kondenzatori na tiskanim pločicama (10%), ne uzimajući u obzir matičnu ploču.

Prosječna težina ravnog ekrana televizora/monitora je procijenjena na masu od 6,92 kg po komadu, a maseni udio kritični vrijednih sirovina koje se nalaze u ekranu prikazani su u Tablici 8 (23).

Tablica 8: Maseni udio kritičnih vrijednih sirovina u ravnim zaslonima televizora/monitora (23)

Kritične vrijedne sirovine	Prosječni maseni udio (%)	Minimalni maseni udio (%)	Maksimalni maseni udio (%)
Indij (In)	0,00132	0,00004	0,00367
Srebro (Ag)	0,00744	0,00650	0,00831
Volfram (W)	0,00915		
Zlato (Au)	0,00233	0,00159	0,00289
Galij (Ga)	0,00006	0,00004	0,00007
Paladij (Pd)	0,00061	0,00058	0,00064

CRT zaslone, sada poznate kao televizijski i računalni monitori "stare generacije", proizvode se korištenjem posebno složenog vakuumskog stakla koje čini oko 65% težine standardnog monitora. Rad CRT-a temelji se na razlici napona između elektronskog topa i anode. CRT zaslone sadrže staklene strukture koje imaju različita strukturna i kemijska svojstva kako bi se osigurao odgovarajući protok elektrona i generiralo svjetlo u različitim bojama i tonovima na površini. Te staklene strukture su prednja ploča, to jest staklo koje sadrži barij-stroncij, lijevak koji sadrži olovo, fritu, odnosno lem niske temperature taljenja i vrat s visokim sadržajem olova. Materijali poput barija, stroncija i olova, sadržani su u ovim vrstama stakla i štetni su za ljudsko zdravlje. CRT monitori, prema svojim dimenzijama, sadrže između 0,5 kg i 2,9 kg olova. Dijelovi vrata i lijevka CRT proizvoda spadaju u kategoriju toksičnog otpada. Prednja ploča pokazuje manju toksičnost zbog sadržaja barij stroncija koji sadrži. Standardni CRT sastoji se od 65% prednje ploče, 30% ljevkastog stakla i 5% vratnog stakla (24).

Postoje dva različita sustava recikliranja CRT-a. U zatvorenom krugu recikliranja pri kojem se otpad koristi kao sirovina za proizvodnju novih CRT-a i recikliranju u otvorenom krugu pri kojem se otpad koristi kao sirovina u drugim proizvodnim područjima.(24).S obzirom da se proizvodnja CRT-a smanjila, otpadno staklo CRT-a češće se koristi u proizvodnji olova pri čemu se podvrgava nizu procesa taljenja. Također, koristi se u sektoru keramike i kao dodatak opeci i cementu. Recikliranje CRT otpada važno je ne samo zbog ekonomske dobiti, već i zbog ekoloških razloga. Otpadni CRT zaslone se odvajaju od plastičnog, metalnog ili drvenog dijela monitora pri recikliranju. Tijekom ove faze rastavljanja, važno je da ne dođe do oštećenja CRT-a kako ne bi došlo do miješanja stakla različitih sastava (20,24).

Kod recikliranja LCD zaslona odvoje se metali i plastika koji se recikliraju na isti način kao kod ostalih električnih i elektroničkih uređaja, dok LCD zaslon ima poseban proces recikliranja. Zaslon s tekućim kristalima sastoji se od 87,2% stakla, 12,7% plastike i 0,1% tekućih kristala, a glavna komponenta ITO sloja je indij. Pozadinsko osvjetljenje zaslona sadrži živu u svojim komponentama te se one moraju ukloniti u procesu rastavljanja. U većini slučajeva LCD zaslone danas se zbrinjavanju spaljivanjem, što dovodi do gubitka vrijednih resursa poput indija. Staklo LCD zaslona koristi se kao ulazni materijal za proizvodnju građevinskih materijala i keramike. Recikliranje indija danas se uglavnom odvija prilikom proizvodnje ITO sloja, prilikom čega nastaje otpad koji sadrži indij otpada u proizvodnji te se pri tome oporabi oko 70% indija.

Izluživanje indija iz ITO sloja predstavlja jedan od najbitnijih procesa uz usitnjavanje. Ispiranje različitim otopinama kiselina neophodno je kako bi se postiglo izluživanje indija iz odvojenog ITO sloja iz otpadnih LCD-a. Što se tiče ITO sloja, za izluživanje indija najprikladnija jest klorovodična kiselina kojom se postiže izluživanje indija čak i preko 90 % (25).

### 3.3. Žarulje

Postoje različite vrste žarulja: ravne fluorescentne žarulje, kompaktne fluorescentne žarulje, fluorescentne žarulje, žarulje s izbijanjem, uključujući visokotlačne žarulje s natrijevim parama i žarulje s metalnim parama, niskotlačne natrijeve žarulje, LED te ostale žarulje (8).

#### 3.3.1. Fluorescentne žarulje

Fluorescentnost ili fluorescentni izvor svjetlosti (FL, eng. Fluorescent Lighting) znači pojava ili izvor svjetlosti u kojem svjetlost nastaje plinskim električnim izbojem, u niskotlačnom živinom izvoru svjetlosti te se većina svjetlosti emitira iz jednog ili više slojeva fosfora pobuđenih ultraljubičastim zračenjem iz izboja. Fluorescentne žarulje su energetske štedljivi izvor svjetlosti čija se svjetlost stvara propuštanjem električne struje kroz paru žive. Fluorescentne žarulje troše od 2 do 5 puta manje snage i vijek im je od 8 do 10 puta dulji od žarulja sa žarnom niti(26).

Razlikujemo više vrsta fluorescentnih žarulja, a to su: kompaktne fluorescentne žarulje (engl. Compact Fluorescent Lamps CFL), linearne fluorescentne žarulje (engl. Linear Fluorescent Lamps LFL) ili pod nazivom fluorescentne cijevi te žarulje u obliku kruga i slova U. Životni vijek CFL-ova je između 6.000 i 15.000 sati, ovisno o vrsti i uporabi, dok žarulje u obliku cijevi imaju životni vijek do 20.000 sati(26).

Glavni dijelovi fluorescentne cijevi su staklena cijev, plinsko punjenja, elektrode i fluorescentni prah. Staklena cijev fluorescentnih žarulje izrađena je od stakla koje sadrži posebni materijal koji



blokira UV zračenje iz izboja žive. Plinsko punjenje fluorescentne žarulje sastoji se od mješavine živinih para i inertnog plina. Inertni plin ima tri funkcije: za lakše paljenje žarulje, posebno pri nižim temperaturama, za kontrolu brzine slobodnih elektrona i za produljenje vijeka trajanja elektroda. Inertni plin obično se sastoji od mješavine argona i neona, a ponekad se koristi i kripton. Funkcija elektroda je osigurati slobodno kretanje elektrona, koji su neophodni za pokretanje i održavanje izbijanja. Elektroda fluorescentne žarulje sastoji se u osnovi od volframove niti koja je obložena emitterskim materijalom u cilju olakšanja emisije elektrona (27).

Fluorescentne žarulje predstavljaju opasan otpad pa je stoga vrlo važno odložiti ih na za to predviđena mjesta poput sabirnih centara i reciklažnih dvorišta odakle se transportiraju na daljnju obradu. Recikliranjem fluorescentnih žarulja dobivaju se produktiluminofor, lomljeno staklo i aluminijske kapice. Prema literaturnim podacima postoje tri načina uklanjanja žive u postupku recikliranja fluorescentnih žarulja, a to su mehaničko uklanjanje fosfornog praha, termička desorpcija i mokri postupak pranja kiselinom (28).

Fluorescentne žarulje se prvo mehanički obrađuju, to jest lome u jedinici za drobljenje. Tijekom drobljenja, vakuumski sustav smješten ispod drobilice sakuplja zrak i lomljeni materijal, sprječavajući emisiju žive kroz ulaznu cijev. Materijali nakon mehaničke obrade prolaze kroz separator gdje se odvajaju aluminijske kapice i lomljeno staklo od luminofora (28).

Jedna od opcija učinkovitog uklanjanja žive adsorbirane na lomljenom staklu je zagrijavanje fluorescentnih žarulja na temperaturu oko  $100^{\circ}\text{C}$ , čime postiže da vrijednosti koncentracije žive budu unutar graničnih te lomljeno staklo kao takvo kategorizira kao neopasan otpad. Elementarna živa u obliku pare sakuplja se u filteru s aktivnim ugljenom te se potom šalje na pročišćavanje. Luminofor i filteri u kojima se nalazi elementarna živa transportiraju se kao opasan otpad u postrojenje za pročišćavanje žive, zbog materijalne uporabe elementarne žive i fosfornog praha. Oporavak se vrši zagrijavanjem iznad temperature vrelišta žive, koja iznosi  $375^{\circ}\text{C}$ , u trajanju od 4 do 20 sati pri čemu se živine pare kondenziraju i sakupljaju. Moguće je korištenje dodatnih tretmana, poput pranja nitratnom kiselinom kako bi se uklonile nečistoće prije ponovnog korištenja žive. Pročišćeni luminofor moguće je ponovo iskoristiti kao sirovinu za proizvodnju novih žarulja, a izdvojena živa pri proizvodnji novih fluorescentnih žarulja ili korištenje za druge industrijske procese (28).

Lomljeno staklo, ukoliko je karakterizirano kao neopasan ili inertan otpad, moguće je odložiti na odlagališta, koristiti kao građevinski materijal ili koristiti kao sirovinu za proizvodnju novih fluorescentnih žarulja. Aluminijske kapice fluorescentnih žarulja predstavljaju korisnu sirovinu koje se tope i proizvode aluminijske ploče, koje se poslije upotrebljavaju za proizvodnju novih proizvoda (28).

