

# Principi projektiranja trajnosti staklenih fasadnih elemenata

---

**Tomičić, Fran**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:140913>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-06**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Fran Tomičić

# **PRINCIPI PROJEKTIRANJA TRAJNOSTI STAKLENIH FASADNIH ELEMENATA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Fran Tomičić

# **PRINCIPI PROJEKTIRANJA TRAJNOSTI STAKLENIH FASADNIH ELEMENATA**

DIPLOMSKI RAD

Mentor:  
izv.prof.dr.sc. Marijana Serdar

Zagreb, 2023.

---

## PODACI ZA DIGITALNI REPOZITORIJ

Naslov:	Principi projektiranja trajnosti staklenih fasadnih elemenata
Title:	Principles of designing the durability of glass facade elements
Fakultet:	Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Zavod:	Zavod za materijale
Vrsta rada:	Diplomski rad
Kolegij:	Trajnost konstrukcijskih materijala
Autor:	univ. bacc. ing. aedif. Fran Tomičić
Mentor:	izv.prof.dr.sc. Marijana Serdar
Komentor:	/
Godina objave:	2023
Datum obrane:	28.09.2023.
Broj stranica:	106
Sažetak:	<p>U ovome radu temeljito se istražuje staklo kao ključni materijal u fasadnom dizajnu i građevinskoj industriji. Fokusira se na povijest, proizvodnju i sastav stakla, istražujući njegova svojstva, uključujući fizikalna, kemijska i mehanička. Također se bavi degradacijskim procesima stakla i metodama za njihovo sprječavanje. Osim toga, rad se bavi ispitivanjima stakla i projektiranim uporabnim vijekom, s posebnim naglaskom na izolacijska stakla. Također se istražuje reciklabilnost stakla i njegova primjena u građevinskim materijalima. Konačno, rad donosi pregled novih tehnologija u proizvodnji stakla i održivost staklenih fasada u suvremenom građevinarstvu.</p>
Summary:	<p>In this paper, glass is thoroughly explored as a pivotal material in facade design and the construction industry. It focuses on the history, production, and composition of glass, investigating its properties, including physical, chemical, and mechanical aspects. It also addresses glass degradation processes and methods for prevention. Additionally, the paper delves into glass testing and projected service life, with a specific emphasis on insulated glass. Furthermore, it explores the recyclability of glass and its application in construction materials. Lastly, the paper provides an</p>

---

	overview of new glass manufacturing technologies and the sustainability of glass facades in modern construction.
Ključne riječi:	Svojstva stakla, degradacijski procesi stakla, trajnost staklenih fasadnih elemenata, konstruktivne mjere zaštite
Keywords:	Glass properties, glass degradation processes, durability of glass facade elements, structural protective measures.

---

## ZADATAK



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET

OBRAZAC 2

### TEMA DIPLOMSKOG RADA

Ime i prezime studenta: **Fran Tomičić**

JMBAG: **0082059308**

Diplomski rad iz predmeta: **Trajnost konstrukcijskih materijala**

Naslov teme  
diplomskog rada:

HR	<b>PRINCIPI PROJEKTIRANJA TRAJNOSTI STAKLENIH FASADNIH ELEMENATA</b>
ENG	<b>Principles of designing the durability of glass facade elements</b>

Opis teme diplomskog rada:

U ovome radu potrebno je obraditi staklo kao ključni materijal u projektu fasade i građevinskoj industriji. Potrebno je obraditi povijest, proizvodnju i sastav stakla, istražujući njegova svojstva, uključujući fizikalna, kemijska i mehanička. Također je potrebno obraditi ključne degradacijske procese stakla i metode za njihovo sprječavanje. U radu se potrebno osvrnuti i na reciklabilnost stakla i njegovu primjenu u građevinskim materijalima.

Datum: **20.04.2023.**

Komentor: \_\_\_\_\_

(Ime i prezime komentora)

Mentor: **izv.prof.dr.sc. Marijana Serdar**

(Ime i prezime mentora)

\_\_\_\_\_  
(Potpis mentora)

## **IZJAVA STUDENTA O IZVORNOSTI**

Ja, Fran Tomičić, JMBAG 0082059308, rođen 27.06.1998. u Zagrebu,  
izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom:

### **PRINCIPI PROJEKTIRANJA TRAJNOSTI STAKLENIH FASADNIH ELEMENATA**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedini autor ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Građevinskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*Potpis studenta / studentice*

---

## ZAHVALA

*Želim izraziti duboku zahvalnost svima koji su mi pomogli tijekom izrade ovog diplomskog rada. Prvo, želim zahvaliti svojoj mentorici, Marijani Serdar, na nesebičnoj podršci, strpljenju i mentorstvu tijekom cijelog procesa pisanja. Vaši savjeti i kritike su mi mnogo značili i doprinijeli su kvaliteti ovog rada.*

*Također, želim se posebno zahvaliti svojoj majci, ocu i bratu, hvala vam na neizmjerne podršci, bez koje ovaj put do diplome ne bi bio moguć. Vaša ljubav, podrška i razumijevanje su mi bili oslonac kroz sve ove godine studiranja. Bez vas, ne bih uspio postići ovo dostignuće.*

*Nadalje, velika zahvala ide dr. Ivici Kuševiću i Luki Fukatu na njihovoj vrijednoj pomoći i strpljenju. Vaš doprinos bio je neizostavan za uspješno dovršavanje ovog rada.*

*Konačno, želim izraziti svoju zahvalnost Bogu na svim blagoslovima i prilikama koje mi je dao tijekom ovog akademskog puta.*

*Ova diploma je rezultat zajedničkog truda i podrške mnogih, i zahvaljujući vama, ostvario sam svoje ciljeve. Hvala vam svima na važnom dijelu koji ste odigrali u mom akademskom putovanju.*

---



## SADRŽAJ

1	Povijest stakla kao materijala.....	1
2	Proizvodnja stakla.....	5
2.1	Pilkingtonov postupak proizvodnje float stakla.....	5
2.2	Fourcaultov postupak proizvodnje stakla.....	7
2.3	Usporedba Pilkingtonovog i Fourcaultovog postupka .....	8
3	Sastav stakla.....	10
3.1	Kemijski sastav .....	10
3.1.1	Vrste stakla prema kemijskom sastavu.....	11
3.1.2	Svojstva glavnih vrsta stakala prema kemijskom sastavu .....	17
3.2	Struktura stakla .....	18
4	Svojstva stakla .....	21
4.1	Fizikalna svojstva .....	21
4.1.1	Deformacija stakla .....	22
4.2	Kemijska svojstva.....	24
4.3	Mehanička svojstva .....	26
5	Degradacijski procesi stakla.....	30
5.1	Korozija uzrokovana alkalijima.....	31
5.1.1	Uzorci korozije stakla .....	32
5.1.2	Prevenција staklene korozije .....	33
5.2	Hrđanje low-E premaza.....	33
6	Metode osiguranja trajnosti staklenih fasadnih elemenata.....	40
7	Konstruktivne mjere zaštite u fazi projektiranja i izvođenja .....	42
7.1	Detalji kojima se osigurava trajnost elemenata.....	42
7.1.1	Opis općenitog sklopa fasadnog elementa.....	46
7.1.2	Vrste silikona i njihova zaštita .....	49

---

---

7.1.3	Butil.....	50
7.1.4	Brušenje low-E premaza.....	50
7.2	Ispitivanja stakla .....	52
7.2.1	Heat soak test (HST) .....	52
7.2.2	Ispitivanje klatnom - Ispitna metoda udarom i razredba za ravno staklo - HRN EN 12600:2006.....	56
7.2.3	Hidrolitička otpornost staklenih granula – HRN ISO 719.....	59
7.2.4	Hidrolitička otpornost staklenih granula – HRN ISO 720.....	62
7.2.5	Otpornost na solnu kiselinu – HRN ISO 1776.....	62
7.2.6	Otpornost na solnu kiselinu - DIN 12116.....	64
7.2.7	Otpornost na vodenu otopinu smjese lužina – HRN ISO 695.....	64
8	Projektirani uporabni vijek.....	66
8.1	Zahtjevi za izolacijska stakla .....	67
8.1.1	Prodiranje vlage – HRN EN 1279-2 .....	67
8.1.2	Propuštanje plina – HRN EN 1279-3.....	68
8.1.3	Svojstva sastavnica rubnih brtvi i umetaka – HRN EN 1279-4.....	70
9	Reciklabilnost stakla.....	72
9.1	Otpad.....	73
9.2	Primjena u lakim betonima .....	75
10	Istraživanja poboljšanja svojstava i nove tehnologije proizvodnje .....	78
10.1	Pametna stakla.....	78
10.2	Magnetronsko raspršivanje.....	79
10.3	Elektrokromna tehnologija.....	80
10.4	Suspended Particle Devices (SPD) – „Uređaji s lebdećim česticama“ .....	81
10.5	Ostakljenje od tekućih kristala .....	82
10.6	Konveksno i konkavno brušenje .....	83
10.7	Sitotisak na staklu .....	84

---

10.8	UV-lijepljenje stakla .....	86
10.9	Lakoća održavanja čistoće – HRN EN 1096-5 .....	86
11	Zaključak.....	89
12	Literatura .....	90
13	Popis slika .....	94
14	Popis tablica .....	96

---

## **1 POVIJEST STAKLA KAO MATERIJALA**

Staklo je igralo značajnu ulogu u području gradnje kroz povijest, revolucionizirajući arhitektonski dizajn i način na koji doživljavamo zgrade. Od drevnih civilizacija do modernih vremena, evolucija stakla u građevinarstvu obilježena je tehnološkim napretkom, inovativnim primjenama i dubokim cijenjenjem njegovih estetskih i funkcionalnih svojstava. Prvi je sintetički materijal koji je čovjek stvorio kombiniranjem kamenog pijeska, vapnenca i sode čije prikaze se može vidjeti na Slika 1, Slika 2 i Slika 3 Kroz vremenski razvoj, čovjek je mijenjao i unaprjeđivao svojstva i oblike stakla sve do današnjih poznatih oblika.[1]



Slika 1 Prikaz kvarcnog pijeska [2]



Slika 2 Prikaz vapnenačkog kamena [3]



Slika 3 Prikaz praška sode bikarbone [4]

Korijeni stakla u građevinarstvu mogu se pratiti do drevnih civilizacija kao što su Mezopotamci, Egipćani i Rimljani. [1] Najraniji dokazi o postojanju stakla u arhitekturi potječu iz Mezopotamije, gdje se koristilo kao materijal za ostakljenje prozora već u 2. tisućljeću prije Krista. Egipćani, poznati po svojoj arhitektonskoj vještini, obilato su koristili staklo u obliku ukrasnih pločica i mozaika, dodajući živopisne boje i zamršene uzorke svojim strukturama. No

iako povijest staklarstva s najranijim poznatim podrijetlom kreće u Maloj Aziji njezino glavno svojstvo danas, transparentnost, nije bio glavni cilj toga doba već su se izrađivale ukrasne perlice, male posude, nakita, prstenja, amfore i tako dalje kao što je prikazano na Slika 4, Slika 5 i Slika 6. [5]



Slika 4 Prikaz staklene narukvice [6]



Slika 5 Rimski prsten [7]



Slika 6 Starogrčka staklena amfora [8]

Jedan od najznačajnijih napredaka u korištenju stakla u građevinarstvu dogodio se za vrijeme Rimskog Carstva. Rimljani su razvili tehnike za proizvodnju velikih, prozirnih staklenih ploča poznatih kao "luksuzno staklo", koje su korištene za izradu prozora, dopuštajući prirodnom svjetlu da prodre u unutarnje prostore. Ova je promjena promjenila arhitektonski krajolik,

omogućivši izgradnju velebnih građevina s velikim prozorima, poput legendarnog Panteona u Rimu. [5]

Nagađa se da u je u Siriji prije otprilike 2000 godina izumljeno puhanje stakla te je time započela nova era staklarske tehnologije te je upotreba zajedno s time porasla. Proces puhanja stakla ubrzo je preplavio područje Rimskog Carstva, a staklene zdjele i posude za piće postale su sveprisutne, ne samo među pripadnicima visokog društva, već i u svakodnevnim domaćinstvima. Tako se povećala potražnja za kristalno čistim posudama, što je dodatno potaknulo impresivan porast proizvodnje puhanog stakla. Veliki trud uložen je u smanjenje prisutnosti nečistoća, posebno željeza i drugih zagađivača, kako bi se osigurala izuzetna kvaliteta staklarskih proizvoda. [5]

Tijekom srednjovjekovnog razdoblja, vitraji su se pojavili kao istaknuto obilježje gotičkih katedrala. Ove zamršene i šarene staklene ploče prikazivale su biblijske priče i svece, stvarajući očaravajuću međuigru svjetla i slika. Razdoblje renesanse svjedočilo je obnovljenom interesu za klasična arhitektonska načela, što je dovelo do oživljavanja starorimskih tehnika u proizvodnji stakla dok su paralelno Mlečani, poznati po svojoj vještini izrade stakla, podigli zanat na nove visine, stvarajući zamršena umjetnička djela od stakla i složene lustere koji su krasili palače i crkve. [1]

Industrijska revolucija označila je prekretnicu u masovnoj proizvodnji stakla, učinivši ga dostupnijim u arhitektonske svrhe. S izumom procesa float stakla u 20. stoljeću, velike i ravne staklene ploče mogle su se proizvoditi ekonomično i učinkovito. Ovaj uzlet doveo je do uspona modernih nebodera ukrašenih staklenim zavjesama, simbolizirajući spoj estetike i funkcionalnosti. [1]

Posljednjih desetljeća tehnološki napredak pomaknuo je granice primjene stakla u građevinarstvu. Inovacije poput laminiranog stakla, kaljenog stakla i izoliranih staklenih jedinica poboljšale su sigurnost, energetska učinkovitost i akustične performanse u zgradama. Štoviše, napredak u staklenim premazima omogućio je razvoj pametnog stakla, koje se može prebaciti iz prozirnog u neprozirno, pružajući privatnost i regulirajući sunčevu svjetlost. [1]

Fourcault, belgijski inovator, zaslužan je za značajan napredak staklarske industrije jer je jedan od prvih koji je razvio tehniku vučenja staklene trake kontinuirano iz posteljice sa rastaljenom talinom. Nakon dugotrajnom i mukotrpnog proces te mnogih laboratorijskih eksperimenata na samome početku dvadesetog stoljeća razvio je način dobivanja stakla strojnom izradom. [6]

U svijetu proizvodnje stakla, Fourcaultov proces ističe se kao inovativna metoda za dobivanje ravne staklene ploče. Ovaj postupak je razvijen tijekom rane faze 20. stoljeća i brzo je postao široko prihvaćen diljem svijeta. Ova tehnika koristi "vertikalno vučenje", gdje se staklo vuče prema gore, suprotstavljajući se sili gravitacije. [7]

Pedesetih godina prošlog stoljeća, tvrtka Pilkington Brothers iz Engleske pronašla je odgovarajuće rješenje za proizvodnju stakla - tehnologiju float stakla. Nakon nekoliko godina razvoja od prve ideje, u 1958. godini započela je redovita proizvodnja ovim revolucionarnim postupkom. float postupak automatske proizvodnje stakla omogućuje masovnu proizvodnju velikih ploča stakla u iznimno velikim dimenzijama, s visokokvalitetnim površinama i po pristupačnoj cijeni. Engleska riječ "float" znači plutati, što vrlo dobro opisuje osnovni princip ovog postupka. Staklo se polako izljuje na površinu rastaljenog metala (kositra), a zbog razlike u gustoći, staklo "pluta" na površini i ravnomjerno se širi, što rezultira ravnom pločom stakla s iznimno glatkom površinom. [6]

Povijest stakla u građevinarstvu svjedočanstvo je ljudske domišljatosti i kreativnosti. Od svojih skromnih početaka kao malih ukrasnih predmeta do svoje ključne uloge u oblikovanju arhitektonskih čuda, staklo se kontinuirano razvijalo kako bi zadovoljilo promjenjive potrebe građevinske industrije. Njegova sposobnost propuštanja svjetlosti, stvaranja vizualnih veza i povećanja estetske privlačnosti zgrada učinila ga je nezamjenjivim materijalom u modernoj arhitekturi. Dok gledamo u budućnost, staklo će nedvojbeno nastaviti nadahnjivati arhitekta i građevinare te transformirati izgrađeni okoliš svojim neograničenim potencijalom. [1]

## **2 PROIZVODNJA STAKLA**

### **2.1 Pilkingtonov postupak proizvodnje float stakla**

Float staklo je vrsta staklene ploče koja se dobiva tako što se rastopljeno staklo položi na površinu rastopljenog metala s niskom točkom taljenja, obično kositra. Ovaj postupak omogućuje staklu da "pluta" po površini metala, stvarajući vrlo ravnu i glatku površinu. [8]

Moderne prozore često izrađuju od float stakla jer ima jednoličnu debljinu i osigurava visoku kvalitetu proizvoda. Najčešće se proizvodi natrij-kalcij-silikatno staklo, ali se također proizvode manje količine specijalnog borosilikatnog stakla i stakla za ravne panele. [8]

Ovaj postupak proizvodnje stakla nazvan je po britanskom proizvođaču stakla Pilkington, koji je razvio ovu tehniku 1950-ih na svojoj proizvodnoj lokaciji u St Helensu, Merseysideu. Pilkingtonov postupak omogućio je masovnu proizvodnju float stakla, što je postalo standardna metoda u proizvodnji modernog stakla diljem svijeta. [8]

Opis Pilkingtonovog postupka:

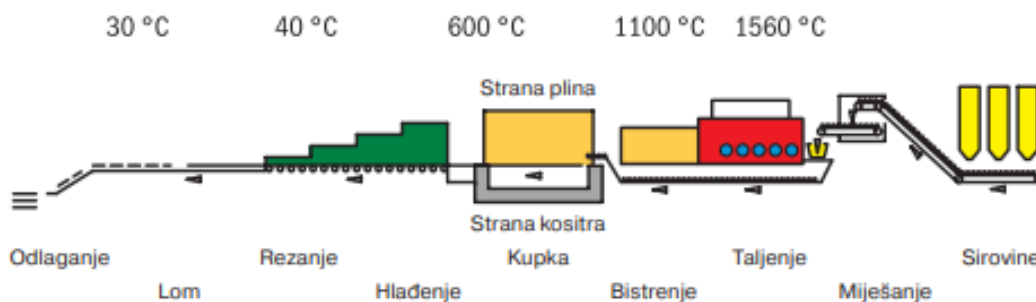
1. Priprema sirovina: Sirovine, poput kremenca, natrijevog karbonata, vapnenca i drugih sastojaka, pažljivo se pripremaju u odgovarajućim omjerima kako bi se dobilo staklo željenih svojstava.
2. Taljenje stakla: Sirovine se unose u staklarsku peć gdje se zagrijavaju na izuzetno visokim temperaturama (više od 1500°C) dok ne postanu rastaljene staklene mase.
3. Plutanje stakla: Rastopljeno staklo pažljivo se prenosi na površinu rastopljenog metala s niskim točkom taljenja (kositar)
4. Širenje i izravnavanje: Staklo se širi preko površine kositra kako bi postalo tanka ploča, a zatim se postupno izravnava kako bi imalo jednoliku debljinu.
5. Hlađenje i obrada: Staklo se polako hladi dok se kreće prema kraju proizvodne linije. Na kraju se obrađuje i reže u željene dimenzije. [8]

Prednosti Pilkingtonovog postupka proizvodnje float stakla su izuzetno visoka kvaliteta proizvoda jer se dobiva vrlo ravna, glatka i homogena staklena ploča. Također bitna stavka je jednolika debljina proizvoda budući da se float staklo koristi u izradi modernih prozora i staklenih vrata. Pomoću ovog postupka dobivaju se ploče velikih dimenzija i samo zbog toga je moguća proizvodnja većih prozora odnosno staklenih fasadnih elemenata bez spojeva. Poznato je da većina proizvođača radi „jumbo“ ploče koje budu dimenzija 6 metara duljine i 3,21 metara širine. Posljednje, najveća prednost Pilkingtonovog postupka je ta što proizvod



float stakla ima različite primjene te se koristi u raznim situacijama uključujući prozore, staklene stijene, stolove, ogledala, fasadnih elemenata i tako dalje. [8]

Zbog svoje praktičnosti i kvalitete, Pilkingtonov postupak proizvodnje float stakla postao je naširoko prihvaćen te dominira na tržištu stakla diljem svijeta. Shematski prikaz postupka vidi se na Slika 7.



Slika 7 Prikaz proizvodnog pogona prema float postupku [6]

Proizvodnja staklene trake zahtijeva pažljivo pripremljene sirovine, s posebnim naglaskom na čistoću i granulaciju. Sirovine se precizno miješaju u određenim težinskim omjerima i automatski usipavaju u peć za taljenje. Ovisno o kapacitetu peći i samog proizvodnog pogona, dnevno se pomiješa između 300 i 850 tona sirovina. [6]

Prije miješanja, svaka sirovina se posebno izvaže i dodaje u smjesu u određenim omjerima, ovisno o vrsti stakla koju želimo dobiti. Kvarcni pijesak je osnovna sirovina u svakom staklu i čini oko 70% smjese. Važno je obratiti pažnju na njegovu čistoću jer može sadržavati oksid željeza koji staklu daje zelenu boju, pa za bezbojno staklo udio željeza ne smije preći 0,0045%. Natrijev sulfat ili soda dodaju se kao alkalijska baza u količini od 12% do 15%, dok se za proizvodnju kalijeva stakla koristi samo kalijev karbonat. Vapnenac, kao kalcijeva komponenta, dodaje se u smjesu u udjelu od 8% do 10%, te se također dodaju magnezijev oksid u udjelu od 1% do 4%, kalijev oksid do 1%, te aluminijev oksid i željezni oksid manje od 1%. [9]

Nakon vaganja, sirovine se prenose pokretnom trakom ispod silosa do miješalice. Smjesi se uz navedene sirovine dodaje i stakleni krš, krhotine stakla koje su nastale prilikom obrade staklenih predmeta i otpadaka stakla. Dodavanjem staklenog krša smanjuje se potreba za skupljim osnovnim sirovinama, čineći proizvodnju stakla ekonomičnijom. Međutim, krš može biti različitog sastava što može negativno utjecati na konačni proizvod. Nakon dodavanja svih

komponentata smjesi, počinje miješanje u miješalici koje traje oko 5 minuta. Tijekom miješanja, dodaje se voda u količini od oko 3% do 5% kako bi se smanjio gubitak lakih sirovina zbog prašenja. Homogenizirana smjesa se potom otprema do spremnika iznad peći za taljenje, gdje slijedi faza taljenja. [9]

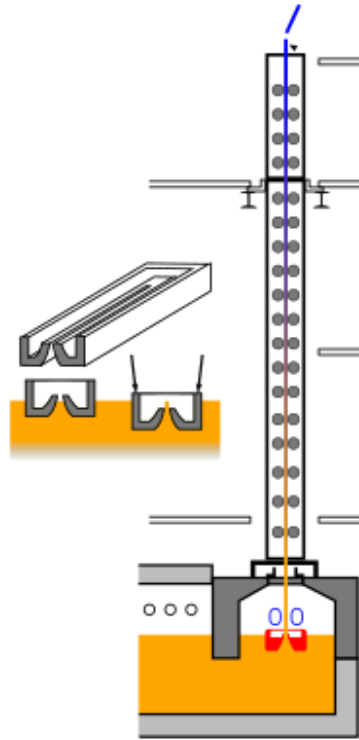
Taljenje sirovina odvija se u dvije faze peći. Prvi dio ima temperaturu od 1560 °C, gdje se sirovine tale, dok je drugi dio s temperaturom od 1100 °C namijenjen bistrenju staklene taline. Zatim, u ključnoj fazi, staklena masa prelijeva se u kadu s tekućim kositrom, gdje se zbog površinske napetosti i razlike u gustoći između ta dva materijala, staklo razlijeva po tekućem metalu i tako se dobiva ravna površina. Debljina staklene trake prilagođava se pomoću zupčastih kotača, koji kontroliraju brzinu njezinog toka. Rezultat ovog postupka je beskonačna staklena traka s jednakom paralelnosti kao kristalno staklo. Posljedni korak proizvodnje treba osigurati da u staklu nema unutarnjih napetosti, a to se postiže tako što staklena traka prolazi kroz rashladni kanal dok izlazi iz posteljice s tekućim metalom. Nakon toga staklena traka spremna je za obrezivanje rubova te nastavak hlađenja na zraku. Kao završetak proizvodnje trake dobivenog stakla režu se poprečno na pravokutnike različitih dimenzija. Prikaz toga procesa može se vidjeti na shematskom prikazu proizvodnje stakla na Slika 7. Početak proizvodnje prikazan je sa desne strane dok završetak sa lijeve. [6]

## **2.2 Fourcaultov postupak proizvodnje stakla**

Fourcaultov postupak i postupak float stakla nisu ista stvar. Fourcaultov postupak odnosi se na proizvodnju pločastog stakla. Fourcaultov postupak proizvodnje pločastog stakla koristi kontinuirano vučenje staklene trake iz kade s rastaljenim staklom. [7]

Fourcaultov postupka ima slične korake kao Pilkingtonov postupak proizvodnje float stakla no princip je drugačiji. Dok se u Pilkintonovu postupku talina izlijeva na kositar pri Fourcaultovu postupku ono se vuče u smjeru suprotnom od gravitacije. Oba procesa započinju isto, pripremaju se sirovine kao što su kremen, natrijev karbonat, vapnenac i drugi. Bitno ih je rasporediti u dobrom omjeru kako bi dobili željena svojstva stakla. Zatim započinje taljenje sirovina pri visokim temperaturama sve dok ne dobijemo dovoljno viskoznu smjesu stakla. Na dnu peći Fourcaultovog postupka, takozvanoj jami za taljenje, nalazi se keramička matrica još

poznato je pod imenom „debiteuse“. Rastaljeno staklo pluta iznad te matrice što omogućuje oblikovanje trake pravokutnog presjeka dok ga gravitacija vuče prema gore. Pri vrhu trake staklena talina prolazi kroz fazu bistrenja kako bi se uklonili plinski mjehurići i kojekakve druge nečistoće koje bi mogle utjecati na kvalitetu stakla. Konačno, staklena traka prolazi kroz rashladni kanal i u njemu se postepeno hladi i zadržava svoj oblik te se naknadno traka reže na tražene dimenzije. Shematizirani postupak proizvodnje Fourcaultovim postupkom može se vidjeti na Slika 8. [7]



Slika 8 Shematski prikaz Fourcaultovog postupka [7]

Ovaj postupak omogućuje proizvodnju velikih količina pločastog stakla s vrlo kvalitetnim površinama i relativno niskom cijenom. Važno je napomenuti da Fourcaultov postupak nije float postupak, iako se koristi za proizvodnju pločastog stakla. [7]

### 2.3 Usporedba Pilkingtonovog i Fourcaultovog postupka

Fourcaultov postupak i Pilkingtonov postupak dva su različita načina proizvodnje stakla, svaki s vlastitim karakteristikama i tehnikama.

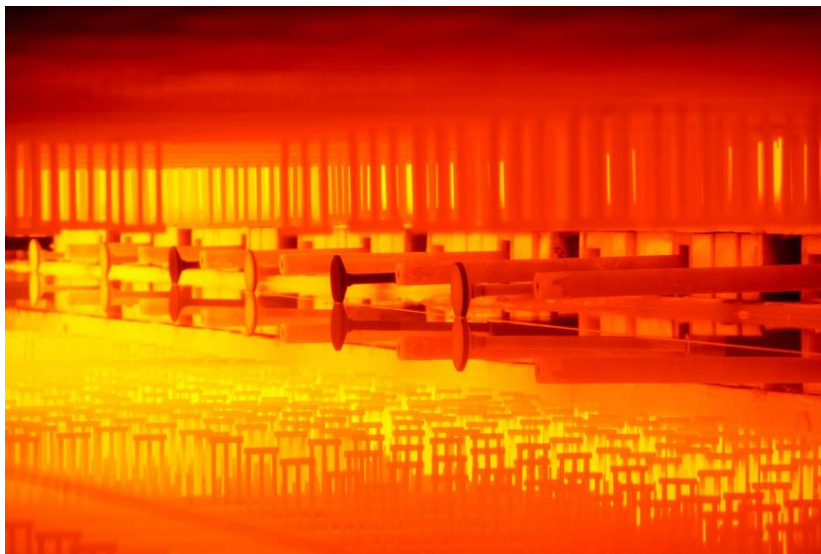
Fourcaultov postupak:

- Fourcaultov postupak je jedan od prvih kontinuiranih postupaka za izradu staklene trake.
- Uključuje upotrebu keramičke matrice (debiteuse) koja oblikuje rastaljeno staklo u traku pravokutnog presjeka.
- Staklo se vuče vertikalno iznad matrice, krećući se od rastaljenog stanja do stanja u kojem postaje kruto ravno staklo.
- Fourcaultov postupak često se koristi za proizvodnju tankih stakala i staklenih vlakana.

