

# Prikupljanje i recikliranje otpadnog ambalažnog stakla

---

**Klasić, Patrik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:930557>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Patrik Klasić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Irena Žmak

Student:

Patrik Klasić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Ireni Žmak na izrazitoj pristupačnosti, susretljivosti i pomoći prilikom izrade ovog rada.

Zahvaljujem svom savjetniku u Vetropacku Zvonimiru Tepešu, mag. ing. mech. i svim djelatnicima Vetropacka koji su mi pomogli u prikupljanju podataka i osigurali usvajanje praktičnog znanja.

Zahvaljujem svim profesorima, asistentima i fakultetskom osoblju koji su mi kroz ovo putovanje na bilo koji način pomogli u stvaranju mojeg inženjerskog promišljanja.

Posebice zahvaljujem najboljem prijatelju Karlu Klasiću koji mi je bio desna ruka i najveća podrška u mojem studiranju.

Naposljetku, zahvaljujem se majci Dubravki, tati Mariu, sestri Moniki, bratu Ivanu, teti Suzani, baki Ani, djedu Petru te preostaloj obitelji i prijateljima na bezuvjetnoj podršci.

Patrik Klasić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Patrik Klasić** JMBAG: **0035215132**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Prikupljanje i recikliranje otpadnog ambalažnog stakla**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Domestic waste glass collection and recycling**

Opis zadatka:

Ambalažno staklo koristi se od davnina za dugotrajnu pohranu namirnica zbog svoje iznimne korozijske postojanosti na brojne medije. Razvojem društva dolazi do sve veće potrošnje raznih materijalnih dobara pa tako i stakla.

U okviru ovog završnog rada potrebno je upoznati se s pojmovima održivog razvoja i kružne ekonomije. Na primjeru lokalne zajednice potrebno je proučiti sustav odvojenog prikupljanja otpadnog ambalažnog stakla od građanstva. Osim toga, potrebno je upoznati se s postupcima koji se primjenjuju pri recikliranju otpadnog ambalažnog stakla i proizvodnji staklene ambalaže. Za sustav prikupljanja stakla i za postrojenje za recikliranje stakla potrebno je predložiti moguća poboljšanja.

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

Zadatak zadan:

6. svibnja 2021.

Datum predaje rada:

**2. rok (izvanredni):** 5. srpnja 2021.  
**3. rok:** 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

**2. rok (izvanredni):** 9.7.2021.  
**3. rok:** 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Irena Žmak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Motivacija za „zelenim“ razvojem.....	1
1.2. Staklo – materijal prošlosti, sadašnjosti i budućnosti .....	2
2. PROBLEMATIKA ODRŽIVOG RAZVOJA.....	4
2.1. Definiranje koncepta održivog razvoja .....	4
2.1.1. Tri stupa održivog razvoja .....	4
2.2. Održivi ekonomski razvoj.....	7
2.2.1. Model linearne ekonomije .....	7
2.2.2. Model kružne ekonomije .....	8
2.2.2.1. Model 9R .....	9
2.2.2.2. Ciljevi i smjernice modela kružne ekonomije .....	10
2.2.2.3. Najčešći pojmovi u istraživanjima kružne ekonomije.....	12
2.3. Sastavnice gospodarenja otpadom .....	13
2.3.1. Definicija problematike gospodarenja otpadom .....	13
2.3.2. Hijerarhija gospodarenja otpadom.....	13
2.3.3. Struktura zakonodavstva gospodarenja otpadom.....	16
2.3.4. Gospodarenje otpadom kroz sferu ekonomije .....	17
2.3.5. Struktura prikupljanja otpada.....	18
2.3.6. Struktura recikliranja otpada .....	19
2.3.6.1. Mobiusova petlja.....	20
2.3.6.2. Indikatori uspješnosti postupka recikliranja .....	21
2.4. Industrija 4.0 .....	22
2.4.1. „Zeleni“ dizajn proizvoda .....	24
2.4.2. „Zeleno“ pakiranje .....	27
2.5. Procjena životnog ciklusa .....	30
3. PROBLEMATIKA OTPADNOG AMBALAŽNOG STAKLA.....	32
3.1. Mikrostruktura stakla .....	32
3.2. Karakteristična svojstva stakla.....	35

---

3.3.	Sastav smjese ambalažnog stakla.....	37
3.3.1.	Karakteristične boje staklene ambalaže .....	38
3.3.2.	Osnovne sirovine za proizvodnju ambalažnog stakla.....	39
3.4.	Prikupljanje i recikliranje otpadne staklene ambalaže.....	41
3.4.1.	Temelj zakonodavstva gospodarenja ambalažnim otpadom.....	41
3.4.1.1.	Naknade za gospodarenje ambalažnim otpadom.....	42
3.4.1.2.	Prihodi i rashodi Fonda.....	46
3.4.2.	Prikupljanje otpadne staklene ambalaže na području Općine Đurmanec .....	47
3.4.3.	Vetropack Straža kao pionir u recikliranju stakla.....	49
3.4.4.	Recikliranje staklene ambalaže.....	52
3.4.4.1.	Odvajanje magnetičnih materijala .....	59
3.4.4.2.	Odvajanje nemagnetičnih materijala.....	59
3.4.4.3.	Odvajanje keramike, kamena i porculana te sortiranje stakla.....	61
3.4.5.	Pripremanje smjese za proizvodnju staklene ambalaže .....	65
3.4.6.	Taljenje sirovina i upravljanje talinom .....	67
3.4.6.1.	Doziranje staklene kapi.....	67
3.4.6.2.	Formiranje staklenog spremnika.....	68
3.4.6.3.	Oplemenjivanje i popuštanje staklenih spremnika .....	70
3.4.6.4.	Kontrola kvalitete staklenih spremnika .....	71
4.	ZAKLJUČAK.....	73

## POPIS SLIKA

Slika 1. UN-ovi ciljevi održivog razvoja direktno povezani s industrijom staklene ambalaže [3] .....	3
Slika 2. Model tri stupa održivog razvoja [6].....	5
Slika 3. Model tri stupa održivosti iz perspektive proizvođača staklene ambalaže [8] .....	6
Slika 4. Linearni ekonomski model [9].....	7
Slika 5. Model kružne ekonomije [13].....	9
Slika 6. Model 9R [10].....	10
Slika 7. Uobičajeno gospodarenje otpadom [1] .....	15
Slika 8. Metoda gospodarenja otpadom ovisno o vrsti otpada [14] .....	17
Slika 9. Mobiusova petlja [15] .....	21
Slika 10. Osnovna ideja industrije 4.0 [17].....	22
Slika 11. Osnovni ciljevi „zelenog“ dizajna proizvoda [20].....	26
Slika 12. Koncept upravljanja „zelenim“ lancima opskrbe [20].....	28
Slika 13. Stope recikliranja određenog materijala za pakiranje [14] .....	29
Slika 14. Faze životnog ciklusa [7] .....	30
Slika 15. Elementarni tetraedar [24] .....	34
Slika 16. Kristalna (a) i amorfna struktura (b) SiO <sub>2</sub> [24] .....	34
Slika 17. Boje stakla u ponudi proizvođača staklene ambalaže [26] .....	38
Slika 18. Stakleni krš [27].....	41
Slika 19. Količina ambalaže stavljene na tržište i količina sakupljenog ambalažnog otpada u razdoblju od 2013. do 2019. godine u tonama [32].....	45
Slika 20. Ukupno sakupljene količine otpadne ambalaže u sustavu FZOEU i prema podacima prijavljenim u ROO za razdoblje od 2013. do 2019. godine [32].....	46
Slika 21. „Zeleni otok“ na području Općine Đurmanec.....	48
Slika 22. Vetropack Straža d.d. [34] .....	49
Slika 23. Izvori potrebne energije za proizvodnju stakla u Vetropacku [35].....	50
Slika 24. Izvori GHG-emisija u Vetropacku [35] .....	51
Slika 25. Okviran omjer primarnih i sekundarnih sirovina u Vetropacku [35].....	52
Slika 26. Ušteda energije ovisno o udjelu staklenog krša [40] .....	54
Slika 27. Utjecaj količine staklenog krša na potrošnju energije i proizvodnost [1].....	55



---

Slika 28. Kružni tok staklene ambalaže [39].....	57
Slika 29. Princip recikliranja staklenog krša u Vetropacku .....	58
Slika 30. Princip odvajanja feromagnetskih materijala [41] .....	59
Slika 31. Princip rada separatora vrtložnim strujama [42].....	60
Slika 32. Fizikalna shema rada separatora vrtložnim strujama [42] .....	61
Slika 33. Princip optičkog sortiranja staklenog krša u vidljivom spektru svjetlosti [41].....	63
Slika 34. Princip hiperspektralne obrade staklenog krša [41] .....	64
Slika 35. Otpadne frakcije nakon recikliranja staklene ambalaže [43] .....	64
Slika 36. Princip procesa miješanja i prijenosa sirovina [44] .....	66
Slika 37. Sustav za generiranje staklenih kapi [24] .....	68
Slika 38. Proces formiranja staklenke (NNPB) [24] .....	69
Slika 39. Izgled staklenih spremnika nakon formiranja oblika [45] .....	70
Slika 40. Optička kontrola kvalitete na liniji za formiranje staklene ambalaže [45] .....	71

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vanjski i unutarnji faktori i utjecaji na motivaciju poduzeća za implementaciju ekodizajna [7] .....	26
Tablica 2. Kemijski sastav bijele, zelene i smeđe staklene ambalaže [25] .....	35
Tablica 3. Fizikalna i mehanička svojstva ambalažnog stakla [25] .....	36
Tablica 4. Najbitniji spojevi za dobivanje željene boje staklene ambalaže [25].....	38
Tablica 5. Osnovne sirovine za proizvodnju stakla i pripadajući oksidi [25] .....	39
Tablica 6. Ciljevi recikliranja za ambalažni otpad propisani Direktivom (EU) 2018/852 [32] .....	44

## POPIS KRATICA

Kratika	Značenje
UN	<i>United Nations</i> – Ujedinjeni narodi
SDG	<i>Sustainable Development Goals</i> – Ciljevi održivog razvoja
SD	<i>Sustainable Development</i> - Održivi razvoj
TBL	<i>Triple Bottom Line</i> – Tri stupa održivosti
CE	<i>Circular Economy</i> – Kružna ekonomija
LE	<i>Linear Economy</i> – Linearna ekonomija
GHG	<i>Greenhouse Gas Emissions</i> – Emisije stakleničkih plinova
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i> – Procjena životnog ciklusa
EU	<i>European Union</i> – Europska unija
WTE	<i>Waste To Energy</i> – Proizvodnja energije iz otpada
EPR	<i>Extended Producer Responsibility</i> – Produžena odgovornost proizvođača
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i> – Ukupna potreba za energijom
GWP	<i>Global Warming Potential</i> – Potencijal globalnog zatopljenja
I4.0	<i>Industry 4.0</i> – Industrija 4.0
BD	<i>Big Data</i> – Veliki podaci
IoT	<i>Internet of Things</i> – Internet stvari
AI	<i>Artificial Intelligence</i> – Umjetna inteligencija
R&D	<i>Research&amp;Development</i> – Istraživanje i razvoj
GSCM	<i>Green Supply Chain Management</i> - Upravljanje zelenim lancima opskrbe
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
CSP	<i>Ceramics, Stone, Porcelain</i> – Keramika, kamen, porculan
NIR	<i>Near Infrared</i> – (svjetlost) Blizu infracrvenog
VIS	<i>Visual Image Spectroscopy</i> – Spektroskopija vidljive svjetlosti
HSI	<i>Hyperspectral Imaging</i> – Hiperspektralno snimanje
NNPB	<i>Narrow Neck Press and Blow</i> – (proces) Prešano – puhanog usko grlo
PB	<i>Press and Blow</i> – (proces) Prešano – puhanog

BB	<i>Blow and Blow</i> – (proces) Puhano – puhano
HECs	<i>Hot – End Coatings</i> – Prevlake vrućeg kraja
CECs	<i>Cold – End Coatings</i> – Prevlake hladnog kraja
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> – Prevlačenje u parnoj fazi kemijskim putem
IR	<i>Infrared Radiation</i> – Infracrveno zračenje
UV	<i>Ultraviolet Radiation</i> – Ultraljubičasto zračenje

## SAŽETAK

Živimo u vremenu razvoja brojnih koncepata, modela i metoda koji služe kao alati za stvaranje sustava koji su u skladu s idejom održivog razvoja. U ovom završnom radu, održivi je razvoj temelj i osnova za povezivanje s ostalim relevantnim modelima, a koji imaju inovativni smisao. Pretjerano crpljenje resursa i neuređeni sustav odlaganja otpada dva su izrazito zahtjevna problema današnjice, no smanjenje, ponovna upotreba i recikliranje otpadnih frakcija tri su presudna alata u tranziciji na kružnu ekonomiju u skladu s održivim razvojem.

U ovom radu približene su ideje održivog razvoja kroz jedno hrvatsko poduzeće koje provodi ideju energetske i resursne učinkovitosti te inovativnog gospodarenja otpadom putem želje za obzirnim sakupljanjem, recikliranjem i proizvodnjom staklene ambalaže što rezultira brojnim imponantnim rezultatima.

Ključne riječi: održivi razvoj, kružna ekonomija, gospodarenje otpadom, staklena ambalaža, sakupljanje stakla, recikliranje stakla, proizvodnja stakla, energetska učinkovitost, resursna učinkovitost.

## **SUMMARY**

We live in times where a variety of concepts, models, and methods are being developed to serve as means for developing systems that are consistent with the concept of sustainable development. In this bachelor thesis, sustainable development serves as a basis for interacting with other relevant models that have innovative meaning.

Excessive consumption of resources and an unregulated waste disposal system are two of today's most difficult problems, yet reducing, reusing, and recycling waste fractions are three critical tools in the transition to a circular economy that is compatible with sustainable development.

This thesis gives an insight into sustainable ideas, approached through a Croatian company that implements the idea of energy and resource efficiency, as well as innovative waste management, through a desire for careful collecting, recycling, and manufacturing of glass packaging, resulting in a number of outstanding results.

Key words: sustainable development, circular economy, waste management, glass packaging, glass collecting, glass recycling, glass manufacturing, energy efficiency, resource efficiency.

## 1. UVOD

### 1.1. Motivacija za „zelenim“ razvojem

Osnovni i primarni cilj čovječanstva je shvatiti kako upravljati degradacijom okoliša, a u isto vrijeme pružiti svakom čovjeku priliku za dostojanstven život. Gledajući noviju povijest razvoja očito je da je trend industrijalizacije i globalizacije značajno ubrzao i povisio potrebu za energijom i resursima, a time direktno doveo u pitanje održivosti takvog razvoja zbog narušavanja ekološke uravnoteženosti.

Promatrajući različite zajednice ljudi koje su na bilo koji način došle u dodir sa „zelenim razvojem“ vidljivo je da se svijest o racionalnom i promišljenom ponašanju povećava uslijed činjenice da svaki pojedinac ima ugljični otisak koji ovisi o njihovom stilu života. Neprestanim razvojem znanosti i tehnologija, a time i poboljšanja uvjeta života pojedinih zajednica te iste zajednice shvaćaju da se zapravo uvjeti života na Zemlji pogoršavaju, dostupni resursi drastično smanjuju, a to znatno utječe na broj ljudi na Zemlji.

Društvo moderne industrije postalo je ekstremno ovisno o resursima zbog svakodnevnog povećanja proizvodnje raznih proizvoda i time gradnje složenog društva koje akumulira nevjerojatne količine resursa [1].

Odlaganje otpada i crpljenje resursa dva su najhitnija problema s kojima se društvo danas suočava, a smanjenje i recikliranje otpada dva su obećavajuća rješenja u tranziciji na kružnu ekonomiju na putu prema održivosti sustava [2].

Zadnjih desetljeća mogle su se vidjeti užasne klimatske nepogode koje su zadesile društvo. Ekstremne suše i vrućine, poplave, šumski požari, bujice, tajfuni i uragani znatno utječu na sam život i način života građana. Pitanje je zašto dolazi do tako strašnih promjena, a svako negiranje moglo bi nas skupo koštati, mnogo više od cijene tromosti k promjenama. Nastavi li se ovim tempom klimatskih promjena i ne postroži li se klimatska politika na međunarodnoj razini, prosječna globalna temperatura mogla bi ubrzo nakon 2050. narasti za 2 °C. Planet se postupno pretvara u “staklenik”, što za sobom nosi zbir nepovratnih klimatskih učinaka i direktno ugrožava sigurnost, narušava gospodarske, prehrambene, vodne i energetske sustave te uništava biološku raznolikost i sustav ekologije.

Zbog ovog malog broja navedenih razloga bitno je baštiniti ideje održivog razvoja i utkati ih u svaki proces u kojem se nalaze ljudi u suradnji s ekologijom. Moraju se stvarati ideje i načini

kojima bi se implementirala kružna ekonomija u postojeće sustave. Kako bi poduzeća mogla pratiti trendove održivog razvoja, razvijaju se mnogi koncepti, modeli i metode koji bi trebali dati jasne smjernice za razvoj kompletnog sustava. Pritom se pod pojmom održivosti ne misli samo na okolišnu održivost, već i na ekonomsku i društvenu održivost, a detaljnije će se ovi pojmovi istražiti zasebno u okviru ovog završnog rada.

## 1.2. Staklo – materijal prošlosti, sadašnjosti i budućnosti

Staklena ambalaža je primjer „zelenog“ proizvoda, dobiven oblikovanjem stakla, koji je održiv materijal zbog velike dostupnosti primarnih i sekundarnih sirovina te mogućnosti beskonačnog ponovnog recikliranja, što za sobom donosi brojne prednosti.

Legende kažu da su ga otkrili Babilonci, Feničani i Egipćani oko 5000 godina prije Krista. Iako navodno nikad nije potvrđeno kao povijesna činjenica, na tim su prostorima pronađeni različiti ukrasni predmet i posude od stakla. Zbog svojih odličnih svojstava nametnulo se kao vodeći materijal u području industrije pića i prehrane, farmaceutske industrije i kozmetičke industrije. Upotrebom kao staklena ambalaža, ono nam osigurava da proizvod ostane svjež, postojan i da zadrži željena svojstva okusa i mirisa jer je obostrano nepropusno za tvari koje bi smanjile kvalitetu proizvoda.

Industrija staklene ambalaže prepoznata je kao vođa kružne ekonomije u Europi težnjom da se omogući tranzicija na učinkovito resursno i niskouglično gospodarstvo. Time se ostvaruje sinergija s ciljevima održivog razvoja Ujedinjenih naroda (engl. *United Nations*, UN) koji ne isključuju poslovni napredak.

[Slika 1] prikazuje da je od ukupno 17 ciljeva održivog razvoja (engl. *sustainable development goals*, SDG), industrija staklene ambalaže direktno povezana s ciljevima [3]:

- Održiva potrošnja i proizvodnja; zbog kružne proizvodnje u potpunosti reciklične staklene ambalaže.
- Zaštita klime; uslijed napora da se učinkovito upravlja resursima, energijom i teži smanjenju emisija CO<sub>2</sub> relevantna je Klimatskom akcijskom planu.
- Partnerstvom do cilja; industrija staklene ambalaže nastojat će ostvariti još viši stupanj povezanosti i cirkularnosti proizvodnje, od dobavljača resursa do potrošača, što je inherentno razvoju kružne ekonomije.





Slika 1. UN-ovi ciljevi održivog razvoja direktno povezani s industrijom staklene ambalaže [3]

## 2. PROBLEMATIKA ODRŽIVOG RAZVOJA

### 2.1. Definiranje koncepta održivog razvoja

Termin održivi razvoj (engl. *sustainable development*, SD) počeo se pojavljivati 80-ih godina 20. stoljeća, a pravno je prihvaćen na konferenciji u Rio de Janeiru 1992. godine. Iako je od tada prošlo gotovo 30 godina, može se primijetiti da se tek u prošlom desetljeću počela buditi prava svijest o problemima očuvanja okoliša uzrokovana lošim globalnim politikama i zbog društvene tromosti k promjenama [4].

Izraz „problematika“ upotrijebljen u naslovu ovog poglavlja nije slučajna, već je posljedica shvaćanja kompleksnosti ove „filozofije“, koja zahtijeva temeljitu, oštru i promišljenu reviziju dosadašnjeg ustaljenog sustava, koji nas vodi u krivom pravcu, pravcu koji ne garantira opstanak.

Prema [4]: „Održivi razvoj je mnogo više od tehnoškopskog pojma za inteligentno preraspoređivanje resursa, mnogo više od pojmova Svjetska banka ili UN. Ova ideja će dobiti svoju pokretačku snagu onog trenutka kada se napravi *novi civilizacijski nacrt*, nacrt koji zapravo već postoji u našoj tradiciji i u ljudskoj psihi. Tradicija i inovacija ne moraju predstavljati dvije sukobljene strane. Zajedničko razmišljanje o vrijednostima, idejama i snovima su važni kulturni resursi.“

Najčešća definicija održivog razvoja glasi: „Održivi razvoj je razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjice, a istodobno ne ugrožava mogućnost budućih generacija da zadovolje svoje potrebe“.

Održivost u bilo kojoj formi može i mora ostvariti optimalne uvjete u problematici 21. stoljeća unutar poslovnog svijeta, društva i okoline kao primarnog fokusa.

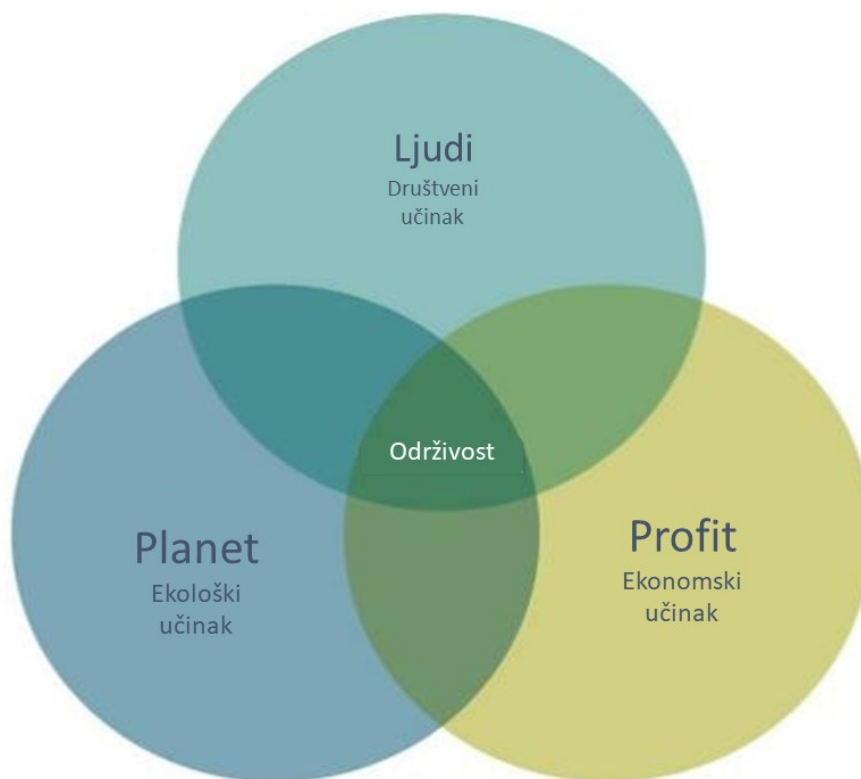
Koncept održivog razvoja generira ograničenja, ali ne radikalna, već ona povezana s trenutnim tehnologijama, društvenim strukturama, okolišnim resursima i mogućnosti biosfere da apsorbira sve posljedice ljudskih aktivnosti koje narušavaju okolišnu sliku, energetska stabilnost i potiču klimatske promjene [5].

#### 2.1.1. Tri stupa održivog razvoja

U današnjem suvremenom poslovnom svijetu uspješnost poduzeća više se ne mjeri samo kroz dobit i gubitak u određenom razdoblju, već koliko su organizacije uspješne u balansiranju odnosa prema okolišu, društvu i ekonomiji, koji nastoje biti u međusobnoj sinergiji.

Najčešća interpretacija koncepta održivog razvoja je kroz model tri stupa održivog razvoja (engl. *triple bottom line*, TBL) kojeg prikazuje [Slika 2, Slika 3], a sastoji se od:

- Društvena održivost; podrazumijeva poštene, korisne prakse prema svim sudionicima unutar poduzeća kroz pravilno osmišljenu društvenu strukturu, u kojoj su interesi poduzeća, radnika i svih ostalih sudionika međusobno ovisni. Podrazumijeva isključivanje iskorištavanja djece kao radne snage, poštene plaće, sigurno radno mjesto i optimalan broj radnih sati, spolnu ravnopravnost i uključivost i sl.
- Okolišna održivost; skup postupaka, radnji i ponašanja kojima se ne narušava prirodna ravnoteža pretjeranim crpljenjem okolišnih resursa. Nastoji se smanjiti ekološki, ugljični otisak svakog pojedinca optimalnim korištenjem energije te proizvodnje energije kroz obnovljive izvore, smanjenje generiranog otpada i korištenja adekvatnih materijala koji smanjuju loš utjecaj na okolinu.
- Ekonomska održivost; podrazumijeva ekonomsku vrijednost dobivenu nakon oduzimanja troškova svih *inputa*. Dinamika modernog društva pretjerano diktira novac kao inicijativu za promjenu te motivaciju za mijenjanje dosad neodrživih sustava.



Slika 2. Model tri stupa održivog razvoja [6]

Prema [7]: „Prema smjernicama održivog razvoja, poslovni modeli, proizvodi i usluge trebaju zadovoljavati potrebe korisnika na društveno najprihvatljiviji način, s najnižim troškovima i utjecajima na okoliš. Ekonomski, okolišni i društveni učinci poslovanja poduzeća, održivi razvoj, briga za okoliš i stupanj društveno odgovornog poslovanja sastavni su dijelovi vizije i inovacijskih strategija poduzeća uz tradicionalno važne čimbenike uspješnosti na tržištu, kao što su konkurentnost poduzeća i prepoznavanje prilika na tržištu.“

U ovom završnom radu koncept održivog razvoja imat će superiornu, osnovnu ulogu, dok će se ostali koncepti, modeli i metode promatrati kao alati kojima se nastoji postići da sustavi budu ili postanu dugoročno održivi.