Trikromatski fosforni prah fluorescentnih žarulja sastoji se od približno 55% crvenog, 35% zelenog i 10% plavog fosfora, iako postoje varijacije. Također, količina rijetkih zemnih metala u svakom od ovih fosfora nije konstantna već se, ovisno o proizvođaču i zahtjevima primjene žarulje, koriste različite količine rijetkih zemnih metala. Itrij i europij čine crveni fosfor, zeleni fosfor sadrži približno 10% terbija, a plavi fosfor manje od 5% europija. Sastav trikromatskog fosfora određen rendgenskom fluorescentnom spektroskopijom (engl. X-ray fluorescence, XRF) prikazan je u Tablici 9. Oksidi rijetkih zemnih metala dosežu do 27,9% ukupne težine fosfora, što dokazuje da fluorescentne žarulje imaju visoku vrijednost recikliranja (29).

Tablica 9: Udio oksida rijetkih zemnih metala u trikromatskom fosforu (29)

Kemijski element	Kemijski spoj	Udio [%]
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,6
P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	14,4
Ca	CaO	15,1
Ba	BaO	2,0
Y	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23,2
Ce	CeO <sub>2</sub>	2,4
Eu	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,8
Tb	Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0,2
La	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3

### 3.3.2. LED žarulje

Posljednjih godina bijele LED diode sve se više koriste za rasvjetu. LED žarulje imaju mnoge prednosti, a jedna od njih jest ta što štedi električnu energiju zahvaljujući visokoj svjetlosnoj učinkovitosti od 50 do 80 lm/W. Njihovo svjetlo visoke je kvalitete s indeksom ocjenjivanja boja (engl. Color rendering index, CRI) 80-90 i kontinuiranim spektrom. Imaju dug životni vijek do 50 000 sati, dobru stabilnost prilikom vremena paljenja i gašenje žarulje. Jako su otporne na udarce i vibracije. Uz to, njihov mali dizajn dopušta nova dizajnerska rješenja i omogućuje širok raspon primjena (21).

Galij je jedna od važnih komponenti čipa LED žarulje. U LED žarulji, poluvodiči galijev nitrid (GaN) i indij galijev nitrid (InGaN) emitiraju svjetlost u plavo-zelenom do ultraljubičastog spektralnog područja koje se pretvara u bijelo svjetlo pomoću luminiscentne tvari nanasene na čip. Uz njih su potrebni i drugi rijetki zemni metali za proizvodnju bijele LED diode, a njihove mase potrebne za proizvodnju jedne tipične bijele LED diode prikazane su u Tablici 10 (21).

Tablica 10: Masa rijetkih zemnih metali za proizvodnju bijele LED diode (21)

Kemijski element	Masa po LED diodi [ $\mu\text{g}$ ]	Mjesto sadržaja
Indij	29	Poluvodički čip (100%)
Galij	33	Poluvodički čip (100%)
Cerij	2	Dopirane luminiscentne tvari (100%)
Europij	0,4 – 0,9	Dopirane luminiscentne tvari (100%)
Gadolinij	15	Medij-nosač luminiscentne tvari (100%)
Itrij	32	Medij-nosač luminiscentne tvari (100%)

LED žarulje u obliku cijevi i obične LED žarulje imaju slične komponente i načine rada, ali imaju različite količine materijala u svom sastavu. U Tablici 11 prikazane su količine materijala prema komponentama LED žarulje iz koje se mogu vidjeti razlike između LED cijevi i običnih LED žarulja, a vrijednosti su izražene u postocima mase. Također, u Tablici 11 prikazana je usporedba koncentracija materijala komponenti LED svjetiljki s tipičnom koncentracijom prirodnih ruda. Ove informacije naglašavaju važnost recikliranja komponenti LED žarulja. Budući da nekoliko materijala ima veće koncentracije od prirodnih ruda i uporaba e-otpada obično je energetski učinkovitija. Unatoč neravnomjernoj distribuciji prirodnih ruda, usporedbom se također može zaključiti o mogućnostima odredišta rashodovanih LED svjetiljki i komponenti, s obzirom da se

materijali odgovarajuće koncentracije mogu preraditi u pogonima za preradu rude, ako je to tehnološki i logistički primjereno (30).

Tablica 11: Koncentracija materijala po komponentama LED žarulje (30,31)

Materials concentration per component of the LED lamps.

Materials	Concentration, %								Typical exploited ore concentration (Granta Design - CES Selector, 2019)
	Tubular Lamps				Bulb Lamps				
	LEDs	PCBs	LED Modules	Carcasses	LEDs	PCBs	LED Modules	Carcasses	
Silver (Ag)	0.718	0.014	0.002	-	0.482	0.005	0.004	-	0.0523-0.0578
Aluminum (Al)	0.194	4.127	20.775	26.460	0.252	5.412	54.728	25.515	30.4-33.6
Copper (Cu)	59.026	17.595	5.006	-	54.647	15.413	2.963	-	2.52-2.78
Iron (Fe)	0.480	9.621	0.126	-	0.741	10.421	0.380	-	45.1-49.9
Gallium (Ga)	0.084	0.064	-	-	0.381	0.061	-	-	0.0242-0.0268
Nickel (Ni)	0.082	0.072	0.001	-	0.183	0.064	0.038	1.408	0.1-1.1
Lead (Pb)	1.025	0.233	0.011	-	-	-	0.001	-	7.6-8.4
Gold (Au)	0.054	0.014	0.030	-	0.052	0.020	0.028	-	0.00176-0.00194
Tin (Sn)	6.812	9.795	1.248	-	10.957	13.028	5.827	-	1.9-2.1
Titanium (Ti)	0.058	0.068	0.025	-	0.019	0.058	0.079	-	15.2-16.8
Cerium (Ce)	0.009	-	-	-	0.009	-	-	-	1.47-1.63
Yttrium (Y)	0.290	-	-	-	0.683	-	-	-	-
Polycarbonate	-	-	-	73.540	-	-	-	27.157	-
Polyester	-	-	-	-	-	-	-	34.037	-
Polyamide	-	-	-	-	-	-	-	11.883	-
Uncharacterized	31.167	58.398	72.778	-	31.590	55.519	35.951	-	-

<sup>1</sup> Uncharacterized: uncharacterized materials quantifies the materials that were disregarded and those that cannot be measured by acid leaching, such as glass fiber, silicon and epoxy resin.

Simulacija materijalne i ekonomske uporabe pokazala je da se korištenjem trenutno dostupnih tehnologija samo približno 55% metala izvlači iz komponenti LED svjetiljki. To predstavlja približno 53% ukupnog potencijalnog gospodarskog oporavka. U isto vrijeme, ovi rezultati simboliziraju poteškoće u recikliranju tako složenog e-otpada i priliku za istraživanje novih alternativa recikliranju, posebno za kritične materijale kao što su galij i elementi rijetki zemni metali (30).

### 3.4. Velika oprema

Pod veliku opremu spadaju slijedeći električni i elektronički uređaji: perilice, sušilice rublja, strojevi za pranje posuđa, kuhinjske peći, električni štednjaci, električne ploče za grijanje, rasvjetna tijela, oprema za reprodukciju zvuka ili slika, glazbena oprema (isključujući orgulje u crkvama), uređaji za pletenje i tkanje, velika računala, veliki pisači, kopirna oprema, veliki automati s kovanicama, veliki medicinski proizvodi, veliki instrumenti za praćenje i kontrolu, veliki uređaji za automatsko izdavanje proizvoda i novca, fotonaponske ploče, ostala velika

oprema (8).Prosječni materijalni sastav pojedinih velikih kućanskih uređaja nalazi se u Tablici 12.

Tablica 12: Prosječni materijalni sastav pojedinih velikih kućanskih uređaja(31)

<b>Materijal</b>	<b>Perilica rublja</b>	<b>Sušilice rublja</b>	<b>Perilica posuđa</b>	<b>Kuhinjski uređaji</b>
ABS	1,6%	4,7%	1,2%	-
Aluminij	3,4%	3,6%	0,25%	1,8%
Beton	23,0%	-	4,0%	-
Bakar	1,9%	3,8%	1,3%	1,9%
Bakar + aluminij	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%
Elektronika	1,2%	2,8%	1,7%	0,51%
Staklo	2,0%	0,10%	-	14,4%
PS	-	0,68%	0,22%	-
PA	0,27%	0,15%	0,25%	-
PC	0,24%	0,13%	0,23%	-
PE	0,07%	-	0,36%	-
PP	6,6%	14,1%	10,2%	-
PUR	-	-	0,35%	-
PVC	0,24%	0,17%	0,82%	0,19%
Nehrđajući čelik	3,5%	8,5%	17,3%	19,5%
Željezo	46,8%	52,0%	41,6%	54,3%
Ostala plastika	3,5%	7,0%	5,8%	1,7%
Ostalo	5,3%	2,4%	14,4%	5,6%

Procijenjeni životni vijek električne i elektroničke opreme može se znatno razlikovati zbog različitih metoda mjerenja i izračuna, ali i geografski, socioekonomski i kulturni aspekti mogu imati ulogu. Prema istraživanju, ustanovljeno je da 69% ispitanih potrošača odbaci startu perilicu rublja zbog njenog kvara, 10% potrošača odbaci staru perilicu jer smatra da nema zadovoljavajuću energetska učinkovitost, dok 2% potrošača nije zadovoljno brojem funkcija koje posjeduje stara perilica, odnosno 1% potrošača promijeni jer im se stara perilica rublja više ne sviđa. Utvrđeno je da je starost odbačenih perilica u rasponu od 1 do 40 godina, s prosjekom od 12 godina. Ipak, čak 50% odbačenih perilica rublja bilo je mlađe od 10 godina, a oko 20% perilica rublja ne dožive životni vijek od 5 godina. Uočeno je da životni vijek raste s cijenom uređaja (32), (33).

Prilikom recikliranja perilica rublja, obično se odvija ručno rastavljanje i razvrstavanje složenih dijelova poput kablova, kondenzatora, betona, tiskane ploče, motore i kondenzatore. Nakon čega obično slijedi mehaničko drobljenje perilice rublja. Tiskane ploče koje sadrže kondenzatore spaljuju se kao opasni otpad. Ostatak perilica dalje se usitnjava u srednjoj ili velikoj sjeckalici nakon čega se frakcije odvajaju ručno ili različitim tehnologijama automatizirane separacije. Odvojene frakcije se zatim šalju na daljnju obradu specifičnom tehnologijom za svaki pojedini materijal, plastika u postrojenja za obradu otpadne plastike, frakcije metala u postrojenja za obradu metala i slično(34).