Pilkingtonov postupak:

- Float postupak omogućuje proizvodnju ravne staklene ploče visoke kvalitete i jednolike debljine.
- Staklo se proizvodi tako što se rastopljeno staklo pažljivo pluta na površini rastopljenog metala niskog točke taljenja, obično kositra.
- Ovaj postupak omogućuje stvaranje staklene trake s vrlo glatkom površinom
- Float postupak postao je dominantan postupak za proizvodnju velike većine modernog stakla, uključujući prozore, staklene stijene, ogledala i ravne staklene ploče.

Dakle, ključna razlika između Fourcaultovog i Pilkingtonovog postupka leži u njihovim tehnikama proizvodnje, a Pilkingtonov postupak se naširoko koristi u modernoj staklarskoj industriji zbog svoje učinkovitosti i visoke kvalitete proizvoda. Kako u stvarnosti izgleda ovaj proizvodni proces može se vidjeti na Slika 9.



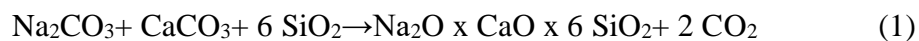
Slika 9 Prikaz stvarnog proizvodnog procesa float stakla [10]

## 3 SASTAV STAKLA

### 3.1 Kemijski sastav

Staklo je materijal amorfne strukture koji se dobiva na način da se smjesa alkalijskih te zemnoalkalijskih oksida zamiješa sa silikatima u određenim masenim udjelima i zatim tali. Glavni sastojak stakla je kvarcni pijesak ( $\text{SiO}_2$ ), tojest kremen čiji je maseni udio u smjesi uglavnom preko 60 %, ovisno o vrsti stakla koji se proizvodi, zatim se on miješa s dvije ili više alkalijskih baza kao što su natrijev karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) odnosno soda bikarbona, vapnenac ( $\text{CaCO}_3$ ) odnosno kalcijev karbonat i potaša ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) točnijeg naziva kalijev karbonat. Navedene komponente se osnovne sirovine, koje u kemijskom smislu čine glavnu mrežu u molekulskoj strukturi. Ovisno o vrsti stakla i određenim njegovim karakteristikama koje želimo postići, u smjesu dodajemo još i takozvane pomoćne sirovine koje utječu na poboljšavanje taljenja, homogeniziranje taline, prozirnost, boju konačnog staklenog proizvoda i slično. Osnovno alkalijsko silikatno staklo bez primjesa je bezbojno i prozirno, no sirovine koje se koriste u proizvodnji dolaze iz prirode te su vrlo rijetko u potpunosti čiste tojest nezagađene drugim spojevima. One mogu sadržavati različite metalne okside i spojeve, koji u prvom redu najviše utječu na boju i prozirnost stakla. Tako naprimjer oksid željeza staklu daje zelenkastu ili smeđu boju, a kroma žutu boju. [11],[12],[13]

Pri samoj proizvodnji uz standardne sastojke ubacuje se i stakleni krš, odnosno reciklirani materijal. To se radi iz razloga što on sam po sebi ima niže talište od glavnih sirovina i time se brzina taljenja značajno ubrzava. Posljedično to štedi do 32% energije proizvodnog procesa. Proces kemijske reakcije koji se odvija u proizvodnom pogonu gdje se izrađuje obično odnosno natrij-kalcij-silikatno staklo prikazano je Jednadžbom 1. [12]



### 3.1.1 Vrste stakla prema kemijskom sastavu

Postoji više vrsta stakla, razlikujući se prema kemijskom sastavu. Neki od tih tipova su:

1. Natrij-kalcij silikatno staklo koje je jedno od najčešćih korištenih tipova stakla u različitim namjenama. Sastoji se od kombinacije natrij-oksida ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) i kalcij-oksida ( $\text{CaO}$ ) zajedno sa silicij-dioksidom ( $\text{SiO}_2$ ). Ova kombinacija daje staklu određene osobine koje ga čine popularnim izborom u mnogim industrijama. Važno je napomenuti da natrij-kalcij silikatno staklo ima određena ograničenja u ekstremnim uvjetima. Naprimjer, nije tako termički otporno kao neki drugi tipovi stakla, poput borosilikatnog stakla. Također, može biti podložno pucanju uslijed brze promjene temperature. Sastav natrij-kalcij-silikatnog stakla može se vidjeti u Tablica 1.

Tablica 1 Kemijski sastav natrij-kalcij-silikatnog stakla [14]

<b>Natrij-kalcij- silikatno staklo</b>		
<b>Oksidi</b>		<b>Sastav [%]</b>
Silicij	Si	32-35%
Kalcij	Ca	3,5 -10,1%
Natrij	Na	7,4 -11,9%
Magnezij	Mg	0-37%
Aluminij	Al	0-16%
Ostalo		5%

2. Zemnoalkalijsko silikatno staklo je vrsta stakla koja se često koristi u proizvodnji različitih staklenih proizvoda. Ovo staklo slično je običnom natrij-kalcij-silikatnom staklu, ali umjesto natrija koristi se kombinacija alkalnih metala zemnoalkalijske grupe, kao što su kalcij, magnezij ili stroncij. Zemnoalkalijska stakla su poznata po svojoj visokoj termičkoj otpornosti i mehaničkoj čvrstoći, što ih čini pogodnim za upotrebu u situacijama gdje su potrebna izdržljiva stakla. Ona imaju niži koeficijent termičke ekspanzije od običnih stakala, što ih čini manje podložnim pucanju uslijed temperaturnih promjena. Sastav zemnoalkalijskog silikatnog stakla može se vidjeti u Tablica 2.

Tablica 2 Kemijski sastav zemnoalkalijskog silikatnog stakla [15]

<b>Zemnoalkalijsko silikatno staklo</b>		
<b>Oksidi</b>		<b>Sastav [%]</b>
Silicijev oksid	SiO <sub>2</sub>	55-70
Kalcijev oksid	CaO	3-12
Kalijev oksid	K <sub>2</sub> O	5-14
Aluminijev oksid	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0-15
Cirkonijev oksid	ZrO <sub>2</sub>	0-8
Barijev oksid	BaO	0-8
Ostalo		0-10

3. Olovno staklo – staklo koje se sastoji se od oksida kalija i olova te silicijevog dioksida (SiO<sub>2</sub>) u drugačijim omjerima. Ova vrsta stakla ima nižu točku topljenja u usporedbi s natrijskim staklom i koristi se za optička stakla i izradbu leća. Neki tipovi olovnog stakla se koriste za kristalno staklo. Koristi se za zaštitu od rendgen i gama zračenja. Lako se tali i mekše je od natrijskoga stakla. Najvažnije mu je svojstvo velik indeks loma, pa se koristi kao optičko staklo za proizvodnju leća. Neke vrste olovnoga stakla jako rasipaju svjetlost i koriste se za izradbu kristalnoga stakla. Olovno staklo, koje se obično naziva kristal, različito je staklo u kojem olovo zamjenjuje sadržaj kalcija tipičnog stakla od kalija. Olovno staklo tipično sadrži 18-40% (težinski) olovnog oksida (PbO), dok moderni kristal olova, povijesno poznat i kao kremeno staklo zbog izvornog izvora silicija, sadrži minimalno 24% PbO. Olovno staklo je zbog svoje jasnoće često poželjno za razne namjene. Sastav olovnog stakla može se vidjeti u Tablica 3. [16]

Tablica 3 Kemijski sastav olovnog stakla [17]

<b>Olovno staklo</b>	
<b>Oksidi</b>	<b>Sastav [%]</b>
SiO <sub>2</sub>	76
CaO	3
Na <sub>2</sub> O	5
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2
PbO	24

4. Aluminijsko silikatno staklo – vrsta je stakla koje je vrlo tvrdo i teško se topi. Osim natrijevih i kalcijevih oksida te silicijevog dioksida ( $\text{SiO}_2$ ), sadrži i do 10% aluminijskog oksida, što mu daje otpornost prema vodi i kiselinama. Aluminijsko-silikatno staklo je vrsta posebnog stakla koje se koristi u različitim tehnološkim i industrijskim primjenama. Ovo staklo se sastoji od kombinacije aluminijskog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i silicij-dioksida ( $\text{SiO}_2$ ), što ga čini termički otpornim i čvrstim materijalom. Jedna od ključnih karakteristika aluminijskog silikatnog stakla je njegova visoka otpornost na ekstremne temperature. Zahvaljujući visokom sadržaju aluminijskog oksida, ovaj tip stakla može podnijeti veoma visoke temperature bez deformacije ili topljenja. To ga čini idealnim za upotrebu u pećima, ljevaonicama metala i drugim industrijskim uređajima koji rade na visokim temperaturama te u fotonaponskim ćelijama. Kriteriji za ovu vrstu stakla definirana su za graditeljstvo normom HRN EN 15681. Sastav aluminijskog silikatnog stakla može se vidjeti u Tablici 4.

Tablica 4 Kemijski sastav aluminijskog silikatnog stakla [18]

Aluminijsko silikatno staklo		
Oksidi		Sastav [%]
Silicij	Si	25,3 - 35,1
Aluminijski	Al	5,8- 16,2
Silicij + Aluminijski	Si+Al	32,1 - 51,3
Litij	Li	0 - 3,7
Kalcij	Ca	0 - 2,1
Natrij	Na	0 - 10,5
Magnezij	Mg	0 - 5
Cink	Zn	0 - 2,4
Kalij	K	0 - 7
Cirkonij	Zr	0 - 3
Stroncij	Sr	0 - 2,5
Barij	Ba	0 - 3,6
Ostalo		0-5



5. Borosilikatno (vatrostalno) staklo – Vrsta je stakla koja sadrži određeni postotak borovog oksida. Odlikuje se malim temperaturnim koeficijentom linearnog rastezanja i visokom otpornošću na nagle promjene temperature i kemikalije. Često se koristi za izradu laboratorijskog posuđa. Borosilikatno staklo je poseban tip stakla koji se ističe svojim specifičnim svojstvima i širokom rasprostranjenosti u raznim industrijskim i kućanskim aplikacijama. Sastoji se od kombinacije silicij-dioksida ( $\text{SiO}_2$ ) i borova dioksida ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), što mu daje karakterističnu kemijsku strukturu. Glavna karakteristika borosilikatnog stakla je njegova visoka termička otpornost. Može podnijeti velike temperaturne promjene bez pucanja ili topljenja. Zbog toga je idealno za korištenje u laboratorijskom posuđu, poput Erlenmeyerove tikvice, laboratorijskih boca i staklenih reaktora, gdje se često koristi za zagrijavanje i hlađenje različitih kemijskih tvari. Osim toga, borosilikatno staklo ima nisku termalnu ekspanziju, što znači da se manje širi i skuplja u odnosu na obično staklo pri promjeni temperature. To ga čini otpornijim na termalni šok i smanjuje rizik od pucanja prilikom izloženosti naglim temperaturnim promjenama. Zbog svoje termičke otpornosti, borosilikatno staklo se često koristi i u proizvodnji staklenih posuda za kuhanje i pečenje, kao što su posude za pećnice i tave. Ove posude mogu sigurno podnositi visoke temperature i termalne šokove. Također, borosilikatno staklo ima dobru kemijsku otpornost, što ga čini pogodnim za upotrebu u industrijskim postrojenjima. Otporno je na djelovanje većine kemijskih tvari i može se koristiti za skladištenje i transport različitih tekućina i kemikalija. Zbog svojih izvanrednih svojstava, borosilikatno staklo ima široku primjenu u industriji, laboratorijima, kućanstvima i drugim područjima. Važno je napomenuti da iako je ovaj tip stakla otporniji na termalne šokove u odnosu na obično staklo, nije potpuno neosjetljiv na lom. Stoga je i dalje važno rukovati ovim staklom s pažnjom kako bi se izbjegle neželjene situacije. Sastav borosilikatnog stakla može se vidjeti u Tablica 5.

Tablica 5 Kemijski sastav borosilikatnog stakla [17]

Borosilikatno staklo	
Oksidi	Sastav [%]
SiO <sub>2</sub>	76
CaO	3
Na <sub>2</sub> O	5
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2
K <sub>2</sub> O	12

6. Staklo keramika - Poseban je tip materijala koji kombinira karakteristike stakla i keramike. Proizvodi se kroz proces kontroliranog topljenja i kristalizacije staklenih čestica, što rezultira materijalom koji ima svojstva i stakla i keramike. Ovaj proces započinje s proizvodnjom staklenog materijala, koji se zatim djelomično topi kako bi se pokrenuo proces kristalizacije. Tijekom kristalizacije, staklene čestice organiziraju se u uređenu kristalnu strukturu unutar keramičke matrice. Konačni proizvod je materijal koji kombinira stakleni amorfn dio i kristalni dio keramike. Staklo keramika ima nekoliko značajnih svojstava koja ga čine korisnim u raznim upotrebama:
- Visoka čvrstoća: Staklo keramika ima znatno veću čvrstoću od običnog stakla, što ga čini otpornijim na lom i pucanje.
  - Otpornost na toplinu: Zahvaljujući kristalnoj strukturi, staklo keramika je otpornije na visoke temperature i termalne šokove. To ga čini pogodnim za korištenje u proizvodima koji se koriste u ekstremnim toplinskim uvjetima, kao što su posuđe za pečenje.
  - Transparentnost: Staklo keramika može biti visoko transparentno, što omogućava primjenu u proizvodnji staklenih ploča i ploča s poboljšanim optičkim svojstvima.
  - Električna izolacija: Ovo svojstvo čini staklo keramiku korisnom u električnoj industriji za izradu izolacijskih materijala.

Staklo keramika se koristi u raznim industrijskim sektorima, uključujući medicinu, elektroniku, građevinarstvo i kućanske aparate. Primjeri primjene uključuju posuđe za pečenje, kuhinjske ploče, laboratorijske posude, staklene ploče za indukcijske peći, komponente za elektroničke uređaje i mnoge druge proizvode. Zbog svojih posebnih svojstava, staklo keramika predstavlja

značajan tehnološki materijal koji kombinira najbolje od stakla i keramike kako bi zadovoljio različite potrebe industrije i potrošača. Sastav stakla keramike može se vidjeti u Tablica 6.

Tablica 6 Kemijski sastav stakla keramike [17]

Staklo keramika		
Oksidi		Sastav [%]
Silicijev oksid	SiO <sub>2</sub>	50-80
Aluminijev oksid	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15-27
Litijev oksid	Li <sub>2</sub> O	0-5
Titanov oksid	TiO <sub>2</sub>	0-5
Kalcijev oksid	CaO	0-8
Natrijev oksid	Na <sub>2</sub> O	0-2
Magnezijev oksid	MgO	0-8
Cinkov oksid	ZnO	0-5
Kalijev oksid	K <sub>2</sub> O	0-2
Cirkonijev oksid	ZrO <sub>2</sub>	0-5
Barijev oksid	BaO	0-8
Ostalo		0-5

7. Kremeno staklo- Vrsta je stakla koje se sastoji samo od silicijevog dioksida (SiO<sub>2</sub>). Ima izuzetno visoku točku topljenja (više od 1700 °C), iznimno je otporno na promjene temperature i kemijske utjecaje. Dobro propušta vidljivo i ultraljubičasto zračenje. Važno je napomenuti da kremeno staklo ima određeni koeficijent termičke ekspanzije, što znači da se širi i skuplja prilikom promjene temperature. To može dovesti do termalnih naprezanja i pucanja, posebno pri brzim promjenama temperature. Kako bi se smanjila ova osjetljivost, razvijena je posebna vrsta stakla koja je već spomenuta, borosilikatno staklo, koje ima niži koeficijent ekspanzije i veću otpornost na termalne šokove. Kremeno staklo, poznato još kao silikatno staklo, je najrasprostranjenija i najčešće korištena vrsta stakla koja se sastoji uglavnom od silicij-dioksida (SiO<sub>2</sub>). Ova jednostavna, ali izuzetno važna kompozicija čini osnovu većine staklenih proizvoda koje svakodnevno koristimo. Osim toga, kremeno staklo je izrazito tvrdo i otporno na ogrebotine, što doprinosi njegovoj dugotrajnosti i trajnosti. [13]

### 3.1.2 Svojstva glavnih vrsta stakala prema kemijskom sastavu

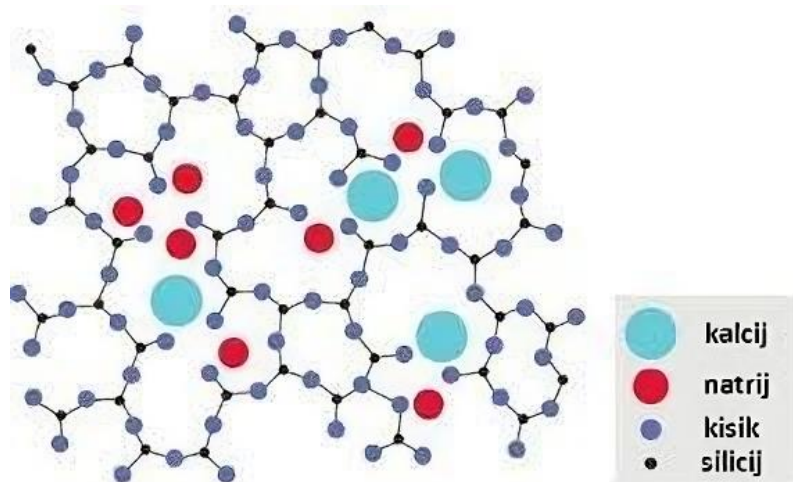
U Tablica 7 prikazane su vrijednosti za osnovna svojstva raznih vrsta stakala i kako kemijski sastav stakla utječe na njih. Svako od stakala prema svojim svojstvima ima drugačiju primjenu u industriji i svijetu ovisno o tome koja svojstva treba zadovoljiti.

Tablica 7 Usporedba svojstava stakala prema kemijskom sastavu [19]

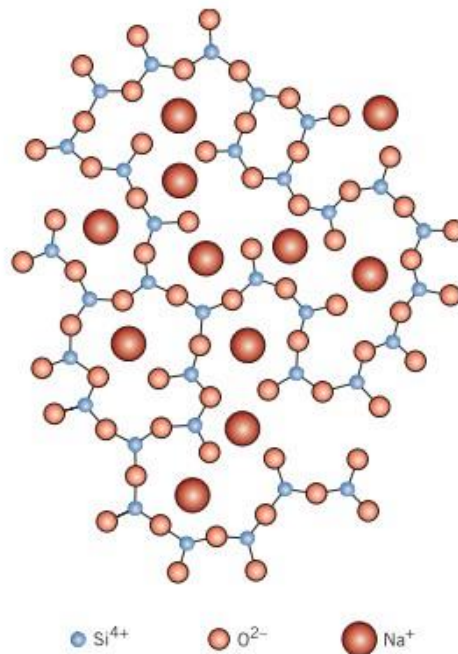
SVOJSTVO	Na-Ca-Si	B-Si	Al-Si	Staklo - Keramika	Zemnoalkalijsko silikatno
Gustoća (na 18 °C), kg/m <sup>3</sup>	2500	2200-2500	2300-2600	2500-2600	2700
Tvrdoća (Knoop), Gpa	6	4,5-6	4-7	6-7,5	5-6
Modul elastičnosti, GPa	70	60-70	7-9	9	7,7
Poissonov koeficijent	0,2	0,2	0,2-0,25	0,25	0,2
Specifični toplinski kapacitet, ×10 <sup>3</sup> J/(kgK)	0,72	0,8	0,7-0,9	0,8-0,9	0,7
Koeficijent toplinskog istezanja, ×10 <sup>6</sup> 1/K	9	Klasa 1: 3,1-4 Klasa 2: 4,1-5 Klasa 3: 5,1-6	3,5-9,8	0	8
Otpornost na promjenu temperature, K	40	80	60	650	40
Toplinska provodljivost, W/(mK)	1	1	0,8-1,7	1,5	0,8-1,1
Refrakcija vidljive radijacije	1,5	1,5	1,5-1,55	1,5	1,5
Emisivnost	0,837	0,837	0,837	0,837	0,837

### 3.2 Struktura stakla

Staklo je materijal amorfne strukture koja nema određeno talište, pa zagrijavanjem polako omekšava, što omogućuje njegovu obradu. Sastoji se od nepravilne mrežaste strukture djelomično spojenih  $\text{SiO}_4$ -tetraedara kao što se to može vidjeti na Slika 10 i Slika 11. [13]



Slika 10 Kemijska struktura natrij-kalcij-silikatnog stakla [20]

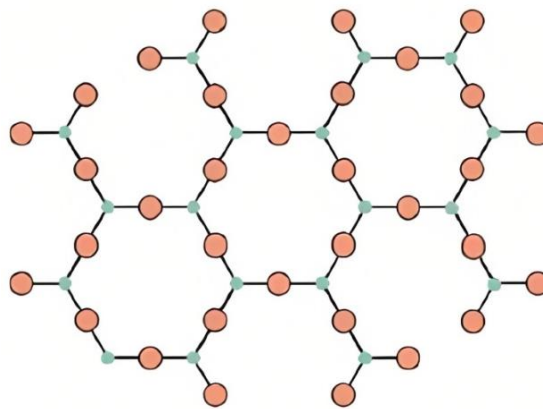


Slika 11 Shematski prikaz položaja iona u natrij-silikatnom staklu [21]

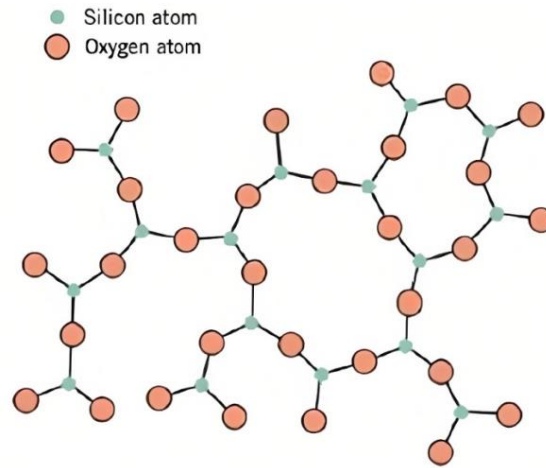
Kao što je prethodno spomenuto staklo se sastoji od oksida, čiji ioni u očvrslom stanju tvore nepravilnu, prostornu, amorfnu mrežnu strukturu koja je prikazana na Slika 13. Takva mrežna struktura sastoji se od međusobno povezanih tetraedara silicijeva dioksida i kisika tojest tvori se  $\text{SiO}_4$ -tetraedar. Oni su povezni jakim kisikovim vezama koje daju čvrstoću i tvrdoću staklu. Ioni ostalih oksida smještaju se mjestimično u strukturu mreže gdje se ponegdje i kidaju Si-O-Si veze. [12]

Zbog takvog nejednolikog rasporeda iona staklo ima promjenjivo talište, te se hlađenjem postupno skrućuje i ne dolazi do nagle kristalizacije. Takvo stanje naziva se amorfno čvrsto stanje. Na Slika 12 je prikazana kristalna struktura materijala gdje se vidi njezina pravilnost i složenost, za razliku od nejednolike amorfne strukture prikazane na Slika 13. [21]

Proces skrućivanja taline nastaje zbog postepene promjene viskoznosti tijekom linearne promjene temperature, sve dok se potpuno ograniči pomicanje između čestica te talina potpuno očvrstne, tojest postane staklo. [12] Stoga se staklo može definirati i kao tekućinu koja ima izrazito veliku viskoznost koja ne dopušta međusobno gibanje čestica. [21]



Slika 12 Prikaz kristalne strukture u 2D [21]



Slika 13 Prikaz amorfne strukture u 2D [21]

Kada se govori o staklu u građevinarstvu, njegova konačna svojstva ne ovise samo o sastavu taline stakla, nego i o brzini i temperaturi hlađenja te taline, načinu proizvodnje, oblikovanjem i završnom obradom stakla. Vrlo važan čimbenik u proizvodnji stakla je temperatura, odnosno brzina hlađenja taline. Staklena se smjesa tali na temperaturi od 1200 °C do 1400 °C, zatim se postepeno hladi do 1100 °C kako bi se razbistrila, a na radnoj temperaturi koja iznosi oko 1000 °C može se obrađivati. Ako naglo hladimo staklo tada dolazi do velike razlike u naprezanju kod vanjskih i unutarnjih slojeva stakla. Površina stakla naglo očvrstne i kristalizira se, a unutrašnjost ostane još meka. U njoj se javljaju velika naprezanja koja su onda kasnije uzrok naglog i neočekivanog pucanja ohlađenog stakla u sitne komadiće. [4] Iako je staklo lako lomljiv materijal, ono se u građevinarstvu često koristi zbog svoje izrazite otpornosti na djelovanja agresivnih kemijskih spojeva i vodootpornosti, te je za razliku od ostalih materijala dugotrajno. [1],[12],[21]

## 4 SVOJSTVA STAKLA

### 4.1 Fizikalna svojstva

Glavno fizikalno svojstvo stakla je koeficijent unutrašnjeg trenja ili viskoznost. Viskoznost stakla je svojstvo koje opisuje unutarnje trenje i otpor protoku materijala. Odnosi se na sposobnost stakla da teče ili mijenja oblik pod utjecajem vanjskih sila, poput topline ili pritiska. Staklo je amorfni materijal, što znači da nema redovitu kristalnu strukturu poput kristalnih materijala, a to utječe na njegove viskozne karakteristike. Javlja se zbog međusobnog gibanja slojeva stakla dok je još u tekućoj fazi, gdje nastaju jake međumolekulske kohezijske sile koje usporavaju gibanje fluida, odnosno javlja se unutarnje trenje. Te sile postaju sve jače smanjenjem temperature te staklo postaje sve čvršće, a viskoznost sve veća. Stoga se može zaključiti da je viskoznost u izravnoj vezi sa temperaturom. Opadanjem temperature raste viskoznost, te je zato kod proizvodnje vrlo važno znati na kojoj temperaturi, odnosno točki viskoznosti se može staklo obrađivati, a na kojoj je ono ohlađeno i spremno za uporabu. [22]

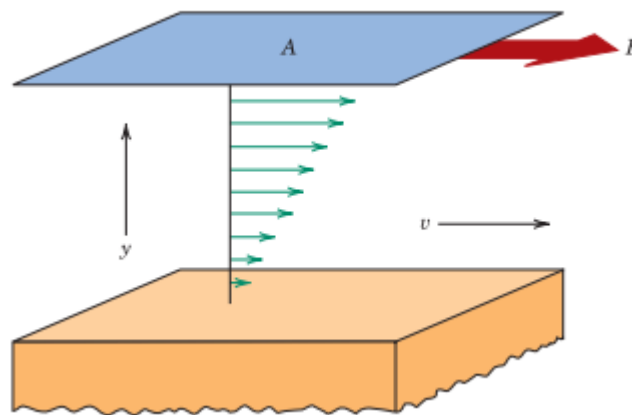
Viskoznost se izražava mjernom jedinicom paskalsekunda (Pas), pa tako potpuno otopljena talina ima viskoznost od 10 Pas i smatra se tekućinom. Kada viskoznost taline dosegne vrijednost od  $10^3$  do  $10^6$  Pas smjesa je mekana, ali ujedno i dovoljno plastična da se može oblikovati i obrađivati. Smanjenjem temperature viskoznost raste do točke od  $10^{6,6}$  Pas, tojest „točke omekšanja“. Na toj vrijednosti koeficijent unutrašnjeg trenja dovoljno je velik da vlastita težina ne utječe na deformacije konačnog oblikovanog proizvoda. Daljnjim hlađenjem stakla viskoznost raste do  $10^{12}$  Pas i time počinje faza transformacije, sve do vrijednosti od  $10^{13}$  Pas. To je zadnja faza hlađenja gdje staklo postaje kruto, čvrsto i poprima svoja karakteristična svojstva. Najveća vrijednost viskoznosti stakla na sobnoj temperaturi iznosi  $10^{20}$  Pas. Za usporedbu viskoznost vode iznosi  $10^{-1}$  Pas dok meda  $10^5$  Pa s. S obzirom na tako veliku viskoznost potrebno je više milijardi godina da bi se okom moglo vidjeti da se staklo pomaklo tojest „poteklo“ na sobnoj temperaturi. [21]