**Slika 3. Model tri stupa održivosti iz perspektive proizvođača staklene ambalaže [8]**

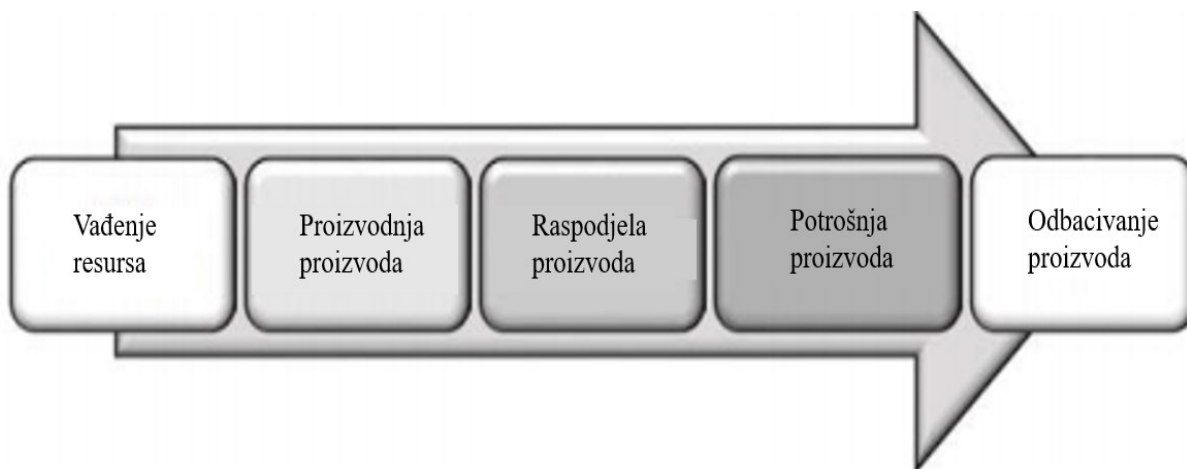
## 2.2. Održivi ekonomski razvoj

### 2.2.1. Model linearne ekonomije

Povijesno gledano, industrija je djelovala kao otvoreni sustav, pretvarajući resurse u proizvode koji se na kraju odbacuju u okoliš. To je, zajedno s masovnim povećanjem uporabe resursa, dovelo do sve većih učinaka na okoliš jer su velike količine energije, emisije stakleničkih plinova i druge emisije ispuštene u okoliš izravno povezane s proizvodnjom i korištenjem resursa.

Da bi se mogao jasnije objasniti model kružne ekonomije (engl. *circular economy*, CE) potrebno je napomenuti uzrok nastanka takvog modela. Model kružne ekonomije je posljedica neodrživog i loše osmišljenog modela linearne ekonomije (engl. *linear economy*, LE), koji se temelji na uzimanju potrebnih resursa iz prirode, njihovim korištenjem za proizvodnju, plasmanu na tržište i odbacivanju proizvoda, čime se generira velika količina otpada [4].

[Slika 4] prikazuje princip „uzmi, proizvedi, baci“, koji nije primjeren jer je količina resursa ograničena pa takav model nije dugoročno održiv ni poželjan.



Slika 4. Linearni ekonomski model [9]

Zbog toga postoji potreba za drugačijim pristupom i modelom koji garantira ekonomski rast i prosperitet.

### 2.2.2. Model kružne ekonomije

Model kružne ekonomije predstavlja ekonomski model u okviru kojeg se količina proizvodne sirovine, otpad, štetne emisije i potrošnja energije nastoji smanjiti usporavanjem, produživanjem i zaokruživanjem energetske i materijalne ciklusa u proizvodnji [Slika 5]. Kako postoje razne definicije modela koje nastoje objasniti istu problematiku, potrebno je diverzificirati mišljenja i poglede iz različitih izvora.

Kružna ekonomija predstavlja ekonomski sustav koji zamjenjuje koncept „*end-of-life*“ postupcima smanjenja potrošnje, ponovnom uporabom, recikliranjem i oporabom materijala u proizvodnim i potrošačkim procesima.

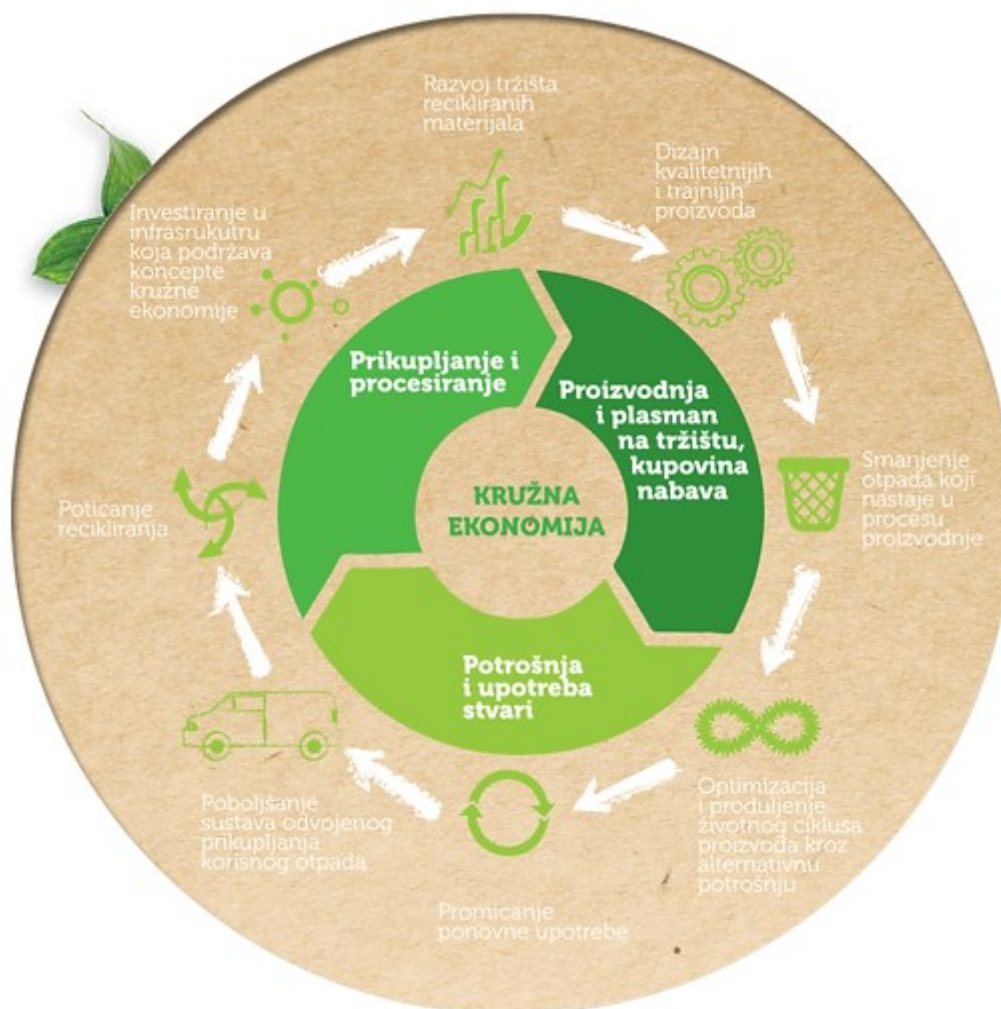
Kružna ekonomija djeluje na mikrorazini (proizvodi, poduzeća, potrošači), mezorazini (ekoindustrijski parkovi) i makrorazini (grad, regija, država i šire), s ciljem postizanja održivih sustava te posljedično osiguranje kvalitetnijeg okoliša, gospodarskog i ekonomskog prosperiteta te društvene jednakosti sadašnjih i budućih generacija [10].

Prema [9]: „cirkularna ekonomija je pokret prema održivom razvoju koji predlaže zatvoreni sustav u kojem se ponovno koristi i reciklira te time nadomješta potreba za novim materijalima, smanjuje ovisnost o takvim sredstvima i poboljšava sposobnost i budućih generacija da zadovolje potrebe, kao i naše trenutne na globalnoj razini.“

Prema [5], kružna ekonomija predstavlja alat koncepta održivog razvoja kojima se generira porast svijesti u cilju održivog korištenja prirodnih resursa i prijelaza s linearnog na kružni model upravljanja. U usporedbi s modelom tri stupa održivosti, koji više naginje okolišnim atributima, kružna ekonomija više naginje financijskom prosperitetu.

Pojavom politika kružne ekonomije u velikim regijama svjetske ekonomije (u Kini 2002., u EU 2015.) takav pristup postaje sve popularniji, a predstavlja alat za ostvarivanje ciljeva vezanih uz očuvanje okoliša, održivi ekonomski rast i dodanu vrijednost, a posljedica je stvaranje novih radnih mjesta. Stoga, postoji potpora svim trima vrstama održivosti u isto vrijeme [11].

Program Europske komisije iz 2015. predviđa da će produživanje vijeka trajanja proizvoda i usluga u ekonomskom smislu dovesti do uspostave održivog ekonomskog sustava, koji će koristiti industriji, okolišu i građanima. Sam model kružne ekonomije sve više privlači pažnju vlada, obrazovnih ustanova, poduzeća i građana zbog želje za ostvarenjem održivih sustava [12].

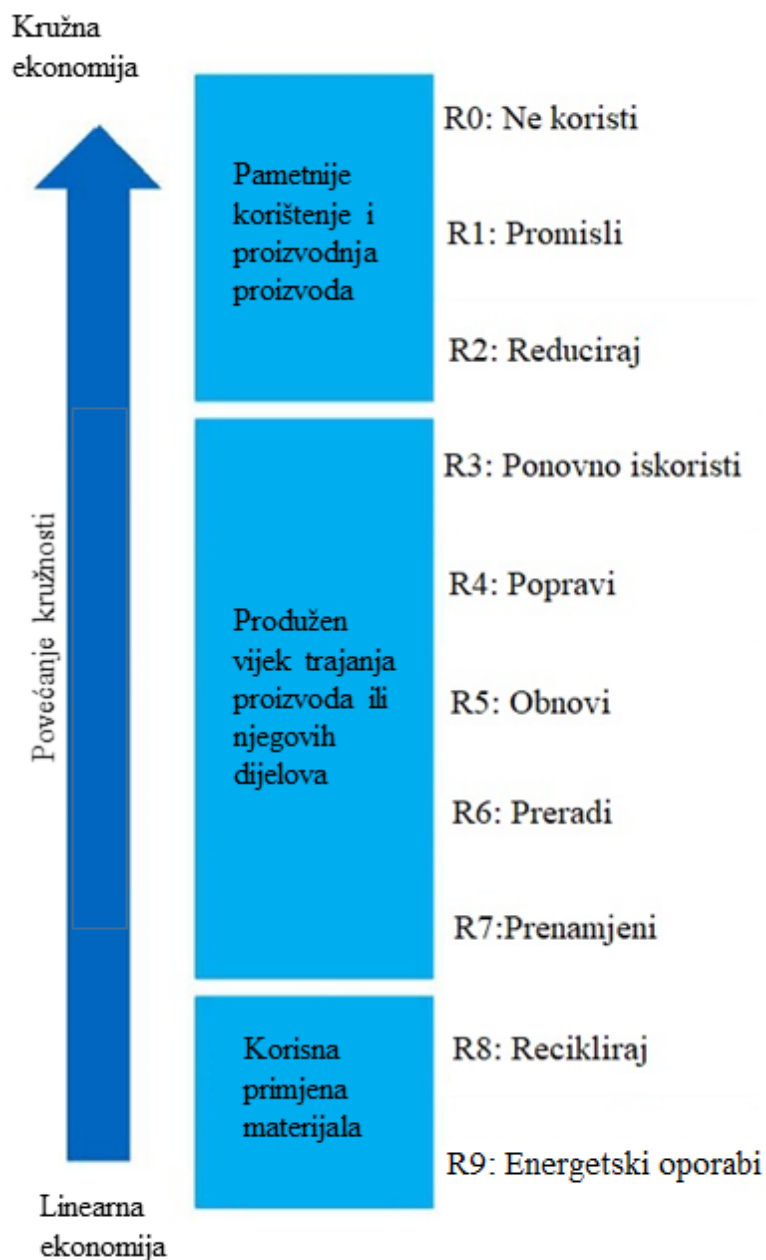


**Slika 5. Model kružne ekonomije [13]**

Ideja kružne ekonomije nije radikalna i ne znači drastične promjene u kvaliteti života ljudi i padu proizvodnje i profita od strane poduzeća, već baš suprotno, takvi sustavi nastoje biti jednako ili više profitabilni te omogućuju potrošačima zadovoljstvo kroz proizvode i usluge. Može se reći da je ovo zdrav način korištenja resursa planeta Zemlje zbog jasne poruke koja glasi: „otpad ne postoji“. Sve je moguće reciklirati, ponovno upotrijebiti ili raščlaniti na sastavnice koje mogu postati dio sljedeće proizvodne iteracije.

#### 2.2.2.1. Model 9R

Kružna ekonomija se najčešće definira kroz model 3R, iako zbog različitog shvaćanja koncepata mnogi autori promiču modele 4R, 6R ili 9R [Slika 6], a krajnji cilj svakog od njih trebao bi biti ekološka ravnoteža, ekonomski prosperitet i društvena jednakost. Ovi modeli prikazuju postupke koji omogućuju prijelaz iz linearnog na kružni ekonomski model.



Slika 6. Model 9R [10]

#### 2.2.2.2. Ciljevi i smjernice modela kružne ekonomije

Postoje brojni ciljevi kružne ekonomije koji se mogu povezati uz nastojanje da se sustavi „zaokruže“, no bitno je navesti osnovne koji služe kao temelj za razvoj. Ciljevi modela kružne ekonomije su:



- smanjiti količinu generiranog otpada
- prikazati otpad vrijednim proizvodom
- povećati produktivnost resursa
- poboljšati recikliranje vrijednih materijala
- minimizirati utjecaj proizvodnog sustava na okoliš
- minimizirati utjecaj korištenja proizvoda na okoliš
- smanjenje potrošnje energije i veća energetska učinkovitost
- smanjenje troškova
- stvaranje novih radnih mjesta.

Prema [2], njemačka vlada je opisala prelazak s linearnog na kružni model upravljanja kroz brojne zakone i principe:

- Otpad i zagađenje okoliša je primarni cilj razvoja kružne ekonomije.
- Prevencija se može ostvariti kroz promjenu tehnologija kojima bi ostvarili „zeleniju“ proizvodnju.
- Potrebno je uspostavljanje i povećanje ponovne uporabe i recikliranja.
- Zahtjeva se veća količina ekoproizvoda (engl. *ecoproduct*) da se ostvari viša stopa recikliranja.
- Postupno se predstavljaju novi održivi proizvodni modeli.
- Ekonomski alati, poput odgovornosti proizvođača, porezi i politike naplate, porezne olakšice i dr., moraju se primjenjivati uz razvoj pravnog okvira za promoviranje kružne ekonomije.
- Potrebna je mobilizacija cijelog društva na nove principe konzumacije, ponovne upotrebe, recikliranja i izbjegavanja otpada.
- Potrebno je potpuno ukidanje odlagališta otpada.

Pitanje koje se postavlja je kako mjeriti je li određeni proizvod ili usluga u skladu s principima kružne ekonomije. Prema [12], kako bi se evaluiralo koliko je određeni sustav u skladu s kružnom ekonomijom potrebno je:

- Smanjenje ulaza materijala, posebno onih rijetkih.
- Smanjenje razine emisija stakleničkih plinova (engl. *greenhouse gas emissions*, GHG) i drugih emisija.
- Smanjenje stvaranja otpada.
- Povećanje ulaza održivih i recikliranih resursa.
- Maksimiziranje iskoristivosti i izdržljivosti proizvoda.
- Stvaranje novih radnih mjesta za sve vještine.
- Dodana vrijednost kroz kreativnost i distributivnost.
- Povećano društveno blagostanje.

Dosadašnja su istraživanja pokazala da zbog različitog shvaćanja koncepta od različitih sudionika niti jedan dosadašnji model za evaluaciju ne upotpunjuje sve kriterije zbog prevelikog fokusa na sam tok materijala, no potencijal se vidi u modelu procjene životnog ciklusa (engl. *life cycle assessment*, LCA).

### 2.2.2.3. Najčešći pojmovi u istraživanjima kružne ekonomije

Kako bi poduzeća mogla pratiti trendove održivog razvoja, razvijaju se mnogi koncepti, modeli i metode. Pritom se pod pojmom održivosti ne misli samo na okolišnu održivost, već i na ekonomsku i društvenu održivost. U moru koncepata, modela i metoda često ih je teško klasificirati i povezati pa je potrebno napraviti određenu sistematizaciju.

Zanimljivo je prikazati koji su to pojmovi povezani uz kružnu ekonomiju kako bi se dobio bolji uvid u širinu ovog područja i adekvatan uvod u temu ovog završnog rada.

Najčešće teme su one povezane uz održivi razvoj, gospodarenje otpadom, recikliranje, materijale, proizvodnju i proizvode [11].

Sa strane povezanosti cirkularne ekonomije i održivog razvoja očituje se da su okolišni atributi najčešći atributi u istraživanju modela kružne ekonomije (energija, štetne emisije plinova, resursi, materijali, voda), zatim ekonomski atributi, a tek onda društveni atributi [11].

Zbog primjetnog zanemarivanja društvene komponente održivosti mora se napomenuti da su ti atributi esencijalni u ekonomskoj transformaciji te da samo integriranjem perspektiva pravilnog

izbora materijala, strategija i potrošača možemo implementirati ideju kružne ekonomije, onu povezanu s principima održivosti.

## **2.3. Sastavnice gospodarenja otpadom**

### **2.3.1. Definicija problematike gospodarenja otpadom**

S ciljem jasnog objašnjenja u kojem trenutku se implementira postupak recikliranja te u koju grupaciju koncepata, modela i metoda navedeni postupak spada, potrebno je objasniti ideju i probleme gospodarenja iliti upravljanja otpadom.

Prije gotovo 200 godina koristio se samo mali broj materijala, kao što su drvo, željezo, bakar, olovo, kositar, zlato, srebro i dr. Od svih danas poznatih materijala koristili smo otprilike samo 10 %, dok se danas za masovnu proizvodnju koristi više od 90 % postojećih materijala, što uzrokuje vrlo zahtjevno i ponekad nemoguće pravilno sakupljanje, odvajanje i recikliranje otpadnih sirovina, posebice onih kritičnih (engl. *raw critical elements*).

Gospodarenje otpadom je šarolika znanstvena disciplina koja obuhvaća društvenu, tehničku, ekonomsku i ekološku problematiku. Kritična komponenta sustava gospodarenja otpadom je svijest javnosti i uključivanje javnosti u sustav uz adekvatno zakonodavstvo, tehničku potporu i pravilno financiranje.

Naglasak u gospodarenju otpadom je na javnosti jer je otpad posljedica ljudskih aktivnosti, a vlast mora težiti da građani određenim alatima pravilno pristupe društvu, kako bi shvatili težinu situacije.

Industrija otpada smatra se i sama veoma značajnim izvorom emisija stakleničkih plinova. Procijenjeno je da je sektor otpada treći po veličini u generiranju stakleničkih plinova koji nisu ugljikov dioksid, a to je prema nekim procjenama oko 13 % ukupnih emisija [2].

Proučavajući prošlo stoljeće, industrijska revolucija je zbog svoje snage i obujma omogućila značajno smanjenje troškova materijala, što je dovelo do loših navika velikog dijela društva, a to je ignoriranje važnosti smanjenja, ponovne uporabe i recikliranja u današnjem društvu.

### **2.3.2. Hijerarhija gospodarenja otpadom**

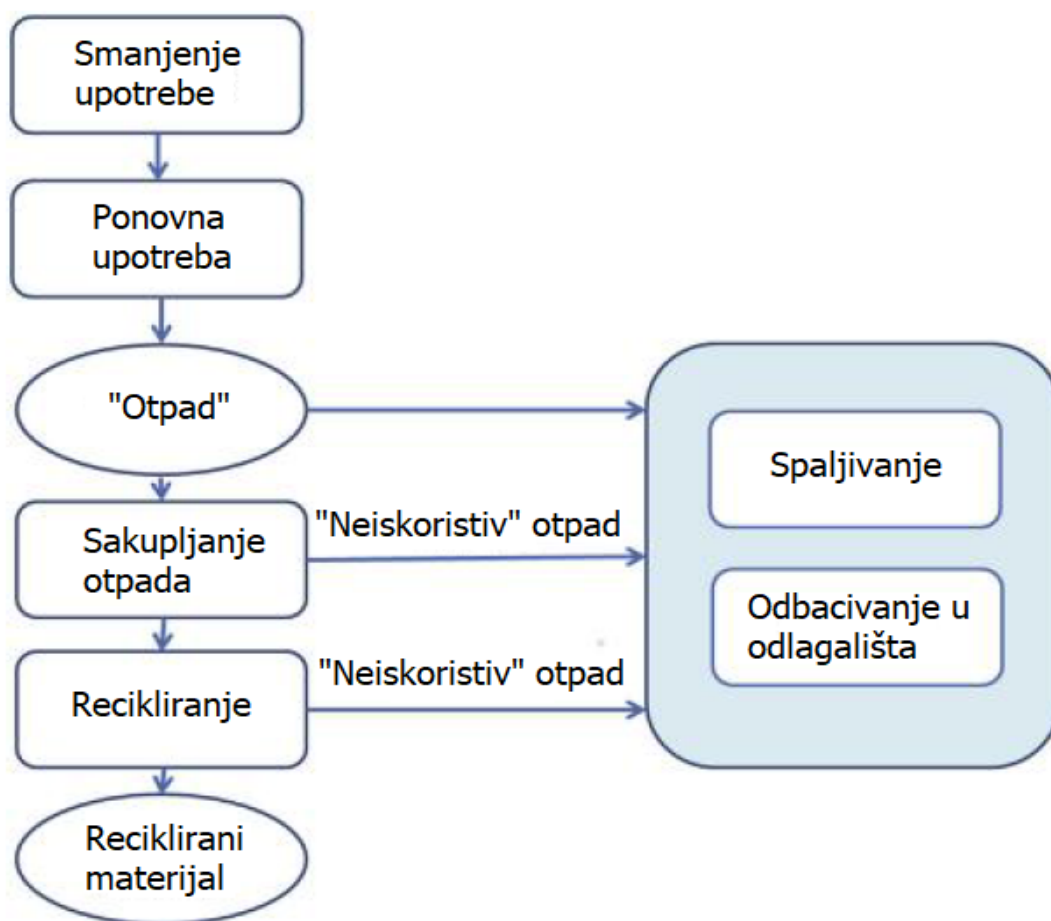
Europske direktive i politike propisuju da su članice Europske unije (engl. *European Union*, EU) obvezne koristiti sljedeću hijerarhiju gospodarenja otpadom:

- Smanjivanje (engl. *reduce*); najbolji način gospodarenja otpadom jer se nastoji ne stvarati otpad ili minimizirati stvaranje otpada.  
Nastoji se postići što duži vijek trajanja usluge ili proizvoda kroz dizajn i popravak te smanjiti gubitak materijala i proizvoda izvan specifikacija u različitim koracima proizvodnje.
- Ponovno upotrijebiti (engl. *reuse*); primjerenija metoda gospodarenja otpadom u odnosu na recikliranje jer zahtjeva puno manje energije.  
Ponovna upotreba proizvoda pa time i materijala postiže se konstruiranjem proizvoda i usluga za višestruku upotrebu te uspostavom adekvatnog tržišta za takve artikle [1].  
Proizvod koji ne mora prolaziti kroz logističku mrežu, koji se ne mora predobrađivati i reciklirati je proizvod kojim se uštedjela ogromna količina energije i emisija. Mora se težiti suradnji s vladama, poduzećima i svim organizacijama koje imaju interesa u sekundarnim sirovinama i uporabi materijala kako bi se ova sastavnica hijerarhije otpada maksimizirala.
- Recikliranje (engl. *recycle*); metoda gospodarenja otpadom koja pridonosi smanjenju otpada na odlagalištima i očuvanju prirodnih resursa. Cilj svakog recikliranja je ponovno upotrijebiti otpadne materijale kako bi se smanjila njihova količina. Obično se sastoji od separacije i mehaničke obrade.
- Oporaba (engl. *recovery*); energetska uporaba općenito se primjenjuje na uporabu jednog dijela utjelovljene energije u materijalima proizvoda koristeći se raznim postupcima i procesima, uključujući proizvodnju goriva dobivenog od otpada iz industrije (npr. u proizvodnji cementa), spaljivanje s energetsom uporabom u postrojenjima za proizvodnju energije iz otpada (engl. *waste to energy*, WTE) ili anaerobnom razgradnjom bioloških/organskih materijala u otpadu. Potonji postupak se može odvijati i na odlagalištu otpada, a plin s odlagališta može se upotrijebiti za proizvodnju energije. Učinkovitost energetske uporabe tih sustava može se uvelike razlikovati i može biti vrlo niska (npr. 12 do 15 % za starije WTE-objekte) [1].

- Odlaganje (engl. *disposal*); to su procesi odlaganja otpada bez uporabe energije, kao što su otpadna odlagališta i neuređeno spaljivanje.

U mnogim zemljama u razvoju, odlaganje otpada i dalje je glavna opcija gospodarenja otpadom, gdje se to često radi na nekontroliranim i neuređenim odlagalištima, a to rezultira negativnim utjecajima na lokalni okoliš, kvalitetu vode i zraka i dr.

[Slika 7] prikazuje uobičajeni princip gospodarenja otpadom.



Slika 7. Uobičajeno gospodarenje otpadom [1]

Očito je da će se metodom smanjenja sačuvati najviše energije, a zatim postupkom ponovne upotrebe i tek onda recikliranjem. No, neizbježno je da jednom kada je proizvod prošao kroz brojne cikluse ponovne upotrebe, proizvod podvrgne recikliranju i oporabi njegovih materijala.

### 2.3.3. *Struktura zakonodavstva gospodarenja otpadom*

U skladu sa zakonodavstvom, gospodarenje otpadom čini skup aktivnosti, odluka i mjera usmjerenih na sprječavanje nastanka otpada, smanjivanje količina otpada i/ili njegovih štetnih utjecaja na okoliš, sortiranje, skupljanje, prijevoz, recikliranje i uporabu, te nadzor nad tim djelatnostima i skrb za zatvorena odlagališta na gospodarski učinkovit i po okoliš prihvatljiv način [2].

Prema [14], tokovi otpada su tokovi specifičnih materijala od njihovog izvora do uporabe, recikliranja ili odlaganja. Zajedno oni čine ukupan otpad zbrinut po stanovniku u Europskoj uniji (4,6 tona po stanovniku u 2012. god).