Popis materijala perilice rublje srednjeg cjenovnog ranga i prosječne izračunate stope recikliranja i uporabe specifične za materijal sažete su u Tablici 13. Tablica prikazuje samo prosjek bez razmatranja varijabilnosti i neizvjesnosti.

Tablica 13: Popis materijala i prosječne stope recikliranja i uporabe perilica rublja (34)

<b>Materijal</b>	<b>Udio materijala u uređaju</b>	<b>Prosječna izračunata stopa recikliranja</b>	<b>Prosječna izračunata stopa uporabe</b>
ABS	1,7%	62%	69%
Aluminij	3,2%	96%	96%
Mjed	0,1%	96%	96%
Kablovi	1,1%	n/a	
Iverica	2,9%	n/a	
Beton	31,7%	73%	73%
Bakar	1,3%	96%	96%
Pamuk s fenolnim vezivom	0,7%		
Elektroničke komponente	0,5%	9%	43%
Kopolimer etilen-propilen	3,1%	n/a	
Staklo	2,7%	73%	73%
Lijeivano željezo	1,8%	96%	96%
PA	0,02%	62%	69%
PMMA	0,004%	62%	69%
PP	0,2%	62%	69%
PP s 20% mineralnog punila	0,6%	n/a	
PP s 40% mineralnog punila	11,2%	n/a	
PS	0,3%	62%	69%

Željezo	33,9%	96%	96%
Ostalo	3,0%	n/a	

### 3.5. Mala oprema

Mala oprema (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm) koja uključuje, ali se ne ograničava na: kućanske uređaje; potrošačku opremu; rasvjetna tijela; opremu za reprodukciju zvuka ili slike, glazbenu opremu; električne i elektroničke alate; igračke, opremu za razonodu i sportove; medicinske proizvode; instrumente za praćenje i kontrolu; automatske samoposlužne uređaje; opremu za proizvodnju električne struje. Ova kategorija ne obuhvaća opremu iz kategorija 1. do 3. i 6 (8).

Mali kućanski uređaji pod velikim su utjecajem mješavine proizvoda u toku otpada koji je najheterogeniji od onih koje kategorizira WEEE Direktiva. Za male kućanske aparate, prisutnost i kvaliteta elektronike te plastike koja sadrži bromirane usporivače gorenja utječe na ekonomski učinak. Elektronika može stvoriti prihod, dok bromirani usporivači gorenja tretirani na ekološki prihvatljiv način stvaraju trošak (31). Prosječni materijalni sastav pojedinih malih kućanskih uređaja nalazi se u Tablici 14.

Tablica 14: Prosječni materijalni sastav pojedinih malih kućanskih uređaja (31)

Materijal	Kuhalo za vodu	Mikrovalna	Uređaji za osobnu higijenu	Usisivač
ABS	2,9%	1,5%	3,2%	10,8%
Aluminij	4,3%	0,47%	4,0%	5,1%
Beton	-	-	0,02%	-
Bakar	4,6%	12,5%	20,0%	3,5%
Bakar + aluminij	0,13%	0,10%	0,38%	0,05%
Elektronika	3,3%	2,4%	1,3%	0,21%
Staklo	7,6%	6,4%	0,53%	-
PS	-	0,09%	1,0%	-
PA	1,1%	-	4,9%	-
PC	0,04%	0,05%	0,20%	-
PE	0,02%	0,03%	0,28%	-
PP	7,4%	0,59%	2,6%	5,1%

PUR	-	-	-	-
PVC	0,26%	0,63%	0,12%	2,0%
Nehrđajući čelik	1,8%	0,92%	6,3%	4,2%
Željezo	49,6%	66,8%	21,1%	12,6%
Ostala plastika	6,9%	3,1%	18,0%	42,8%
Ostalo	10,0%	4,6%	16,0%	13,8%

### 3.6. Mala oprema informatičke tehnike (IT) i oprema za telekomunikacije

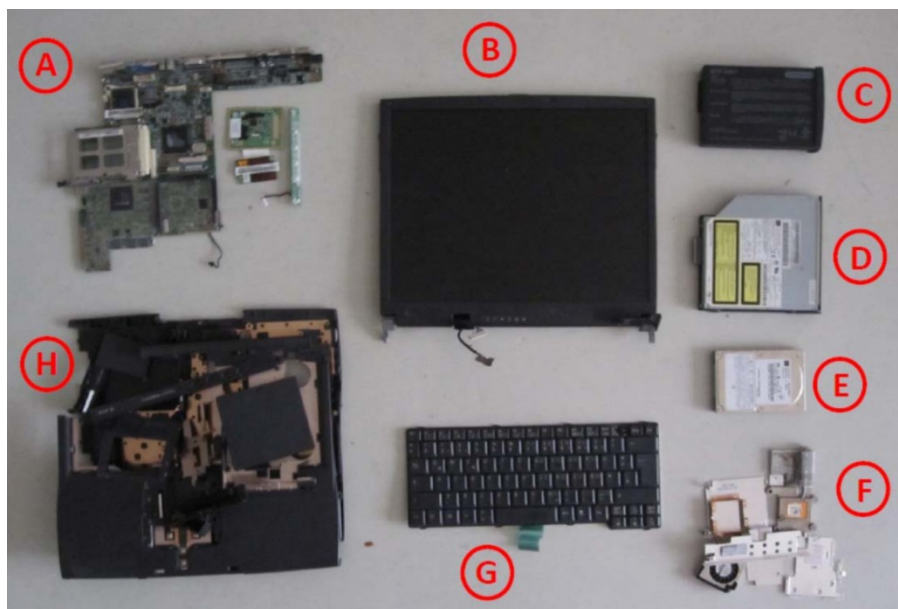
Mala oprema informatičke tehnike (IT) i oprema za telekomunikacije (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm) (8).

#### 3.6.1. Prijenosna računala

Prijenosna se računala sastoje od 1800 do 2000 pojedinačnih dijelova koji zajedno sadrže širok raspon kemijskih elemenata.

Glavni dijelovi prijenosnog računalaprikazani su na Slici 3, a to sumatična ploča i manje tiskane pločice, LCD zaslon, baterija, optički pogon CD, DVD ili Blu-ray, no njega ne sadrže ga sva prijenosna računala, tvrdi disk, čelične pločice, rashladni elementi i ventilatori, tipkovnica te plastične komponente(21).





Slika 3: Glavni dijelovi prijenosnog računala

Prijenosna računala često se kvare, no ti se kvarovi mogu lako popraviti poboljšanjem dizajna ili promjenom oštećenog dijela računala. Tipični životni vijek prijenosnog računala iznosi 4 do 5 godina. Provedenim istraživanjem 2019. godine, 84% ispitanika smatra da bi Europska unija trebala djelovati na proizvođače u cilju produljenja životnog vijeka proizvoda. Čak 77% ispitanika je radije popravljalo oštećeno prijenosno računalo nego kupovalo novo(35).

Nekoliko istraživanja pokušalo je prikupiti, sažeti i objaviti općenite podatke o materijalnom sastavu prijenosnih računala. Tablica 15 prikazuje prosječni sastav prijenosnih računala kako je navedeno u Kasulaitis i sur. (36), FEM / IUTA (37) i Oguchi i sur.(38),(34,38).

Tablica 15: Težinski udio materijala u prijenosnim računalima (34)

Materijal	Kasulaitis i sur. (36)	FEM / IUTA (37)	Oguchi i sur. (38)
Željezo	10%	11%	19,5%
Aluminij	14%	4%	2,4%
Bakar	2%	0,4%	1,0%
Plastika	24%	38%	25,8%
Tiskane pločice	14%	16%	13,7%
Magnezij	4%	-	-
Baterija	13%	11%	14,4%
LCD	18% <sup>1</sup>	8% <sup>2</sup>	-

<b>Optički pogon</b>	-	8%	-
<b>Tvrđi disk</b>	-	4%	-
<b>Broj podataka</b>	11	451	10

- 1) LCD modul, vjerojatno uključujući jedinicu za pozadinsko osvjetljenje (difuzor itd.), CCFL cijevi i druge materijale zaslona  
2) LCD panel bez jedinice za pozadinsko osvjetljenje (LED ili CCFL cijevi)

Udio navedenih materijala razlikuje se u svakom od provedenih istraživanju. Magnezij je kao materijal naveden u najnovijem istraživanju Kasulaitisa i sur. (36) jer se nalazi u prijenosnim računalima novije generacije kao lagani konstruktivni okvir. Kasulaitis i sur. (36) rastavili su 11 prijenosnih računala kako bi karakterizirali prijenosna računala na temelju funkcije, komponenti i materijala. Oguchi i sur. (38). Napravili su istraživanje na temelju 10 prijenosnih računala iz modela od 1987. do 2008., koristeći literaturu drugih istraživanja i svojih provedenih mjerenja. Za studiju FEM / IUTA (37), prema priručniku za rastavljanje obučeno je osoblje u reciklažnom centru koje je ručno rastavilo 451 prijenosno računalo. U istraživanju nije navedeno koliko su laptopi bili stari. Ovisno o procesima koji se koriste prilikom kraja životnog vijeka proizvoda, složeni dijelovi kao što su jedinica zaslona, pogoni i tvrđi diskovi moraju se dalje rastaviti na različite materijale (34).

Prijenosna računala sadrže različite tiskane pločice koje su opremljene raznim elektroničkim komponentama i priključcima. Značajne količine plemenitih metala sadržane su u elektroničkim komponentama, konektorima i lemu. Od plemenitih metala, zlato se koristi za kontakte, žice za spajanje i mikročipove, srebro se koristi za lemljenje, a paladij se upotrebljava za kondenzatore. Zlato, srebro i paladij mogu se reciklirati uz visoku razinu učinkovitosti. Masene koncentracije plemenitih metala koje se nalaze u prijenosnom računalu prikazani su u Tablici 16 [28].