Kao što je prikazano na Slika 15, viskoznost stakla također ovisi i kemijskom sastavu stakla, pa tako različite vrste stakla imaju jednaku viskoznost na drugačijim temperaturama. [22] Stakla koja imaju veći udio oksida kao što su aluminijev oksid ( $Al_2O_3$ ) i silicijev dioksid ( $SiO_2$ ) imaju veću viskoznost na nižim temperaturama, dok ona koja imaju okside naprimjer barijev oksid ( $BaO$ ), natrijev oksid ( $Na_2O$ ) i litijev oksid ( $LiO$ ) imaju manju viskoznost. [1]



#### 4.1.1 Deformacija stakla

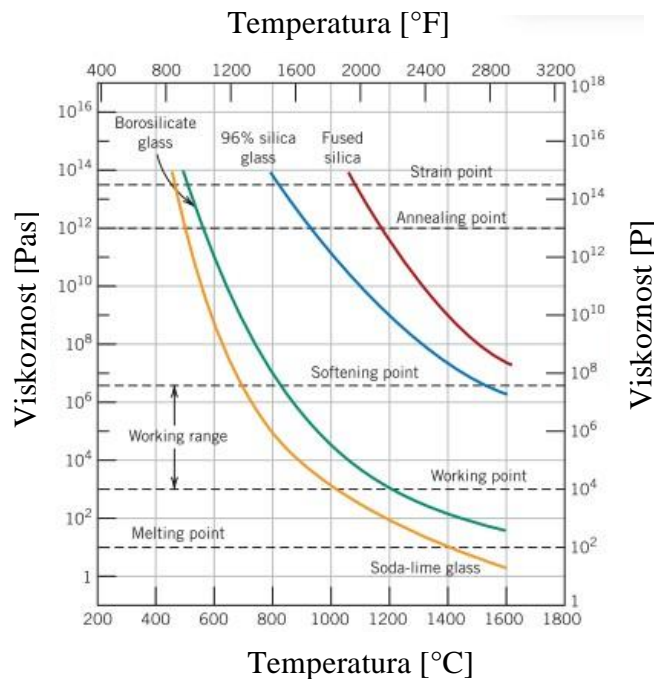
Plastična deformacija stakla ne nastaje pomicanjem dislokacija jer nema pravilne atomske strukture. Umjesto toga, staklo se deformira putem viskoznog toka, istim načinom na koji se tekućine deformiraju. Stopa deformacije je proporcionalna primijenjenom naprezanju. Pod utjecajem primijenjenog posmičnog naprezanja, atomi ili ioni klize jedan pored drugoga razbijajući i ponovno stvarajući međuatomske veze. Međutim, nema unaprijed propisane metode ili smjera u kojem se to događa, kao kod dislokacija. Viskozna promjena na makroskopskoj skali je prikazana na Slika 14.[21]



Slika 14 Prikaz viskoznog strujanja tekućine ili fluida stakla kao odgovor na primijenjenu silu smicanja. [21]

Većina tehnika obrade stakla zahtijeva da viskoznost bude u određenom rasponu ( $10^3 - 10^7$  Pas) na određenoj temperaturi. To je poznato kao radna točka. Na temperaturi kada viskoznost stakla dosegne  $10^{7,6}$  Pas staklo krene omekšavati te je pogodno za obradu. U ovom trenutku staklo se brzo deformira pa se lakše oblikuje U rasponu transformacije stakla koje se može vidjeti na Slika 15, većina stakala pokazuje viskoznost u rasponu od  $10^{12}-10^{13,5}$  Pas, a gornja granica od  $10^{13}$  dPa s naziva se točka žarenja. Žarenje je vrlo važno za popuštanje naprezanja koja nastaju tijekom toplog oblikovanja stakla Na  $30-40$  °C ispod točke žarenja, gdje je viskoznost  $10^{14,5}$  Pas, za popuštanje naprezanja potrebno je više vremena čak i do 43 sata. To je poznato kao točka naprezanja. Optimalna temperatura opuštanja naprezanja za korištenje treba odabrati prema primjeni i zahtjevima točnosti dimenzija. Ispod temperature transformacije stakla ( $T_g$ ), viskoznost stakla se povećava za mnogo redova veličine i struktura postaje smrznuta (kvazičvrsta). Brzina hlađenja utječe na gustoću stakla, a također i na stvaranje kristala. U natrijeva silikatna stakla, najčešći stakleni sustav, povećanje sadržaja lužine razbija

trodimenzionalnu mrežu uz stvaranje jednostruko vezanih kisika koji ne sudjeluju u mreži, čime se smanjuje duljina lanca. Glavni učinak povećanog sadržaja alkalijskih oksida je smanjenje temperature taljenja smanjenjem viskoznosti, što bi značilo niža temperatura stakla ( $T_g$ ), ali uočene su varijacije za staklene sastave koji sadrže  $B_2O_3$ , što je poznato kao anomalija borovog oksida. Povećanje sadržaja alkalijskih oksida u staklenim sastavima natrijevog borata pretvara  $BO_3$  trokute u  $BO_4$  tetraedre, čime se povećava mrežna povezanost. Stoga se temperatura staklastog prijelaza povećava. Mjesta koja ne premošćuju kisik ne postaju očita sve dok se sadržaj lužine ne poveća. Zamjena alkalnog oksida ( $Na_2O$ ) zemnoalkalnim oksidom ( $CaO$ ), uz održavanje konstantne koncentracije silicija, jača mrežu zamjenom natrijevih iona niske jakosti polja dvovalentnim zemnoalkalijskim ionima veće jakosti polja i tako povećava temperaturu obrade stakla ( $T_g$ ). [23]



Slika 15 Logaritam viskoznosti u odnosu na temperature za otopljeni silicij i tri stakla na bazi silicija. [21]

Uz viskoznost, kao fizikalno svojstvo važna je i gustoća. Gustoća građevnog stakla slična je gustoći betona, te ona u prosjeku iznosi  $2500 \text{ kg/m}^3$ . Gustoća je, kao i viskoznost, ovisna o kemijskom sastavu stakla. Zbog čega najveću gustoću imaju stakla s velikim udjelom olovnog oksida, a najmanju borosilikatna stakla, pa su ona ujedno i najlakša stakla. Također stakla koja su naglo hlađena imaju manju gustoću od onih postupno hlađenih. [21]

## **4.2 Kemijska svojstva**

Kao svi materijali koji se koriste u građevinarstvu, niti staklo nije potpuno otporno na vanjske utjecaje. Vremenom može iskusiti oštećenja, koroziju ili slabljenje, ovisno o tvarima koje djeluju na njega. Kemijska postojanost stakla također ovisi o njegovom sastavu, pa se prije taljenja staklene smjese određuje količina i vrsta sastojaka u skladu s predviđenim vanjskim utjecajima tijekom životnog vijeka proizvoda. Aluminijska silikatna i borosilikatna stakla su otpornija na kiseline, dok stakla koja sadrže veći udio cirkonij-oksida ( $ZrO_2$ ) su otpornija na lužine. Staklo koje se obično koristi u građevinarstvu obično je otporno na soli, lužine i kiseline, osim na fluorovodičnu kiselinu (HF) koja se koristi u završnoj obradi kako bi se postigao efekt zamućenog stakla. Silikatno staklo je osjetljivije na lužine, koje mogu razgraditi njegovu površinu razbijanjem Si-O-Si veza i čineći ga slabijim. Staklo koje je duže izloženo djelovanju lužina ili lužnatih spojeva obično će iskusiti oštećenja. Iako je staklo netopljivo u vodi, dulje izlaganje vodi ili vlažnosti može uzrokovati koroziju. Povećanje temperature također ubrzava proces korozije. Silikati na površini stakla reagiraju s vodom i stvaraju Si-OH skupine koje se ne mogu povezati, što dovodi do kidanja silikatne amorfnosti strukture. To se manifestira bijelim mrljama na površini i stalnom zamućenju stakla kao što se to može vidjeti na Slika 16. Korozija se obično događa kada staklo nije pravilno skladišteno, izloženo je visokoj vlažnosti ili je staklo međusobno naslonjeno. [1,12,24]

Kemijska postojanost je svojstvo materijala koje se mjeri njegovom sposobnošću da se odupre korozivnom djelovanju vode, otopina kiselina, lužina i soli. Kemijska postojanost stakala je bolja od većine metala i polimera. Međutim, nesilikatna stakla su osjetljiva na otapanje u vodenoj otopini, posebno u otopinama s niskim pH vrijednostima. Skoro sve vrste stakala lako se otapaju u fluorovodičnoj kiselini (HF) koja napada mrežne veze. Stakla koje posjeduju odličnu kemijsku trajnost, također su značajno napadnute ako su izložene vrlo visokom ili niskom pH, posebno na povišenim temperaturama.[23]

Kemijska stabilnost i otpornost stakla na bilo koji kemijski napad ovise o faktorima kao što su vrsta otopine, vrijeme izloženosti i temperatura te stanje površine stakla. Postoji nekoliko procesa koji su uključeni tijekom kemijskog napada vodenom otopinom na staklo. Međutim, svaki kemijski napad uključuje disocijaciju vode u  $H^+$  ili  $OH^-$  ione. Ionizacija se događa ako staklo sadrži alkalijske ili druge visoko pokretne ione, gdje otopina napada mrežne veze kako bi održala omjer koncentracije komponenata u staklu i otopini identičnim. Ovaj proces

ionizacije između visoko pokretnih iona iz stakla i protonskih vrsta iz tekuće otopine poznat je kao kongruentna otapalica i zahtijeva prisutnost tekućine ili vodene pare. Većina komercijalnih stakala su silikatna stakla koja sadrže alkalijske ione, pa se njihov proces otapanja obično događa kroz kongruentno otapanje. Reakcijski produkti formiraju sloj na površini stakla i utječu na daljnju stopu otapanja što rezultira korozijom stakla te se njezin izgled mijenja kako se vidi na Slika 16. Nasuprot tome, nevodene otopine (npr. organske) ne reagiraju s staklom.[23]

Pri ekstremno visokom pH (manje od 1 ili veće od 14), silikatna stakla se otapaju bržom stopom, gdje proces ionizacije i tanak sloj otapajućeg silikatnog gela više nisu odlučujući faktor za otapanje. Kemijski napad se događa izravno na Si-O veze u ovim ekstremnim uvjetima pH. Za stakla na bazi alkalijskih borosilikata, gdje se na termičkoj obradi formiraju dvije međusobno povezane faze: bogata silicijem faza i bogata boratima faza, primjenjuje se luženje na staklo nakon termičke obrade kako bi se selektivno uklonila faza alkalijskih borata koja ima vrlo nisku trajnost čak i u slabim kiselinama, dok je silicijeva faza otporna na te slabije kiseline. Nakon luženja potrebno je dodatno ispiranje lužinom kako bi se uklonili zarobljeni silikatni gel i ostavila za sobom porozna silicijeva struktura. Koraci termičke obrade i luženja mogu se prilagoditi kako bi se postigla željena veličina pora, volumen pora i površinska površina. Cirkonij ili cirkonijev oksid mogu se koristiti kako bi se poboljšala trajnost poroznog stakla.[23]



Slika 16 Korodirano staklo [25]

### **4.3 Mehanička svojstva**

Staklo se razlikuje od metala po tome što, kada je podvrgnuto mehaničkom opterećenju, ne deformira se i ne pokazuje naznake pucanja, već puca naglo odnosno dogodi se krti slom. Stoga je iznimno važno pri proračunu stakla u konstrukciji točno odrediti njegovu vlačnu čvrstoću, koja je glavni uzrok pucanja. U teoriji, staklo ima relativno veliku tlačnu čvrstoću od oko 1000 MPa i vlačnu čvrstoću od oko 6,5-8,5 GPa, no stvarne vrijednosti su znatno niže. Vrijednosti vlačne čvrstoće ovise o oštećenosti površine stakla. Svaki stakleni element na površini ima mikro-pukotine koje oslabljuju staklo tijekom vlačnog naprezanja i smanjuju vlačnu čvrstoću na vrijednost od oko 30-60 MPa. [23]

Prilikom proizvodnje stakla, teško je održati staklo potpuno ravno bez oštećenja i nepravilnosti na površini. No, ta oštećenja mogu se umanjiti primjenom premaza ili poliranjem u završnoj obradi stakla, što ujedno povećava njegovu vlačnu čvrstoću. Stanje površine nije jedini utjecajni faktor sloma nego na vlačnu čvrstoću stakla utječu i drugi čimbenici kao što su zaostala naprezanja (nastalo iz procesa očvršćivanja stakla) i njihova povijest, vanjski utjecaji te veličina poprečnog presjeka elementa. [26]

Tvrdoća stakla je mehaničko svojstvo koje opisuje njegovu sposobnost odupiranja prodiranju drugih tvrdih tijela utiskivanjem. Tvrdoća je usko povezana s vlačnom čvrstoćom stakla, a može se odrediti pomoću različitih metoda, uključujući Mohsovu ljestvicu i Vickersovu metodu. Staklo ima tvrdoću koja se kreće između 5 i 7 na Mohsovoj ljestvici, a Vickersovom metodom dobiveni rezultati kreću se oko 5500 N/mm<sup>2</sup>. Prikaz tvrdoća stakla prema vrsti u odnosu na sastav može se vidjeti na Tablica 8. [1]

U očvrslom stanju, staklo je idealno elastično, a njegov modul elastičnosti ovisi o vrsti stakla. Za građevinsko staklo, prosječna vrijednost modula elastičnosti iznosi 75000 N/mm<sup>2</sup>. Stakla s većim udjelom oksida, poput B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i CaO, imaju veći modul elastičnosti, dok oksidi natrija, kalija ili litija smanjuju elastičnost stakla. Također, Poissonov koeficijent za građevinsko staklo iznosi od 0,22 do 0,25. U Tablica 8 može se vidjeti tvrdoća nekoliko vrsti stakala prema Mohsu i Vickersu. [1,13,23]

Tablica 8 Prikaz tvrdoća prema Mohsu i Vickersu [1]

Vrsta materijala	Tvrdoća po Mohsovoj ljestvici	Tvrdoća po Vickersu [N/mm <sup>2</sup> ]
1. milovka (talk)	1	30
2. sadra (kamena sol)	2	350
3. kalcit	3	1000
4. fluorit	4	2000
5. apatit	5	5500
olovno kristalno staklo	5	4950
prozorsko staklo (silikatno staklo)	5	5500
optičko staklo	5	6450
borosilikatno staklo	5	7000
6. glinenac (feldspat)	6	8000
kremeno staklo	6	8000
7. kremen (kvarc)	7	11.000
8. topaz	8	14.000
9. korund	9	20.000
10. dijamant	10	1.000.000

Staklo ima gustoću sličnu armiranom betonu (25 kN/m<sup>3</sup>) i Youngov modul jednak aluminiju (70 GPa) [26]. Unatoč izuzetno visokoj tlačnoj čvrstoći (oko 1000 MPa), staklo pokazuje mnogo nižu vlačnu čvrstoću, što primarno određuje njegovu prikladnost za konstrukcijske primjene [26]. Teorijska vrijednost vlačne čvrstoće iznosi približno 6,5-8,5 GPa, međutim ispitivanja razaranjem pokazuju da je kritično vlačno naprezanje samo neznatan dio te vrijednosti (30-60 MPa). Razlog tako velikog neslaganja između teorijske i praktične vlačne čvrstoće stakla je taj što u stvari ovaj materijal pokazuje površinske nedostatke, što je karakteristično za krhke materijale. Naprimjer, površina staklene ploče ima mnogo dubokih mikro-ogrebotina za razliku od površine staklenih vlakana. Što je manji poprečni presjek vlakana, to je manje oštećenja materijala, a otuda i veća vlačna čvrstoća. Osnovna svojstva natrij-kalcij-silikatnog stakla može se vidjeti u Tablica 9. [24]

Staklo, kao i većina građevinskih materijala, korodira [27]. Dobro je poznata pojava zamučivanja staklenih ploča horizontalno uskladištenih u uvjetima velike vlage ili izloženih stalnom kontaktu s vodom. Također, prirodna vlaga okoliša nagriza staklene ploče izložene stalnom naprezanju, osobito ako ono dugo traje. Svaka molekula vode ( $H_2O$ ) reagira sa silikatnom strukturom stakla formirajući dvije Si-OH grupe koje se ne mogu međusobno spojiti i ostavljaju prazninu u silikatnoj strukturi stakla. Ako se ova reakcija dogodi na vrhu pukotine, praznina se postupno povećava atomskim korakom i zbog toga smanjuje čvrstoću stakla. Velike promjene temperature dodatno ubrzavaju procese nagrivanja. Postupno smanjenje čvrstoće stakla tijekom vremena naziva se statičkim zamorom [27]. Osnovna svojstva natrij-kalcij-silikatnog stakla su prikazana u tablici 1.[24]

Tablica 9 Osnovna svojstva natrij-kalcij-silikatnog stakla [24]

<b>Svojstvo</b>	<b>Vrijednost</b>
Gustoća	2500kg/m <sup>3</sup>
Youngov modul	70000 MPa
Poissonov koeficijent	0,23
Karakteristična vlačna čvrstoća	45 MPa
Koeficijent toplinskog širenja	9x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Toplinska vodljivost	1 Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>



Kada se ispituje čvrstoća stakla koristi se preša koja ima sposobnost savijanja u dvije točke. Posljedično, maksimalne vrijednosti momentog savijanja nalaze se u sredini ispitnog uzorka gdje dolazi do sloma. Prikaz laboratorijske opreme s kojom se određuje ova karakteristika materijala vidi se na Slika 17, Slika 18 i Slika 19.



Slika 17 Preša za ispitivanje čvrstoće stakla



Slika 18 Preša za ispitivanje čvrstoće stakla



Slika 19 Laboratorijsko ispitivanje čvrstoće stakla [28]



## **5 DEGRADACIJSKI PROCESI STAKLA**

Staklo je krhki materijal koji može degradirati na nekoliko načina. Neki od mehanizama degradacije stakla uključuju:

- **Kemijska degradacija:** Staklo može reagirati s kiselinama, bazama i drugim kemikalijama u okolišu, što može dovesti do promjene njegovih svojstava i smanjenja njegove čvrstoće. Kemijska degradacija stakla odnosi se na reakcije stakla s kiselinama, bazama i drugim kemikalijama u okolišu. Ove reakcije mogu dovesti do promjene svojstava stakla i smanjenja njegove čvrstoće. Na primjer, staklo može reagirati s vodom i drugim tekućinama, što može dovesti do korozije i erozije površine stakla. Također, staklo može reagirati s plinovima u zraku, poput ugljičnog dioksida i sumporovodika, što može dovesti do promjene boje i smanjenja prozirnosti. Kemijska degradacija stakla može se ubrzati u prisutnosti vlage, visokih temperatura i drugih čimbenika koji potiču kemijske reakcije. [29]
- **Fizikalna degradacija:** Staklo može biti podložno mehaničkim naprezanjima, kao što su udarci, savijanje i vibracije, što može dovesti do pukotina i lomljenja.. Staklo je krhki materijal, što znači da ima visoku čvrstoću, ali nisku otpornost na lom. To znači da se može lako slomiti kada je izloženo mehaničkim naprezanjima koja prelaze njegovu čvrstoću. Fizikalna degradacija stakla može se ubrzati u prisutnosti drugih čimbenika, kao što su visoke temperature ili nagle promjene temperature. [26]
- **Termička degradacija:** Staklo se može oštetiti zbog izloženosti visokim temperaturama ili naglim promjenama temperature, što može dovesti do pucanja ili lomljenja. [13]
- **Biološka degradacija:** Mikroorganizmi poput bakterija i gljivica mogu se naseliti na površini stakla i uzrokovati njegovu degradaciju. [13]

## **5.1 Korozija uzrokovana alkalijama**

Korozija stakla uzrokovana alkalijama je jedan od oblika kemijske korozije koja može zahvatiti staklene površine. Alkaliji su kemijske tvari s baznim svojstvima, a neka od najčešćih alkalija su natrij, kalij i kalcij. Kada alkalije dođu u kontakt sa staklom, može doći do kemijske reakcije koja dovodi do oštećenja staklenih površina. [29]

Jedan od primjera korozije stakla uzrokovane alkalijama je "alkalna korozija stakla". Ovaj tip korozije događa se kada alkalne tvari, kao što je natrij hidroksid (lužina) ili kalij hidroksid, reagiraju s površinom stakla. Ova reakcija može dovesti do postupne razgradnje stakla i stvaranja mrlja i oštećenja na površini koja se mogu izgledati kao korozija na Slika 20 Slika 21. [29]

Naprimjer, ako dođe do prodiranja alkalnih tvari, kao što je lužina, na površinu stakla, alkalne tvari reagiraju s silicijevim dioksidom u staklu. Rezultat je stvaranje topljivih alkalnih silikata, što dovodi do postupnog otapanja i oslabljivanja staklene površine. Ovo može uzrokovati zamagljivanje, hrapavost, gubitak transparentnosti i čak stvaranje sitnih pukotina u staklu. [23,29]

Korozija uzrokovana alkalijama može biti posebno problematična u nekim industrijskim postrojenjima ili okolinama gdje se koriste visoke koncentracije alkalnih tvari. Također, staklo koje se koristi u laboratorijima, staklenim posudama za kemikalije ili staklenim površinama koje dolaze u kontakt s alkalnim otopinama, može biti osjetljivije na ovakav oblik korozije. [21]

Kako bi se spriječila korozija stakla uzrokovana alkalijama, važno je odabrati odgovarajući tip stakla koji je otporan na alkalne tvari ili primijeniti zaštitne premaze koji će smanjiti osjetljivost stakla na ovu vrstu korozije. Također, pravilno rukovanje i održavanje staklenih površina u okruženjima s alkalijama može pomoći u očuvanju njihove kvalitete i dugotrajnosti. [29]



Slika 20 Prikaz korodiranog stakla [25]



Slika 21 Prikaz korodiranog stakla [30]

### 5.1.1 Uzorci korozije stakla

Staklene površine koje su dugotrajno izložene vodi ili kemikalijama doživljavaju povećane kemijske reakcije. Naprimjer, voda koja se zadržava na staklenoj površini reagira s kombinacijom sode i vapnenca u staklu. Ova interakcija je sporog i neprimjetnog karaktera, no njezin rezultat može biti korozija ili stvaranje mrlja. Fenomen korozije stakla rezultat je kombinacije reakcija. U prvoj fazi, događa se proces ionske izmjene kojim dominira difuzija. Ioni natrija u staklu reagiraju s ionima vodika. Voda dalje "ispire" ione natrija iz stakla. Ova reakcija povećava pH vrijednost staklene površine zbog akumulacije hidroksidnih iona. Što je pH vrijednost veća, to je i površina alkalija. Visoka pH vrijednost površine također potiče više štetnih reakcija. Stoga je nužno pažljivo pratiti curenje na staklenoj površini. Prva faza korozije traje sve dok pH vrijednost ne prijeđe vrijednost 9 pod normalnim uvjetima. Tijekom tog razdoblja, optička kakvoća i integritet staklene površine ostaju nepromijenjeni. Druga faza počinje kad pH vrijednost prelazi 9 ili više. U ovoj fazi, pH vrijednost je dovoljno visoka da "napadne" silikatnu mrežu stakla. Tada se stanje površine mora promatrati pod mikroskopom. Kako reakcija napreduje, počinju se pojavljivati sve više oštećenja na površini. Ova faza utječe na optičku kakvoću stakla, čak i ako integritet stakla ostaje netaknut. Atmosferski ugljik dioksid ( $\text{CO}_2$ ) također može reagirati s vlagom na površini stakla, stvarajući naslage na površini: natrijeva i kalcijeva karbonata. [25]

### **5.1.2 Prevenirija staklene korozije**

Staklena korozija se može spriječiti pravilnim čišćenjem i sušenjem površine. Također je važno izbjegavati korozivne okoline te ne koristiti kemijske proizvode za čišćenje. Prilikom slanja i rukovanja staklenim predmetima, koristite papir ili praškaste međuslojne materijale kako biste spriječili abraziju i mehanička oštećenja. Zaštita uz pomoć međuslojnih materijala također pomaže neutralizirati početnu fazu nakupljanja alkalnih tvari i održavati pH vrijednost, čime se sprječava korozija stakla. Odabir odgovarajućeg tipa stakla treba temeljiti na specifičnoj primjeni. Za okruženja s više vlage, poput kupaonica, preporučuje se upotreba nekorozivnog stakla. [25]

## **5.2 Hrdanje low-E premaza**

Low-E (niskoemisijski) premazi su tanki slojevi metalnih oksida koji se nanose na površinu izolacijskih stakala kako bi poboljšali njihove termičke i optičke karakteristike. Kratica "E" označava emisiju, odnosno sposobnost materijala da reflektira toplinsko zračenje. Low-E premazi smanjuju gubitak topline kroz staklo i omogućuju bolju kontrolu prolaska sunčeve svjetlosti. [31]

Među prednostima korištenja Low-E premaza su:

- Smanjenje gubitka topline: Low-E premazi smanjuju prijenos topline kroz staklo, čime pomažu u očuvanju unutarnje temperature prostora i smanjenju potrebe za grijanjem ili hlađenjem. To rezultira uštedom energije i nižim računima za energiju.
- Bolja kontrola sunčeve svjetlosti: Low-E premazi mogu filtrirati određene valne duljine sunčeve svjetlosti, čime smanjuju unos neželjenog toplinskog zračenja u prostoriju. To pomaže održavanju ugodne unutarnje temperature i smanjuje potrebu za klimatizacijom.
- Smanjenje UV zračenja: Low-E premazi također mogu smanjiti prodiranje ultraljubičastog (UV) zračenja kroz staklo. UV zračenje može izbljediti namještaj, tepihe i druge unutarnje površine, pa njegova filtracija može produžiti trajnost interijera.
- Poboľšana energetska učinkovitost: Kombinacija niskog emisijskog premaza s dvostrukim ili trostrukim staklom (izolacijsko staklo) povećava energetska učinkovitost prozora i pomaže u postizanju bolje toplinske izolacije. [31]

No, postoje i neki potencijalni nedostaci niskog emisijskog premaza, uključujući:

- Cijena: Izolacijska stakla s Low-E premazom mogu biti skuplja od običnih stakala. Međutim, dugoročno će vam se ulaganje isplatiti kroz smanjenje troškova energije.
- Osjetljivost na ogrebotine: Premaz može biti osjetljiv na ogrebotine, što može umanjiti njegovu učinkovitost. Stoga, održavanje stakala zahtijeva nježan pristup i upotrebu adekvatnih sredstava za čišćenje.
- Primjena: Low-E premazi moraju se pravilno nanijeti kako bi bili učinkoviti. Postupak primjene zahtijeva posebne tehnike, što može povećati troškove proizvodnje. [31]

Općenito, upotreba Low-E premaza u izolacijskim staklima postala je široko prihvaćena i prepoznata kao učinkovit način poboljšanja energetske učinkovitosti zgrada i stambenih prostora. Njihova primjena doprinosi smanjenju potrošnje energije i štednji novca, a istovremeno pruža ugodniji i udobniji boravak u unutarnjim prostorima. [31]

Low-E staklo, poznato i kao staklo niske emisije, proizvodi se u dvije varijante: hard-coating (pirolitička zaštita) i sputtering/soft-coating. Kod hard-coating-a, željezni oksid nanosi se na površinu float-stakla tijekom proizvodnje stakla. S druge strane, kod sputtering/soft-coatinga, više slojeva željeznog oksida nanosi se nakon procesa proizvodnje stakla, koristeći postupak katodnih zraka u visokovakuumiranom postrojenju. [32]