Tokovi otpada mogu biti podijeljeni u dvije velike skupine [14]:

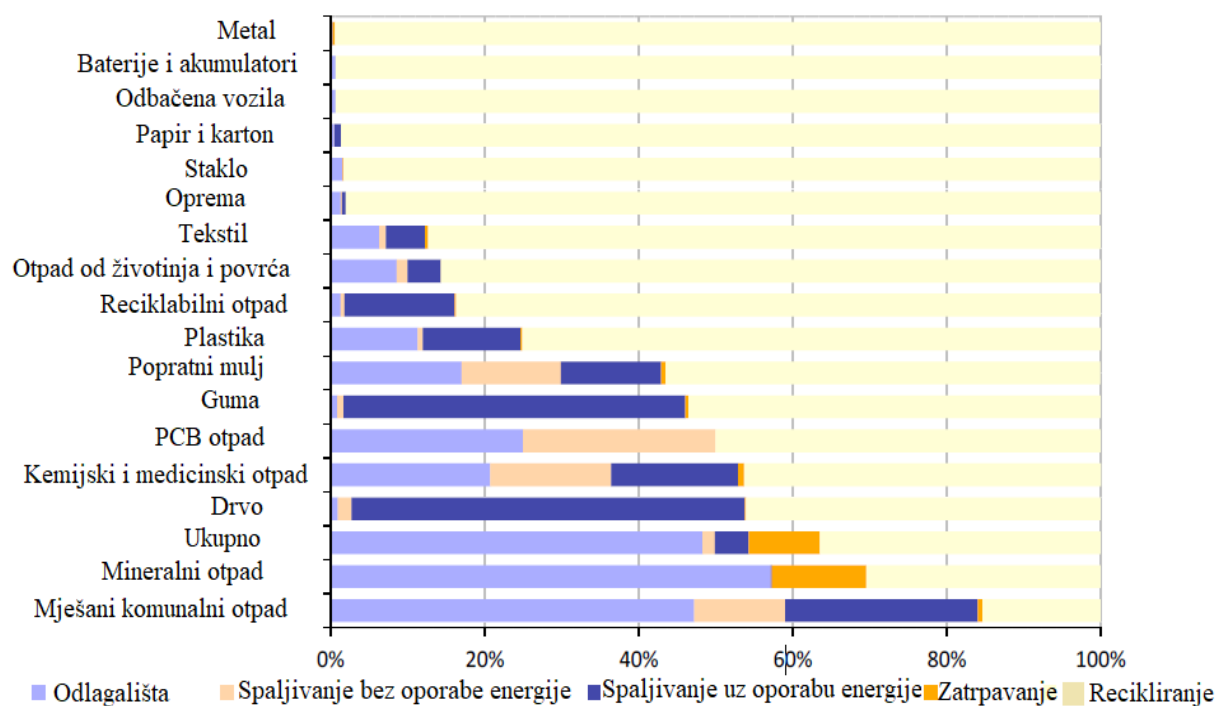
- Tokovi materijala – metali, polimeri, staklo, papir i karton, drvo, guma, tekstil i biootpad.
- Tokovi proizvoda – elektronički otpad, otpadna vozila, pakiranje, baterije i akumulatori, otpad od rušenja građevina, gradnje i rudarenja; zahtijevaju posebnu naknadnu obradu da bi mogli završiti u tokovima materijala.

Dva su osnovna načela gospodarenja otpadom u zakonodavstvu EU [14]:

- Hijerarhija otpada (engl. *waste hierarchy*): poglavlje 2.3.2..
- Princip „zagađivač plaća“: zahtjeva se od zagađivača da snosi troškove sprječavanja, kontroliranja i čišćenja zagađenja kako bi se osiguralo da se ti troškovi odražavaju u cijeni roba i usluga koje su uzrok tom zagađenju.

Provedbom tih načela, produžena odgovornost proizvođača (engl. *extended producer responsibility*, EPR) koristi se u nekoliko tokova otpada u EU uključujući otpadni stakleni krš. Implicira se da proizvođač preuzima financijsku i/ili radnu odgovornost za sakupljanje, sortiranje i recikliranje dobara.

Prema istraživanju provedenom u EU-članicama 2012. godine 48 % ukupno otpada je odloženo u odlagališta, a 36 % je reciklirano. Najmanju stopu recikliranja ima miješani otpad od otprilike 15 % što zajedno s ostalim otpadnim frakcijama prikazuje [Slika 8].



Slika 8. Metoda gospodarenja otpadom ovisno o vrsti otpada [14]

#### 2.3.4. Gospodarenje otpadom kroz sferu ekonomije

Za takav globalni problem, problem koji se u nekim društvima čini nerješiv, potrebno je uzeti primjere dobrih praksi iz zemalja koje su uspjele napraviti korak na kružno gospodarenje te proučiti kako motivirati svakog sudionika da bude snažna karika u lancu otpada.

Ekonomska strana sastoji se od dvije perspektive, a to su [2]:

- Perspektiva administracije odgovorne za gospodarenje otpadom (npr. grad, općina): Ako je odvojeno sakupljanje otpada pogonjeno stratejskim ili ekološkim razlozima, vlasti su spremne podmiriti veće troškove (npr. brzo smanjenje kapaciteta odlagališta otpada), što dovodi dugoročno do smanjenja troškova.
- Perspektiva proizvođača otpada, vlasnika otpada i trgovca otpadom: Najbitniji faktor je novac, odnosno troškovi podmirivanja aktivnosti vezanih uz otpad. Razlika između troškova odlaganja i troškova razdvajanja i recikliranja su ekonomski impuls za odvajanje određenih materijala pogodnih za recikliranje.

Dakle, ekonomski poticaj mora biti dovoljno velik da potakne sve sudionike unutar sustava na pravilno djelovanje, no nije dovoljno osigurati sredstva kojima bi se pravilno platilo određene

otpadne frakcije, već kojima bi se potaknulo pravilno ponašanje cijelog društva, kako bi se optimizirali rezultati sakupljanja s naglaskom na količinu i kvalitetu.

Prihodi od odvojenog sakupljanja otpada ovise o [2]:

- kapitalnim i radnim troškovima sakupljanja
- količini i kvaliteti ulaznog materijala
- cijeni otpada
- kapitalnim i radnim troškovima objekata
- tržišnoj cijeni oporabljenih materijala.

### ***2.3.5. Struktura prikupljanja otpada***

Otpad koji se može reciklirati često prikupljaju gradovi i općine, prodajući ga na tržištu trgovcima i sekundarnim prerađivačima, koji ponovno obrađuju materijale kako bi ih na kraju prodali proizvođačima.

Različite vrste otpada mogu se odvojeno prikupljati izravno u kućanstvima, u lokalnim kontejnerima ili centrima za recikliranje. Zbog različitih razloga, često ljudi nisu u stanju razvrstati svoj otpad u odgovarajuće spremnike, što se može pripisati lijenosti ili neznanju o mogućim posljedicama. Na taj način sav otpad završava u istom spremniku ili u pogrešnom spremniku, što otežava pravilno sakupljanje, recikliranje i snižava stopu i efikasnost recikliranja.

Otpad je moguće skupljati zajedno u iste spremnike ili odvojeno. Odvojeno sakupljanje otpada zahtjeva veći napor (više spremnika, više vrsta vozila, više sakupljačke logistike), no zbog homogenosti tog otpada potrebno je manje napora u kasnijim sortiranjima. Time veća količina materijala visoke kvalitete može biti razdvojena te je potrebno zbrinuti manje otpadnih ostataka. Veći udio materijala koje je moguće reciklirati u nastalom i sakupljenom otpadu može olakšati učinkovitu mehaničku predobradu [2].

Da bi se određeni otpad reciklirao potrebno je napraviti kvalitetan sustav odvojenog sakupljanja otpada, što direktno pridonosi očuvanju resursa i smanjenju emisija stakleničkih plinova iz otpadnih odlagališta. Nadalje, pravilno odvajanje određenih vrsta otpada je nužno da se osigura pravilno upravljanje odlagalištima i spalionicama. Pravilan sustav gospodarenja otpadom temeljen na istraživanjima i dobroj praksi doprinosi smanjenju troškova koje društvo plaća za svoje komunalne usluge.



Potrebne su jasne politike koje bi generirale pravilne metode za sakupljanje otpada, no još bitniji je odgovor građana i društva na te smjernice koje moraju biti prihvaćene. Potrošačke navike mijenjaju se jako brzo i tako se vrlo brzo mijenja količina i vrsta otpada.

No, ne dovodi se u pitanje samo plaćanje komunalnih usluga: cijena društvene, političke i zakonodavne robusnosti se naplaćuje u najgorem slučaju u zdravlju građana.

### **2.3.6. Struktura recikliranja otpada**

Već se do sada u ovom završnom radu navelo da recikliranje nije prvi i najpoželjniji pristup gospodarenju otpadom, već je naglasak na smanjenju intenziteta kojim kupujemo proizvode i ponovnoj upotrebi, no promatrajući moderno društvo te prve dvije stepenice se često preskaču. Recikliranje nije samo po sebi cilj, već osnovni alat iz cijele kutije s alatom za bolje upravljanje prirodnim resursima. To je svaki postupak oporabe kojim se otpadni materijali prerađuju u proizvode, materijale ili tvari za izvornu ili drugu namjenu.

Recikliranje je ponovna prerada materijala na kraju životnog vijeka proizvoda te njihovo vraćanje u lanac opskrbe. Takav reciklirani materijal naziva se „sekundarni“, za razliku od „primarnog“ materijala koji se vadi iz okoliša. Iz perspektive recikliranja, primarni i sekundarni materijali se ne razlikuju u kvaliteti. Također, energija potrebna za recikliranje općenito je znatno manja od energije potrebne za konvencionalnu proizvodnju materijala iz ruda, a u tom procesu često se stvaraju velike količine nusproizvoda ili otpada s malom ili nikakvom ekonomskom vrijednošću, koji ponekad sadrže i štetne spojeve.

Sakupljanje i recikliranje otpadnih materijala i proizvodnja sekundarnih materijala ima znatno manju ukupnu potrebu za energijom (engl. *cumulative energy demand*, CED) od proizvodnje primarnih materijala. Pojednostavljeno, otpadni materijali moraju se „samo“ sakupiti, sortirati, očistiti od drugih frakcija i obraditi određenim postupcima što dovodi do znatno nižeg potencijala globalnog zatopljenja (engl. *global warming potential*, GWP) sekundarnih materijala [2].

Iako recikliranje ima dalekosežne ekološke i društvene koristi, tržište je to koje određuje mogu li se materijali ili složeni proizvodi u konačnici reciklirati i oporabiti.

Na tržištu recikliranja cijene variraju ovisno o ponudi i potražnji, cijeni materijala izrađenih od primarnih sirovina, kao i ponašanju i organizaciji tržišta i njegovih dionika. To povezuje cijenu recikliranog materijala s cijenom primarnog materijala [1].

Međutim, povećanjem cijena primarnih materijala, recikliranje postaje sve snažnija opcija kojom se omogućuje da otpad postane resurs. Dok se određeni materijali lako recikliraju, postoje oni za koje je to trenutno nemoguće zbog složenih funkcionalnih veza u potrošačkim proizvodima.

U proteklim desetljećima recikliranje se uglavnom smatralo pitanjem gospodarenja otpadom, dok se danas kao glavni pokretač recikliranja smatra učinkovitost gospodarenja resursima [1]. Proizvodnja sekundarnih materijala iz otpadnih materijala obično zahtjeva puno manje energije u odnosu na proizvodnju primarnih materijala te generira manju količinu štetnih emisija. U skladu s tim potrebno je skupljati i sortirati otpadne materijale na način da se maksimizira količina generiranih odvojenih materijala visoke kvalitete.

Potencijalno se recikliranje može obaviti brzinom usporedivom sa stopom kojom odbacujemo resurse, ali tada sustav mora biti pažljivo dizajniran kako bi se neizbježni gubici sveli na najmanju moguću mjeru. Dio materijala koji može ponovno ući u životni ciklus ovisit će i o samom materijalu i o proizvodu koji je napravljen od tog materijala jer kvaliteta i čistoća sakupljenog materijala određuju njegovu buduću uporabljivost [1].

Postupak recikliranja ima svoja ograničenja, a najvažnije ograničenje dolazi iz cilja recikliranja, a to je da se zatvori krivulja upotrebe određenog materijala. Teoretski to je moguće samo kod nekolicine anorganskih materijala, kao što su staklo i metali. Organske tvari kao što su papir, polimeri i ostale organske molekule prolaze s vremenom kroz procese degradacije i smanjenja kvalitete prilikom recikliranja (engl. *downcycling*) [2].

Dakle, recikliranje donosi:

- Smanjenje troškova i potreba za završnom obradom (postupci odbacivanja).
- Smanjenje GHG – emisija, energetske potrebe i potrebe za materijalima.
- Smanjenje štetnog utjecaja na zdravlje ljudi.
- Stvaranje novih radnih mjesta.
- Odvajanje otrovnih tvari s odlagališta (izbjegavanje zagađenja zraka, vode i tla).

#### 2.3.6.1. Mobiusova petlja

Univerzalni simbol recikliranja ili Mobiusova petlja [Slika 9] sadrži tri povezane strelice u obliku trokuta sa zaobljenim kutovima. Sve tri se nadovezuju jedna na drugu i svaka predstavlja ciklus recikliranja. Ovaj simbol nema autorskih prava i moguće ga je mijenjati, ali generalno se može reći da označava proizvode koji se mogu reciklirati. Ako je Mobiusova petlja u krugu,

označava proizvode dobivene recikliranjem. Ako se unutar petlje nalazi postotak on označava udio recikliranog materijala u proizvodu [15].



**Slika 9. Mobiusova petlja [15]**

Numeriranje te označavanje kraticama ambalažnog materijala opće je poznato i jednostavno. Ispod simbola Mobiusove petlje nalazi se slovna skraćenica materijala od kojeg je ambalaža proizvedena (PVC, PP, PE i sl.), dok se unutar petlje nalazi i brojčana oznaka. Kratice se pišu samo velikim slovima, a ako je unutar petlje samo broj bez kratice, radi se o kombinaciji materijala. Za staklenu ambalažu vrijedi 70 – bezbojno staklo (GL), 71 – zeleno staklo (GL) i 72 – smeđe staklo (GL) [15].

#### 2.3.6.2. Indikatori uspješnosti postupka recikliranja

Kada se omogući situacija da postoji dobar sustav gospodarenja otpadom, a da recikliranje ima određeni stupanj funkcionalnosti, pitanje je kako mjeriti uspješnost tog postupka.

Potrebno je razlikovati različite indikatore uspješnosti postupka recikliranja [1]:

- Stopa recikliranja (engl. *recycle rate*): To je pojam koji se u literaturi često različito definira pa će se prikazati nekoliko definicija.

Općenito se odnosi na količinu materijala oporabljene postupkom recikliranja iz toka otpada. Može se definirati kao količina oporabljene materijala iz toka otpada podijeljeno s količinom ukupnog nastalog otpada. Nadalje, stopa recikliranja često se odnosi na količinu materijala prikupljenog za recikliranje uključujući sve materijale odbačene tijekom obrade podijeljeno s količinom (masom) ukupnog nastalog otpada, iako bi se odbačeni materijal trebao oduzeti te bi trebalo uključiti samo materijal koji se prodaje na tržištu nakon obrade. Stoga se mogu pronaći razlike u tome gdje se broji količina recikliranog materijala i kako se procjenjuje količina materijala u otpadu.

- Učinkovitost recikliranja (engl. *recycle efficiency*): Na ukupnu količinu materijala dostupnog za ponovnu upotrebu utjecat će svi gubici materijala (zbog npr. kvalitete, boje ili obrade) tijekom samog postupka recikliranja. To se može definirati kao učinkovitost recikliranja ili izlaz procesa recikliranja podijeljen s ulaznim materijalom.
- Reciklirani sadržaj (engl. *recycled content*): je dio ukupnog recikliranog ili sekundarnog materijala na ulazu u proizvodni proces.

## 2.4. Industrija 4.0

U zadnjih nekoliko godina uvodi se sve veći broj politika i regulativa čiji je cilj zaštititi okoliš od nepovoljne industrije koja nepromišljeno proizvodi neodržive proizvode. Održivi dizajn je definiran kao dizajn proizvoda koji društvo i okoliš gleda kao ključne elemente prilikom proizvodnje, a to je ono što nazivamo inovativnim. Inovativno i održivo je temelj razvoja tzv. industrije 4.0 (engl. *industry 4.0*, I4.0), koja podrazumijeva razvoj i upotrebu novih tehnologija u proizvodnji s ciljem maksimalne proizvodnosti uz efektivno korištenje resursa, a detaljniju ideju prikazuje [Slika 10].

Ideja je koristiti napredne informacijsko-komunikacijske tehnologije s ciljem inteligentnog umrežavanja strojeva i ostalih regulacijskih i sličnih uređaja kako bi se omogućilo autonomno komuniciranje među uređajima, analiziranje i prikupljanje velike količine podataka, autonomno donošenje odluka, praćenje imovine i procesa u stvarnom vremenu te vertikalna i horizontalna integracija [16].



Slika 10. Osnovna ideja industrije 4.0 [17]

Prema [5], industrija 4.0 obuhvaća tehnologiju velikih podataka (engl. *big data*, BD), tehnologiju internet stvari (engl. *internet of things*, IoT) i umjetnu inteligenciju (engl. *artificial intelligence*, AI), s ciljem optimizacije postojećih sustava i njihove kompetitivnosti, efikasnosti i otpornosti na promjene.

Digitalizacija podrazumijeva korištenje digitalnih podataka i informacija potrebnih za razvoj proizvoda, što je samo dio industrije 4.0, dakle, prikupljanje i obrada podataka u svim fazama korištenja proizvoda koji se mogu koristiti za daljnji razvoj i poboljšanje proizvoda i usluga. To su zapravo korijeni tzv. *big data*-tehnologije, koja daje velike mogućnosti u razvoju proizvoda i usluga. Inženjeri na taj način mogu skupiti velike količine podataka vezanih za tehnologiju proizvodnje i za sam proizvod, no bitno je kako se ti podaci analiziraju i interpretiraju, za što se koriste napredni računalni programi.

Podaci se prikupljaju iz različitih uređaja koji nam olakšavaju svakodnevicu (npr. pametni telefoni, satovi hladnjaci i sl.), putem interneta i dr.

Na temelju velikog broja istraživanja, digitalizacija donosi mnoge prednosti [18]:

- Povišena isplativost proizvodnje i povećani prihodi zbog pametnijeg i preciznijeg sustava obrade podataka.
- Povećana produktivnost, detaljnost i kvaliteta proizvodnih ciklusa.
- Koordinacija i mogućnost praćenja resursa i optimiziranje njihovog dolaska.
- Bolje praćenje funkcionalnosti proizvoda pa time širi prostor za poboljšanja.
- Praćenje želja potrošača.
- Olakšano i pravovremeno održavanje.

Digitalizacija postaje inherentna poduzećima u borbi protiv konkurencije i prilika za detekciju potrebnih rješenja. Digitalizacija je isto tako sredstvo lakšeg odgovaranja na želje potrošača, kako bi proizvođači bili kompetitivniji. Ona omogućuje i pristup specifičnim podacima za lakši i efikasniji razvoj proizvoda, jednostavniju optimizaciju postojećih procesa i korištenje simulacija za minimiziranje generiranog otpada. Izazov koji se mora riješiti je kako kombinirati digitalna rješenja i modele sa stvarnim, tradicionalnim fizičkim modelima [18].

Da bi poduzeća bila konkurentna u budućnosti digitalna transformacija je nužna zbog sve dinamičnijih zahtjeva tržišta i sve veće količine podatka, što zahtjeva zapošljavanje ljudi s adekvatnim vještinama i znanjem programiranja, razvoja novih softvera i razumijevanja modernih poslovnih modela, a za sve to potrebno je ubrzati digitalnu i obrazovnu tranziciju.

Industrija 4.0 smatra se sljedećom industrijskom revolucijom koje se ne mora bojati ako će se pravilno slijediti vrlo brzi tehnološki trendovi. Društvo je to koje mora prihvatiti da je to ispravan put.

Kako je industrija skup ljudskih djelatnosti kojima se stvaraju proizvodi i usluge, inherentno je ovom konceptu dodati modele kojima se definira kakvi su to proizvodi i usluge u sinergiji s održivim razvojem.

#### **2.4.1. „Zeleni“ dizajn proizvoda**

Velik broj današnjih sofisticiranih proizvoda sadrži širok spektar različitih materijala, a iz znanosti o materijalima jasno je da kemijski sastav i vrsta veza značajno otežavaju razvoj adekvatnih tehnologija razdvajanja, sortiranja i recikliranja. Kroz obrazovanje se uči kako je jednostavnost često najbolji odgovor na određene probleme pa je tako dizajn jednostavnih, prihvatljivih proizvoda koji olakšavaju navedene procese prijeko potreban. Činjenica je da potrebna funkcionalnost određuje koja se vrsta materijala treba upotrijebiti i s kakvim vezama, što ponekad diktira nekompatibilnost za recikliranje.

S obzirom na to da je pod problematikom industrije 4.0 naglasak na proizvode, potrebno je proučiti problematiku vezanu uz njih. U definiranju ovog područja, različiti autori imaju drugačije perspektive pa će se prikazati više njih.

Ideja je da se poduzmu koraci koji uzimaju u obzir okolišne faktore i smanjenje utjecaja zagađenosti na početku razvoja proizvoda. Drugim riječima, utjecaj na okoliš bi se trebao uzeti kao polazna točka i najbitniji faktor razvoja proizvoda. Uz to nije dovoljno samo korištenje ekoloških materijala i održive energije za proizvodnju, već je potrebno osmisliti proizvod koji se lako rastavlja, sortira, ponovno upotrijebi i reciklira. Pod imenom novog „zelenog“ proizvoda (engl. *green product*) svakako se uzima u obzir funkcionalnost, vrsta materijala, principi konstruiranja, upotrebljivost i vrsta tehnologije za proizvodnju [19].

Prema [20], definicija „zelenog“ dizajna (engl. *green design*) proizvoda je: „Proces dizajna kod kojeg se okolišni atributi tretiraju kao ciljevi dizajna, a ne kao ograničenja; dva osnovna cilja „zelenog“ dizajna trebala bi biti prevencija otpada i bolje upravljanje materijalima te dizajn (konstrukcija) kojim bi se produžio životni vijek proizvoda i smanjila proizvodnja otpada“, a to prikazuje [Slika 11]. Prema [21], „zeleni“ proizvod je proizvod koji ima manji ili smanjeni utjecaj na ljudsko zdravlje i zagađenje okoliša kada se usporedi s proizvodima iste namjene, a

takav dizajn ima značajan utjecaj na cijenu rastavljanja, održavanja, popravka i recikliranja ponovno iskoristivih materijala“.

Prema [7], svrha ekodizajna (u ovom radu ekodizajn = „zeleni“ dizajn) je preventivno smanjiti ili potpuno izbjeći potencijalno štetne učinke proizvoda na okoliš, a to se čini u fazama konstruiranja u kojima postoji najveći potencijal za razvoj ekološki prihvatljivijih proizvoda i usluga, uz nezanemarivanje drugih važnih kriterija vrednovanja, kao što su kvaliteta zadovoljenja korisničkih zahtjeva, funkcionalnost, profitabilnost, sigurnost, pouzdanost tijekom rada, ergonomija, tehnička izvedivost i estetski zahtjevi.

Očito je da je odjel za istraživanje i razvoj (engl. *research and development*, R&D) poduzeća ključan prilikom implementiranja koncepta „zelenog“ dizajna u samom razvoju proizvoda, na način da sakuplja informacije o održivim idejama. Te se informacije zatim koriste kako bi se oblikovao moderan i drugačiji proizvod, koji se na kraju svog vijeka upotrebe može lako reciklirati. To je također indikator da poduzeće vodi brigu o izboru i korištenju materijala i prihvatljivih tehnologija.

Bitno je napomenuti da se ovakvim pristupom ne zanemaruje ekonomska važnost proizvoda i usluga, već se u skladu s održivim razvojem nastoje balansirati sva tri „stupa“ održivog razvoja. Kao i za sve ostale modele, potrebno je stvarati ispravna mjerila. Ovdje se kao jedna od važnijih izdvaja ekoeфикаsnost (engl. *eco-efficiency*).

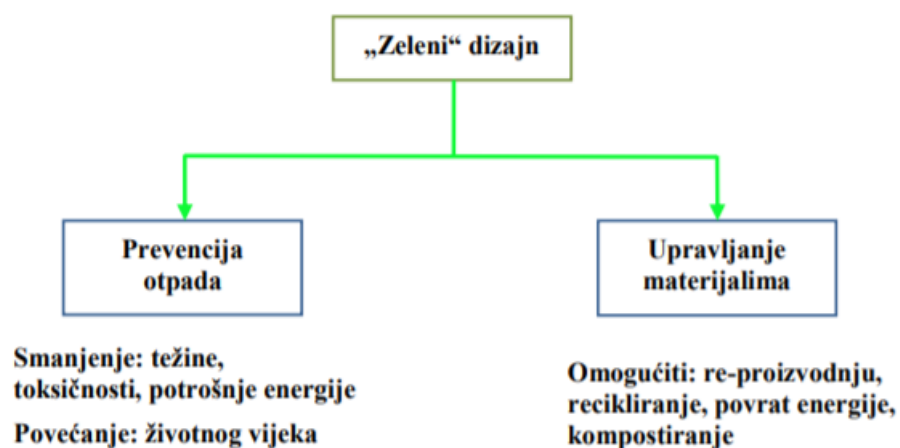
Ekoeфикаsnost proizvoda definira se kao omjer vrijednosti proizvoda izražene u monetarnim ili nominalnim jedinicama i utjecaja proizvoda na okoliš izražena u jedinicama utjecaja na okoliš. Glavni pokretač primjene ekodizajna te smanjivanja utjecaja proizvoda i procesa na okoliš su smanjeni troškovi kompletnog sustava proizvodnje i maksimizacija profita. Međutim, kao dodatan orijentir uzimaju se u obzir i politički sustav i zakoni te norme i regulative koje se tiču proizvoda i razvojnog procesa [7].

[Tablica 1] detaljnije prikazuje pokretače za implementaciju ekodizajna.

**Tablica 1. Vanjski i unutarnji faktori i utjecaji na motivaciju poduzeća za implementaciju ekodizajna [7]**

Vanjski faktori i utjecaji na motivaciju poduzeća za implementaciju ekodizajna	Unutarnje motivacije poduzeća za implementaciju ekodizajna
Zakonske i pravne regulative	Kvalitetniji i bolji proizvodi
Ostvarivanje veće konkurentnosti na tržištu	Zahtjevi korisnika za ekološki prihvatljivijim proizvodima
Utjecaj konkurencije, trendova i kretanja na tržištu (engl. <i>market push</i> )	Smanjenje troškova razvoja i ukupnih troškova (uključujući troškove životnog ciklusa proizvoda)
Utjecaj razvoja tehnologije u tržišnoj niši ili tehnologije općenito (engl. <i>technology push</i> )	Povrat uložениh sredstava u obliku profita

Zanimljivo je proučiti uspjeh poduzeća koja su se odlučila na tranziciju proizvodnje ekoproizvoda u suradnji sa „zelenim“ dobavljačima (engl. *green suppliers*). Pokazalo se da će poduzeća ostvariti veću diferencijacijsku prednost (kako inovativnost donosi prednost pred konkurencijom) proizvodeći ekoproizvode i time veći profit, a suradnjom sa „zelenim“ dobavljačima ostvarit će još veće benefite [22].



**Slika 11. Osnovni ciljevi „zelenog“ dizajna proizvoda [20]**



Kako bi se procijenilo koji su proizvodi prihvatljivi i u skladu s idejama „zelenog“ iliti ekodizajna, potrebno je izabrati pravilnu metodu. Prema brojnim autorima vrlo je teško odabrati adekvatnu metodu za procjenu, no kao najistaknutija metodologija pokazala se metoda procjene životnog ciklusa (engl. *life cycle assessment*, LCA).

