

# Izrada i karakterizacija uzorka od recikliranog stakla

---

**Tomić, Ante**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*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:235:408706>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Ante Tomić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauerl, dipl. ing.

Student:

Ante Tomić

Zagreb, 2023.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ante Tomić** JMBAG: 0035224021

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada i karakterizacija uzoraka od recikliranog stakla**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Production and characterization of recycled glass samples**

Opis zadatka:

Staklo, zbog svojih jedinstvenih karakteristika, predstavlja vrlo značajan materijal u nizu različitih industrija: građevinska, prehrambena, kemijska i slično. Tome svakako doprinosi i svojstvo stakla da se može vrlo uspješno reciklirati. Ta svojstva otvaraju mogućnost primjene samljevenog otpadnog stakla za izradu fasadnih blokova u građevinarstvu.

U uvodnom dijelu rada potrebno je opisati postupak dobivanja stakla, osnovne karakteristike stakla i s tim povezana mjesta primjene. Poseban naglasak treba biti na mogućnostima i primjerima recikliranja stakla.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je napraviti staklene blokove koristeći granule samljevenog sekundarnog stakla. Iz tih staklenih blokova treba izraditi uzorke na kojima je potrebno provesti karakterizaciju strukture te laboratorijska ispitivanja svojstava. Pri tome treba izabrati i ispitati svojstva koja su važna za fasadne blokove u građevinarstvu.

Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o mogućnostima primjene recikliranog stakla u izradi fasadnih blokova za zgrade.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predvideni datum obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zdravko Schauperl

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Zdravku Schauperlu na savjetima, pomoći i na pruženoj prilici za izradu ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se i djelatnicima Laboratorija za mehanička ispitivanja na pomoći pri provedbi ispitivanja mehaničkih svojstava.

Ante Tomić

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ.....	1
POPIS SLIKA.....	3
POPIS TABLICA.....	4
POPIS KRATICA.....	5
SAŽETAK.....	6
SUMMARY.....	7
1. UVOD.....	8
2. STAKLO.....	10
2.1. Povijest stakla.....	10
2.2. Sirovine za proizvodnju stakla.....	11
2.3. Proizvodnja stakla.....	13
2.3.1. Postupci proizvodnje stakla.....	15
2.4. Tipovi stakla.....	17
2.4.1. Klasično staklo.....	17
2.4.2. Kaljeno staklo.....	17
2.4.3. Laminirano staklo.....	18
2.4.4. Toplinski ojačano staklo.....	19
2.4.5. Izolacijsko staklo.....	19
2.5. Mehanička svojstva stakla.....	20
2.6. Staklo kao građevni materijal.....	22
2.7. Recikliranje stakla.....	24
2.7.1. Reciklažni tok ambalažnog stakla.....	26
2.7.2. Stakleni lom.....	27
3. PJENASTO STAKLO.....	29
3.1. Prednosti i mane pjenastog stakla [22].....	31

3.2. Proizvodnja pjenastog stakla.....	33
3.2.1. Kemijsko pjenjenje [23].....	33
3.2.2. Fizičko pjenjenje [23] .....	35
3.2.3. Proizvodnja od recikliranog stakla [24,25] .....	37
4. EKSPERIMENTALNI DIO .....	39
4.1. Izrada uzoraka .....	39
4.2. Mehaničko ispitivanje.....	41
4.3. Rasprava.....	45
5. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA .....	48

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Zgrada sa staklenom fasadom [2] .....	8
Slika 2. Stakleni predmeti iz drevnog Egipta [4] .....	11
Slika 3. Princip proizvodnje stakla float (plutajućim) postupkom [26] .....	16
Slika 4. Izgled loma običnog, kaljenog i laminiranog stakla [27] .....	18
Slika 5. Izolacijsko staklo [28] .....	20
Slika 6. Stakleni strop [12] .....	22
Slika 7. Stakleni pregradni blokovi [12] .....	23
Slika 8. Stakleni proizvodi za recikliranje [27] .....	24
Slika 9. Kružni tok recikliranja stakla [29] .....	26
Slika 10. Stakleni lom [29] .....	27
Slika 11. Pjenasto staklo [30] .....	28
Slika 12. Pjenasto staklo izrađeno različitim veličinama čestica [21] .....	29
Slika 13. Proizvodnja pjenastog stakla metodom kemijskog pjenjenja [22] .....	32
Slika 14. Pjenasto staklo izrađeno od recikliranoga stakla [24] .....	37
Slika 15. Ispitni uzorci izrađeni od recikliranoga stakla .....	39
Slika 16. Ispitni uzorci izrađeni od recikliranoga stakla .....	39
Slika 17. Ispitni uzorci u aluminijskom kalupu .....	40
Slika 18. Ispitni uzorci (ravnost površine) .....	41
Slika 19. Uređaj za mjerenje tlačne čvrstoće .....	42
Slika 20. Ispitni uzorak na ispitnoj stanici .....	43
Slika 21. Ispitni uzorak neposredno prije ispitivanja .....	43
Slika 22. Prvi ispitni uzorak nakon tlačnog ispitivanja .....	44
Slika 23. Drugi ispitni uzorak nakon tlačnog ispitivanja .....	45



## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Osnovna mehanička svojstva natrij-kalcij-silikatnog stakla [10] .....	21
Tablica 2. Mehanička svojstva pjenastog stakla izrađenog od komercijalnog stakla [21] .....	30

## POPIS KRATICA

<b>Kratica</b>	<b>Opis</b>
H <sub>2</sub> O	Voda
CO <sub>2</sub>	Ugljikov dioksid
Li <sup>+</sup>	Litijev ion
Na <sup>+</sup>	Natrijev ion
Li	Litij
Na	Natrij
K	Kalij
K <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Kalijev fosfat

## SAŽETAK

Staklo je jedan od najvažnijih materijala u industriji i svakodnevnom životu zbog svojih izuzetnih svojstava i široke primjene. Transparentnost stakla omogućava prolazak svjetlosti, čineći prostor svijetlim i prostranim. Osim toga, staklo je kemijski inertno, što znači da ne reagira s mnogim tvarima, čineći ga idealnim za upotrebu u kemijskim posudama i laboratorijskoj opremi. Njegova izdržljivost i lakoća čišćenja čine ga također popularnim izborom za prozore, boce, posuđe, vaze i optička vlakna.

Recikliranje stakla ima ključnu ulogu u očuvanju prirodnih resursa i zaštiti okoliša. Staklo se može reciklirati bez gubitka kvalitete ili svojstava, što omogućuje njegovu ponovnu upotrebu. Ovaj proces smanjuje potrebu za eksploatacijom novih sirovina i smanjuje količinu otpada koja završava na odlagalištima.

Pored tradicionalnog stakla, postoji i poseban oblik poznat kao pjenasto staklo. Pjenasto staklo karakterizira prisutnost zatvorenih pora koje ga čine iznimno laganim i izolacijskim. Proces proizvodnje pjenastog stakla uključuje dodavanje tvari koje stvaraju mjehuriće zraka tijekom taljenja i oblikovanja stakla. Ovo staklo ima izvrsna toplinska i zvučna izolacijska svojstva, što ga čini idealnim za primjenu u građevinskoj industriji. Koristi se za izolaciju zidova, stropova i podova, pružajući energetske učinkovitost i smanjenje buke.

U eksperimentalnom dijelu ispitana su dva staklena uzorka izrađena od recikliranog stakla. Granulati recikliranoga bezbojnog stakla međusobno su povezani natrijevim silikatom i dodacima. Provedeno je tlačno ispitivanje te su doneseni zaključci o kvaliteti staklenih uzoraka i mogućoj primjeni materijala izrade u fasadnim blokovima.

Ključne riječi: staklo, recikliranje, pjenasto staklo, tlačno ispitivanje, fasadni blokovi

## **SUMMARY**

Glass is one of the most important materials in industry and everyday life due to its exceptional properties and wide range of applications. The transparency of glass allows the passage of light, creating bright and spacious environments. Additionally, glass is chemically inert, meaning it does not react with many substances, making it an ideal choice for chemical containers and laboratory equipment. Its durability and ease of cleaning also make it a popular option for windows, bottles, dishes, vases, and optical fibers.

Glass recycling plays a crucial role in preserving natural resources and protecting the environment. Glass can be recycled without losing its quality or properties, enabling its reuse. This process reduces the need for extracting new raw materials and minimizes the amount of waste ending up in landfills.

In addition to traditional glass, there is a special type known as foam glass. Foam glass is characterized by its closed-cell structure, making it extremely lightweight and insulating. The production process involves adding substances that create air bubbles during the melting and shaping of glass. This type of glass exhibits excellent thermal and sound insulation properties, making it ideal for applications in the construction industry. It is used for insulating walls, ceilings, and floors, providing energy efficiency and noise reduction. It is also utilized in the automotive industry to improve sound insulation and enhance vehicle energy efficiency.

In an experimental study, two glass samples made from recycled glass were examined. Granules of colorless recycled glass were bonded together using sodium silicate and additives. Compressive testing was conducted to evaluate the quality of the glass samples and the potential application of the material in facade blocks.

Keywords: glass, recycling, foam glass, compressive testing, facade blocks

## 1. UVOD

Staklo je dugi niz godina materijal koji pronalazi široku primjenu u raznim granama. Zbog odličnih mehaničkih svojstava, jednostavne proizvodnje i mogućnosti recikliranja spada među najkorištenije materijale. Građevinska industrija je jedna od najvećih potrošača stakla. Glavninu potrošnje stakla u građevinskoj industriji čine:

- Prozori
- Staklene fasade
- Staklene grede
- Stakleni pregradni zidovi
- Stakleni podovi

Glavna karakteristika stakla zbog čega je toliko zastupljeno u građevini je prozirnost. Ta karakteristika daje mogućnost vizualnog kontakta između vanjskog svijeta i unutrašnjosti građevinskog objekta. Također pojedina stakla su nepropusna za UV zračenje što ih čini idealnima za građevinsku primjenu [1]. U zadnjih nekoliko desetljeća staklo postaje pouzdan građevinski materijal te je primjena stakla u građevini u stalnom porastu. U usporedbi s klasičnim fasadama, staklene fasade estetski su privlačnije te se najčešće koriste kod izgradnje poslovnih objekata. Primjer poslovnog objekta sa staklenom fasadom prikazan je na slici 1.



Slika 1. Zgrada sa staklenom fasadom [2]

Potreba za izolacijom građevinskih objekata pruža mogućnost korištenja pjenastoga stakla u tu svrhu. Pjenasto staklo zbog svoje poroznosti, velikoga volumena, niske toplinske vodljivosti i otpornosti na gorenje daje odlična izolacijska svojstva. Prednost u usporedbi s ostalim izolacijskim materijalima je mogućnost izrade pjenastog stakla od raznih vrsta recikliranoga stakla te ponovno recikliranje istoga.

## 2. STAKLO

### 2.1. Povijest stakla

Staklo već tisućljećima potvrđuje svoju kvalitetu. Staklo je staro koliko i planet s obzirom da nastaje i prirodno kroz erupcije vulkana i udare munja. Također, recikliranje stakla poznato je jednako dugo kao i njegova proizvodnja. Kao jedan od prvih trgovačkih proizvoda u prošlosti smatrao se statusnim simbolom za vrijeme Rimskog Carstva i u Egiptu [3].