Upotreba Low-E stakla značajno smanjuje U-vrijednost stakla, blokirajući prolaz infracrvenog (IR) zračenja, dok istovremeno propušta sunčevu svjetlost. Stoga, ako je cilj spriječiti gubitak toplinske energije iz prostorije, unutarnja strana izolacijskog stakla mora biti opremljena Low-E premazom, što omogućuje ulazak sunčeve topline koja doprinosi grijanju prostorije. S druge strane, ako je cilj spriječiti ulazak sunčeve topline u prostoriju, Low-E premaz se postavlja na vanjsku stranu izolacijskog stakla. Radi toga od izuzetne je važnosti na koju stranu se ugrađuje staklo sa premazom ako se želi postići željeni cilj. Jedna od mogućih provjera na kojem staklu se nalazi low-E premaz je ta da se upaljač ili neki drugi izvor svjetlosti, kao naprimjer svjetiljka na mobitelu, prisloni uz staklo i promatraju odsjaji u staklu kao što se to može vidjeti na Slika 22. Naime svi odsjaji svjetlosti nisu iste boje, već strana stakla koje ima na sebi low-E lomi svjetlost pod drugačijim kutem te kao rezultat plamen ili izvor svjetlosti odsjajava drugačijom bojom. Radi toga na Slika 22 vide se 3 odsjaja i to je zbog toga što se u ovom slučaju radi o

troslojnom izolacijskom staklu. Također svaki odsjaj posebno ime dva bliska odsjaja jer se svjetlost lomi i na prednjoj i stražnoj strani staklene ploče. Iz toga se može zaključiti da na Slika 22 srednje staklo ima low-E premaz na prednjoj strani stakla te ju je potrebno ugraditi na pravilnu stranu kako bi se zadovoljili zahtjevi koje se očekuju od low-E premaza. [32]



Slika 22 Primjer načina provjere na kojem staklu se nalazi low-E premaz

Važno je napomenuti da Low-E staklo propušta zračenje kratkih valova, dok reflektira duge valove. Uvijek se nanos metalnog oksida usmjerava prema unutrašnjosti izolacijskog stakla odnosno na stranu komore koja je ispunjena plemenitim plinom, najčešće argonom kako ne bi bilo izloženo vanjskim utjecajima. [31]

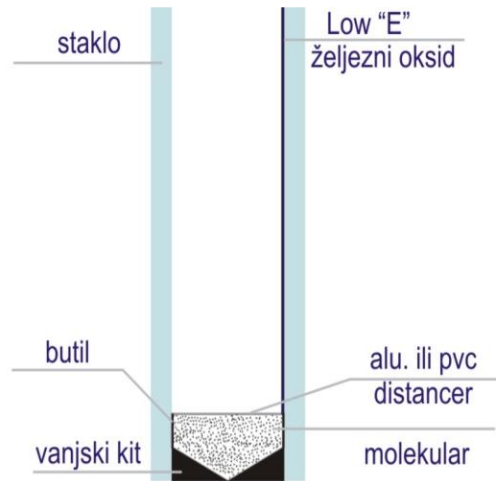
Učinkovitost stakla mjeri se koeficijentom "U" ( $W/m^2K$ ), koji je ranije bio poznat kao "k" faktor. Standardno izolacijsko staklo (4+4) ima k faktor od oko 2,7, dok jedan sloj Low-E stakla smanjuje taj faktor na otprilike 1,4. Staklo s Low-E premazom izgleda poput običnog float stakla, često ga nazivajući termoizolacijskim staklom jer smanjuje mogućnost kondenzacije vode između stakala. Prema zapadnoeuropskim zakonima, koeficijent "U" (k) mora biti minimalno 1,1-1,4  $W/m^2K$ . Standardna debljina Low-E stakla iznosi 4 mm. [31]

Low-E premazi obično se sastoje od tankih slojeva metalnih oksida, poput srebra ili cinkovog oksida, koji su pravilno zaštićeni unutar staklenog „sendviča“. Ti slojevi su izloženi unutarnjoj strani stakla, koja se nalazi između stakla i prostora u kojem se nalazi plemeniti plin. U normalnim uvjetima, Low-E premazi su zaštićeni i ne bi trebali doći u kontakt s vanjskim okolišem ili vlagom koja bi mogla uzrokovati hrđanje. Unutarnji prostor između stakala, gdje su smješteni premazi, trebao bi biti hermetički zatvoren i ispunjen inertnim plinom (obično argonom) kako bi se spriječilo oštećenje premaza. [31,32]

Međutim, postoje neki izuzetni uvjeti koji bi mogli uzrokovati oštećenje ili hrđanje Low-E premaza:

- Neispravna ugradnja: Ako postupak proizvodnje ili ugradnje izolacijskog stakla nije obavljen pravilno, moguće je da premazi budu izloženi vlazi i drugim štetnim elementima.
  - Oštećenje stakla: Ako staklo samo po sebi postane oštećeno (npr. ogrebotine, pukotine), to bi moglo dovesti do prodora vlage i potencijalnog hrđanja premaza.
  - Loša kvaliteta premaza: U rijetkim slučajevima, ako su premazi niske kvalitete ili nisu pravilno zaštićeni tijekom proizvodnje, moguće je da se s vremenom pojavi hrđanje.
- [32]

Važno je napomenuti da se vrhunski proizvođači i dobavljači izolacijskih stakala pobrinu da njihovi Low-E premazi budu otporni na hrđanje i održe dugotrajnu funkcionalnost. Stoga je važno odabrati pouzdanog proizvođača i slijediti upute za njegovo održavanje kako bi se osigurala dugotrajna i učinkovita upotreba Low-E stakla. [31]



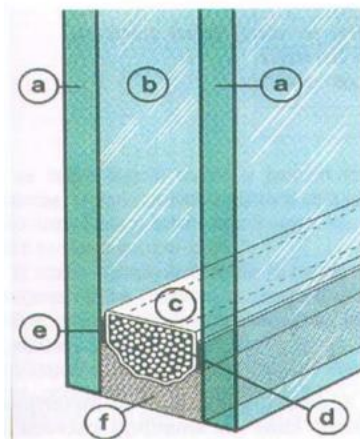
Slika 23 Izolacijsko staklo s dvostrukim staklenim jedinicama

Ukoliko s izolacijskim staklom nije pravilno rukovano može doći do znatnih oštećenja. Nepravilno rukovanje dvostrukim staklenim jedinicama, kao što je curenje plina, curenje molekularnog sita itd., može uzrokovati oksidaciju Low-E stakla nakon izolacije, posebno ako brtvilo od butila nije potpuno napunjeno i molekularno sito predstavlja fatalnu prijetnju Low-E staklu. Stoga, za poboljšanje kvalitete izolacijskih staklenih jedinica ključan je faktor za izbjegavanje loša izvedba spajanja komponenti koje su prikazane na Slika 23. [31]

Također treba izbjegavati greške nakon kaljenja. A to se odnosi na niz grešaka u naknadnoj obradi kaljenog Low-E stakla. Budući da kaljeno Low-E staklo ima više procesa nakon što je premaz završen, tok obrade je sljedeći:

Svaki od tih procesa može oštetiti Low-E staklo. U proizvodnom procesu, što je dulje vrijeme ciklusa, veća je vjerojatnost grešaka. Osim toga, budući da su površinska otpornost različitih Low-E proizvoda različita, razlikuje se i koeficijent toplinske provodljivosti. Stoga je odabir odgovarajućeg postupka kaljenja ključan za poboljšanje kvalitete premaza nakon kaljenja Low-E stakla. Stoga, osim postupka premazivanja, kontrola Low-E stakla koje se može kaliti mora se provesti u skladu s odgovarajućim mjerama kako bi se smanjila pojava grešaka.

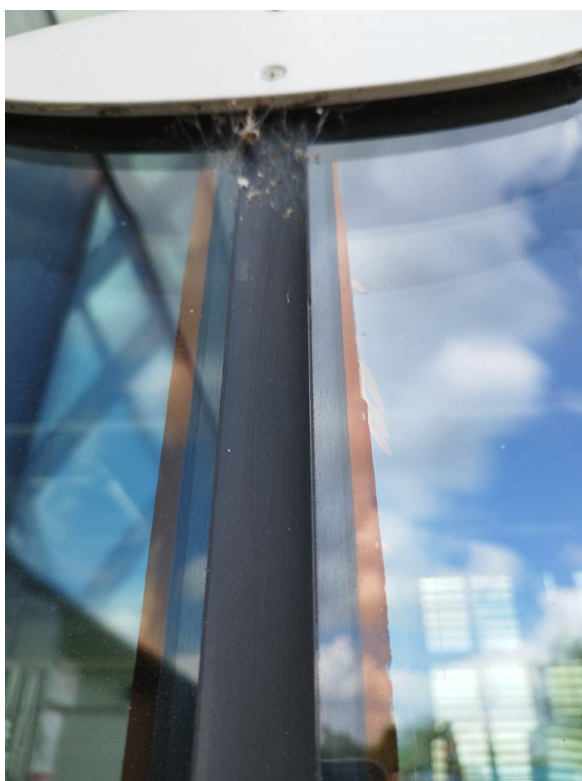




- a. staklo (npr. 2x4mm)
- b. međuprostor (zrak ili plinsko punjenje)
- c. okvir „odstojnik“
- d. higroskopno sredstvo za odvlaživanje
- e. unutarnje brtvilo, (butil 5g/m)
- f. vanjsko brtvilo, 65-70ml/m

Slika 24 Shematski prikaz presjeka dvostrukog izolacijskog stakla [33]

Ukoliko spoj butila i stakla popusti te low-E premaz dođe u kontakt s vanjskim uvjetima postoji velika šansa da će taj premaz zahrđavati zbog utjecaja vlage i kisika. Primjer takvih trajnosnih propadanja može se vidjeti na Slika 25, Slika 26, Slika 27 i Slika 28.



Slika 25 Primjer korodiranog low-E  
premaza



Slika 26 Primjer korodiranog low-E  
premaza



Slika 27 Primjer korodiranog low-E  
premaza



Slika 28 Primjer korodiranog low-E  
premaza

## **6 METODE OSIGURANJA TRAJNOSTI STAKLENIH FASADNIH ELEMENATA**

Razvoj standarda za ostakljivanje konstrukcija ne može ići u korak s dinamičnim razvojem industrije stakla i njezinim potrebama te je zbog toga do danas u Europskoj Uniji nije objavljen niti jedan službeni i usklađeni standard za projektiranje komponenti od stakla. Europski prEN standardi pripremani su tijekom nekoliko godina, međutim ostali su u fazi nacrt, najviše zbog nedostatka jednoglasnosti među državama članicama. Nekoliko zemalja ima nacionalne standarde i smjernice koje predstavljaju različite filozofije projektiranja i u različitom stupnju su konzervativne. Europsko povjerenstvo za standardizaciju (CEN) je 2016. godine osnovalo povjerenstvo za konstrukcijsko staklo CEN / TC 250 / SC 11 čiji je zadatak razviti zajednički standard za projektiranje stakla za sve zemlje članice s radnim nazivom "Eurocode 10". Standard će se konačno sastojati od tri dijela, o osnovama projektiranja i općim načelima, proračunima elemenata opterećenih okomito na svoju površinu i proračunima elemenata opterećenih u ravnini i analize spojeva. Pojedini dijelovi „Eurocode 10“ trenutno imaju status nacrt tehničkih specifikacija i u sljedećim godinama bit će predmet savjetovanja u nacionalnim povjerenstvima za standardizaciju. [24]

Osiguranje trajnosti staklenih fasadnih elemenata može se postići primjenom različitih metoda i pristupa. Naprimjer izborom kvalitetnih materijala kao što je visokokvalitetno staklo i drugi materijali koji se koriste u fasadnim elementima ključan je faktor za osiguranje trajnosti jer otpornost na vremenske utjecaje, temperaturne promjene i UV zračenje igraju značajnu ulogu u sprječavanju propadanja fasadnih elemenata. [34,35]

Također pravilna ugradnja staklenih panela i njenih komponenti zahtijeva pažljivo planiranje, stručno znanje i vještine jer nepravilna ugradnja može dovesti do curenja, kondenzacije, pucanja stakla, hrđanja low-E premaza i drugih problema. [34]

Isto tako postoje premazi koji se mogu nanositi na staklene površine kako bi se zaštitile od vremenskih utjecaja, korozije i oštećenja od UV zračenja. Premazi se koriste jer mogu povećati otpornost stakla na ogrebotine i smanjiti potrebu za čestim održavanjem. [21]

Kada je element ugrađen od iznimne je važnosti redovito održavanje. Periodično održavanje fasadnih elemenata, uključujući čišćenje i inspekciju, ključno je za očuvanje njihove trajnosti. Redovito čišćenje pomaže u uklanjanju naslaga prašine, prljavštine i zagađivača koji mogu oštetiti staklo i premaze. [23,26]

No već i kod projektiranja treba paziti na određene stvari. Naprimjer, važno je projektirati termičke dilatacije stakleni fasadni elementi moraju se širi i skupljati uslijed temperaturnih promjena. Nepravilno projektiranje termičkih dilatacija može izazvati naprezanja i oštećenja stakla te njihov lom. [36]

Na trajnost stakla od najveće je važnosti izvesti pravilnu izolaciju i brtvljenje: Pravilna izolacija i brtvljenje ključni su faktori za sprečavanje prodora vode, zraka i vlage u staklene fasadne elemente. Loša izolacija može dovesti do kondenzacije, propuštanja i oštećenja unutrašnjosti objekta i gubitak glavnih karakteristika izolacijskog stakla. [35,37]

Trajnost se ne odnosi samo na kemijska i fizikalna svojstva fasadnog elementa već i mehaničkih stoga je potrebno zadovoljiti i otpornost na udarce što se provjerava normiranim ispitivanjem udarca klatnom. Fasadni elementi izloženi su raznim potencijalnim udarcima, kao što su vjetrovi, kiše i udari predmeta. Konstrukcija staklenih elemenata trebala bi biti otporna na ove udarce kako bi se spriječilo lomljenje i oštećenje. [38]

Pravilno testiranje materijala konstrukcije staklenih fasadnih elemenata može pomoći u osiguranju njihove kvalitete i trajnosti. Certifikati i standardi, kao što su ASTM i EN standardi, mogu poslužiti kao referenca za odabir i procjenu kvalitete materijala i konstrukcije. Uzimajući u obzir ove metode i faktore, projektanti, inženjeri i izvođači radova mogu zajedno raditi na osiguranju trajnosti staklenih fasadnih elemenata i produžiti njihov vijek trajanja.

## **7 KONSTRUKTIVNE MJERE ZAŠTITE U FAZI PROJEKTIRANJA I IZVOĐENJA**

### **7.1 Detalji kojima se osigurava trajnost elemenata**

Kod proizvodnje izolacijskih stakala, kao što su dvostruka ili trostruka stakla, važno je osigurati izvrsnu termalnu izolaciju i smanjenje gubitka energije kroz staklo. Plemeniti plin argon igra ključnu ulogu u tom procesu jer se koristi kao izolator između staklenih ploča, poboljšavajući toplinsku učinkovitost prozora. No, kako bi se osigurala dugotrajnost i očuvanje argona između stakala, primjenjuju se principi primarne i sekundarne obrane. [1]

Primarna obrana odnosi se na brtvu koja se koristi za hermetičko zatvaranje između staklenih ploča. Najčešće se koristi poliisobutilen (PIB) kao primarna brtva jer ima visoku sposobnost brtvljenja i otporan je na vlagu i plinove. U procesu proizvodnje izolacijskih stakala, staklene ploče se postavljaju na odgovarajući okvir s razmakom između njih. U taj razmak se umetne primarna brtva, koja se potom stvrdne kako bi stvorila hermetički zatvoren prostor između staklenih ploča. Na taj način, primarna obrana sprječava prolazak zraka, vlage i plinova, uključujući argon, čime osigurava dugotrajnu termalnu izolaciju staklenih jedinica. [37]

Sekundarna obrana odnosi se na dodatne mjere koje se primjenjuju kako bi se osiguralo dodatno zatvaranje i smanjilo istjecanje argona između stakala. Kako bi se poboljšala učinkovitost i dugotrajnost izolacijskih stakala, može se primijeniti dodatna brtva ili dodatni materijali koji će spriječiti curenje argona. Jedna od uobičajenih metoda sekundarne obrane je povećanje dimenzija aluminijskih ili PVC profila oko staklenih ploča. Povećanjem dimenzija profila, stvaraju se dodatni preklopi ili izbočine koji prekrivaju područje izloženo argonu. Time se smanjuje mogućnost istjecanja plina između stakala i osigurava dodatna zaštita od curenja. [39]

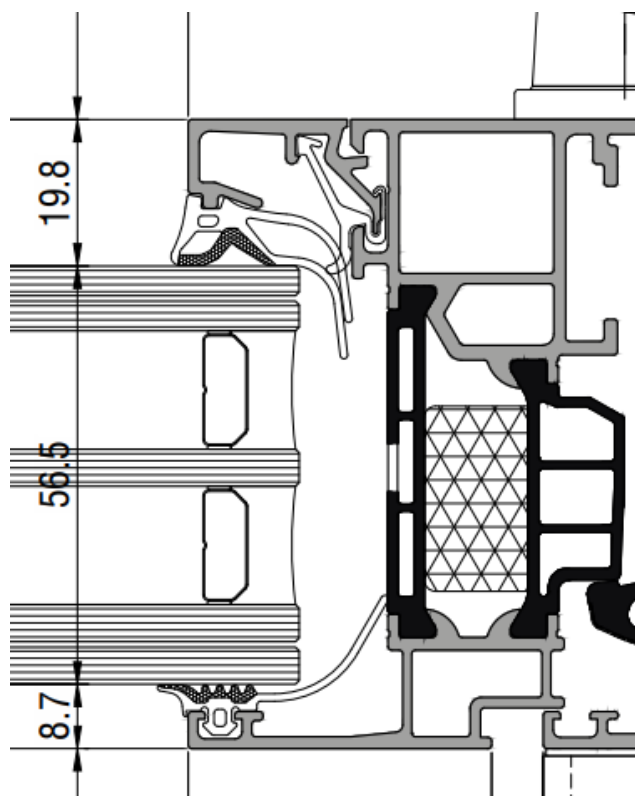
Kombinacija primarne i sekundarne obrane omogućuje stvaranje visoko kvalitetnih izolacijskih stakala koja zadržavaju svoju termalnu izolaciju i učinkovitost tijekom dugog vremenskog razdoblja. Pravilno brtvljenje i zaštita od istjecanja plemenitog plina argona ključni su za postizanje energetske učinkovitosti i dugotrajnosti izolacijskih stakala, te pružaju ugodnu unutarnju klimu prostora.

Također jedan od bitnih elemenata u proizvodnji izolacijskih prozora su silikoni koji se koriste za brtvljenje i spajanje stakla s aluminijskim ili PVC profilima. Međutim, UV nestabilni silikoni mogu biti osjetljivi na UV zračenje, što može s vremenom uzrokovati njihovu degradaciju i smanjenje učinkovitosti. Kako bi se nadoknadili negativni učinci UV zračenja na silikone, proizvođači izolacijskih prozora razvili su inovativan pristup, takozvanu sekundarnu obranu od UV zračenja. Umjesto upotrebe stabilnih silikona, aluminijski ili PVC profili prozora mogu se povećati u dimenzijama kako bi fizički spriječili prolazak sunčevih zraka na kritične dijelove silikona. [34]

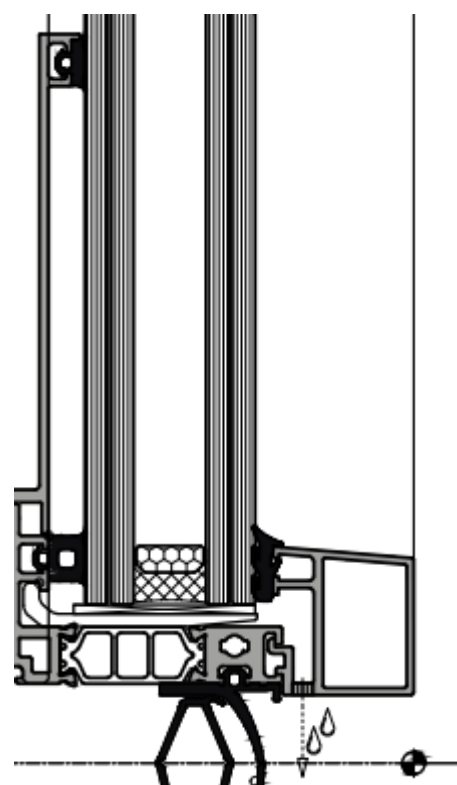
Povećanjem dimenzija aluminijskih ili PVC profila, stvaraju se dodatni preklopi ili izbočine koji prekrivaju područje izloženo UV zračenju. Time se smanjuje izravan kontakt silikona s UV zračenjem, što pomaže u zaštiti silikona od potencijalnih oštećenja i degradacije. Ova metoda omogućuje proizvođačima da i dalje koriste uvjetno nestabilne silikone bez žrtvovanja dugotrajnosti i performansi prozora. [34]

Kombinacija UV stabilnih silikona i povećanih dimenzija aluminijskih ili PVC profila pruža sekundarnu obranu koja osigurava da izolacijski prozori zadrže svoje izvrsne performanse tijekom dugog vremenskog razdoblja. Osim što poboljšava otpornost silikona na UV zračenje, ovaj pristup također doprinosi povećanoj trajnosti prozora i smanjenju potrebe za redovitim održavanjem.

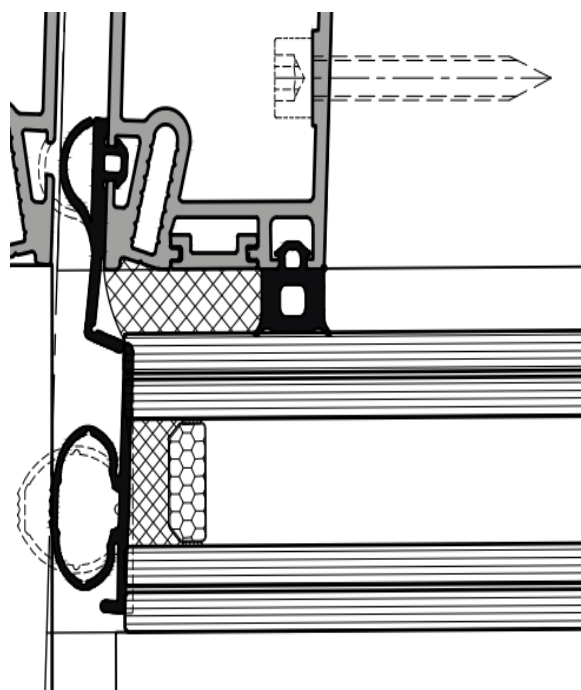
Na Slika 29, Slika 30 i Slika 31 može se vidjeti primjer u projektiranju gdje se namjerno povećavaju dimenzije aluminijskih profila da stvore barijeru između UV zraka i silikona, bilo da je taj silikon stabilan ili nestabilan. Tako silikon u svojem životnom vijeku uvijek bude u hladu i ne degradira pa se time povećava njegova trajnost jer je manja šansa da će uslijed degradacije spoj stakla i silikona popustiti te time uzrokovati istjecanje plemenitih plinova.



Slika 29 103P3-E34-3100-16003



Slika 30 C03-KFK-O1C-XX-MUP-  
FC-P1DV01



Slika 31 C03-KFK-O1C-XX-DRG-FC-DHA001

Jedan od mehanizama degradacije butila je UV zračenje. Sunčeva svjetlost izaziva razgradnju molekula butila, što dovodi do gubitka elastičnosti i smanjenja njegove brtvilačke sposobnosti. Ovaj proces posebno je izražen u područjima s jakim sunčevim zrakama, izloženim staklenim fasadama. Kako butil postaje krhki, povećava se rizik od curenja i propuštanja vlage između stakala. Visoke temperature također mogu izazvati degradaciju butila. U okolinama s visokim temperaturama, butil može postati mekan te izgubiti svoju brtvilačku funkciju. Ovo je posebno važno u urbanoj sredini gdje su staklene površine izložene intenzivnom sunčevom zračenju i zagrijavanju. [6]

Kemijska izloženost također može uzrokovati oštećenje i degradaciju butila. Izloženost kemikalijama, poput otapala i kiselina, može narušiti strukturu butila, smanjujući njegovu učinkovitost kao brtvila. Također, dugotrajna izloženost vlazi može uzrokovati otapanje i razgradnju butila, što dovodi do smanjenja njegove trajnosti. Kako bi se spriječila degradacija butila i osigurala dugotrajnost izolacijskih stakala, važno je koristiti kvalitetan butil visoke UV stabilnosti i pravilno ga primijeniti tijekom proizvodnje staklenih jedinica. Redovito održavanje i nadzor staklenih jedinica također su ključni za očuvanje njihove kvalitete i produljenje njihovog vijeka trajanja. [6]



Slika 32 Prikaz butila nanešenog na aluminijski profil



### **7.1.1 Opis općenitog sklopa fasadnog elementa**

Stakleni fasadni elementi izrađuju se od visokokvalitetnih stakala koja su otporna na vremenske utjecaje, UV zračenje i toplinu. Stakla se često kombiniraju s aluminijskim, čeličnim ili PVC profilima kako bi se osigurala stabilnost i čvrstoća fasade. Ovi profili omogućavaju pravilno postavljanje i povezivanje staklenih ploča, kao i termalno rasterećenje kako bi se spriječila mogućnost pucanja ili lomljenja stakla zbog toplinske ekspanzije. [1,36]

Stakleni fasadni elementi mogu biti fiksni ili pokretni. Fiksni elementi su nepomične staklene ploče koje služe za osvjetljenje interijera i pružanje prozirnih vanjskih zidova. Pokretni elementi, kao što su prozori i klizna vrata, omogućuju prozračivanje prostora i lakši pristup vanjskim površinama zgrade. [6]

Jedan od ključnih aspekata staklenih fasadnih elemenata je energetska učinkovitost. Napredne tehnologije uključuju low-e premaze i argon punjenje između stakala kako bi se smanjio prijenos topline i poboljšala termalna izolacija. Također, reflektirajuće staklo može se koristiti za smanjenje prolaska sunčeve topline, što pridonosi uštedi energije za klimatizaciju. [6]

Stakleni fasadni elementi obuhvaćaju različite dijelove i detalje koji čine cjelokupnu strukturu fasade. Ovi elementi su ključni za pravilno funkcioniranje i izgled staklene fasade. Evo nekoliko glavnih elemenata i detalja koji se obično nalaze u staklenim fasadama:

Osnovni elementi staklene fasade su sami stakleni paneli. Ovi paneli čine prozračnu vanjsku površinu zgrade i omogućavaju prirodno osvjetljenje unutar prostorija. Staklene ploče mogu biti različitih debljina, oblika i vrsta stakla, uključujući obično float staklo, reflektirajuće staklo, sigurnosno staklo, i staklo s niskoemisivskim premazom (low-E staklo) za poboljšanu termalnu izolaciju. [6]

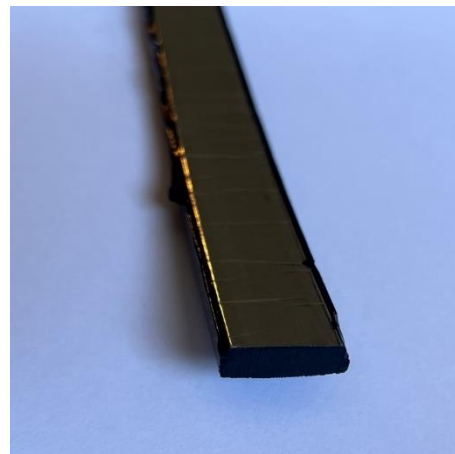
Aluminijski ili PVC profili koriste se kao okviri koji drže staklene ploče na mjestu. Aluminijski profili su često korišteni zbog svoje izdržljivosti i čvrstoće, dok PVC profili pružaju bolju termalnu izolaciju. Profili mogu biti različitih oblika i debljina, ovisno o dizajnu fasade i statičkim zahtjevima. [6]

Brtve se koriste za hermetičko zatvaranje između staklenih ploča i profila kako bi se spriječio ulazak vode, zraka i drugih elemenata koji bi mogli oštetiti unutarnji prostor ili smanjiti energetska učinkovitost. Najčešće korišteni materijali za brtvljenje su silikoni, poliisobutilen (PIB) i poliuretan.

