



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
INŽENJERSTVO ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE



Zorica Miroslavljević

**MODEL UPOTREBE OTPADNE STAKLENE
AMBALAŽE KAO SEKUNDARNE SIROVINE U
PROIZVODNJI BLOKOVA OD GLINE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:
dr Dragana Štrbac, vanredni profesor

Novi Sad, 2018.



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР:			
Идентификациони број, ИБР:			
Тип документације, ТД:	Монографска публикација		
Тип записа, ТЗ:	Текстуални штампани материјал		
Врста рада, ВР:	Докторска дисертација		
Аутор, АУ:	МСц. Зорица Мирсављевић		
Ментор, МН:	др Драгана Штрбац, ванредни професор		
Наслов рада, НР:	Модел употребе отпадне стаклене амбалаже као секундарне сировине у производњи блокова од глине		
Језик публикације, ЈП:	Српски (латиница)		
Језик извода, ЈИ:	Српски/енглески		
Земља публиковања, ЗП:	Република Србија		
Уже географско подручје, УГП:	Војводина		
Година, ГО:	2018. година		
Издавач, ИЗ:	Ауторски репримт		
Место и адреса, МА:	Нови Сад, Трг Доситеја Обрадовића 6		
Физички опис рада, ФО:	Поглавља 6/ Страна 141/ Цитата 90/ Табела 39/ Слика 42		
Научна област, НО:	Инжењерство заштите животне средине и заштите на раду		
Научна дисциплина, НД:	Инжењерство заштите животне средине		
Предметна одредница/Клучне речи, ПО:	Отпадна стаклена амбалажа, стаклени рециклат, блокови од глине, експериментално добијање, управљање стакленим отпадом		
УДК			
Чува се, ЧУ:	У библиотеци Факултета техничких наука у Новом Саду		
Важна напомена, ВН:	Нема		
Извод, ИЗ:	Истраживање у оквиру докторске дисертације обухвата анализу могућности примене рециклаже отпадног амбалажног стакла ради добијања новог производа. Са циљем изналажења потенцијалног решења за постојећи проблем у области управљања отпадном стакленом амбалажом у Србији и начина за побољшање одрживости у области индустријске производње, тестирана је употреба дробљеног отпадног стакла у форми праха, као секундарне сировине у производњи блокова од глине у циглани. У складу са добијеним експерименталним резултатима и закључком да је 30% оптимална масена количина стакленог праха која може да се меша са глином код практичне производње блокова доброг квалитета, развијен је модел, базиран на подацима који се односе на конкретан пример. Резултати модела у оквиру анализе утицаја процеса производње блокова са стакленим рециклатом на животну средину, као и резултати анализе утицаја на цену производње блокова употребом стакленог рециклата, представљају значајан допринос комплетном спроведеном истраживању и усмеравају на даљи ток истраживања у области употребе отпада као ресурса у индустријској производњи.		
Датум прихватanja теме, ДП:	08.09.2016.		
Датум одбране, ДО:			
Чланови комисије, КО:	Председник: Члан: Члан: Члан: Члан, ментор:	Др Дејан Убавин, ванредни професор Др Мирјана Малешев, редовни професор Др Милан Трумић, редовни професор Др Немања Станисављевић, ванредни професор Др Драгана Штрбац, ванредни професор	Потпис ментора



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO:			
Identification number, INO:			
Document type, DT:	Monograph publication		
Type of record, TR:	Textual Printed Material		
Contents code, CC:	PhD Thesis		
Author, AU:	Zorica Miroslavljević, MSc		
Mentor, MN:	Associate Professor Dragana Šrbac, PhD		
Title, TI:	Model of waste glass containers using as secondary raw material in clay blocks production		
Language of text, LT:	Serbian (Latin)		
Language of abstract, LA:	Serbian/English		
Country of publication, CP:	Republic of Serbia		
Locality of publication, LP:	Vojvodina		
Publication year, PY:	2018		
Publisher, PB:	Author's reprint		
Publication place, PP:	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6		
Physical description, PD:	Chapters 6 / Pages 141 / References 90 / Tables 39 / Pictures 42		
Scientific field, SF:	Environmental Engineering and Occupational Safety and Health		
Scientific discipline, SD:	Environmental Engineering		
Subject/Key words, S/KW:	Waste glass container, glass cullet, clay blocks, experimental production, waste glass management		
UC			
Holding data, HD:	The Library of the Faculty of Technical Sciences, Novi Sad		
Note, N:	None		
Abstract, AB:	The research within doctoral dissertation includes a possibility analysis of applying waste glass containers recycling in the production of new product. In order to find a potential solution for the existing problem in the waste glass container management in Serbia and to find a way to improve sustainability in the field of industrial production, the use of waste glass cullet in powder form as a secondary raw material in the clay block production was tested. In accordance with the obtained experimental results and the conclusion that 30 wt. % is the optimal glass cullet amount which can be mixed with clay in the practical production of good quality blocks, a model, based on data related to the concrete example, has been developed. The results of environmental impact assessment of clay/glass blocks production and its costs, represent a significant contribution for complete research and focus on a further research course in the field of waste utilization as a resource in industrial production.		
Accepted by the Scientific Board on, ASB:	08.09.2016.		
Defended on, DE:			
Defended Board, DB:	President:	Associate professor Dejan Ubavin, PhD	
	Member:	Full professor Mirjana Malešev, PhD	
	Member:	Full professor Milan Trumić, PhD	Menthor's sign
	Member:	Associate professor Nemanja Stanislavljević, PhD	
	Member, Mentor:	Associate professor Dragana Šrbac, PhD	

Zahvalnica...

Neizmernu zahvalnost dugujem svom mentoru, vanr. prof. dr Dragani Štrbac, kako zbog ideja za dizajn samog istraživanja, tako i oko pomoći u sagledavanju dobijenih rezulatata u okviru doktorske disertacije. Veliko Vam hvala za sav uložen trud i vreme, smernice, korisne savete, sugestije, strpljenje, razumevanje i bezrezervnu stručnu pomoć, bez koje ova disertacija ne bi bila realizovana. Hvala što tokom naše zajedničke saradnje svih ovih godina verujete u mene i pružate mi podršku!

Kako je veliki deo eksperimentalnog istraživanja realizovan na PMF-u u Novom Sadu, ogromnu zahvalnost dugujem vanr. prof. dr Goranu Štrbcu, bez čije pomoći, u okviru SVAKOG segmenta eksperimentalnog istraživanja, ne bismo dobili naš novi proizvod sa staklenim reciklatom. Hvala Vam Gorane! Takođe se zahvaljujem vanr. prof dr Fedoru Skubanu na snimanju i proračunu dilatometrijskih krivi blokova sa različitim masenim udelom staklenog reciklata.

Veliku zahvalnost dugujem profesorima dr Vlastimiru Radonjaninu i dr Miroslavi Radeki sa Katedre za građevinske materijale, procenu stanja i sanaciju konstrukcija, FTN Novi Sad, koji su me, radi ispitivanja fizičkih svojstava eksperimentalnih blokova, uputili na saradnju sa divnom prof. dr Mirjanom Malešev. Profesorice Malešev, hvala Vam na nesebičnoj podršci i dragocenim savetima i sugestijama od samog početka naše saradnje.

Za realizaciju ispitivanja uticaja proizvodnje blokova sa staklenim reciklatom na životnu sredinu, veliku zahvalnost dugujem prof. dr Igoru Budaku, dr Ferencu Kiš i doc. dr Borisu Agarski. Hvala na stručnoj pomoći i slobodnom pristupu za rad u LCA softveru.

Zahvaljujem se upravi i zaposlenima u ciglanama I.G.M. "Neimar" iz Zrenjanina i "FIT-FS" d.o.o. iz Bečeja na pomoći oko realizacije rezultata prikazanih u doktorskoj disertaciji.

Posebno želim da se zahvalim profesorima sa Departmana za inženjertsvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, koji su me od početka mog rada na FTN-u uvek podržavali. Hvala prof. dr emeritus Mirjani Vojinović Miloradov za svo znanje i dugogodišnje iskustvo koje nesebično deli sa svima, podršci i veri u mene.

Veliko hvala prof. dr Goranu Vujiću za pruženu šansu, na prilici da učim i učestvujem u izradi projekata iz oblasti upravljanja otpadom, vanr. prof. dr Nemanji Stanisavljeviću na pomoći i konstruktivnim savetima u oblasti analize tokova materijala, doc. dr Bojanu Batiniću na korisnim savetima i spremnosti da uvek pomogne i doc. dr Maji Petrović, na nesebičnoj stručnoj pomoći, "tehničkoj" i prijateljskoj podršci!

Ogromnu zahvalnost za podršku kako u naučno-istraživačkom radu tako i u profesionalnom razvoju, dugujem vanr. prof. dr Dejanu Ubavinu. Hvala Vam za ukazano poverenje, što ste me uveli u kolektiv Departmana i oblast upravljanja otpadom, za korisne savete i pomoći u teškim trenucima tokom naučnog rada kada nije sve išlo kako je planirano!

Takođe, zahvaljujem se mojoj dragoj kumi Jovani, Ivani i Milani, mojim odbojkašicama i kolegama Neveni, Bojani, Nikoli, Miodragu, Zoranu, Mladenki i svim ostalim kolegama na razumevanju, savetima, podršci i pomoći tokom prethodnog perioda!

Zahvaljujem se i svim članovima komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije koji su svojim sugestijama dali doprinos konačnoj formi doktorske disertacije.

Na kraju, ali i najvažnije, najveću zahvalnost dugujem članovima moje porodice.

Svojim dragim roditeljima, Floriki i Dušanu, i bratu Dušanu, od srca se zahvaljujem na neprocenjivoj podršci i pomoći svih ovih godina, pruženoj ljubavi i razumevanju, i spokojnom osećaju kada su moja deca sa vama, što mi je i dalo snagu da privедem kraju pisanje disertacije.

Ogromnu zahvalnost za pomoći i omogućenu saradnju sa ciglanama dugujem svom suprugu Nenadu. Beskrajno sam ti zahvalna na strpljenju, razumevanju, podršci i ljubavi, a najviše što si se potudio da naša deca, Nina i Ana, uživaju i ne primete pojačano odsustvo majke poslednjih par meseci tokom trajanja završne faze izrade doktorske disertacije... Voli vas mama...

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1 Predmet, problem i cilj istraživanja	4
1.2 Hipoteze, koncepcija i metodologija istraživanja	5
2. TEORIJSKE OSNOVE ZA RAZVOJ MODELA	8
2.1 Staklena ambalaža kao sekundarni resurs	8
2.1.1 Fizičko – hemijska svojstva, proces proizvodnje i klasifikacija stakla	9
2.1.2 Sektori fabrike za proizvodnju stakla	12
2.1.3 Otpadno staklo	13
2.1.4 Opcije upravljanja staklom kao otpadom	15
2.2 Proizvodnja blokova od gline	23
2.2.1 Podela proizvoda građevinske keramike	24
2.2.2 Sirovine za proizvodnju pečenog bloka	25
2.2.3 Proces proizvodnje pečenih blokova od gline	26
2.2.4 Pregled dosadašnjih istraživanja	30
3. MATERIJAL I METODE ZA RAZVOJ MODELA	34
3.1 Eksperimentalno dobijanje i ispitivanje geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava blokova od gline sa staklenim reciklatom	37
3.1.1 Priprema ulazne sirovine za proizvodnju eksperimentalnih uzoraka pečenih blokova od gline sa staklenim reciklatom	38
3.1.2 Optimizacija procesa dobijanja staklenog reciklata u formi praha	38
3.1.3 Priprema radne mase	40
3.1.4 Oblikovanje eksperimentalnih uzoraka	42
3.1.5 Sušenje eksperimentalnih uzoraka	43
3.1.6 Pečenje eksperimentalnih uzoraka	44
3.1.7 Ispitivanje geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava dobijenih eksperimentalnih uzoraka u skladu sa propisanim standardima	46
3.1.8 Metode ispitivanja fizičko – mehaničkih svojstava eksperimentalnih uzoraka koje nisu definisane propisanim standardom	62

3.2 Primena analize tokova materijala za definisanje i razvoj modela	69
3.2.1 Definisanje sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom u okviru razvoja modela	71
3.2.2 Definisanje prostorne i vremenske granice u okviru razvoja modela	73
3.2.3 Definisanje procesa u okviru modela	74
3.2.3 Ulagani podaci za razvoj modela	77
3.3 Kriterijumi za evaluaciju modela	78
3.3.1 Očuvanje resursa	80
3.3.3 Uticaj primene modela na životnu sredinu kroz LCA analizu	82
3.3.4 Troškovi proizvodnje eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom u skladu sa uslovima definisanim u okviru modela	91
4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA	95
4.1 Rezultati ispitivanja geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava eksperimentalnih blokova.....	96
4.2.1 Rezultati geometrijskih svojstava eksperimentalnih blokova	96
4.2.2 Rezultati fizičko – mehaničkih svojstava eksperimentalnih blokova	98
4.2 Projekcija rezultata sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom primenom definisanog modela	106
4.3 Evaluacija modela na osnovu definisanih kriterijuma	109
4.3.1 Rezultati uštede deponijskog prostora, prirodnog resursa i stopa reciklaže	109
4.3.2 Rezultati ocenjivanja uticaja procesa proizvodnje blokova bez i sa staklenim reciklatom na životnu sredinu	110
4.3.3 Rezultati određivanja ekonomskih kriterijuma	116
5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA 118	
6. LITERATURA	122

Pregled slika

Slika 2.1 Šematski prikaz proizvodnje stakla	9
Slika 2.2 Procentualni udeo generisnog otpadnog stakla u EU – 27 prema Evropskom katalogu otpada.....	14
Slika 2.3 Spektri transmisije za providno, zeleno, braon i crno staklo.....	17
Slika 2.4 Spektri transmisije Coca - cole i piva.....	18
Slika 2.5 Životni ciklus deponovane i reciklirane staklene ambalaže.....	20
Slika 2.6 Stopa reciklaže staklene ambalaže u zemljama EU za 2013. godinu.....	22
Slika 2.7 Pokretna traka sa pripremljenom glinom za ekstrudiranje u ciglani I. G. M. "Neimar"	27
Slika 2.8 Prikaz ekstrudera i vagona sa oblikovanim blokovima od gline u ciglani I. G. M. "Neimar"	27
Slika 2.9 Primer pečenog bloka od gline na kraju proizvodnje u ciglani I. G. M. "Neimar"	29
Slika 2.10 Operacije u okviru dobijanja pečenog bloka od gline	30
Slika 3.1 Metodologija dobijanja i ispitivanja svojstava eksperimentalnih uzoraka blokova od gline sa staklenim reciklatom kao sekundarnim resursom	37
Slika 3.2 Ulazna sirovina za dobijanje staklenog praha – otpadna staklena ambalaža i tegle	38
Slika 3.3 Šema poluindustrijskog mlina i poprečnog preseka mlina sa meljućim telima ...	39
Slika 3.4 Laboratorijska sita sa praškastim uzorcima dobijenih mlevenjem otpadnog ambalažnog stakla i dobijeni stakleni prah nakon prosejavanja.....	40
Slika 3.5 Radna masa (mešavina staklenog reciklata i gline) za proizvodnju eksperimentalnih uzoraka.....	41
Slika 3.6 Ekstrudiranje eksperimentalnih blokova sa različitim masenim udelima staklenog reciklata	42
Slika 3.7 Označavanje oblikovanih eksperimentalnih uzoraka blokova sa staklenim reciklatom	43
Slika 3.8 Sukcesivno sušenje eksperimentalnih blokova	44
Slika 3.9 Režim pečenja eksperimentalnih uzoraka blokova od gline sa staklenim reciklatom	45
Slika 3.10 Prikaz gotovih pečenih eksperimentalnih blokova sa 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30% masenog udela staklenog reciklata	45
Slika 3.11 Proveravanje dimenzija keramičkih materijala	49
Slika 3.12 Merenje upravnosti ivica	53
Slika 3.13 Priprema uzoraka za ispitivanje čvrstoće pri pritisku	56
Slika 3.14 Uredaj za merenje sile loma pri opterećenju na pritisak – hidraulična presa.....	57
Slika 3.15 Postupak ispitivanja upijanja vode postupnim potapanjem uzorka.....	60

Slika 3.16 Šema kontaknog goniometra	62
Slika 3.17 Šema oznaka korišćenih u tabeli 3.9	63
Slika 3.18. Šema termomehaničkog analizatora.....	65
Slika 3.19 Ispitivanje hemijske stabilnosti uzoraka eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom	66
Slika 3.20 Šema uređaja za difrakciju na praškastim uzorcima	67
Slika 3.21 Geometrijska postavka uređaja za difrakciju na praškastim uzorcima	68
Slika 3.22 Prikaz sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom u okviru razvoja modela	72
Slika 3.23 Položaj i oblik glavne deponije u Novom Sadu	76
Slika 3.24 Kriterijumi za evaluaciju modela	79
Slika 3.25 Granice sistema pri LCA analizi modela	88
Slika 4.1 Distribucija mase praškastog uzorka dobijenog mlevenjem otpadnog ambalažnog stakla po veličini čestica praha	95
Slika 4.2 Dilatometrijske krive blokova sa staklenim reciklatom	103
Slika 4.3 Minerološki sastav blokova od gline sa staklenim reciklatom.....	104
Slika 4.4 Difraktogrami eksperimentalnih uzoraka blokova sa različitim masenim udelima staklenog reciklata	105
Slika 4.5 Rezultati sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom u okviru definisong modela	108
Slika 4.6 Poređenje rezultata uticaja proizvodnje blokova na životnu sredinu kroz odabране indikatore (zdravlje stanovništva, kvalitet ekosistema, klimatske promene i resursi)	115
Slika 4.7 Kretanje cene proizvodnje 1 kg bloka sa 30% masenog udela staklenog praha u odnosu na cenu proizvodnje 1 kg bloka bez staklenog praha primenom plaćanja takse za odlaganje otpada	117