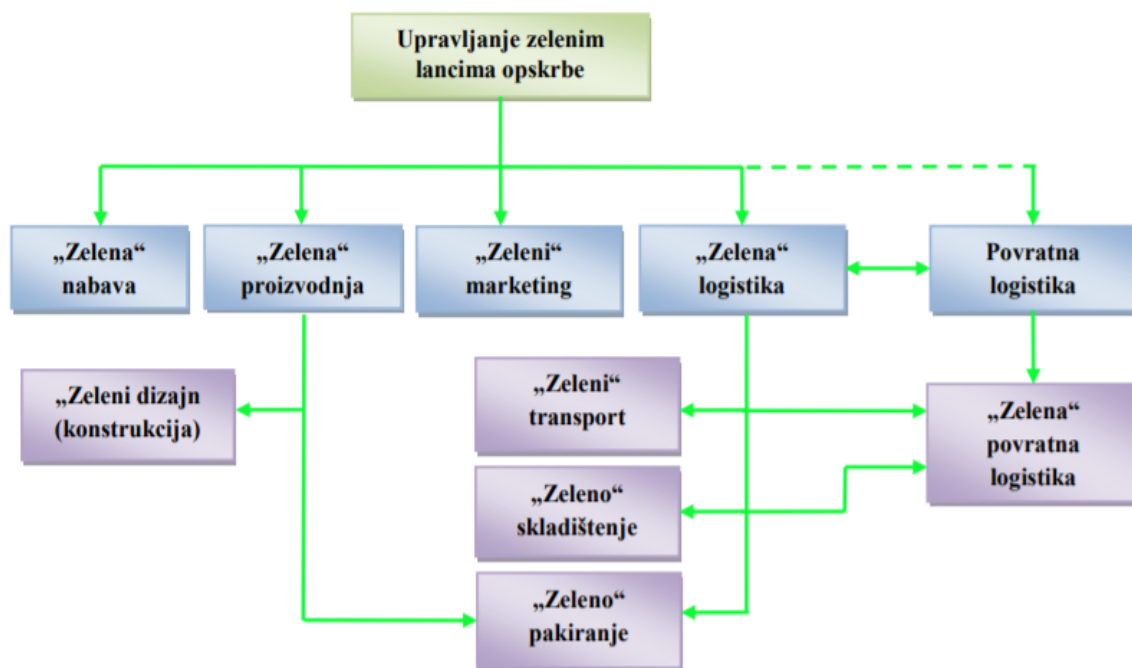
#### **2.4.2. „Zeleno“ pakiranje**

„Zeleno“ pakiranje (engl. *green packaging*) je još jedan od modela unutar koncepta upravljanja zelenim lancima opskrbe (engl. *green supply chain management*, GSCM) kao i model „zelenog“ dizajna proizvoda [Slika 12]. Ono je bitan i mnogo puta presudan čimbenik kupnje proizvoda, no nastoji se smanjiti količina korištenog materijala za pakiranje i odabrati adekvatna vrsta materijala. Pakiranje se podrazumijeva drugim izrazom za ambalažu te će u ovom odjeljku biti korišten navedeni izraz.

Popularno je na tržištu da pakiranje proizvoda bude moderno, glamurozno kako bi proizvod bio bolje prihvaćen. S druge strane, jednom kada se proizvod počine koristiti, pakiranje se odbacuje i na taj se način generira ogromna količina otpada, koja možda onečišćuje i zagađuje okoliš. Zato je vrlo bitno da poduzeća vode brigu o izboru materijala za pakiranja zbog lakšeg odlaganja, sakupljanja i recikliranja.

Prema [22], „zeleno pakiranje je odgovarajuće pakiranje koje se može ponovno koristiti, reciklirati ili razgraditi, kvariti, a da ne uzrokuju zagađenje prema ljudima i okolišu tijekom životnog ciklusa“.

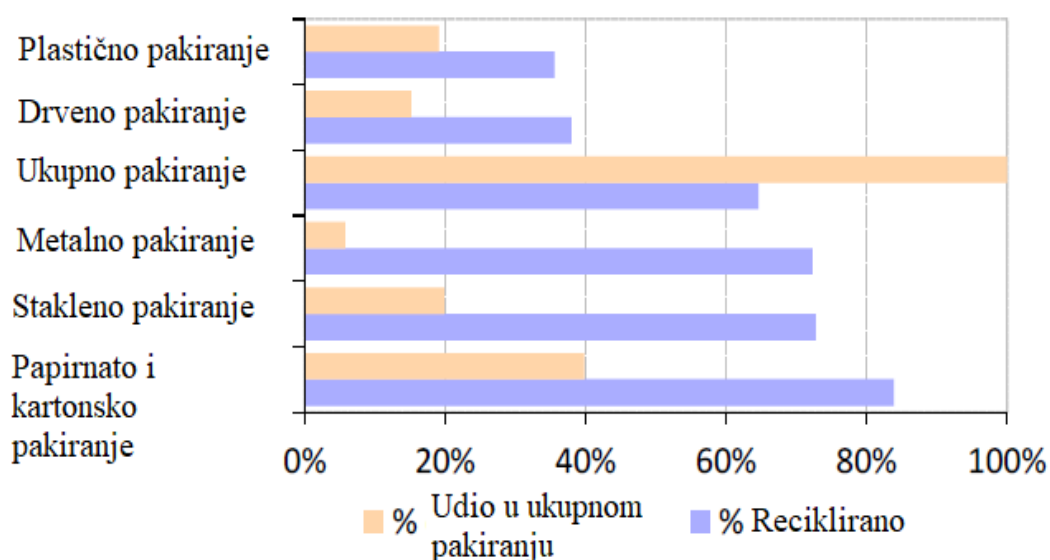
Da bi se dobio bolji uvid u širinu ovog područja, bitno je grafički interpretirati ovu problematiku.



Slika 12. Koncept upravljanja „zelenim“ lancima opskrbe [20]

Važno je napomenuti da otpad od pakiranja u EU iznosi 3,14 % ukupnog generiranog otpada, a to je indikator za racionaliziranje procesa pakiranja [19].

[Slika 13] prikazuje stope recikliranja pojedinog materijala pakiranja i masene udjele materijala u otpadu od pakiranja u EU, a to su: papir i karton (40 %), staklo (20 %), polimeri (19 %), drvo (15 %) i metal (6 %). Ukupno se u EU u 2012. godini recikliralo 65 % otpada od pakiranja, iako su udjeli drugačiji ovisno o vrsti materijala [14].



Slika 13. Stope recikliranja određenog materijala za pakiranje [14]

Direktiva o ambalaži i ambalažnom otpadu iz 1994. godine u EU nastoji povezati i propisati adekvatne mjere povezane s ambalažom i ambalažnim otpadom i definira osnovna pravila s ciljem očuvanja i zaštite okoliša te funkcioniranja unutarnjeg tržišta EU. Direktivom se od članica zahtijeva da poduzmu mjere za sprječavanje ambalažnog otpada i razvoj sustava ponovne uporabe ambalaže.

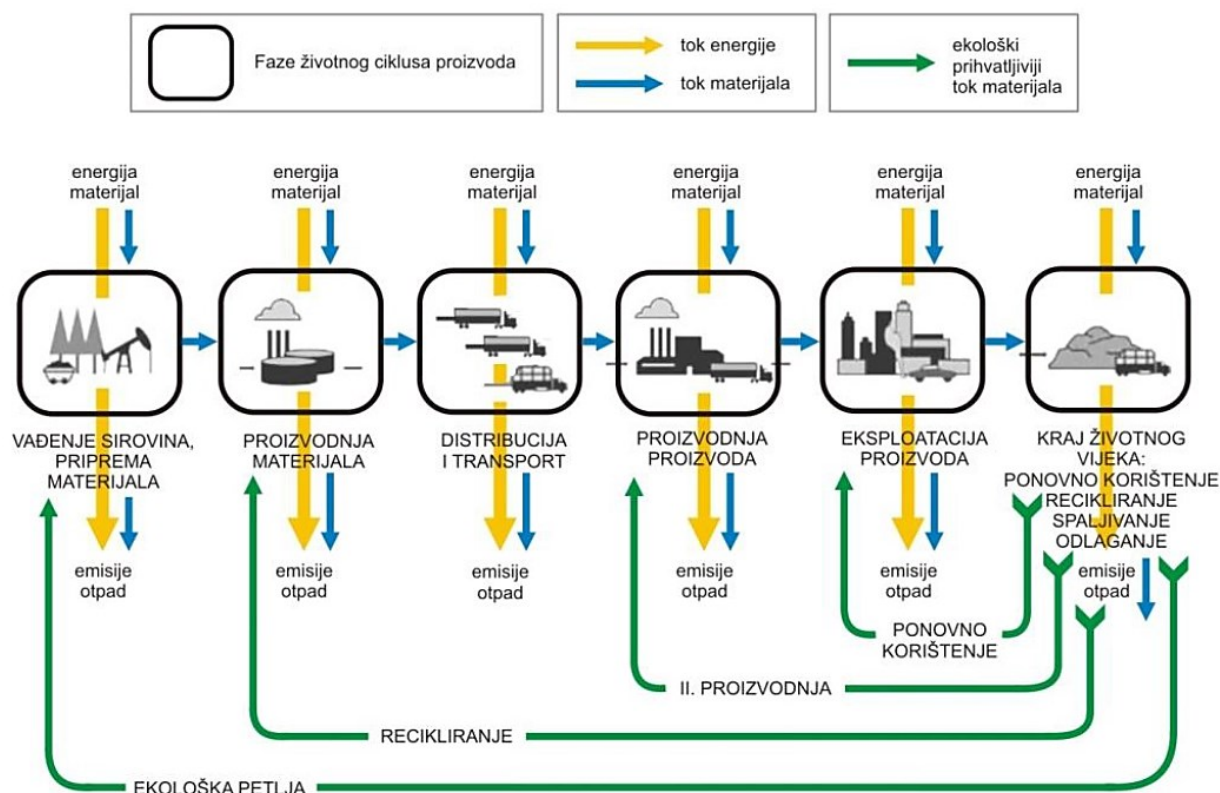
Da ovi koncepti, modeli i metode ne ostanu u „zraku“ kao nešto što se ne koristi, kasnije će se pokazati da i u Hrvatskoj postoje poduzeća koja u nekim svojim dijelovima provode navedene koncepte.

Pakiranje će se u kasnijem dijelu rada predstavljati kao ambalaža. Ambalaža su svi proizvodi bez obzira na materijal od kojeg su izrađeni, a korišteni su za sadržavanje, čuvanje, rukovanje, isporuku i predstavljanje robe, od sirovina do gotovih proizvoda, od proizvođača do korisnika ili potrošača [29].

## 2.5. Procjena životnog ciklusa

Kako bi se kvalitetno obradilo područje recikliranja koje je glavno u ovom radu, zanimljivo je vidjeti koje su to faze života kroz koje proizvod prolazi.

[Slika 14] prikazuje životni ciklus proizvoda, a predstavlja proces transformacije energije i materijala tijekom životnog vijeka proizvoda, a počinje vađenjem sirovina i proizvodnjom sirovih materijala koji se zatim koriste u proizvodnji komponenata proizvoda. Nakon nabave sirovina i proizvodnje komponenata, proizvod se sastavlja, pakira i distribuira na tržište. Nakon što je proizvod završio svoj korisni životni vijek (tj. fazu eksploatacije), njegov bi životni ciklus trebao završiti za okoliš sigurnim zbrinjavanjem. Završnu fazu životnog ciklusa proizvoda čini rastavljanje, recikliranje materijala, ekološki prihvatljivo odlaganje ili ponovno iskorištavanje komponenata proizvoda u sljedećoj generaciji proizvoda [7].



Slika 14. Faze životnog ciklusa [7]

Svaka od tih faza životnog ciklusa proizvoda promatra se zasebno pomoću LCA-metode, a svrha je identificiranje procesa u životnom ciklusu proizvoda kod kojih je moguće reduciranje potrošnje materijala i energije.

Ako se rano u procesu konstruiranja detektiraju kritični parametri za okoliš kroz potrošnju energije i materijala, moguće je izbjeći prevelik utjecaj na okoliš u ostalim fazama životnog ciklusa proizvoda kroz implementaciju ekološki prihvatljivijih rješenja.

Rezultati LCA-analize omogućuju rezultate kojima menadžeri mogu donositi bitne odluke vezane uz strateško planiranje, konstruiranje i redizajn procesa i proizvoda. Bitna sastavnica LCA je komunikacija s vladinim i nevladinim organizacijama kako bi se bolje razumio utjecaj na okoliš kroz životni vijek proizvoda [1].

Europska komisija je prepoznala LCA-analizu kao „najbolji okvir za procjenu potencijalnih utjecaja proizvoda na okoliš“ [20].

Propisana je kroz norme Međunarodne organizacije za standardizaciju (engl. *International Organization for Standardization*, ISO), a to su norme ISO 14040 i ISO 14044. Ovim propisima LCA predstavlja metodologiju koja se može primijeniti na svaki proizvod u životima ljudi. LCA-analiza ne referira se na ekonomske i društvene problematike, makar postoje dodaci kojima se i one mogu uračunati.

Temelj je shvatiti utjecaj na okoliš sa svrhom zdravlja okoliša, zdravlja ljudi i smanjenja crpljenja resursa.

### 3. PROBLEMATIKA OTPADNOG AMBALAŽNOG STAKLA

Iako ambalažno staklo predstavlja mogućnost za besprijekorno prikazivanje elemenata održivog razvoja, kružne ekonomije i pametnog gospodarenja otpadom, u Hrvatskoj je očit problem nepravilnog sortiranja različitih vrsta stakla i nepravilnog odlaganja u određenim sredinama. Zato je u naslovu ovog poglavlja upotrijebljen naziv „problematika“ jer rješenja i odlične prakse iz drugih zemalja postoje te zakoni koji propisuju pravilna ponašanja pa je ovo rezignirajuće ponašanje većim dijelom neopravdano.

Prirodno staklo postoji još od početaka vremena. Nastalo je uslijed taljenja stijena kao posljedica pojava visokih temperatura, poput vulkanskih erupcija, udara groma ili udara meteorita, dovoljno brzim ohlađivanjem rezultirajući staklastom, amorfnom strukturom nalik tekućini. Staklo je jedan od najstarijih, najupotrebljivijih i najsvestranijih materijala kojeg je čovjek stvorio, s dokazima o njegovoj proizvodnji u drevnom Egiptu koji datiraju iz najmanje 3000 god. pr. Kr. S druge strane, legende kažu da su staklo otkrili Babilonci, Feničani i Egipćani oko 5000 godina prije Krista. Doduše, to nikad nije potvrđeno kao povijesna činjenica, iako su na tim prostorima pronađeni različiti ukrasni predmet i posude od stakla [23].

#### 3.1. Mikrostruktura stakla

Općenito se materijali klasificiraju u četiri skupine prema karakterističnim svojstvima:

- metali
- keramike
- polimeri
- kompoziti.

Prema kemijskom sastavu razlikuju se:

- natrijevo staklo
- olovno staklo
- alumosilikatno staklo
- borosilikatno staklo
- kremeno staklo.

Staklo pripada skupini keramike, a keramika je anorganski materijali dobiven kombinacijom metala i nemetala, što se zbog atomskih veza naziva ionska keramika (npr. MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN, ZrO<sub>2</sub>) te kombinacijom nemetala, što se zbog atomskih veza naziva kovalentna keramika (npr. SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) [24].

Najčešće se u strojarскоj literaturi nalaze keramike koje se nazivaju nitridi, boridi, oksidi i karbidi, koji imaju široku primjenu u raznim tehnologijama za obradu materijala.

Prema karakterističnim svojstvima, stakla se mogu klasificirati kao keramika zbog ionskih ili kovalentnih veza, no mikrostrukturno se razlikuju. Keramike imaju izrazito orijentiranu, uređenu, kristalnu strukturu, a stakla neorijentiranu, neuređenu, amorfnu strukturu.

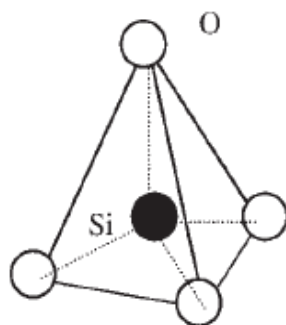
Mikrostruktura stakla izgleda poput zamrznute tekućine jer prilikom ohlađivanja viskoznost taline postaje toliko visoka da se atomska gibanja u potpunosti uspore što rezultira staklastom mikrostrukturom [24].

Takva mikrostruktura je neravnotežna zbog toga jer se talina hladi na takav način da pri prelasku temperature likvidusa ne dolazi do kristalizacije već zamrzavanja, a konačna temperatura mora biti dovoljno niska da je pokretljivost atoma dovoljno mala kako ne bi došlo do prekrystalizacije u stabilniju kristalnu mikrostrukturom.

Dakle, staklo je anorganski čvrsti materijal koji ima atomsku strukturu primjerenu tekućim tvarima iz razloga što se dobiva brzim hlađenjem taline te očvršćivanjа u uvjetima u kojima ne kristalizira.

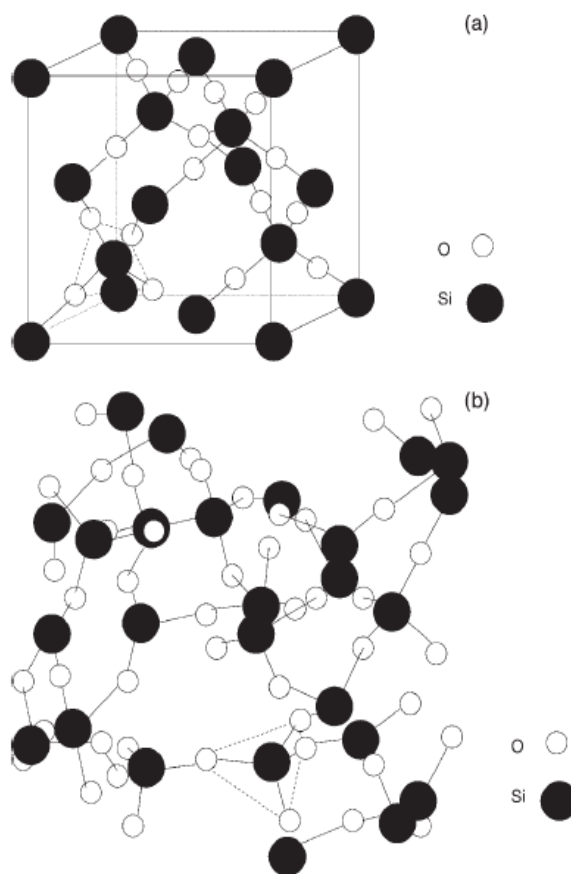
U pogledu rasporeda i izgleda atomske strukture najveća je količina stakla građena od tetraedara silicijeva dioksida sa silicijevim atomom u središtu i kisikovim atomima u kutovima [Slika 15]. Osnovne sirovine za proizvodnju stakla dolaze u „neograničenim“ količinama iz okoline, a to su po kemijskom sastavu kvarcni pijesak (SiO<sub>2</sub>, silicijev dioksid), vapnenac (CaCO<sub>3</sub>, kalcijev karbonat), soda (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, natrijev karbonat), dolomit (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, kalcijev magnezijev karbonat) i glinenac („feldšpat“, njem. *Feldspat*, aluminijski silikati u spoju s npr. natrijem, kalijem, kalcijem ili željezom), a zajedno tvore strukturu natrijeva-kalcijeva-silikatnog stakla. Naglasak je na ovoj vrsti stakla jer se od njega proizvodi staklena ambalaža, a oksidi koji tvore njegovu strukturu prikazuje [Tablica 2].

Silicij se nastoji spojiti s četiri atoma kisika, a može se primijetiti da se spajanjem više tetraedara svaki atom kisika spaja s dva atoma silicija [Slika 16] [24].



**Slika 15. Elementarni tetraedar [24]**

Karakteristične se elementarne jedinice spajaju u vrhovima tetraedra, a dva se tetraedra mogu spojiti samo na jednom vrhu. No, posljedično su svi vrhovi podijeljeni s ostalim elementarnim strukturnim jedinicama. Ovakve strukture mogu biti građene na razne načine, a razlikuje se uređena mikrostruktura (kristalna) i neuređena (amorfn), koja je tipična za stakla. [Slika 16a] prikazuje kristalnu, predvidivu i ponavljajuću strukturu, a [Slika 16b] prikazuje amorfnu, slučajnu, ne ponavljajuću i nepredvidivu strukturu. U obje je vidljivo da je kisikov atom spojen s dva silicijeva atoma i da tvore Si-O-Si lance.



**Slika 16. Kristalna (a) i amorfn struktura (b)  $\text{SiO}_2$  [24]**



Uslijed visokog tališta  $\text{SiO}_2$  (1713 °C) potrebno je modificirati strukturu određenim alkalijским i zemnoalkalijским oksidima kao što je natrijev oksid ( $\text{Na}_2\text{O}$ ).  $\text{Na}^+$ -ion doprinosi smanjenju viskoznosti, a time je olakšan tok taline i olakšano je formiranje staklenih proizvoda na nižim temperaturama. Vapnenac ( $\text{CaO}$ ) generira zemnoalkalijške ione ( $\text{Ca}^{2+}$ ), koji su relativno nepokretni, te smanjuju difuziju drugih elemenata, pogotovo alkalijških i tako povećavaju kemijsku postojanost stakla [24].

**Tablica 2. Kemijski sastav bijele, zelene i smeđe staklene ambalaže [25]**

Udio u masi, %	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Ostalo
Bijelo	72,6	13,7	0,5	11,0	0,1	1,6	<0,05	0,2 $\text{SO}_3$ ; 0,1 $\text{TiO}_2$
Zeleno	72	15,1	-	8,4	2,1	1,1	0,4	0,02 – 0,06 $\text{SO}_3$ ; 0,25 $\text{Cr}_2\text{O}_3$
Smeđe	72,7	13,6	1,0	10,0	-	1,9	0,2	0,05 – 0,08 $\text{SO}_3$

### 3.2. Karakteristična svojstva stakla

Promatrajući okolinu i proučavajući povijest stakla vidljivo je da staklo ima toliko raznoliku i čestu upotrebu da ga ljudi ponekad podcjenjuju zbog navike na prednosti koje generira. Koristi se za umjetnine, boce i staklenke, posuđe, laboratorijsku opremu, optičku opremu, u građevinskom sektoru, razne vrste prijevoznih sredstava, solarne panele, toplinske izolacije, ekrane, kao ojačala u kompozitima, u medicini, kozmetici itd., pa je očito da je ovaj materijal odigrao ključnu ulogu u mnogim dostignućima u znanosti i tehnologiji u svakom aspektu ljudskog života.

Zbog svojih odličnih svojstava staklo se nametnulo kao vodeći materijal u području industrije pića i prehrane, farmaceutske industrije i kozmetičke industrije. Posebice zanimljivo za ovaj rad je područje staklene ambalaže, a ono osigurava da proizvod ostane svjež, postojan i da zadrži željena svojstva okusa i mirisa jer staklo ne ispušta ništa u proizvod i ne dopušta izlazak tvari koje bi smanjile kvalitetu proizvoda.

Zbog jakih ionskih i kovalentnih veza, staklo je vatrootporno, električki i toplinski nevodljivo, visoke krutosti i granice tečenja, a time i niske dopuštene elastične i plastične deformacije do krhkog loma. Stakla pokazuju visoku kemijsku i toplinsku otpornost, ali izrazitu krhkost, tj.

nisku žilavost i u pravilu nisku otpornost na toplinski šok. Osnovna fizikalna i mehanička svojstva prikazuje [Tablica 3].

**Tablica 3. Fizikalna i mehanička svojstva ambalažnog stakla [25]**

Mjerna veličina	Mjerna jedinica	Ambalažno staklo
Gustoća	kg/m <sup>3</sup>	2500
Koeficijent toplinskog rastezanja	1/K	$92 \times 10^{-7}$
Koeficijent toplinske vodljivosti (100 °C)	W/(m · K)	1,1
Specifičan toplinski kapacitet	kJ/(kg · K)	0,87
Modul elastičnosti	GPa	Teoretski: 72
Temperatura oblikovanja	°C	990
Temperatura mekšanja	°C	700
Temperatura popuštanja	°C	520 - 540
Indeks loma	-	1,52

Staklo se koristi kao ambalaža zbog brojnih pozitivnih karakteristika:

- kemijski je inertno (voda, kiseline osim fluorovodične, lužine, soli, alkohol i druga organska otapala)
- u potpunosti se može reciklirati
- boce se mogu ponovo puniti
- ne zagađujuće za okoliš ako se odbaci u prirodu
- sirovine su dostupne u velikim količinama
- UV-filtracija i poželjna optička svojstva
- niska propusnost plinova
- visoka unutarnja čvrstoća
- higijensko.

### 3.3. Sastav smjese ambalažnog stakla

Općenito se sastav stakla bira prema ovim zahtjevima [25]:

- vrsta proizvoda
- vrsta proizvodnog postupka
- troškovi.

Sastav materijala smjese te njihova prethodna i naknadna obrada određuju kakva će buduća svojstva proizvoda biti. Staklena ambalaža je krajnji proizvod stotina složenih tehnoloških postupaka. Svaki kemijski element, tvar ili materijal u smjesi donosi određene prednosti, no donosi i ograničenja, a krajnji je proizvod rezultat optimalnog balansa između navedenih sastojaka. Ambalažno se staklo uz već navedene osnovne elemente sastoji i od raznih dodatnih elemenata, a svi zajedno tvore određenu kombinaciju koja će odrediti krajnja svojstva staklenog proizvoda.

Stakla se sastoje od [25]:

- Oksidi za formiranje strukture:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{GeO}_2$ .
- Oksidi za modificiranje strukture – omogućuju smanjenje viskoznosti staklene taline:  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SrO}$ .
- Prijelazni oksidi – daju staklu stabilnost smanjenjem tendencije za kristalizacijom:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ .
- Sredstva za oksidiranje ili reduciranje staklene taline.
- Sredstva za bistrenje/otplinjavanje – pomažu pri homogenizaciji tijekom taljenja i izbacivanju mjehurića:  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ .
- Sredstva za povećanje brzine taljenja:  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ , stakleni krš, troska.
- Sredstva za nukleaciju.
- Stakleni krš – sekundarna sirovina u proizvodnji staklene ambalaže.
- Bojila.
- Druga sredstva za poboljšanje specifičnih svojstava.

### 3.3.1. Karakteristične boje staklene ambalaže

Ogroman udio proizvedenog stakla je ambalažno staklo, a kako tržište zahtjeva boce i staklenke različitih boja dodaju se različiti metalni kemijski spojevi kao pigmenti ili boje [Tablica 4].