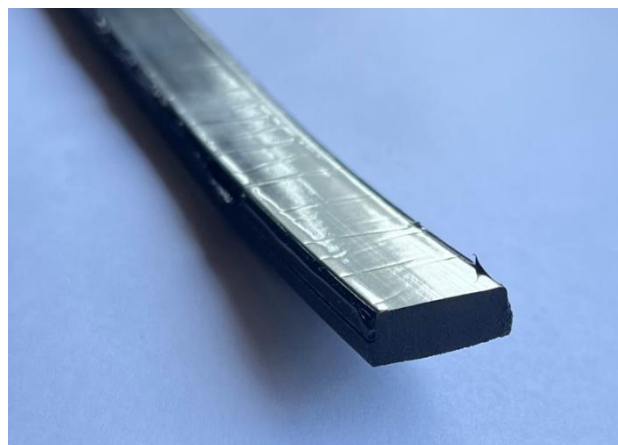
Na Slika 33, Slika 34, Slika 35, Slika 36, Slika 37 i Slika 38 mogu se vidjeti različiti tipovi umetaka između stakla koji se koriste pri izradi staklenih fasadnih elemenata. Svaki ima svoje prednosti i mane no bitno je naglasiti da je njihovo najvažnije svojstvo koje trebaju zadovoljiti nepropusnost i što manji toplinski prijenos.



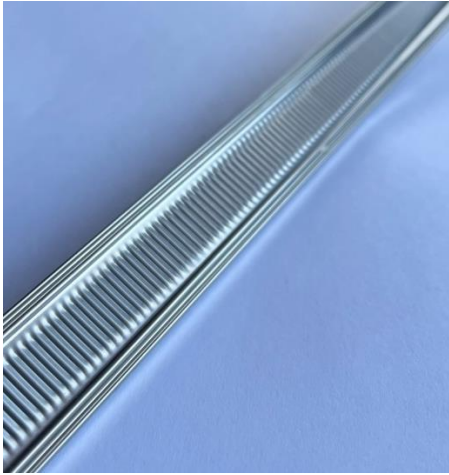
Slika 33 Superspacer



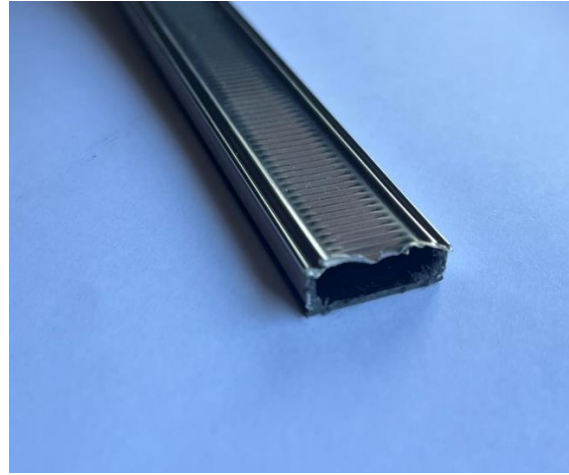
Slika 34 Superspacer



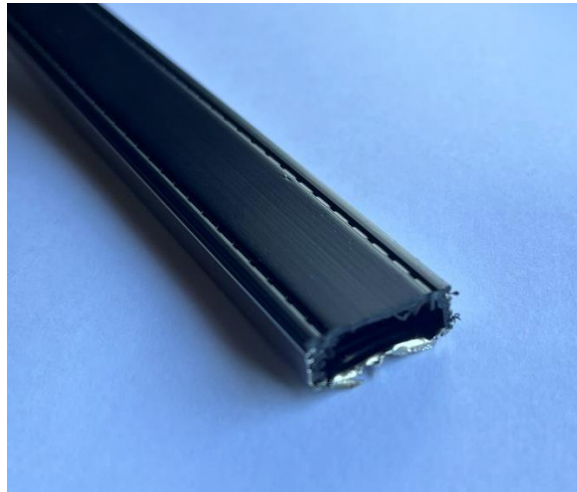
Slika 35 Superspacer



Slika 36 Aluminijski profil



Slika 37 Šuplji dio aluminjskog profila  
namjenjen za molekular



Slika 38 Hybridspacer

U nekim staklenim fasadama, između staklenih ploča može se koristiti plemeniti plin argon kako bi se poboljšala termalna izolacija. Argon je manje konduktivan od zraka i smanjuje gubitak topline kroz staklo. Kao zamjena može se koristiti i kripton jer je isto tromi plemeniti plin.

Pokretne komponente: Ovisno o dizajnu fasade, moguće je uključiti i pokretne elemente kao što su prozori, klizna vrata ili ventilacijski otvori. Ovi elementi omogućuju prozračivanje prostora i bolju kontrolu protoka zraka.

### **7.1.2 Vrste silikona i njihova zaštita**

Kada je riječ o brtvljenju izolacijskih stakala i fasadnih elemenata, bitno je razumjeti razliku između UV stabilnih i nestabilnih silikona. Ove dvije vrste silikona imaju različitu reakciju na UV zračenje, što može značajno utjecati na njihovu učinkovitost i dugotrajnost.

UV nestabilni silikoni su osjetljivi na UV zračenje i mogu degradirati pod utjecajem sunčeve svjetlosti. Postupno gube svoje brtvilačke sposobnosti i postaju krhki. Kada se izlože UV zračenju, ovi silikoni mogu puknuti, omekšati ili se skupiti, što dovodi do curenja i propuštanja vlage. To može uzrokovati oštećenje unutarnjih elemenata stakala i premaza. Stoga, kod korištenja UV nestabilnih silikona, važno je redovito provjeravati stanje brtve i obavljati potrebno održavanje kako bi se osigurala njihova funkcionalnost.

S druge strane, UV stabilni silikoni posebno su projektirani da izdrže UV zračenje i ostanu fleksibilni i otporni na štetne učinke sunčeve svjetlosti. Zadržavaju svoju elastičnost i brtvilačke karakteristike unatoč izloženosti UV zračenju. Ovi silikoni pružaju dugotrajnu i pouzdanu brtvu izolacijskih stakala i fasadnih elemenata, smanjujući potrebu za čestim održavanjem i zamjenom. Odabirom UV stabilnih silikona, osigurava se trajnost i učinkovitost staklenih konstrukcija tijekom vremena.

U konačnici, korištenje UV stabilnih silikona pruža prednost jer osigurava pouzdanu brtvu i zaštitu od vlage, omogućavajući fasadama i izolacijskim staklima da zadrže svoju funkcionalnost i izgled tijekom dugog vremenskog razdoblja. To je ključno za održavanje trajnosti i integriteta staklenih konstrukcija te za minimiziranje potrebe za popravcima i zamjenama na duži rok.

### **7.1.3 Butil**

Korištenje butila je česta i važna komponenta kod izolacijskih stakala, posebno u proizvodnji dvostrukih i trostrukih staklenih jedinica. Butil je vrsta polimerne brtvilne trake koja se koristi za stvaranje brtve između staklenih ploča i okvira u izolacijskim staklima. Ova brtvilna traka osigurava hermetičko zatvaranje unutarnjeg prostora staklenih jedinica, čime se sprečava prodiranje vlage, plinova i prašine, te pruža izolacijske i zvučne karakteristike.

Butil je idealan materijal za ovu primjenu jer ima nekoliko važnih svojstava. Prije svega, butil je vrlo fleksibilan i elastičan, što omogućuje stvaranje čvrstog spoja između staklenih ploča i okvira, čak i ako postoje manja odstupanja u veličini ili obliku. Osim toga, butil je vodootporan i otporan na UV zračenje, što znači da može zadržati svoje brtve i izolacijske sposobnosti tijekom dugog vremenskog razdoblja. To je posebno važno kod izolacijskih stakala jer štiti staklene ploče od vlage koja bi mogla uzrokovati kondenzaciju i oštećenje unutarnjih elemenata i premaza.

Također, butil ima nisku propusnost za plinove, što znači da smanjuje prijenos topline između staklenih ploča, što doprinosi boljoj termalnoj izolaciji izolacijskih stakala. Ova svojstva omogućuju stvaranje energetski učinkovitih staklenih jedinica, što doprinosi smanjenju potrošnje energije za grijanje i hlađenje prostora.

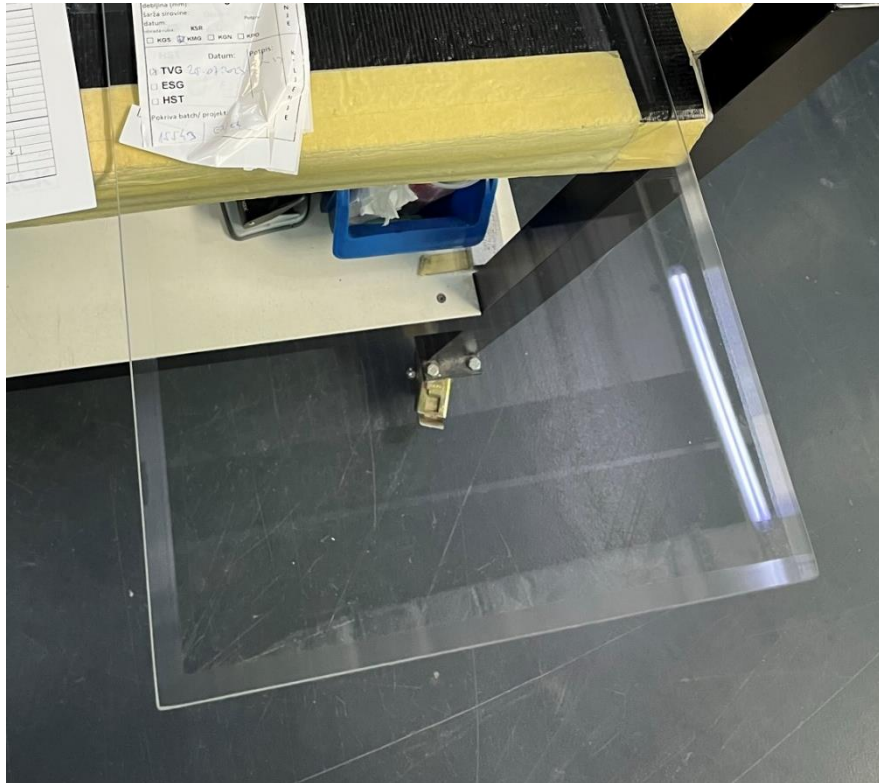
### **7.1.4 Brušenje low-E premaza**

Brušenje ruba izolacijskog stakla igra ključnu ulogu u zaštiti Low-E premaza od hrđanja i drugih nepoželjnih problema. Izolacijsko staklo s Low-E premazom sastoji se od dva ili više staklenih ploča koje su spojene oko rubova uz pomoć brtvila. Brušenje rubova ima nekoliko važnih funkcija koje osiguravaju dugotrajnost i pouzdanost Low-E premaza. [37,39]

Prvo, brušenje rubova uklanja oštre i nepravilne dijelove stakla koji bi mogli biti potencijalni izvor oštećenja Low-E premaza. Nepravilni rubovi mogu stvoriti mjesta na kojima se vlaga može zadržavati i prodirati između stakala, izlažući premaze vlazi i koroziji. Brušenjem se osigurava ravna i glatka površina rubova, smanjujući rizik i od pucanja stakla. [39]

Drugo, brušenje rubova omogućuje bolje prijanjanje brtvila na staklo. Kvalitetno brtvilo poput butila koristi se za zatvaranje između staklenih ploča kako bi se spriječilo prodiranje vlage i plinova. Ako rubovi nisu dobro brušeni, brtvilo možda neće pravilno prijanjati, ostavljajući praznine kroz koje vlaga može proći. To bi moglo izazvati kondenzaciju između stakala, što potencijalno dovodi do oštećenja Low-E premaza. [37]

Treće, brušenje rubova smanjuje mehanički pritisak na premaze. Nepravilno obrađeni rubovi stakla mogu izazvati neravnomjerno raspoređivanje tereta i pritiska na Low-E premaz. To bi moglo dovesti do mikropukotina ili oštećenja premaza koji bi kasnije mogli potaknuti hrđanje. Kvalitetno brušenje rubova osigurava ravnomjerno raspoređivanje opterećenja. Primjer brušenih rubova može se vidjeti na Slika 39. [36]



Slika 39 Prikaz brušenih rubova stakla

## **7.2 Ispitivanja stakla**

Ispitivanje stakla je značajan korak prisutan u različitim industrijama kako bi osigurali da staklo bude visokog standarda u pogledu kvalitete, trajnosti i sigurnosti. Budući da se staklo široko primjenjuje u područjima kao što su građevinarstvo, automobilska industrija, elektronika, medicina i drugi sektori, provođenje ispitivanja igra ključnu ulogu.

Cilj ispitivanja stakla je višestruk. Prvo, provođenjem ovih testiranja identificiraju se potencijalni nedostaci ili nepravilnosti u staklu, kao što su ogrebotine, pukotine ili mjehurići. To omogućava proizvođačima da eliminiraju ili poprave takve nedostatke prije nego što staklo bude ugrađeno u konačni proizvod.

Drugo, ispitivanja stakla omogućavaju stručnjacima da odrede ključna svojstva materijala. To uključuje mjerenje debljine stakla, njegovu otpornost na udarce i temperaturne varijacije te sposobnost stakla da zadrži svoje optičke karakteristike u različitim uvjetima.

Treće, kvalitetna kontrola je važan aspekt ispitivanja stakla. Provjeravanjem stakla putem različitih metoda osigurava se da ono ispunjava industrijske standarde i specifikacije. Ovo je od iznimne važnosti, posebno kada staklo igra ključnu ulogu u osiguravanju sigurnosti, kao što je slučaj s automobilskim vjetrobranima ili staklenim zgradama.

U suštini, ispitivanja stakla osiguravaju da materijal bude pouzdan, izdržljiv i siguran za upotrebu u različitim kontekstima. Ovo omogućava stvaranje proizvoda koji su funkcionalni, estetski privlačni i sposobni izdržati različite zahtjeve svakodnevnih primjene.

### **7.2.1 Heat soak test (HST)**

Heat Soak Test (HST) je testiranje koje se koristi da bi se unaprijed identificirali potencijalni problemi s lomom staklenih ploča. Ideja je da se kritične inkluzije nikal sulfida (NiS) unaprijed detektiraju i uklone. Test uzrokuje ubranu transformaciju strukture stakla, što dovodi do eventualnog lomljenja ploča koje sadrže te inkluzije. Ovo se radi prije nego što se ploče dostave na gradilište kako bi se spriječile neželjene situacije nakon ugradnje. Testiranje toplinske izolacije, s druge strane, odnosi se na provjeru kako potpuno kaljeno staklo reagira na promjene temperature. Potpuno kaljeno staklo je osjetljivo na spontani lom zbog inkluzija nikal sulfida. Da bi se smanjio rizik od loma, provodi se testiranje koje simulira temperaturne promjene. Na taj način se može utvrditi hoće li staklo izdržati takve varijacije ili postoji opasnost od pucanja. Ovaj postupak pomaže osigurati da staklo zadrži svoju strukturalnu integritet nakon instalacije.

Dakle, cilj oba postupka je osigurati da staklene ploče budu stabilne i sigurne za upotrebu, kako bi se izbjegle nepredviđene situacije i oštećenja nakon ugradnje.

Spontani lom kaljenih i toplotno ojačanih stakala pripisan inkluzijama nikal sulfida (NiS) bio je ponavljajući problem tijekom posljednjih 40 godina. Trenutno se primjenjuje destruktivni postupak toplinske obrade nazvan Heat Soak Test (HST), koji podrazumijeva držanje stakla dulje vrijeme (nekoliko sati) na temperaturi od 260-290 °C, kao najučinkovitija metoda za izbjegavanje kasnijeg spontanog pucanja. Ispitivanja toplinske izolacije, utemeljena na empirijskoj osnovi, ne nužno uzimaju u obzir kinetiku spontanih otkazivanja. Kao posljedica toga, Heat Soak Test nije optimalan u pogledu temperature i vremena. Mjerenja brzina transformacije i identifikacija opasnih kompozicija NiS povezanih s termodinamičkim modelom koristili su se za predviđanje pojave spontanih otkazivanja u pećima za ispitivanje toplinske izolacije. [40]

Nagle pukotine poznato su uzrokovane širenjem nikal sulfidnih kamenčića kao rezultat sporog kristalnog prelaza iz  $\alpha$ -NiS (heksagonalna visokotemperaturna forma) u  $\beta$ -NiS (romboedarska forma pri niskim temperaturama, nazvana Millerit). Tijekom kaljenja, nikal sulfidni kamenčići potpuno prelaze u stanje visoke temperature tijekom procesa zagrijavanja, ali nakon toga staklo se previše brzo hladi tijekom kaljenja i toplinskog ojačavanja kako bi omogućilo obrnuti prelazak u fazu niske temperature,  $\beta$ -NiS. Ovaj obrnuti prelazak događa se kasnije tijekom razdoblja koja variraju od nekoliko minuta nakon toplinske obrade do više od 10 godina nakon ugradnje stakla. [40]

Opasne inkluzije skupljaju se nakon pucanja između "krila leptira" u slučajevima kada slomljena stakla ne padaju dolje kao što se može vidjeti na Slika 40. Većinu vremena analiziraju se kao polikristalne sfere NiS-a s promjerima od 0,04 do 0,7 mm, uvijek smještene unutar dijela naprezanja kaljenih stakala. [40]

Iako su većina opasnih inkluzija NiS-a smještene u područjima visokih naprezanja kaljenih stakala, neke su primijećene unutar područja niskih naprezanja. Ovaj rezultat bi mogao objasniti povremene spontane otkaze u polukaljenim staklima. [40]



Kaljeno staklo sklonije je spontanom pucanju nego netretirana stakla jer ono je čvršće i manje sposobno prilagoditi se istim razinama pokreta unutar staklene ploče. Stoga, u slučajevima kada postoje nečistoće u staklu i tijekom atmosferskih promjena temperature, nečistoće će se širiti i skupljati brže od stakla. Kako se staklo zagrijava tijekom postupka kaljenja, ove nečistoće mijenjaju svoje stanje. Visokotemperaturno stanje nečistoća može biti "zamrznuto" kada se staklo brzo hladi, a povratak na niskotemperaturno stanje može potrajati nekoliko godina. Spontano pucanje stakla može uslijediti, jer niskotemperaturno stanje nikal sulfidnih nečistoća zauzima nešto veći volumen i time stvara lokalnu koncentraciju naprezanja. [41]

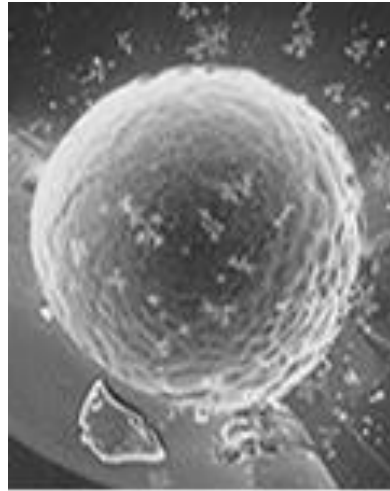
#### 7.2.1.1 Nikal sulfid

Pucanje stakla uzrokovano nikal sulfidom pokazuje karakterističan obrazac loma. Pretpostavljajući da se slomljena staklena ploča zadržava na mjestu, na početku ili epicentru pukotine trebala bi se nalaziti dva fragmenta koji su veći od ostalih i koji tvore sliku 'osmice' ili 'leptira'. U središtu bi se trebala nalaziti inkluzija koja je mala, okrugla, sjajna, žuto-crna čestica koja može biti veličine svega 0,05 mm u promjeru. Ovaj fenomen može se vidjeti na Slika 40.



Slika 40 Primjer puknuća stakla nastalog ekspanzijom NiS [41]

Skenirajući elektronski mikrograf tipične inkluzije NiS-a uočene nakon spontanog pucanja kaljenog stakla (oko 0,2 mm promjera). Primjetan je grub izgled površine, kao što je uvijek vidljivo kod opasnih NiS kamenčića što možemo vidjeti na Slika 41.



Slika 41 Mikroskopska snimka molekule NiS [40]

Kako bi se izbjeglo spontano pucanje treba razmatrati alternativne vrste stakla za sve staklene površine kao što su laminirano staklo, kaljeno-laminirano staklo ili staklo testirano na toplinsku stabilizaciju (HST). HST staklo postaje sve uobičajenije i iako je skuplje od kaljenog stakla, znatno je manje sklono spontanom pucanju.

Proces proizvodnje HST stakla uključuje zagrijavanje kaljenog stakla na otprilike 280 °C, te kad postigne tu temperaturu, zadržava se 2 sata. Ovo zagrijavanje će ubrzati fazni prelazak inkluzija NiS-a te će se tako širiti u volumenu, uzrokujući pucanje ploče. Kao dio rezultata uobičajenog postupka izrade stakla uobičajenog proizvođača, izvijestilo je da se samo 1 kritična inkluzija pojavljuje u svakih 13 tona stakla koje proizvode i da će 90% tih inkluzija uzrokovati prijevremeno pucanje tijekom procesa toplinske stabilizacije. To znači da samo jedna inkluzija nikal sulfida će "proći" za svakih 8.470 m<sup>2</sup> 6 mm toplinski stabiliziranog kaljenog stakla. [41]

## **7.2.2 Ispitivanje klatnom - Ispitna metoda udarom i razredba za ravno staklo - HRN EN 12600:2006**

Norma HRN EN 12600 odnosi se na ispitivanje stakla otpornosti na udarce, konkretno stakla koje se koriste u građevinskim i industrijskim primjenama. Ova norma postavlja smjernice i zahtjeve za ispitivanje i klasifikaciju staklenih proizvoda prema njihovoj otpornosti na udarce. Ispitivanje stakla prema normi HRN EN 12600 uključuje simuliranje situacija gdje staklo može biti izloženo udarcima ili tupim silama, kao što su padajući predmeti ili udarci tijelom. Ovo ispitivanje omogućava procjenu kako će se staklo ponašati u takvim situacijama te da li će se raspasti ili ostati cijelo. Glavni cilj ispitivanja je odrediti klasu otpornosti stakla na temelju rezultata udaraca. Otpornost stakla na udarce klasificira se u različite klase prema načinu pucanja i širenju lomljenih komada. Klase se označavaju brojevima (npr. 1B1, 2B2, 3B3 itd.), gdje veći brojevi označavaju veću otpornost. Ispitivanje se obično provodi pomoću uređaja koji generira kontrolirane udarce na uzorcima stakla. Uzorci se postavljaju u okvir i izlažu se udarcima. Nakon udarca, procjenjuju se parametri kao što su veličina raspršenih fragmenata, širenje pukotine, stupanj deformacije i općenito ponašanje stakla pod udarcem. Ovisno o zahtjevima i namjeni stakla, odabrana klasa otpornosti može se razlikovati. Na primjer, staklo koje se koristi u fasadama visokih zgrada trebalo bi imati veću otpornost na udarce kako bi se osigurala sigurnost prolaznika i stanovnika. Važno je napomenuti da norme poput HRN EN 12600 pomažu osigurati da stakleni proizvodi koji se koriste u građevinarstvu i industriji udovoljavaju minimalnim standardima sigurnosti i kvalitete. Pravilno ispitivanje stakla prema tim normama pomaže smanjiti rizik od ozljeda i nesreća povezanih s lomljenjem stakla.



Slika 42 Oprema za ispitivanje klatnom [38]

Koraci ispitivanja:

- Priprema uzoraka: Za ispitivanje se pripremaju uzorci stakla. Ovi uzorci obično su komadi stakla određenih dimenzija i debljine (Širina=  $876\pm 2$  mm ; visina:  $1938\pm 2$  mm), koji će biti podvrgnuti udarcima. Uzorci se mogu pripremiti iz stvarnih proizvoda ili se mogu proizvesti posebno za ispitivanje.
- Uređaj za ispitivanje: Koristi se uređaj za ispitivanje otpornosti na udarce, koji se naziva i uređaj za pad. Ovaj uređaj obično se sastoji od okvira s nosačem stakla i mehanizmom koji generira kontrolirane udarce.
- Postavljanje uzorka: Uzorak stakla postavlja se u okvir na uređaju za ispitivanje. Uzorak mora biti pravilno fiksiran kako bi se simulirali realni uvjeti i osigurala konzistentnost ispitivanja.
- Kontrolirani udarci: Uređaj generira udarce na staklo pomoću standardiziranog sustava. Udari se primjenjuju na sredini staklenog uzorka, simulirajući situaciju gdje bi staklo moglo biti izloženo središnjem udarcu.

### 7.2.2.1 Postupak ispitivanja udarom

Ispitivanje počinje na najnižoj visini pada kako se to vidi na Tablica 10 i povećava se do visine pada koja odgovara razred za koji je materijal namijenjen. [42]

Treba staviti svaki ispitni komad u stezni okvir tako da su njegovi rubovi obloženi gumom do minimalne dubine od 10 mm. Kada je stegnuta, guma ne smije biti stisnuta za više od 20% svoje debljine. Zatim treba napumpati obje gume udarne glave na tlak od  $(0,35 \pm 0,02)$  MPa. Tlak se mora provjeriti prije svake visine pada. Zatim se podiže udarna glava na najnižu visinu pada i stabilizira. Na visini pada ovjesni kablovi moraju biti zategnuti, a os udarne glave i kabela moraju biti u liniji. [38]

Zatim treba ispustiti udarnu glavu tako da padne uz kretanje njihala i bez početne brzine. Smjer udarca na mora biti okomit na površinu. Ako udarna glava udari više od jednom, test treba poništiti. Utezi ne smiju doći u dodir s ispitnim komadom tijekom udarca.

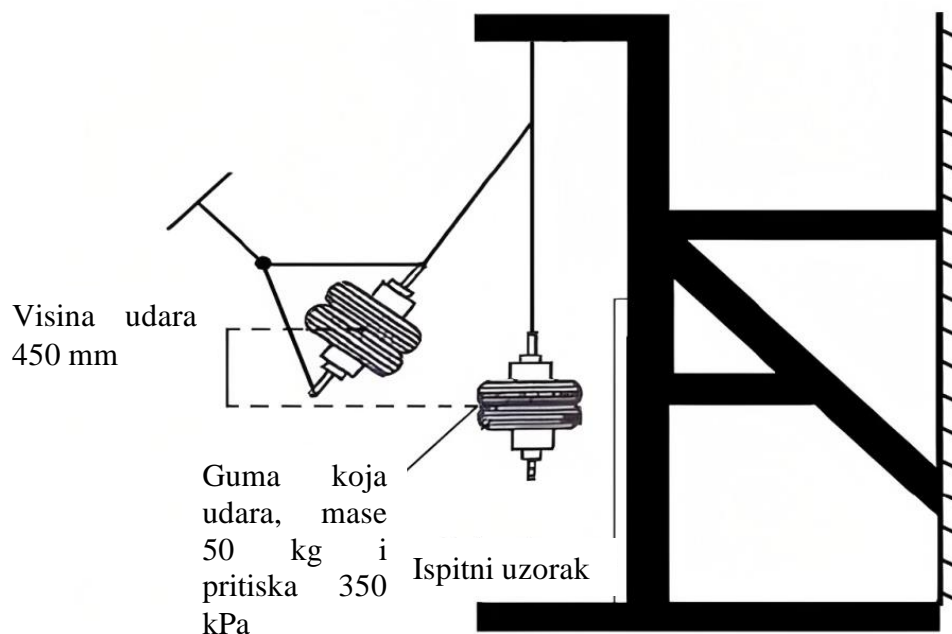
Za asimetrične materijale koji su namijenjeni za ugradnju gdje postoji opasnost od udara s obje strane, treba napraviti test s obje strane. Za asimetrične materijale kod kojih je potrebna klasifikacija samo za jedno lice testirati će se samo označeno lice i to će se prijaviti u izvješću. Ako bilo koji od prvih četiri ispitna komada ne zadovoljava zahtjeve iz točke 4. norme treba prekinuti postupak. Ako se sva četiri druga ispitna komada ne slome ili se pak slome u skladu s kriterijima navedenim u klauzuli 4, a potrebno je ispitati materijal na višu razinu udara, treba povećati visinu pada. Ponovite test na još četiri uzorka istog materijala. Ako je materijal ostao neslomljen, mogu se koristiti isti uzorci.

Tablica 10 Klasifikacija razine udara [43]

Razina utjecaja	
Klasifikacija	Visina ispuštanja [mm]
3	190
2	450
1	1200

- Vizualna procjena: Nakon svakog udarca, provodi se vizualna procjena štete na staklu. Promatra se nastanak pukotina, raspršivanje fragmenata i opće ponašanje stakla pod udarcem.