Pregled tabela

Tabela 2.1 Osnovni sastav stakala koja se najviše proizvode	11
Tabela 2.2 Maksimalno dozvoljene koncentracije (MDK) zagađujućih supstanci u staklenom reciklatu za proizvodnju staklene ambalaže, ravnih stakala i mineralne vune ..	19
Tabela 2.3 Inventar pojedinačnih procesa uključenih u proizvodnju 1 tone stakla i 1 tone flaša.....	21
Tabela 2.4 Uobičajen sastav sirovine za proizvodnju pečenih šupljih blokova	25
Tabela 3.1 Pregled materijala i metoda korišćenih u okviru izrade doktorske disertacije ..	35
Tabela 3.2 Karakteristike serije sita Tyler sistema.....	39
Tabela 3.3 Prikaz načina označavanja eksperimentalnih uzoraka blokova.....	47
Tabela 3.4 Dimenzije eksperimentalnih uzoraka blokova od gline.....	50
Tabela 3.5 Odstupanje od pravog ugla dužih ivica pri rogljevima eksperimentalnih uzoraka blokova od gline	53
Tabela 3.6 Površina eksperimentalnih uzoraka blokova preko koje se prenosi sila loma... ..	55
Tabela 3.7 Uslovi za marke šupljih opeka i blokova.....	57
Tabela 3.8 Mase suvih uzorka kod određivanja gustine pomoću hidrostatičkih terazija	58
Tabela 3.9 Mase potpuno suvih uzoraka	61
Tabela 3.10 Mosova skala tvrdoće minerala	64
Tabela 3.11 Količine generisanog komunalnog i staklenog otpada u opštinama Regiona .	77
Tabela 3.12 Ulazne količine otpadne staklene ambalaže razmatrane u okviru modela	77
Tabela 3.13 Gustine komunalnog otpada i drobljene staklene ambalaže.....	80
Tabela 3.14 Kategorije mehanizama uticaja na životnu sredinu prikazane IMPACT2002+ metodom	84
Tabela 3.15 Potrošnja ulaznih sirovina i energenata u proizvodnom pogonu ciglane I. G. M. "Neimar"	88
Tabela 3.16 Podaci za LCA analizu o ulaznim sirovinama kod proizvodnje 1 kg pečenog bloka od gline	89
Tabela 3.17 Podaci za LCA analizu o potrošnji energenata kod proizvodnje 1 kg pečenog bloka od gline	90
Tabela 3.18 Prikaz troškova rada, materijalnih i kapitalnih troškova u ciglani I. G. M. "Neimar" u 2015. godini.....	93
Tabela 3.19 Faktori koji utiču na cenu bloka sa i bez staklenog reciklata	93
Tabela 3.20 Troškovi transporta staklenog reciklata.....	94
Tabela 4.1 Odstupanje od nazivne vrednosti prema SRPS B.D1.015 (2003)	96
Tabela 4.2 Rezultati odstupanja od nazivne vrednosti eksperimentalnih blokova.....	96
Tabela 4.3 Uglovi između ravnih kod eksperimentalnih uzoraka blokova sa staklenim reciklatom mereni kontaktnim goniometrom	98
Tabela 4.4 Rezultati merenja čvrstoće eksperimentalnih blokova pri pritisku	99

Tabela 4.5 Rezultati određivanja gustine eksperimentalnih blokova hidrostatickim terazijama.....	100
Tabela 4.6 Rezultati merenja upijanja vode postupnim potapanjem eksperimentalnih blokova	101
Tabela 4.7 Rezultati merenja efekata termičkog širenja na uzorcima blokova sa različitim sadržajem staklenog reciklata.....	104
Tabela 4.8 Poređenje dobijenih rezultata ispitivanja svojstava eksperimentalnih uzoraka sa vrednostima propisanim standardom SRPS B.D1.015	106
Tabela 4.9 Godišnja ušteda deponijskog prostora, gline i porast stope reciklaže staklenog otpada usled primene modela	109
Tabela 4.10 Podaci za LCA analizu o ulaznim sirovinama kod proizvodnje 1 kg pečenog bloka sa 30% masenog udela staklenog reciklata.....	110
Tabela 4.11 Rezultati indikatora na međupoziciji mehanizama životne sredine pri analizi procesa proizvodnje blokova bez staklenog reciklata (EB0), sa staklenim reciklatom (EB30) i EB30 sa uračunatim transportom staklenog reciklata od Novog Sada do Zrenjanina.....	112
Tabela 4.12 Rezultati indikatora na krajnjoj poziciji mehanizama životne sredine pri analizi procesa proizvodnje blokova bez staklenog reciklata (EB0), sa staklenim reciklatom (EB30) i EB30 sa uračunatim transportom staklenog reciklata od Novog Sada do Zrenjanina.....	113
Tabela 4.13 Rezultati normalizovanih vrednosti na krajnjoj poziciji mehanizama životne sredine pri analizi procesa proizvodnje blokova bez staklenog reciklata (EB0), sa staklenim reciklatom (EB30) i EB30 sa uračunatim transportom staklenog reciklata od Novog Sada do Zrenjanina.....	113
Tabela 4.14 Sumaran prikaz i poređenje rezultata ocenjivanja uticaja proizvodnje blokova bez staklenog reciklata (EB0), sa staklenim reciklatom (EB30) i EB30 sa uračunatim transportom staklenog reciklata od Novog Sada do Zrenjanina.....	113
Tabela 4.15 Cena proizvodnje 1 kg bloka bez staklenog praha i 1 kg bloka sa 30% masenog udela staklenog praha	116

Pregled korišćenih skraćenica

UN	Ujedinjene nacije (<i>eng. United Nations</i>)
EU	Evropska unija (<i>eng. European Union</i>)
SEPA	Agencija za zaštitu životne sredine Republike Srbije (<i>eng. Serbian Protection Agency</i>)
EPA	Agencija za zaštitu životne sredine (<i>eng. Environmental Protection Agency</i>)
Region	Grad Novi Sad i opštine Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalg, Srbobran, Temerin i Vrbas
I. G. M.	Industrija građevinskog materijala
SRPS	Srpski standard
SR	Stakleni reciklat
EB	Eksperimentalni uzorci pečenih blokova od gline
MFA	Analiza tokova materijala (<i>eng. Material Flow Analysis</i>)
STAN	(<i>eng. subSTANCE flow ANalysis</i>)
EWC	Evropski katalog otpada (<i>eng. European Waste Catalogue</i>)
SEM	Skenirajući elektronski mikroskop (<i>eng. Scanning Electron Microscope</i>)
Model	Model upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline
ekv	Ekvivalentan uticaj referentne supstance
a	Period od jedne godine (<i>eng. Annually</i>)
NIST	Američki nacionalni institut za standarde i tehnologiju Sjedinjenih američkih država (<i>eng. U.S. National Institute of Standards and Technology</i>)
BEES	(<i>eng. Building for Environmental and Economic Sustainability</i>)
ISO	Međunarodna organizacija za standarde (<i>eng. International Standards Organization</i>)
LCA	Ocenjivanje životnog ciklusa (<i>eng. Life Cycle Assessment</i>)
LCI	Inventar životnog ciklusa (<i>eng. Life Cycle Inventory</i>)
LCIA	Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa (<i>eng. Life Cycle Impact Assessment</i>)
DALY	Oštećenje zdravlja zbog izloženosti osobe zagađenju (<i>eng. Disability Adjusted Life Years</i>)
PDF	Potencijalno ugrožena vrsta (<i>eng. Potentially Disappeared Fraction</i>)
Pt	Predstavlja prosečan uticaj specifične kategorije izazvan od strane stanovnika tokom jedne godine (<i>eng. Point</i>)
MDK	Maksimalno dozvoljena koncentracija
DP	Deponijski prostor

SO	Stakleni otpad
KO	Komunalni otpad
IG	Iskop gline
Q	Kvarc (<i>eng. Quartz</i>)
F	Feldspar (<i>eng. Feldspar</i>)
M	Muskovit (<i>eng. Muscovite</i>)

1. UVOD

Rast populacije i produkcija sve većih količina čvrstog otpada po osobi čini da u svim zemljama sveta dolazi do povećanja u apsolutnoj količini proizvedenog čvrstog otpada. Stalno povećanje ukupne količine čvrstog otpada koje produkuje, kako stanovništvo tako i industrija, i ubrzano iscrpljivanje prirodnih, sirovinskih i energetskih resursa, zahtevaju korenitu promenu tradicionalnog načina proizvodnje i nove načine upravljanja otpadom. Tako bi, u novom, integrisanom industrijskom sistemu, potrošnja energije i sirovina morala da bude optimizovana, a odlaganje otpada na deponiju, koji ima potencijal za reciklažu, svedeno na minimum. Obično se u ovakvim sistemima, u cilju uštede energije i sirovina, i smanjenja količine otpada koji se deponuje, otpad iz jednog proizvodnog procesa koristi kao sirovina u istom, a mnogo češće u drugom proizvodnom procesu. Materijal koji je idealan primer za to je upravo staklo odnosno staklena ambalaža.

Staklo, kao jedna od osnovnih vrsta materijala sa tendencijom prelaska u otpad, deo je svakodnevnog života većine ljudi. Poslednjih godina, poboljšanja u tehnološkom razvoju i životnom standardu doveli su do povećane proizvodnje i potrošnje staklenih flaša i tegli za jednokratnu upotrebu. U 2016. godini količina (izražena u tonama) proizvodnje staklene ambalaže u Evropi povećana je za 2,9% u odnosu na prethodnu godinu, a u odnosu na period od 2012. godine, fabrike za proizvodnju staklene ambalaže su povećale količinu proizvodnje staklene ambalaže za 5,8% (FEVE, 2017), što eksplicitno ukazuje na povećanje količine otpadne staklene ambalaže. Staklena ambalaža spada u vrstu otpada sa relativno kratkim životnim vekom, odnosno sa kratkim upotrebnim periodom, pre odlaganja na deponije. Budući da staklo generalno ima visoku hemijsku i termičku stabilnost, njegova degradacija na deponijama je zanemarljiva, što povratno, stvara veliki problem na deponijama iz razloga što se količina otpadnog stakla povećava, ukoliko se ne preduzimaju prethodno određeni koraci sanacije ove vrste čvrstog otpada (kao na primer, ponovna upotreba, reciklaža staklene ambalaže sa ciljem dobijanja istog ili novog proizvoda i druge). Međutim, visoka stabilnost oksidnih stakala, materijala od kojih se pravi staklena ambalaža, iako sa aspekta uticaja na životnu sredinu predstavlja negativno svojstvo u smislu zanemarljive degradacije stakla, sa aspekta upotrebe materijala se smatra kvalitetnom odlikom, koja donosi značajan aplikativni potencijal materijalima (Šrbac i dr., 2015). Većina staklene ambalaže je pomešana međusobno, u različitim bojama stakla (belo, smeđe, zeleno), pa ju je iz tog razloga teško reciklirati i upotrebiti ponovo za proizvodnju staklene ambalaže. Razlog tome je činjenica da se u zavisnosti od boje stakla temperature topljenja stakla razlikuju, sortiranje stakla prema boji dodatno poskupljuje

proces, a potrebno je imati razvijeni sistem za sakupljanje staklene ambalaže, pa najčešće u zemljama u razvoju, iz ovih razloga, najveći deo staklene ambalaže završi na deponiji.

Ujedinjene nacije (UN) procenjuju da godišnje, količina deponovanog čvrstog otpada u svetu iznosi 200 miliona tona, od čega 7% čini otpadno staklo (Topcu i Canbaz, 2004). Više od 67% staklenih flaša i tegli sakupljalo se u 2009. godini za reciklažu u zemljama Evropske unije (EU), odnosno oko 11 miliona tona ili 25 milijardi flaša i tegli sakupljenih širom Evrope (FEVE, 2009). U 2014. godini prosečna stopa reciklaže stakla u zoni EU28 po prvi put je dostigla prag od 74%, što je za 3,5% više u odnosu na prethodnu godinu. Većina ovako sakupljene ambalaže se vraća u proizvodnju nove ambalaže, dok se 26% staklene ambalaže još uvek “gubi” na deponijama u Evropi. Evropski parlament je odobrio izmene postojećih pravila upravljanja otpadom u okviru Evropske direktive (Evropska direktiva 2008/98/EC) koje se odnose na nove ciljeve za reciklažu, ambalažu i deponovanje radi boljeg praćenja stvarnog napretka prema cirkularnoj ekonomiji. Usvojeni ciljevi za reciklažu komunalnog otpada, odnose se na postizanje 55% reciklaže komunalnog otpada do 2025. godine, 60% do 2030. godine i 65% do 2035. godine. Novi ciljevi za reciklažu svih vrsta ambalaže su: 65% do 2025. godine i 70% do 2030. godine i variraju u odnosu na vrstu materijala ambalaže, pa je tako za staklo propisan procenat od 75% reciklaže staklene ambalaže do 2025. godine i 80% do 2030. godine. Propisano je takođe da u Evropskoj uniji do 2035. godine količina deponovanog komunalnog otpada mora biti smanjena na 10% ili manje od ukupne količine proizvedenog komunalnog otpada u zemljama članicama, što direktno ukazuje na potrebu poboljšanja stope reciklaže svih vrsta otpadne ambalaže (Evropska direktiva 2008/98/EC; Zebek i dr.; 2015; Miroslavljević i dr. 2016; Ivanovski i dr., 2016).

Prema podacima o produkciji komunalnog otpada, u Srbiji se proizvede približno 2500000 tona godišnje komunalnog otpada, od čega stakleni otpad čini približno 5,44% odnosno 130000 tona a od te količine 90000 tona godišnje se odnosi na staklenu ambalažu, koja čini oko 27% udela u ukupnoj količini ambalažnog otpada prozvedenog u Srbiji (SEPA, 2009; Strategija, 2010 – 2019; Vujić i dr., 2010; Miroslavljević i dr., 2013). Količina ambalažnog otpada u Srbiji se ne meri pa se evidencija ne vrši na sistematski način, a pomenuuti podaci su procenjeni na osnovu merenja u nekoliko gradova, odnosno obuhvata 30% stanovništva, što ukazuje da ove količine mogu biti i znatno veće (Strategija, 2010 – 2019). Uredbom o utvrđivanju plana smanjenja ambalažnog otpada (2015 – 2019) u Srbiji, definisani su specifični ciljevi za reciklažu ambalažnog otpada u Srbiji i obuhvataju ambalažu od papira/kartona, plastike, stakla, metala i drveta. Prema Izveštaju o upravljanju ambalažom i ambalažnim otpadom u 2017. godini, Agencije za zaštitu životne sredine (*eng. Serbian Protection Agency – SEPA*), reciklažu otpadne staklene ambalaže potrebno je minimalno vršiti u vrednosti od 31% u 2017. godini, 37% u

2018. godini i 43% u 2019. godini (SEPA, 2017). Prema rezultatima iz Izveštaja o upravljanju ambalažom i ambalažnim otpadom u 2017. godini, stepen reciklaže otpadne staklene ambalaže u 2017. godini iznosi 36,3%, uz napomenu da je publikacija o rezultatima rađena isključivo na osnovu podataka unetih od strane korisnika u informacioni sistem Agencije za zaštitu životne sredine, što može uticati na promenu, odnosno smanjenje dobijenih vrednosti zastupljenosti reciklaže ambalažnog otpada.

Srbija, kao zemlja u razvoju i potencijalni kandidat za zemlju članicu EU, biće u obavezi da svoje zakonodavne okvire uskladi sa zakonodavstvom EU i da ispunjava propisane ciljeve upravljanja otpadom. S obzirom da je trenutni procenat reciklaže staklene ambalaže u Srbiji znatno niži naspram zastupljenih procenata reciklaže u zemljama Evrope i da su navedeni specifični ciljevi za reciklažu staklene ambalaže u Evropi za naredni period od dvanaest godina znatno viši nego propisani specifični ciljevi u Srbiji, potrebno je istražiti i primeniti nove načine ponovnog iskorišćenja/reciklaže staklenog ambalažnog otpada, koji bi doprineli znatnom povećanju stope reciklaže stakla u Srbiji, u narednom periodu. U Srbiji, uzrok niske stope reciklaže staklene ambalaže jesu pre svega, niska otkupna cena stakla, visoka cena sakupljanja i transporta otpadne staklene ambalaže i vrlo visoki troškovi sortiranja stakla prema boji, koje je neophodno, da bi se ono iskoristilo kao sekundarna sirovina u proizvodnji nove staklene ambalaže (*eng. Closed Loop Recycling*), što sa aspekta zaštite životne sredine predstavlja najbolju moguću opciju upravljanja staklenom ambalažom (Miroslavljević i dr., 2013). Zbog navedenih razloga, potrebno je istražiti i primeniti nove načine reciklaže otpadne staklene ambalaže, koji bi doprineli znatnom povećanju stope reciklaže stakla u Srbiji.

Jedan od načina rešavanja problema reciklaže otpadnog mešanog ambalažnog stakla jeste da se staklena ambalaža kao sekundarna sirovina iskoristi za dobijanje novog proizvoda – bloka od gline sa određenim udelom drobljenog reciklažnog stakla (*eng. Glass Cullet*) (Miroslavljević i dr., 2014). Kontinualno korišćenje neobnovljivih resursa, povećanje troškova energije i upravljanje otpadom, doveli su do sve veće potrebe za optimizacijom procesa proizvodnje građevinskog materijala, odnosno blokova, koja je od suštinskog značaja za održivost ciglarske industrije. Ovakvim načinom reciklaže otpadne staklene ambalaže smanjuje se količina otpada koji se šalje na deponije i ublažava aktuelni problem ograničenosti prostora za deponovanje, smanjuje se potrošnja prirodnog resursa i energetska potrebnih za proces dobijanja blokova, ali se takođe mogu poboljšati i snaga i izdržljivost blokova. Zbog sadržaja natrijum oksida (Na_2O) i nekristalne strukture, staklena ambalaža pokazala se kao dobar aditiv za proizvodnju blokova od gline, smanjujući potrebne temperature za sinterovanje blokova od gline. Pored toga, dodatno prisustvo staklene faze u blokovima od gline doprinelo je i poboljšanju strukture samih blokova u smislu njihove trajnosti (Brown i Mackenzi, 1982; Youssef i dr., 1998; Leshina i Pavnev,

2002; Chidiac i Federico, 2007; Lin, 2007; Demir, 2009; Loryuenyong i dr., 2009; Phonphuak i dr., 2015).