Tablica 16: Masena koncentracija plemenitih metala u tiskanima pločicama prijenosnog računala (34)

<b>Dijelovi</b>	<b>Masa dijela po jedinici [g]</b>	<b>Ag [mg/kg]</b>	<b>Au [mg/kg]</b>	<b>Pd [mg/kg]</b>
Matična ploča	310	800	180	80
Memorijske kartice	20	1650	750	180
Male tiskane pločice	28	800	180	80
Tiskana pločica tvrdog diska	12	2600	400	280

Tiskana pločica optičkog uređaja	25	2200	200	70
Tiskana pločica zaslona	37	1300	490	99

Osim tiskanih pločica, ploče tvrdog diska također sadrže određenu količinu plemenitih metala, koje se uglavnom nalaze na površini medija za pohranu. Prijenosna računala obično koriste tvrde diskove formata 2,5 inča. Međutim, neki noviji uređaji opremljeni su poluvodičkim memorijama, tzv. SSD memoriju (engl. solid state drive) čija je prednost to što su manje osjetljivi, za svoj rad koriste manje električne energije, što ima prednosti u smislu produljenja trajanja baterije. Ploče pogona klasičnog tvrdog diska općenito se mogu podijeliti na staklene ili aluminijske u smislu materijala podloge. Ploče na bazi aluminijske obično se koriste u tvrdim diskovima formata 3,5 inča, a pogoni tvrdog diska veličine 2,5 inča primarno su opremljeni s dvije ili tri ploče na bazi stakla. Pojedinačna staklena ploča formata 2,5 inča teži oko 4,8 g (21). Masena koncentracija plemenitih metala koje se nalaze u tvrdim diskovima prikazane su u Tablici 17.

Tablica 17: Masena koncentracija plemenitih metala u tvrdim diskovima prijenosnog računala(21)

<b>Materijal ploče tvrdog diska</b>	<b>Ag [mg/kg]</b>	<b>Au [mg/kg]</b>	<b>Pt [mg/kg]</b>	<b>Pd [mg/kg]</b>	<b>Rh [mg/kg]</b>	<b>Ru [mg/kg]</b>
Aluminij	850	21	0	14	0	<7
Staklo	<3	<6	38	<2,3	<3	<6

Indij je prisutan u LCD zaslonima u obliku indij kositar oksida (ITO). Pretpostavlja se da je sadržaj indija u iznosu od 700 mg/m<sup>2</sup> površine LCD zaslona. Ukupni sadržaj indija površine zaslona od 552 cm<sup>2</sup>, odnosno 14-inčni LCD zaslon, iznosi oko 39 mg.

Rijetki se zemni metali u prijenosnim računalima koriste za potrebe trajnih magneta i zaslona. Trajni magneti temeljeni na rijetkim zemnim metalima, odnosno neodimijski magneti (NdFeB) željeza i bora koriste se u prijenosnim računalima kao komponenta u tvrdom disku, optičkom pogonu i zvučnicima. Prosječne mase rijetkih zemnih metala koje se nalaze u jednom prijenosnom računalu u trajnim magnetima su neodimij (Nd) – 2.136 mg, praseodimij (Pr) – 274 mg i disprozij (Dy) – 60 mg (21).

Kobalt se u prijenosnim računalima prvenstveno koristi za potrebu baterija, koje su uglavnom litij-ionske baterijske ćelije. Pozitivna elektroda u litij-ionskim ćelijama u prijenosnim računalima se u većini slučajeva sastoji od litijev kobaltnog oksida ( $\text{LiCoO}_2$ ). Litij-ionske baterije malih i srednjih veličina imaju prosječni maseni udio kobalta u iznosu od 13,8% od ukupne težine baterije (21).

Specifične tehnologije koje se koriste za obradu otpadnih prijenosnih računala, kao i redoslijed kojim se tehnologije koriste, mogu se razlikovati od obrađivača do obrađivača. Iz otpadnih prijenosnih računala uglavnom se ručno odvajaju baterije i jedinice zaslona od ostatka uređaja. Zatim se odvija ručno razvrstavanje elemenata poput tiskanih ploča, tvrdih diskova, DVD pogona i drugih i/ili mehaničko usitnjavanje za što se koristi drobilica. Nakon toga slijedi daljnje odvajanje i kondicioniranje ostalih frakcija koje se prosljeđuju na finalnu obradu. Jedinica zaslona obično se dalje rastavlja u frakcije željeza, frakcije plastike, frakcije LCD panela i tiskanih ploča (34).

### 3.6.2. Pametni telefoni

Pametni telefon elektronički je uređaj koji se koristi za komunikaciju velikog dometa preko mobilne mreže specijaliziranih baznih stanica. Također, pametni telefon mora imati funkcionalnost sličnu bežičnom prijenosnom računalu, koja se prvenstveno koristi uz pomoć baterije i ima sučelje sa zaslonom osjetljivim na dodir. Spajanje na električnu mrežu putem vanjskog izvora napajanja smatra se uglavnom u svrhu punjenja baterije, a virtualna tipkovnica na zaslonu ili digitalna olovka se koriste umjesto fizičke tipkovnice (39). Na svijetu postoji ukupno 6,841 milijardi korisnika pametnih telefona, odnosno čak 85,94% populacije koristi pametan telefon (40).

Sastavljanje preciznog popisa materijala sadržanih u pametnom telefonu teško je zbog neomogućenog pristupa strogo zaštićenim podacima od raznih proizvođača i različitih varijacija modela i proizvođača. Prosječna veličina zaslona pametnog telefona iznosi oko  $75,53 \text{ cm}^2$ , a masa je oko 160 grama, uključujući 39 g baterije, isključujući dodatke i pakiranje (39).

Masa pametnog telefona općenito se sastoji od metala, uglavnom aluminijska, bakra i legura željeza/čelika, ali također i manjih količina drugih elemenata koji se koriste za specifične primjene zbog svojih svojstava, uključujući rijetke zemne elemente i minerale, stakla, keramike, plastike i drugih materijala. Zaslone se uglavnom proizvode od aluminosilikatnog stakla, mješavine aluminijskog oksida i silicijevog dioksida. Zaslon sadrži tanak, proziran, vodljiv sloj indij-kositrenog oksida koji se nanese na staklo kako bi ono funkcioniralo kao zaslon osjetljiv na dodir. Nekoliko rijetkih zemnih elemenata prisutno je u vrlo malim količinama u svrhu prikazivanja boja na zaslonu. Baterija je obično smještena u aluminijsko kućište, a većina pametnih telefona koristi litij-ionske baterije, koje obično koriste litij kobalt oksid kao pozitivnu elektrodu u bateriji, dok se negativna elektroda sastoji od ugljika u obliku grafita. Baterije također imaju i organsko otapalo koje djeluje kao elektrolitička tekućina (39).

Glavni procesor telefona napravljen je od silicija, a u sebi može sadržavati fosfor, antimon, arsen, bor, indij ili galij. Električne komponente i ožičenje u telefonu sastoji se uglavnom od bakra, zlata i srebra. Tantal se koristi kao glavna komponenta mikrokonkondenzatora. Za međusobno spajanje električnih komponenti za lemljenje koristi se kositar i olovo, ali posljednjih godina razvijene su alternative bez olova, od kojih mnoge koriste kombinaciju kositra, srebra i bakra. Mikrofon i zvučnik telefona sadrže magnete, koji su obično legure neodima, željeza i bora, iako su disprozij i prazeodimij također često prisutni u leguri, a oni se također nalaze u jedinici za vibraciju telefona (39).

Kućišta pametnih telefona može biti izrađeno od metala ili plastike, a može biti i njihova mješavina. Metalna kućišta mogu biti izrađena od legura magnezija, dok su plastična kućišta na bazi ugljika. Kućište često može sadržavati spojeve koji usporavaju plamen. Trenutni trend u dizajnu kućišta pametnih telefona usmjeren je prema korištenju visokokvalitetnih materijala kao što su aluminij, nehrđajući čelik ili čak titan umjesto uobičajeno korištene plastike, a također se sve više koriste specijalna keramika i kaljeno staklo (39). Popis najčešćih materijala koji se koriste u pametnim telefonima navedeni su u Tablici 18.

Tablica 18: Popis materijala pametnih telefona (39)

Materijal	Upotreba	Mase po pametnom telefonu (g)
Aluminij (Al)	Kućište	22,18
Bakar (Cu)	Žice, legure, tiskane pločice, zvučnici, modul za vibraciju, elektromagnetska zaštita	15,12
Plastika	Kućište	9,53
Magnezij (Mg)	Kućište	5,54
Kobalt (Co)	Litij-ionske baterije	5,38
Kositar (Sn)	Lem	1,21
Željezo (Fe)	Kućište	0,88
Volfram (W)	Modul za vibraciju	0,44
Srebro (Ag)	Lem, tiskane pločice	0,31
Zlato (Au)	Tiskane pločice	0,03
Neodimij (Nd)	Magneti zvučnika	0,05
Praseodimij (Pr)	Magneti zvučnika	0,01
Tantal (Ta)	Kondenzatori	0,02
Indij (In)	Zaslon	0,01
Paladij (Pd)	Tiskane pločice	0,01
Galij (Ga)	LED zaslon	0,0004
Gadolinij (Gd)	LED zaslon	0,0002
Europij (Eu)	LED zaslon	0,0001
Cerij (Ce)	LED zaslon	0,00003
Ostalo	Staklo, keramika, poluvodiči	99,29

Za većinu proizvođača upotreba sekundarnih materijala uglavnom je ograničena na plastiku. Samsung koristi recikliranu plastiku za putne adaptere, za potrebu futrola za slušalice i za pakiranje proizvoda (39). Kako bi odredili prioritet kojim se materijalima trebaju posvetiti, Apple je stvorio studiju utjecaja materijala za 45 elemenata i sirovina, koja kombinira čimbenike rizika za okoliš, društvo i opskrbu duž lanca vrijednosti. Aluminij, kositar i kobalt identificirani su kao prioritetni materijali za koje trebaju izvor i iz sekundarnih izvora materijala. Što se tiče aluminija, Apple tvrdi da se tražena razina kvalitete u njihovim proizvodima može postići samo uz čiste tokove materijala te iz tog razloga ne koriste reciklirani aluminij za svoje proizvode. Ta je tvrtka također izvijestila da koristi 100% reciklirani kositar za lemljenje matične ploče. Također,

objavili su svoj cilj stvaranja opskrbnog lanca zatvorene petlje, kojom bi svoje proizvode izrađivali samo od recikliranih ili obnovljivih materijala (41).