Staklo, kako drevno tako i moderno, materijal je koji se obično sastoji od silicijevog dioksida, a karakteriziraju ga neuredni atomi. Istraživanja pokazuju da se tijekom Brončanog doba počelo s proizvodnjom stakla. Ne postoje dokazi o tome kako su ljudi otkrili način proizvodnje nego samo stakleni predmeti koji datiraju iz toga doba. Za razliku od današnjeg vremena, staklo iz tog vremena često je bilo neprozirno i zasićeno bojom, a izvor silicijevog dioksida bili su zdrobljeni kvarcni kamenčići, a ne pijesak. Ljudi iz toga doba otkrili su način kako sniziti temperaturu taljenja zdrobljenog kvarca na temperaturu koja se mogla postići u pećima iz brončanog doba. Koristili su pepeo pustinjskih biljaka, koje sadrže visoke razine soli kao što su natrijev karbonat ili bikarbonati. Vapnenac koji se nalazi u biljkama učinio je staklo stabilnijim. Drevni proizvođači stakla također su dodavali materijale koji staklu daju boju, poput kobalta za tamnoplavu boju ili olovnog antimonata za žutu. Egipatski faraoni i rimski carevi koristili su staklo u svrhu statusnog simbola kroz nakit, posuđe, uređenje interijera dok su faraoni zakapani sa staklenim predmetima oko sebe [4]. Primjer staklenih predmeta iz drevnog Egiptata prikazani su na slici 2.

Michael Owens je u 20. stoljeću izumio stroj za automatiziranu proizvodnju stakla što je dovelo do naglog porasta u proizvodnji i potrošnji stakla. Staklo je do tada bilo skupocjeno te je nakon njegovoga izuma došlo do naglog pada cijene stakla [3].



Slika 2. Stakleni predmeti iz drevnog Egipta [4]

## 2.2. Sirovine za proizvodnju stakla

Glavni sastojak stakla je silicijev dioksid amorfne strukture. Prilikom proizvodnje stakla potrebno je dodati tvari koje pospješuju proizvodnju stakla. Dodaju se vapnenac i soda. Čisti silicijev dioksid tali se na  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  zbog čega je potrebno dodati sodu kako bi se talište snizilo na  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Time staklo postaje topljivo u vodi te se to sprječava dodavanjem vapnenca. Miješanjem silicijeva dioksida, vapnenca i sode dobiva se staklena pasta s talištem u rasponu od  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$  koja je idealna za različite tehnike proizvodnje. Uz osnovne sirovine, dodaju se i sredstva za bojanje. Ovisno o tehnici izrade, željenim svojstvima, ekonomskim i ekološkim parametrima, odabiru se sirovine korištene u proizvodnji. [1, 5, 6]



Sirovine za proizvodnju stakla:

- Silicijev dioksid
- Borov oksid
- Oksidi alkalijskih metala
- Aluminijev oksid
- Sredstvo za bojanje
- Sredstvo za zamućivanje [5]

Silicijev dioksid tvori trodimenzijsku strukturnu mrežu silikatnih stakala zbog čega je njihov glavni sastojak. Povećanjem masenog udjela silicijevog dioksida utječe na:

- Povećanje temperature taljenja
- Povećanje viskoznosti
- Povećanje čvrstoće
- Povećanje kemijske otpornosti
- Povećanje težnje kristalizaciji
- Smanjenje toplinske provodnosti
- Smanjenje toplinske rastezljivosti
- Smanjenje električne provodnosti
- Smanjenje indeksa loma
- Smanjenje apsorpcije ultraljubičastih zraka (bitno kod prozora).

Udio silicijevog dioksida obično je u rasponu od 55 % do 80 % [5].

Borov oksid važna je komponenta kod specijalnih stakala. Atomi bora tvore mrežu zbog čega može biti zamjena za silicijev dioksid. Borov oksid poboljšava optička svojstva stakla, povećava propusnost svjetlosti dugih valnih duljina, a smanjuje za kratke valne duljine. Visok udjel (više od 15 %) borovog oksida u staklu povećava tvrdoću, savojnu čvrstoću i otpornost na udar [5].

Natrijev i kalijev oksid sastavni su dio svakog stakla. Natrijev oksid povećava viskoznost i omogućuje lakše taljenje i preradu stakla. Stakla koja u sebi sadrže veće količine kalijevog oksida imaju povećanu otpornost na temperaturne promjene, glađu površinu, lakše i ljepše se oboje te zbog većeg loma svjetlosti su sjajnija [5].

Aluminijev oksid s jako niskim udjelom, već od 1%, poboljšava gotova sva svojstva stakla. S udjelom od 4% povećava se vlačna i tlačna čvrstoća, udarna otpornost, kemijska otpornost, a smanjuje se toplinska rastezljivost i težnja ka kristalizaciji. Kod nekih specijalnih stakala potrebno je dodati aluminijev hidroksid ili glinicu kako bi se postigla izuzetna čistoća stakla [5].

Kako bi se dobilo staklo zahtijevane boje potrebno je dodati sredstvo za bojanje. To su u većini slučajeva oksidi teških metala [5].

Zbog podložnosti stakla razdvajanju faza što uvjetuje naknadnu tehničku obradu kako bi se postigla željena svojstva potrebno je u nekim slučajevima dodati sredstvo za zamućivanje [5].

### 2.3. Proizvodnja stakla

Prva faza u proizvodnji stakla obuhvaća pripremu sirovina, što uključuje njihovo drobljenje, mljevenje i miješanje. Cilj ove tehnološke faze je usitniti sirovine i dozirati ih kako bi se dobila homogena staklarska masa u praškastom stanju. Radi lakšeg i boljeg homogeniziranja smjese, svaka sirovina se prethodno čisti, obogaćuje, drobi, melje te raspoređuje prema potrebnoj granulaciji i čistoći. Uzimajući u obzir složenost ovog koraka u proizvodnji stakla, ključno je osigurati pažljivo doziranje svake sirovine kako bi se postigla željena kvaliteta i karakteristike stakla. Pravilno odmjereni sastojci osiguravaju konzistentnost i stabilnost staklarske mase, što je važno za daljnje faze procesa. Također, očišćene i dozirane sirovine mogu biti obogaćene dodatnim materijalima koji pružaju specifične osobine staklu, poput boje, otpornosti na toplinu ili transparentnosti. Ovi dodaci mogu se kombinirati s pažljivo izmjerenim količinama sirovina kako bi se postigao željeni rezultat u konačnom proizvodu. Uzimajući u obzir važnost pravilne pripreme sirovina, strogo se pridržavanje tehnoloških postupaka i kontrola kvalitete u ovoj fazi pokazuje ključnim za postizanje visokokvalitetnog stakla sa željenim karakteristikama [5, 7].

U drugoj fazi proizvodnje stakla, sirovine se otapaju na temperaturama od 1300°C do 1500 °C. Postupak otapanja može se provesti na dva načina, ovisno o vrsti peći koja se koristi. Za specijalna stakla, poput optičkih stakala, koriste se peći s loncima, dok se za staklo koje se koristi u širokoj upotrebi koriste koritaste peći. Peći s loncima su peći koje rade sa prekidima (šaržne peći), dok se danas češće koriste peći s kontinuiranim radom, posebno tzv. kadne peći [5, 7].

Proces topljenja sirovina odvija se u tri faze. Prvo dolazi do stapanja, sinteriranja sirovina i nastajanja silikata. Zatim slijedi faza bistrenja i homogenizacije staklene mase. Na kraju, u trećoj fazi, staklena masa mora odstajati, temperatura se smanjuje, a viskoznost povećava, što je važno kako bi smjesa postala prikladna za daljnje oblikovanje. Između tih faza, faza bistrenja i homogenizacije staklene mase ima posebnu važnost. U ovoj fazi dolazi do pročišćavanja i potpune homogenizacije staklene mase, što rezultira uklanjanjem nečistoća i postizanjem željenih karakteristika stakla. Kroz odležavanje staklene mase u trećoj fazi, temperatura se smanjuje, a viskoznost se povećava. To je ključno kako bi se smjesa staklene mase pripremila za daljnje oblikovanje i obradu u željeni konačni proizvod [5, 7].

Treća faza proizvodnje stakla obuhvaća proces oblikovanja stakla koji se provodi pri temperaturi od 700°C do 800°C. U ovoj fazi, temperatura stakla je dovoljno visoka da omogući oblikovanje, ali nije tako visoka da staklo postane previše tekuće i izgubi oblik [5, 7].

Četvrta i posljednja faza u proizvodnji stakla obuhvaća hlađenje proizvoda u posebnim komorama s postepenim hlađenjem. Tokom procesa hlađenja, staklo se steže i postaje gušće jer se razmaci između atoma smanjuju sve dok se ne uspostavi stabilno, ravnotežno stanje pri nižoj temperaturi. Hlađenje stakla ima važan utjecaj na njegovu strukturu i svojstva. Pokretljivost atoma u staklu smanjuje se smanjenjem temperature, što dovodi do povećanja viskoznosti i produženja vremena potrebnog za postizanje stabilnog stanja. Da bi se postiglo stabilno stanje, hlađenje mora biti dovoljno sporo. Ako se staklo brzo ohladi, neće se ravnomjerno stezati, što može rezultirati nehomogenostima u strukturi i pojavom trajnih mehaničkih naprezanja. Ta trajna naprezanja negativno utječu na mehanička svojstva stakla, smanjuju kvalitetu gotovih proizvoda, posebno u pogledu optičkih svojstava, čvrstoće, gustoće i sposobnosti održavanja stalnih dimenzija. Stoga, prilikom proizvodnje stakla, važno je smanjiti trajna naprezanja što se postiže kontroliranim hlađenjem proizvoda. Kontrolirano hlađenje omogućava postepeno smanjenje temperature stakla kako bi se osiguralo ravnomjerno stezanje i postizanje stabilne strukture. Ova faza hlađenja ključna je za postizanje visokokvalitetnih staklenih proizvoda s željenim svojstvima i performansama. Nakon završetka hlađenja, staklo prolazi dodatne postupke provjere i kvalitete kako bi se osigurala njegova ispravnost prije konačne distribucije i upotrebe [5, 7].

### 2.3.1. Postupci proizvodnje stakla

Četiri najzastupljenija postupka proizvodnje stakla su:

- Forcaultov postupak
- Colburnov (Libbey-Owens) postupak
- Pittsburški postupak
- Float (plutajući) postupak [5].

#### 2.3.1.1. Forcaultov postupak

Za ovaj postupak proizvodnje stakla zaslužan je belgijski inženjer Emile Fourcault koji ga je uveo 1913. godine. Iz kadne peći, staklene trake se vertikalno izvlače kroz dugačku sapnicu izrađenu od vatrootpornog materijala u obliku uskog razreza, koja pluta po rastopljenom staklu. Na početku, sapnica se duboko utiskuje u staklo, tako da kroz njen otvor dolazi talina koja se hvata u okvir koji se spušta u stroj s gornje strane. Izvlačenjem stakla prema gore počinje oblikovanje staklene trake. U oknu za hlađenje, visine 5 m do 8 m, nalazi se 16 do 18 parova čeličnih valjaka obloženih azbestom, između kojih se provlači staklena traka. Nakon formiranja, staklena traka se intenzivno hladi na oba ruba kako bi se postigla potrebna mehanička čvrstoća. Prilikom izlaska iz okna za hlađenje, traka se automatski reže na željenu dužinu, a istovremeno se režu i zadebljani rubovi. Ovim postupkom nastaju staklene trake debljine od 1,5 mm do 7,0 mm, pri čemu postrojenje omogućuje proizvodnju traka brzinom od 60 m/h do 90 m/h, s debljinom od 3,0 mm. Brzina izvlačenja određuje se na temelju viskoznosti stakla, pri čemu je neposredno prije formiranja trake potrebna visoka viskoznost, a temperatura izvlačenja relativno niska. Sapnica za vertikalno izvlačenje stakla obično je širine 2 m. Kvaliteta stakla dobivenog ovim postupkom ovisi o kemijskoj homogenosti stakla, a proces izvlačenja omogućuje proizvodnju visokokvalitetnih staklenih traka različitih debljina za razne primjene [5].