1.1 Predmet, problem i cilj istraživanja

U cilju iznalaženja novih mogućnosti za reciklažu otpadnog ambalažnog stakla u svrsi dobijanja novog proizvoda, u okviru doktorske disertacije je ispitana mogućnost upotrebe drobljenog otpadnog stakla, kao sekundarne sirovine, za proizvodnju bloka u ciglani, sa tendencijom davanja predloga jednog od potencijalnih rešenja za postojeće probleme u oblasti upravljanja staklenom ambalažom kao čvrstim otpadom. Predmet istraživanja u okviru doktorske disertacije obuhvata četiri osnovna segmenta:

1. Prvi segment istraživanja u okviru doktorske disertacije obuhvatio je eksperimentalno ispitivanje mogućnosti dobijanja uzoraka blokova od gline sa različitim masenim udelima staklenog reciklata;
2. Drugi segment istraživanja obuhvatio je ispitivanje geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava dobijenih uzoraka i njihovu usaglašenost sa postojećim standardima u Srbiji;
3. Treći segment istraživanja obuhvatio je razvoj modela upotrebe otpadne staklene ambalaže koja se produkuje na teritoriji Regionala (koga čine: Grad Novi Sad i opštine Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas) u proizvodnji blokova od gline u skladu sa podacima i zastupljenim režimima proizvodnje u okviru ciglane I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu;
4. Četvrti segment istraživanja obuhvatio je analizu uticaja modela na životnu sredinu kao i ekonomsku analizu proizvodnje eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom u skladu sa definisanim uslovima proizvodnje u okviru modela.

U okviru doktorske disertacije definisana su dva osnovna cilja istraživanja:

Prvi cilj je eksperimentalno dobijanje blokova od gline sa različitim masenim udelom staklenog reciklata (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%). Realizaciju prvog cilja u okviru istraživanja, čine sledeće faze: pravljenje staklenog reciklata poluindustrijskim mlinovima, za dobijanje sitnozrnaste sekundarne sirovine, koja je dalje mešana sa glinom iz ciglane; izrada eksperimentalnih blokova (presovanje, sušenje i pečenje); testiranje dobijenih eksperimentalnih uzoraka sa ciljem određivanja svojstava značajnih kako za praktičnu upotrebu, kao što su mehanička čvrstoća, zapreminska masa, upijanje vode, hemijska stabilnost, tako i za finalnu validaciju planiranog rezultata istraživanja u okviru doktorske disertacije.

Drugi cilj je procena uticaja na životnu sredinu i analiza ekonomskog faktora prilikom primene predloženog modela upotrebe otpadne staklene ambalaže, na primeru Regionala i deponije u Novom Sadu i ciglane I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu. U domenu realizacije drugog cilja, utvrđene su raspoložive količine otpadne staklene ambalaže na godišnjem nivou, koje bi umesto odlaganja na deponiju u Novom Sadu mogle biti iskorišćene kao jedna od sirovina za dobijanje keramičkih proizvoda – blokova od gline.

Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata, izvršena je ocena najpogodnijeg masenog procentualnog udela staklenog praha u uzorcima blokova od gline. U skladu sa tom ocenom, procenjene su godišnje količine blokova koji se mogu dobiti korišćenjem staklenog reciklata dobijenog drobljenjem godišnje raspoložive količine otpadne staklene ambalaže produkovane na teritoriji Regionala.

Sveobuhvatni cilj doktorske disertacije jeste predlog tehnologije dobijanja novog bloka, kao osnove za realnu proizvodnju blokova od gline sa staklenim reciklatom (SR), i predlog modela upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarne sirovine u proizvodnji blokova od gline (model), u cilju smanjenja količine otpada koji bi se odlagao na deponiju u Novom Sadu.

1.2 Hipoteze, koncepcija i metodologija istraživanja

U skladu sa postavljenim ciljevima istraživanja, definisane su sledeće hipoteze u okviru izrade doktorske disertacije:

1. Otpadna staklena ambalaža izdvojena na postrojenju za separaciju na deponiji može da se koristi u proizvodnji blokova od gline kao sekundarna sirovina;
2. Moguće je eksperimentalnim ispitivanjem utvrditi pogodan maseni udeo staklenog reciklata u proizvodnji blokova od gline;
3. Upotrebom staklenog reciklata, kao sekundarne sirovine u proizvodnji blokova od gline, poboljšava se njihova čvrstoća i izdržljivost;
4. Primenom režima proizvodnje blokova od gline u praksi moguće je dobiti novi proizvod – blok od gline sa određenim udelom staklenog reciklata;
5. Upotrebom otpadne staklene ambalaže kao sekundarne sirovine u proizvodnji blokova od gline utiče se na povećanje procenta reciklaže stakla i smanjuje se potrošnja prirodnih resursa.

Koncepcija istraživanja u okviru doktorske disertacije i za potrebe razvoja modela upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline, obuhvatila je sledeće faze:

Prva faza – Prikupljanje i analiza adekvatne literature. U okviru početne faze istraživanja, naglasak je bio na prikupljanju i analizi literaturnih podataka iz oblasti istraživanja i utvrđivanje podataka neophodnih za kompletno sprovođenje eksperimenta dobijanja blokova od gline sa određenim udelom staklenog reciklata i prikupljanje podataka o količinama i načinu tretmana otpadne staklene ambalaže u Srbiji i Regionu.

Druga faza – Optimizacija procesa dobijanja staklenog reciklata u formi praha i ispitivanje granulometrijskog sastava staklenog reciklata u formi praha. U cilju dobijanja informacija o granulometrijskom sastavu staklenog reciklata u formi praha, dobijenog od otpadnog ambalažnog stakla urađeno je sledeće:

- Sakupljanje reprezentativnih uzoraka otpadnog ambalažnog stakla;
- Pripremanje uzoraka i tela za mlevenje (pranje, odmeravanje mase, grubo usitnjavanje);
- Mlevenje uzoraka u poluindustrijskom mlinu;
- Analiza granulometrijskog sastava na mehaničkom uređaju za prosejavanje;
- Statistička i grafička obrada dobijenih rezultata;
- Određivanje optimalnog vremena mlevenja i odnosa mase stakla i mase meljućih tela, radi dobijanja frakcija pogodne veličine za proizvodnju bloka.

Treća faza – Dobijanje eksperimentalnih uzoraka blokova sa različitim masenim udelom staklenog raciklata u sastavu (sa 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30% masenog dela staklenog reciklata). Stakleni reciklat je mešan sa glinom do dobijanja homogene smeše odnosno sirovine, nakon čega je sprovedeno:

- Ekstrudiranje uzoraka;
- Sušenje uzoraka;
- Pečenje uzoraka.

Četvrta faza – Ispitivanje svojstava blokova od gline sa staklenim reciklatom. Da bi blokovi od gline mogli da se puste na tržište, moraju se ispitati svojstva blokova u skladu sa vladajućim standardima u Srbiji: SRPS B.D1.015 i SRPS B.D8.011. U cilju provere kvaliteta dobijenih uzoraka i provere da li su zadovoljeni uslovi definisani pomenutim standardima, ispitana su geometrijska i fizičko – mehanička svojstva uzoraka.

Peta faza – Analiza toka staklene ambalaže u okviru sistema za upravljanje otpadom za Region. Koristeći računarski alat STAN, definisan je i prikazan model upotrebe utvrđene količine otpadne staklene ambalaže koja bi se deponovala na deponiju u Novom Sadu i potencijalne količine dobijenog staklenog reciklata u formi praha koji bi se koristio kao sekundarna sirovina za proizvodnju blokova od gline.

Šesta faza – Ispitivanje uticaja proizvodnje bloka od gline bez i sa masenim udelom staklenog reciklata na životnu sredinu. Za komparaciju uticaja na životnu sredinu proizvodnje bloka od gline bez i sa masenim udelom staklenog reciklata korišćen je postojeći LCA računarski softver SimaPro 8.0.3.14 (eng. Life Cycle Assessment – LCA).

Sedma faza – Proračun cene za proizvodnju 1 kilograma pečenog bloka od gline bez staklenog reciklata i za proizvodnju 1 kilograma pečenog bloka od gline sa određenim masenim udelom staklenog reciklata. Uzimajući u obzir troškove za dobijanje staklenog reciklata, za sirovu glinu, električnu energiju, prirodni gas i petrol koks, kao i materijalne troškove, kapitalne troškove, troškove rada i troškove transporta staklenog praha od Novog Sada do Zrenjanina, urađen je proračun cene za proizvodnju pečenog bloka od gline bez i sa masenim udelom staklenog reciklata.

Osma faza – Evaluacija modela na osnovu dobijenih rezultata istraživanja. U skladu sa dobijenim rezultatima u okviru eksperimentalnog dela istraživanja i u okviru analize uticaja na životnu sredinu i ekonomske analize, izvršena je evaluacija predloženog modela.

Deveta faza – Zaključna razmatranja sa daljim pravcima istraživanja. Na osnovu dobijenih rezultata i njihove komparacije, donešeni su zaključci i predloženi dalji pravci i opcije istraživanja koji bi mogli da dovedu do razvoja ekonomične tehnologije za primenu upotrebe staklenog reciklata u ciglarskoj industriji.

U okviru doktorske disertacije, za potrebe eksperimentalnog dobijanja i ispitivanja svojstava eksperimentalnih uzoraka blokova od gline sa staklenim reciklatom, primenjene su sledeće metode: mlevenje uzoraka u poluindustrijskom mlinu i analiza granulometrijskog sastava dobijenog praha na mehaničkom uređaju za prosejavanje; određivanje zapreminske mase direktnom metodom i metodom hidrostatičkih terazija; ispitivanje čvrstoće uzoraka pri pritisku; metoda paranja; ispitivanje hemijske stabilnosti; ispitivanje uzoraka na upijanje vode metodom postupnog potapanja i difrakcija X – zraka na praškastim uzorcima. Za potrebe razvoja modela upotrebe otpadne staklene ambalaže i proizvodnje blokova od gline sa staklenim reciklatom u cilju prikaza tokova otpadne staklene ambalaže u okviru Regiona korišćena je Analiza tokova materijala (eng. Material Flow Analysis –MFA) i računarski softver STAN, dok je za analizu i komparaciju uticaja na životnu sredinu proizvodnje blokova od gline bez i sa staklenim reciklatom korišćeno Ocenjivanje životnog ciklusa (LCA metoda) i računarski softver SimaPro 8.0.3.14.

2. TEORIJSKE OSNOVE ZA RAZVOJ MODELA

2.1 Staklena ambalaža kao sekundarni resurs

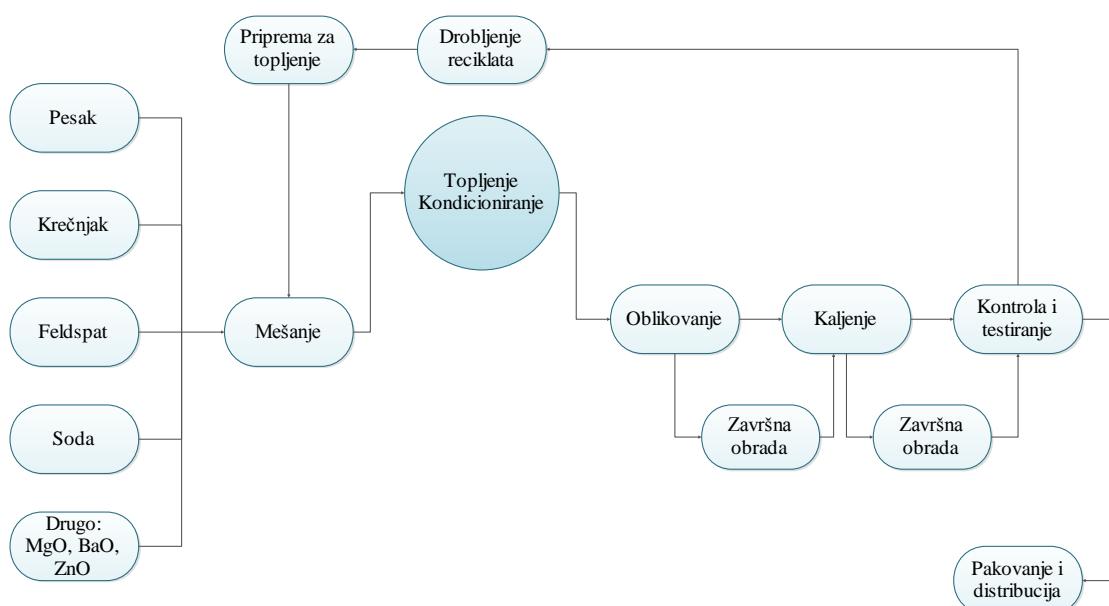
Pojam "staklo" obuhvata niz neorganskih materijala sa različitim mehaničkim i optičkim svojstvima, koje karakteriše staklasto ili amorfno stanje, nastalo relativno brzim hlađenjem i očvršćavanjem početnog tečnog stanja. Brzo hlađenje sprečava atome, molekule ili jone da se organizuju u termodinamički povoljnije kristalne strukture. Kao posledica toga, staklo se ne topi na određenoj temperaturi kao kristali kod kojih postoji pravilnost u prostoru i rasporedu strukturnih jedinica i kod kojih su jačine veza jednakе, već se prilikom zagrevanja razmekšava. Kod stakla, rastojanja između elemenata strukture nisu jednakaka, nisu jednakake dužine i jačine veza, pa iz tog razloga ne postoji nagli prelaz iz čvrstog u tečno agregatno stanje na određenoj temperaturi, već se pri zagrevanju, staklo prvo razmekšava, a tek onda topi u određenom temperaturnom intervalu.

Zbog svoje strukture, staklo, kao materijal, ima raznovrsnu primenu. Staklo ima važnu ulogu u svakodnevnom životu, u istraživanju i nauci, kao i u modernoj arhitekturi. Fabrike za proizvodnju stakla bave se proizvodnjom raznovrsnih i vrlo različitih vrsta proizvoda i uz primenu različitih tehnologija, kao što su proizvodnja flaša i tegli, ravnog stakla, posuđa, izolacione mineralne vune, optičkih vlakana i specijalnih stakala (katodne cevi, staklo za televizore i monitore, staklo za osvetljenje, optičko staklo, laboratorijsko i tehničko staklo, borosilikatna i staklokeramička posuđa i drugo). Specifični proizvodi koje fabrika stakla može da proizvede su veoma raznovrsni, od malih proizvoda nakita do ogromnih površina arhitektonskog ravnog stakla za zgrade. Zajedničko za sve fabrike za proizvodnju stakla je to da su im potrebne peći za proizvodnju proizvoda, međutim sirovine koje koriste za proizvodnju, veličina i vrsta peći, količina potrebne energije, vrsta iskorišćenog goriva, vremenski period potreban za proces dobijanja i proizvodnje gotovog proizvoda, značajno variraju u zavisnosti od vrste proizvoda od stakla koji se proizvode u određenoj fabrici (Vieitez i dr., 2011).

2.1.1 Fizičko – hemijska svojstva, proces proizvodnje i klasifikacija stakla

Za dobijanje stakla, kao sirovina se koriste rasprostranjeni, prirodni materijali. Kvarcni pesak odnosno silicijum (IV) oksid (SiO_2) čini osnovnu sirovinu za dobijanje stakla, soda odnosno natrijum karbonat (Na_2CO_3) je aditiv koji omogućava topljenje i fluidnost, a krečnjak, odnosno kalcijum karbonat (CaCO_3) staklu daje postojanost (Christensen, 2011). U najjednostavnijem hemijskom obliku, staklo se može sastojati od čistog silicijuma (kvarcno staklo). Međutim, proizvodnja amorfognog stakla iz čistog silicijuma zahteva veliku potrošnju energenata jer je za topljenje potrebna temperatura od oko 1900°C . Kao takvo, kvarcno staklo se samo proizvodi u svrhe koje zahtevaju visoku hemijsku otpornost i stoga pripadaju specijalnim tipovima stakla (MGS, 2010).

Da bi se smanjila potrošnja potrebne energije za proizvodnju stakla, staklo se većinom sastoji od SiO_2 i dodatnih jedinjenja. Alkalni oksidi se koriste kao agensi za spuštanje tačke topljenja stakla (natrijum, kalijum, litijum i drugi), takođe se koriste i alkalni oksidi zemljanih metala (kalcijum, magnezijum, barijum, stroncijum i drugi) i drugi oksidi metala (kao na primer aluminijum oksid). Njihovo prisustvo dovodi do promena fizičkih i hemijskih osobina stakla. Tako na primer, dodavanjem Na_2CO_3 snižava se tačka topljenja na oko 1000°C . Od navedenih osnovnih sirovina potrebnih za izradu stakla, priprema se smesa koja je u prahu i koja se topi u peći. Takođe, staklu mogu da se dodaju primese koje ga boje, ili ga čine prozirnim ili neprozirnim (Pfaender, 1996; Scalet i dr., 2013). Šematski prikaz tipičnog procesa proizvodnje stakla prikazan je na slici 2.1.