Nakon njihovog korisnog vijeka, pametne telefone je potrebno zbrinuti kako bi se uklonio i pravilno tretirao svaki izvor opasnosti koji bi mogli prouzrokovati nepravilnim gospodarenjem te kako bi se recikliranjem povratila vrijednost ugrađenih sirovina u komponente i/ili materijale. Proces recikliranja može se podijeliti u dvije glavne faze, a to su predobrada koja obuhvaća sve korake potrebne za odvajanje, razvrstavanje dijelova i materijala za sigurno odlaganje i postupke uporabe te druge faze, odnosno završnu obradu koja obuhvaća sve korake potrebne za uporabu sekundarnih materijala iz obrade otpadaka (39).

Predobrada uključuje uklanjanje mogućih onečišćenja, odnosno razvrstavanje baterija, tiskanih pločica i vanjskih električnih kablova, to jest punjača. Nakon toga slijedi daljnja demontaža uređaja mehaničkim procesima kao što je usitnjavanje, ručnim radom, odnosno demontažom ili kombinacijom obje. Mješoviti se otpad koji nastane zatim razvrstava u frakcije izlaznog materijala, na primjer čelični otpad, aluminijski otpad, bakreni otpad, tiskane ploče, plastika, koji se ili prosljeđuju jedinicama za krajnju obradu ili specijaliziranim tvrtkama koje provode specifičnije sortiranje. Mehanički koraci predobrade mogu dovesti do gubitaka metala koji se ne mogu savršeno odvojiti ili gubitka zbog usitnjavanja metala u presitne frakcije. Zbog toga se nakon vađenja baterija, mobilni telefoni i slični uređaji često isporučuju izravno u jedinice za krajnju obradu specijalizirane za obnavljanje bakra i drugih plemenitih metala (39).

Završna obrada se uglavnom temelji na piro-metalurškim metodama, u osnovi temeljenim na taljenju. S druge strane, praksa stavljanja pametnih telefona izravno u talionice bakra dovodi do gubitaka aluminijske i željezne jer ti metali prelaze u trosku. Plastika se može spaljivati u svrhu pogona takvih talionica. Dostupni su i namjenski procesi taljenja za recikliranje baterija i uporabu kobalta koji se može koristiti za nove punjive baterije. Litij-ionske baterije ne mogu se odlagati jer izlučuju otrovne i eksplozivne tvari. Međutim, recikliranje litij-ionskih baterija tehnološki je izazovno jer sadrže veliki broj miješanih materijala, što recikliranje čini složenijim nego kod jednostavnijih tehnologija poput olovne kiseline. Niz kemijskih sastava za elektrode dodaje komplikaciju, posebno zato što nisu označeni podaci o sastavu u svrhu recikliranja. Recikliranje otpadnih litij-ionskih baterija općenito je usmjereno na dobivanje kobalta, nikla i bakra zbog njihove ekonomske vrijednosti(39).

#### 4. Produžena odgovornost proizvođača

Produžena odgovornost proizvođača (POP) (engl. extended producer responsibility) politika je zaštite okoliša prema kojoj su proizvođači odgovorni za cijeli životni ciklus proizvoda koje stavljaju na tržište. Proizvođači proizvoda prema toj su politici financijski i fizički odgovorni od perioda dizajna pa sve do kraja životnog vijeka, što uključuje prikupljanje otpada i njegovu obradu, odnosno recikliranje i upravljanje materijalima. Cilj je produžene odgovornosti proizvođača smanjiti negativan utjecaj proizvoda na okoliš tijekom cijelog njegovog životnog ciklusa (42).

„Proces prenošenja i ugrađivanja politike i pravne stečevine EU o gospodarenju otpadom u ustavno-pravni sustav Republike Hrvatske, provoditi tako da se izborom i primjenom načina, sustava i tehnologija gospodarenja otpadom, tamo gdje je to moguće, odabere ono što je dokazano, a odgovara okolišu, kulturnim i gospodarskom naslijeđu i mogućnostima Republike Hrvatske“ (43).

POP je uveden u sustav gospodarenja otpadom kako bi se omogućila uspostava sustava gospodarenja određenom posebnom kategorijom. Načelo „onečišćivač plaća“ implementirano je u produženu odgovornost proizvođača. Osnovni cilj POP-a aktivno je uključiti proizvođača u cjeloživotni ciklus proizvoda koji stavlja na tržište i proizvodi otpad. Kroz POP uključeni su i proizvođači proizvoda jer je trošak koji nastaje pri zbrinjavanju otpada iz proizvoda koji su kupili, koristili i odbacili moraju platiti u cijeni proizvoda. U načelu troškovi u sustavu POP uključuju realne troškove kao što su troškovi sustava sakupljanja, transporta, obrade otpada, uključujući troškove podizanja svijesti. Međutim, do sada se pri izračunu ovih troškova fokus stavlja na gospodarenje otpadom, dok su se ostali elementi sustava, koji se baziraju na prevenciji, produženom životnom vijeku proizvodu, recikličnosti i drugim faktorima koji utječu na proizvod, njegovo korištenje, okoliš te socijalna komponenta, nisu uzimali u obzir (44).

Neke vrste otpada sadrže dovoljno vrijednih sirovina te se troškovi sakupljanja, recikliranja, zbrinjavanja ostatka pokrivaju iz sirovine koja se nalazi unutar otpada. Međutim, neke vrste otpada za koje postoji obveza POP, odnosno recikliranja ne mogu pokriti svoje troškove.



#### 4.1. Produžena odgovornost proizvođača u različitim državama svijeta

Produžena je odgovornost proizvođača u različitim zemljama svijeta drugačije definirana i opisana zakonima. U nastavku je uspoređena ova politika u pet zemalja kako bi se uočila razlika u pristupu i načinu upravljanja električnim i elektroničkim otpadom.

Južna Koreja jedna je od prvih zemalja koja je razvila pravni okvir koji potiče proizvođače na recikliranje i obradu elektroničkog i električnog otpada. Tijekom posljednjih 20 godina, odgovornost proizvođača ove vrste otpada postala je obavezna zbog uvedenih novčanih kazni i obvezujućih ciljeva recikliranja. Također, broj grupa električnog i elektroničkog otpada u ovoj je zemlji porastao sa četiri na deset. S ciljem uspješnije realizacije produžene odgovornosti proizvođača, isti su počeli proizvoditi proizvode koji su osmišljeni i dizajnirani s ciljem što efikasnije i isplativije reciklaže. Na taj se način omogućuje da se proizvodi odlažu i obrađuju na ekološki prihvatljiv način te što dulji životni vijek elektroničkih i električnih uređaja(45).

Indija je jedna od zemalja u kojima je sustav produžene odgovornosti proizvođača integriran u mali broj organizacija zbog nejasnoća koje se nalaze u zakonodavstvu, a vezane su za sektor gospodarenja otpadom. Unutar većih korporacija u Indiji, produžena odgovornost proizvođača, ali i cjelokupni proces gospodarenja otpadom, razvijeni su povećanjem pristupa informacijama koje su povezale različite nepovezane dionike kroz cijeli proces proizvodnje, stavljanja proizvoda na tržište te obrade i recikliranja istog. Zbog takvog efikasnog načina gospodarenja električnim i elektroničkim proizvodima, smanjeni su troškovi recikliranja, povećana je jasnoća zakonodavstva, pojačan je nadzor i poboljšana provedba zakona poboljšanjem tehnologije. Time su stvoreni temelji za veća ulaganja u kružno gospodarenje otpadom. U Indiji postoji nekoliko online alata, aplikacija i trgovina koji pomažu sakupljačima otpada sakupiti otpad, razvrstati ga, procijeniti mu kvalitetu i proslijediti ga na mjesta za recikliranje. Na taj se način optimizira cijeli proces obrade električnog i elektroničkog otpada te se prate proizvedene i reciklirane količine istog (46).

Pomoću novog sustava povratnih sredstava u Kini, nastoji se potaknuti proizvođače električnog i elektroničkog otpada na veća ulaganja u gospodarenje proizvodima nakon što se više ne koriste za svoju primarnu svrhu. Korištenjem novog sustava nastoji se povećati količina električnog i

elektroničkog otpada koji se reciklira i ublažiti financijski pritisak na Vladu u tom sektoru. U odnosu na sustav koji se trenutno koristi, novi sustav koji se uvodi trebao bi navesti proizvođače na povećanje napora u svrhu recikliranja električnog i elektroničkog otpada zbog isplativosti financijske isplativosti. Od 2012. godine, na području Kine koristi se sustav u kojem se prikupljena sredstva od proizvođača koriste za subvencioniranje službenih tvrtki za demontažu i recikliranje. Zbog velikih gubitaka koji je taj sustav donio, novi sustav uključuje dodatak plaćanja od strane potrošača(44,47).

Kod provođenja politike produžene odgovornosti proizvođača u Čileu potrebno je provesti zakone u područjima obuke, organizacije, infrastrukture i ekonomije. Ova država unutar pravnih okvira zaštite okoliša još uvijek nema razvijene alternative za gospodarenje električnim i elektroničkim otpadom koji sadrži opasne tvari. Općine na području Čilea počele su s ulaganjem u proces otvaranja skladišta za privremeno odlaganje ove vrste otpada. Obveze koje je preuzela čileanska Vlada podrazumijevaju pružanje boljih uvjeta sakupljanja, skladištenja i obrade električnih i elektroničkih proizvoda nakon što se isti prestanu koristiti(48).

Proizvođači u Italiji obvezni su prema zakonu biti ugovorno povezani s proizvođačima u istom sektoru te imati neprofitnu organizaciju koja se bavi gospodarenjem električnim i elektroničkim otpadom. U ovoj je državi postignuta stopa prikupljanja ove vrste otpada od četiri kilograma po stanovniku godišnje. Tehnički i ekonomski učinak prikupljanja i obrade otpada ovisi o proizvođačima, mogućnostima skladištenja, trgovcima, općinama, logističkim operaterima, postrojenjima za obradu, potrošačima te složenom lancu njihove razmjene i komunikacije, od faze proizvodnje do prodaje električnih i elektroničkih proizvoda te upravljanja otpadom koji nastaje od istih(49).