#### 2.3.1.2. Colburnov (Libbey-Owens) postupak

Irving Colburn, američki inženjer, razvio je postupak 1905. godine. Pri ovom postupku, staklena traka izvlači se slobodno s površine rastaljenog stakla bez korištenja sapnice za izvlačenje. Važnu ulogu igralo je hlađenje rubova trake pomoću rotirajućih valjaka koje je hladila voda, a koji su se nalazili na udaljenosti od 3 cm do 5 cm od staklene taline. Temperatura trake smanjivala se pomoću dva uređaja za hlađenje kako bi joj se omogućila promjena smjera u horizontalni položaj. Ovaj postupak imao je nekoliko nedostataka, uključujući kompleksnost

komore za izvlačenje i potrebu za zamjenom istrošenih valjaka za promjenu smjera izvlačenja [5].

### 2.3.1.3. Pittsburški postupak

Kod Pittsburškog postupka, blok od vatrootpornog materijala širine od 30 cm do 80 cm uranja se nekoliko centimetara ispod mjesta iz kojeg se traka izvlačila, unutar staklene taline. Dok se staklo izvlači, temperatura se stabilizirala uz pomoć bloka, koji je talinu održavao hladnom.

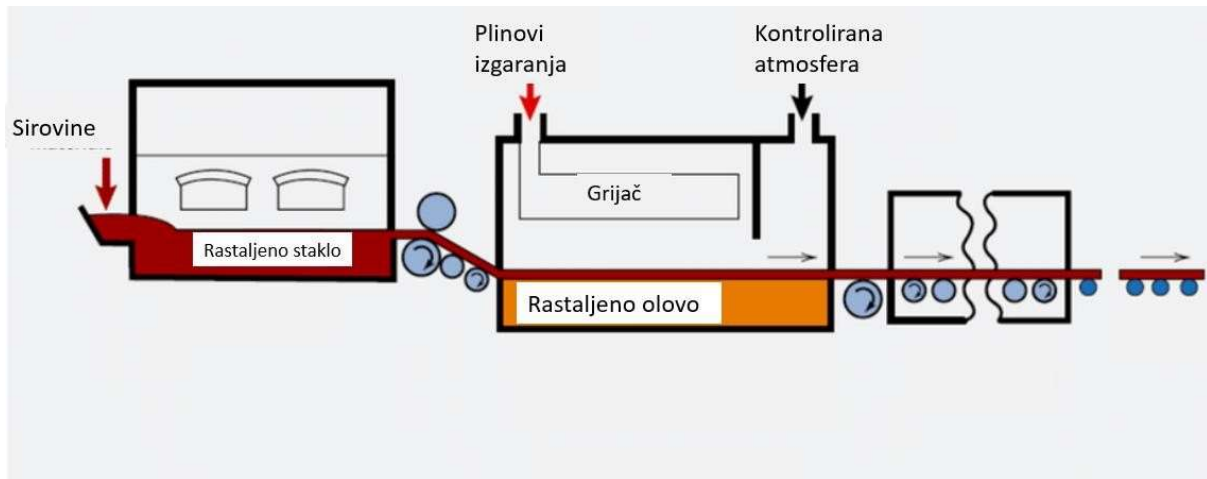
Izvlačenje trake potpomaže se vodom ohlađenim valjcima koji hlade rubove trake. Staklene trake izvlače se vertikalno pomoću stroja koji je sličan Fourcaultovom stroju. Širina staklenih traka kreće se od 220 cm do 320 cm, a ovim postupkom moguće je izvući 70 m/h do 110 m/h stakla debljine 3 mm [5].

### 2.3.1.4. Float (plutajući) postupak

1952. godine Sir Alastair Pilkington je razvio tehnološki postupak proizvodnje stakla pod nazivom "float". Automatizirana proizvodnja plivajućeg stakla počela je 1958. godine prema "float postupku. Ovaj postupak podrazumijeva klizanje široke trake rastopljene mase po metalu u kontroliranoj atmosferi. Masa se postupno hladi, rezultirajući staklom s izuzetno ravnom površinom. Dodavanje različitih primjesa u osnovnu smjesu omogućuje proizvodnju stakla različitih boja, namjena i svojstava. Float staklo, dobiveno ovim postupkom, odlikuje se:

- Prozirnošću
- Bistrom staklenom masom
- Jednoličnom debljinom i paralelnim površinama

Zbog svojih karakteristika, ovo staklo se smatra osnovnim proizvodom za dobivanje drugih vrsta stakla. Najčešće se koristi u građevinarstvu i koristi se za proizvodnju raznih staklarskih proizvoda. Float staklo je dostupno u različitim debljinama, od 2 mm do 25 mm, pri čemu se dimenzije prilagođavaju transportu. Danas je float postupak standardna metoda za proizvodnju stakla, a float staklo čini preko 90% svjetske proizvodnje ravnog stakla [5]. Postupak je prikazan na slici 3.



Slika 3. Princip proizvodnje stakla float (plutajućim) postupkom [26]

## 2.4. Tipovi stakla

### 2.4.1. Klasično staklo

Staklo koje nije prošlo toplinsku obradu, poznato kao obično staklo u konstrukcijskom smislu, karakterizira idealna krhkost, što znači da je potpuno elastično sve do trenutka sloma. Lom takvog stakla uglavnom ovisi o faktorima poput površinskih pukotina, napreznja, veličine napregnute površine i trajanja opterećenja. Pukotine u staklu mogu biti inherentne ili nastati uslijed rezanja, brušenja i bušenja, a njihov broj može se povećati ovisno o okolini u kojoj se staklo koristi. Primjerice, vlažnost zraka može potaknuti rast pukotina. Važno je napomenuti da rezani rubovi stakla obično imaju manju čvrstoću u odnosu na unutarnje površine, stoga se pri dizajniranju konstrukcija s staklom primjenjuju smanjena dopuštena napreznja za staklene grede u usporedbi s staklenim pločama. Iako se predviđanje loma stakla temelji na statističkim zakonitostima, pravilno rukovanje, održavanje i izbjegavanje oštećenja mogu značajno povećati sigurnost i trajnost konstrukcija koje koriste obično staklo [8].

### 2.4.2. Kaljeno staklo

Kaljeno staklo podvrgava se procesu zagrijavanja na 620 °C, nakon čega se naglo hladi pomoću zraka. Ovaj postupak rezultira staklom koje ima stisnute površine i vlačna napreznja u unutrašnjosti, zbog čega može izdržati veća opterećenja u usporedbi s običnim staklom. Tijekom procesa kaljenja, nečistoće prisutne u staklu, posebno male količine nikal sulfida, mogu uzrokovati neočekivano lomljenje stakla bez vidljivog razloga. To se događa zbog

promjene faze tih nečistoća, što rezultira njihovim širenjem i pucanjem stakla na vrlo sitne komade. Na slici 4 prikazani su kaljeno, laminirano i klasično staklo pri pucanju. Kako bi se

osigurala kvaliteta kaljenog stakla, većina stakla prolazi kroz kontrolu promjene faze u tvornici. Razbijeni komadi kaljenog stakla imaju oblik malih kockica jednake ili manje debljine od izvornog stakla, što čini kaljeno staklo pogodnim i kao sigurnosno staklo. Važno je napomenuti da kaljeno staklo ima povećanu čvrstoću i otpornost na udarce u usporedbi s običnim staklom, ali i da treba voditi računa o mogućnosti nenadanih lomova uzrokovanih nečistoćama [8].



Slika 4. Izgled loma običnog, kaljenog i laminiranog stakla [27]

### 2.4.3. Laminirano staklo

Laminirano staklo je sastavljeno od najmanje dvije staklene plohe koje su međusobno povezane prozirnim plastičnim slojem. Za tu svrhu koriste se osnovni materijali poput polivinilbutirala (PVB) ili akrilnih smola. Debljina plastičnog sloja varira između 0,4 mm i 6 mm. Sve vrste stakla, uključujući obično, kaljeno i toplinski ojačano staklo, mogu se koristiti u laminiranim konstrukcijama. Karakteristike laminiranog stakla ovise o čvrstoći veze između staklene plohe i PVB folije. Faktori poput trajanja opterećenja, debljine plastičnog sloja, temperature i pozicije sloja u odnosu na težište presjeka utječu na ponašanje te veze. Na primjer, dugotrajno opterećenje ili povišena temperatura mogu omekšati vezu između staklenih ploha zbog relaksacije PVB folije. Laminirano staklo ima široku primjenu u sigurnosnom smislu. Pri lomu stakla, plastični sloj nastavlja povezivati razbijene komade, smanjujući rizik od ozljeda uzrokovanih oštrim staklenim krhotinama. Deblji plastični slojevi pružaju veću

sigurnost od prodiranja pri udarcima. Dodatno, laminirana stakla s više slojeva pružaju još veću sigurnost.

#### 2.4.4. Toplinski ojačano staklo

Toplinski ojačano staklo podvrgava se kontroliranom procesu zagrijavanja i hlađenja kako bi se poboljšala njegova otpornost i sigurnost. Zagrijavanje smanjuje površinsku napetost stakla, čime se postiže veća otpornost na lom u odnosu na obično staklo. Međutim, lom toplinski ojačanog stakla ima više sličnosti s lomom običnog stakla nego s kaljenim staklom, što znači da se pri lomu ne raspada na male krhotine kao kaljeno staklo, već ostaje u većim fragmentima s ostrim rubovima. Ova karakteristika čini toplinski ojačano staklo prikladnim za primjenu gdje je potrebna poboljšana sigurnost, ali nije potrebno sprječavanje ozljeda od oštrih krhotina [8, 9].

#### 2.4.5. Izolacijsko staklo

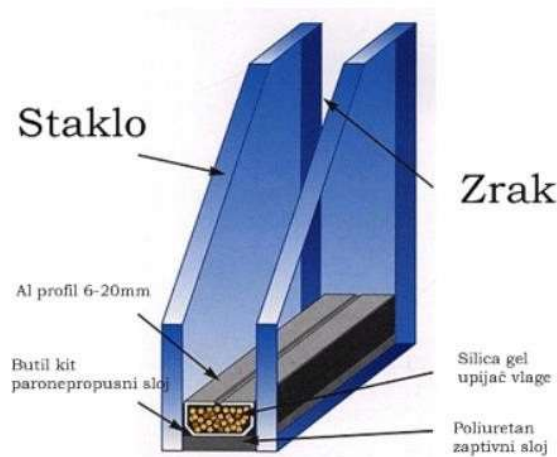
Izolacijsko staklo je sastavljeno od dvije staklene ploče koje su odvojene šupljim profilom, obično aluminijskim, i moguće je koristiti i plastični profil s boljim toplinskim karakteristikama. Unutar profila se nalazi materijal za isušivanje koji održava suhoću zraka u šupljini između stakala. Staklene ploče su spojene silikonom duž oboda kako bi se omogućili mali međusobni pomaci i spriječilo prodiranje vode. Šupljina između stakala može imati različite dimenzije, obično u rasponu od 6 mm do 20 mm, a može biti ispunjena zrakom ili drugim inertnim plinom poput argona. Struktura izolacijskog stakla vidljiva je na slici 5. Odabir plina ovisi o željenim toplinskim svojstvima stakla.