Slika 2.1 Šematski prikaz proizvodnje stakla (Mukherjee, 2013)

Prvi korak ka dobijanju stakla jeste pripremanje sirovina, njihovo drobljenje, mlevenje i mešanje. Zatim se vrši topljenje na temperaturi od oko 1500 – 1600°C, i to na dva načina, u pećima sa loncima (diskontinualan proces koji se može prekinuti ukoliko se proizvode specijalna stakla, staklena vuna ili optičko staklo) i koritastim pećima (kontinualan proces, koji se koristi za izradu stakala u širokoj primeni, kao što su na primer ambalaža, rasveta i drugo). Nakon topljenja, vrši se oblikovanje, na temperaturi od 700 °C do 800°C. Postoji više načina oblikovanja stakla: duvanje stakla (uduvava se vazduh u staklenu masu, cevčicom, pa se stvaraju šupljine i prave se na primer sijalice, posuđe, čaše i drugo), izvlačenje stakla (staklena masa se pomoću valjkova izvlači i valja u cilju dobijanja određenih debljina i dimenzija potrebnih za prozorska stakla, sigurnosna i neprobojna stakla), presovanje stakla (staklena masa se sipa u kalup i pomoću pritiska se dobija određen oblik pogodan za stakla za televizore, monitore i slično), zatim postoji i livenje stakla (staklena masa se izvlači na sto i zatim se valja, u cilju dobijanja stakla pogodnog za izloge i ogledala). Nakon oblikovanja, vrši se završna obrada, kao što su brušenje, graviranje, matiranje ili slikanje (Christensen, 2011; Mukherjee, 2013).

Staklena ambalaža se uglavnom proizvodi u tri boje: providna (*eng. Clear*), zelena (*eng. Green*) i braon (*eng. Amber*). Providno staklo se dobija iz čistog kvarcnog peska sa malim primesama gvožđe oksida. Zeleno staklo se dobija dodavanjem oksida hroma, kobalta i vanadijuma, dok se braon boja stakla dobija dodavanjem oksida mangana, gvožđa, nikla i kobalta (Christensen, 2011).

Klasifikacija stakla se najčešće vrši prema njegovom hemijskom sastavu i nameni, pa se prema tome stakla mogu podeliti u četiri osnovne grupe (Scalet i dr., 2013):

- komercijalno staklo,
- kristalno staklo,
- borosilikatno staklo i
- specijalno staklo(najčešće se tu ubraja staklo sadržano u električnim uređajima).

Prve tri navedene grupe čine preko 95% proizvedenog stakla, dok preostalih 5% predstavljaju male količine specijalnih stakala, uglavnom ugrađenih u električne uređaje.

Fizičko – hemijski sastav najčešćih vrsta stakala koja se proizvode i koriste predstavljene su u tabeli 2.1, a detaljnije su opisane u nastavku teksta.

Tabela 2.1 Osnovni sastav stakala koja se najviše proizvode (Scalet i dr., 2013)

	Komercijalno staklo	Kristalno staklo (sa olovom)	Borosilikatno staklo
Silicijum (IV) oksid (SiO_2)	71 – 75%	54 – 65%	70 – 80%
Bor (III) oksid (B_2O_3)	/	/	7 – 15%
Oovo (II) oksid (PbO)	/	25 – 30%	/
Natrijum oksid – soda (Na_2O) ili Kalijum oksid (K_2O)	12 – 16% /	13 – 15%	4 – 8%
Kalcijum oksid – kreč (CaO)	10 – 15%	/	/
Aluminijum oksid (Al_2O_3)	/	7%	/

Komercijalno staklo

Fabrike za proizvodnju stakla, u najvećem procentu, bave se proizvodnjom komercijalnog stakla koje se naziva i "obično staklo". Sastav ove vrste stakla u najvećem procentu čini 71 – 75% silicijum (IV) oksid (SiO_2 , uglavnom poreklom iz peska), zatim 12 – 16% sastava čini natrijum oksid (Na_2O poreklom iz anhidrovanog natrijum karbonata – Na_2CO_3) i 10 – 15% kalcijum oksid (kreč, CaO , poreklom iz krečnjaka – CaCO_3). Druge komponente se nalaze u vrlo malim količinama. U ovu vrstu stakala ubrajaju se staklene ambalaže (flaše, tegle i drugo), ravno staklo (prozorska stakla, stakla na vozilima) i staklo u domaćinstvima (čaše, posuđe i drugo) (Vieitez i dr., 2011).

Oovo – kristal i kristal staklo

U kristalna stakla se ubrajaju stakla koja u svom sastavu sadrže različite količine oksida olova, u skladu sa Direktivom 69/493/EEC od 15. decembra 1969. godine o usklađivanju zakona država članica EU koji se odnose na kristalno staklo. Tipičan sastav olovnih kristala čini 54 – 65% SiO_2 , 25 – 30% PbO i 13 – 15% Na_2O ili K_2O . Oovo može biti delimično ili potpuno zamenjeno barijumom, cinkom ili kalijum oksidom, i to u staklima poznatim kao kristalno staklo. Druge komponente se nalaze u vrlo malim količinama. Oovo se koristi za poboljšanje zvučnosti (eng. Sonority) i povećanje indeksa refrakcije stakla, što stvara visoku sjajnost proizvoda od olova i kristalnog stakla. Oovo oksidi olakšavaju završnu ručnu obradu stakla, jer snižavaju radnu temperaturu i viskoznost. Ova vrsta stakla je skuplja od komercijalnog i vrlo je značajna u primeni u elektrotehnici, za proizvodnju cevi za termometre i umetničkih kristalnih predmeta, visoko kvalitetnih kristalnih čaša, vaza i drugo (Vieitez i dr., 2011).

Borosilikatno staklo

Tipično borosilikatno staklo sadrži 70 – 80% SiO₂, 7 – 15% B₂O₃, 4 – 8% Na₂O ili K₂O i 7% Al₂O₃. Prisustvo bora doprinosi izdržljivosti stakla pri dejstvu hemikalija, vode i topote. Borosilikatno staklo se koristi za proizvodnju laboratorijske opreme (špricevi, ampule, bočice i epruvete za farmaceutsku upotrebu), posuđa, zatim za proizvodnju sijalica za visokoenergetske lampe, za prozore za protivpožarnu zaštitu i za izolacione mineralne vune (Vieitez i dr., 2011).

2.1.2 Sektori fabrike za proizvodnju stakla

Kao što je prethodno rečeno, spektar primene stakla za proizvodnju različitih vrsta proizvoda je raznovrsan. U zavisnosti od vrste proizvoda koje proizvode, tipična klasifikacija fabrika za proizvodnju stakla obuhvata šest sektora industrija za proizvodnju stakla. Brojevi u zagradama ukazuju na njihov približni udio u ukupnoj proizvodnji stakla zemalja članica Evropske unije (EU – 27):

1. Sektor za proizvodnju staklene ambalaže (približno 56%): flaše i druge ambalaže za pakovanje hrane, pića, farmaceutskih proizvoda, kozmetike i drugo;
2. Sektor za proizvodnju ravnih stakala (približno 25%): prozorska stakla na kućama i zgradama i prozorska stakla na vozilima;
3. Sektor za proizvodnju staklenih vlakana (približno 2%): razni kompozitni materijali u građevinskoj i automobilskoj industriji i električnoj i elektronskoj industriji. U ovu svrhu se proizvode specijalne vrste stakala;
4. Sektor za proizvodnju staklenih proizvoda u domaćinstvima (približno 4%): proizvodi koji se koriste za stakleno posuđe, dekorativno staklo itd.
5. Sektor za proizvodnju staklene vune za izolaciju (približno 10%): staklena vuna je izrađena od kratkih staklenih vlakana sačinjenih uglavnom od borosilikatnog stakla i keramičkih materijala i koristi se za izolaciju, filtriranje i vatrogasnu upotrebu.
6. Sektor za proizvodnju specijalnih stakala (manje od 3%): optičko/oftalmološko staklo, staklo u laboratorijskoj opremi (delimično izrađeno od borosilikatnog stakla), staklo u cevima, staklena keramika, staklo za osvetljenje, staklene katodne cevi u računarskim i televizorskim ekranima i drugo (Vieitez i dr., 2011).

2.1.3 Otpadno staklo

Postoje dva načina klasifikacije otpadnog stakla. Prvi način je da se stakleni otpad klasificuje prema izvoru nastanka otpada, a drugi prema Evropskom katalogu otpada.

Klasifikacija otpadnog stakla prema izvoru nastanka:

1. Otpad nastao pre upotrebe od strane potrošača;
2. Otpad nastao posle upotrebe od strane potrošača.

Otpad nastao pre upotrebe od strane potrošača generiše se tokom proizvodnje stakla (pre nego što dođe do potrošača) i isključivo je porekлом iz fabrike za proizvodnju stakla. Obuhvata približno 25% od ukupne generisane količine otpadnog stakla u EU (FERVER, 2007, IPTS, 2009, Vieitez i dr., 2011).

Otpad nastao nakon upotrebe od strane potrošača čini ostatak udela (oko 75%) u ukupnom generisanom staklenom otpadu u EU. Osnovni izvori nastalog staklenog otpada nakon upotrebe su:

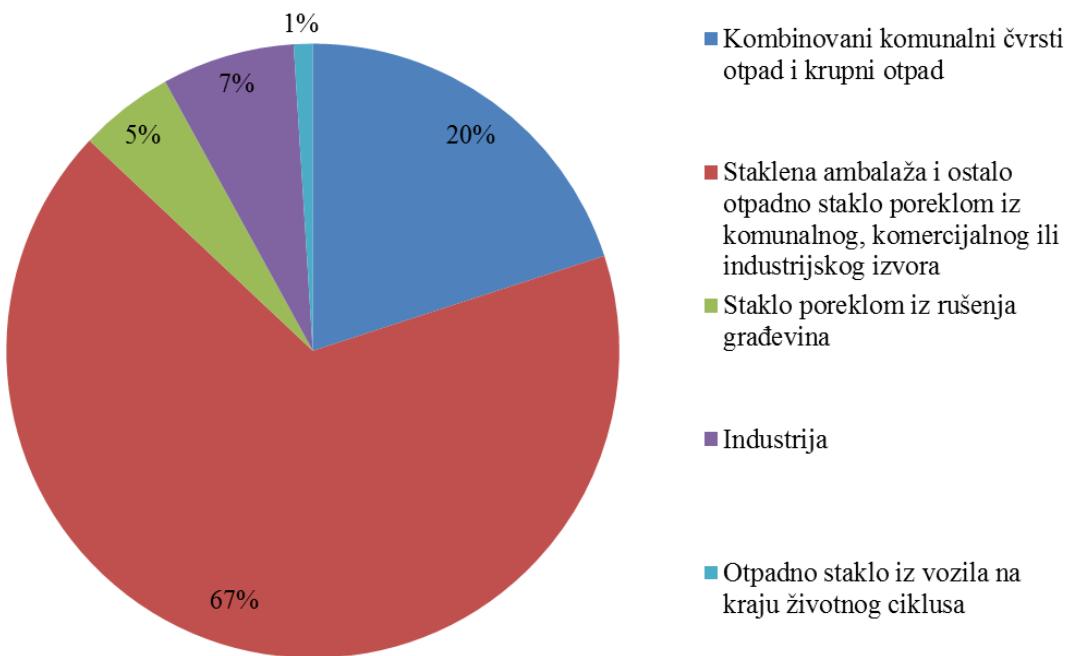
- komunalni čvrst otpad (stakleni otpad iz domaćinstva i komercijalnog sektora);
- industrijski otpad;
- građevinski otpad;
- otpad iz električnih i elektronskih uređaja.

Stakleni otpad nastao u okviru fabrike za proizvodnju stakla je uglavnom homogen i ne zahteva posebne stepene sortiranja i tretmana, dok stakleni otpad nastao nakon upotrebe i izdvojen iz mešanog čvrstog otpada, skoro uvek zahteva različite načine sortiranja, sakupljanja i tretmana (Vieitez i dr., 2011).

Drugi način klasifikacije otpadnog stakla je u skladu sa Evropskim katalogom otpada (*eng. European Waste Catalogue – EWC*), prema kom se stakleni otpad klasificuje na osnovu pet različitih izvora nastanka:

1. Kombinovani komunalni čvrsti otpad i krupni otpad;
2. Staklena ambalaža i ostalo otpadno staklo porekлом iz komunalnog, komercijalnog ili industrijskog izvora;
3. Staklo porekлом iz rušenja građevinskih objekata;
4. Industrija;
5. Otpadno staklo iz vozila na kraju životnog ciklusa.

Na slici 2.2 dat je procentualni udeo generisnog staklenog otpada spram definisanih pet različitih izvora prema Evropskom katalogu otpada.



Slika 2.2 Procentualni udeo generisnog otpadnog stakla u EU – 27 prema Evropskom katalogu otpada (Vieitez i dr., 2011)

Kako je prethodno istaknuto, primena stakla je raznovrsna i mnogobrojna, ali u sistemu za upravljanje otpadom, staklo se u najvećem procentu nalazi u obliku ambalaže za prehrambene proizvode, koja ima relativno kratak životni vek, odnosno kratak upotrebnii period, pre odlaganja u otpad. Pored staklene ambalaže, u sistemu upravljanja otpadom, prisutne su velike količine ravnog stakla koje se koriste kao prozorska stakla na zgradama i kućama, međutim njihov životni vek je mnogo duži pre odlaganja u otpad (Christensen, 2011). Proizvodnja obe vrste stakala (ambalažno i ravno prozorsko staklo) čini oko 82% od ukupne proizvodnje stakla u fabrikama za proizvodnju stakla u Evropi (IPPC, 2001; Christensen, 2011). Iz tog razloga, istraživanja, eksperiment i razvijanje modela u okviru ove doktorske disertacije uzimaće u obzir samo količine otpadne staklene ambalaže.

2.1.4 Opcije upravljanja stakлом kao otpadom

Jedna od najpoželjnijih opcija upravljanja otpadom, svakako jeste ponovna upotreba stakla (*eng. Reuse*) odnosno staklene ambalaže kao povratne ambalaže, međutim, u ovom slučaju se staklo ne svrstava u otpad. Staklo kao otpad nastao nakon upotrebe, umesto odlaganja na deponiju ili insinerator, može da se koristi kao resurs u procesu reciklaže, u cilju dobijanja novog istog proizvoda ili drugog korisnog proizvoda. Teoretski gledano, staklo se može potpuno reciklirati i može se neograničeni broj puta reciklirati bez gubitka u kvalitetu, međutim da bi se na kraju dobio proizvod najboljeg kvaliteta, materijal koji se koristi za reciklažu mora da bude visokog kvaliteta (FEVE, 2010). Zbog toga dolazi do nagomilavanja velikih količina otpadnog stakla poreklom iz porušenih građevina, komunalnog, industrijskog i medicinskog otpada, koji u najvećem procentu završi na deponiji.

Proces reciklaže sastoji se iz nekoliko koraka u cilju obezbeđivanja staklenog reciklata pogodnog za dalju upotrebu. Tipični koraci kod reciklaže staklenog otpada su:

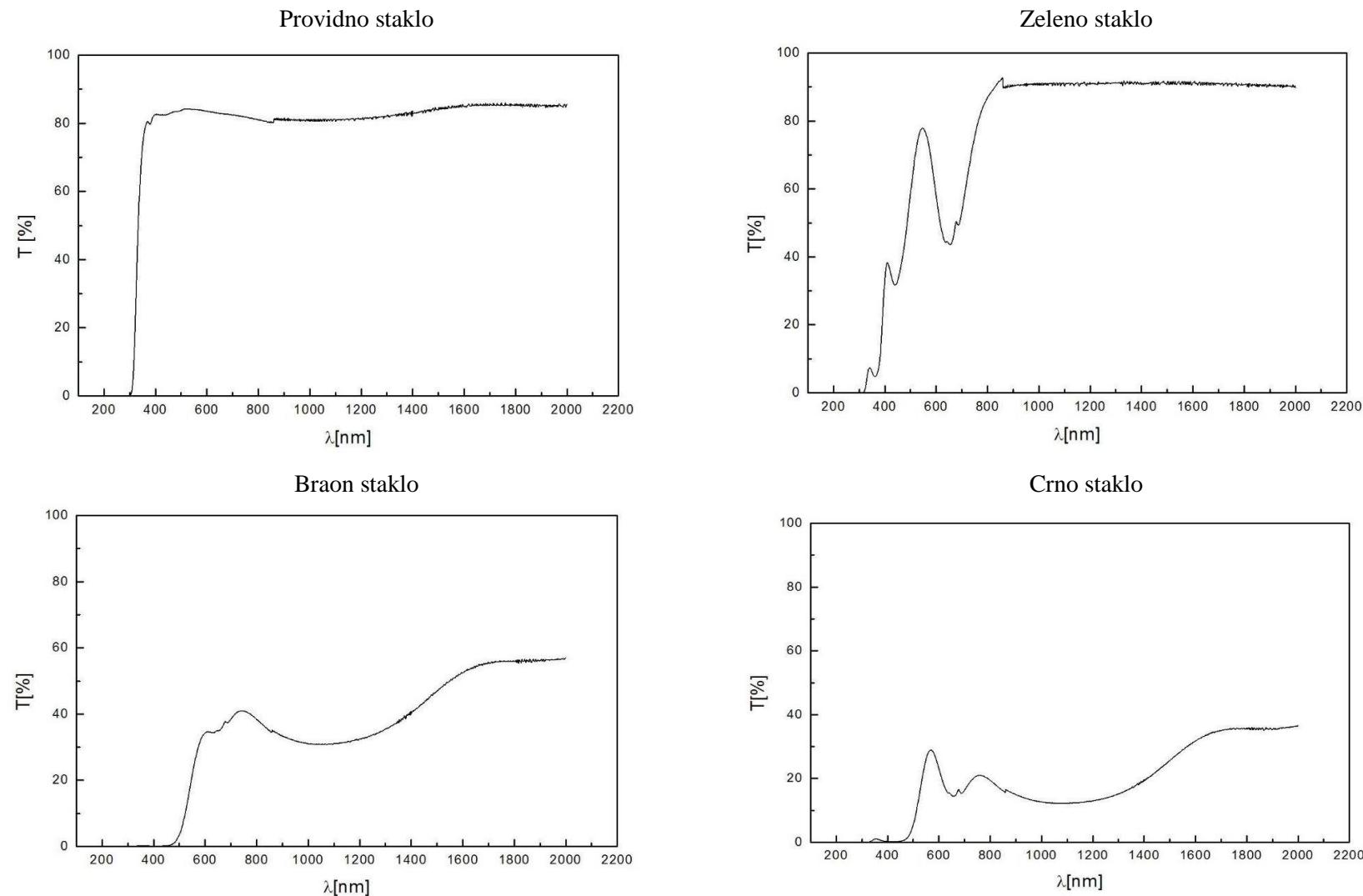
- sakupljanje,
- drobljenje,
- sortiranje,
- uklanjanje zagađujućih supstanci,
- transport i
- konačna upotreba stakla kao resursa u proizvodnji novog proizvoda (Vieitez i dr., 2011).