## 4.2. Kriterij za procjenu ekomodulacije proizvoda

### 4.2.1. Ekomodulacija

Ekomodulacija za POP sustav je koncept koji pri izračunu troškova razlikuje izvjesne kriterije koji potiču proizvođača u prilagodbi i promjeni dizajna proizvoda u smjeru njegove veće okolišne održivosti, produžavanju životnog vijeka proizvoda i smanjenju njegovog utjecaja na okoliš. Cilj ekomodulacije je da potiče proizvođača proizvoda na usmjeravanje svoje proizvodnje u pravcu poticanja kružnog gospodarstva i smanjenja nastanka otpada(50). Ekomodulacija podrazumijeva različitu visinu naknade utvrđenu prema određenim kriterijima. Dodatno, cilj ekomodulacije je da, osim proizvođača, potiče i korisnika proizvoda da mijenja svoje ponašanje u pravcu održivosti. Trenutno na razini EU nije unificiran sustav određivanja i provođenja ekomodulacije, već je ostavljeno zemljama članicama da same definiraju svoje sustave sa ciljem ispunjenja ciljeva.

Dosadašnja ekomodulacija bazirala se isključivo na masi proizvoda, što je bio jedini kriterij za određivanje visine naknade koju proizvođač mora platiti. Napredna ekomodulacija, koristi i kriterije koji osim mase određenog proizvoda uključuje i niz drugih faktora, što čini sustav POP kompleksnijim i zahtjevnijim.(51)

U sklopu napredne ekomodulacije uzimaju se prednosti i nedostaci proizvoda s aspekta njegovog cjeloživotnog vijeka. Obzirom na navedeno, ekomodulirana naknada gospodarenja otpadom za određeni proizvod mora uzeti u obzir više elemenata koji se u osnovi sastoje od podkategorija i biti dostatna da pokrije troškove sustava gospodarenja posebnom kategorijom i to:

1. Fiksni trošak koji uključuje sakupljanje, transport, recikliranje, zbrinjavanje te troškove infrastrukture, uključujući i prihod od prodaje sirovine. Ovo je stimulatívni/kazneni trošak koji može biti usmjeren na proizvođača proizvoda - koji uključuje napor proizvođača koji je uložio u svoj proizvod kako bi mu produžio životni vijek, olakšao recikliranje, implementirao u svoj sustav elemente kružnog gospodarstva, smanjio štetan utjecaj na okoliš. Ovaj trošak smanjuje se kako se povećava broj navedenih elemenata, odnosno ovisi o razini primjene hijerarhije gospodarenja otpadom u proizvodu.

2. Ostali trošak, odnosno naknadu za rad organizacije, trošak podizanja svijesti, izvješćivanje i administrativni trošak.
3. Dodatan izazov je postavljen kroz odredbu da je pri izračunu troška nužno je voditi računa da visina troška bude socijalno prihvatljiva.
4. Prema članku 8a(4)(c) Direktive, troškovi koji se naplaćuju proizvođaču moraju biti takvi da ne pređu iznos troška koji je neophodan da osigura uslugu gospodarenja otpadom u troškovno učinkovit način. Pri uspostavi sustava eko modulacije, potrebno je voditi računada financijski doprinos koji plaća proizvođač za proizvod koji stavlja na tržište mora biti dostatan za obveze iz članka 8a(4)(c) Direktive, ali da ne pređe troškove koji su neophodni.
5. Prema Zakonu o gospodarenju otpadom u članku 105. stavak 3, navodi se način izračuna iznosa naknade gospodarenja otpadom koja se određuje za vrstu proizvoda (ili skupinu sličnih proizvoda) uzimajući u obzir:
  - a. trajnost proizvoda
  - b. mogućnosti popravka proizvoda
  - c. mogućnost ponovne uporabe proizvoda
  - d. mogućnost recikliranja otpada od proizvoda
  - e. prisustva opasnih tvari u proizvodu
  - f. životni ciklus proizvoda
  - g. mjerodavne propise Europske unije i usklađene kriterije, kako bi se osiguralo neometano funkcioniranje unutarnjeg tržišta
  - h. da troškovi ne budu veći od neophodnih za troškovno učinkovite usluge gospodarenje otpadom
  - i. da se troškovi uspostavljaju na transparentan način među dionicima koji imaju pravni interes.

#### 4.2.2. Kriterij za ekomodulaciju

Kako bi se pojedinom proizvodu odredila razina ekomodulacije nužno je znati osnovne podatke o proizvodu. Osnovni kriterij ekomodulacije jest recikličnost pojedinog proizvoda, ali za određivanje ekomodulacije potrebno je uzeti u obzir i ostale elemente i karakteristike proizvoda.

#### a) Recikličnost proizvoda

- Količina komponenti iz kojih je proizvod sastavljen – ovaj faktor može značajno utjecati na recikličnost proizvoda koji je postao otpad. Veći broj komponenti implicira i više različitih materijala što u konačnici otežava recikliranje ako su materijali različitog sastava. Nadalje, ručna rastavlјivost dijelova može olakšati recikliranje i povećati vrijednost proizvoda. Npr. ukoliko je baterija koja se nalazi u električnom i elektroničkom otpadu lako uklonjiva, tada u procesu recikliranja neće onečistiti druge frakcije, plastika koja sadrži antiretardante, također može onečistiti druge vrste plastike i smanjiti vrijednost recikliranog materijala, stoga je nužno da se ova vrsta plastike može lako ukloniti. Otpadni toneri, ukoliko se ne uklone prije usitnjavanja mogu izazvati eksplozije i požare u procesu recikliranja, stoga je laka rastavlјivost važan parametar za određivanje recikličnosti. Otpadni automobil, prije nego uđe u proces recikliranja mora biti oslobođen od niza dijelova, komponenti i tekućina.
- Vrste materijala od kojih su načinjene komponente proizvoda – neki materijali imaju tržišnu vrijednost nakon recikliranja, neki sa svojom tržišnom vrijednošću pokrivaju troškove recikliranja, dok neki nakon postupka recikliranja imaju negativnu vrijednost na tržištu. Materijal od kojeg je proizvod (otpad) napravljen može sadržavati različite vrste opasnih tvari čime se otežava i poskupljuje recikliranje i/ili onemogućava korištenje tvari/materijala nakon recikliranja.
- Razina tehnologije koja je nužna za oporabu određenog proizvoda – tehnološki postupak recikliranja sastoji se od niza uređaja i opreme. Prvi korak u pravilu je ručno rastavljanje, nakon toga slijedi usitnjavanje te razdvajanje materijala. Proces se vodi do dobivanja sirovine. Čistoća i kvaliteta izlazne frakcije ovisi o razini koncentracije onečišćenja za što je potrebno imati tehnologiju. Duži tehnološki proces (broj tehnoloških operacija) povećava čistoću izlazne frakcije.

#### b) Ostali elementi ekomodulacije

Ostali elementi ekomodulacije sastavni su dio ekodizajna proizvoda. Ovi elementi omogućavaju direktno i indirektno smanjenje utjecaja proizvoda na okoliš kroz slijedeće:

- Udio recikliranih materijala koji se koriste za proizvodnju proizvoda doprinosi očuvanju okoliša i smanjuju ugljični otisak proizvoda.
- Vijek trajanja proizvoda svakako predstavlja jedan od važnih elemenata, naime duži životni vijek proizvoda smanjuje potrošnju sirovina za proizvodnju novog proizvoda te odgađa nastanak otpada.

Cilj je stimulirati/destimulirati proizvođača da koristi ekodizajn što uključuje korištenje recikličnih materijala, lakše rastavljanje, dizajnirani proizvod koji će biti korišten duže od uobičajenog.

#### 4.3. Prijedlog ekomodulacije EE opreme

U Republici Hrvatskoj nužno je u budućnosti uvesti sustav ekomodulacije za EE opremu kako bi se stimuliralo/destimuliralo proizvođače da proizvode proizvode koji imaju što manji ugljični otisak, manje tvari koje otežavaju recikliranje, više tvari koje se mogu reciklirati te proizvode koji imaju duži životni vijek proizvoda. Stoga se u nastavku daje prijedlog definiranja ekomodulacije određenom EE proizvodu. U ovom prijedlogu svaki pojedini kriterij koji se valorizira ocjenjuje se s ocjenom od 1 do 5.

Temeljem prethodno analiziranog sastava pojedine kategorije EE opreme predlaže se da se u sustav ekomodulacije uzmu slijedeći kriteriji koji su usklađeni sa pozitivnim propisima:

Definiranje kriterija:

- a. Trajnost proizvoda - trajnost pojedinog kriterija utvrđuje se sa dužinom garancije za pojedini proizvod. U slučaju kada EE oprema nema garanciju pretpostavlja se da u bilo kojem trenutku EE oprema može postati otpad. Ovi proizvodi dobivaju 0 bodova za kriterij trajnosti. Ocjenjivanje se provodi na slijedeći način:
  - i. Nema garancije 5
  - ii. Garancija do 1 godine 4

- iii. Garancija do 2 godine            3
- iv. Garancija do 3 godine            2
- v. Garancija 4 i više godina        1

b. Mogućnost popravka proizvoda – ovaj kriterij podrazumijeva da je za određeni proizvod osigurano na području Republike Hrvatske popravak i servisiranje od strane ovlaštenog servisa. Ocjenjivanje za ovaj kriterij provodi se na slijedeći način:

- i. Popravak nije moguć            5
- ii. nema servisa                    3
- iii. ima servisa                    1

c. Mogućnost ponovne uporabe proizvoda – ovaj kriterij teško je kategorizirati i definirati, te ga je teško pratiti. Obzirom na to da je ovaj kriterij zakonom definiran nužno ga je uvrstiti u kriterije. Stoga se predlaže da se ovaj kriterij određuje temeljem broja Centara za ponovnu uporabu, a osnova je Evidencija centara za ponovnu uporabu koje vodi županija ili Grad Zagreb. Za svaku godinu potrebno je definirati broj centara za ponovnu uporabu te ovaj je kriterij za sve proizvode jednak na razini Republike Hrvatske. U Republici Hrvatskoj Evidencija centara za ponovnu uporabu još nije zaživjela, stoga je za sve uređaje vrijednost 1.