Glavne prednosti izolacijskog stakla su:

- Poboljšana toplinska izolacija
- Poboljšana zvučna izolacija [8].

Međutim, temperaturne promjene mogu utjecati na ponašanje izolacijskog stakla. Niski atmosferski tlak i povećane temperature mogu uzrokovati ekspanziju unutarnjeg plina, dok visoki atmosferski tlak u kombinaciji s niskim temperaturama može uzrokovati kontrakciju plina. Takve promjene atmosferskih uvjeta mogu dovesti do značajnog progiba stakla koji može negativno utjecati na izgled zgrade. Stoga je važno uzeti u obzir ove faktore prilikom dizajniranja i instaliranja izolacijskog stakla [8].





Slika 5. Izolacijsko staklo [28]

## 2.5. Mehanička svojstva stakla

Gustoća stakla je slična gustoći armiranog betona ( $25 \text{ kg/m}^3$ ), dok je Youngov modul stakla jednak aluminiju (70 GPa) [7]. Unatoč izuzetno visokoj tlačnoj čvrstoći od oko 1000 MPa, staklo pokazuje mnogo nižu vlačnu čvrstoću, što je ključno za određivanje njegove prikladnosti za konstrukcijske primjene [7]. Teoretska vrijednost vlačne čvrstoće stakla iznosi otprilike od 6,5 GPa do 8,5 GPa, međutim, rezultati ispitivanja razaranjem pokazuju da je kritično vlačno naprezanje samo mali dio te teoretske vrijednosti (od 30 MPa do 60 MPa). Razlog za to veliko neslaganje između teoretske i praktične vlačne čvrstoće stakla leži u prisutnosti površinskih nedostataka, što je karakteristično za krhke materijale. Na primjer, površina staklene ploče ima mnogo dubokih mikro-ogrebotina u usporedbi s površinom staklenih vlakana. Što je manji poprečni presjek vlakana, to je manje oštećenja materijala, a time i veća vlačna čvrstoća. Stoga je važno uzeti u obzir ove površinske nedostatke prilikom konstrukcijskog dizajna stakla kako bi se osigurala njegova optimalna vlačna čvrstoća [10]. Mehanička svojstva stakla prikazana su u tablici 1.

Tablica 1. Osnovna mehanička svojstva natrij-kalcij-silikatnog stakla [10]

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	2500 kg/m <sup>3</sup>
Youngov modul	70000 MPa
Poissonov koeficijent	0,23
Karakteristična vlačna čvrstoća	45 MPa
Koeficijent toplinskog širenja	9×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Toplinska vodljivost	1 W×m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

Vlačna čvrstoća stakla nije konstantna vrijednost i ovisi o mnogim faktorima kao što su:

- Stanje površine elemenata
- Veličina stakla
- Povijest trajanja opterećenja
- Zaostalo naprezanje
- Radni uvjeti elementa [11].

Staklo, kao i većina građevinskih materijala, podliježe koroziji. Dobro je poznata pojava zamučivanja staklenih ploča koje su horizontalno pohranjene u uvjetima visoke vlažnosti ili su izložene stalnom kontaktu s vodom. Također, prirodna vlaga u okolišu nagriza staklene ploče koje su izložene dugotrajnom naprežanju, posebno ako traje duže vrijeme. Svaka molekula H<sub>2</sub>O reagira silikatnom strukturom stakla stvarajući dvije grupe silikata koje se ne mogu povezati međusobno, stvarajući praznine u silikatnoj strukturi stakla. Ako se ova reakcija dogodi na vrhu pukotine, praznina postupno raste atomskim koracima, što dovodi do smanjenja čvrstoćestakla. Velike promjene temperature dodatno ubrzavaju procese korozije.

Postupno smanjenje čvrstoće stakla tijekom vremena naziva se statičkim zamorom [11]. U tablici 1 prikazana su osnovna mehanička svojstva natrij-kalcij-silikatnog stakla.

## 2.6. Staklo kao građevni materijal

Staklo se sve više koristi u građevinskoj industriji, a najčešće se koristi natrij-kalcij-silikatno staklo [10]. Za proizvodnju ovog stakla koriste se sirovine poput kvarcnog pijeska, otpada od stakla te dodataka poput natrijevog i kalcijevog karbonata, kao i otapala u obliku oksida bora i olova. Plutajući (float) proces, koji je razvio Pilkington pedesetih godina prošlog stoljeća, trenutno se koristi za proizvodnju 90% stakla [13]. U ovom procesu, sirovine se taljenjem pretvaraju u tekuću masu koja se izlijeva na podlogu od rastaljenog kositra. Ovaj postupak omogućuje formiranje neprekidne ploče s ravnom površinom [14]. Nakon toga, ploča se hladi na valjcima kako bi se smanjio toplinski stres i dobiva žareno ravno staklo. Standardne dimenzije proizvedenih staklenih ploča su 6,00 m × 3,21 m, ali moguće je proizvesti i mnogo veće ploče do 18 m duljine [15].

U građevinske svrhe obično se koriste debljine stakla od:

- 8 mm
- 10 mm
- 12 mm

Primjeri korištenja stakla kao građevnog materijala prikazani su na slikama 6 i 7.



Slika 6. Stakleni strop [12]



Slika 7. Stakleni pregradni blokovi [12]

Staklo se značajno razlikuje od drugih materijala koji se često koriste u građevinarstvu poput čelika, armiranog betona ili drveta. Ono je savršeno elastičan, izotropan i krhki materijal [10]. Krhkost je glavna mana stakla, jer se ono naglo i bez upozorenja razbija pod preopterećenjem. Također, vlačna čvrstoća stakla ima veliko rasipanje i ovisi o faktorima poput trajanja opterećenja, veličine uzorka i položaja maksimalnog naprezanja. Konstrukcijsko ponašanje laminiranog stakla također je ovisno o temperaturi i vremenu zbog reoloških svojstava slojeva koji povezuju staklene ploče. Stoga je projektiranje staklenih elemenata zahtjevno i zahtijeva specijalizirano znanje i iskustvo.

Važan aspekt projektiranja konstrukcija od stakla je ograničavanje koncentracije naprezanja u staklu razrađivanjem detalja konstrukcije i korištenjem elastičnih materijala niske krutosti između stakla i učvršćivača, obično od čelika. Sigurna uporaba elemenata od stakla uključuje razinu materijala, gdje vrsta stakla određuje nosivost elementa (npr. kaljeno staklo povećava nosivost za 2 do 3 puta), razinu elementa, gdje laminirano staklo poboljšava ponašanje nakon loma, te razinu cijele konstrukcije koja treba biti projektirana na način da lom pojedine komponente ne dovodi do progresivne katastrofe [16, 17].

## 2.7. Recikliranje stakla

Staklo je materijal s amorfnom strukturom, viskozna tekućina koja nema definirano talište. Staklo se odlikuje svojstvima:

- Loša toplinska vodljivost
- Izolacijska svojstva
- Visoka prozirnost
- Netopljivost u vodi.

Koristi se u različitim područjima kao što su:

- Medicina
- Građevinarstvo
- Automobilaska industrija
- Umjetnost
- Proizvodnja robe široke potrošnje.

Staklena ambalaža omogućuje zadržavanje svježine i arome proizvoda, budući da je nepropusna i ne reagira s okolinom.

U Republici Hrvatskoj, sve vrste otpadnog stakla (slika 8 ) moguće je reciklirati:

- Ambalažno staklo
- Ravno prozorsko staklo
- Bolničko staklo
- Laboratorijsko staklo
- Automobilsko staklo
- Kristalno staklo [18].



Slika 8. Stakleni proizvodi za recikliranje [27]

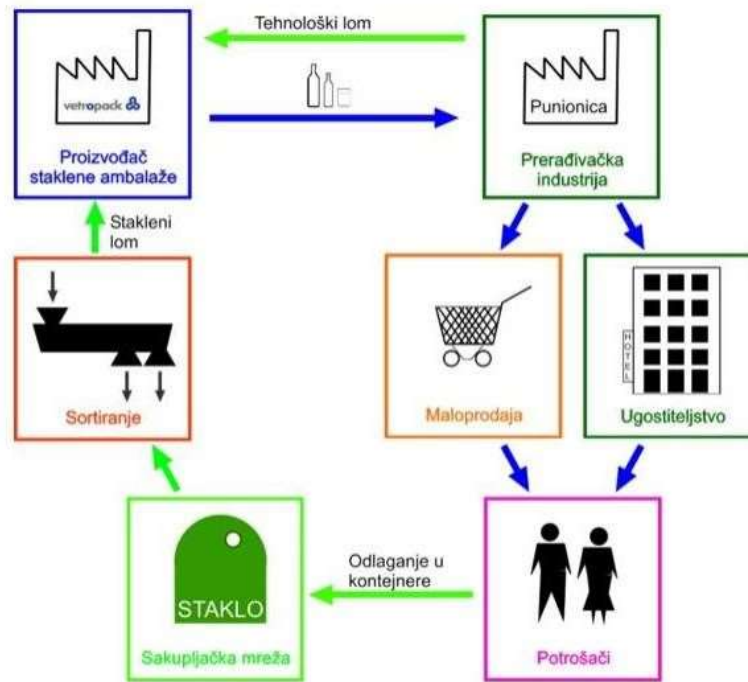
Ključno je pravilno postupanje s otpadnim staklom, što uključuje smanjenje generiranja otpada i odvojeno prikupljanje. Smanjenje otpada može se postići kroz ponovno korištenje staklene ambalaže punjenjem i upotrebom praznih ambalaža u druge svrhe. Odvojeno prikupljanje je temeljni korak u recikliranju. Stakleni ambalažni otpad bez obzira na boju odlaže se u zelene spremnike, dok se bezbojna staklena ambalaža odlaže u bijelo-zelene spremnike. Prije odlaganja, ambalažu treba isprazniti i ukloniti zatvarače. Jedan zeleni spremnik godišnje može smanjiti odlaganje otpada za najmanje 4 prostorna metra na odlagalištima što dovodi do štednje dragocjene prirodne sirovine i energiju te smanjuje onečišćenje tla, vode i zraka [19].

Recikliranje stakla uglavnom se odnosi na staklenu ambalažu, koja može biti povratna ili jednokratna. Prema podacima iz 2015. godine, staklo čini 10% komunalnog otpada, ambalažno staklo čini 64% ukupne proizvodnje stakla, a samo 16% staklene ambalaže u Hrvatskoj se reciklira [18].

Staklo je materijal koji se uvijek može reciklirati i ponovno koristiti, što doprinosi smanjenju potrošnje energije, emisija CO<sub>2</sub>, količine otpada te korištenju prirodnih resursa. Stopa recikliranja trenutno iznosi 76%. No, europski proizvođači staklene ambalaže postavili su si novi cilj kroz inicijativu "Close the Glass Loop" da do 2030. godine prikupe 90% upotrijebljenog stakla. Time bi se zatvorio ciklus proizvodnje i uporabe stakla. Planira se okupljanje različitih sudionika u lancu prikupljanja i recikliranja stakla s ciljem poboljšanja sustava prikupljanja i kvalitete recikliranog stakla [20].