[Slika 17] prikazuje boje u ponudi proizvođača staklene ambalaže, a najčešće su:

- Bijelo staklo – zahtjeva se veoma mala koncentracija drugih elemenata kako bi se reducirala količina nečistoća u staklu koji se sastoji od spojeva željeza.
- Smeđe staklo – u već poznati kemijski sastav dodaju se nikal, željezo, sumpor, ugljik.
- Zeleno staklo – u već poznati kemijski sastav dodaje se krom, željezo i bakar.

Tamnija boja jamči bolju zaštitu od utjecaja svjetla na sadržaj boce.



Slika 17. Boje stakla u ponudi proizvođača staklene ambalaže [26]

Uz ove boje, neki proizvođači mogu proizvesti i određene nijanse plave staklene ambalaže.

Tablica 4. Najbitniji spojevi za dobivanje željene boje staklene ambalaže [25]

Spoj	Ion	Boja
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}^{2+}$	Zelena
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}^{3+}$	Zelena
$\text{CuO}$	$\text{Cu}^{2+}$	Plavozelena
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}^{3+}$	Žućkasta
$\text{MnO}_2$	$\text{Mn}^{3+}$	Ljubičasta
$\text{NiO}$	$\text{Ni}^{2+}$	Smeđa
$\text{Co}_3\text{O}_4$	$\text{Co}^{2+}$	Plava

### 3.3.2. Osnovne sirovine za proizvodnju ambalažnog stakla

Sirovine za proizvodnju stakla mogu biti [25]:

- Mineralnog porijekla – podrazumijeva se dobivanje sirovina iz zemlje ili rudnika, a takva sirovina je jeftina, često onečišćena, upitnog kemijskog sastava, zahtijeva višestruko ispitivanje svojstava, ograničena je kontrola nad procesom i teško je dobivanje sirovina s adekvatnim certifikatima.
- Kemijskog podrijetla – podrazumijeva se dobivanje sirovina kemijskim procesima – skuplje, čišćeg i konstantnog sastava, dovoljno je jednostruko ispitivanje svojstava, moguće je kontrolirati proces i dobivanje sirovine s certifikatom.

[Tablica 5] prikazuje primarne sirovine za proizvodnju staklene ambalaže, a to su kvarcni pijesak, soda, vapnenac, dolomit i glinenac („feldšpat“). Soda smanjuje talište kvarcnog pijeska, a vapnenac i dolomit staklu daju čvrstoću, sjaj i trajnost.

**Tablica 5. Osnovne sirovine za proizvodnju stakla i pripadajući oksidi [25]**

Sirovina	Kemijski sastav sirovine	Pripadajući oksid	Maseni udio oksida u sirovini, %
Kvarcni pijesak	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	99,8
Soda	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	58,5
Vapnenac	CaCO <sub>3</sub>	CaO	56,0
Dolomit	CaCO <sub>3</sub> × MgCO <sub>3</sub>	CaO	30,5
		MgO	21,5
Glinenac („feldšpat“)	K <sub>2</sub> (Na <sub>2</sub> )O - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	68,0
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,5
		Na <sub>2</sub> (K <sub>2</sub> )O	12,8

SiO<sub>2</sub> je glavni element u svim navedenim komercijalnim staklima pa tako i u staklenoj ambalaži, a ponajviše se dobiva iz kvarcnog pijeska. Kvarcni pijesak nalazi se gotovo u svakom dijelu svijeta, a nastaje raznim erozijskim procesima te taloženjem u specifičnim mjestima ovisno o vjetru i vodi koji ga prenose.

S ekonomske perspektive je bitno da ova sirovina, još neprerađena, nije daleko od željenih krajnjih svojstava. Veličina zrna, mineraloški sastav te niska količina nečistoća su najbitniji parametri, no vrlo je rijetko da se ovi parametri zadovolje bez određene prerade. Poželjno je da je veličina zrna između 0,125 mm i 0,5 mm.

Prerada sirovina za proizvodnju stakla se sastoji od [25]:

- smanjenje veličine zrna
- pranje
- prosijavanje
- klasifikacija
- abrazijsko čišćenje (ribanje)
- magnetsko odvajanje
- gravimetrijsko odvajanje
- flotacija
- termičko sušenje i mljevenje.

Stakleni krš se dobiva iz sakupljenog i recikliranog otpadnog stakla, koje se zajedno s glavnim sirovinama ubacuje u peć. U današnjoj proizvodnji staklene ambalaže, zbog svijesti o neodrživosti postojećih procesa i mogućnosti uštede ogromnih količina energije, koristi se i do 90 % staklenog krša u proizvodnji određenih staklenih proizvoda. Glavna prednost uporabe staklenog krša je to što je potrebno puno manje energije za taljenje, a ostale prednosti staklenog krša i njegovo recikliranje biti će objašnjene u sljedećim poglavljima.

[Slika 18] prikazuje stakleni krš, a on može biti:

- Unutarnji stakleni krš – to je krš koji je produkt procesa obrade i proizvodnje staklenih proizvoda.
- Vanjski stakleni krš – to je krš dobiven od sakupljača, prerađivača i dobavljača iz sakupljačke mreže.



Slika 18. Stakleni krš [27]

### 3.4. Prikupljanje i recikliranje otpadne staklene ambalaže

#### 3.4.1. *Temelj zakonodavstva gospodarenja ambalažnim otpadom*

U Hrvatskoj je sustav gospodarenja ambalažnim otpadom uspostavljen i uređen 2006. godine donošenjem Pravilnika o ambalaži i ambalažnom otpadu. Pravilnik propisuje mjere i aktivnosti za odvojeno skupljanje ambalažnog otpada prema vrsti materijala ambalaže, načine korištenja, te zbrinjavanje ambalažnog otpada iz naknada proizvođača i uvoznika za proizvode koji se stavljaju na tržište.

Prema ovom pravilniku za sve vrste ambalaže, a to su staklo, papir, karton, drvo, metal i tekstil, se primjenjuje koncept proširene odgovornosti proizvođača.

Svaki proizvođač i uvoznik koji na tržište stavlja proizvode pakirane u navedenu ambalažu plaća naknadu Fondu za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost bez obzira na količinu naknadno skupljene i reciklirane ambalaže. To je iznos koji obuhvaća buduće troškove sakupljanja, prijevoza i obrade, odnosno kompletne manipulacije ambalažnim otpadom. Fond

s tim sredstvima refundira troškove trgovcima, sakupljačima i prijevoznicima otpadne ambalaže [28], [29].

Sustav prikupljanja ambalaže kojim upravlja Fond dijeli se na [28]:

- **Depozitni sustav:** to je sustav sakupljanja ambalaže od pića za koju je utvrđena naknada od 0,50 kn. Primjenjuje se za ambalažu za piće izrađenu od stakla, polimera i metala i ne uključuje boce manje od 0,20 L.  
Prema Pravilniku, potrošač prilikom kupnje proizvoda uplaćuje određeni polog za kupljen proizvod, a on se potrošaču vraća u trenutku kada potrošač vrati proizvod na mjesto otkupa (trgovine, automatizirani objekti za odlaganje ambalaže).
- **Nedepozitni sustav:** to je sustav sakupljanja ambalaže bez naknade koja se prikuplja putem odgovarajućih spremnika u eko-otocima, u reciklažnim dvorištima te izravno donošenjem sakupljačima koji imaju sklopljen ugovor s Fondom.

#### *3.4.1.1. Naknade za gospodarenje ambalažnim otpadom*

Pravilnikom o ambalaži i otpadnoj ambalaži i Uredbom o gospodarenju otpadnom ambalažom propisano je da su proizvođači i uvoznici dužni prilikom stavljanja proizvoda pakiranih u ambalažu na tržište Republike Hrvatske platiti Fondu za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost (FZOEU) naknadu gospodarenja otpadnom ambalažom i povratnu naknadu.

Naknada prema vrsti ambalažnog materijala koja se plaća za povratne i nepovratne spremnike svih volumena [30]:

- PET, Al-limenke – 410,00 kn/t
- Fe-limenke – 225,00 kn/t
- papir/karton – 375,00 kn/t
- višeslojna kompozitna ambalaža – 750,00 kn/t (osim za pića 410,00 kn/t)
- drvo, tekstil, staklo – 150,00 kn/t
- polimerne vrećice – 1.500,00 kn/t
- ostali polimerni materijali za mliječne proizvode – 410,00 kn/t
- ostali polimerni materijali – 750,00 kn/t.



Proizvođači i uvoznici koji na tržište godišnje stavljaju količine manje od 300 kg staklene ambalaže, 100 kg ambalaže od papira, kartona i višeslojne ambalaže, 50 kg metalne ambalaže, 50 kg polimerne ambalaže, 50 kg drvene ambalaže i 50 kg ambalaže od ostalih ambalažnih materijala, nisu dužni plaćati naknadu gospodarenja otpadom, ali su dužni plaćati povratnu naknadu ako na tržište stavljaju pića [29].

Sljedeća naknada je po jedinici proizvoda prodajne ambalaže u iznosu od 0,10 kuna za pića u jednokratnoj PET, Al/Fe i staklenoj ambalaži volumena jednakog i većeg od 0,2 L. Izuzetak je ambalaža od mlijeka i tekućih mliječnih proizvoda, za koju naknada po jedinici prodajne ambalaže iznosi 0,02 kuna i plaća se od 1.siječnja 2021. [31].

Povratna naknada se plaća po jedinici prodajne ambalaže za sva pića i napitke volumena većeg od 0,20 L u staklenoj, PET, Al/Fe ambalaži. Naknadu plaća proizvođač ili uvoznik te je zaračunava trgovcu na veliko, a on trgovcu na malo. Na kraju teret naknade svakako snosi krajnji potrošač. Kada potrošač vrati ambalažu trgovcu na malo, isplaćuje mu se 0,50 kn po boci. Novac koji je trgovac na malo isplatio krajnjim potrošačima za povrat ambalaže, trgovac na malo potražuje od Fonda. Stopa sakupljanja ambalažnog otpada u sustavu povratne naknade vrlo je visoka i, ovisno o materijalu, kreće se između 72 i 96 %. Osim visoke stope sakupljanja otpadne ambalaže, prednost depozitnog sustava je i nizak stupanj nečistoća koje sadrži tako prikupljena otpadna ambalaža.

Prema Izvješću o gospodarenju otpadnom ambalažom u Republici Hrvatskoj u 2019. godini na tržište Republike Hrvatske stavljeno je 301.099 t ambalaže. Putem sustava FZOEU sakupljeno je 152.682 t ambalažnog otpada, što iznosi 51% količina stavljenih na tržište [32].

U 2019. godini prijavljena je uporaba ukupno 147.198 t ambalažnog otpada, a stopa uporabe ambalažnog otpada je ukupno bila 49%, čime nije ispunjen cilj uporabe koji za 2019. godinu iznosi 60%. Kako su sve količine ambalažnog otpada oporabljene recikliranjem, stopa recikliranja u 2019. godini iznosila je također 49%, što nije bilo dovoljno ni za postizanje cilja recikliranja ambalažnog otpada koji iznosi 55 do 80% [32]. Ciljeve recikliranja ovisno o razdoblju pa time i uporabe prikazuje [Tablica 6].

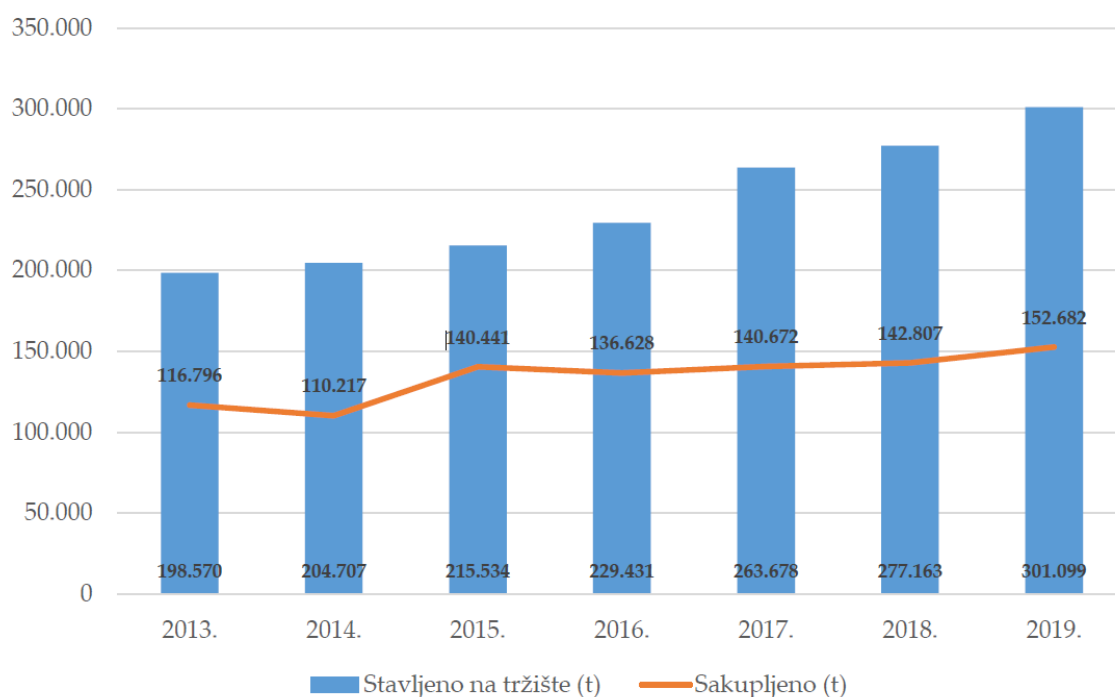
U 2019. godini ukupno je na tržište stavljeno 81.780 t staklene ambalaže, prikupljeno 43.454 t, dok je reciklirano 41.966 t. Ovi iznosi rezultiraju stopom recikliranja od 51% što ne ispunjava iznos od zahtijevanih 60% [32]. Vidljivo je da je prosjek recikliranja staklene ambalaže puno manji od prosjeka EU koji trenutno iznosi 76 %.

**Tablica 6. Ciljevi recikliranja za ambalažni otpad propisani Direktivom (EU) 2018/852 [32]**

	2008.	2025.	2030.
UKUPNA AMBALAŽA	55%-80%	65%	70%
PLASTIČNA AMBALAŽA	22,5%	50%	55%
DRVENA AMBALAŽA	15%	25%	30%
ŽELJEZNA AMBALAŽA	50%	70%	80%
ALUMINIJSKA AMBALAŽA	50%	50%	60%
STAKLENA AMBALAŽA	60%	70%	75%
PAPIRNATA/KARTONSKA AMBALAŽA	60%	75%	85%

Pojedinačni ciljevi stope recikliranja dostignuti su za papir (74%) i plastiku (36%), dok je stopa recikliranja za staklo iznosila 51% od zadanih 60%, za metale 19% od zadanih 50%, a za drvo 3% od zadanih 15% [32].

[Slika 19] prikazuje da su u razdoblju od 2013. do 2019. količina ambalaže i nastalog ambalažnog otpada stabilni i pokazuju blagi rast. U 2019. je potrošnja iznosila 74,1 kg/stanovnik što je porast od 9% u odnosu na godinu prije. Nakon što su u 2015. godini postignuti ciljevi za uporabu i recikliranje ukupnih količina ambalažnog otpada, u narednim godinama bilježi se konstantan pad navedenih stopa, uzrokovan povećanjem potrošnje uz istodobno stagniranje sakupljenih i oporabljenih količina [32].



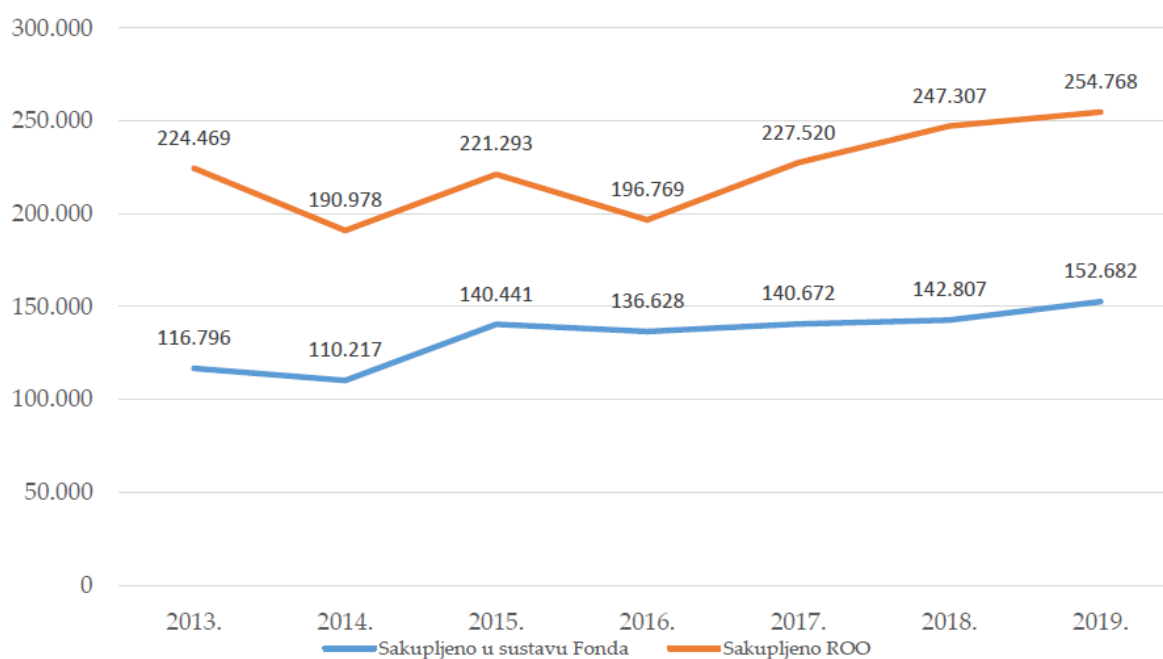
**Slika 19. Količina ambalaže stavljene na tržište i količina sakupljenog ambalažnog otpada u razdoblju od 2013. do 2019. godine u tonama [32]**

Kako bi se dobio potpuniji uvid u cjelokupan sustav gospodarenja ambalažnim otpadom potrebno je napomenuti da se ambalažni otpad sakuplja izvan sustava FZOEU. Podaci su dostupni u Registru onečišćavanja okoliša (ROO). Podatke sukladno Pravilniku o registru onečišćavanja okoliša (NN 87/2015) prijavljuju sakupljači putem obrazaca SO (sakupljanje otpada) i obrađivači otpada putem obrazaca OZO (oporaba/zbrinjavanje otpada) [32].

Prijavljene količine nadmašuju one prijavljene od strane FZOEU, a to je posljedica što dio subjekata koji imaju dozvolu za gospodarenje ambalažnim otpadom nemaju važeći ugovor s FZOEU. Dakle, značajan je dio količina ambalažnog otpada sakupljen i oporabljen u zemlji i susjednim članicama EU izvan sustava kojeg vodi FZOEU.

Fond će troškove refundirati ovlaštenim sakupljačima koji ambalažni otpad voze na obradu ovlaštenim obrađivačima, a svi ostali sakupljači koji prikupljaju ambalažni otpad, a nemaju ugovor s Fondom nemaju pravo na subvenciju od Fonda.

Dakle, iako su proizvođači/uvoznici platili naknade Fondu za svu ambalažu stavljenu na tržište pa i za onu koju prikupe „neovlašteni“ sakupljači, taj se novac „neovlaštenim“ sakupljači ne isplaćuje.



**Slika 20. Ukupno sakupljene količine otpadne ambalaže u sustavu FZOEU i prema podacima prijavljenim u ROO za razdoblje od 2013. do 2019. godine [32]**

[Slika 20. Ukupno sakupljene količine otpadne ambalaže u sustavu FZOEU i prema podacima prijavljenim u ROO za razdoblje od 2013. do 2019. godine. U razdoblju od 2016. do 2018. godine količine sakupljene kroz sustav FZOEU stagniraju dok ukupno sakupljene količine otpadne ambalaže prijavljene u ROO pokazuju oštar uzlazni trend. U 2019. godini u oba sustava bilježi se uglavnom jednaki trend porasta količina u odnosu na prethodnu godinu [32].

Potrebno je homogenizirati sakupljačku mrežu kako bi omogućili što točnije podatke, a time stvarno stanje sustava gospodarenja ambalažnim otpadom.

#### 3.4.1.2. Prihodi i rashodi Fonda

U ovom dijelu rada nastojat će se okvirno približiti iznos sredstava koji otpada za gospodarenje ambalažnim otpadom u RH. S obzirom na to da su dostupni podaci veoma zamršeni, iznosi će se pokazati iz dva relevantna izvora. S obzirom na to da su promjene u ovom segmentu veoma spore, a predviđanja prihoda i rashoda za nadolazeće godine blizu potonjima, mogu se uzeti kao točnima.

U Izvješću o ostvarenju Programa rada Fonda za 2015. godinu navodi se da su prihodi od naknada za ambalažu i ambalažni otpad u 2015. godini iznosili 526.395.921,53 kn (31,35 % od ukupnih prihoda Fonda). Rashodi za ambalažni otpad u 2015. godini iznosili su 483.643.418,26 kn. Nigdje se ne specificira koliko je od tog iznosa uprihodovano od strane depozitnog / nedepozitnog sustava, no okvirno se može zaključiti da je ukupan sustav gospodarenja ambalažnim otpadom održiv [28].

Prema Izvješću o obavljenoj financijskoj reviziji Fonda za zaštitu okoliša i energetske učinkovitost za 2019. godinu prihodi i primici Fonda za 2019. ostvareni su u iznosu od 1.871.341.225,00 kn. U iznosu manjem od iznosa prihoda ostvareni su rashodi za gospodarenje ambalažom i ambalažnim otpadom za 54.801.898,00 kn. Ukupni rashodi za gospodarenje ambalažnim otpadom iznosili su 537.831.235,00 kn. Ako usporedimo 2015. i 2019. godinu vidljivo je da je područje gospodarenja ambalažom, ekonomski održivo.

### ***3.4.2. Prikupljanje otpadne staklene ambalaže na području Općine Đurmanec***

S ciljem što boljeg prikazivanja sustava sakupljanja staklene ambalaže, ukratko će se objasniti generalan način gospodarenja otpadom u općini Đurmanec u Krapinsko-zagorskoj županiji.

Na području Općine Đurmanec provodi se odvojeno prikupljanje:

- Na lokaciji korisnika usluge provodi se sortiranje papira i polimera u plavoj kanti te prikupljanje miješanog komunalnog otpada u zelenoj kanti.
- Na lokaciji „zelenih otoka“ u spremnicima za odvojeno prikupljanje papira (plavi spremnici), stakla (zeleni spremnici), polimera (žuti spremnici) i tekstila smještenih na javnim površinama [**Pogreška! Izvor reference nije pronađen.**].
- Na lokaciji reciklažnog dvorišta smještenog u Poduzetničkoj zoni Krapina Nova u kojem se od stanovništva preuzimaju posebne vrste otpada, uključujući i problematični otpad iz kućanstava, u skladu s Pravilnikom o gospodarenju otpadom.



Slika 21. „Zeleni otok“ na području Općine Đurmanec

Miješani komunalni otpad s područja općine Đurmanec odlaže se na odlagalištu Gorjak. Lokacija odlagališta otpada Gorjak se nalazi u brdovitom i šumskom predjelu na udaljenosti od otprilike 12 km sjeverno od grada Krapine, a otpad se na odlagalištu Gorjak odlaže od 1976. godine.

Na području općine Đurmanec poslovi organiziranog sakupljanja, skladištenja, uporabe, te zbrinjavanja neopasnog otpada odlaganjem odgovornost su trgovačkog društva Krakom d.o.o. iz Krapine na temelju dozvole za gospodarenje otpadom [33].

Otpad prikupljen u plave spremnike i u spremnike na lokaciji „zelenih otoka“ zbrinjava se kod ovlaštenih tvrtki specijaliziranih za recikliranje pojedine vrste otpada.

Upute za pravilno upravljanje otpadnim staklom (nedepozitni sustav):

- Odložiti u adekvatne spremnike u sklopu „zelenih otoka“ – boce i staklenke za prehrambene proizvode bilo koje boje bez čepova i drugih plastičnih ili metalnih dijelova.
- Odložiti u reciklažna dvorišta – keramički i porculanski otpad, laboratorijsko, kristalno ili stolno staklo, vjetrobranska i prozorska stakla, kućna ogledala, vatrostalna stakla, staklo rasvjetnih tijela, bočice od parfema, lakovi za nokte i dr.

- Isprati boce i staklenke da bi se olakšao proces recikliranja – svaki materijal koji nije staklo, a građani se ipak odluče odložiti ga u spremnik namijenjen staklenoj ambalaži, produžuje i otežava proces recikliranja zbog potrebe naknadnog odvajanja tih materijala. U nekim slučajevima poduzeća za recikliranje ne žele primiti takav stakleni krš.

### 3.4.3. *Vetropack Straža kao pionir u recikliranju stakla*

Do prethodnom dijelu ovog završnog rada se teoretski pristupalo globalnoj problematici kružnog gospodarenja resursima, a kako bi se pokazao odličan primjer da se može i mora razvijati u skladu s izazovima današnjice, u nastavku rada navodi se primjer uspješne tradicionalne hrvatske podružnice Vetropack Straža d.d. u mjestu Hum na Sutli [Slika 22], u Krapinsko-zagorskoj županiji, članice Vetropack grupe, koja, osim u Hrvatskoj, ima podružnice u još sedam zemalja.

Vetropack Straža d.d. proizvodi, prodaje i distribuira staklenu ambalažu na tržištima Hrvatske, Slovenije, Bosne i Hercegovine, Srbije, Crne Gore, Sjeverne Makedonije, kao i na tržištima ostalih zemalja jugoistočne Europe. Nude sveobuhvatan asortiman prilagođen regionalnim potrebama u više od 2500 različitih proizvoda. Kao jedini hrvatski proizvođač ambalaže, najvažniji su dobavljač staklene ambalaže domaćoj industriji pića i namirnica.



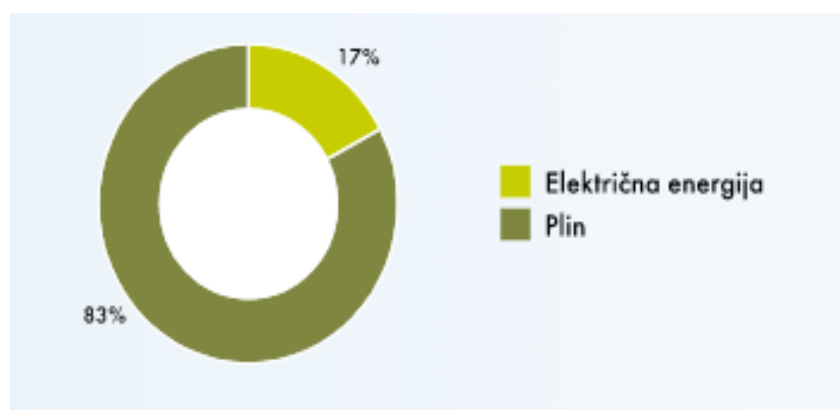
Slika 22. Vetropack Straža d.d. [34]

Vetropack je započeo s recikliranjem stakla u Švicarskoj sedamdesetih godina 20. stoljeća i time pokrenuo uspješnu priču savjesnog gospodarenja sirovinama i energijom, što za posljedicu stvara ekonomsku, okolišnu i društvenu vrijednost, a to je u skladu s modelom tri stupa održivosti, koji predstavlja osnovu održivog razvoja.