- i. Nije moguća ponovna uporaba        5
- ii. <10 Centara za ponovnu uporabu    4
- iii. 10-20 Centara za ponovnu uporabu 3
- iv. 20-30 Centara za ponovnu uporabu 2
- v. 30-40 Centara za ponovnu uporabu 1
- vi. >40 Centara za ponovnu uporabu    0

d. Mogućnost recikliranja proizvoda – mogućnost recikliranja proizvoda osigurana je u Republici Hrvatskoj kroz sustav kojim upravlja Fond. Za potrebe ovog kriterija može se uzeti u obzir nekoliko podkriterija.

- i. Broj različitih materijal od kojih se sastoji proizvod može isto tako ocijeniti. Proizvod koji ima manje različitih materijala lakše je recikličan. U obzir se uzimaju materijali koji su sadržani u postotku većem od 1%.

1. 1-3 vrste materijala	1
2. 4-7 vrsta materijala	2
3. 7-10 vrsta materijala	3
4. 10-15 vrsta materijala	4
5. 15 vrsta materijala i više	5

- ii. Općenito postupak recikliranja obuhvaća nekoliko faza te se može podijeliti u nekoliko općih faza. Prva faza je ručno rastavljanje, zatim je usitnjavanje i nakon toga separacija. U slučaju kada je za određeni proizvod potrebna nadogradnja određene faze radi specifičnosti proizvoda, tada se ona dodatno valorizira.

1. Ručna separacija	1
2. Usitnjavanje	1
3. Separacija (jedan korak npr. samo sito ili samo magnet)	1
4. Separacija (2-4 koraka separacije)	2
5. Separacija (2-4 koraka separacije) u posebnim uvjetima	3
6. Separacija (4-6 koraka separacije)	3
7. Separacija (4-6 koraka separacije) u posebnim uvjetima	4
8. Usitnjavanje u posebnim uvjetima	2

- e. Prisutnost opasnih komponenti u proizvodu – u slučaju kada proizvod sadrži jednu ili više opasnih komponenti tada se proizvod boduje na slijedeći način:

i. Nema opasnih komponenti	1
ii. 1 opasna komponenta	3
iii. 2 ili više opasnih komponenti	5



#### 4.4. Primjer izračuna ekomodulacije pojedinih proizvoda

U nastavku je dan primjer za hladnjak, perilicu rublja, fluorescentnu žarulju te LCD zaslon.

Tablica 19: Izračun ekomodulacije pojedinih proizvoda

Kriteriji	EE proizvod				
	Hladnjak (3 godine garancije)	Hladnjak(5 godina garancije)	Perilica rublja (5 godina garancije)	Fluorescentna žarulja (nema garancije)	LCD zaslon (1 godina garancije)
trajnost proizvoda	3	1	1	1	4
mogućnost popravka proizvoda	1	1	1	1	3
mogućnost ponovne uporabe proizvoda	4	4	4	4	5
mogućnost recikliranja proizvoda-broj različitih materijala	3	3	3	3	3
mogućnost recikliranja proizvoda-postupak recikliranja (ukupno)	6	6	4	4	4
Ručna separacija	1	1	1	0	1
Usitnjavanje	1	0	0	1	1
Separacija (jedan korak, npr. samo sito ili samo magnet)	1	0	0	0	0
Separacija (2-4 koraka separacije)	2	0	0	2	2
Separacija (2-4 koraka separacije) posebni uvjeti	3	3	3	0	0
Separacija (4 i više koraka separacije)	3	0	0	0	0
Separacija (4 i više koraka separacije) posebni uvjeti	4	0	0	0	0
Usitnjavanje u posebnim uvjetima	2	2	2	0	0
Prisutnost opasnih komponenti u proizvodu	5	5	0	0	1
<b>Ukupno</b>	<b>22</b>	<b>20</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>20</b>

Temeljem provedenog ocjenjivanja za pojedine kriterije i pojedine proizvode, vidljivo je da će proizvod koji je zahtjevniji za recikliranje, što zbog kompleksnosti, sadržaja različitih materijala, sadržaja opasnih tvari te kraćeg životnog vijeka dobiti veći broj bodova od onih proizvoda koji su lakše reciklični. Na ovaj način, moguće je stimulirati proizvođače da dizajn svojih proizvoda

usmjeravaju kako bi dobili što manje bodova. Posljedično, veći broj bodova uzrokovat će i plaćanje veće naknade proizvođača. Temeljem prikazanog, vidljivo je da ekomodulacija bazirana na recikličnosti može biti pravedan alat za proizvodnju EE proizvoda kako bi se omogućilo lakše i jednostavnije postizanje ciljeva kružnog gospodarstva.

## 5. Zaključak

Električni i elektronički uređaji i oprema obuhvaćaju proizvode i njihove dijelove koji za primarno djelovanje ovise o električnoj energiji ili elektromagnetskom polju. Ova vrsta otpada sadrži vrijedne metalne i nemetalne sirovine koje se koriste u energetske svrhe. Upravljanje električnim i elektroničkim otpadom odnosi se na sakupljanje, prijevoz, zbrinjavanje, uporabu i nadzor ostalih obrada EE otpada.

Postoji šest kategorija otpadne električne i elektroničke opreme, a one su: oprema za izmjenu topline, zasloni i monitori površine veće od 100 cm<sup>2</sup>, žarulje, velika oprema (bilo koja vanjska dimenzija veća od 50 cm), mala oprema (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm), mala oprema informatičke tehnike (IT) i oprema za telekomunikacije (nijedna vanjska dimenzija nije veća od 50 cm).

Kod izrade električnih i elektroničkih uređaja i gospodarenja njima kada postanu otpad veliku ulogu ima produžena odgovornost proizvođača. Ta politika ovisi o zakonima te političkim i ekonomskim stanjem u državi u kojoj se primjenjuje. S obzirom na to, različite zemlje svijeta na drugačiji način definiraju obveze proizvođača električne i elektroničke opreme, no cilj ove politike u svim je zemljama gotovo jednak. Teži se smanjenju negativnog utjecaja otpadne električne i elektroničke opreme na okoliš, efikasnijem i ekonomski isplativijem načinu proizvodnje te uspješnom procesu recikliranja i upravljanja materijalima.

Uvođenjem sustava ekomodulacije temeljem ocjene recikličnosti EE proizvoda moguće je stimulirati proizvođače da dizajn svojih proizvoda usmjeravaju kako bi dobili što manje bodova u sustavu ocjenjivanja. Posljedično, veći broj bodova uzrokovat će i plaćanje veće naknade proizvođača. Vidljivo je da ekomodulacija bazirana na recikličnosti može biti pravedan alat za proizvodnju EE proizvoda kako bi se omogućilo lakše i jednostavnije postizanje ciljeva kružnog gospodarstva u sklopu produžene odgovornosti proizvođača.

## 6. Popis literature

1. Ministarstvo zaštite okoliša i prirode. Pravilnik o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom (NN 42/2014). Narodne novine. 2014;
2. Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost. Električni i elektronički otpad. Dostupno na: <https://www.fzoeu.hr/hr/elektricni-i-elektronicki-otpad/7747>
3. Europski Parlament. E-otpad u EU-u: činjenice i brojke (infografika). 2022. Dostupno na: <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/headlines/society/20201208STO93325/e-otpad-u-eu-u-cinjenice-i-brojke-infografika>
4. Europski revizorski sud. Mjere EU-a i postojeći izazovi u području elektroničkog otpada. Europski revizorski sud; 2021. p. 1–51.
5. Eurostat. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) by waste management operations - open scope, 6 product categories (from 2018 onwards). 2022. Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tepsr\\_wc170/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tepsr_wc170/default/table?lang=en)
6. Eurostat. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) by waste management operations. 2022. Dostupno na: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tepsr\\_wc170/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tepsr_wc170/default/table?lang=en)
7. Antoine Pinasseau, Zerger B, Roth J, Canova M, Roudier S. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste treatment Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). EUR 29362. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2018. 1–851 p.
8. Ministarstvo zaštite okoliša i energetike. Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o gospodarenju otpadnom električnom i elektroničkom opremom (NN 11/2019). Narodne novine 2019.
9. APO d.o.o. usluge zaštite okoliša. Kod dobra prakse pri radu s tvarima koje oštećuju ozonski omotač. Ministarstvo zaštite okoliša, prostornog uređenja i graditeljstva; 1–60 p.
10. Andrassy M, Balen I, Boras I, Dović D, Hrs Borković Ž, Lenić K, et al. Priručnik za energetska certificiranje zgrada. Pavković B, Zanki V, editors. Program Ujedinjenih naroda za razvoj - UNDP; 2010. 1–883 p.
11. Vlada Republike Hrvatske. Uredba o tvarima koje oštećuju ozonski sloj i fluoriranim stakleničkim plinovima (NN 83/2021). 2021.

12. Estrada-Flores S. Transportation of frozen foods. In: Handbook of Frozen Food Processing and Packaging. CRC Press; 2005. p. 227–42.
13. La Marca F. Control and characterization of materials recovered from mechanical recycling of waste refrigerators. *Adv Mat Res.* 2012;508:207–11.
14. Heubes J. Management and Destruction of Existing Ozone Depleting Substances Banks. *Guideline on the Manual Dismantling of Refrigerators and Air Conditioners.* 2017;103.
15. González Chávez CA, Despeisse M, Johansson B, Romero D. Finding and Capturing Value in e-Waste for Refrigerators Manufacturers and Recyclers. *IFIP Adv Inf Commun Technol.* 2020;591 IFIP(August):505–12.
16. Peagam R. Fridge recycling standards - Report on comparative UK performance. 2019.
17. Brar JS. Study, Modeling, Analysis, Evaluation, Selection and Performance Improvement of Air-Conditioning System. Patiala: Department of Mechanical Enigneering Thapar University; 2012. p. 1–118.
18. Fenaughty K, Parker D. Evaluation of Air Conditioning Performance Degradation: Opportunities from Diagnostic Methods. In: Florida Solar Energy Center, editor. 2018 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. American Council for an Energy Efficient Economy; 2018. p. 1–16.
19. Klima Koncept. Što je klima uređaj i vrste klima uređaja. Dostupno na: [https://www.klimakoncept.hr/hr/podrska-sto\\_je\\_klima\\_uredaj\\_i\\_vrste\\_klima\\_uredaja-/1171/151](https://www.klimakoncept.hr/hr/podrska-sto_je_klima_uredaj_i_vrste_klima_uredaja-/1171/151)
20. Salhofer S, Spitzbart M, Maurer K. Recycling of LCD screens in Europe - state of the art and challenges. In: 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering. Braunschweig; 2011. p. 1–6.
21. Buchert M, Manhart A, Bleher D, Pingel D. Recycling critical raw materials from waste electronic equipment. Darmstadt; 2012.
22. Bacher J, Punkkinen H, Mroueh UM, Rietveld E. CRM\_InnoNet - Internal report summarising the results of ICT and electronics sector analysis. Espoo; 2013.
23. Bakas I, Herczeg M, Veá EB, Fráne A, Youhanan L, Baxter J, et al. Critical metals in discarded electronics - Mapping recycling potentials from selected waste electronics in the Nordic region Ioannis. Copenhagen: Nordic Council of Ministers; 2016. 56 p.
24. Ciftci M, Cicek B. E-waste: A Review of CRT (Cathode Ray Tube) Recycling. *Research & Reviews: Journal of Material Sciences.* 2017;05(02):1–17.