### **2.7.1. Reciklažni tok ambalažnog stakla**

Staklena ambalaža se nakon upotrebe odlaže u spremnike za recikliranje, koje se zatim prevoze u reciklažne pogone. U pogonima, staklo se prvo čisti od neželjenih nečistoća, sortira se po boji i drobi na manje komadiće. Postupak sortiranja uključuje ručno odvajanje ambalažnog stakla iz miješanog komunalnog otpada. Nakon prikupljanja, staklo se dostavlja u tvornicu u obliku staklenog otpada i podvrgava se daljnjem razvrstavanju prema kvaliteti. Magnetni otpad se uklanja pomoću magneta, a ručno odvajanje krupnog otpada odvija se na sortirnim trakama. Stakleni otpad se zatim drobilicom usitnjava na optimalnu veličinu. Veliki komadi stakla i strani materijali se odvajaju kroz sita, a posebni uređaji uklanjaju nemagnetične nečistoće, kamen, keramiku i porculan. Automatski separatori identificiraju staklo različitih



Slika 9. Kružni tok recikliranja stakla [29]

Nakon postupka razvrstavanja, provodi se dodatna kontrola kako bi se osigurala kvaliteta materijala. Čisti stakleni otpad se pohranjuje u posebnim spremnicima ili kontejnerima.

U procesu recikliranja koriste se:

- Magnetski separatori
- Separatori s vrtložnim strujama
- Separatori s teškim strujama
- Sita
- Zračni klasifikatori za uklanjanja metala i nečistoća.

U nekim pogonima se također koriste optički uređaji za sortiranje prema boji, dok se u drugima i dalje obavlja ručno sortiranje. Metalni ostaci, kamen, keramika i slični materijali ne rastapaju se u staklenoj peći, već ostaju kao nečistoće u staklenoj masi, smanjujući mehaničku čvrstoću ili uzrokujući "škart" u proizvodnji. Čelik i olovo, na primjer, tonu na dno peći, oštećujući vatrootpornu oblogu i usporavajući istjecanje stakla iz peći [18].

### 2.7.2. Stakleni lom

Stakleni lom je rezultat procesa recikliranja staklenog otpada, a vidljiv je na slici 10. Sadrži razne organske i anorganske nečistoće koje je potrebno ukloniti tijekom recikliranja. Najčešće primjese u staklenom lomu su sljedeće:



- Metalni dijelovi zatvarača boca
- Olovni ovratnici na bocama za vino i pjenušac
- Metalni zatvarači i prstenovi na vratovima boca
- Čaše i ambalaža opasne tekućine
- Organske tvari i vlaga [18]



Slika 10. Stakleni lom [29]

Nakon procesa recikliranja, stakleni lom ne sadrži metalne primjese, porculan i keramiku. Stakleni lom visoke razine nečistoće može se koristiti kao dodatak u izradi cestovnih podloga, asfalta, staklenih vlakana za izolaciju i za pjeskarenje. Prilikom upotrebe staklenog loma, važni su tri parametra: kemijski sastav, boja i granulometrijski sastav [18].

Stakleni lom se miješa sa sodom, dolomitom, kvarcnim pijeskom i kalcitom u tzv. sirovinsku smjesu za izradu nove staklene ambalaže. Zamjena jedne tone primarnih sirovina s jednom tonom staklenog loma rezultira uštedom resursa, dok veći udio loma smanjuje temperaturu taljenja i pridonosi energetskej učinkovitosti [18].

### 3. PJENASTO STAKLO

Pjenasto staklo posjeduje jedinstvenu kombinaciju svojstava:

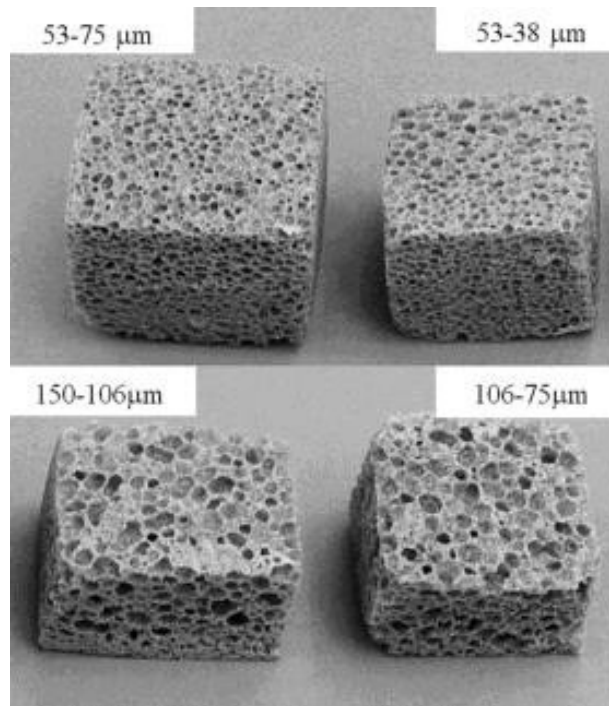
- Mala gustoća
- Visoka čvrstoća
- Visoka tlačna čvrstoća
- Toplinska izolacija
- Otpornost na smrzavanje
- Vatrootpornost
- Kemijska inertnost i netoksičnost
- Otpornost na glodavce i insekte
- Otpornost na vodu i paru.

Osim toga, pjenasto staklo olakšava brzu izgradnju i ima niske troškove prijevoza, lako se rukuje, reže i buši, te se lako kombinira s betonom. Ta kombinacija svojstava čini pjenasto staklo praktički nezamjenjivim kako u građevinarstvu (npr. za izolaciju krovova, zidova, podova i stropova u uvjetima visokih ili niskih temperatura), tako i u mnogim drugim područjima [21]. Pjenasto staklo prikazano je na slici 11.



Slika 11. Pjenasto staklo [30]

Proces dobivanja pjenastog stakla obično uključuje djelovanje sredstva za stvaranje plina (najčešće ugljik ili ugljikovodik) koje se zajedno s početnim staklom melje u fini prah. Smjesa staklenog praha, pjenila i ponekad drugih mineralnih tvari zagrijava se na temperaturu na kojoj dolazi do oslobađanja plina iz pjenila unutar plastične mase omekšanih staklenih čestica koje podliježu viskoznom toplinskom sinteriranju. Oslobođeni plin stvara mnoštvo početno sfernih mjehurića koji se pod povećanim tlakom plina šire u pjenušavu strukturu poliedarskih stanica koje, nakon hlađenja stakla, čine pore u pjenastom staklu. Svojstva gotovih proizvoda od pjenastog stakla snažno ovise o vrsti i količini dodanih sredstava za pjenjenje, početnoj veličini staklenih čestica i temperaturnom režimu pečenja. Razlika u strukturi stakla različitih veličina čestica prikazano je na slici 12. Rezultat je pjenasto staklo visoke tlačne čvrstoće i dimenzijske stabilnosti, karakterizirano gustoćom od samo  $0,13 \text{ g/cm}^3$  do  $0,3 \text{ g/cm}^3$  [21]. Svojstva staklene pjene izrađene od komercijalnog stakla prikazana su u tablici 2.



Slika 12. Pjenasto staklo izrađeno različitim veličinama čestica [21]

Tablica 2. Mehanička svojstva pjenastog stakla izrađenog od komercijalnog stakla [21]

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	0,1–0,3 g/cm <sup>3</sup>
Poroznost	85–95 %
Tlačna čvrstoća	0,4–9 MPa
Savojna čvrstoća	0,3–1 MPa
Modul elastičnosti pri savijanju	0,1–1,5 GPa
Koeficijent toplinskog širenja	8,9 x 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Toplinska provodljivost	0,04–0,08 W/mK
Specifična toplina	0,84 kJ/kgK
Toplinska difuzivnost pri 0 °C	(3,5–4,9) x 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s
Gubitak zvučne izolacije pri normalnoj frekvenciji	28 dB/100 mm

### 3.1. Prednosti i mane pjenastog stakla [22]

Pjenasto staklo je inovativan materijal s mnogim prednostima u građevinskoj industriji. Ovaj materijal ima jedinstvenu kombinaciju svojstava koja ga čini praktički nezamjenjivim u različitim područjima primjene.

Jedna od glavnih prednosti pjenastog stakla je njegova otpornost na vodu. Budući da je otporan na vlagu, neće nabubriti ni apsorbirati vodu tijekom cijelog životnog vijeka zgrade. Ovo čini

penasto staklo izvršnim izolacijskim materijalom za krovove, zidove, podove i stropove u ekstremno vlažnim uvjetima.

Osim toga, penasto staklo je otporno na štetočine poput glodavaca i insekata. Njegova mineralna kompozicija sprječava rast biljaka i gljivica, što ga čini idealnim izborom za izolaciju koja je izložena eksternim uvjetima ili kontaktu s tlom.

Jedna od ključnih prednosti penastog stakla je visoka tlačna čvrstoća. Ovaj materijal može izdržati velika opterećenja bez deformacija, što ga čini pogodnim za upotrebu kao nosivu toplinsku izolaciju. Pjenasto staklo također pruža izvrsnu izolaciju u područjima kao što su vodovodne instalacije, sustavi prijenosa plina i komercijalne cijevi.

Još jedna značajna prednost penastog stakla je njegova svojstva otpornosti na vatru. Ono ne gori ni pod utjecajem visokih temperatura i pruža pouzdanu zaštitu od širenja vatre. Ova svojstva čine ga izvršnim izborom za izolaciju u slučaju požara, jer može značajno usporiti širenje vatre kroz zidove i cijevi.

Pjenasto staklo također je nepropusno za vlagu. Njegove zatvorene staklene stanice sprječavaju prodiranje vlage i stvaraju učinkovitu barijeru protiv kondenzacije i rasta plijesni.

Osim svojih funkcionalnih svojstava, penasto staklo je i ekološki prihvatljivo. Proizvodi se od recikliranog stakla i ne sadrži štetne kemikalije. Nakon upotrebe, penasto staklo može se ponovno koristiti u uređenju okoliša ili kao termički izolacijski granulat, što doprinosi održivosti i smanjenju otpada.

Unatoč svojim mnogim prednostima, važno je napomenuti i nekoliko nedostataka penastog stakla. Ono je krhko i lomljivo, osjetljivo na oštećenja uzrokovana vibracijama. Također, troškovi instalacije mogu biti viši zbog njegove lomljivosti, a sam materijal može biti skuplji u usporedbi s drugim izolacijskim materijalima sličnih svojstava.

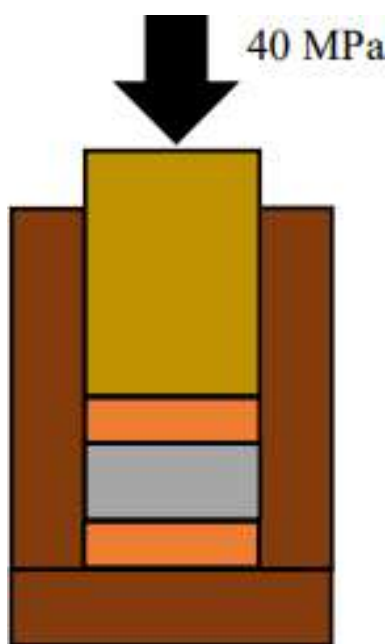
Ukupno, penasto staklo je inovativan materijal s mnogim prednostima koji ga čine izuzetno korisnim u građevinskoj industriji. Njegova vodootpornost, otpornost na štetočine, visoka tlačna čvrstoća, svojstva otpornosti na vatru, nepropusnost za vlagu, dimenzijska stabilnost, otpornost na kiseline, jednostavnost uporabe i ekološka prihvatljivost čine ga atraktivnim izborom za različite građevinske primjene. Ipak, važno je uzeti u obzir i nedostatke, poput lomljivosti i viših troškova instalacije.