- Mjerenje parametara: Mjere se različiti parametri kao što su veličina raspršenih fragmenata, širenje pukotine, deformacija uzorka i slično. Ovi parametri pomažu u određivanju klasifikacije otpornosti stakla.
- Klasifikacija otpornosti: Na temelju rezultata ispitivanja, staklo se klasificira prema određenoj klasi otpornosti na udarce. Klase se određuju prema tome kako se staklo raspada i šire li se fragmenti nakon udara.
- Zapisivanje rezultata: Svi rezultati ispitivanja zapisuju se u izvješću. Ovo izvješće dokumentira rezultate udara, parametre koji su mjerljivi i konačnu klasifikaciju otpornosti stakla



Slika 43 Shematizirani prikaz ispitivanja klatnom [42]

### 7.2.3 Hidrolitička otpornost staklenih granula – HRN ISO 719

Norma HRN ISO 719 odnosi se na ispitivanje hidrolitičke otpornosti staklenih granula. Hidrolitička otpornost je sposobnost stakla da izdrži djelovanje vode ili vlažnosti bez značajnog oštećenja ili razgradnje. Ova norma postavlja smjernice i metode za ispitivanje kako bi se utvrdila hidrolitička stabilnost staklenih granula.

Postupak ispitivanja prema HRN ISO 719 uključuje sljedeće korake:

- Priprema uzoraka: Za ispitivanje se pripremaju uzorci staklenih granula. Ovi uzorci mogu biti u obliku sitnih čestica stakla koje se koriste u različite svrhe, kao što su filtracija, izolacija ili primjena u različitim industrijskim sektorima. Uzorci se biraju kako bi se osigurala reprezentativnost i pouzdanost ispitivanja.
- Priprema okruženja: Ispitivanje se provodi u kontroliranom okruženju, obično uz određene uvjete temperature i vlažnosti. Ovi uvjeti ovise o svrsi ispitivanja i stvarnim uvjetima koji bi se mogli pojaviti tijekom upotrebe staklenih granula.
- Stavljanje uzoraka u okruženje: Uzorci se postavljaju u okruženje koje simulira stvarne uvjete vlažnosti ili izloženosti vodi. Mogu se postaviti u spremnike s vodom odnosno potopiti u vodu ili izložiti parnoj atmosferi, ovisno o specifičnim zahtjevima ispitivanja.
- Izlaganje uzoraka: Uzorci staklenih granula izlažu se određenim uvjetima vlažnosti i/ili vodi tijekom određenog vremenskog razdoblja. Ovaj postupak simulira stvarne uvjete upotrebe staklenih granula koji bi mogli izazvati hidrolitičku reakciju.
- Periodično promatranje: Tijekom izlaganja, uzorci se redovito promatraju kako bi se identificirale promjene u njihovim karakteristikama. Promatra se boja, tekstura, površina i drugi vizualni aspekti kako bi se utvrdilo postoje li znakovi oštećenja ili razgradnje.
- Mjerenje gubitka mase: Nakon određenog vremenskog razdoblja izlaganja, uzorci se izvade iz okruženja i pažljivo osuše. Zatim se mjeri gubitak mase uzoraka. Ovaj gubitak mase može ukazivati na razgradnju staklenih granula uslijed djelovanja vode ili vlažnosti.
- Analiza rezultata: Rezultati promatranja i mjerenja gubitka mase analiziraju se kako bi se procijenila hidrolitička otpornost staklenih granula. Uzorci koji pokazuju minimalne promjene ili gubitak mase unutar prihvatljivih granica smatraju se hidrolitički otpornima.
- Izvješće o ispitivanju: Svi rezultati ispitivanja, promatranja, mjerenja i analize zabilježeni su u izvješću. Ovo izvješće pruža sveobuhvatne informacije o hidrolitičkoj otpornosti staklenih granula i njihovoj sposobnosti da zadrže svoje karakteristike tijekom izlaganja vodi ili vlažnosti.

Norma HRN ISO 719 i slične norme pomažu osigurati da stakleni materijali koji dolaze u kontakt s vodom ili vlagom udovoljavaju određenim standardima kvalitete i izdržljivosti.

Dodatno treba objasniti da se određena količina staklenih granula propisane veličine izlaže se vodi 60 minuta na temperature od 98 98°C te se mjeri količina otopljenih alkalijskih u vodi.

Rezultat se izražava kao količina potrebne klorovodične kiseline, preračunata u količinu otopljenog natrijevog oksida. (1 mg HCl (0,01 mol/l) = 310 µg Na<sub>2</sub>O). [19]

Tablica 11 Klasifikacija stakla prema hidrolitičkoj otpornosti prema HRN ISO 719 [44]

<b>KLASA</b>	<b>Potrošnja klorovodične kiseline 0,01 mol/l za g zrna stakla, ml/g</b>	<b>Ekvivalent alkalijskih, izražen kao masa natrijevog oksida Na<sub>2</sub>O za g zrna stakla, µg/g</b>	<b>Otpornost</b>
HGB 1	< 0.10	< 31	Vrlo velika
HGB 2	0.10 - 0.20	31 - 62	Velika
HGB 3	0.20 - 0.85	62 - 264	Srednja
HGB 4	0.85 - 2.0	264 - 620	Mala
HGB 5	2.0 - 3.5	620 - 1085	Vrlo mala



#### 7.2.4 Hidrolitička otpornost staklenih granula – HRN ISO 720

Ispitivanje otpornosti na djelovanje vode prema normi HRN ISO 720 izvodi se tako da određena količina staklenih granula propisane veličine se izlaže vodi 30 minuta na temperaturi od 121 °C te se potom mjeri količina otopljenih alkalija. Kao rezultat se izražava kao količina potrebne klorovodične kiseline ,preračunata u količinu otopljenog natrijevog oksida (1 mg HCl (0,02 mol/l) = 620 µg Na<sub>2</sub>O). [19]

Tablica 12 Klasifikacija stakla prema hidrolitičkoj otpornosti prema HRN ISO 720 [45]

KLASA	Potrošnja klorovodične kiseline 0,02 mol/l za g zrna stakla, ml/g	Ekvivalent alkalija, izražen kao masa natrijevog oksida Na <sub>2</sub> O za g zrna stakla, µg/g
HGA 1	< 0.10	< 62
HGA 2	0.10 - 0.85	62 - 527
HGA 3	0.85 - 1.50	527- 93

#### 7.2.5 Otpornost na solnu kiselinu – HRN ISO 1776

Ispitivanje stakla za određivanje otpornosti na solnu kiselinu pri 100 °C. Ispitivanje se odvija pomoću plamene emisije ili metode plamene apsorpcijske spektrometrije. Provodi se tako da se zagrije pećnica na 115 °C i drugu na 100 ± 1 °C. Uzorci se ostave preko noći u pećnici te se sljedeći dan stavi 25 ml solne kiseline i ostavi da zavrije. Potom se uzorak zalije zavrelom solnom kiselinom i stavi u drugu prethodno zagrijanu pećnicu na 100 ± 1 °C, cijela ta radnja mora se izvesti u roku od 2 minute. Također potrebno je staviti termočlanak kojim se prati temperatura fluida i uzorak mora provesti 3 sata u zavreloj kiselini. [46]

Treba ispitati tri uzorka i tri slijepe otopine kako je navedeno u normi. Peć treba zagrijati na 115 °C, a drugu peć na 100 ± 1 °C. Stavite svaki komad uzorka (pripremljen u skladu s normom.) pomoću hvataljki u zasebnu posudu, labavo treba zatvoriti tri posude poklopcima i staviti ih u vruću pećnicu preko noći. Na isti način zagrijte još tri zdjelice za slijepe probe bez uzoraka i još jednu za kontrolu temperature. Sljedeći dan zagrijavati sedam ispitnih uzoraka od točno 25 ml otopine klorovodične kiseline u čašama do vrenja. Zatim vruću posudu za kontrolu temperature treba prebaciti u dimni ormar i uliti kipuću otopinu klorovodične kiseline. Zatim

treba pokriti i zatvoriti posudu i umetnuti termočlanak te vratiti posudu u drugu pećnicu za sušenje na 100 °C. Ponoviti postupak punjenja s tri druge posude bez uzoraka (za slijepe testove) i na kraju s tri posude koje sadrže uzorke (tojest otopine za ekstrakciju). Poslije treba izračunati razdoblje od 3 sata od vremena kada je prva posuda s uzorkom ponovno stavljena u sušionicu. [46]

Sljedeće je potrebno izračunati sadržaj oksida alkalijskih metala u otopinama za ekstrakciju i otopinama koristeći plameni emisijski ili plameni atomski apsorpcijski spektrometar. Izračunajte srednju vrijednost za tri otopine za ekstrakciju (u mikrogramima po mililitrima) Ako se pojedinačne vrijednosti otopina slijepe probe razlikuju za više od 0,2 µg/ml od njihove srednje vrijednosti ili ako je apsolutni sadržaj Na<sub>2</sub>O veći od 5 µg, došlo je do kontaminacije; Iako se naknadna mjerenja i izračuni mogu provesti, tako dobivene vrijednosti služe samo za informaciju. [46]

Nakon ispitivanja potrebno je izračunati srednju vrijednost dobivenih vrijednosti. Ako se najveća i najniža uočena vrijednost razlikuju više od dopuštenog raspona navedenog u Tablica 13, treba ponoviti ispitivanje.

Tablica 13 Dopušteni raspon dobivenih vrijednosti [46]

Srednja vrijednost dobivenih vrijednosti (µg Na <sub>2</sub> O na 100 cm <sup>2</sup> )	Dopušteni raspon za dobivene vrijednosti
Do i uključujući 30	30% prosjeka
Od 30 do i uključujući 70	20% od prosjeka
Od 70 na više	15% od prosjeka

Od srednje vrijednosti dobivene iz ekstrakcijskih otopina treba oduzeti srednju vrijednost oksida alkalijskih metala, dobivenu iz otopina slijepe probe. Zatim izračunati količinu ekstrahiranih oksida alkalnih metala na 100 cm<sup>2</sup> napadnute površine. Ako je otpuštanje kalijevog oksida niže od 5 µg/100 cm<sup>2</sup>, ono se ne uzima u obzir. Rezultat treba izraziti ili kao masu natrijevog oksida (Na<sub>2</sub>O) ili, ako je potrebno, kao masu odvojenog ekstrahiranog oksida alkalnog metala, na 100 cm<sup>2</sup> napadnute površine. [46]

### 7.2.6 Otpornost na solnu kiselinu - DIN 12116

Ispitivanje otpornosti na solnu kiselinu prema normi DIN 12116 slično je prethodnom no otpornost na djelovanje ispitivanja ispituje se tako da se uzorci izažu solnoj kiselini tijekom 6 sati. Zatim se mjeri izgubljena masa izloženih uzoraka. [19,47]

Tablica 14 Klasifikacija prema ispitivanju otpornosti na solnu kiselinu DIN 12116 [47]

KLASA	Otpornost	Gubitak pola mase nakon 6 sati mg/100 cm <sup>2</sup>
1	Vrlo velika	0,7
2	Velika	0,7 - 1,5
3	Lagani napad	1,5-15
4	Jaki napad	> 15

### 7.2.7 Otpornost na vodenu otopinu smjese lužina – HRN ISO 695

Za ispitivanje otpornosti stakla na vodenu otopinu smjese s lužinom potrebno je uranjanjati dva komada uzorka, od kojih svaki ima ukupnu površinu od 10 cm<sup>2</sup> do 15 cm<sup>2</sup>, u kipuću vodenu otopinu jednakih volumena natrijevog karbonata, c(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) 0,5 mol/l, i natrijevog hidroksida c(NaOH) - 1 mol/l, tijekom 3 sata. Rezultat se izražava kao izračun gubitka mase po jedinici površine stakla. [48]

Uzorak je potrebno potpuno uroniti u jednu smjesu od fluorovodične kiseline (HF) i 9 smjesa klorovodične kiseline. Treba ostaviti uzorke da odstoje na sobnoj temperaturi 10 minuta. Držeći uzorke na mjestu, vrlo pažljivo treba izliti smjesu i potom isperiti uzorake pet puta destiliranom vodom. [48]

Nakon toga potrebno je otvoriti poklopce i kondenzatore s ispitnih posuda. objesiti uzorke vezicama od srebrne žice na kuke na poklopcima ispitnih posuda, namjestiti brtvu na prirubnicu tijela svake ispitne posude i zatim uroniti uzorke u kipuću ispitnu otopinu tako da su svi uzorci potpuno uronjeni. Potrebno osigurati da nema kontakta između uzoraka ili sa stijenkama ispitnih posuda i da su poklopac i tijelo ispitne posude dovoljno čvrsto stegnuti na brtvilu kako bi se spriječio gubitak pare tijekom zagrijavanja. Potrebno je održavati temperaturu od 102,5 °C 0,5 °C u ispitnim posudama 3 sata od trenutka uranjanja uzoraka. Potom izvaditi uzorke iz kipuće otopine i brzo ih uroniti tri puta u 500 ml otopine klorovodične kiseline koja se nalazi u

čaši. Zatim tri puta isprati vodom i na kraju isperite acetonom. Zadnje treba sušiti uzorak u sušioniku na oko 110 °C tijekom 60 minuta, prebaciti u eksikator te ostaviti da se ohladi na sobnu temperaturu. Onda izvagati svaki uzorak s točnošću od 0,1 mg i potom treba zabilježiti masu svakog uzorka i izračunati gubitak mase svakog uzorka. Klasifikacija stakla se određuje prema Tablica 15.

Tablica 15 Klasifikacija prema ispitivanju otpornosti stakla na vodenu otopinu smjese lužina [48]

<b>KLASA</b>	<b>Otpornost</b>	<b>Gubitak mase nakon 3 sata mg/100 cm<sup>2</sup></b>
A1	Slabi napad	<75
A2	Srednji napad	75 - 175
A3	Jaki napad	>175

## **8 PROJEKTIRANI UPORABNI VIJEK**

Projektirani uporabni vijek izolacijskog stakla predstavlja temu od izuzetne važnosti u suvremenom građevinarstvu. Izolacijsko staklo, kao ključna komponenta energetske učinkovitih i udobnih građevinskih konstrukcija, ima potencijal značajno utjecati na trajnost i performanse građevinskih objekata. Ovaj koncept odnosi se na očekivani vremenski period tijekom kojeg će izolacijsko staklo zadržati svoje strukturne, toplinske, akustičke i optičke karakteristike pod utjecajem uvjeta okoline i uporabe.

Razumijevanje faktora koji oblikuju projektirani uporabni vijek izolacijskog stakla zahtijeva sveobuhvatno istraživanje i analizu. Prvi ključni čimbenik je kvaliteta materijala. Odabirom visokokvalitetnog stakla i spojnih materijala, smanjuje se rizik od degradacije i oštećenja tijekom vremena. Pravilna ugradnja također ima ključnu ulogu - nedostatak pravilne zabrtvljenosti ili stabilne podrške može dovesti do curenja zraka ili vlage, narušavajući učinkovitost staklenih površina.

Utjecaj okoline također treba uzeti u obzir. U područjima s ekstremnim vremenskim uvjetima, poput visokih temperaturnih fluktuacija, oborina ili izloženosti solarnom zračenju, staklo može biti podložno većem naprezanju i bržem propadanju. Pravilno održavanje, uključujući čišćenje staklenih površina i provjeru brtvi, može značajno produžiti vijek trajanja stakla.

Tehnološki napredak također igra ulogu. Napredni premazi, tehnike lijepljenja i inovacije poput tekućih kristala ili pametnih materijala mogu povećati trajnost i funkcionalnost izolacijskog stakla.

Važno je shvatiti da projektirani uporabni vijek izolacijskog stakla nije univerzalna konstanta, već dinamičan parametar koji ovisi o nizu interakcija. Pravilno projektiranje, kvalitetna proizvodnja, profesionalna ugradnja i redovito održavanje ključni su čimbenici koji mogu osigurati optimalne performanse izolacijskog stakla tijekom dugog vremenskog perioda.

U konačnici, dublje razumijevanje ovog koncepta pridonosi održivosti građevinskih projekata, smanjenju potrebe za zamjenom staklenih elemenata te smanjenju ekonomske i ekološke potrošnje. Projektirani uporabni vijek izolacijskog stakla stvara most između inicijalnih projektantskih koncepata i stvarnih performansi, čime osigurava da građevine zadovoljavaju svoju funkcionalnost i estetiku tijekom godina.

## **8.1 Zahtjevi za izolacijska stakla**

### **8.1.1 Prodiranje vlage – HRN EN 1279-2**

Norma HRN EN 1279-2 odnosi se na ispitivanje staklenih elemenata izolacijskog stakla u pogledu prodiranja vlage. Ispitivanje prodiranja vlage važno je kako bi se osigurala dugotrajna funkcionalnost izolacijskog stakla u kojem se sastoji od više staklenih ploča međusobno spojenih rubnim distancerima i brtvama.

Ispitivanje se provodi na uzorcima izolacijskog stakla koji su pripremljeni prema specifikacijama norme. Uzorci se često sastoje od dvije ili više staklenih ploča koje su spojene rubnim distancerima, a unutarnji prostor između njih ispunjen je suhim zrakom ili inertnim plinom. Uzorci se postavljaju u odgovarajuće ispitne stanice koje simuliraju stvarne uvjete. Ove stanice često uključuju komore s kontroliranim uvjetima temperature i vlažnosti. Uzorci se izlažu određenim uvjetima, obično povišenoj temperaturi i vlažnosti, kako bi se simulirali stvarni uvjeti koji bi mogli uzrokovati prodiranje vlage u unutarnji prostor izolacijskog stakla. Tijekom izlaganja, promatra se pojava kondenzacije unutar unutarnjeg prostora izolacijskog stakla. Kondenzacija se može pojaviti ako vlaga prođe kroz rubne distancere i/ili brtve. Uzorci se obično izlažu uvjetima ispitivanja tijekom određenog vremenskog razdoblja, što može trajati nekoliko tjedana ili mjeseci. Mjerenje prodiranja vlage: Na kraju ispitivanja, provodi se mjerenje prodiranja vlage kroz rubne distancere i/ili brtve. To se obično radi uz pomoć odgovarajućih uređaja koji mjere količinu vlage koja je prošla kroz uzorak. Posljednje na temelju rezultata mjerenja, ocjenjuje se sposobnost uzorka izolacijskog stakla da zadrži vlagu pod uvjetima ispitivanja. Materijali i konstrukcije koje dopuštaju visoki stupanj prodiranja vlage možda neće udovoljiti standardima kvalitete. [49]

Prosječni indeks prodora vlage i indeks prodora vlage određuju se u skladu s normom HRN EN 1279-2. Prema normi prosječni indeks prodora vlage pet ispitnih uzoraka ne smije biti veći od 0,20 (ili 20 %), dok indeks prodiranja vlage bilo kojeg ispitnog uzorka ne smije biti veći od 0,25 (ili 25 %). [49]

Uzorci izolacijskih staklenih jedinica (IGU- insulating glass unit) izlažu se klimatskom ispitivanju. Određuje se početni i konačni sadržaj vlage sredstva za sušenje vrijednosti za svaku testiranu jedinicu te se računa prosječni indeks prodora vlage za svaku testiranu jedinicu. [49]

#### 8.1.1.1 Broj, opis i izbor ispitnih uzoraka

15 ispitnih uzoraka koji će biti reprezentativni za opis sustava sastojat će se od dvije staklene ploče od 4 mm u skladu s EN 1279-1:2018. Ako staklo debljine 4 mm nije dostupno, koristi se debljina što je moguće bliža 4 mm. Duljina mora biti 5022 mm, a širina  $352 \pm 2$  mm. Širina šupljine mora biti 12 mm, ili ako nije proizvedena, širina šupljine mora biti što bliža 12 mm. Također se mogu testirati uzorci trostrukih stakala no duljina, širina i šupljina moraju ispunjavati gore navedene zahtjeve. [49]

Ovaj postupak ispitivanja pomaže osigurati da izolacijsko staklo zadržava svoje termičke i mehaničke karakteristike tijekom vremena, čime se osigurava kvaliteta i dugotrajnost staklenih elemenata u različitim primjenama.

#### **8.1.2 Propuštanje plina – HRN EN 1279-3**

Za većine izolacijskih staklenih jedinica, izmjerene vrijednosti Li (stopa curenja plina [ $\% a^{-1}$ ]) puno su veće od stvarnih vrijednosti curenja plina nakon 10 godina prirodnog starenja. Stoga se granična vrijednost ne smije koristiti za izračun koncentracije plina tijekom životnog vijeka IGU-a. (Insulating glass unit). [39]

##### 8.1.2.1 Odstupanja koncentracije plina

Prema normi ispitivanja koncentracija plina prije i nakon ispitnog postupka navedenog ne smije biti niža od 5 % apsolutno ispod minimalne vrijednosti koja se koristi za izračun U-vrijednosti koju je naveo proizvođač IGU-a. Za potrebe punjenja plinom, trebaju se koristiti samo inertni plinovi kao što je Argon. Kripton ili Ksenon. Upotreba bilo kojeg drugog plina zahtijeva provođenje testova kemijske kompatibilnosti. [39]

### 8.1.2.2 Metoda ispitivanja

Za mjerenje istjecanja plina uzeti uzorak se stavi u plinonepropusnu posudu i nakon određenog vremena mjeri se količina plina koja je iscurila iz uzorka. Nakon ovog mjerenja analizira se koncentracija plina u uzorku i izračunava se brzina istjecanja plina. Stopa istjecanja plina pri 20 °C mjeri se nakon izlaganja ispitnih uzoraka klimi kako je navedeno u EN 1279-2:2018. Bitno je naglasiti da je vrijeme na konstantnoj temperaturi od 58 °C je 4 tjedna. [39]

Također mora se koristiti uređaj za uzimanje uzoraka plina iz ispitanih IGU uzoraka, čime se osigurava da rezultat ne bude iskrivljen ulaskom zraka. fenomen segregacije ili slično. Uzorci plina moraju biti reprezentativni za cijeli volumen plina

Ispitni uzorci moraju biti reprezentativni za opis sustava i sastojat će se od dvije staklene ploče od 4 mm u skladu s EN 1279-1:2018. Ako staklo debljine 4 mm nije dostupno, koristi se debljina što je moguće bliža 4 mm. Duljina mora biti  $(502 \pm 2)$  mm, a širina  $(352 \pm 2)$  mm. Širina šupljine mora biti nominalna 12 mm, ili ako nije proizvedena, širina šupljine što je moguće bliže 12 mm. Također se mogu testirati uzorci trostrukih stakala. Duljina, širina i širina šupljine trebaju ispunjavati gore navedene opise. Stope gubitka plina u pojedinačnim šupljinama mogu biti različite. Stoga, može se dati samo prosječna vrijednost i treba naglasiti da ne postoje posebni zahtjevi za pojedinačne šupljine. Stakla ispitnog uzorka moraju biti ravna kada je jedinica zabrtvljena. Tijekom brtvljenja, temperatura okoline T mjeri se u °C i bilježi u K, a apsolutni tlak P u hPa mora se mjeriti i bilježiti. Ispitni uzorci moraju biti proizvedeni na takav način da koncentracija plina ne bude niža od 5 % apsolutne deklarirane vrijednosti  $c_i$ , za svaku smjesu koja se koristi. plin kada plin Mora se pripremiti najmanje šest ispitnih uzoraka od kojih se najmanje dva ispituju kako je opisano [39]

### 8.1.2.3 Odnos umjetnog i prirodnog starenja s obzirom na toplinsku i zvučnu izolaciju

Utvrđena je stopa propuštanja plina izolacijskih stakala koja su 10 godina bila ugrađena u prozore zgrada. Izmjerene vrijednosti na terenskim jedinicama bile su manje za faktor 10 u usporedbi s vrijednostima izmjerenim na ispitnim jedinicama iste konstrukcije izmjerene prema DIN 52293 nakon umjetnog starenja. Usporedba DIN umjetnog starenja nije pokazala značajnu razliku s obzirom na stopu istjecanja plina. [39]

DIN 52293 je povučen i zamijenjen EN 1279-3, ali obje metode ispitivanja su gotovo iste. Uz ovo iskustvo, može se pretpostaviti da tip izolacijskog stakla sa stopom ispuštanja plina  $L_i <$



1,0% a<sup>1</sup> nakon umjetnog starenja prema ovoj normi gubi manje od 5% u odnosu na plin tijekom 25 godina ugrađenog u zgradu. Za ovu procjenu, radi sigurnosti, pretpostavljeno je da se u zgradama stopa curenja plina udvostručuje svakih 10 godina. Uz pretpostavku da poboljšanje U-vrijednosti sa 100 % punjenjem argonom iznosi 0,4 W/(m<sup>2</sup>K) također se slično može uzeti u obzir za zvučnu izolaciju. Može se očekivati da izolacijske staklene jedinice koje ispunjavaju zahtjeve ove norme neće pokazati značajne promjene. [39]

### **8.1.3 Svojstva sastavnica rubnih brtvi i umetaka – HRN EN 1279-4**

Ova norma opisuje kako sustav rubnih brtvi mora pružati dovoljnu otpornost na prodor vlage i gubitak plina za punjenje iz IGU šupljine. Osim toga, vanjska ili pojedinačna brtvila moraju biti sposobna izgraditi trajnu adhezivnu i kohezijsku snagu kako bi se zadržao integritet rubnog brtvenog sustava izloženog okolišnim i mehaničkim opterećenjima tijekom ekonomski razumnog radnog vijeka IGU-a. Unutarnja brtvila se također mogu koristiti kao pomoć pri montaži za lijepljenje stakla na razmaknicu. [37]

Važno je znati da ostale komponente IGU rubne brtve mogu utjecati na trajnost rubne brtve. Isporučitelj brtvila mora ispitivanjem dokazati sukladnost s deklariranim karakteristikama proizvodni proces. Sustav rubnih brtvi mora pružati dovoljnu otpornost na prodor vlage i gubitak plina za punjenje iz IGU šupljine. Osim toga, vanjska ili pojedinačna brtvila moraju biti sposobna izgraditi trajnu adhezivnu i kohezijsku snagu kako bi se zadržao integritet rubnog brtvenog sustava izloženog okolišnim i mehaničkim opterećenjima tijekom ekonomski razumnog radnog vijeka IGU-a. [37]

Sljedeće sredstva za sušenje u rasutom stanju odnosno molekulari moraju osigurati dovoljno dostupnog kapaciteta adsorpcije vode kako bi se osiguralo da u IGU-u ne dođe do kondenzacije tijekom razumnog ekonomskog vijeka trajanja. Dobavljač sredstva za sušenje mora jasno pokazati sukladnost s deklariranim svojstvima sadržanim u izvješćima o ispitivanju. Desikanti kemijski identičnog sastava, ali naprimjer različitog fizičkog oblika, mogu se grupirati u obitelji. Zahtijevana izvješća o ispitivanju moraju sadržavati rezultate ispitivanja za karakteristike izvedbe kako je navedeno u normi zajedno s rezultatima ispitivanja fizikalno-kemijske karakterizacije kako je također navedeno u normi. [37]

Unaprijed oblikovani fleksibilni odstojnik koji sadrži sredstvo za sušenje može biti fleksibilni odstojnik koji se nanosi vrućim putem, montažni fleksibilni odstojnik ili matrica sredstva za sušenje. Unaprijed oblikovani fleksibilni odstojnik koji uključuje sredstva za sušenje mora osigurati dovoljan kapacitet adsorpcije vode kako bi se osiguralo da ne dođe do kondenzacije u IGU-u pod zadanom razinom prodiranja vlage preko rubne brtve. U slučaju da u IGU nema krutog odstojnika niti unutarnje brtvene komponente, prethodno oblikovani fleksibilni odstojnik koji sadrži sredstva za sušenje mora ispunjavati relevantne zahtjeve postavljene u ovoj normi za odstojnike i unutarnja brtvila. Dobavljač prethodno oblikovanog fleksibilnog odstojnika koji sadrži sredstva za sušenje mora voditi izvješća o ispitivanju izdano u skladu sa normom. Zahtijevana izvješća o ispitivanju moraju sadržavati rezultate ispitivanja karakteristika odstojnika i/ili molekulara. [37]