25. Šušak D. Cirkularna ekonomija u recikliranju LCD-a Jedan. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet; 2017. p. 1–40.
26. Golub I. Analiza mogućnosti kraja životnog vijeka otpadnih fluorescentnih lampi. Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet; 2020. p. 1–69.
27. Bommel W van. Tubular and Compact Fluorescent Lamp. *Encyclopedia of Color Science and Technology*. 2012;1–14.
28. Anić Vučinić A, Črnica N, Filipan V, Kosor K, Tepeša P. Recikliranje rasvjetne opreme. Zagreb: XI Međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom Zagreb; 2010.
29. Tunsu C, Ekberg C, Retegan T. Sustainable processes development for recycling of fluorescent phosphorous powders – rare earths and mercury separation: A literature report. Gothenburg: Department of Chemical and Biological Engineering Industrial Material Recycling and Nuclear Chemistry Chalmers University of Technology; 2011. p. 1–65.
30. Cenci MP, Dal Berto FC, Schneider EL, Veit HM. Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective. *Waste Management*. 2020;107:285–93.
31. Magalini F, Kueher R, Huisman J, Deubzer O, Sinha Khatriwa D. Material Flows of the Home Appliances Industry. Bruxelles: European Committee of Domestic Equipment Manufacturers; 2017. p. 1–106.
32. Alfieri F, Cordella M, Stamminger R, Bues A. Durability assessment of products: analysis and testing of washing machines. EUR 29487 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2018. Dostupno na: <https://ec.europa.eu/jrc>
33. Ardente F, Talens Peiró L. Report on benefits and impacts/costs of options for different potential material efficiency requirements for Dishwashers. JRC Science Hub. Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability Title: 2015. 1–70 p.
34. Chancerel P, Marwede M. Feasibility study for setting-up reference values to support the calculation of recyclability / recoverability rates of electr(on)ic products. EUR 27922. Mathieux F, Peiró LT, editors. JRC Science Hub; 2016. 1–155 p.
35. Oldyrevas E, McAlister C. Long live the machine - How ecodesign & energy labelling can prevent premature obsolescence of laptops. After Jews. Brussels: Environmental Coalition on Standards (ECOS); 2020.
36. Kasulaitis B v., Babbitt CW, Kahhat R, Williams E, Ryen EG. Evolving materials, attributes, and functionality in consumer electronics: Case study of laptop computers. *Resour Conserv Recycl*.2015;100:1–10

37. FEM / IUTA. "Metallurgische Rückgewinnung von Indium, Gallium und Germanium aus Elektronikschrott und Entwicklung entsprechender Aufarbeitungsmethoden für die Verwertungsindustrie - Abschlussbericht IGF 16040 N. 2011. p. 1–155.
38. Oguchi M, Murakami S, Sakanakura H, Kida A, Kameya T. A preliminary categorization of end-of-life electrical and electronic equipment as secondary metal resources. *Waste Management*. 2011;31(9–10):2150–60.
39. Cordella M, Alfieri F, Sanfelix J. Guidance for the Assessment of Material Efficiency: Application to Smartphones. EUR 30068. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2020.
40. Ericsson. Ericsson Mobility Report. Ericsson. Stockholm: Ericsson; 2022. p. 1–40.
41. Apple. Environmental Responsibility Report 2018 Progress Report. Covering Fiscal Year 2017; 2019. p. 1–183.
42. EPR info. Extended Producer Responsibility (EPR). Dostupno na: <https://epr-info.com/>
43. Hrvatski sabor. Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske (NN 130/2005). *Narodne novine*; 2005.
44. Gu Y, Wu Y, Xu M, Wang H, Zuo T. To realize better extended producer responsibility: Redesign of WEEE fund mode in China. *J Clean Prod*. 2017;164:347–56.
45. Manomaivibool P, Hong JH. Two decades, three WEEE systems: How far did EPR evolve in Korea's resource circulation policy? *Resour Conserv Recycl*. 2014;83:202–12.
46. Bhadra U, Mishra PP. Extended Producer Responsibility in India: Evidence from Recykal, Hyderabad. *Journal of Urban Management*. 2021;10(4):430–9.
47. Zhao X, Bai X. How to motivate the producers' green innovation in WEEE recycling in China? – An analysis based on evolutionary game theory. *Waste Management*. 2021;122:26–35.
48. Silva U, Baigorrotegui G. The Chilean regulation of waste electrical and electronic equipment (WEEE): Some of the challenges and opportunities to incorporate informal E-waste recyclers. *Handbook of Electronic Waste Management: International Best Practices and Case Studies*. INC; 2019. 517–531 p.
49. Favot M, Veit R, Massarutto A. The evolution of the Italian EPR system for the management of household Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Technical and economic performance in the spotlight. *Waste Management*. 2016;56(2016):431–7.

50. Sachdeva A, Araujo A, Hirschnitz-Garbers M. Extended Producer Responsibility and Ecomodulation of Fees. 2021;(July).
51. Laubinger F, Brown A, Dubois M, Börkey P. Modulated fees for extended producer responsibility schemes. Organisation for Economic Co-operation and Development; 2021. p. 1–42.



## 7. Popis slika

Slika 1:Prikupljene količine EE otpada u Hrvatskoj (6).....	3
Slika 2: Proces recikliranja hladnjaka .....	8
Slika 3: Glavni dijelovi prijenosnog računala.....	24

## 8. Popis tablica

Tablica 1: Proizvodnja, prikupljanje i recikliranje električnog i elektroničkog otpada u svijetu u 2019.godini (4).....	2
Tablica 2: Prosječni materijalni sastav 1000 hladnjaka u Europi isporučenih postrojenju za obradu OEEO (14).....	7
Tablica 3: Prosječni materijalni sastav klima uređaja (14).....	9
Tablica 4: Tehnologije zaslona i područja primjene (20).....	11
Tablica 5: Prosječno životni vijek zaslona i standardna devijacija u godinama.....	11
Tablica 6: Sadržaj indija u LCD zaslonima (21).....	12
Tablica 7: Prosječni sadržaj rijetkih metala po LCD televizoru, PC monitoru i monitoru prijenosnog računala (22).....	13
Tablica 8: Maseni udio kritičnih vrijednih sirovina u ravnim zaslonima televizora/monitora (23).....	13
Tablica 9: Udio oksida rijetkih zemnih metala u trikromatskom fosforu (29).....	17
Tablica 10: Masa rijetkih zemnih metali za proizvodnju bijele LED diode (21).....	18
Tablica 11: Koncentracija materijala po komponentama LED žarulje (30,31).....	19
Tablica 12: Prosječni materijalni sastav pojedinih velikih kućanskih uređaja (31).....	20
Tablica 13: Popis materijala i prosječne stope recikliranja i uporabe perilica rublja (34).....	21
Tablica 14: Prosječni materijalni sastav pojedinih malih kućanskih uređaja (31).....	22
Tablica 15: Težinski udio materijala u prijenosnim računalima (34).....	24
Tablica 16: Masena koncentracija plemenitih metala u tiskanim pločicama prijenosnog računala (34).....	25
Tablica 17: Masena koncentracija plemenitih metala u tvrdim diskovima prijenosnog računala (21).....	26
Tablica 18: Popis materijala pametnih telefona (39).....	29
Tablica 19: Izračun ekomodulacije pojedinih proizvoda.....	40

## 9. Popis i objašnjenje kratica korištenih u radu

ABS	akrilonitril butadien stiren
CCFL	engl. Cold Cathode Fluorescent Lamps, cijev s hladnom katodom
CeMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub>	cerij
CFC	klorofluorougjik
CFL	engl. Compact Fluorescent Lamp, kompaktna fluorescentna žarulja
CRI	engl. Color rendering index, indeks ocjenjivanja boja
CRT	engl. cathode ray tube, katodna cijev
Dy	disprozij
EE oprema	električni i elektronički uređaji i oprema
EE otpad	električni i elektronički otpad
FL	engl. Fluorescent Lighting, Fluorescentnost ili fluorescentni izvor svjetlosti
GaN	galijev nitrid
HCFC	halogenirani kloroflorougjikovodik
HFC	fluorirani ugljikovodik
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	indij (III) oksid
InGaN	indij galijev nitrid
IT	informatička tehnika
ITO	indij kositrov oksid
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	lantani

LFL	engl. Linear Fluorescent Lamp, linearna fluorescentna žarulja
LiCO <sub>2</sub>	litijev kobaltni oksid
Nd	neodimij
NdFeB	neodimijski magnet
OEEO	otpadna električna i elektronička oprema
PBB	polibromirani bifenil
PBDE	polibromirani difenil ester
POP	produžena odgovornost proizvođača
PP	polipropilen
Pr	praseodimij
PS	polistiren
PUR	poliuretanska pjena
PVC	polivinil klorid
SnO	kositar (IV) oksid
SSD	engl. solid state drive
UNEP	Ujedinjeni narodi za okoliš
WEEE	engl. Waste Electrical and Electronic Equipment
XRF	engl. X-ray fluorescence, fluorescentna spektroskopija
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	itrij