## 3.2. Proizvodnja pjenastog stakla

### 3.2.1. Kemijsko pjenjenje [23]

Staklene pjene mogu se proizvesti različitim postupcima. Najčešći način proizvodnje temelji se na kemijskom pristupu u kojem se miješaju stakleni prah i sredstva za pjenjenje te se zagrijavaju.

Staklo se drobi kako bi se dobila sitna čestica. Stakleni prah i sredstva za pjenjenje miješaju se koristeći kugličnu drobilicu kako bi se homogenizirala smjesa i smanjila veličina čestica jer veličina čestica ima veliki utjecaj na sposobnost pjenjenja i karakteristike pjene. Smjesa praha jednoosno se preša u pelet pri tlaku od 40 MPa, jer uzorci pripremljeni od kompaktnih smjesa praha dobivaju ujednačenu strukturu u usporedbi s uzorcima pripremljenim od labavih smjesa praha. Peleti mogu imati promjer od 13 mm ili 35 mm. Ovaj postupak vidljiv je na slici 13.



Slika 13. Proizvodnja pjenastog stakla metodom kemijskog pjenjenja [22]

Pjenjenje peleta provodi se na dva različita načina. Mali peleti (1 g, promjera 13 mm) stavljaju se na aluminijsku ploču premazanu kaolinom i pjene se u grijanoj cijevnoj peći. Veliki peleti (20 g, promjera 35 mm) stavljaju se na čeličnu ploču u kružni kalup promjera 60 mm prekriven aluminijsko-silikatnim vlaknima kako bi se spriječilo lijepljenje i pjene se u električno grijanoj cijevnoj peći s kontrolom plina.

Pjenjenje staklenog praha pomoću sredstava za pjenjenje uključuje nekoliko koraka. Nakon miješanja i prešanja u pelet, smjesa se zagrijava. Tijekom zagrijavanja smjesa doseže točku sinteriranja stakla, koja je ključni korak u stvaranju pjene. Sinteriranje stvara nedovršeni obradak koji može zarobiti plin koji se oslobađa iz sredstava za pjenjenje umjesto da plin bude oslobođen u okoliš. Nastavak zagrijavanja dovodi staklenu fazu do točke omekšavanja (viskoznosti od 106,6 Pa·s); nakon toga trebaju se dogoditi reakcije sredstava za pjenjenje. Reakcije mogu biti dekompozicije metalnih karbonata i prijelaznih metalnih oksida u obliku karbonskih spojeva i CO<sub>2</sub> ili izgaranja organskih spojeva na temelju ugljika. Reakcijom između sredstava za pjenjenje i stakla dolazi do oslobađanja plina, što dovodi do širenja viskoznog tijela. Daljnjim zagrijavanjem dolazi do stapanja pora i konačnog urušavanja pjene, a hlađenjem se dobivena porozna struktura, što rezultira staklenom pjenom. Pravilni program zagrijavanja važan je čimbenik i ovisi o kemijskom sastavu stakla i sredstvima za pjenjenje koja se koriste.

Kemijsko pjenjenje ovisi o raznim parametrima. Prije svega, temperatura razgradnje ili reakcije sredstava za pjenjenje mora biti u pravom rasponu viskoznosti stakla koje se koristi. Staklo se mora sintetizirati prije oslobađanja plina iz sredstava za pjenjenje, dok se sredstva za pjenjenje moraju razgraditi prije nego što viskoznost stakla postane preniska da bi zadržala plin. Stoga je temperatura ključna za kontrolu i mora se mijenjati za različite sastave stakla. Ioni Li<sup>+</sup> i Na<sup>+</sup> iz alkalijskih fosfata uzrokuju urušavanje pjene zbog efekta taljenja. Ako bi se temperatura obrade za te uzorke smanjila, mogle bi se dobiti staklene pjene s zatvorenim porama jer urušavanje pjene ne bi nastupilo. U vezi s temperaturom, važna je brzina zagrijavanja. Niska brzina zagrijavanja poželjna je kako bi se uzorak ravnomjerno zagrijavao. Prethodno se sugerira brzina zagrijavanja od 5 °C/min do 10 °C/min, iako se, uspoređujući brzinu zagrijavanja od 5 °C/min i 10 °C/min, dobiva niža gustoća pjene smanjenjem brzine zagrijavanja.

Da bi se pripremile termoizolacijske staklene pjene, ključna je niska gustoća (ili visoka poroznost). Da bi se to postiglo, veličina čestica praha i sredstava za pjenjenje može se smanjiti jer to poboljšava pjenjenje. Smanjenjem veličine sredstava za pjenjenje povećava se ukupna površina, što povećava kinetiku reakcije. Početna veličina čestica također utječe na veličinu pora u staklenim pjena.

Kemijsko pjenjenje može se provoditi pomoću različitih sredstava, obično podijeljenih na metalne karbonate i prijelazne metalne okside i/ili ugljikovodike. Glavni princip je isti, pri čemu se prah stakla koji sadrži sredstva za pjenjenje preša u zeleno tijelo i zagrijava iznad

temperature omekšavanja. Prah stakla sinterira stvarajući zatvoreno tijelo koje zadržava plinove koji se proizvode iz sredstava za pjenjenje, bilo razgradnjom ili redoks-reakcijom.

Dodaci mogu pomoći u mijenjanju postupka pjenjenja ili karakteristika pjene. Alkalijski fosfati kao dodaci pokazuju značajan učinak na pjenjenje kada se mijenjaju i alkalijski dio (Li, Na i K) i koncentracija (do 1,03 mol%). Nijedan od alkalijskih fosfata ne pokazuje učinak na strukturu pora, odnosno veličinu pora, oblik pora i debljinu zidova, u istraženom rasponu koncentracije. Međutim,  $K_3PO_4$  pokazuje obećavajuće rezultate za postizanje visokog stupnja zatvorenih pora kod visoko poroznih staklenih pjena.

### 3.2.2. Fizičko pjenjenje [23]

Osim kemijskog pjenjenja, za proizvodnju staklenih pjena koriste se i drugi pristupi. Industrija metalnih pjena koristi postupak temeljen na sinteriranju pod visokim tlakom.

Fizičko pjenjenje postupak je u dva koraka, za razliku od jednostavnog kemijskog pjenjenja. Stakleni prah se preša u pelete, ali bez dodavanja pjenila. Peleta se sinterira pod tlakom plina. Sinteriranje oblikuje zeleno tijelo u kojem se zadržava visoki tlak plina. Naknadno zagrijavanje rezultira ekspanzijom zbog visokog unutarnjeg tlaka plina i smanjenja viskoznosti stakla. Za uzorke, ponovljeno zagrijavanje provodi se više puta do sve veće maksimalne temperature kako bi se postigla slična kemija u plinskoj i čvrstoj fazi, ali s različitom gustoćom.

Fizičko pjenjenje snažno ovisi o vrsti plina i tlaku koji se koristi tijekom sinteriranja. Što se tiče vrste plina, uzorci sinterirani argonom i dušikom proširuju se do 600% prije hlađenja, dok se uzorci sinterirani helijem proširuju do 200%. Helij ima najveću topljivost u staklima, vjerojatno zbog manjeg kinetičkog promjera. Kinetički promjer helija, argona i dušika iznosi 0,255 nm, 0,354 nm, odnosno 0,364 nm. Ovi podaci pokazuju da helij može stati u silikatne prstene ako oni nisu zauzeti modificirajućim ionima. Također, velika količina helija može se fizički otapati u strukturi stakla, umjesto da ostane zarobljen u zatvorenim porama sinterirane pelete. Stoga, u porama postoji niži tlak koji ograničava ekspanziju staklene mase. Druga mogućnost manje ekspanzije uzoraka s helijem je da helij izlazi iz uzorka tijekom zagrijavanja jer može napustiti strukturu stakla kroz međuprostorne točke. S druge strane, argon i dušik su preveliki da bi se mogli smjestiti u međuprostorne točke, pa ostaju zarobljeni u zatvorenim porama, povećavajući tlak i rezultirajući većom ekspanzijom. Pjenjenje uzoraka započinje



između 540°C i 585 °C za sve uzorke. Općenito, uzorci sinterirani helijem počinju pjeniti pri nižoj temperaturi, zatim uzorci sinterirani argonom i na kraju uzorci sinterirani dušikom. Stoga, temperatura pjenjenja slijedi kinetički promjer plinova. Razlog za to može biti lakša difuzija helija u odnosu na druge plinove, što omogućava lakše kretanje pri visokim viskoznostima.

Drugi važan faktor je tlak plina koji značajno utječe na temperaturu pjenjenja i maksimalnu ekspanziju. Općenito, pjenjenje započinje pri nižim temperaturama s povećanjem tlaka jer veće unutarnje sile mogu proširiti viskoznu talinu od nižih sila pri niskom tlaku. S druge strane, tlak pokazuje maksimalno pjenjenje pri 20 MPa, dok uzorci sinterirani pri 25 MPa manje pjene. To bi moglo biti zbog sile koju stvara unutarnji tlak, koja nadmašuje silu staklene mase, kao što su površinska napetost i viskoznost, te vanjski atmosferski tlak.

Usporedba maksimalne veličine pjene pri maksimalnoj temperaturi je teška jer se pjene skupljaju tijekom hlađenja. Međutim, konačne staklene pjene mogu se usporediti među različitim istraživanjima jer je konačna veličina povezana s poroznošću. Poroznost uzoraka pripremljenih fizičkim pjenjenjem ima kritični tlak tijekom sinteriranja od oko 20 MPa. Prikazane poroznosti odnose se na pojedinačno toplinski tretirane uzorke. Stoga razlika u temperaturi pjenjenja objašnjava razliku u poroznosti između uzoraka sinteriranih argonom i između uzoraka sinteriranih dušikom.

Fizički pristup omogućava zadržavanje plinova unutar staklenih pjena koji se kemijski ne mogu zadržati. Analiza plinova uzoraka sinteriranih argonom i dušikom pokazuje prisutnost velikih količina sinterirajućeg plina (>70%). Međutim, prisutan je i CO<sub>2</sub> u količini do 30%, što je vjerojatno uzrokovano oksidacijom čestica ugljika. U pjenastom staklu sinteriranom argonom, helijem ili dušikom nalazi se visok sadržaj CO<sub>2</sub>. Također, razvoj CO<sub>2</sub> povećava ekspanziju uzoraka sinteriranih argonom i dušikom.

Važni parametri za fizičko pjenjenje staklenih pjena su još uvijek slabo istraženi, pa je potrebno provesti još mnogo istraživanja kako bi se postiglo temeljito razumijevanje kao za kemijsko pjenjenje. Međutim, za sada se razumiju neki početni parametri. Utvrđeno je odgovarajući inertni plinovi ili molekularni plinovi, povećavaju veličinu staklenih pjena. Stoga bi trebalo istražiti veće plinove od dušika kako bi se pronašla moguća maksimalna veličina plina ili povezala kinetički promjer (ili neki drugi relevantan parametar veličine) s veličinom konačnog staklenog pjena. S druge strane, utvrđeno je da je optimalan tlak sinteriranja pri 20 MPa. Stoga je za sada poznato da sinteriranje pri 20 MPa koristeći velike inerte plinove ključni parametri.

Staklena pjena pripremljena fizičkim pjenjenjem pokazuje važnost tlaka koji se stvara unutar staklene pelete. Ako je tlak nizak, ekspanzija će biti ograničena, dok će veći tlakovi omogućiti veću ekspanziju. Vrsta plina također ima utjecaj, pri čemu su argon i dušik pružaju veću ekspanziju od helija. Ovi parametri su važni za postizanje željenih svojstava staklenih pjena pri fizičkom pjenjenju.