Neki od navedenih koraka mogu da se preskoče, ukoliko postoji opravdan razlog za to.

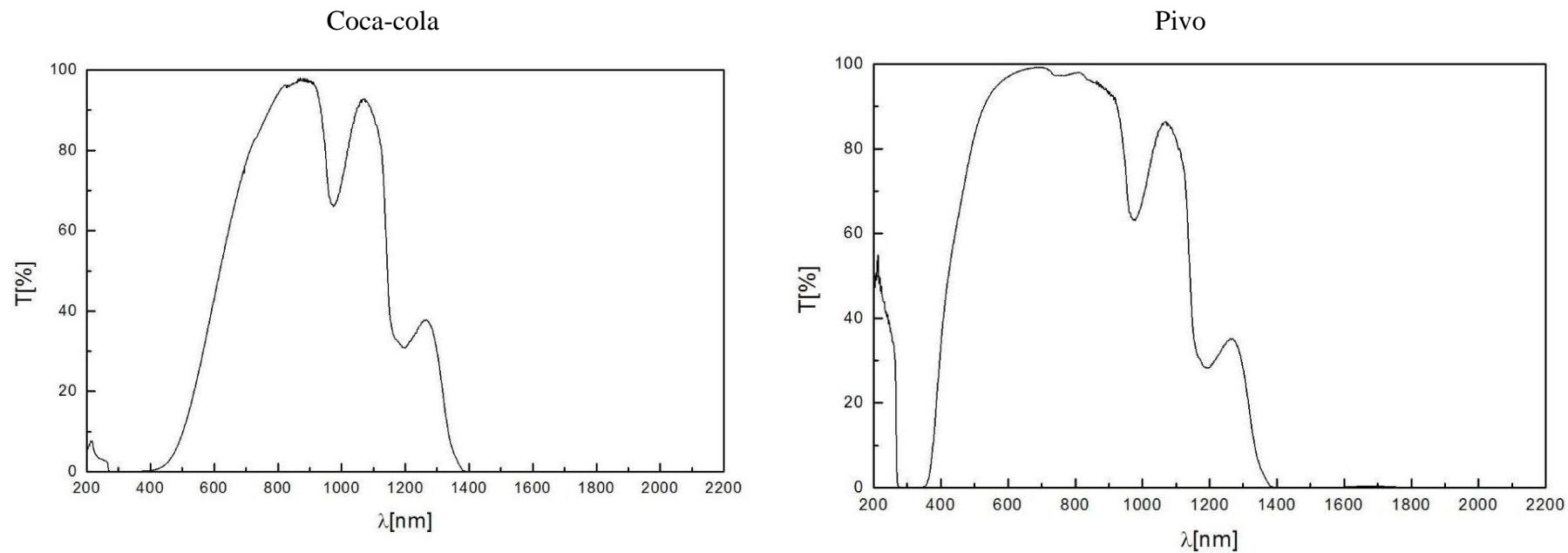
Reciklaža otpadne staklene ambalaže u cilju dobijanja nove staklene ambalaže (eng. Closed Loop Recycling)

Od svih vrsta stakala, staklena ambalaža je najbitnija u toku upravljanja čvrstim otpadom i jedino staklena ambalaža može da se reciklira ponovnim topljenjem u cilju dobijanja nove staklene ambalaže (Christensen, 2011). Druge vrste stakala imaju različita fizička svojstva i iz tog razloga se ne mogu koristiti u ovoj vrsti reciklaže staklene ambalaže, jer se stakleni reciklat ne bi mogao dobro pomešati, a i temperature topljenja se razlikuju u zavisnosti od vrste stakla, što bi doveo do stvaranja defekata na novom proizvedenom materijalu (Vellini i Saviola, 2009).

Staklena ambalaža se proizvodi odvojeno, uglavnom u tri različite boje, od kojih svaka boja zahteva nešto drugačije mešavine ulaznih materijala, koje se dodaju u primesama, ali je proces dobijanja stakla isti (Vellini i Saviola, 2009). Na slici 2.3 prikazani su spektri transmisije, dobijeni spektroskopskim merenjem uzorka stakala različitih boja, providnog, zelenog, braon i crnog stakla, četiri tipične boje ambalažnog stakla u Srbiji, na osnovu kojih se može uraditi separacija stakla po boji. Na slici 2.4 kao primer su prikazani spektri transmisije tipičnih ostataka tečnosti koji se mogu naći u staklenoj ambalaži, konkretno, Coca-Cole i piva i koji mogu uticati na proces separacije ambalažnog stakla po boji (Štrbac i dr., 2017).



Slika 2.3 Spektri transmisije za providno, zeleno, braon i crno staklo (Štrbac i dr., 2017)



Slika 2.4 Spektri transmisije Coca - cole i piva (Štrbac i dr., 2017)

Otpadna staklena ambalaža može se mešati sa sirovinama ili, teoretski, može da bude jedina sirovinu koja se koristi za proizvodnju nove staklene ambalaže, ali se u praksi obično koristi drobljeno staklo, u procentu od 80%, kao ulazna sirovinu u poizvodnji nove staklene ambalaže (EPA, 2011). Međutim, drobljeno staklo (reciklat), pre uključivanja u proizvodni proces, mora da bude razvrstano prema boji stakla i sa određenim stepenom čistoće, kako se ne bi degradirao proces proizvodnje nove staklene ambalaže. Pomešanost boja frakcija staklenog reciklata mora biti manja od 2% za proizvodnju providnog stakla i manja od 5% za proizvodnju obojenog stakla (Christensen, 2011). U tabeli 2.2 dati su maksimalno dozvoljeni nivoi tipične kontaminacije staklenog reciklata koji se koristi za proizvodnju nove staklene ambalaže, ravnih stakala i izolacione mineralne vune. Kako bi proizvod, dobijen iz reciklata, bio visokog kvaliteta, i stakleni reciklat mora biti sa što je manjom koncentracijom kontaminacije, što dodatno poskupljuje ovakav vid procesa reciklaže.

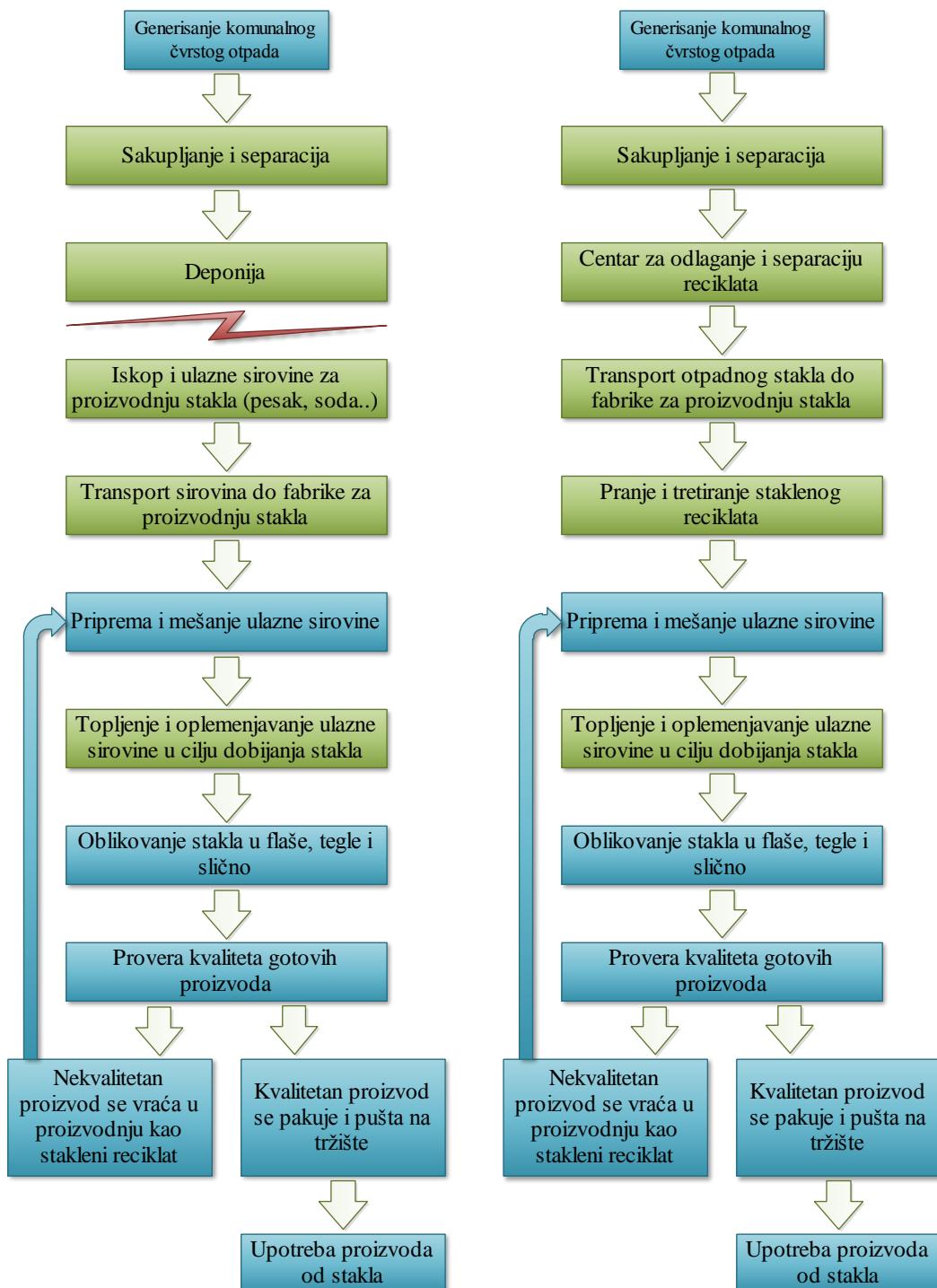
Tabela 2.2 Maksimalno dozvoljene koncentracije (MDK) zagađujućih supstanci u staklenom reciklatu za proizvodnju staklene ambalaže, ravnih stakala i mineralne vune (Vieitez i dr., 2011)

Kontaminacija	Težina/veličina čestice	MDK (staklena ambalaža) [ppm]	MDK (ravna stakla) [ppm]	MDK (izolaciona mineralna vuna) [ppm]
Tečkim metalima	>0,5g	50	0 (2 ako je <0,5g)	10
Lakim metalima	>0,1g	20	0 (0,5 ako je <0,1g)	20
Neorganska	>0,2 mm	20	0	25
Organska	>2g	3000	0 (45 ako je <2g)	3000

Reciklieri takođe moraju da vode računa da se svi ostali materijali, kao što su plastika ili drvo, uklone pre dodavanja u mešavinu za proizvodnju novog proizvoda. Stakleni reciklat se zatim drobi i priprema za dodavanje, kao sekundarna sirovinu, u proizvodnji stakla. Gruba separacija i priprema reciklata vrši se ručno, a zatim se reciklat dalje šalje na finu pripremu koja se vrši automatskom laserskom mašinom za odvajanje malih komada stakla prema boji, što je vrlo skup proces separacije kod proizvodnje nove ambalaže iz staklenog reciklata (Hischier, 2007; Christensen, 2011). Kada je reciklat pripremljen i spreman za topljenje, proces proizvodnje stakla odvija se po istom postupku kao što je proces proizvodnje stakla za koju se koriste primarne sirovine.

Na slici 2.5 dat je grafički prikaz životnog ciklusa stakla napravljenog od sirovina i reciklirane staklene ambalaže. Plavom bojom su označeni procesi koji su identični u oba procesa proizvodnje staklene ambalaže. U tabeli 2.3 dat je pregled količina ulaznih resursa (energetski resursi, resursi za proizvodnju stakla i flaša) i izlaznih emisija (emisije u vodu i

vazduh) i frakcije otpadnog stakla, potrebnih za proizvodnju stakla iz prirodnih resursa, staklenog reciklata i za proizvodnju staklenih flaša. U okviru prikazanih procesa za proizvodnju stakla nije uključena upotreba hemikalija pri procesu jer takvi podaci nisu javno dostupni. Procesi za proizvodnju stakla bazirani su na podacima iz 1996. godine (Christensen, 2011).

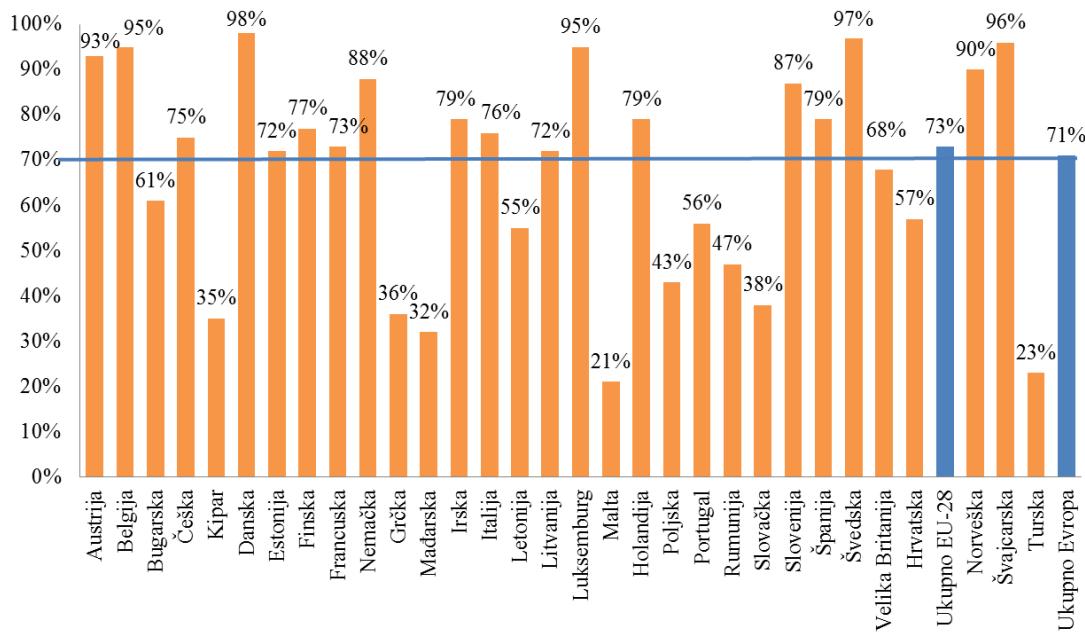


Slika 2.5 Životni ciklus deponovane i reciklirane staklene ambalaže (Vossberg, 2012)

*Tabela 2.3 Inventar pojedinačnih procesa uključenih u proizvodnju 1 tone stakla i 1 tone flaša
(Christensen, 2011)*

Jedinica	Proizvodnja stakla		Proizvodnja flaše	
	Od recikliranog stakla	Od prirodnih sirovina	Pranje staklenih flaša za ponovnu upotrebu	Proizvodnja staklenih flaša
Ulazi				
Energetski resursi				
Sirova nafta - gorivo	[kg]	121	161	- 1,6
Prirodni gas - gorivo	[Nm ³]	10,4	55,2	2,9 121
Resursi				
Drobljeno staklo (cullet)	[kg]	1 010	-	- 850
Staklene flaše	[kg]	-	-	1 040 -
Staklo iz prirodnih materijala	[kg]	-	-	- 176
Kvarc	[kg]	-	633	- -
NaCl	[kg]	3	87	- -
NaOH	[kg]	-	-	4,5 -
CaCO ₃	[kg]	3	363	- -
Voda	[m ³]	0,002	0,24	3 0,4
Električna energija	[kWh]	38,4	68,9	0,04 290
Izlazi				
Staklo	[kg]	1 000	1 000	- -
Staklene flaše	[kg]	-	-	1 000 1 000
Otpadna voda	[m ³]	0,002	0,24	3 nije dostupno
Čvrsti ostaci	[kg]	nije dostupno	nije dostupno	1 54
Emisije u vodu				
BPK	[kg]	-	-	nije dostupno 0,01
Ukupni fosfor	[kg]	-	-	40 0
Neodređeno ulje	[kg]	-	-	nije dostupno 0,001
Emisije u vazduh				
CO ₂	[kg]	403	609	5,3 296
SO ₂	[kg]	2,1	2,8	0 1,3
NO _x	[kg]	1,3	1,8	0,009 1,7
CO	[kg]	nije dostupno	0,01	nije dostupno 0,03
HC	[kg]	nije dostupno	0,016	- -
HCl	[kg]	0,006	0,07	- -
HF	[kg]	0,02	0,001	nije dostupno 0,0004
N ₂ O	[kg]	0,003	0,08	- -
Čestice	[kg]	0,4	17,7	nije dostupno 0,02
Pb	[kg]	0,016	nije dostupno	- -

Reciklaža staklene ambalaže je različitog obima, razlikuje se od države do države u zavisnosti od uspostavljenog sistema za upravljanje staklenom ambalažom. U svetu, Evropa ima najveću stopu reciklaže stakla, u kojoj se trenutno prosečno prikuplja i reciklira više od 70% otpadne staklene ambalaže. Na slici 2.6 dat je procenat reciklaže sakupljene otpadne staklene ambalaže u Evropi za 2013. godinu.