Zbog korištenja staklenog krša kao sekundarne sirovine u smjesi materijala za proizvodnju staklene ambalaže europska je ambalažna industrija u zadnjih 25 godina smanjila emisije ugljičnog dioksida i opterećenje okoliša otpadom za 74 % [35].

Staklarska industrija je specifična jer predstavlja neprestani tijekom rada što zahtjeva ogromne količine energije. Kao glavni izvor energije koristi se zemni plin (oko 83 %), a ostatak se pokriva električnom energijom [Slika 23].

Procesom recikliranja Vetropack smanjuje potrošnju energije tijekom proizvodnje stakla za više od 20 %, no tu se ne staje. Vetropack grupa će nastojati do 2030. godine smanjiti emisije za još 30 %, ulagati u modernija, tehnološki naprednija rješenja, osigurati da prijevoz robe bude u skladu s održivim razvojem i dr.



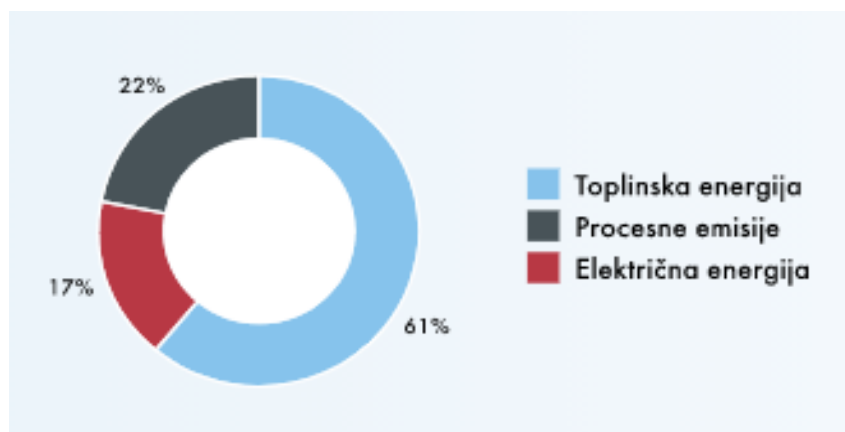
**Slika 23. Izvori potrebne energije za proizvodnju stakla u Vetropacku [35]**

Vetropack Straža prominentno prilazi energetskej problematici, što je vidljivo kroz velika ulaganja u energetske učinkovitost sustava. 2021. godine puštena je u rad nova staklena peć (ukupno ih je sad tri), koja ima veći kapacitet od prethodne, a uz to za 14 % smanjenu potrošnju energije. Činjenica je da na toplinsku energiju koja je potrebna za rad peći otpada više od 60 % ukupnih emisija stakleničkih plinova u proizvodnji [Slika 24]. Gradnja peći trajala je osam i pol tjedana uz pomoć vanjskih suradnika kojih je na dnevnoj bazi bilo više od 200. Ovo je



velika i značajna investicija kojom Vetropack Straža sada proizvodi više od 960 tona staklene ambalaže dnevno [36].

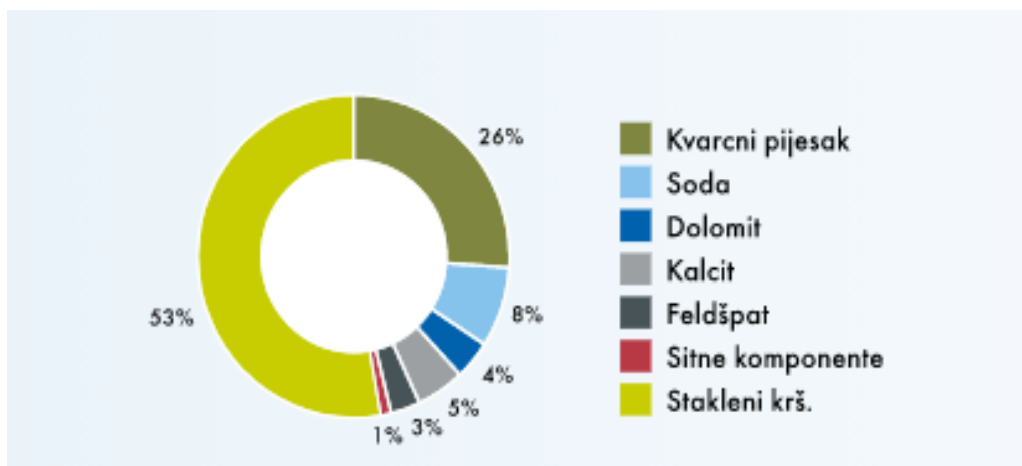
Vetropack grupa nastoji smanjivati masu staklene ambalaže, a da se pritom ne gubi na bitnim svojstvima pa je danas staklena ambalaža lakša za 40 % u odnosu na prije 20 godina. To je bitno jer manja masa znači manje potrebnih sirovina, energije, emisije plinova i smanjenje ukupnih troškova [35].



**Slika 24. Izvori GHG-emisija u Vetropacku [35]**

Uspješna je tvornica 2015. godine pustila u rad filter za pročišćavanje otpadnih plinova, a u 2019. godini investiralo se u fotonaponske ćelije koje proizvedu oko 1000 MWh energije svake godine. Ovo su primjeri korištenja tehnologija generiranih iz koncepta održivog razvoja.

U Vetropack Straži trenutno je omjer korištenih sirovina približno prema [Slika 25], no s neprestanim razvojem poduzeća nastoji se povećati udio staklenog krša. Stopa recikliranog staklenog krša bila bi veća kada bi institucije, tvrtke i građani pravilnije sakupljali ambalažno staklo, koje nažalost ponekad završava i na odlagalištima komunalnog otpada.



**Slika 25. Okviran omjer primarnih i sekundarnih sirovina u Vetropacku [35]**

Ovaj prikaz se odnosi na cijelu grupu, dok je u nekim podružnicama udio staklenog krša i do 83 %. Općenito za proizvodnju bijelog i smeđeg stakla može se koristiti do 60 % staklenog krša, a za proizvodnju zelenog i do 100 % ako je stakleni krš propisane kvalitete.

Vetropack grupa zapošljava više od 3800 zaposlenika, a to su staklari, dizajneri stakla, tehnolozi, operateri, statističari i strojari, koji su zaduženi za implementiranje novih proizvodnih tehnologija, partnersko savjetovanje kupaca, dizajniranje, razvoj i kontrolu kvalitete širokog asortimana proizvoda. Oni podešavaju, kontroliraju i ispituju certificirane korake proizvodnje (ISO, FSSC) i time osiguravaju najvišu kvalitetu u proizvodnji.

Recikliranjem staklene ambalaže generiraju se zanimljive i značajne brojke vezane uz bitne gospodarske sastavnice, a to je u EU ušteda više od 12 milijuna tona sirovina godišnje, izbjegavanje ispuštanja sedam milijuna tona CO<sub>2</sub>, što je kao da se ukloni četiri milijuna automobila iz prometa. Stope recikliranja stakla su u stalnom rastu, a na razini EU iznosi trenutno oko 76 %, što ga čini jednim od vodećih materijala kružnog gospodarstva [37].

Vetropack stvara jasna pravila kojima se zahtijeva od zaposlenika da se s otpadom postupa u skladu sa Zakonom o održivom gospodarenju otpadom. Od zaposlenika se zahtijeva sortiranje na mjestu nastanka u za to predviđene kontejnere koji su smješteni unutar i izvan tvornice. Razlikuju se spremnici za otpadni papir, otpadnu PE-foliju, otpadne metale, otpadne kabele, otpadnu gumu, otpadno drvo, nesortirani otpad te opasan otpad.

#### **3.4.4. Recikliranje staklene ambalaže**

Arheološki dokazi o recikliranju stakla pronađeni su na lokalitetima koji potječu iz ranijih dana postojanja Bizantskog Carstva i kasnijeg Rimskog Carstva, no u novije doba recikliranje stakla

započelo je u većim razmjerima 70-ih godina prošlog stoljeća uzrokovano zabrinutošću za energetske sigurnost.

Ponovna upotrebljivost i recikliranje stakla najizraženija je kod različitog spektra ambalaže, a to su spremnici koji najkvalitetnije spremaju i čuvaju određeni proizvod na najduži mogući period. Posljedično s time, proizvođači i vlade su shvatiti da bi se uštede u obliku energije i resursa mogle ostvariti boljim skupljanjem, ponovnom upotrebom ili recikliranje staklene ambalaže.

Recikliranje je ponovna prerada materijala na kraju životnog vijeka proizvoda te njihovo vraćanje u lanac opskrbe. Takav reciklirani materijal naziva se „sekundarni“, za razliku od „primarnog“ materijala koji se vadi iz okoliša. Uvođenje otpadnog stakla natrag u lanac zajedno sa sirovinom za proizvodnju ambalaže uzrokovat će njihovo taljenje i miješanje, a ovaj postupak može se ponavljati beskonačno mnogo puta bez gubitka bitnih svojstava.

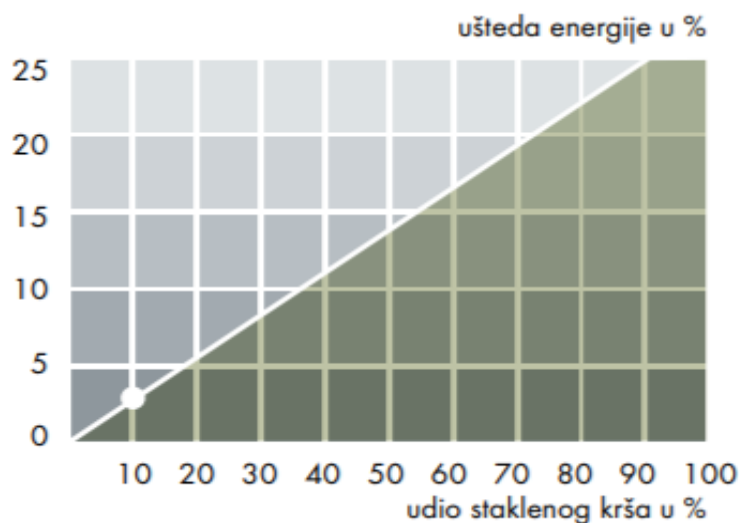
Staklo je materijal koji se jednostavno reciklira jer se može jednostavno uzastopno rastaliti i iskoristiti za iste početne proizvode s jednakim karakteristikama, što predstavlja zatvorenu petlju recikliranja (engl. *closed-loop recycling*). Kako bi se odbacilo što manje materijala potrebno je koristiti i alternativne metode otvorene petlje recikliranja (engl. *open-loop recycling*), gdje se stakleni spremnik koristi za druge namjene [1].

Kako bi se povećale stope recikliranja i smanjilo onečišćenje okoliša potrebne su promjene u društvenom smislu u početnim koracima recikliranja, dok su promjene u tehničkom smislu potrebne u kasnijem razdoblju, kako bi se poboljšala energetska efikasnost i okolišna bilanca.

Statistički podaci o otpadnoj staklenoj ambalaži:

- Glavni izvor stakla za recikliranje u EU je otpadna staklena ambalaža, koja iznosi 65 % ukupno proizvedenog stakla prema istraživanju iz 2014. godine [14].
- U prosjeku u EU se reciklira oko 76 % ambalažnog stakla, a novoproducirana ambalaža u prosjeku ima 52 % otpadnog staklenog krša [14].
- Prema [38], u Sjedinjenim Američkim Državama se godišnje odbaci 11 milijuna tona staklenih proizvoda od čega je reciklirano samo 32 do 34 %. Približno 2,7 milijuna tona se reciklira za dobivanje staklene ambalaže, a 1 milijun za proizvodnju staklenih vlakana, prema podacima za 2017. godinu.

- Ambalaža čini oko 90 % odbačenog stakla u masi jer je više od 60 % proizvedenih staklenih proizvoda staklena ambalaža. Visoki udio je posljedica kratkog životnog vijeka staklene ambalaže u odnosu na druge staklene proizvode [38].
- Više od tone primarnih sirovina je uštedeno za svaku tonu recikliranog ambalažnog stakla, oko 580 tona emisija CO<sub>2</sub> kroz cijeli opskrbeni lanac, zagađenje zraka smanjeno je za 20 % i zagađenje vode za 50 % [3].
- Recikliranjem jedne boce uštedjet ćemo toliko energije koliko je potrebno žarulji od 60 W da svijetli 4 sata, računalu da radi 30 minuta, a televizoru 20 minuta [39].
- Sirovina za zelenu staklenu ambalažu može imati maksimalno 90 % , a smeđe i bijelo staklo 60 do 70 % otpadnog staklenog krša [1].
- [Slika 26] prikazuje linearnu vezu između udjela staklenog krša i uštede energije, tj. za svakih 10 % staklenog krša potrošnja energije manja je za 3 %, a emisije ugljičnog dioksida smanjene za 7 % [40].



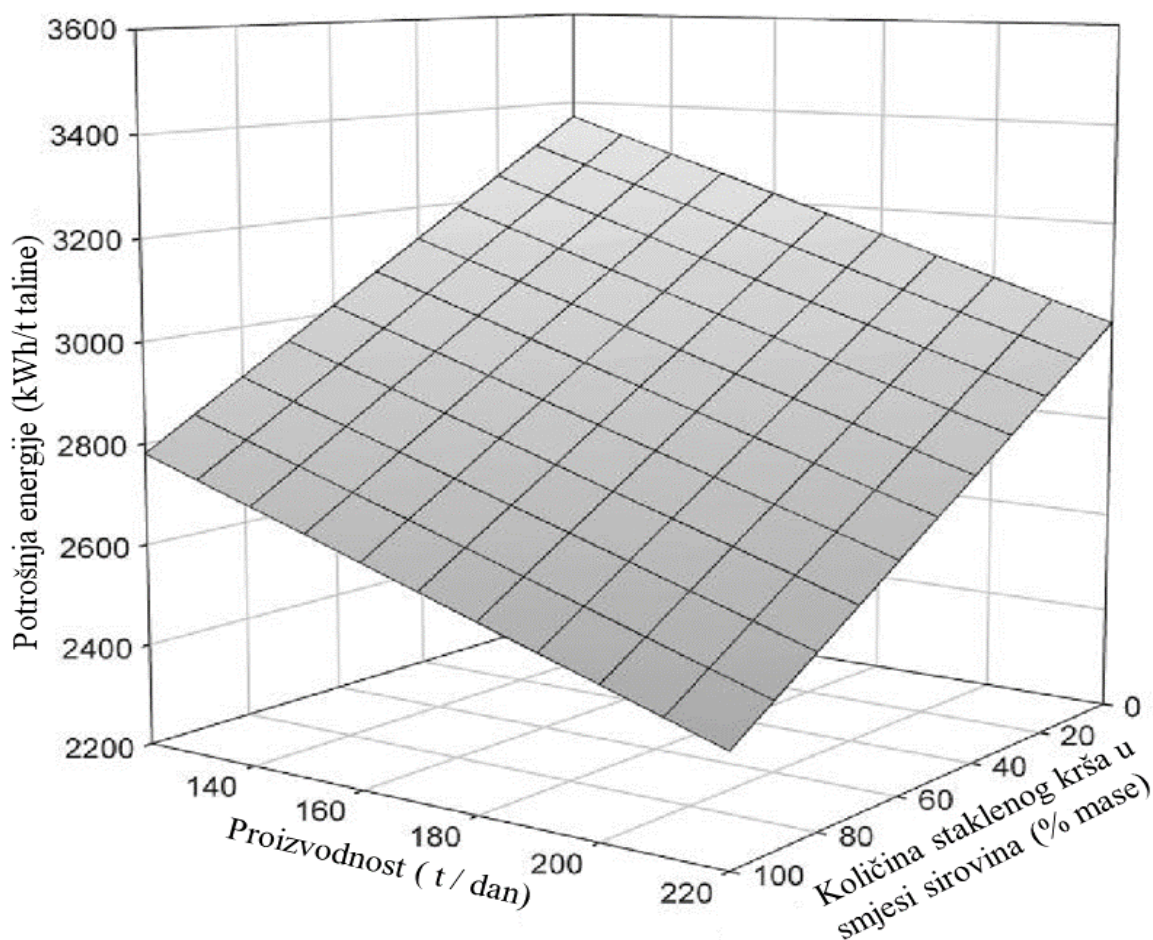
**Slika 26. Ušteta energije ovisno o udjelu staklenog krša [40]**

Kvaliteta potrebnog staklenog proizvoda definira može li se recikliranje stakla koristiti za određeni proizvodni proces. Na primjer, uključivanje otpadnog stakla u proizvodnju ravnog stakla nije uvijek moguće zbog strogih zahtjeva u smislu čistoće sirovina potrebnih za postizanje željenih optičkih svojstava. Općenito, nabava staklenog krša odgovarajućeg sastava poželjna je za proizvođače, ali kako bi se provelo pravilno recikliranje potrebno je sortirati staklo prema vrstama. Kod proizvodnje ambalažnog stakla potrebno je sortiranje i po bojama

jer svaka vrsta stakla (bijelo, zeleno i smeđe) može sadržati ograničenu količinu staklenog krša druge boje.

Sirovine za proizvodnju staklene ambalaže zahtijevaju toplinsku energiju za taljenje i toplinsku razgradnju. Potrebno je zagrijati peć na temperaturu od 1400 do 1600 °C. Iako uključivanje krša ne utječe na potrebu za temperaturom navedenih iznosa, svakako smanjuje količinu potrebne energije zbog ponašanja krša na povišenim temperaturama i to za trećinu. Naime, potrebno je dovesti toplinsku energiju za povišenje temperature na iznos koji je dovoljan da se stakleni krš rastali, dok se za ostale sirovine (soda, vapnenac, kvarcni pijesak) mora osigurati dodatna energija kako bi se toplinski razgradili.

[Slika 27] prikazuje kako se s povećanjem udjela staklenog krša u smjesi sirovina smanjuje potrošnja energije i povećava stopa proizvodnosti.



Slika 27. Utjecaj količine staklenog krša na potrošnju energije i proizvodnost [1]

Sortiranje staklene ambalaže prema boji nastoji se postići adekvatnim zakonodavstvom zahtijevanjem od javnosti sortiranje boca prilikom njihovog povratka. Iz potrebe za sortiranjem razvila se automatizirana oprema, koja je u stanju identificirati nepoželjne čestice i izbaciti ih pomoću zračnih mlaznica, a pojedine tehnologije će biti objašnjene u kasnijem dijelu završnog rada. Ti postupci su potrebni jer se unutar staklenog krša nalaze brojne druge nepoželjne čestice materijala koji se koriste za zatvaranje i etiketiranje staklene ambalaže. To su najčešće razni metali, polimeri i papir, dok se nerijetko može pronaći kamenje, keramika i druge vrste stakla, kao što je borosilikatno staklo, koje se ne može koristiti u ambalažnoj industriji.

U EU pokretač napretka su razne direktive Europskog parlamenta i Vijeća, kao što je Direktiva o ambalaži i ambalažnom otpadu iz 1994. godine, te direktive iz drugih sektora koje su potaknule rast recikliranja stakla, npr. Direktiva o otpadnoj električnoj i elektroničkoj opremi iz 2003. godine te Direktiva o otpadnim vozilima iz 1997. godine [1].

Recikliranje u zatvorenoj petlji staklene ambalaže ima brojne ekološke benefite koji su u skladu s principima održivog razvoja:

- Vraćanje mineralnih resursa natrag u ciklus proizvodnje – nije od presudne važnosti zbog činjenice da mineralnih resursa koji se koriste za proizvodnju stakla ima u izobilju.
- Smanjenje količine otpada – staklo je kemijski inertno, a to znači da se neće otopiti i kemijski reagirati u normalnim uvjetima odlaganja na odlagalištima. Dakle, neće se dogoditi situacija, kao s opasnim i otrovnim materijalima, da se materijal razgradi, generira stakleničke plinove ili izluči štetne tvari koje bi mogle ugroziti kvalitetu podzemnih voda i atmosfere. Staklo ne izgara, pa njegovo korištenje u postrojenjima za stvaranje energije iz otpada neće polučiti nikakve rezultate.
- Smanjenje zagađenja i troškova.
- Smanjenje potrebne energije za proces proizvodnje staklene ambalaže.

Postupak recikliranja stakla konceptualno će se pojasniti na primjeru tvrtke Vetropack Straža d.d. [Slika 28] prikazuje tijek recikliranja otpadne staklene ambalaže koja započinje s ljudima. Ljudi kupuju proizvod pakiran unutar staklene ambalaže. Nakon što se popije piće, odlučuje se hoće li se vrijedan otpad baciti u neadekvatna odlagališta te mjesta kao što su polja, šume i potoci ili će se u slučaju povratne ambalaže vratiti na prodajno mjesto i dobiti povrat novca, a slučaju nepovratne ambalaže odložiti u jedan od eko-otoka u lokalnoj zajednici. Kako bi se

produžio ili ponovio životni vijek staklenog proizvoda, potrebno ga je reciklirati, a to znači organizirano sakupiti staklenu ambalažu koja se više ne koristi i ponovno preraditi u novi proizvod. Odvojeno prikupljeno otpadno ambalažno staklo zbrinjavaju poduzeća koja su ovlaštena za sakupljanje i odvoz te ga dostavljaju u Vetropack ili drugo prerađivačko poduzeće. U Hrvatskoj se za preradu staklenog krša, uz Vetropack, brine i poduzeće Unija Nova.



Slika 28. Kružni tok staklene ambalaže [39]

Dakle, Vetropack Straža nabavlja dvije vrste otpadnog staklenog krša. Nečisti i čisti stakleni krš iz Hrvatske i susjednih zemalja.

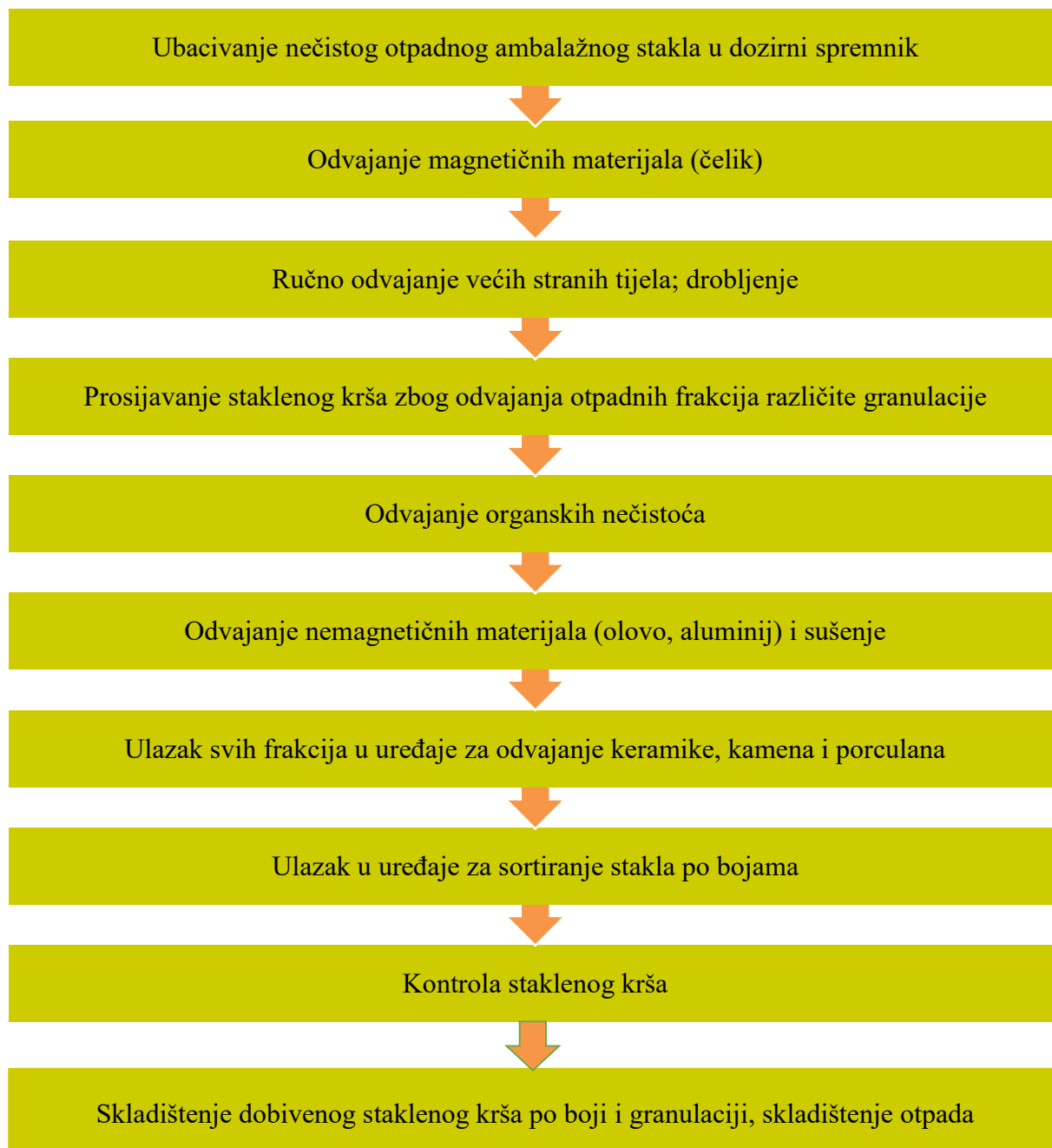
Bitno je spomenuti da trenutno relativno niski udio staklenog krša dolazi iz Hrvatske, što djelomično ukazuje na nedostatke domaćeg sustava skupljanja staklene ambalaže.

Sve sirovine koje se dostave moraju proći kroz kontrolu određenih fizikalnih i kemijskih svojstava, kako bi se osigurala što bolja kvaliteta proizvoda te što manje popratnih problema i nepravilnosti tijekom proizvodnje. Dospjeli stakleni krš radnik pregleda vizualno kako bi utvrdio je li staklo ambalažnog porijekla i odgovarajuće boje. Kontrolor ulazne kvalitete pregleda stakleni krš i kategorizira ga u četiri skupine ovisno o kvaliteti.

Zatim se stakleni krš skladišti u veliko natkriveno skladište, kako bi bio izvan utjecaja kiše. Poželjno je da je krš što manje mokar jer sušenje u kasnijem dijelu recikliranja zahtjeva dodatnu

energiju. Stakleni krš se strojevima ubacuje u dozirni spremnik, koji vodi stakleni krš na pokretnu traku.

[Slika 29] prikazuje princip recikliranja otpadnog krša u Vetropacku, no napominje se da postoji mogućnost i drugačijeg poretka postupaka i da u okviru ovog završnog rada neće sve tehnologije biti detaljno objašnjene.