#### 8.1.3.1 Zahtjevi za umetke koji sadrže materijale na bazi polimera

Polimeri mogu ispariti hlapljive materijale i moraju se ispitati u skladu s normom. Budući da se umeci obično dodaju postojećim konstrukcijama IGU-a, potrebno je ispitati utjecaj na ponašanje IGU-a. Otpuštena količina vode mora se uzeti u ponovni izračun indeksa prodiranja vlage. Količina vode koju unosi umetak mora se izračunati i dodati dodatnu količinu sredstva za sušenje kao kompenzaciju. Sadržaj vode, sadržaj hlapljivih tvari i ispitivanje zamagljivanja provodi se svaki put kada se promijeni sastav materijala bitnog umetka. [37]

#### 8.1.3.2 Rezultat sadržaja vode

Uložak treba čuvati najmanje 7 dana u standardnim laboratorijskim uvjetima. Ispitni uzorak mora se izvagati s točnošću manjom od 0,5 % njegove težine. Sadržaj vode mora se odrediti korištenjem Karl-Fischerove metode u skladu s normom. Sadržaj vode mora se prikazati u postocima [%] početne težine. [37]

## **9 RECIKLABILNOST STAKLA**

U građevinskoj industriji, staklo se koristi za širok spektar proizvoda, uključujući unutarnje pregrade i izložbene vitrine, ali prije svega koristi se kao arhitektonsko staklo na prozorima i sustavima ostakljivanja svih vrsta zgrada i u svim sektorima. Staklo se također koristi u fotonaponskim panelima koji se primjenjuju na zgradama i infrastrukturnim projektima. Staklo je inertan materijal koji ima potencijal za recikliranje u zatvorenom sustavu bez ograničenja kao i čelik. Uz kratki vijek trajanja izolacijskih staklenih jedinica (dvoslojno i troslojno staklo), čini se da postoji nesrazmjer između potencijala materijala i njegove trenutne upotrebe. U Velikoj Britaniji generira se gotovo 200.000 tona staklenog otpada nakon upotrebe svake godine. Velik dio toga završava na odlagalištima otpada ili se drobi u agregate. Upotreba recikliranog stakla za proizvodnju novih staklenih proizvoda stvara značajne uštede energije i CO<sub>2</sub> te doprinosi stvaranju cirkularne ekonomije. Pregled postojećih linearnih proizvodnih procesa stakla za ostakljivanje i prijedlog cirkularnog pristupa staklenim materijalima na kraju njihovog životnog vijeka putem recikliranja na visokoj razini, vraćajući ih u peć za proizvodnju stakla objasniti će se u nastavku. Također razmatrat će se ograničenja, prepreke i izvedivost takvog pristupa te razvijanje strategija za implementaciju operativnog sustava koji bi proizveo održiv poslovni model za recikliranje staklenih ploča nakon upotrebe u građevinskoj industriji. [50]

Od 200 000 tona staklenog otpada nakon upotrebe generiranog u Velikoj Britaniji, procjenjuje se da većina nije reciklirana natrag u staklo. Većina toga se koristi za proizvodnju agregata niže vrijednosti ili se odlaže na odlagalište otpada. Dio otpada od stakla koristi se za proizvodnju izolacije od staklene vune, agregata i proizvoda od staklenih kuglica. To su materijalni tokovi niske vrijednosti ili necirkularni materijalni tokovi i nije ih moguće ponovno reciklirati, stoga se ne smatraju procesima zatvorenog recikliranja. Osim toga, istraživanje ukazuje da recikliranje natrag u plutajuće staklo štedi sličnu količinu CO<sub>2</sub> kao recikliranje u staklene posude. [50]

Za svaku tonu staklenog otpada koji se koristi u proizvodnji plutajućeg stakla, štedi se 1,2 tone sirovine. To smanjuje potrebe za rudarenjem i kamenolomima, kao i pripadajućom obradom i transportom. Smanjenje potrošnje energije i CO<sub>2</sub> emisija ovih aktivnosti nije uključeno u analizu projekta, ali su značajni. [50]

Budući da se stakleni otpad topi na nižoj temperaturi nego sirovine, za svakih 10% dodanog staklenog otpada u peć, koristi se 3% manje energije. British Glass je opisao ovo kao 300 kWh energije uštedeno za svaku tonu iskorištenog staklenog otpada. Također smanjenje emisija CO<sub>2</sub> od 250-300 kg ostvaruje se za svaku tonu staklenog otpada dodanu u peć. [50]



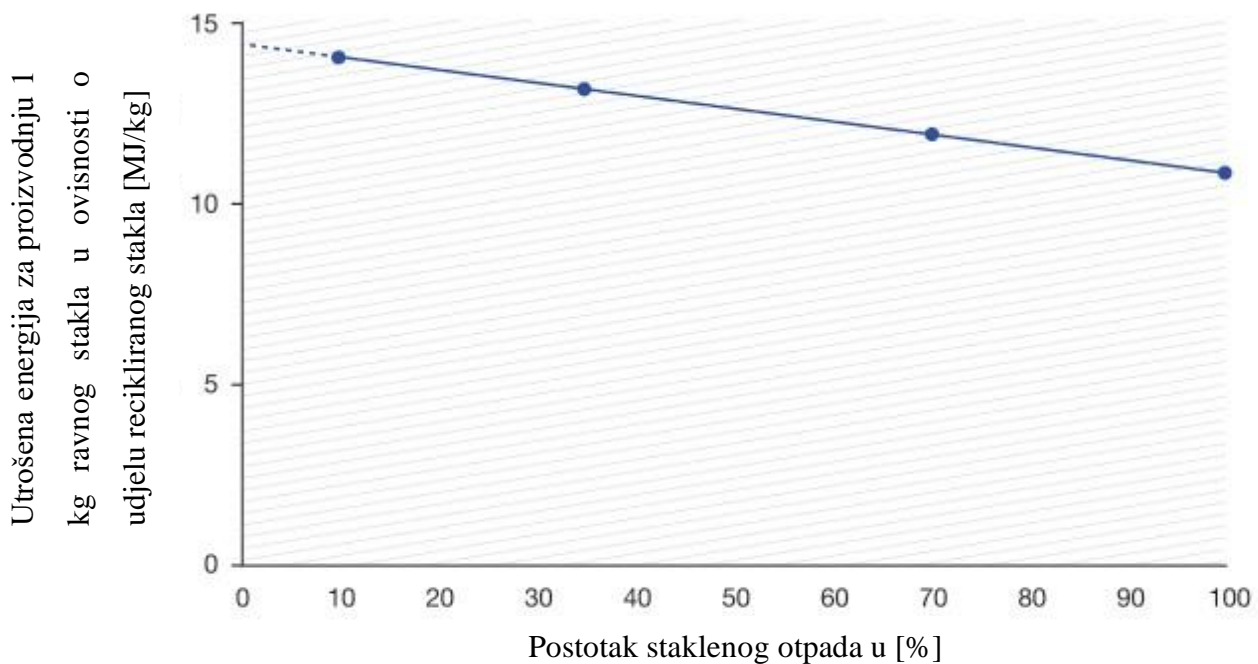
Slika 44 Stakleni otpad [50]

## **9.1 Otpad**

Budući da okviri prozora i staklene jedinice moraju biti pažljivije uklonjeni nego tijekom rušenja, veća je vjerojatnost da će biti odvojeno pohranjeni, što olakšava prikupljanje stakla bez onečišćenja izvora, a to je ključna stvar za recikliranje. Mogućnost recikliranja se povećava zbog izvedivosti recikliranja okvira od PVC materijala te drugih elemenata kao što su aluminijske trake za razdvajanje u staklenim jedinicama. [50]

Ova zamjena obično se provodi putem specijalizirane tvrtke za opskrbu i ugradnju prozora, često izravno imenovane od strane vlasnika zgrade ili kod javnih stanova, lokalnih vlasti. Istraživanje pokazuje da niz tvrtki za prozore u Velikoj britaniji koje aktivno traže poboljšanje svog postupka recikliranja putem vlastitih inicijativa. To je ohrabrujuće i trebalo bi nastaviti promovirati. Ove tvrtke koriste ovaj postupak kao dio svoje društvene korporativne odgovornosti te promoviraju svoje poslovne aktivnosti kao "zeleno" ili "održivo" prema potencijalnim

kupcima. Također važan poticaj za ovaj korak je sve veća svijest potrošača i želja za kupnjom "zelenih" proizvoda te takve aktivnosti mogu privući više posla. Edukacija javnosti kako bi se povećala svijest o tim pitanjima i pristup tim tvrtkama i dalje će promovirati ove mogućnosti. Za javne i socijalne stambene objekte, trebalo bi uspostaviti zakonodavstvo koje zahtijeva da ugovori za zamjenu prozora uključuju recikliranje svih uklonjenih materijala u zatvorenim sustavima recikliranja kako se ne bi previdjele velike mogućnosti i količine potencijalnih ušteda materijala u građevinskom sektoru kao što se to može vidjeti na Slika 45. [50]



Slika 45 Grafikon koji prikazuje utrošenu energiju od 1 kg ravno stakla u odnosu na postotak staklenog otpada korištenog u proizvodnji ravno staklo [50]

Najveća prednost recikliranja je ta što je staklo 100 % reciklično, odnosno može se prerađivati bezbroj puta, a da ne izgubi na kvaliteti. Samim recikliranjem smanjuje se i količina komunalnog otpada. Smanjuju se i emisije ugljičnog dioksida za oko 20 % u fazi taljenja stakla i vode za oko 50 % tokom proizvodnje glavnih sirovina. Recikliranjem stakla štede se i resursi, npr. u Europi se 2009. godine uštedjelo oko 13,8 milijuna tona osnovnih sirovina zbog recikliranja stakla. Kako je već spomenuto iz jedne tone staklenog loma može se zamijeniti oko 1,25 tona osnovnih sirovina. [51]

## **9.2 Primjena u lakim betonima**

Reciklirano staklo ima razne primjene te se tako može koristiti i kao agregat u betonu. Tako jedan od proizvoda reciklaže naziva "Geofil Bubbles" odnosi se na granulat silikatne pjene tojest agregat temeljen na ekspaniranom otpadnom staklenom otpadu, koji je patentiran prije 10 godina i proizvodi se u Republici Mađarskoj u tvrtki "Geofil" Ltd. Dosadašnja praksa recikliranja različitog porijekla otpadnog stakla stakleni spremnici, ravna stakla na građevinama, žarulje, monitori, ekrani, i tako dalje zbog određenih problema prilikom sakupljanja i recikliranja kao naprimjer različit sastav, boja i kvaliteta rezultirala je time da veći dio sakupljenog staklenog otpada zapravo nije mogao biti recikliran u iste staklene proizvode. [52]

Jedna od prednosti agregata "Geofil Bubbles" upravo je ta što se izrađuje od mješovitog komunalnog otpadnog stakla s mogućim navedenim sastavom, koje ne mora biti potpuno čisto i može sadržavati različite materijale organskog ili neorganskog podrijetla kao naprimjer razne tekućine, papirnate ili plastične etikete, zatvarači, i drugo. [52]

Zrna proizvedena u rotacijskim pećima imaju promjer veličine od 2 do 25 mm, odlični su toplinski izolatori i dobro se prijanjaju uz razne anorganske i organske vezivne materijale kao što su cement, gips, bitumen, razne smole i drugi. [52],[53]

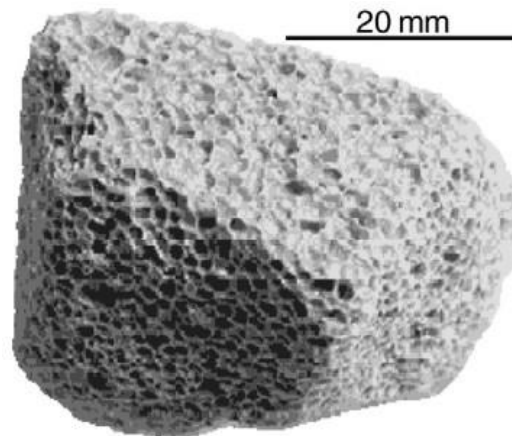


Slika 46 „Geofil Bubbles“ – ekspanirani stakleni agregat za lake betone [52]

No nije sve građevinsko staklo primjereno za proizvodnju ravnog stakla visoke kvalitete. U staklenoj industriji prilikom reciklaže staklo se dijeli u tri kategorije prema kvaliteti. Stakleni krš klase C ne može se ponovno taliti, jer može sadržavati tiskano staklo, ambalažno staklo, kit i olovne perle iz izolacijskog stakla i sl. Takav stakleni krš se uglavnom koristi kao agregat u betonu. Krš klase B je čišći, ali može sadržavati nečistoće, kao što je npr. folija u laminiranom staklu. Ono se najčešće koristiti za ponovnu proizvodnju staklene vune, staklene pjene ili za obojana stakla. Najkvalitetniji stakleni krš je klase A i on se koristiti za proizvodnju novog ravnog stakla, jer se jedino s njime može proizvesti staklo najvišeg standarda. Stakleni otpad koji se pritom koristi je staklo koje se nije upotrijebilo, ono dolazi uglavnom od otpada prilikom rezanja stakla u tvornici. [51,54]

Kao dio EU Life + NOVEDI projekta, implementirana je nova ekološki učinkovita ruta recikliranja kako bi se maksimalno iskoristili resursi i energetska obnova iz otpadnog stakla nakon upotrebe, putem integriranog upravljanja otpadom i industrijske proizvodnje. Procjena životnog ciklusa (LCA) koristila se za identifikaciju inženjerskih rješenja za održivost tijekom razvoja proizvoda zelene gradnje. Novi proces i pripadajuća LCA okvireni su unutar značajnog slučaja industrijske simbioze, gdje se višestruki tokovi otpada koriste u višestrukom industrijskom procesu s višestrukim izlazima. Ulaz je mješavina odbačenog otpadnog stakla iz konvencionalnog recikliranja staklenih posuda i otpadnog posebnog stakla kao što su monitori, žarulje i staklena vlakna. Proizvod zelene gradnje je reciklirana pjena od stakla (RFG) koja se koristi u visoko učinkovitom termički izolirajućem i laganoj betonskoj konstrukciji. Ekološke dobiti su uspoređene s izazvanim utjecajima i predložene su poboljšane mjere. Povratni ko-proizvodi, kao što su stakleni fragmenti ili prah, plastika i metali, donose ekološke dobiti veće od onih povezanih s izbjegavanjem odlagališta, dok su ovi potonji poništeni zbog povećane udaljenosti transporta. U skladu s načelom ekološke učinkovitosti, istaknuto je da bi se recikliranje koje zahtijeva visoku potrošnju energije trebalo ograničiti na otpad koji se ne može reciklirati u zatvorenoj petlji. [54]

Izvrstan primjer inovativnog materijala nastalog recikliranjem je RFG (Recycled foam glass) talijanske tvrtke, koji je umjetni agregat proizveden od otpadnog stakla koje je prikazano na Slika 47.



Slika 47 Prikaz novog proizvoda „Recycled foam glass (RFG)“ [54]

Ova reciklirana pjena od stakla (RFG) namijenjena je za različite primjene u građevinskom sektoru, gdje se energetska ušteda i učinkovitost resursa smatraju ključnim pitanjima. Zahvaljujući kombinaciji niske gustoće, niske toplinske provodljivosti i dobre mehaničke čvrstoće, RFG se može koristiti u laganim betonskim konstrukcijama s dobrim toplinsko-izolacijskim svojstvima. Ovi betonski proizvodi temeljeni na RFG-u, koji se trenutno testiraju u suradnji sa SASIL SpA, Italcementi Group i Politecnico di Torino, očekuje se da će otvoriti put prema novim inženjerskim rješenjima za energetske učinkovite zgrade. Jedna od tih primjena je jednokomponentna vanjština zgrade koja, osim što poboljšava uštedu energije tijekom operativne faze zgrada, trebala bi povećati mogućnost recikliranja same zgrade u cjelini. [54]

Našim tehničkim propisom određeno je da kod uklanjanja staklene konstrukcije treba imati važeći projekt. Nadalje u njemu bih trebao biti jasan opis što učiniti s otpadnim materijalom.

#### *„Uklanjanje staklene konstrukcije*

##### *Članak 76.*

- (1) Uklanjanje staklene konstrukcije izvodi se prema projektu uklanjanja građevine, a uklanjanje ili zamjena pojedinih dijelova staklene konstrukcije kod rekonstrukcije izvodi se prema projektu rekonstrukcije građevine.*
- (2) Projekt uklanjanja mora imati sadržaj propisan posebnim zakonom kojim je uređena gradnja građevina, a na sadržaj projekta uklanjanja primjenjuju se pravila propisana posebnim propisom kojim je uređen obavezan sadržaj i opremanje projekata građevina.“ [36]*



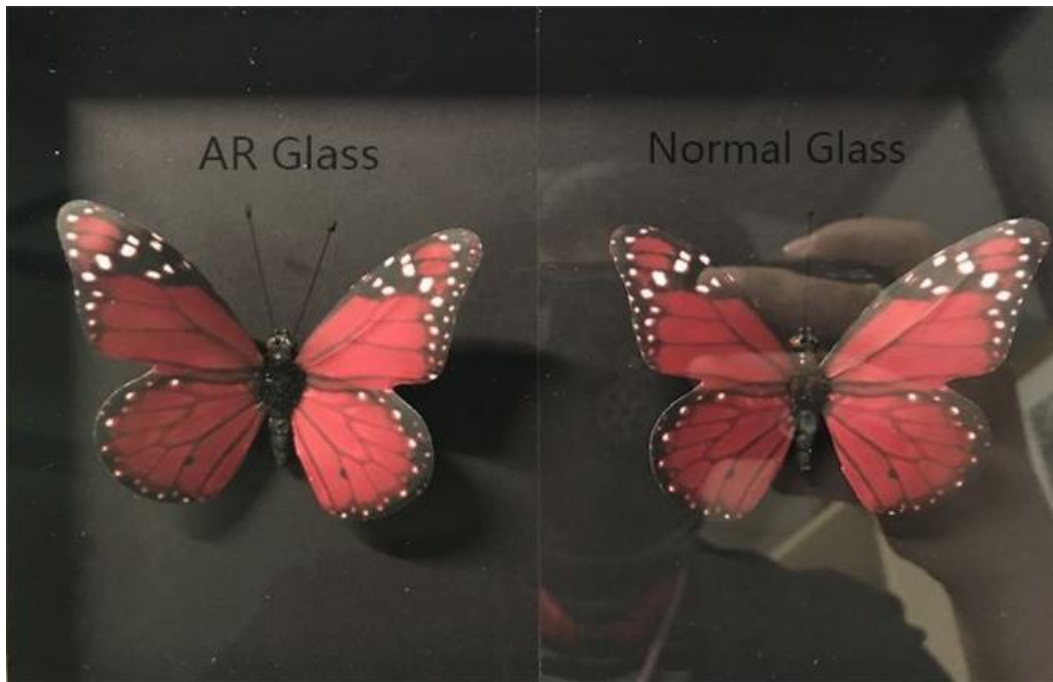
## **10 ISTRAŽIVANJA POBOLJŠANJA SVOJSTAVA I NOVE TEHNOLOGIJE PROIZVODNJE**

### **10.1 Pametna stakla**

Nekoliko tvrtki diljem svijeta razvija dinamičke prozore i velike ravne zaslone. Sveučilišta i laboratorijske skupine istražuju nove materijale i procese kako bi poboljšali ove proizvode. Koncept preklopnog stakla za primjenu u zgradama i vozilima vrlo je privlačan. Konvencionalno staklo nudi samo fiksnu propusnost svjetla i kontrolu prolaska energije kroz njega. S obzirom na širok spektar uvjeta osvjjetljenja i sjaja, dinamičko staklo s prilagodljivom propusnošću nudi najbolje rješenje. Fotonaponski sustavi mogu se integrirati kao izvori napajanja za pametne prozore. Na taj način, preklopni prozor može biti potpuno samostalan pametni sustav. Razvija se nova serija velikih ravnih zaslona, uključujući lagane i fleksibilne zaslone. Ovi se zaslone mogu koristiti za reklamne transparente, dinamične oznake za cijene u trgovinama, elektronički papir i elektroničke knjige, da navedemo samo nekoliko primjena. Istraživanjima se obuhvaćaju odabrane tehnologije preklopnosti, uključujući elektrokromizam, suspendirane čestice i kapsulirane tekuće kristale. [55]

Jedna od tvrtki koja se bavi inovacijama u staklarstvu naziva Flabeg napravila je iskorak u istraživanju i razvila tehnologiju tankog filma za proizvodnju posebnog stakla koje štiti slike i fotografije i istovremeno ih održava vjernima originalu što ga čini učinkovitim doprinosom očuvanju vrijednosti jedinstvenih umjetničkih djela. [56]

Uklanjanje refleksije zahvaljujući antirefleksnom staklu s optičkim smetnjama postiže se smanjenje refleksije svjetla do 0,6% rezidualne refleksije i gotovo 100% UV zaštita zahvaljujući antirefleksnim premazima nanesenim magnetronskim raspršivanjem. Isto tako pruža pouzdanu zaštitu u području zaštite umjetničkih slika: Anti refleksni premaz nanesen metodom magnetronskog raspršivanja blokira do 92% štetnog UV zračenja, ili čak 100% u slučaju laminiranog sigurnosnog stakla. [56]



Slika 48 Antirefektivno staklo [56]

## 10.2 Magnetronsko raspršivanje

Magnetronska sputtering metoda je široko korištena tehnika za nanošenje tankih filmova u području materijalne znanosti i mikroelektronike. Uključuje proces nanošenja tankih filmova na podloge bombardiranjem materijala cilja energičnim ionima u vakuumskoj komori. Tehnika je poznata po sposobnosti proizvodnje visokokvalitetnih tankih filmova s kontroliranom debljinom, sastavom i svojstvima. Evo detaljnijeg objašnjenja metode magnetronske sputtering: Magnetronska sputtering metoda se oslanja na fizički fenomen sputteringa, gdje se atomi iz materijala izbacuju energičnim ionima i zatim deponiraju na podlogu kako bi se stvorio tanak film. Pojam "magnetron" odnosi se na upotrebu magnetskih polja kako bi se poboljšao proces sputteringa. Proces nanošenja odvija se u vakuumskoj komori kako bi se minimizirale neželjene interakcije s molekulama zraka i osigurala kontrolirana okolina. Materijal koji će se nanositi kao tanki film obično je napravljen od željenog materijala za premazivanje i postavljen je na katodu unutar vakuumske komore. Ključna značajka sustava za magnetsku sputtering metodu sastoji se od magneta smještenih iza materijala koji se nabacuje. Magnetsko polje poboljšava proces sputteringa tako da zadržava elektrone i povećava njihovu stopu sudara s atomima plina, što dovodi do učinkovitijeg ioniziranja i sputteringa. Proces započinje tako da se vakuumska komora prvo evakuira kako bi se stvorila niskotlačna okolina. To pomaže spriječiti neželjene kemijske reakcije i kontaminaciju tijekom procesa nanošenja tankog filma. Na katodu

primjenjuje se visoki električni potencijal, stvarajući plazmu ionskog plina u komori. Magnetsko polje iz izvora magnetrona zadržava elektrone blizu materijala cilja, pojačavajući ionizaciju atoma plina. Zatim energični ioni plina sudaraju se s materijalom cilja, izazivajući izbacivanje atoma s površine katode. Ti atomi zatim se deponiraju na površinu podloge, stvarajući tanak film. Tijekom procesa nanošenja, podloga se može zagrijavati ili hladiti kako bi se kontrolirala struktura i svojstva filma. Dok sam proces sputteringa može se kontrolirati prilagodbom parametara kao što su tlak plina, sastav materijala cilja, unos snage i konfiguracija magnetrona. Ovi faktori utječu na debljinu filma, njegov sastav i svojstva. [55]

Magnetronska sputtering metoda koristi se u raznim industrijama, uključujući mikroelektroniku, optiku, dekorativne premaze i energetiku. Koristi se za nanos materijala poput metala, poluvodiča, keramike i dielektrika u svrhu stvaranja vodičkih slojeva, reflektirajućih premaza, antirefleksnih premaza i više. Magnetronska sputtering metoda je svestrana tehnika nanošenja tankih filmova koja nudi preciznu kontrolu nad svojstvima filma i ima širok spektar primjena u suvremenoj tehnologiji i industriji. [55]

### **10.3 Elektrokromna tehnologija**

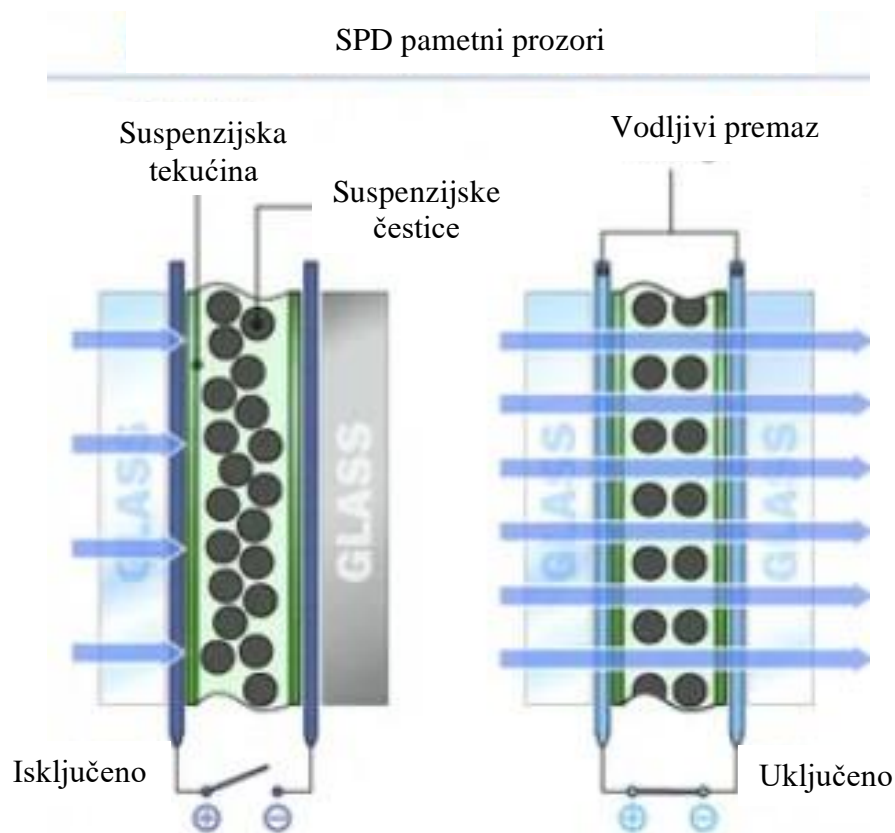
EC tehnologija (elektrokromna tehnologija) je tehnologija koja se koristi za stvaranje elektrokromnih materijala i uređaja. Elektrokromni materijali mogu promijeniti svoju boju ili transparentnost kada se primijeni električni napon.. Glavna značajka elektrokromnih materijala je da njihove optičke karakteristike, kao što su boja i transparentnost, mogu biti aktivno i reverzibilno kontrolirane primjenom električnog napona. Ova tehnologija ima mnoge primjene u različitim područjima, uključujući arhitekturu, automobilsku industriju, elektroniku i energetiku. [55]

Elektrokromni materijali mogu se koristiti za stvaranje preklopnih prozora koji se mogu zatamniti ili posvijetliti kako bi se kontrolirala količina svjetla koja ulazi u prostoriju. Ovo je korisno za poboljšanje energetske učinkovitosti zgrada i prilagodbu osvjetljenja prema potrebama korisnika. [55]

Ovisno o specifičnoj primjeni, elektrokromni materijali mogu koristiti različite mehanizme kako bi postigli promjene u optičkim svojstvima. To uključuje elektrokromizam (promjena boje uzrokovana ionizacijom), elektrokemijske reakcije i promjene u strukturi materijala pod utjecajem električnog polja. EC tehnologija ima potencijal transformirati način na koji upravljamo sa svjetlošću i svjetlosnim efektima u različitim okruženjima, doprinoseći energetskej učinkovitosti, udobnosti i estetici. [55]