Slika 2.6 Stopa reciklaže staklene ambalaže u zemljama EU za 2013. godinu (FEVE, 2013)

Nažalost, do sada u Srbiji nije obezbeđen sistem sakupljanja staklene ambalaže iz toka komunalnog čvrstog otpada, niti se staklena ambalaža reciklira u cilju dobijanja nove staklene ambalaže. Zbog toga postoji potencijal da se drobljeno otpadno staklo koristi delimično, umesto gline, kao sekundarni resurs u ciglanama za proizvodnju cigli i blokova od gline.

Reciklaža otpadne staklene ambalaže koja ne zahteva ponovo topljenje

Reciklaža otpadne staklene ambalaže koja ne zahteva ponovo topljenje stakla, koje je neophodno u proizvodnji nove staklene ambalaže, uspešno se primenjuje širom sveta, a neki od primera su upotrebe drobljenog staklenog reciklata kao: aditiva u proizvodnji cigli, blokova i druge keramike, filtera za prečišćavanje vode, agregata u građevinarstvu, brusnog materijala za šmirgланje, sirovine za proizvodnju staklenih perlica koje se koriste u reflektujućoj boji za autoputeve, za proizvodnju stakloplastike i kao frakcije za osvetljavanje municije i drugo (Park i dr., 2004; Vieitez, 2011). Novija istraživanja omogućila su korišćenje otpadnog stakla u betonu kao zamenu agregata, čiji je jedini cilj korišćenje što više stakla, ili u vrednim, kreativnim proizvodima koji u potpunosti koriste

fizičke i estetske osobine, po boji sortiranog, drobljenog stakla. Park i dr. (2004) pokazali su prednosti korišćenja mešavine agragata i 30% drobljenog staklenog reciklata.

Mnoge zemlje ulažu dosta napora da recikliraju otpadnu staklenu ambalažu. Sistem za sakupljanje staklene ambalaže je već uspostavljen, putem kojeg se prazne ambalaže od pića, začina, mleka i slično, sakupljaju, peru i ponovo koriste. Pored toga, razbijena ambalaža i ambalaže u kojima su bile hemikalije, kozmetika i slično, drobe se i pretvaraju u materijal za popločavanje, za zidove, stakleni mermer, staklene pločice, staklena vlakna i drugo (WRAP, 2008; Mohajerani i dr., 2017; Heriyanto i dr. 2018). Kada se otpadno staklo ne reciklira, ono se skladišti ili odlaže. Naljčešće opcije odlaganja otpadne staklene ambalaže su njeno deponovanje ili insineracija. Međutim, ako se tome doda podatak da se staklo, praktično ne raspada tokom vremena, pronalaženje rešenja, za ovu vrstu otpada je od velikog značaja sa aspekta zaštite i očuvanja životne sredine.

2.2 Proizvodnja blokova od gline

Glina kao građevinska sirovina, koristi se više od pedeset vekova, i tokom vremena je njen upotreba usavršavana. Oblik zidane opeke korišćen je još u Mesopotamiji i u doba Vavilona (Zhang, 2013; Pacheco-Torgal i dr., 2014). U početku su proizvodi od gline izrađivani u kućnoj radinosti, da bi danas to postala moderna procesna industrija. U toku dvanaestog veka, ciglarstvo počinje da se javlja kao industrijska grana i usavršava se u Engleskoj, Nemačkoj, Francuskoj, Italiji, na šta ukazuju građevine koje su i danas očuvane (Denić, 2005).

Pojavom savremenog načina gradnje, pojavila su se mišljenja da opeka kao građevinski materijal, odnosno blok, ne prate razvoj savremenog građevinarstva, odnosno upotrebu mehanizacije, u čemu ima malo istine, jer iako opeka i blokovi od gline još uvek zahtevaju klasičan način građenja (na primer, slaganje opeke na opeku i slično), opeka i blokovi i dalje predstavljaju jedan od osnovnih materijala u zgradarstvu, kao najkvalitetniji materijal sa aspekta higijensko – tehničkih uslova (Denić, 2005, Pacheco-Torgal i dr., 2014).

Blokovi i cigle od gline ubrajaju se u građevinsku keramiku, koja obuhvata sve materijale i proizvode, dobijene operacijama pripreme, oblikovanja, sušenja i pečenja polazne sirovine – gline. Primena keramičkih proizvoda i materijala u građevinarstvu je značajna, iz razloga što ovi materijali i proizvodi poseduju mnoga svojstva značajna u građevinarstvu, kao što su na primer, visoka mehanička čvrstoća, dugotrajnost, rasprostranjenost gline u prirodi, dobra topotna i zvučna izolaciona svojstva i drugo (Živanović, 1981).

I pored otkrića Portland cementa (zidani betonski blokovi) u dvadeset prvom veku, koji su se pojavili kao alternativa blokovima i ciglama od gline, i dalje proizvodnja blokova od gline preovladava u velikoj meri. Na primer, u Velikoj Britaniji proizvodnja betonskih blokova obuhvata samo 5% od ukupne proizvodnje ciglana (Bingel i dr., 2009). To ukazuje da se trenutno, i da će se ubuduće blokovi i cigle od gline, u značajnom procentu koristiti širom sveta, čak i u visoko razvijenim zemljama.

2.2.1 Podela proizvoda građevinske keramike

Postoji veliki broj mogućih podela na manje grupe materijala i proizvoda koji spadaju u građevinsku keramiku, ali izdvajaju se dve osnovne podele:

1. Podela keramike prema poroznosti;
2. Podela keramike prema njenoj nameni.

Podela prema poroznosti razvrstava proizvode na porozne i guste keramičke proizvode. U porozne keramičke proizvode ubrajaju se proizvodi koji upijaju vodu više od masenih 5% (Živanović, 1981). Veliki broj raznih keramičkih proizvoda koji se najviše koriste u savremenom građevinarstvu i čije se upijanje vode kreće u opsegu od 8 – 30% spadaju u poroznu keramiku, pa se tu ubrajaju i blokovi od gline. Guste keramičke proizvode karakteriše upijanje vode, u odnosu na njihovu masu, koje je manje od 5%.

Podela keramičkih proizvoda prema njihovoj nameni izvršena je na sledeći način (Živanović, 1981):

1. Zidna građevinska keramika (pune i šuplje opeke, blokovi, elementi građevinske keramike koji se koriste za izradu tavanica - "monte" elementi);
2. Krovna građevinska keramika (crep);
3. Fasadna građevinska keramika (fasadne i klinker opeke, glazirane i neglazirane keramičke pločice za spoljašnje i unutrašnje oblaganje fasada);
4. Podna građevinska keramika (linker i sinter keramičke opeke i drugo);
5. Specijalna građevinska keramika (sanitarna keramika, keramičke cevi i drugo);
6. Agregati za lake betone (keramizit – zamena za šljunak kod izrade lakih i termoizolacionih betona).

Najviše se koriste proizvodi zidne građevinske keramike, a potom dolaze krovna i fasadna keramika, što ujedno i uslovljava obim proizvodnje pomenutih proizvoda (Živanović, 1981).

Pune opeke, danas se retko koriste za izradu građevinskih objekata. Mnogo veću upotrebu imaju šuplji blokovi, koji, iako imaju veće dimenzije, poseduju praktično iste mehaničke osobine kao i pune opeke, ali su znatno lakši. Za njihovu proizvodnju se troši 25 – 30% manje polazne sirovine i znatno manje energije pri sušenju i pečenju u odnosu na pune opeke. Iz ovih razloga je znatno smanjena primena i proizvodnja punih opeka (Živanović, 1981; Neimar, 2014). Shodno tome, u doktorskoj disertaciji su pravljeni eksperimentalni uzorci sa staklenim reciklatom u obliku šupljih blokova.

2.2.2 Sirovine za proizvodnju pečenog bloka

Sirovine za proizvodnju keramičkih proizvoda mogu da se podele na plastične (minerali gline, kvarcni pesak, karbonati kalcijuma i magnezijuma, hidroksidi gvožđa i aluminijuma i slično) i neplastične sirovine (kvarcni pesak, šljaka, šamot, sagorljivi ostaci i drugo). Pored toga, u cilju snižavanja temperature sinterovanja (tačke topljenja sirovine), a time i maksimalne temperature na kojoj se odvija proces pečenja bloka, osnovnim sirovinama se dodaju topitelji (hidroksidi i oksidi gvožđa i slično). Na osnovu navedenog, zaključuje se da gline predstavljaju složene polimineralne, polidisperzne aglomeracije (Živanović, 1981, Mukherjee, 2013).

Uzimajući u obzir temperaturu topljenja, gline mogu da se podele na (Živanović, 1981):

- Lakotopive gline (ispod 1350°C) – najčešće se koriste u proizvodnji blokova;
- Teškotopive gline (1350 – 1580°C) – koriste se za izradu sanitарне keramike;
- Vatrostalne gline (iznad 1580°C) – koriste se za izradu vatrostalnih opeka.

Za proizvodnju šupljih blokova koriste se lakotopive opekarske sirovine i njihov sastav prikazan je u tabeli 2.4.

Tabela 2.4 Uobičajen sastav sirovine za proizvodnju pečenih šupljih blokova (Živanović, 1981)

Sirovine	Procentualni udio u opekarskoj sirovini (%)
Kvarcni pesak (SiO_2)	50 – 75
Glinene komponente	10 – 20
Karbonati	10 – 20

Granulometrijski sastav, odnosno, izražena plastičnost (sposobnost glinene mase dobijene dodavanjem vode da se transformiše pod dejstvom spoljašnjih mehaničkih sila bez loma i formiranja pukotina i da zadrži željeni oblik), obradljivost i vezivna sposobnost glina, uslovljeni su sadržajem sitnih čestica minerala glina veličine uglavnom manje od 1 mikrona. Što je veći sadržaj tih čestica, glina je plastičnija. Kod glina u Srbiji, koje se

koriste u ciglanama sadržaj ovih čestica kreće se obično do 30%, dok su ostale čestice, čestice liskuna, feldspata, kvarca i drugih minerala (Živanović, 1981). Prisustvo ovih minerala u glini je potvrđeno i u ispitivanjima u okviru ove disertacije i biće prikazano u daljem tekstu. Prisustvo peska je korisno jer njegove čestice daju skeletnu čvrstoću gotovim proizvodima, a takođe u određenoj meri utiču na smanjivanje skupljanja proizvoda od gline u toku sušenja i pečenja (Mukherjee, 2013).

2.2.3 Proces proizvodnje pečenih blokova od gline

Tehnološki proces proizvodnje blokova od gline sastoji se od sledećih osnovnih operacija:

1. Priprema ulazne sirovine (gline);
2. Oblikovanje blokova;
3. Sušenje blokova;
4. Pečenje blokova;
5. Sortiranje gotovih blokova.

U zavisnosti koji tip keramike se proizvodi, razlikuju se načini oblikovanja polazne mase, pa se tako proizvodi mogu oblikovati presovanjem, istiskivanjem (ekstrudiranjem) ili livenjem. Kod proizvodnje šupljih blokova, koji su pravljeni kao eksperimentalni uzorci u okviru disertacije, oblikovanje ulazne sirovine vrši se istiskivanjem (ekstrudiranjem).

U toku pripreme ulazne sirovine (radne mase) vrši se udaljavanje štetnih primesa (šljunak, krupni karbonatni aglomerati), sitnjene krupnijih komada ulazne sirovine i njihovo homogeno mešanje u cilju dobijanja homogene radne mase. Kod oblikovanja radne mase istiskivanjem, glina se suši, drobi i melje, a zatim se homogenizuje pomoću mešača u okviru ciglane, kako bi se dobila radna masa pogodna za ovaj tip oblikovanja. Vlažnost radne mase se obično kreće između 18% i 25%, a ponekad i više (Živanović, 1981; Mukherjee, 2013; Neimar, 2014). Na slici 2.7 prikazana je pripremljena sirovina (gлина), u ciglani I. G. M. "Neimar", koja se nalazi na pokretnoj traci i ide ka mešaču radi homogenizacije, odakle zatim odlazi u uređaj za istiskivanje (ekstruder) šupljih blokova.



Slika 2.7 Pokretna traka sa pripremljenom glinom za ekstrudiranje u ciglani I. G. M.
"Neimar"

Za oblikovanje šupljih blokova koriste se kontinualne, vakuum prese odnosno ekstruder (Neimar, 2014), pomoću kojih se dobija praktično beskonačna traka želenog geometrijskog oblika, koja se zatim posebnim uređajem za sečenje razdvaja na manje komade definisanih dimenzija. Nakon oblikovanja, blokovi idu na sušenje. Na slici 2.8 prikazan je izlaz iz ekstrudera u ciglani I. G. M. "Neimar" i vagon sa istisnutim blokovima koji se dalje šalju na sušenje.



Slika 2.8 Prikaz ekstrudera i vagona sa oblikovanim blokovima od gline u ciglani I. G. M.
"Neimar"

Sirovinska masa koja se koristi za izradu opeke i blokova, sadrži značajnu količinu vode (prirodno primešana voda takozvana "rudnička vlaga" ili naknadno dodavana voda), koja je neophodna zbog plastičnosti odnosno obradljivosti gline, i kreće se i do 25%. Proces sušenja je neophodan proces kod procesa proizvodnje keramike oblikovane istiskivanjem, sa ciljem smanjenja sadržaja vode kako bi se dobili proizvodi sa određenom mehaničkom čvrstoćom (Živanović, 1981). U toku procesa sušenja, voda se uklanja putem dovođenja određene količine toplone energije, i to se, radi ubrzavanja procesa, obavlja u specijalnim uređajima koji se zovu sušare. U sušarama se kao medijum za sušenje koristi suv vazduh, koji je zagrejan do određene temperature. Proces sušenja je vrlo delikatan proces budući da ako se ne izabere adekvatan režim sušenja, može doći do pojave mikropukotina na proizvodima, koje smanjuju njihovu mehaničku čvrstoću (Neimar, 2014). Iz ovog razloga, proces sušenja se odvija putem postupnog zagrevanja i hlađenja u vremenskom periodu od 24 do 72 časa, u zavisnosti od mineraloškog sastava ulazne sirovine (Živanović, 1981; Neimar, 2014).

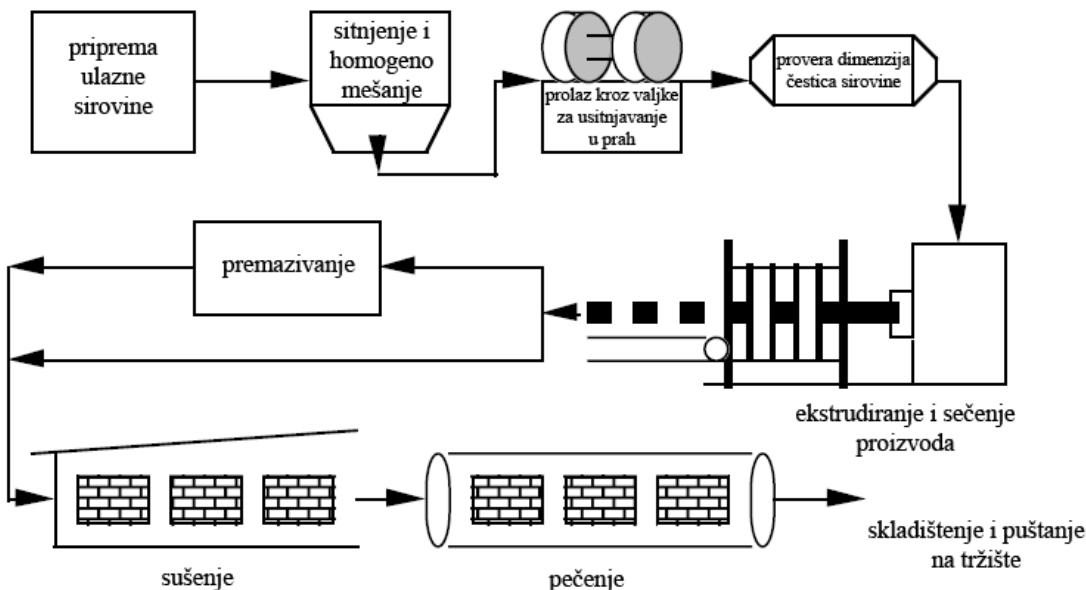
Završna operacija u tehnološkom procesu dobijanja bloka od gline je pečenje oblikovanih i osušenih blokova. Pečenje se vrši u pećima u kojima se postupno vrši porast temperature, zatim se zadata maksimalna temperatura održava u određenom vremenskom periodu, a potom dolazi do postepenog snižavanja temperature i postupnog hlađenja (Neimar, 2014). Kada se osušeni blokovi zagreju do temperature od 100°C do 200°C, iz njih se izdvaja voda koja je dodata ulaznoj sirovini pri oblikovanju, a nije u potpunosti uklonjena pri sušenju. Zatim pri zagrevanju na višim temperaturama od 300°C do 500°C, dolazi do uklanjanja "kristalne vode" iz hidroksida gvožđa prisutnih u ulaznoj sirovini i dolazi do sagorevanja prisutnih organskih materija. Zagrevanjem na temperaturama od 550°C do 800°C, dolazi do uklanjanja vode iz ulazne sirovine i dolazi do termičkog razlaganja karbonata, čime ulazna sirovina odnosno glina nepovratno gubi svoju plastičnost. Usled udaljavanja vode iz glinenih minerala i daljeg zagrevanja, dolazi do njihovog raspadanja na sastavne okside, kao što su alumijum oksid (Al_2O_3) i silicijum (IV) oksid (SiO_2), koji međusobno reaguju sa drugim oksidima kao što su kalcijum oksid (CaO), gvožđe (III) oksid (Fe_2O_3) i na taj način obrazuju niz jedinjenja kristalnog i nekristalnog tipa (staklo). Vrlo je važno prisustvo staklaste faze (niskotopiva stakla), zbog prisustva stakla u tečnom stanju na temperaturama sinterovanja blokova (kreće se između 900°C i 1050 °C), iz razloga što se na ovaj način ispunjavaju šupljine i pore u bloku koji se sinteruje sa staklastom fazom i time se pospešuje njegova mehanička čvrstoća (Živanović, 1981; Mukherjee, 2013; Neimar, 2014).