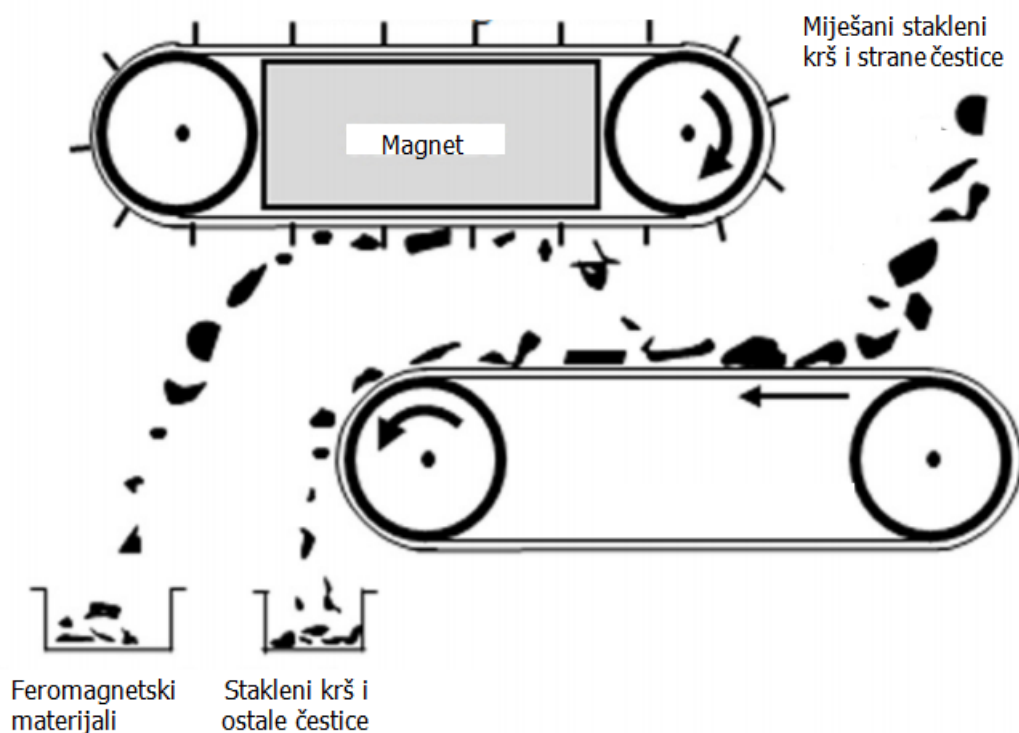


**Slika 29. Princip recikliranja staklenog krša u Vetropacku**



### 3.4.4.1. Odvajanje magnetskih materijala

Stakleni krš se bagerom ubacuje u dozirni spremnik koji usmjerava krš na pokretnu traku, a zatim se izbacuju feromagnetski materijali snažnim magnetima [Slika 30].



**Slika 30. Princip odvajanja feromagnetskih materijala [41]**

Potom se ručno izuzimaju veće nečistoće poput papira i kartona. Nakon što je sakupljeni stakleni krš prošao, često, vrlo daleki put od mjesta sakupljanja do obrade u Vetropacku, jedan dio krša je premale granulacije (manje od 7 mm) te se on izuzima uz pomoć vibracijskih sita, a ostatak se usitnjava na adekvatnu granulaciju, koja iznosi 7 do 60 mm. Nakon usitnjavanja staklenog otpada postoji više frakcija krša, pa tako postoji i više pokretnih traka koje vode krš kroz ostale korake obrade. Abrazijom usitnjenog krša uslijed kotrljanja pri prolasku kroz pužni transporter odvajaju se sa stakla lakše frakcije, poput etiketa, papira, polimera, pluta i slično, koje se zatim pomoću zračnog vrtloga (ciklona) izdvajaju iz staklenog krša.

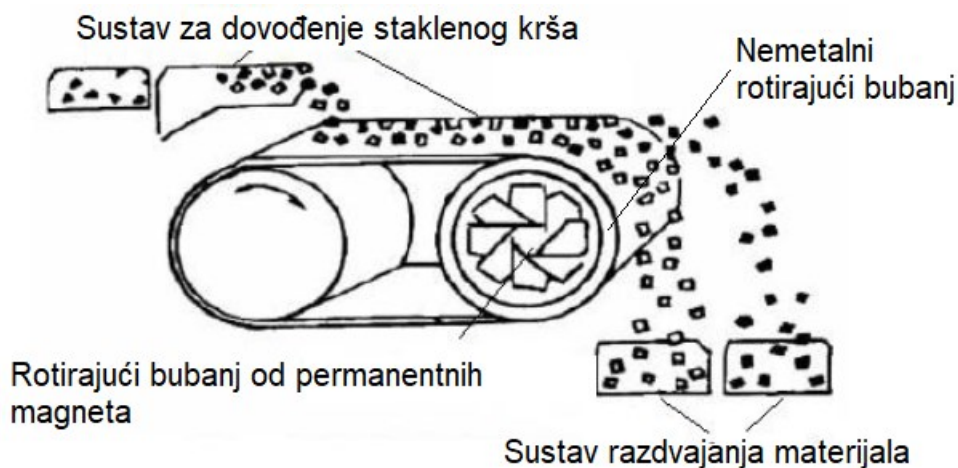
### 3.4.4.2. Odvajanje nemagnetskih materijala

Nemagnetski materijali, a to je u slučaju staklenih boca najčešće aluminij koji se koristi za čepove, izuzimaju se pomoću vrtložnih struja (engl. *eddy current separator*), a to prikazuje [Slika 31].

Rad ovog separatora se zasniva na principu elektromagnetske indukcije. Najvažniji dio separatora je permanentni magnet, koji se sastoji najčešće od legure željeza, neodimija i bora, složenih u tetragonalnu kristalnu jediničnu rešetku. Neodimijski magneti su najjači komercijalno dostupni magneti, što znači da ima najjača magnetska svojstva kao što su:

- Magnetska remanencija ili zaostali magnetizam, koji pokazuje zaostalu magnetsku indukciju u materijalu nakon prestanka djelovanja vanjskog magnetskog polja kojim se nastoji magnetizirati materijal.
- Magnetska koercitivnost pokazuje otpor sada već magnetiziranog materijala da se uslijed vanjskog magnetskog polja suprotnog smjera od početnog taj materijal demagnetizira.
- Curijeva temperatura je temperatura na kojoj magnet gubi magnetska svojstva.

Rotirajući permanentni magnet odvojen je od nosivog bubnja koji zajedno s trakom prenosi materijal. Odvojenost je potrebna jer se magnet rotira puno većom brzinom od brzine kretanja nosivog bubnja i pokretne trake, kako bi se moglo stvoriti promjenjivo magnetsko polje, tj. promjenjivi magnetski tok.

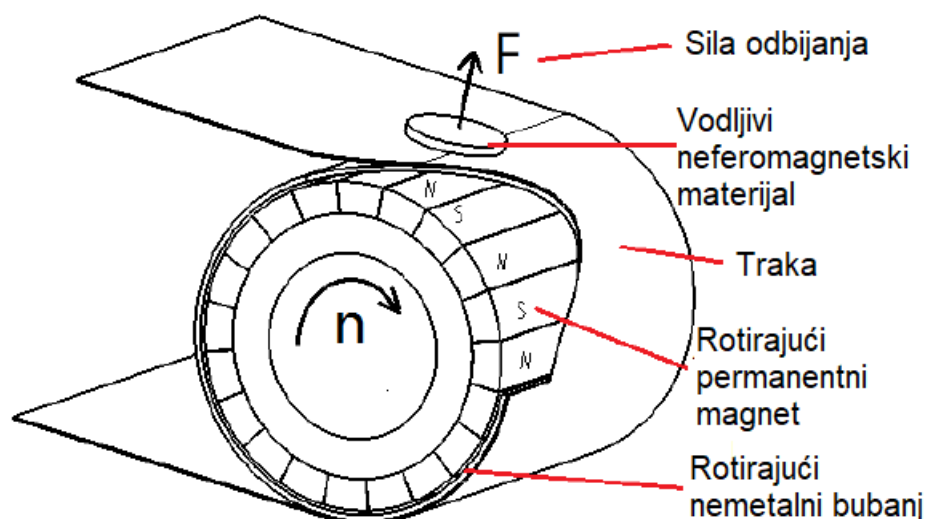


Slika 31. Princip rada separatora vrtložnim strujama [42]

Prema Faradayevom zakonu, ukoliko se u promjenjivom magnetskom polju nalazi električni vodič, na njegovim će se krajevima inducirati napon proporcionalno brzini promjene magnetskog toka. Ako je vodič podvrgnutih djelovanju promjenljivoga magnetskoga polja, u njegovoj unutrašnjosti nastaju Foucaultove struje. S obzirom na to da te struje teku u zatvorenim petljama nalik vrtlozima u fluidu, nazivaju se i vrtložne struje. Kada nečisti stakleni krš prolazi

iznad rotirajućeg permanentnog magneta, u električki vodljivom aluminiju inducira se napon, odnosno razlika potencijala. Zbog toga aluminijem poteče struja, koja prema Lenzovom pravilu stvara magnetski tok suprotan magnetskom toku koji je uzrok nastanka te struje. Lorentzova sila odbacuje s pokretne trake one električki nabijene čestice aluminija koje se u danom trenutku gibaju okomito na silnice magnetskog polja indukcije [Slika 32].

Pojednostavljeno može se reći da je magnetsko polje oko čestice takvog polariteta da se odbija od magnetskog polja rotirajućeg magneta [42]. Iznos sile ovisi o snazi magnetskog polja magneta, brzini kretanja, te o provodljivosti, gustoći, veličini i obliku metalnih čestica.



**Slika 32. Fizikalna shema rada separatora vrtložnim strujama [42]**

Aluminij izuzet iz nečistog krša se skladišti na primjereno mjesto te se prodaje kako bi se reciklirao. Sljedeći su koraci sušenje, kako bi se omogućilo kvalitetnije sortiranje materijala i odvajanje keramike, kamena i porculana.

#### 3.4.4.3. Odvajanje keramike, kamena i porculana te sortiranje stakla

Nakon odvajanja metalnih komponenti iz staklenog krša, slijedi odvajanje keramike, kamenja i porculana (engl. *ceramics, stone, porcelain, CSP*) i sortiranje stakla prema boji. Navedeni materijali imaju više talište od stakla pa im temperatura peći nije dovoljna kako bi se rastalili, stoga ukoliko oni nisu izdvojeni u dovoljnoj mjeri, čine krajnju strukturu staklene ambalaže nehomogenom, a time manje čvrstom.

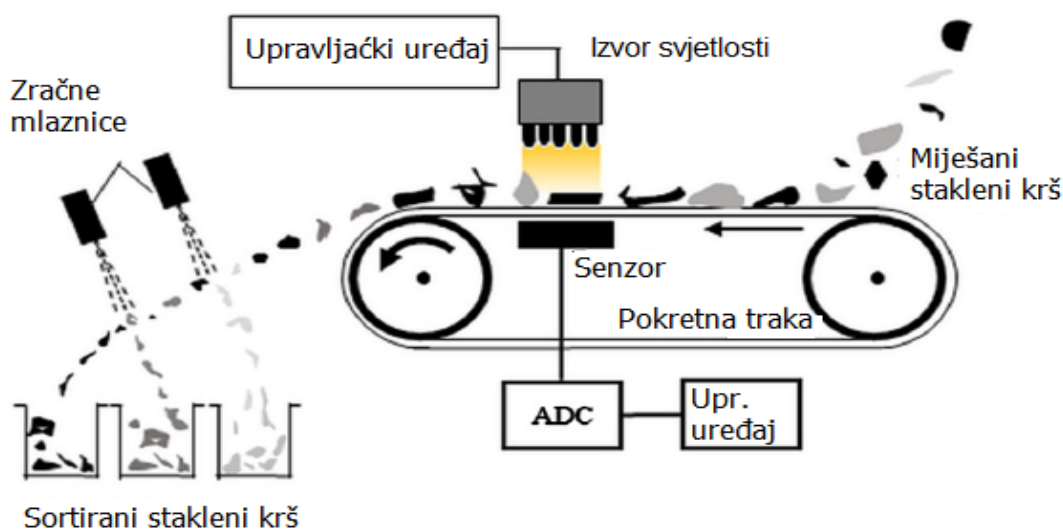
Za sortiranje staklenog krša i odvajanje nepoželjnih stranih čestica koriste se optičke i spektralne metode, a pod tim se podrazumijeva da se stakleni krš podvrgava elektromagnetskom zračenju različitih valnih duljina [38].

Optičko sortiranje je automatski proces sortiranja korištenjem kamera i/ili lasera. Ovisno o vrsti senzora i softverskoj inteligenciji sustava za obradu slika, ovi sustavi su sposobni prepoznati boju, teksturu, veličinu, oblik, strukturalna svojstva i kemijski sastav materijala, a za to su potrebni izvori svjetlosti za osvjetljavanje i senzori za snimanje fotografija kako bi se one mogle obraditi.

Prema raznim proizvođačima opreme iz EU, koriste se sustavi sortiranja s kamerama, laserski sorteri i njihova kombinacija, koji mogu raditi u vidljivom i nevidljivom dijelu spektra elektromagnetskog zračenja, bilo infracrvenom (engl. *infrared*, IR) ili ultraljubičastom (engl. *ultraviolet*, UV). Kamere su adekvatnije za identifikaciju boja, veličine i oblika, dok su laseri i pripadajući senzori sposobni razlikovati strukturalna svojstva materijala.

Trokanalne kamere dijele svjetlost u tri pojasa (crveno, zeleno i plavo) te mogu uključivati IR i UV-zračenje. Kako je ilustrirano slikom [Slika 33], nesortirani stakleni krš koji se nalazi na pokretnoj traci prolazi kroz zonu provjere koja je osvjetljena vidljivim spektrom svjetlosti crvene, plave i zelene boje. Ovisno o boji staklenog krša svjetlost se manje ili više prigušuje te se to prigušenje uspoređuje s poznatim referentnim vrijednostima kako bi se identificirala boja. Takvi identificirani komadići stakla se u sljedećem koraku sortiraju pomoću zračnih mlaznica [41].

Nedostatak ove metode je da može doći do pogreške ukoliko se na staklenom komadiću nalazi papirnata ili polimerna etiketa, no da bi se to izbjeglo mogu se koristiti infracrvene ili ultraljubičaste valne duljine koje prolaze kroz stakleni krš i tako ih identificiraju. UV-zračenje se također koristi kada treba izbaciti stakla koja se ne mogu koristiti za proizvodnju staklene ambalaže, a to su keramička stakla, olovno staklo, borosilikatno staklo i dr. Metoda je neovisna o boji i veličini staklenog komadića. Zračenjem UV-svjetlosti po uzorku, ono se apsorbira ili prigušuje i te se vrijednosti uspoređuju s referentnim vrijednostima [41].

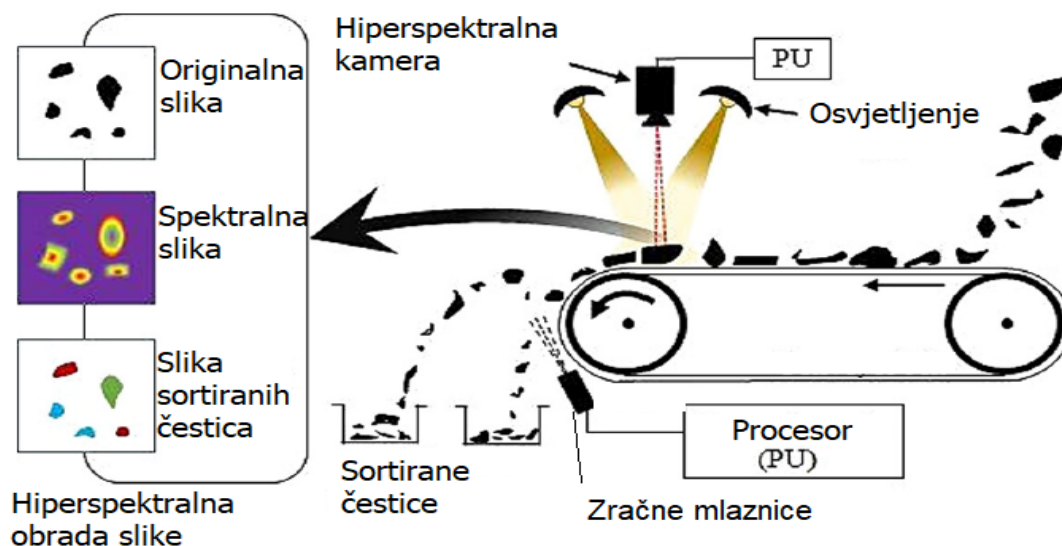


Slika 33. Princip optičkog sortiranja staklenog krša u vidljivom spektru svjetlosti [41]

Spektralno snimanje kombinira mjerenje spektralne refleksije i tehnologiju obrade slike. Obrada slike podrazumijeva korištenje zračenja blizu infracrvene svjetlosti (engl. *near infrared*, NIR), spektroskopiju vidljive svjetlosti (engl. *visual image spectroscopy*, VIS) i hiperspektralno snimanje (engl. *hyperspectral imaging*, HSI). Hiperspektralno snimanje je korišteno kako bi se svaki komadić stakla u toku materijala analizirao u vidljivom i nevidljivom dijelu valnih duljina. Dakle, analizira se u ultraljubičastom, infracrvenom i vidljivom području valnih duljina. Čestice koje prolaze kroz ovaj sustav analiziraju se te ako nisu staklene one se izbacuju pomoću zračnih mlaznica u posebnu komoru. Između trenutka kada je nestakleni materijal otkriven i kada je izbačen potrebno je 2 do 3 milisekunde, što je vrlo precizno uračunato u sustav [38].

Hiperspektralno snimanje skuplja i obrađuje podatke iz cijelog elektromagnetskog spektra. U usporedbi s trokanalnim kamerama koji dijele svjetlost u tri boje (tri podatka po pikselu), hiperspektralni sustavi mogu podijeliti svjetlost u stotine svjetlosnih traka kontinuirano pokrivajući veliki dio elektromagnetskog spektra, a to znači stotine podataka po pikselu, kreirajući tako jedinstveni spektralni otisak. Uz pametan softver vrlo je lako sortirati materijale po kemijskom sastavu, obliku, boji, debljini. Spektralni otisak je jedinstven za svaki kemijski sastav materijala, što omogućuje raspoznavanje CSP-čestica ili različitih boja staklenog krša. Prema [Slika 34] stakleni krš prolazi ispod hiperspektralne kamere i prikuplja spektralne podatke na određenoj frekvenciji. Nakon obrade podataka stakleni krš se razvrstava ovisno o

boji. Isto tako mogu se izbacivati CSP-čestice. Izbacivanje se omogućuje tlačnim zračnim mlaznicama [41].



Slika 34. Princip hiperspektralne obrade staklenog krša [41]

U cijelom sustavu za recikliranje staklenog krša nalaze se brojna vibracijska sita za odvajanje različitih frakcija po granulaciji te različitih vrsta materijala. Svi materijali moraju biti pravilno zbrinuti, a to podrazumijeva odlaganje u odvojena uređena odlagališta [Slika 35] ili prodaju poduzećima koja mogu adekvatno zbrinuti ili iskoristiti nastale otpadne frakcije.



Slika 35. Otpadne frakcije nakon recikliranja staklene ambalaže [43]

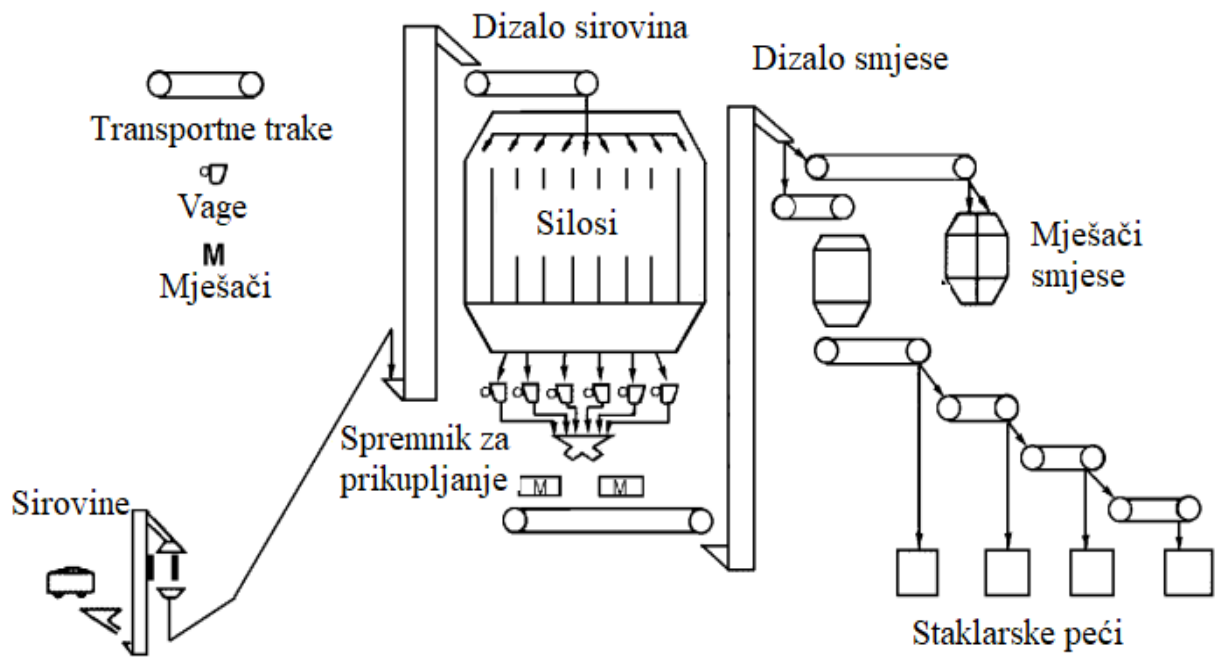
### 3.4.5. Pripremanje smjese za proizvodnju staklene ambalaže

U skladu s podacima iz poglavlja 3.3. potrebno je napraviti smjesu za proizvodnju staklene ambalaže, koja će biti u skladu s zahtijevanim proizvodom. Smjesa se sastoji od raznih primarnih sirovina, a glavne su kvarcni pijesak, soda, vapnenac, glinenac („feldšpat“) i stakleni krš. Primarne sirovine se nalaze u velikim silosima, a bitno je da sirovina unutar silosa zadrži homogenost, tj. da su veličine svih čestica jednoliko distribuirane. Homogenost staklenog proizvoda određena je homogenošću smjese pa je time potrebno pravilno skladištenje i naknadno miješanje.

Za svaku primarnu sirovinu mora se odrediti koncentracija relevantnih oksida i nečistoća (Cl, F, S, oksidi željeza), odnosno kemijski sastav, veličina zrna i udio vlage. Mnoge primarne sirovine sadrže karbonate, nitrata i vodu, koji na povišenim temperaturama disociraju u okside i ugljikov/dušikov dioksid i vodenu paru, koji ispare iz smjese i tako dolazi do određenog gubitka. Smjesa od oko 1200 kilograma nakon isparavanja komponenti ima oko 1000 kilograma staklene taline [44].

S obzirom na to da je razmjernost sirovina vrlo različita, potrebno je imati različite vage: one koje mogu izmjeriti tisuće kilograma (npr. kvarcni pijesak) i one koje precizno mjere par grama (npr. bojila), kako bi se sastojci mogli pravilno izvagati. Masa jedne smjese iznosi oko 4000 kg, a jedan mješač proizvede i do 10 smjesa u jednom satu, što osigurava proizvodnju od otprilike 1000 tona stakla dnevno.

Sekundarna sirovina (stakleni krš) dodaje se na kraju ili poslije ciklusa miješanja kako bi se izbjeglo trošenje dijelova mješača. Vrlo je bitno da se prilikom prijenosa izmiješanih sirovina ne pojavi segregacija pa je potrebno voditi brigu o dužini prijenosa između mješača i punjenja peći. Kako bi se to spriječilo, dodaje se mala količina vode (2 do 4 %) koja uz to otklanja probleme s higroskopskim tvarima kao što je soda [44]. [Slika 36] shematski prikazuje navedene korake.



Slika 36. Princip procesa miješanja i prijenosa sirovina [44]



### 3.4.6. *Taljenje sirovina i upravljanje talinom*

Za tvornice za proizvodnju staklene ambalaže tipično je da se tvornica dijeli na tzv. hladni i vrući kraj. Ta se područja razlikuju po vrstama tehnoloških procesa. Na vrućem kraju nalazi se staklarska peć, staklarski stroj i, dijelom, hladionik, a na hladnom kraju preostali dio hladionika, postupci kontrole kvalitete i pakiranja.

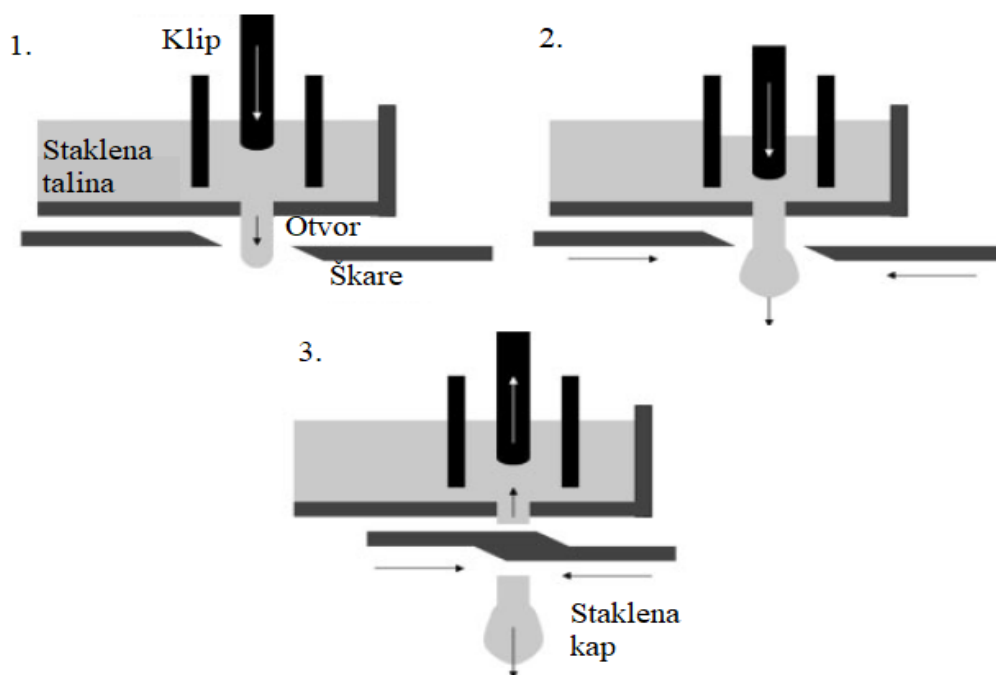
Prikladna se smjesa sirovina hranilicom usmjeruje u staklarsku peć. U suštini, većina staklarskih peći za izvor topline koristi zemni plin, a peći se razlikuju ovisno o tome kako se iskorištava otpadna topline i izgara li gorivo pomoću zraka ili kisika. Oporaba topline je jako bitan faktor s obzirom na to da samo 10 % topline otpada na taljenje sirovina, dok se oko 70 % gubi kroz ispušne dimne plinove. Jedan od načina kako bi se podigla efikasnost sustava je ugradnja regeneratora za pohranu i izmjenu toplinske energije. Regenerator se sastoji od vatrostalnih materijala enormnog toplinskog kapaciteta, koji se u jednom ciklusu zagrijavaju dimnim plinovima, a zatim se u fazi od 20 do 30 minuta topline prenosi na zrak za izgaranje [24].