### **3.2.3. *Proizvodnja od recikliranog stakla [24,25]***

Proizvodnja staklenih pjena od recikliranog stakla postala je važan i ekološki prihvatljiv način korištenja otpada od stakla. Recikliranje stakla ima ključnu ulogu u smanjenju otpada, očuvanju prirodnih resursa i zaštiti okoliša. Staklene pjene dobivene iz recikliranog stakla imaju širok spektar primjena u građevinskoj industriji i drugim sektorima.

Proces proizvodnje staklenih pjena započinje prikupljanjem i sortiranjem otpadnog stakla. Staklene boce, posude i drugi stakleni proizvodi prikupljaju se iz kućanstava, trgovačkih centara i industrijskih postrojenja. Nakon prikupljanja, staklo se sortira prema vrsti i boji kako bi se osigurala kvalitetna sirovina za proizvodnju staklene pjene.

Nakon sortiranja, otpadno staklo se melje u fini prah kako bi se povećala njegova površina i olakšala reakcija s pjenilom. Pjenilo, u obliku praha ili granula, dodaje se otpadnom staklu. Pjenilo može biti različitih vrsta, poput karbonata, sulfata ili silicij karbida, ovisno o željenim svojstvima pjene. Pjenilo reagira s rastopljenim staklom tijekom visoko temperaturnog procesa pjenjenja, stvarajući mjehuriće plina unutar staklene mase.

Masa stakla s pjenilom, poznata kao zelena tijela, oblikuje se u željeni oblik, poput ploča ili blokova, i podvrgava se kontroliranom zagrijavanju u peći. Tijekom zagrijavanja, pjenilo reagira s rastopljenim staklom, stvarajući mjehuriće plina koji se šire i stvaraju poroznu strukturu u staklenoj masi. Temperatura i vrijeme pečenja važni su parametri koji utječu na kvalitetu i karakteristike staklene pjene.

Nakon pečenja, staklena pjena se hladi do sobne temperature. Svojstva dobivene pjene su:

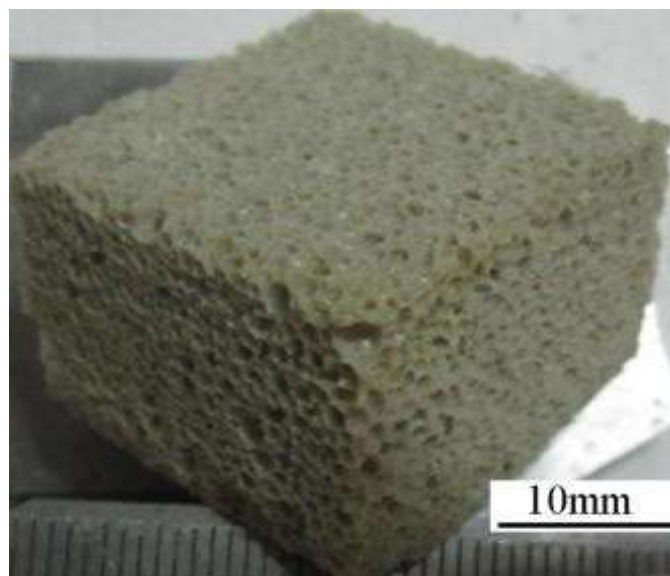
- Niska gustoća
- Visoka čvrstoća
- Toplinska izolacija

- Zvučna izolacija
- Otpornost na kemikalije

Primjer pjene dobivene ovom metodom vidljiv je na slici 14. Te karakteristike čine staklene pjene atraktivnim materijalom za primjenu u građevinskim materijalima, kao što su:

- Izolacija zidova stropova i podova
- Zaštita od požara
- Zvučna apsorpcija

Također se koristi u drugim područjima, poput automobilske industrije, filterima i pakiranjima.



Slika 14. Pjenasto staklo izrađeno od recikliranoga stakla [24]

Proizvodnja staklenih pjena od recikliranog stakla ima brojne prednosti. Smanjuje se potreba za izvlačenjem i proizvodnjom novog stakla, štede se prirodni resursi i smanjuje se emisija stakleničkih plinova. Osim toga, recikliranje stakla smanjuje količinu otpada koji završava na odlagalištima i doprinosi održivom razvoju.

Ukratko, proizvodnja staklenih pjena od recikliranog stakla predstavlja inovativan i ekološki prihvatljiv pristup upravljanju otpadom od stakla. Ovaj proces omogućuje ponovnu upotrebu stakla i stvaranje korisnih proizvoda s izvrsnim svojstvima. Upotreba staklenih pjena od recikliranog stakla pridonosi očuvanju okoliša i održivosti u građevinskoj industriji i drugim sektorima.

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

U sklopu eksperimentalnog dijela diplomskog rada izrađena su dva staklena bloka te su ispitani na uređaju za mjerenje tlačne čvrstoće. Cilj eksperimentalnog dijela je ispitati mehanička svojstva uzoraka u svrhu procjene kvalitete materijala od kojih su izrađeni. Ideja je postići strukturu koja bi zadovoljavala svojstva potrebna za korištenje u građevini, tj. za fasadne blokove.

Zahtjevi na materijal su što bolja mehanička svojstva uz što veću poroznost. Poroznost je potrebna kako bi se postigla što bolja izolacijska svojstva materijala.

### 4.1. Izrada uzoraka

Uzorci su izrađeni od granulata recikliranoga prozirnog stakla koji su povezani pomoću natrijevog silikata i dodataka. Uzorci su izrađeni u uvjetima (temperatura, tlak) potrebnima za postizanje veze između granulata. Oba uzorka prikazana su na slikama 15 i 16. Potrebne dimenzije uzoraka su:

- Duljina: 40 mm
- Širina: 20 mm
- Debljina 10 mm



Slika 15. Ispitni uzorci izrađeni od recikliranoga stakla



Slika 16. Ispitni uzorci izrađeni od recikliranoga stakla

Za izradu uzoraka nije postojao adekvatan kalup stoga je od aluminijske folije izrađen improvizirani kalup pomoću kojega su izrađeni uzorci (slika 17).



Slika 17. Ispitni uzorci u aluminijskom kalupu

Zbog nepravilnih oblika granulata konačni uzorci nisu idealnoga oblika, gornja površina uzoraka je neravna (vidljivo na slici 18), a poroznost unutar samog uzorka nije jednako raspoređena kroz uzorak.



Slika 18. Ispitni uzorci (ravnost površine)

Uz korištenu metodu, razmatralo se i povezivanje granulata polietilenskom smolom. Staklo i polietilenska smola imaju odlična adhezivna svojstva što bi dalo odlična mehanička svojstva, ali ne bi bilo poroznosti zbog čega bi masa materijala bila prevelika, a izolacijska svojstva niska.

#### **4.2. Mehaničko ispitivanje**

Oba uzorka podvrgnuta su na ispitivanje tlaka u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Laboratorij je zbog obnove fakulteta premješten u prostore tvrtke Viadukt, Radnička cesta 206. Za ispitivanje tlaka korišten je uređaj (slika 19) za mjerenje tlačne čvrstoće proizvođača Heckert.



Slika 19. Uređaj za mjerenje tlačne čvrstoće

Oba uzorka podvrgnuta su jednakom ispitivanju, u jednakim uvjetima, na jednakom stroju. U prvom koraku potrebno je postaviti uzorak na ispitnu pločicu nakon čega slijedi tlačjenje uzorka (slike 20 i 21).