#### 10.4 Suspended Particle Devices (SPD) – „Uređaji s lebdećim česticama“

SPD je kratica za Suspended Particle Devices (čestice poput štapića koje su suspendirane u matrici). SPD može blokirati do 99% svjetla, što ga čini idealnim za prilagođeno sjenčanje vanjskih prozora, ali ne i rješenjem za privatnost. Shema rada SPD pstakla je takva da ona zahtjeva kontinuiran dovod struje kako bi ona ostala potpuno prozirna. To uzrokuje konstantnu potrošnju električne energije, a kada se struja isključi suspenzijske čestice spriječe prolaz UV zraka i određeni spekatar boja kao što se to može vidjeti na Slika 49. [57]



Slika 49 Shema rada SPD pametnih prozora [57]



Slika 50 Prikaz SPD uključenog i isključenog stakla [57]

## 10.5 Ostakljenje od tekućih kristala

Za zaslone se najčešće koriste zakrivljeni tekući kristali. Mehanizam optičkog prebacivanja u tekućim kristalima je promijeniti orijentaciju ili zakretanje molekula tekućih kristala raspoređenih između dva provodna elektroda, s primijenjenim električnim poljem. Orijehtacija tekućih kristala također može promijeniti ukupna optička svojstva refleksije prozora ili zaslona. [55]

Jedna prilično neobična verzija sustava tekućih kristala je napraviti emulziju polimera i tekućih kristala kako bi se formirao film. Takve emulzije nazivaju se PDLC i komercijalizirane su za upotrebu u preklopnim staklima. Kapljice tekućih kristala (promjera 5 mm) su kapsulirane unutar matrice indeksom podudarajućeg polimera (debljine 22 mm). Polimerna emulzija je izrađena između dvije folije prozirnih vodiča presvučenih poliesterom ili staklom, koje služe kao elektrode. Efekt prebacivanja ovog uređaja prostire se cijelim solarnim spektrom, do apsorpcijske granice stakla. U isključenom stanju, uređaj izgleda prozirno bijelo i to se može vidjeti na Slika 51. Kada se primijeni električno polje, kapljice tekućih kristala poravnavaju se

s poljem i uređaj postaje proziran. Tipično, ovi uređaji rade između 24 i 100 V izmjenične struje. Potrošnja energije im je manja od 5 W/m<sup>2</sup>, ali zahtijevaju kontinuiranu struju kako bi ostali prozirni. Općenito, u usporedbi s EC-ima, potrošnja energije je veća za tekuće kristale zbog potrebe za kontinuiranom snagom u aktiviranom stanju. [55]

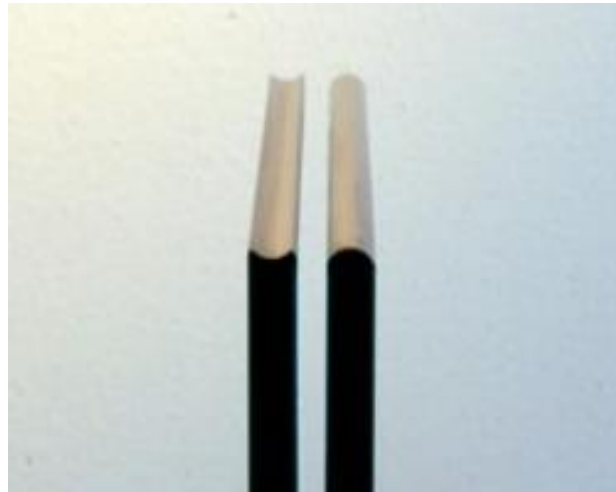


Slika 51 PDLC [58]

Glavna razlika SPD i PDLC je to što PDLC staklo prelazi od prozirnog do mliječno bijelog, a SPD staklo od prozirnog do tamnog. [57,58]

## **10.6 Konveksno i konkavno brušenje**

Osim normalnog brušenja rubova radi poboljšanja trajnosti, staklo se može brusiti kako bi postalo konveksno ili konkavno. Pomoću ovog metoda rezanja, staklo dobiva zaobljeni rub (konveksno) ili udubljeni rub (konkavno) kao što se može vidjeti na Slika 52. Ova operacija često se koristi kod staklenih zidova od tvrdog stakla u kojima različite staklene ploče moraju biti izravno spojene jedna na drugu. Zbog udubljenog i zaobljenog ruba, one klize "jedna u drugu", čime nije potrebno ih brtviti. Time se stvara izuzetno stabilan zid s jedva vidljivim spojevima. [59]



Slika 52 Konveksno i konkavno brušenje rubova [59]

## **10.7 Sitotisak na staklu**

U suvremenoj arhitekturi, sito-tisak na staklu uvijek stvara iznenađujuće efekte. Staklo u kombinaciji s bojom i svjetlom otvara mnoštvo kreativnih mogućnosti za oblikovanje unutarnjih prostora i vanjskih fasada. Sa sito-tiskom dekoracijama kao što su tekstovi, ponavljajući apstraktni oblici i šarene slike, kreativne mogućnosti su naizgled beskrajne. Sito-tisak se općenito koristi za ponavljajuće radove. Primjer sito-tziska može se vidjeti na Slika 53 gdje ima ulogu reklamnog loga tvrtke. [59]

Staklo se tiska keramičkom bojom putem tehnologije sito-tiska. Boja se peče na staklu pri približno 600°C, čime se postiže izuzetna prijanjanja između keramičke boje i stakla. Način rada osigurava da boja ne može biti uklonjena s stakla, čak ni uz otapalo. Također nema promjena boje zbog izloženosti sunčevom svjetlu. Prolaskom boje kroz visoke temperature pečenja, staklo također dobiva mehanička i toplinska svojstva jednostrukog sigurnosnog stakla. Obojene ploče mogu se dalje obraditi u laminirana i/ili izolacijska stakla i većina Ral boja može se koristiti. [59]





Slika 53 Sitotisak na staklu [59]

Primjena digitalnih pisaa najnoviji je razvoj u području unutarnjeg stakla. Tehnologija se neprestano poboljšava tako da je moguće printati veće površine stakla, otisci postaju održiviji, otporniji na UV zračenje, a također se povećava svjetlina i broj piksela s pozitivnim učinkom na kvalitetu slike. Relativno nova novost na tržištu je digitalno tiskanje na PVB foliji za upotrebu u laminiranom staklu što sigurnosna stakla može učiniti vizualno zanimljivijima što se naprimjer vidi kao na Slika 54. [59]

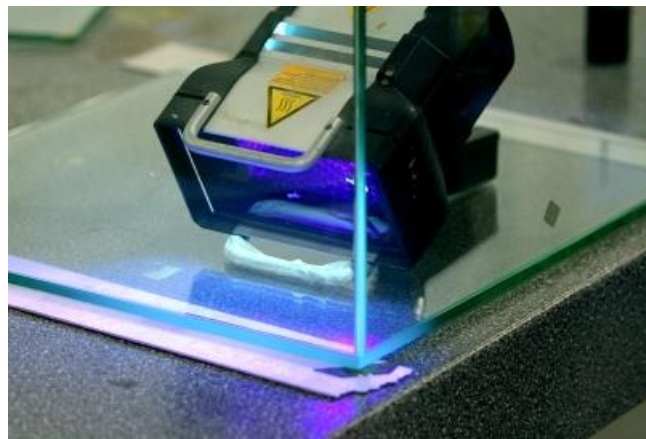


Slika 54 Digitalni tisak [59]



## **10.8 UV-lijepjenje stakla**

Kada se koristi UV-lijepjenje, ostvaruje se veza između stakla i stakla ili stakla i metala. Veza se ostvaruje pomoću fotospojivih ljepila koja se aktiviraju u spektru UV-A zračenja. Korištena frekvencija iznosi oko 380 Nm. Veze koje se ostvaruju znatno su jače od čvrstoće stakla. Primjer uređaja kojim se izvodi lijepjenje vidi se na Slika 55. Ova metoda je izvrsna pri izradi laminiranih stakla jer se pri spajanju na ovaj način dobivaju sigurne i čvrste veze sa ostalim konstruktivnim elementima od metala te konstrukciju čini sigurnijom. [59]



Slika 55 Lijepjenje UV zrakama [59]

## **10.9 Lakoća održavanja čistoće – HRN EN 1096-5**

Samočišćeći premazi za stakla su vrsta nano premaza koji štite staklene površine od nakupljanja kamenca i nečistoća. Oni imaju ultra-hidrofobna svojstva koja odbijaju vodu i prljavštinu, čime se olakšava održavanje i čišćenje stakla. Samočišćeći premazi za stakla se mogu koristiti na različitim staklenim predmetima, kao što su tuš kabine, vjetrobranska stakla, ogledala i prozori te fasadni elementi. [60]

Kemijski sastav nano premaza za stakla ovisi o vrsti premaza, ali uglavnom se temelje na silicijevom dioksidu ( $\text{SiO}_2$ ) ili drugim silikatnim spojevima. Ti spojevi stvaraju nevidljivi zaštitni sloj na staklu koji je vrlo glatak i hidrofoban. To znači da voda i prljavština klize s površine stakla, umjesto da se zadržavaju i stvaraju mrlje. Kemijski sastav nano premaza za stakla utječe na njihovu trajnost, učinkovitost i cijenu. [61]

Titanijev dioksid ( $\text{TiO}_2$ ) je još jedan spoj koji se koristi u nano premazima za stakla. On ima fotokatalitička svojstva, što znači da pod utjecajem svjetlosti razgrađuje organske tvari koje se nalaze na staklu. To omogućava da se staklo samočisti i odbija prljavštinu. Titanijev dioksid se može kombinirati s drugim nano materijalima, kao što je sintetski amorfan silicij, kako bi se poboljšala čvrstoća i otpornost premaza. Titanijev dioksid se također koristi u kozmetičkim proizvodima, bojama i zaštitnim kremama za sunčanje. [61]

Međutim, nano premazi za stakla također mogu imati neke negativne utjecaje na okoliš, kao što su moguća toksičnost za vodene organizme, otpornost na biološku razgradnju i stvaranje otpada. Nano premazi za stakla još uvijek nisu dovoljno istraženi u pogledu njihovog dugoročnog utjecaja na zdravlje ljudi i životinja. Stoga je važno biti oprezan pri korištenju nano premaza za stakla i slijediti upute proizvođača. [61]

Samočišćeća stakla postala su neizostavan dio proizvodnih asortimana u posljednjim godinama. Međutim, postoje različiti pristupi s obzirom na trajnost premaza i načela djelovanja. Općenito treba napomenuti da nije slučaj da samočišćeća stakla nikada ne treba ponovno čistiti, međutim periodi između dva čišćenja se značajno povećavaju ovisno o proizvodu. [60]

Ovisno o primjeni, dostupan je sloj od titanske oksidne folije otporne na UV zračenje koja je trajno utisnuta u jednu od površina tijekom procesa proizvodnje plivajućeg stakla, ovisno o procesu proizvodnje, i koja pruža izvanredna svojstva. UV zračenje dnevnog svjetla koje pada na ovaj sloj razgrađuje svaku vrstu organske prljavštine u kontinuiranom procesu. Osim toga, sloj je hidrofilan, što znači da će kiša padati niz stakleni panel u obliku vodene folije koja ispiru panel i ispiru razgrađenu prljavštinu. Bitan uvjet za ovaj fotokatalitički i hidrofilni efekt da bi funkcionirao je neprekinuta izloženost premazanog stakla prirodnom UV svjetlu i vodi. [60]

To značajno smanjuje napor pri čišćenju kako u stambenim primjenama tako i kod velikih fasadnih staklenih površina, jer staklo većinu čišćenja obavlja samo. Sloj titanskog oksida vrlo je izdržljiv i otporan na utjecaje okoliša. [60]

Nedostatak ovog sloja je da zbog zahtjeva za UV zračenjem može se koristiti samo za vanjske primjene. Osim toga, sloj nije kompatibilan s silikonskim uljima, što neutralizira hidrofilno svojstvo. Posebni zahtjevi za sustave staklenih prozora pa sve do brtvila prozora primjenjuju se stoga. Alternativno, dostupni su hidrofobni, odnosno vodootporni premazi. Ti slojevi temelje

se na kemijskoj nano-tehnologiji i odlikuju se vrlo visokim stupnjevima otpornosti na habanje i visokom otpornošću na konvencionalna sredstva za čišćenje. Zbog izvrsne UV stabilnosti, ovi se slojevi također mogu primjenjivati na vanjskim područjima. Obje vrste premaza generiraju takozvani 'lotus efekt' koji značajno olakšava čišćenje staklenih površina. [60]

Titanijev dioksid postao je materijal izbora za samočišćeće prozore i općenito hidrofilne samopranjajuće površine zbog svojih povoljnih fizičkih i kemijskih svojstava. Ne samo da je titanijev dioksid izuzetno učinkovit u fotokatalitičkom razgradnji prljavštine na sunčevoj svjetlosti i postizanju superhidrofilnog stanja, već je i netoksičan, kemijski inertan u odsutnosti svjetlosti, jeftin, relativno jednostavan za obradu i nanošenje u tankim slojevima, te je etablirana kućna kemikalija koja se koristi kao pigment u kozmetici i boji te kao prehrambeni aditiv. Njegov učinak na staklo vidljiv je na Slika 56. [60]



Slika 56 Samočišćeće staklo [61]

## **11 ZAKLJUČAK**

U ovome radu istraživanje je vršeno u pogledu ključnih aspekata projektiranja trajnosti staklenih fasadnih elemenata i naglašavanjem važnosti održivosti u građevinskoj industriji. Staklo je materijal s izuzetnim potencijalom, ali zahtijeva promišljeno projektiranje i proizvodnju kako bi se osigurala dugotrajnost i ekološka prihvatljivost.

Uočili smo da principi projektiranja trajnosti staklenih fasadnih elemenata uključuju pravilan odabir materijala i debljine stakla, kao i pažljivo planiranje konstrukcije kako bi se minimizirali energetske gubici i osigurala sigurnost. Osim toga, integracija tehnologija kao što su termalna izolacija, reflektirajuće premaze i pametna upravljanja može značajno poboljšati učinkovitost staklenih fasadnih elemenata.

Proces proizvodnje stakla također je ključan za održivost. Korištenje recikliranih materijala i energetske učinkovite tehnologije proizvodnje može smanjiti negativan utjecaj na okoliš. Dodatno, staklo se može reciklirati i ponovno koristiti, čime se smanjuje potreba za novim sirovinama.

Ispitivanja staklenih materijala igraju važnu ulogu u osiguranju kvalitete i sigurnosti. Testiranje na otpornost na udarce, temperaturne promjene i druge čimbenike ključno je za osiguravanje dugotrajnosti staklenih fasada. Bez tih ispitivanja napredak u tehnologiji proizvodnje stakla kontinuirano donosi nove inovacije. Razvoj inteligentnih stakala koja se prilagođavaju okolišnim uvjetima ili imaju funkcionalnosti poput samostalnog zatamnjenja predstavlja budućnost staklenih fasadnih elemenata.

Zaključno, stakleni fasadni elementi predstavljaju važan aspekt suvremenog građevinarstva, ali njihova trajnost i ekološka održivost zahtijevaju integriranje najnovijih tehnologija i održivih pristupa u svim fazama projektiranja, proizvodnje i korištenja. Ovaj rad potvrđuje važnost brige o okolišu i dugotrajnosti u projektiranju te primjeni staklenih fasadnih elemenata za bolju budućnost građevinske industrije.

## **12 LITERATURA**

1. Stanuga G. Staklo na fasadama. Zagreb: Institut građevinarstva Hrvatske; 1993.
2. Kvarcni pijesak [Internet]. [citirano 28. lipnja 2023.]; <https://www.wienerberger.hr/proizvodi/semmelrock/dodatni-elementi/kvarcni-pijesak.html>
3. Vapnenac [Internet]. [citirano 28. lipnja 2023.]; <https://zastita-prirode.hr/clanci/vapnenac-8-stvari-koje-niste-znali/>
4. Soda bikarbona [Internet]. [citirano 28. lipnja 2023.]; <https://prirodna.hr/razlika-sode-bikarbone-i-sode-za-pranje>
5. Kurkjian CR, Prindle WR. Perspectives on the History of Glass Composition.
6. Hajdinjak R. Gradimo staklom. 3. izdanje. Gornja Radgona, Slovenija: REFLEX d.o.o.; 2009.
7. Fourcault process - Wikipedia [Internet]. [citirano 22. srpnja 2023.]; [https://en.wikipedia.org/wiki/Fourcault\\_process](https://en.wikipedia.org/wiki/Fourcault_process)
8. Float glass [Internet]. [citirano 25. lipnja 2023.]; [https://en.wikipedia.org/wiki/Float\\_glass](https://en.wikipedia.org/wiki/Float_glass)
9. Staklo u graditeljstvu [Internet]. [citirano 23. srpnja 2023.]; <https://webgradnja.hr/clanci/staklo-u-graditeljstvu/1140>
10. Plutajuće staklo [Internet]. [citirano 25. lipnja 2023.]; <https://www.gw-news.eu/manufacturing/glass-basics-how-float-glass-process-has-revolutionised-glass-industry>
11. Stanuga G. Staklo na fasadama. Zagreb: Institut građevinarstva Hrvatske; 1993.
12. Požar H, editor. Tehnička enciklopedija. Zagreb: Leksikografski zavod „Miroslav Krleža“; 1963.
13. Hrvatska enciklopedija - Staklo [Internet]. [citirano 2. kolovoza 2023.]; <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=57714>
14. HRN 572 1.
15. HRN EN 14178.
16. Olovno staklo [Internet]. [citirano 3. kolovoza 2023.]; [https://hmn.wiki/hr/Lead\\_glass](https://hmn.wiki/hr/Lead_glass)
17. HRN EN 1748 2 1.
18. HRN EN 15681.
19. Prezentacija iz kolegija TKM.

20. Čalogović M, Marjanac T. Staklo, od Antike do svemirskog doba. Kemija u industriji 2022;
21. Callister WD. Materials science and engineering : an introduction. 7th ed. John Wiley & Sons; 2007.
22. Mauro JC, Yue Y, Ellison AJ, Gupta PK, Allan DC. Viscosity of glass-forming liquids [Internet].: [www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0911705106](http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0911705106)
23. Hasanuzzaman M, Rafferty A, Sajjia M, Olabi AG. Properties of Glass Materials. In: Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier; 2016.
24. Kozłowski M, Malewski A, Akmadzic V, Vrdoljak A. Primjena stakla kao nosivog elementa [Internet]. 2019.: <https://www.researchgate.net/publication/338609163>
25. Korodirano staklo [Internet]. [citirano 7. kolovoza 2023-]; <https://m-kvadrat.ba/sta-uzrokuje-koroziju-stakla-i-kako-se-sprjecava/>
26. Luible A, Haldimann M, Overend M. Structural use of Glass. 2008.
27. Schneider J, Hilcken J. Cyclical fatigue of annealed and of thermally tempered soda-lime-silica glass. In: MATEC Web of Conferences. EDP Sciences; 2018.
28. Ispitivanje stakla [Internet]. [citirano 7. kolovoza 2023.]; <https://www.ispitivanje.com/staklo/>
29. Does glass rust? [Internet].: [www.chemetall.com](http://www.chemetall.com)
30. Korodirano staklo 2. [citirano 7. kolovoza 2023.];: [https://www.researchgate.net/figure/Erosion-of-Glass-insulators-in-coastal-area-1\\_fig2\\_233910452](https://www.researchgate.net/figure/Erosion-of-Glass-insulators-in-coastal-area-1_fig2_233910452)
31. Low-E premaz [Internet]. [citirano 27. srpnja 2023.];: <https://ilsad.hr/proizvodi/stakla/low-e-staklo/>
32. manufacturing methods pyrolytic-on line coating/hard coat.
33. Presjek prozora sa silica gelom [Internet]. [citirano 27. srpnja 2023.]; <https://energa.hr/>
34. Richet P, American Ceramic Society. Encyclopedia of glass science, technology, history, and culture. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons; 2021.
35. Khorasani N. Design Principles For Glass Used Structurally.
36. Tehnički propis za staklene konstrukcije.
37. Svojstva sastavnica rubnih brtvi i umetaka – HRN EN 1279-4.
38. Ispitivanje klatnom [Internet]. [citirano 13. kolovoza 2023.]; <https://www.glassonweb.com/news/rcn-solutions-importance-pendulum-test-safety-glass>

39. Propuštanje plina – HRN EN 1279-3.
40. Vitkala Jorma, Tamglass Engineering. Glass processing days. Tamglass Engineering; 1997.
41. HST failure [Internet]. [citirano 13. kolovoza 2023.]; <https://www.dortechdirect.co.uk/blog/impurities-in-glass-causing-spontaneous-breakages/>
42. Pendulum test [Internet]. [citirano 13. kolovoza 2023.]; <http://fr.bonad-tester.com/universal-safety-test-equipment/en12600-building-glass-pendulum-impact-test.html>
43. HRN\_EN\_12600\_2006.
44. HRN ISO 719.
45. HRN ISO 720.
46. HRN\_ISO\_1776\_2000-Otpornost na solnu kiselinu.
47. DIN 12116 - Otpornost na solnu kiselinu.
48. HRN ISO 695 - Otpornost na vodenu otopinu smjese lužina.
49. Prodiranje vlage – HRN EN 1279-2.
50. Debrincat G, Babic E. Re-thinking the life-cycle of architectural glass.
51. Lučić M, Juraj J. Postupci recikliranja stakla i keramike [Internet]. <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:169234>
52. Kasaš K, Čeh A, Karaman G. Nova vrsta agregata za lake betone na bazi otpadnog stakla. 2009.
53. Petrella A, Petrella M, Boghetich G, Petruzzelli D, Calabrese D, Stefanizzi P, et al. Recycled waste glass as aggregate for lightweight concrete. Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials 2007;160:165–70.
54. Blengini GA, Busto M, Fantoni M, Fino D. Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA. Waste Management 2012;32:1000–8.
55. Lampert CM. Large-area smart glass and integrated photovoltaics. 2003.
56. AR glass [Internet]. [citirano 12. kolovoza 2023.]; <https://jnsglass.com/anti-reflective-or-non-glare/>
57. SPD. [citirano 12. kolovoza 2023.]; <https://home.howstuffworks.com/home-improvement/construction/green/smart-window2.htm>

58. PDLC [Internet]. [citirano 12. kolovoza 2023.];<https://www.smartprivacyglass.net/post/the-difference-between-pdlc-glass-and-spd-glass>
59. New Glass Technology [Internet]. [citirano 9. kolovoza 2023.];<https://www.newglasstech.com/?nav=bewerkingen&lang=en>
60. Samočišćeće staklo [Internet]. [citirano 9. kolovoza 2023.];  
<https://glassolutions.co.uk/en-gb/products/bioclean-self-cleaning-glass>
61. Samočišćeće staklo- Wiki [Internet]. [citirano 9. kolovoza 2023.];  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Self-cleaning\\_glass](https://en.wikipedia.org/wiki/Self-cleaning_glass)



## 13 POPIS SLIKA

Slika 1 Prikaz kvarcnog pijeska [2] .....	1
Slika 2 Prikaz vapnenačkog kamena [3].....	1
Slika 3 Prikaz praška sode bikarbone [4] .....	1
Slika 4 Prikaz staklene narukvice [6].....	2
Slika 5 Rimski prsten [7] .....	2
Slika 6 Starogrčka staklena amfora [8].....	2
Slika 7 Prikaz proizvodnog pogona prema float postupku [6].....	6
Slika 8 Shematski prikaz Fourcaultovog postupka [7].....	8
Slika 9 Prikaz stvarnog proizvodnog procesa float stakla [10].....	9
Slika 10 Kemijska struktura natrij-kalcij-silikatnog stakla [20] .....	18
Slika 11 Shematski prikaz položaj iona u natrij-silikatnom staklu [21].....	18
Slika 12 Prikaz kristalne strukture u 2D [21] .....	19
Slika 13 Prikaz amorfne strukture u 2D [21] .....	20
Slika 14 Prikaz viskoznog strujanja tekućine ili fluida stakla kao odgovor na primijenjenu silu smicanja. [21].....	22
Slika 15 Logaritam viskoznosti u odnosu na temperature za otopljeni silicij i tri stakla na bazi silicija. [21].....	23
Slika 16 Korodirano staklo [25].....	25
Slika 17 Preša za ispitivanje čvrstoće stakla .....	29
Slika 18 Preša za ispitivanje čvrstoće stakla .....	29
Slika 19 Laboratorijsko ispitivanje čvrstoće stakla [28].....	29
Slika 20 Prikaz korodiranog stakla [25] .....	32
Slika 21 Prikaz korodiranog stakla [30] .....	32
Slika 22 Primjer načina provjere na kojem staklu se nalazi low-E premaz .....	35
Slika 23 Izolacijsko staklo s dvostrukim staklenim jedinicama.....	37
Slika 24 Shematski prikaz presjeka dvostrukog izolacijskog stakla [33].....	38
Slika 25 Primjer korodiranog low-E premaza.....	38
Slika 26 Primjer korodiranog low-E premaza.....	38
Slika 27 Primjer korodiranog low-E premaza.....	39
Slika 28 Primjer korodiranog low-E premaza.....	39
Slika 29 103P3-E34-3100-16003.....	44
Slika 30 C03-KFK-O1C-XX-MUP-FC-P1DV01 .....	44

Slika 31 C03-KFK-O1C-XX-DRG-FC-DHA001 .....	44
Slika 32 Prikaz butila nanešenog na aluminijski profil .....	45
Slika 33 Superspacer.....	47
Slika 34 Superspacer.....	47
Slika 35 Superspacer.....	47
Slika 36 Aluminijski profil .....	48
Slika 37 Šuplji dio aluminijskog profila namjenjen za molekular .....	48
Slika 38 Hybridspacer.....	48
Slika 39 Prikaz brušenih rubova stakla.....	51
Slika 40 Primjer puknuća stakla nastalog ekspanzijom NiS [41] .....	54
Slika 41 Mikroskopska snimka molekule NiS [40] .....	55
Slika 42 Oprema za ispitivanje klatnom [38].....	57
Slika 43 Shematizirani prikaz ispitivanja klatnom [42] .....	59
Slika 44 Stakleni otpad [50] .....	73
Slika 45 Grafikon koji prikazuje utrošenu energiju od 1 kg ravno stakla u odnosu na postotak staklenog otpada korištenog u proizvodnji ravno staklo [50] .....	74
Slika 46 „Geofil Bubbles“ – ekspanzirani stakleni agregat za lake betone [52].....	75
Slika 47 Prikaz novog proizvoda „Recycled foam glass (RFG)“ [54] .....	77
Slika 48 Antirefektivno staklo [56] .....	79
Slika 49 Shema rada SPD pametnih prozora [57].....	81
Slika 50 Prikaz SPD uključenog i isključenog stakla [57].....	82
Slika 51 PDLC [58] .....	83
Slika 52 Konveksno i konkavno brušenje rubova [59].....	84
Slika 53 Sitotisak na staklu [59].....	85
Slika 54 Digitalni tisak [59] .....	85
Slika 55 Lijepljenje UV zrakama [59].....	86
Slika 56 Samočišćeće staklo [61].....	88

## **14 POPIS TABLICA**

Tablica 1 Kemijski sastav natrij-kalcij-silikatnog stakla [14]	11
Tablica 2 Kemijski sastav zemnoalkalijskog silikatnog stakla [15]	12
Tablica 3 Kemijski sastav olovnog stakla [17]	12
Tablica 4 Kemijski sastav aluminijski silikatnog stakla [18]	13
Tablica 5 Kemijski sastav borosilikatnog stakla [17]	15
Tablica 6 Kemijski sastav stakla keramike [17]	16
Tablica 7 Usporedba svojstava stakala prema kemijskom sastavu [19]	17
Tablica 8 Prikaz tvrdoća prema Mohsu i Vickersu [1]	27
Tablica 9 Osnovna svojstva natrij-kalcij-silikatnog stakla [24]	28
Tablica 10 Klasifikacija razine udara [43]	58
Tablica 11 Klasifikacija stakla prema hidrolitičkoj otpornosti prema HRN ISO 719 [44]	61
Tablica 12 Klasifikacija stakla prema hidrolitičkoj otpornosti prema HRN ISO 720 [45]	62
Tablica 13 Dopusćeni raspon dobivenih vrijednosti [46]	63
Tablica 14 Klasifikacija prema ispitivanju otpornosti na solnu kiselinu DIN 12116 [47]	64
Tablica 15 Klasifikacija prema ispitivanju otpornosti stakla na vodenu otopinu smjese lužina [48]	65