Taljenje smjese provodi se u pećima pri temperaturi oko 1600 °C, gdje usitnjene sirovine prelaze kroz procese taljenja, primarnog i sekundarnog bistrenja i kondicioniranja s ciljem homogenizacije taline. Postupcima bistrenja osigurava se talina ujednačenog sastava i temperature bez mjehurića, koji su neizbježni zbog brojnih kemijskih reakcija prilikom prijelaza krute smjese u talinu [44].

#### 3.4.6.1. *Doziranje staklene kapi*

Nakon što se u peći osigura talina željenih svojstava, ona se hladi do određene temperature prije početka kristalizacije, kako bi bila određene viskoznosti povoljne za oblikovanje stakla. Sada se staklene kapi određene mase, temperature i oblika šalju pomoću žlijebova u pretkalup. Ovo je ključan trenutak, koji određuje hoće li kasnije u kontroli kvalitete doći do problema vezanih uz premalo ili previše stakla.

[Slika 37] prikazuje dodavač, a jedan može generirati 300 kapi u minuti, što je dovoljno za nekoliko pozicija pretkalupa i kalupa. Dodavač se sastoji od klipa, koji tlači staklenu talinu kroz otvor, i škara, koje režu staklenu talinu na određenoj visini. Time se dobije staklena kap koja putem žlijeba upada u pretkalup [24].



Slika 37. Sustav za generiranje staklenih kapi [24]

#### 3.4.6.2. Formiranje staklenog spremnika

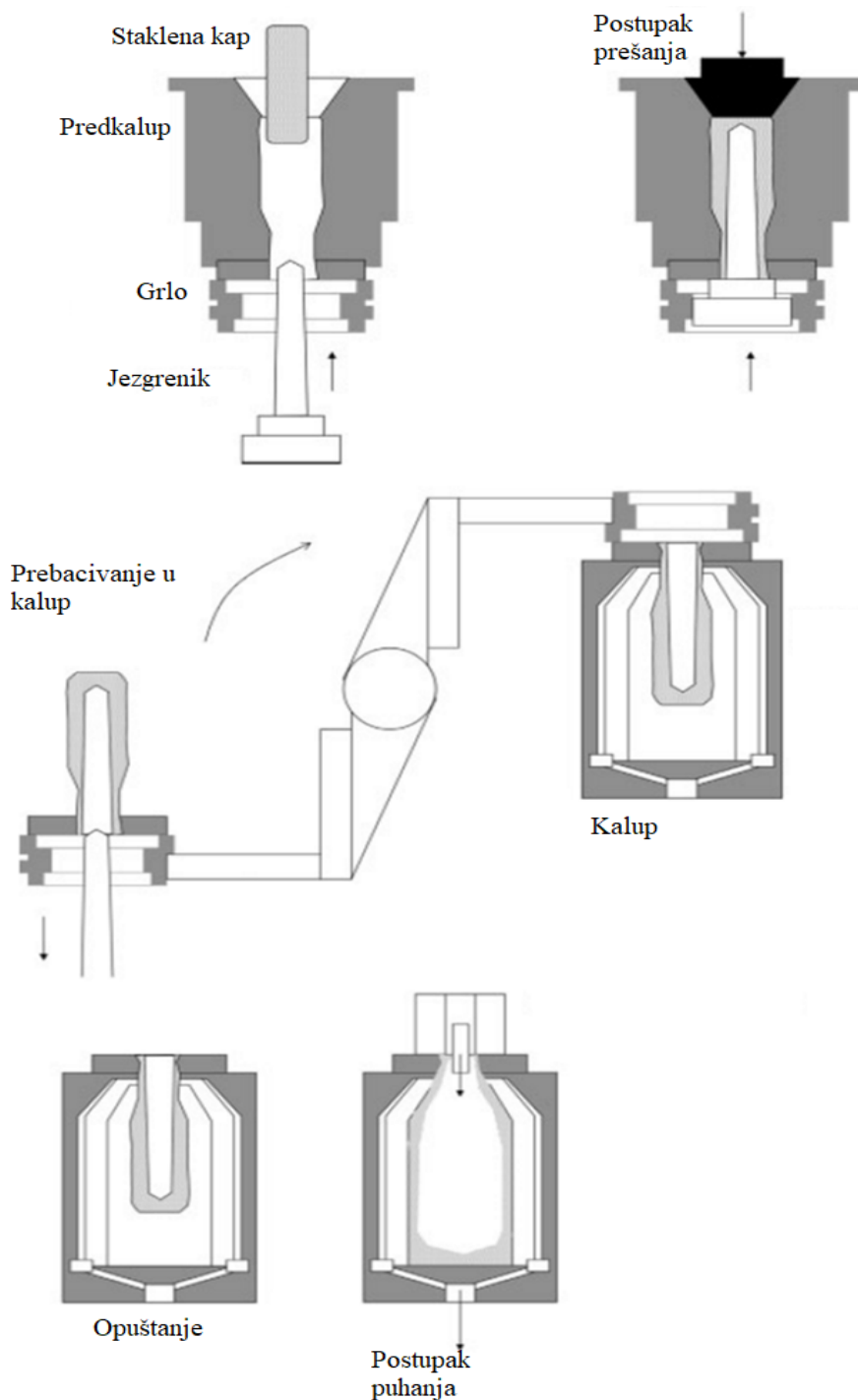
U industriji staklene ambalaže proces formiranja staklenke sastoji se od:

- formiranja predoblika
- formiranja oblika
- kontroliranog popuštanja i oplemenjivanja.

Ovisno o vrsti staklenog proizvoda te zahtjevima koji se postavljaju od strane kupaca postoje tri vrste proizvodnih procesa [24]:

- Proces prešano – puhamo usko grlo (engl. *narrow neck press and blow*, NNPB); ovim procesom proizvode se boce i staklenke s uskim grlom. Prednost ovog postupka je dobivanje ravnomjernije i tanje stjenke i time brže hlađenje te proizvodnja većeg broja proizvoda.
- Proces prešano – puhamo (engl. *press and blow*, PB); ovim procesom proizvode se boce i staklenke širokog grla.
- Proces puhamo – puhamo (engl. *blow and blow*, BB); ovim postupkom se proizvode boce veće mase, debele stjenke i kompliciranijeg oblika. BB proces je veoma spor za današnje tržišne zahtjeve i rezultira nehomogenom raspodjelom stakla.

[Slika 38] prikazuje staklenu kap koja ulazi kroz otvor na vrhu pretkalupa (oko 1150 °C) te se tamo uz pomoć prešanja jezgrenika ili puhanja zraka (ovisno o procesu) oblikuje predoblik prema obliku unutrašnje strane pretkalupa. Zatim se predoblik (oko 1000 °C) prebacuje u kalup te se pomoću puhanja zraka dobiva krajnji oblik boce ili staklenke na temperaturi oko 800 °C, a izgled takvog spremnika ilustrira [Slika 39].



Slika 38. Proces formiranja staklenke (NNPB) [24]



Slika 39. Izgled staklenih spremnika nakon formiranja oblika [45]

#### 3.4.6.3. Oplemenjivanje i popuštanje staklenih spremnika

Proizvodi se nakon procesa formiranja prebacuju na pokretnu traku koja ih vodi na oplemenjivanje i popuštanje:

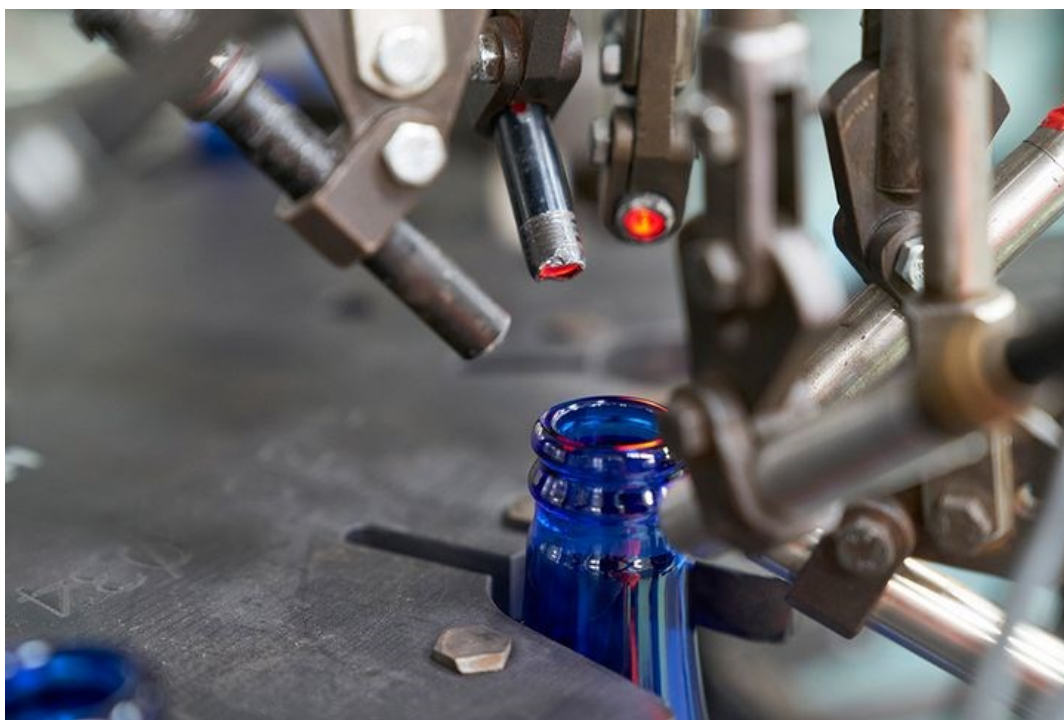
- Komora za vruće oplemenjivanje: nanose se tzv. prevlake vrućeg kraja (engl. *hot-end coatings*, HECs), a to su prevlake debljine oko 10 nm od tvrdog keramičkog materijala prevlačene u parnoj fazi kemijskim putem (engl. *chemical vapour deposition*, CVD) na oko 500 °C. Prevlake su od kositrovog oksida ( $\text{SnO}_2$ ) ili titanijevog oksida ( $\text{TiO}_2$ ). Te prevlake omogućuju dobro prijanjanje i čvrstoću te smanjuju mogućnost daljnjeg kontaktnog oštećenja [24].
- Popuštanje u hladioniku: spremnik se postupno hladi kako bi se izbjeglo nastajanje zaostalih napreznja i osigurala zahtijevana mehanička svojstva.
- Hladno oplemenjivanje: nanose se tzv. prevlake hladnog kraja (engl. *cold-end coatings*, CECs), a to su prevlake debljine 50 nm od organskog materijala (djelomično oksidiranog polietilena), koji se nanosi raspršivanjem razrijeđene vodene emulzije na temperaturi od otprilike 150 °C [24].

Ova temperatura je kritična jer ako je previsoka prevlaka će se ljuštiti, a ako je preniska voda iz emulzije neće ispariti.

#### 3.4.6.4. Kontrola kvalitete staklenih spremnika

U Vetropacku se nalazi devet linija za formiranje staklene ambalaže, a svaka linija ima navedene tehnološke postupke te postupke kontrole kvalitete. Kontrolom kvalitete nastoje se otkriti postoje li određene pogreške na spremniku koje bi mogle ugroziti sigurnost potrošača. Greške se nastoje otkriti optičkim [Slika 40], mehaničkim i elektronskim ispitivanjem, a boce koje ne zadovoljavaju kriterije automatski se odbacuju te se povratnom transportnom trakom prenose na početak proizvodnje, tj. na recikliranje.

Kontrola kvalitete propisana je od strane Vetropacka te od strane kupaca. Osim automatskih ispitivanja na linijama i ispitivanjima od strane osoblja koje se nalaze uz liniju, provode se ispitivanja od strane tehničke službe kontrole kvalitete u odvojenom laboratoriju u propisanim vremenskim razmacima.



**Slika 40. Optička kontrola kvalitete na liniji za formiranje staklene ambalaže [45]**

Mjere se razni parametri:

- volumen, debljina stjenke, dimenzije tijela, dimenzije grla, paralelnost gornje površine grla i dna, ekscentričnost

- otpornost na unutarnji tlak, otpornost na vertikalni pritisak, otpornost na udar, izdržljivost na toplinski udar
- parametri kvalitete vrućeg i hladnog oplemenjivanja.

Vizualne greške svrstavaju se u četiri kategorije:

- Kritične greške – greške koje bi mogle dovesti do opasnih uvjeta za potrošača (npr. greške poznate pod nazivima majmunska ljuljačka, šnajder, natpritisak, ptičja krila, mandula itd.).
- Glavne greške grupe A – greške na grlu staklenog spremnika koje mogu dovesti do kvarenja sadržaja ili smanjiti funkcionalnost čepova (npr. deformirano / napuknuto grlo, neispuhano grlo, napuklina ispod grla itd.).
- Glavne greške grupe B – greške koje bi mogle uzrokovati ispade s linije punjenja i zatvaranja, tj. smanjuju upotrebljivost spremnika na linijama kupaca (npr. mjehur u tijelu, zamaknuto grlo, deformiran vrat, nestabilno dno, uklopine, kravlje oko itd.).
- Sporedne greške – greške koje smanjuju estetiku spremnika (npr. narančina kora, hrapava površina, rifle, tragovi od naribavanja itd.).

Boce koje zadovoljavaju kriterije automatski se pakiraju, skladište i isporučuju kupcu.

## 4. ZAKLJUČAK

Ideja održivog razvoja je stvaranje inovativnog načina ponašanja i prihvaćanja u sva tri stupa održivog razvoja: ekonomskom, društvenom i ekološkom. To ponašanje podrazumijeva korištenje ispitanih alata u obliku modela i metoda koji imaju snažne temelje u održivom razvoju. Kružna ekonomija je snažan alat koji, ako je pravilno shvaćen i korišten, generira poslovne ideje, inovacijske strategije, proizvode i usluge koje zadovoljavaju potrebe društva i tradicionalno bitne ekonomije na ekološki najprihvatljiviji način, uz sve veće prepoznavanje i konkurentnost takvih poduzeća na tržištu.

Da bi se povećale stope recikliranja staklene ambalaže potrebno je u početnim koracima napraviti promjene u društvenom smislu. Potrebno je pravilno i marljivo čišćenje staklenih spremnika, sortiranja i otpremanja u za to predviđena mjesta od strane građana. Logično je da se tako zbrinuti spremnici odvoze u postrojenja za recikliranje stakla i da nikako ne završavaju na odlagalištima miješanog komunalnog otpada. Esencijalno je ostvariti bolju suradnju između državnih i gradskih poduzeća s privatnima, kako bi se pronašao model kako osigurati pravilnu pripremu i sortiranje otpadnih staklenih spremnika. Za uspješno recikliranje staklene ambalaže ne smiju se u spremnicima za staklo nalaziti ostale vrste stakla ili otpada. Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost bi, u suradnji s gradskim poduzećima, trebao omogućiti manje naknade za građane koji bi prihvatili pravilno odvajanje staklene ambalaže u za to predviđene spremnike na mjestu stanovanja. Drugi način je da se uvede povratna naknada za svu staklenu ambalažu kako bi se ona vraćala na prodajna mjesta jer takav model već vrlo dobro funkcionira u sustavu napitaka. Promjene u tehničkom smislu potrebne su zadnjoj karici, a to znači promjene u postrojenju za recikliranje. Uz promjene u sakupljanju staklene ambalaže, bilo bi potrebno veće i sofisticiranije postrojenje za recikliranje, koje bi ostvarivalo veću brzinu prerade staklenog krša. Vetropack Straža d.d. odlučno ide u tome smjeru.

Staklena ambalaža je „zeleni“ proizvod koji predstavlja priliku da se ostvari u potpunosti zatvoreni sustav toka materijala, sustav koji može biti primjer drugim sektorima da se marljivost isplati i da je ideja kružne ekonomije ostvariva. Takvim sustavom se nadomješta potreba i ovisnost o primarnim sirovinama, što donosi brojne energetske, ekološke, ekonomske i društvene koristi. Bitno je još jednom napomenuti da je za svakih 10 % staklenog krša potrošnja energije manja za 3 %, a emisije ugljičnog dioksida smanjene za 7 %. To su brojke koje ulijevaju nadu da možemo dobiti bitku s klimatskih promjenama, bitku koju smo sami izazvali.

## LITERATURA

- [1] Worrell E, Reuter MA. Handbook of recycling: state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists. Waltham: Elsevier; 2014.
- [2] Maletz R, Dornack C, Ziyang L. Source Separation and Recycling: Implementation and Benefits for a Circular Economy. Cham; Springer; 2018.
- [3] Our future is glass – FEVE: <https://feve.org/the-sustainable-development-goals-our-future-is-glass/>, Pristupljeno: 8. kolovoza 2021.
- [4] Drljača M. Koncept održivog razvoja i sustav upravljanja. Međunarodni skup Nedjelja kvaliteta, Kvalitet i izvrsnost. 2012.
- [5] Khan IS, Ahmad MO, Majava J. Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of Triple Bottom Line, Circular Economy and Sustainable Business Models Perspectives. Journal of Cleaner Production. 2021;297:2-14.
- [6] Triple Bottom Line 3P Formulation \_ Download Scientific Diagram: [https://www.researchgate.net/figure/Triple-Bottom-Line-3P-Formulation\\_fig1\\_329124890](https://www.researchgate.net/figure/Triple-Bottom-Line-3P-Formulation_fig1_329124890), Pristupljeno; 8. kolovoza 2021.
- [7] Midžić I. Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava [doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.
- [8] nachhaltigkeit\_HR: [https://www.vetropack.hr/fileadmin/doc/01\\_publications/02\\_Vetrotime\\_Customer\\_Magazine/Croatian/nachhaltigkeit\\_HR.pdf](https://www.vetropack.hr/fileadmin/doc/01_publications/02_Vetrotime_Customer_Magazine/Croatian/nachhaltigkeit_HR.pdf), Pristupljeno: 8. kolovoza 2021.
- [9] Ereš I. Cirkularno gospodarenje otpadom na primjeru otpada prehrambene industrije i tekstila. Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet; 2017.
- [10] Kirchherr J, Reike D, Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation & Recycling. 2017;127:221-232.
- [11] Schöggel JP, Stumpf L, Baumgartner RJ. The narrative of sustainability and circular economy – A longitudinal review of two decades of research. Resources, Conservation & Recycling. 2020;163:2-22.
- [12] Corona B, Shen L, Reike D, Carreón JR, Wottell E. Towards sustainable development through the circular economy- A review and critical assessment on current circularity metrics. Resources, Conservation & Recycling. 2019;151:2-15.



- [13] Tvoj izbor: <https://recikliraj-investiraj.eu/hr/projekt/kruzno-gospodarstvo>,  
Pristupljeno: 10. kolovoza 2021.
- [14] Bourguignon D. Understanding waste streams: Treatment of specific waste. European Parliamentary Research Service. July 2015.
- [15] Oznake na ambalaži – Zeleni val: <https://zeleni-val.com/oznake-na-ambalazi/>,  
Pristupljeno: 13. kolovoza 2021.
- [16] Sharma R, Jabbour CJC, Jabbour ABL. Sustainable manufacturing and industry 4.0: what we know and what we don't. *Journal of Enterprise Information Management*. 2021;31(1):230-266.
- [17] Što je Industrija 4.0\_: <https://www.happtory.hr/post/industrija-4-0>,  
Pristupljeno: 15. kolovoza 2021.
- [18] Hallstedt SL, Isaksson O, Rönnbäck AO. The Need for New Product Development Capabilities from Digitalization, Sustainability, and Servitization Trends. *MDPI journals*. 2020; 12:1-26.
- [19] 6th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering: ICADME 2016. The Green Design Concept in New Product Development. Jingdezhen Ceramic Institute. Atlantis Press; 2016
- [20] Opetuk T. Model uvođenja upravljanja zelenim lancima opskrbe [Doktorski rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2016.
- [21] Paul ID, Bhole GP, Chaudhari J. A review on Green Manufacturing: It's important, Methodology and its Application. *Procedia Materials Science*. 2014;6:1644 – 1649.
- [22] Andersén J. A relational natural-resource-based view on product innovation: The influence on green product innovation and green suppliers on differentiation advantage in small manufacturing firms. *Technovation*. 2021;104:2-8.
- [23] Vitezović S, Balen J, Karavanić S, Franjić A, Grömer K, Alduk I et. al. Recikliraj, ideje iz prošlosti. Zagreb; 2017.
- [24] Bourhis EL. Glass: Mechanics and Technology. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2008.
- [25] Hubert M. Commercial glass compositions, properties and technical considerations – Raw materials. Eindhoven: International Materials Institute for New Functionality in Glass; 2015.

- [26] Vetropack\_farbe\_veredelung\_hr\_p1-8: [https://www.vetropack.hr/fileadmin/doc/01\\_publications/02\\_Vetrotime\\_Customer\\_Magazine/Croatian/Vetropack\\_farbe\\_veredelung\\_hr\\_p1-8.pdf](https://www.vetropack.hr/fileadmin/doc/01_publications/02_Vetrotime_Customer_Magazine/Croatian/Vetropack_farbe_veredelung_hr_p1-8.pdf), Pristupljeno: 27. kolovoza 2021.
- [27] Cullet glass colors colorful colourful detail closeup close-up Stock Photo – Alamy: <https://www.alamy.com/stock-photo-cullet-glass-colors-colorful-colourful-detail-closeup-close-up-recycling-30508598.html>, Pristupljeno: 20. kolovoza 2021.
- [28] Sustav gospodarenja ambalažnim otpadom u HR. Tko pije, a tko plaća – Kružna ekonomija: <https://kruzna-ekonomija.com/2018/10/04/sustav-gospodarenja-ambalaznim-otpadom-u-hr-tko-pije-a-tko-placa/>, Pristupljeno: 22. kolovoza 2021.
- [29] Pravilnik o ambalaži i otpadnoj ambalaži: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015\\_08\\_88\\_1735.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_08_88_1735.html), Pristupljeno: 30. kolovoza 2021.
- [30] Uredba o gospodarenju otpadnom ambalažom: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015\\_09\\_97\\_1872.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2015_09_97_1872.html), Pristupljeno 10. rujna 2021.
- [31] Uredba o izmjenama i dopunama Uredbe o gospodarenju otpadnom ambalažom: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020\\_01\\_7\\_93.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_01_7_93.html), Pristupljeno 10. rujna 2021.
- [32] OTP\_Izvješće\_ambalažni otpad\_2019\_WEB (1): [http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021\\_otpad/Izvjescia/ostalo/OTP\\_Izvje%C5%A1%C4%87e\\_ambala%C5%BEni%20otpad\\_2019\\_WEB.PDF](http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/Izvjescia/ostalo/OTP_Izvje%C5%A1%C4%87e_ambala%C5%BEni%20otpad_2019_WEB.PDF), Pristupljeno 10. rujna 2021.
- [33] PGO\_Opcina\_Durmanec\_2017-2022: [http://krakom.hr/pdf/odvoz/otpad\\_zakoni/PGO\\_Opcina\\_Durmanec\\_2017-2022.pdf?x92260](http://krakom.hr/pdf/odvoz/otpad_zakoni/PGO_Opcina_Durmanec_2017-2022.pdf?x92260), Pristupljeno: 23. kolovoza 2021.
- [34] Vetropack Straža d. d. \_ Hrvatska tehnička enciklopedija: <https://tehnika.lzmk.hr/tvornica-stakla-straza-hum-na-sutli/>, Pristupljeno: 15. kolovoza 2021.
- [35] Zaštita okoliša, Vetropack Croatia: <https://www.vetropack.hr/hr/odrzivost/zastita-okolisa/>, Pristupljeno: 15. kolovoza 2021.
- [36] vetrotime\_01\_2021\_hr\_web: [https://www.vetropack.hr/fileadmin/doc/01\\_publications/02\\_Vetrotime\\_Customer\\_Magazine/Croatian/vetrotime\\_01\\_2021\\_hr\\_web.pdf](https://www.vetropack.hr/fileadmin/doc/01_publications/02_Vetrotime_Customer_Magazine/Croatian/vetrotime_01_2021_hr_web.pdf), Pristupljeno: 16. kolovoza 2021.
- [37] Recikliranje, Vetropack Croatia: <https://www.vetropack.hr/hr/staklo/recikliranje/>, Pristupljeno: 16. kolovoza 2021.

- [38] Rue D. Cullet supply issues and Technologies. Glass Manufacturing Industry Council. 2018.
- [39] Recikliranje stakla: <http://recikliranje-stakla.com/recikliranje-stakla/>, Pristupljeno: 23. kolovoza 2021.
- [40] Recycling\_HR: [https://www.vetropack.hr/fileadmin/doc/01\\_publications/02\\_Vetro\\_time\\_Customer\\_Magazine/Croatian/Recycling\\_HR.pdf](https://www.vetropack.hr/fileadmin/doc/01_publications/02_Vetro_time_Customer_Magazine/Croatian/Recycling_HR.pdf), Pristupljeno: 22. kolovoza 2021.
- [41] Gundupalli SP, Hait S, Thakur A. A review on automated sorting of source - separated municipal solid waste for recycling. Waste management. 2016;60:56-74.
- [42] Fengjie Y, Weifang C, Dehao Z. The research of simulation on eddy current separation process based on MATLAB and COMSOL. Procedia CIRP. 2016;56:520-523.
- [43] Ministar Dobrović u Vetropack Straži: Umjesto da stare staklene boce završe u otpadu, reciklirajmo ih jer time razvijamo industriju i nova radna mjesta, Zagorje.com: <https://www.zagorje.com/clanak/vijesti/ministar-dobrovic-u-vetropack-strazi-umjesto-da-stare-staklene-boce-zavrse-u-otpadu-recikl>, Pristupljeno: 25. kolovoza 2021.
- [44] Hubert M. Melting and Fining processes in industrial glass furnaces. Eindhoven: International Materials Institute for New Functionality in Glass; 2015.
- [45] Proizvodnja stakla u Vetropack, proizvodnja staklene ambalaže: <https://www.vetropack.hr/hr/staklo/proizvodnja-stakla/>, Pristupljeno: 29. kolovoza 2021.

## **PRILOZI**

### **I. Kompaktni disk**