Slika 20. Ispitni uzorak na ispitnoj stanici

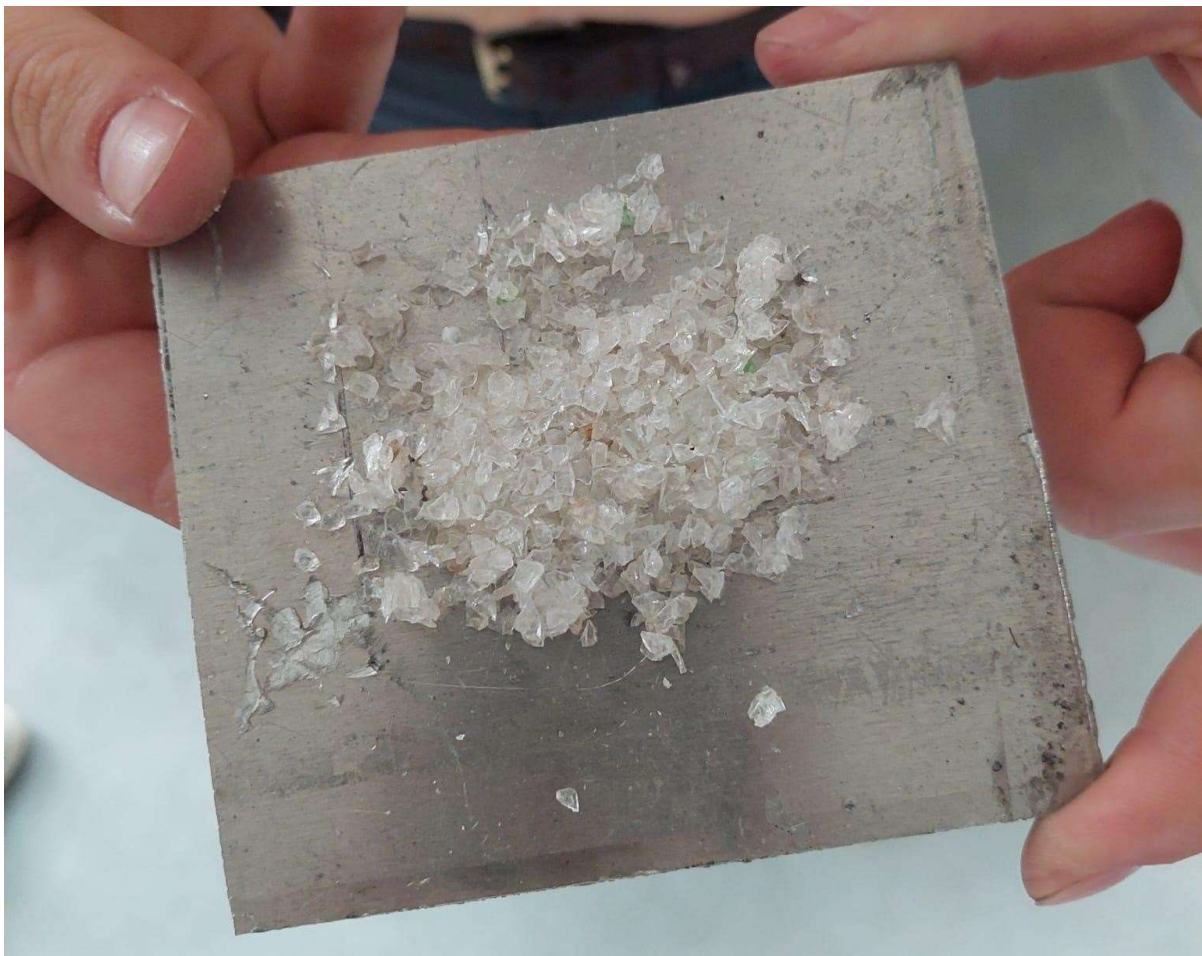


Slika 21. Ispitni uzorak neposredno prije ispitivanja

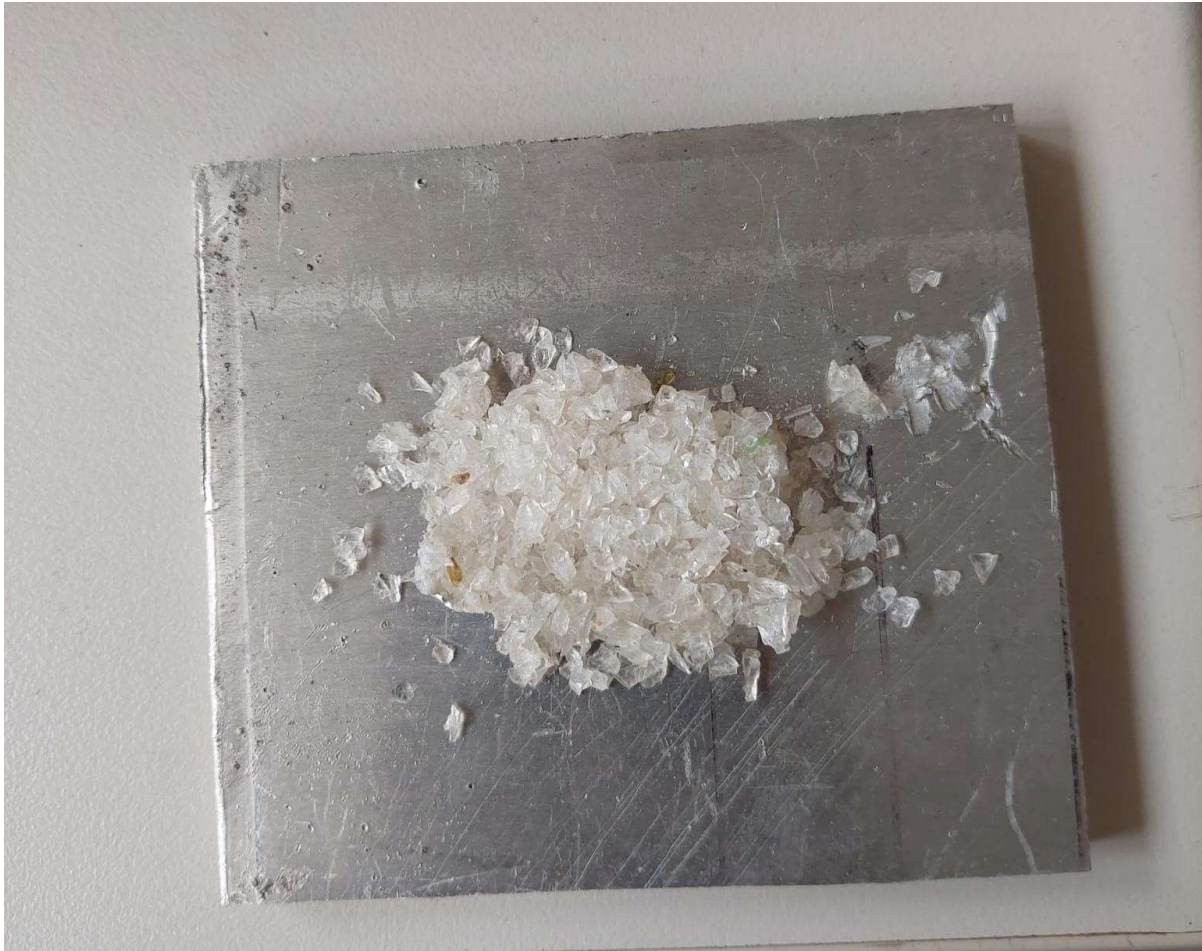


Uređaj nije u mogućnosti izmjeriti tlačnu čvrstoću uzoraka zbog konstantnih fluktuacija u rezultatima sile zbog čega je bilo potrebno "ručno" tlačiti uzorke.

Pri automatskom tlačenju prvog uzorka, stroj za tlačenje nije mogao odraditi ispitivanje kvalitetno zbog toga što pri niskim silama pritiska (do 50 N) dolazi do pucanja stakla koje zbog svoje krhkosti i poroznosti u strukturi blokova lako puca i "propada" do iduće granule što rezultira padom opterećenja uređaja prema ispitnim uzorcima koji to prepoznaje kao lom ispitnog uzorka. Uređaj kada prepozna lom, prekida s opterećenjem te se vraća u početnu poziciju. Ispitivanje drugoga uzorka provedeno je kao i prvo - "ručno". Maksimalna tlačna sila koju je prvi uzorak izdržao prije nego što se cijeli komad raspršio na manje granulate je 422 N, a drugi uzorak je izdržao 428 N. Na slikama 22 i 23 prikazani su uzorci nakon tlačnog ispitivanja.



Slika 22. Prvi ispitni uzorak nakon tlačnog ispitivanja



Slika 23. Drugi ispitni uzorak nakon tlačnog ispitivanja

Na slikama je vidljivo da su se uzorci u potpunosti raspali i da su popucale veze između granula.

#### 4.3. Rasprava

Uzorci koji su podvrgnuti ispitivanju nažalost nisu ispitani adekvatno te se ne mogu odrediti i navesti njihova točna mehanička svojstva. Iz viđenoga u eksperimentalnom dijelu zaključuje se da su uzorci pucali pri prilično niskim tlačnim silama te da ne bi mogli zadovoljiti zahtjeve postavljene za upotrebu u fasadnim blokovima. Primjećuje se da uzorci imaju visoku poroznost zbog velikih fluktuacija prilikom tlačnog ispitivanja što je jedan od ciljeva. Uzorci nisu gotov proizvod nego poluproizvod iz procesne faze te je potrebno proces razvijati u svrhu

postizanja boljih rezultata. Jedna od metoda koja bi se mogla primijeniti u budućem razvoju je eksplozivna metoda. Ta metoda radi na principu da se zatvoreni kalup napuni granulatima recikliranog stakla te da se stvori pritisak pomoću vanjskih stjenki nakon čega se ubrizgava smjesa metana i kisika koja se potom zapaljuje te razvijena toplina dovodi do otapanja stakla na rubovima granulata koji se pri hlađenju vežu u čvrstu strukturu. Ova metoda ima potencijala za dovoljno dobre rezultate te bi u budućnosti mogla biti visoko zastupljena u primjeni.

## **5. ZAKLJUČAK**

Zaključak ovoga rada opisan je kroz nekoliko točki.

- Staklo je oduvijek bilo visoko zastupljeno u primjeni.
- Sredinom 90-ih godina prošlog stoljeća, staklo pronalazi sve veću primjenu u građevini.
- Rast i razvoj staklenih proizvoda u građevini je u zamahu te se primjenjuje u sve kompleksnijim uvjetima i izvedbama.
- Recikliranje stakla štedi resurse i energiju te pruža razne mogućnosti u proizvodnji.
- Pjenasto staklo posjeduje jedinstvenu kombinaciju svojstava: lako je, čvrsto, otporno na kompresiju, toplinski izolator, otporno na smrzavanje, nezapaljivo, kemijski inertno i netoksično, otporno na glodavce, insekte, bakterije, vodu i paru zbog čega se sve češće primjenjuje.
- Pjenasto staklo proizvodi se postupcima kemijskog i fizičkog pjenjenja te proizvodnjom iz recikliranog stakla.
- U eksperimentalnom dijelu ispitana su dva uzorka izrađena od granulata recikliranoga bezbojnoga stakla.
- Površina uzoraka nije dovoljno ravna, a zbog svoje krhkosti i poroznosti tlačno ispitivanje nije se uspjelo izvesti na prikladan način.
- Tijekom tlačnog ispitivanja pojavljivala se fluktuacija rezultata.
- Ispitni uzorci nisu pokazali zadovoljavajuća mehanička svojstva za traženu primjenu.
- Postigla se visoka poroznost u strukturi staklenih blokova.
- Potrebno je unaprijediti metodu proizvodnje ili koristiti neku drugu metodu za izradu blokova.

**LITERATURA**

- [1] Rajaramakrishna, R., & Kaewkhao, J. (2019). Glass material and their advanced applications. *KnE Social Sciences*
- [2] <https://okno.hr/staklene-fasade/> , pristupio 8.6.2023.
- [3] <https://www.smithsonianmag.com/science-nature/a-brief-scientific-history-of-glass-180979117/> , pristupio 8.6.2023.
- [4] <https://recikliranje-stakla.com/saznaj-vise/povijest-stakla/> , pristupio 8.6.2023.
- [5] Muravljov M, Građevinski materijali, Beograd 2007.
- [6] <https://www.renovablesverdes.com/bs/kako-nastaje-staklo/> , pristupio 9.6.2023.
- [7] <http://recikliranje-stakla.com/faze-proizvodnje-stakla/> , pristupio 9.6.2023.
- [8] Osnovna svojstva stakla kao konstrukcijskog materijala i norme u primjeni, Tatjana Gere, Ivica Kožar, 4.4.2008.
- [9] <https://ba.migoglass.org/info/the-difference-between-heat-strengthened-and-t-76659004.html> , pristupio 10.6.2023.
- [10] Haldimann, M., Luible, A., Overend, M.: Structural Use of Glass, IABSE, Zürich, 2008
- [11] Schneider, J., Hilcken, J.: Cyclical fatigue of annealed and of thermally tempered soda-lime-silica glass, Proceedings of MATEC Web of Conferences, Vol. 165 (1031):18003, 2018.
- [12] O'Regan, C., & Institution of Structural Engineers (Great Britain). (n.d.). *Structural use of glass in buildings*.
- [13] Bourhis, E.: Glass: Mechanics and Technology, Wiley
- [14] Wurm, J.: Glass structures: design and construction of self-supporting skins, Birkhäuser Verlag AG, Basel, 2007.

- [15] Kumar, R.V., Buckett, J.: Float Glass, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2017.
- [16] Bos, F.P.: Safety Concepts in Structural Glass Engineering: Towards an Integrated Approach, PhD thesis, TU Delft, Delft, 2007.
- [17] Kozłowski, M.: Experimental and numerical analysis of hybrid timber-glass beams, PhD thesis, Faculty of Civil Engineering, Silesian University of Technology, Gliwice, 2014.
- [18] Kalambura, S.; Održivo gospodarenje otpadom, Zdravstveno veleučilište, Zagreb, 2015.
- [19] Milanović, Z., Radović, S., Vučić, V., Otpad nije smeće, Gospodarstvo i okoliš ; Velika Gorica : Mtg-topgraf, Zagreb, 2002.
- [20] Vetrotime, br. 01/2020, Corporate Communication Vetropack Holding Ltd, Bülach, 2020.
- [21] Scheffler, M., & Colombo, P. (2005). *Cellular ceramics: structure, manufacturing, properties and applications*. Wiley-VCH.
- [22] <https://gharpedia.com/blog/foam-glass-its-uses-pros-cons-and-properties/> , pristupio 13.6.2023.
- [23] Østergaard, M. B. (n.d.). *preparation and characteristics of glass foam*.
- [24] Khamidulina, D. D., Nekrasova, S. A., & Voronin, K. M. (2017). Foam Glass Production from Waste Glass by Compression. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 262(1).
- [25] Bai, J., Yang, X., Xu, S., Jing, W., & Yang, J. (2014). Preparation of foam glass from waste glass and fly ash. *Materials Letters*, 136, 52–54.
- [26] <https://www.saidaglass.com/hr/news/what-is-float-glass-and-how-it-made>, pristupio 15.6.2023.
- [27] <https://iverpan.hr/blog/staklo-u-interijeru-mala-cijena-ekskluzivnosti/>, pristupio 17.6.2023.
- [28] <https://zrcalo.hr/izo-staklo/izo-staklo-dvoslojno/>, pristupio 17.6.2023.

[28] <https://ekoivot.ba/recikliranje-stakla/>, pristupio 17.6.2023.

[29] <https://www.vetropack.com/en/>, pristupio 17.6.2023.