Uzveši u obzir navedene topotne režime, kompletan proces sinterovanja može da se podeli u faze: zagrevanje, sinterovanje (pečenje) i hlađenje. Vreme trajanja procesa pečenja keramike se kreće između 24 i 120 časova u zavisnosti od osobina koje se očekuju od gotovog proizvoda. Na slici 2.9 dat je primer gotovog pečenog bloka u ciglani I. G. M. "Neimar".



Slika 2.9 Primer pečenog bloka od gline na kraju proizvodnje u ciglani I. G. M. "Neimar"

Nakon proizvodnje pečenih blokova, vrši se njihovo sortiranje (ručno ili automatski) i nakon toga se vrši pakovanje određene količine gotovih blokova prema kvalitetu koji mora biti u skladu sa propisanim standardima (Neimar, 2014). Šuplji blokovi moraju da imaju upijanje vode veće od 6% i zapreminsku masu između 1200 kg/m^3 i 1900 kg/m^3 , a kvalitet bloka se najviše ogleda u mehaničkoj čvrstoći proizvoda koja treba da se kreće između 5 i 20 MPa, u zavisnosti koja marka proizvoda je u pitanju. Više o mehaničkoj čvrstoći biće objašnjeno u eksperimentalnom delu istraživanja u okviru doktorske disertacije. Na slici 2.10 prikazan je redosled prethodno objašnjениh operacija u okviru tehnološkog dobijanja šupljih blokova od gline.



Slika 2.10 Operacije u okviru dobijanja pečenog bloka od gline (BIA, 2006)

2.4 Pregled dosadašnjih istraživanja

U periodu od 2002. godine vršena su novija istraživanja širom sveta koja su se bavila proučavanjem i sumiranjem načina upotrebe otpadnog stakla kao potencijalnog resursa u proizvodnji pečenih blokova od gline i keramičkih pločica sa dodatom staklastom fazom u cilju poboljšavanja svojstava proizvoda. Prikazane su upotrebe otpadnog stakla u različitim masenim procentualnim udelima u mešavini sa glinom kako bi se pripremila visokokvalitetna opeka, odnosno blok. Procentualno dodavanje otpadnog stakla u uzorcima blokova vršeno je u rasponu od 0,5% do 94% mase stakla, međutim većina istraživanja bavila su se ispitivanjima uzorka sa otpadnim stakлом u opsegu između 5% i 20% učešća mase stakla, a veličinom čestica stakla između 45 i 600 µm. U dostupnim rezultatima testiranja uzorka, uočeno je da se sa povećanjem masenog procenta stakla u uzorcima, energija aktivacije procesa sinterovanja smanjuje, dok se viskoznost tečne faze u uzorku sa otpadnim stakлом smanjuje sa dodatkom stakla (Matteucci i dr., 2002; Hwang i dr., 2006; Chidiac i Federico, 2007; Lin, 2007; Luz i Ribeiro, 2007; Raimondo i dr., 2007; Demir, 2009; Loryuenyong i dr., 2009; Mustafi i dr., 2011; Phonphuak i dr., 2015). Hwang i dr. (2006) takođe ukazuju da je upotreba stakla sitnijih čestica (5 µm) i stakla krupnijih čestica (150 µm) u uzorcima uzrokovalo veliku razliku u vremenu sušenja uzorka.

U prethodnim studijama, rađeno je ispitivanje mehaničke čvrstoće uzorka metodom ispitivanja čvrstoće pri pritisku i metodom paranja. Dobijeni rezultati mehaničke čvrstoće varirali su između uzorka, čemu uzrok može da bude razlika između veličina čestica,

razlika u veličini uzorka, pa čak i razlika u temperaturama pečenja različitih uzoraka. Međutim, svi dobijeni rezultati ispitivane čvrstoće uzorka jasno ukazuju da čvrstoća raste sa povećanjem masenog udela stakla u uzorku, posebno između 10% i 30% masenog učešća stakla (Brown i Mackenzie, 1982; Youssef i dr., 1998; Leshina i Pavnev, 2002; Chidiac i Federico, 2007; Lin, 2007; Demir, 2009; Loryuenyong i dr., 2009; Phonphuak i dr., 2015). Demir (2009) je takođe istakao da amorfna priroda čestica otpadnog stakla poboljšava proces sinterovanja, što dovodi do postizanja bolje čvrstoće u pečenim blokovima od gline. Pečene blokove od gline, sa odgovarajućim mehaničkim svojstvima, moguće je dobiti na odgovarajućoj temperaturi pečenja upotreboom otpadnog stakla u procentualnom udelu između 15% i 30% (Loryuenyong i dr., 2009). Štaviše, (Phonphuak i dr., 2015) navode da se upotreboom 10% otpadnog stakla i pečenjem na 900°C dobija blok slične čvrstoće kao i blok napravljen samo od gline koji je pečen na 1000°C, što ukazuje na postizanje znatnih ušteda u potrošnji energetskih resursa za proces pečenja proizvoda. U drugim istraživanjima, Chidiac i Federico (2007) ukazuju na to da su čvrstoća i transportna svojstva u strukturama pora blokova od gline poboljšana dodavanjem sitnijih i krupnijih čestica drobljenog otpadnog stakla i da su dobijene mehaničke čvrstoće blokova bile mnogo veće od izmerenih čvrstoća prikazanih u radu (Lin, 2007). Leshina i Pavnev (2002) su zaključili da je optimalni maseni sadržaj stakla, koje se dodaje u mešavinu sa glinom za proizvodnju keramičkih proizvoda, između 15% i 20%, i da je na taj način moguća proizvodnja keramičkih proizvoda za zidanje čija svojstva zadovoljavaju zahteve propisanih standarda u pogledu upijanja vode i sa poboljšanim mehaničkim svojstvima. Takođe su u radu ukazali na naglo povećanje pritisne čvrstoće kod uzorka sa česticama stakla veličine između 140 i 315 µm. Međutim, prikazane vrednosti za module ruptura pokazuju sličan trend, odnosno, rupture su se povećavale sa porastom procentualnog u dela staklenog reciklata u uzorcima (Brown i Mackenzie, 1982; Matteucci i dr., 2002; Lin, 2007b; Luz i Ribeiro, 2007; Raimondo i dr., 2007; Dondi, 2009; Mustafi i dr., 2011). Brown i Mackenzie (1982) takođe su proučavali uticaj veličine čestica, plastičnost i pritisnu čvrstoću keramike sa 90% (masenih) dodatog otpadnog staklenog reciklata. Rezultat je pokazao da progresivno povećanje učešća stakla u uzorku dovodi do progresivnog povećanja stepena sinterovanja, što se direktno reflektovalo na povećanje čvrstoće uzorka. Različita veličina čestica dovela je do značajnog pogoršanja mehaničkih svojstava uzorka. Takođe, svojstva uzorka se postepeno pogoršavaju i sa povećanjem sadržaja vode u glini, dok razlike u pritisnoj čvrstoći nisu bile velike.

Sa druge strane, pored proučavanja procesa sušenja i mehaničkih svojstava uzorka, u prethodnim istraživanjima takođe je ispitivano upijanje vode i poroznost kod uzorka koji sadrže otpadno staklo. U svim predstavljenim rezultatima istraživanja, ustanovljeno je da su i upijanje vode i poroznost opadali sa porastom procentualnog u dela stakla u uzorcima, kao i sa povećanjem temperature pečenja proizvoda (Brown i Mackenzie, 1982;

Youssef i dr., 1998; Leshina i Pavnev, 2002; Matteucci i dr., 2002; Hwang i dr., 2006; Lin, 2007a; Lin, 2007b; Luz i Ribeiro, 2007; Raimondo i dr., 2007; Demir, 2009; Loryuenyong i dr., 2009; Mustafi i dr., 2011; Phonphuak i dr., 2015). Loryuenyong i dr., (2009) su takođe pokazali opadanje u procentu upijanja vode (2% – 3%) za blokove sa masenim udelom stakla između 15% i 30% i temperaturom pečenja od 1100 °C. Međutim sa 45% masenog udela otpadnog stakla u uzorku, poroznost i upijanje vode uzorka su rapidno porasli. Preliminarni eksperiment istog autora (Loryuenyong i dr., 2009) pokazao je da se sa učešćem čestica stakla manje veličine ovaj problem može izbeći. Youssef i dr. (1998) preporučuju dodavanje stakla u procentualnom masenom udelu od 33,3% i pečenje uzoraka na temperaturi od 1100°C, kako bi se dobilo upijanje vode od 5,6% za neglazirane podne keramičke pločice. U okviru radova, prikazani su rezultati eksperimentalnih snimanja uzoraka keramičkih proizvoda sa dodatim staklenim reciklatom skenirajućim elektronskim mikroskopom (*eng. Scanning Electron Microscope – SEM*) i na snimcima je uočen porast prisustva staklene faze i redukcija poroznosti uzoraka sa dodavanjem stakla (Phonphuak i dr., 2015). Takođe, mnogi autori su vršili poređenje rezultata upijanja vode, kod uzoraka sa različitim masenim udelima staklenog reciklata, sa vladajućim standardima (Youssef i dr., 1998; Leshina and Pavnev, 2002).

Istraživanja i rezultati u pogledu ispitivanja trajnosti odnosno izdržljivosti blokova sa otpadnim staklenim reciklatom su oskudni pa ih je teško porebiti. Demir (2009) je istakao da se sa infiltriranjem vode u keramičkom bloku njegova izdržljivost smanjuje. Rezultati ispitivanja koeficijenta apsorpcije, koji je često reper za procenu trajnosti, ukazuju na povećanje izdržljivosti, odnosno trajnosti uzoraka sa povećanjem udela otpadnog staklenog reciklata (Leshina i Pavnev, 2002; Chidiac i Federico, 2007; Demir, 2009).

Tokom pregleda literature, uočeno je da su različite vrste stakla korišćene kao resurs u proizvodnji pečenih blokova od gline. Otpadno staklo izdvojeno iz komunalnog otpada korišćeno je za pravljenje blokova od gline u sledećim radovima: Youssef i dr. (1998), Demir (2009) i Phonphuak i dr. (2015). Loryuenyong i dr. (2009) ispitivali su upotrebu otpadnog stakla iz staklenih zidova u proizvodnji pečenih blokova od gline. Leshina i Pavnev (2002) i Matteucci i dr. (2002) koristili su drobljenu otpadnu staklenu ambalažu, dok su Mustafi i dr. (2011) koristili otpadne staklene flaše u okviru svojih istraživanja. Chidiac i Federico (2007) su ispitivali uticaj upotrebe nereciklabilnih otpadnih stakala kao aditive u proizvodnji blokova od gline. Međutim, Hwang i dr. (2006) su zaključili da ne postoji velika razlika između upotrebe prozorskih otpadnih stakala i otpadnog stakla nakon konzumacije (najčešće staklena ambalaža) u proizvodima od gline. Dodavanja drugih vrsta stakala takođe su doprinela poboljšanju svojstava eksperimentalnih blokova. Tako je u prethodnim istraživanjima korišćeno staklo poreklom iz opasnog otpada za proizvodnju pečenih blokova od gline i za proizvodnju keramičkih pločica. Dondi i dr. (2009) ispitivali

su upotrebu otpadnog panel stakla iz televizora i personalnih računara koje je takođe mešano zajedno sa glinom. Ova vrsta otpadnih stakala sadrži visoke koncentracije olova (Pb) ili barijuma (Ba). U radu je pokazano da dodavanje od 2% (masenih) otpadnog stakla u glinu, ne narušava značajno tehnološke performanse pečenog bloka. Međutim, dodavanjem više od 5% mase otpadnog stakla mogu se značajno pogoršati mehanička svojstva proizvoda i uzrokovati takozvano "cvetanje" bloka. Rezultati u okviru ovog istraživanja nisu ukazali na postojanje značajnih emisija zagadjujućih supstanci. U istraživanjima u okviru rada (Lin, 2007a), otpadno staklo je bilo porekлом iz tankih filmova kristalnog displeja (TFT – LCD) i optičkih stakala koje je takođe mešano sa glinom, uz prisustvo pojedinih teških metala u staklu, ali se TFT – LCD može samleti u prah zajedno sa glinom. Dobijeni rezultati pokazali su manje upijanje vode, manje skupljanje eksperimentalnih uzoraka pri sušenju i povećanje mehaničke čvrstoće, što sve zajedno pokazuje da treba podstaknuti upotrebu TFT – LCD otpada kao aditiva u proizvodnji blokova od gline (Lin, 2007). U radu, Raimondo i dr. (2007), rezultati ukazuju da upotreba TV/PC katodnih cevi i ekranskog stakla u tipičnim porcelanskim proizvodima može delimično da zameni konvencionalne industrijske sirovine, bez značajnih promena u tehnološkom procesu proizvodnje. Njihovo prisustvo omogućava dobijanje dobrih tehnoloških i mehaničkih svojstava, u skladu sa najnovijim zahtevima industrijske prakse. Štaviše, oba stakla mogu da modifikuju način sinterovanja tela sa različitim stepenom efikasnosti.

Prethodne studije pokazale su da je uloženo mnogo napora i eksperimenata u istraživanje uticaja upotrebe raznih otpadnih materijala od stakla kao sekundarnog resursa u proizvodnji pečenih blokova od gline, ali su svi pokušavali da usklade svoje istraživanje sa situacijom u lokalnim područjima (Miroslavljević i Štrbac, 2018). Istraživanje u okviru ove doktorske disertacije ima za cilj da primeni sličan zadatak, ali primenom raspoloživih lokalnih materijala koji će detaljno biti opisani u narednim poglavljima, u cilju razvoja modela upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline (model) na primeru Regionalne i regionalne deponije u Novom Sadu i ciglane I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu.

3. MATERIJAL I METODE ZA RAZVOJ MODELA

Realizacija istraživanja u okviru doktorske disertacije i eksperimentalne provere rezultata istraživanja sprovedeni su na više lokacija:

- Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, Departman za fiziku, Katedra za eksperimentalnu fiziku kondenzovane materije;
- Ciglana I.G.M "Neimar" u Zrenjaninu;
- Ciglana FIT-FS d.o.o. u Bečeju ;
- Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Departman za građevinarstvo i geodeziju, Katedra za građevinske materijale, procenu stanja i sanaciju konstrukcija;
- Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, Katedra za inženjerstvo zaštite životne sredine;
- Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Departman za proizvodno mašinstvo, Katedra za metrologiju, kvalitet, pribore, alate i ekološko - inženjerske aspekte.

Kao osnovna metoda statističke obrade podataka, za potrebe proračuna cene proizvodnje 1 kg bloka od gline sa i bez staklenog reciklata i za grafičko prikazivanje dobijenih rezultata korišćen je Microsoft Excel 2010.

U tabeli 3.1 dat je pregled materijala, metoda i opreme korišćenih za razvoj modela u okviru doktorske disertacije, kao i pregled lokacija na kojima je sproveden određeni proces u okviru istraživanja.

Tabela 3.1 Pregled materijala i metoda korišćenih u okviru izrade doktorske disertacije

Proces	Materijal	Oprema	Metoda	Lokacija
Primarna sirovina za dobijanje EB sa SR	Glina	Bager	Iskopavanje bagerom	I. G. M. "Neimar", Zrenjanin
Sekundarna sirovina za dobijanje EB sa SR	Otpadna staklena ambalaža i tegle	Poliindustrijski mlin	Serijska sita prema skali Tyler	PMF ¹
Oblikovanje EB sa SR	Mešavina gline i staklenog praha u određenom procentu	Ekstruder Handle Mohlacker	Istiskivanje	Ciglana FIT – FS doo, Bečej
Sušenje EB sa SR	Oblikovani uzorci EB sa SR u formi šupljeg bloka i bez SR	Peć proizvođača Sutjeska	Sukcesivno sušenje	PMF ¹
Pečenje EB sa SR	Šuplji uzorci EB sa i bez SR	Vimselectric peć	Postepeno pečenje	PMF ¹
Mere EB sa SR	Gotovi pečeni EB sa i bez SR	Pomično merilo	Prema SRPS B.D8.011	FTN ²
Odstupanje od pravog ugla	Gotovi pečeni EB sa i bez SR	1. Pomično merilo; uglomer; lenjir 2. Kontaktни goniometar	Prema SRPS B.D8.011 Nije definisana SRPS - om	PMF ¹
Čvrstoća EB sa SR	Gotovi pečeni EB sa i bez SR	Presa proizvođača ZRMK Ljubljana, Slovenija, mernog opsega 150 i 400kN	Ispitivanje čvrstoće pri pritisku	FTN ²
Zapreminska masa	Gotovi pečeni EB sa bez SR	Analitičke terazije Mettler B-6	Metoda hidrostatičkih terazija	PMF ¹

¹Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu, Departman za fiziku, Katedra za eksperimentalnu fiziku kondenzovane materije.²Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Departman za građevinarstvo i geodeziju, Katedra za građevinske materijale, procenu stanja i sanaciju konstrukcija.

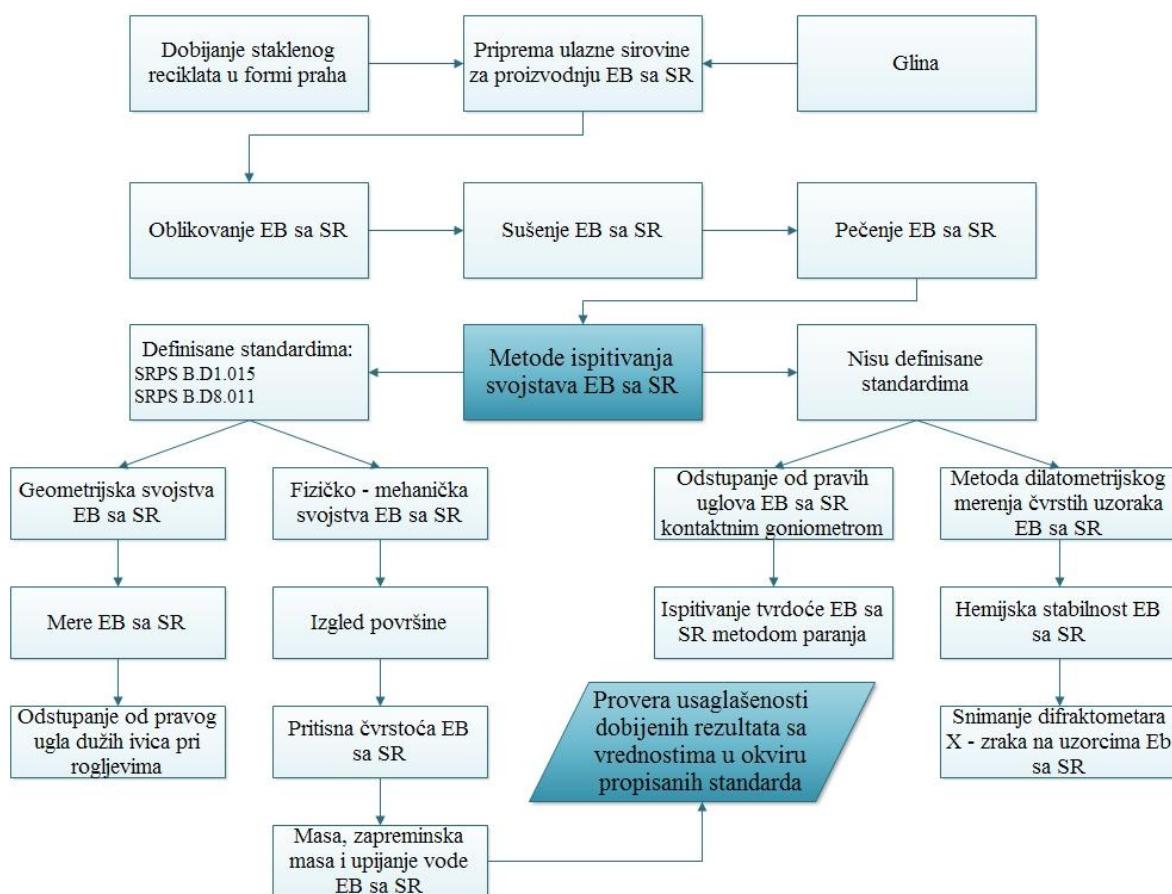
Proces	Materijal	Oprema	Metoda	Lokacija
Masa potpuno suvih uzoraka	Gotovi pečeni EB sa i bez SR	Tehnička vaga, KERN EW	Prema SRPS B.D8.011	FTN ³
Upijanje vode	Gotovi pečeni EB sa i bez SR	Tehnička vaga, KERN EW; posuda; drveni oslonac	Postupno potapanje	FTN ³
Ispitivanje tvrdoće EB sa SR	Gotovi pečeni EB sa i bez SR	Olovke za određivanje tvrdoće po Mohs-ovoj skali opsega 4-10	Metoda paranja	PMF ¹
Određivanje promene dužine EB sa SR u funkciji temperature	Gotovi pečeni EB sa i bez SR	Termomehanički analizator	Metoda dilatometrijskog merenja	PMF ¹
Hemijska stabilnost	Gotovi pečeni EB sa i bez SR	Rastvor sumporne kiseline	Potpuno potapanje uzorka na 24h	PMF ¹
Određivanja mineraloškog sastava EB sa i bez SR	Gotovi pečeni EB sa i bez SR	Uredaj za difrakciju X zraka na praškastim uzorcima	Metoda difrakcije X – zraka	PMF ¹
Definisanje i razvoj modela	Otpadna staklena amabalaža prokovana na teritoriji Regionala	Računarski alat STAN	Zakon održanja mase	FTN
LCA analiza primene modela	Proces proizvodnje EB sa i bez SR	LCA softver SimaPro 8.0.3.14	Impact 2002+	FTN ⁴

³Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, Laboratorijska za monitoring deponija, otpadnih voda i vazduha.

⁴Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Departman za proizvodno mašinstvo, Katedra za metrologiju, kvalitet, pribore, alate i ekološko - inženjerske aspekte.

3.1 Eksperimentalno dobijanje i ispitivanje geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava blokova od gline sa staklenim reciklatom

Eksperimentalni deo istraživanja u okviru doktorske disertacije, obuhvata sprovođenje svih koraka za dobijanje eksperimentalnih uzoraka pečenih blokova od gline (EB) sa različitim masenim udelima staklenog reciklata (SR) i ispitivanje uticaja prisustva staklenog reciklata na geometrijska i fizičko – mehanička svojstva dobijenih blokova i njihovu usaglašenost sa postojećim standardima u Srbiji. Slika 3.1 prikazuje neophodne korake u procesu dobijanja i ispitivanja svojstava blokova sa različitim masenim udelima staklenog praha (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%), kao delimične zamene primarnog resursa odnosno gline.



Slika 3.1 Metodologija dobijanja i ispitivanja svojstava eksperimentalnih uzoraka blokova od gline sa staklenim reciklatom kao sekundarnim resursom

Radi potvrde izvodljivosti primene predložene varijante iskorišćenja staklenog reciklata, pravljenje uzoraka eksperimentalnih blokova sa masenim udelima staklenog praha je rađeno u režimima sušenja i pečenja koji se primenjuju u proizvodnom pogonu ciglane I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu.

3.1.1 Priprema ulazne sirovine za proizvodnju eksperimentalnih uzoraka pečenih blokova od gline sa staklenim reciklatom

Ulagnu sirovinu (radnu masu) za dobijanje eksperimentalnih uzoraka sa staklenim reciklatom predstavlja mešavina gline i staklenog praha, koji je dodavan u određenom masenom procentu (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%). Glina koja je korišćena u eksperimentu je poreklom iz ciglane I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu, koja se inače koristi za proizvodnju konvencionalnih blokova od gline u okviru pomenute ciglane. Za dobijanje staklenog praha korišćeni su otpadna staklena ambalaža i tegle iz domaćinstva, kao otpad koji je u najvećem procentu prisutan u toku otpadnog stakla, poreklom iz komunalnog otpada (slika 3.2).

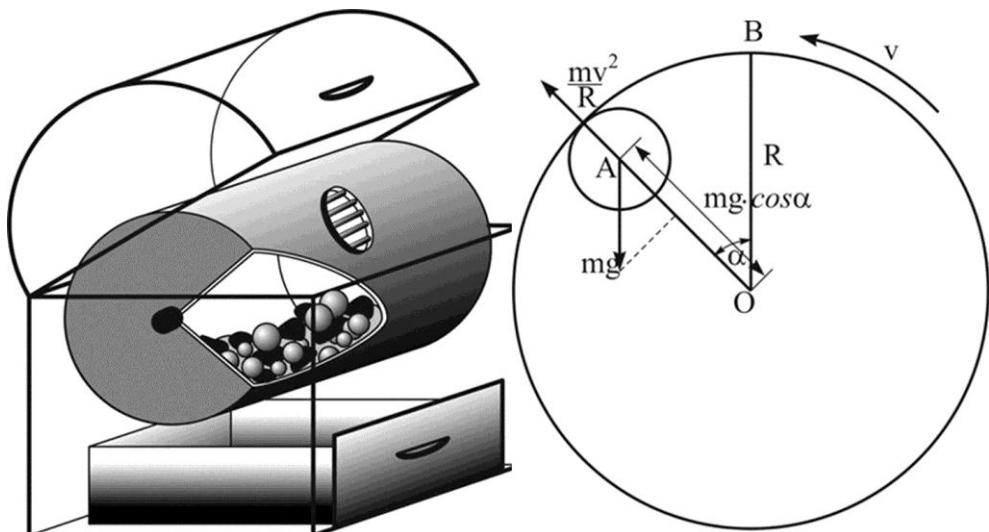


Slika 3.2 Ulazna sirovina za dobijanje staklenog praha – otpadna staklena ambalaža i tegle

3.1.2 Optimizacija procesa dobijanja staklenog reciklata u formi praha

Poznato je da svojstva prahova zavise od vrste materijala, ali i od veličine zrna praha. Samim tim, i svojstva materijala koji se dobijaju naknadnim tretmanom istih, zavise od režima dalje obrade, ali i od veličine zrna praha, što dalje određuje moguće primene materijala. U cilju upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline, urađena je preparacija staklenog praha i njegova analiza granulometrijskog sastava. Pre toga, sakupljeni su reprezentativni uzorci otpadnog ambalažnog stakla i izvršena je njihova priprema: pranje, odmeravanje mase i grubo

usitnjavanje. Nakon grubog usitnjavanja usledilo je mlevenje uzorka u poluindustrijskom mlinu. Na slici 3.3 date su šeme poluindustrijskog mlina i poprečnog preseka mlinu sa meljućim telima, koji je korišćen za dobijanje staklenog reciklata u formi praha. Zatim je urađena analiza granulometrijskog sastava dobijenog praha na mehaničkoj njihajućoj sejalici.



Slika 3.3 Šema poluindustrijskog mlini i poprečnog preseka mlini sa meljućim telima

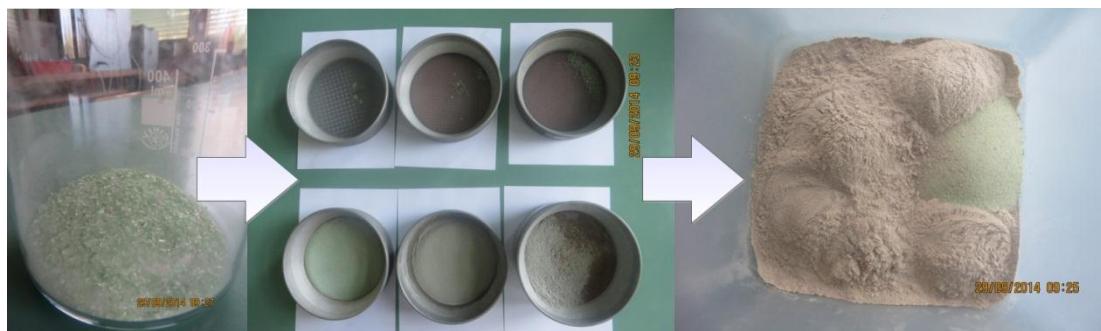
Za određivanje granulometrijskog sastava dobijenog praha korišćena je serija sita prema skali *Tyler*, sa faktorom geometrijske progresije $2^{1/2}$ i osnovnim sitom od 200 meša⁵. Dimenzije većih ili manjih otvora dobijaju se množenjem, odnosno deljenjem sa 2 i na osnovu toga se određuju vrednosti prikazane u tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Karakteristike serije sita *Tyler* sistema

Broj sita	3	4	5	6	7	8	9
Otvor [mm]	6,680	4,699	3,327	2,362	1,981	1,651	1,397
Broj sita	14	16	20	24	28	32	35
Otvor [mm]	1,168	0,981	0,833	0,701	0,589	0,495	0,417
Broj sita	42	48	60	65	80	100	115
Otvor [mm]	0,351	0,295	0,245	0,206	0,175	0,149	0,124
Broj sita	150	170	200	250	270	325	400
Otvor [mm]	0,104	0,088	0,074	0,063	0,053	0,044	0,037

Na slici 3.4 dat je prikaz laboratorijskih sita sa praškastim uzorcima nakon separacije i dobijeni stakleni reciklat u formi praha.

⁵Na jedan linearni col (25,4 mm) 200 otvora, takve debljine žice da dimenzija osnovnog otvora bude $0,074 \times 0,074$ mm.



Slika 3.4 Laboratorijska sita sa praškastim uzorcima dobijenih mlevenjem otpadnog ambalažnog stakla i dobijeni stakleni prah nakon prosejavanja

Nakon optimizacije, veća količina staklenog reciklata je obradena po odabranom režimu pripreme, mlevenja i prosejavanja radi dobijanja sitnozrnaste sekundarne sirovine koja je dalje korišćena kao sekundarni resurs u mešavini sa glinom (primarni resurs) za formiranje ulazne sirovine za dobijanje eksperimentalnih uzoraka pečenih blokova od gline sa staklenim reciklatom.

U cilju dobijanja eksperimentalnih uzoraka pečenih blokova od gline sa staklenim reciklatom urađeno je sledeće:

1. Priprema radne mase (ulazne sirovine kao mešavine gline sa staklenim reciklatom);
2. Oblikovanje eksperimentalnih uzoraka istiskivanjem;
3. Sušenje eksperimentalnih uzoraka;
4. Pečenje eksperimentalnih uzoraka;
5. Sortiranje gotovih eksperimentalnih pečenih uzoraka.

3.1.3 Priprema radne mase

Dobijeni stakleni reciklat u formi praha mešan je sa glinom do dobijanja homogene ulazne sirovine odnosno radne mase, uz minimalno dodavanje vode radi bolje homogenizacije. Stakleni prah dodavan je u masenim procentima od 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%. Pregledom literature i prethodnih istraživanja, utvrđeno je da se stakleni prah uglavnom dodavao u masenom procentu između 10% i 20%. U cilju utvrđivanja uticaja staklenog reciklata koji bi se dodao u većem procentu od, do sada dodavanih 20% masenih procenata, u okviru disertacije su pravljeni uzorci i sa 25% i 30% mase staklenog praha. Takođe, napravljeni su eksperimentalni blokovi bez staklenog reciklata (sa 0% staklenog praha) u odnosu na čija svojstva su upoređena svojstva eksperimentalnih uzoraka sa staklenim prahom, u cilju određivanja uticaja prisutva staklenog reciklata na geometrijska i fizičko – mehanička svojstva eksperimentalnih blokova. Proračun mase staklenog reciklata koji se dodaje glini u određenom procentu rađen je prema formuli 3.1:

$$m_s = \frac{X \cdot m_g}{1 - X} \quad (3.1)$$

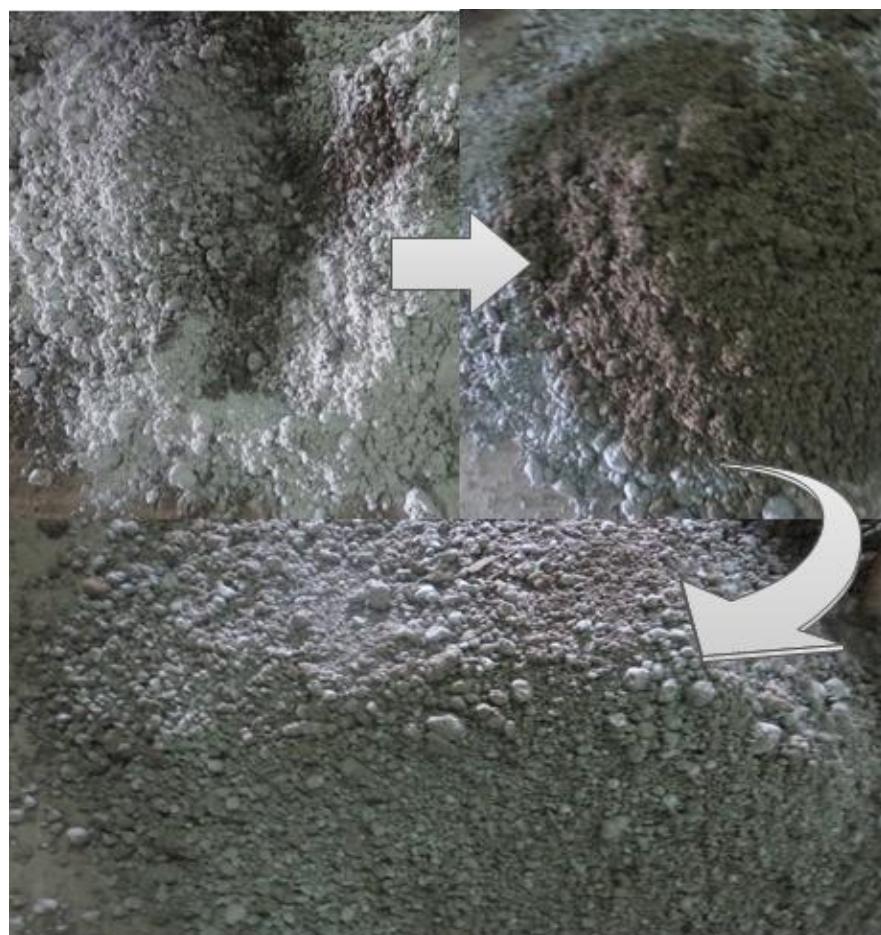
gde su:

m_s – masa staklenog praha [kg];

X – maseni procenat staklenog praha koji se dadaje u smešu sa glinom [%];

m_g – masa gline u smeši [kg].

Na slici 3.5 prikazana je pripremljena ulazna sirovina (mešavina staklenog praha i gline) za proizvodnju eksperimentalnih blokova od gline sa određenim masenim udjelom staklenog reciklata.



Slika 3.5 Radna masa (mešavina staklenog reciklata i gline) za proizvodnju eksperimentalnih uzoraka

3.1.4 Oblikovanje eksperimentalnih uzoraka

Oblikovanje eksperimentalnih uzoraka blokova od gline sa staklenim reciklatom realizovano je metodom istiskivanja pomoću vakuum prese odnosno ekstrudera. Pripremljene mešavine gline i staklenog reciklata sa masenim udelima od 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30% su pomoću vakuum prese i pritiska istiskivane u praktično beskonačnu traku sa šupljinama koja se posebnim uređajem za sečenje, postavljenim u produžetku ekstrudera, razdvaja na manje komade određenih dimenzija. Istiskivanje eksperimentalnih uzoraka prikazano je na slici 3.6.



Slika 3.6 Ekstrudiranje eksperimentalnih blokova sa različitim masenim udelima staklenog reciklata

Nakon oblikovanja eksperimentalnih uzoraka, rađeno je njihovo označavanje (slika 3.7). Označeni uzorci su dalje nošeni na sušenje.



Slika 3.7 Označavanje oblikovanih eksperimentalnih uzoraka blokova sa staklenim reciklatom

3.1.5 Sušenje eksperimentalnih uzoraka

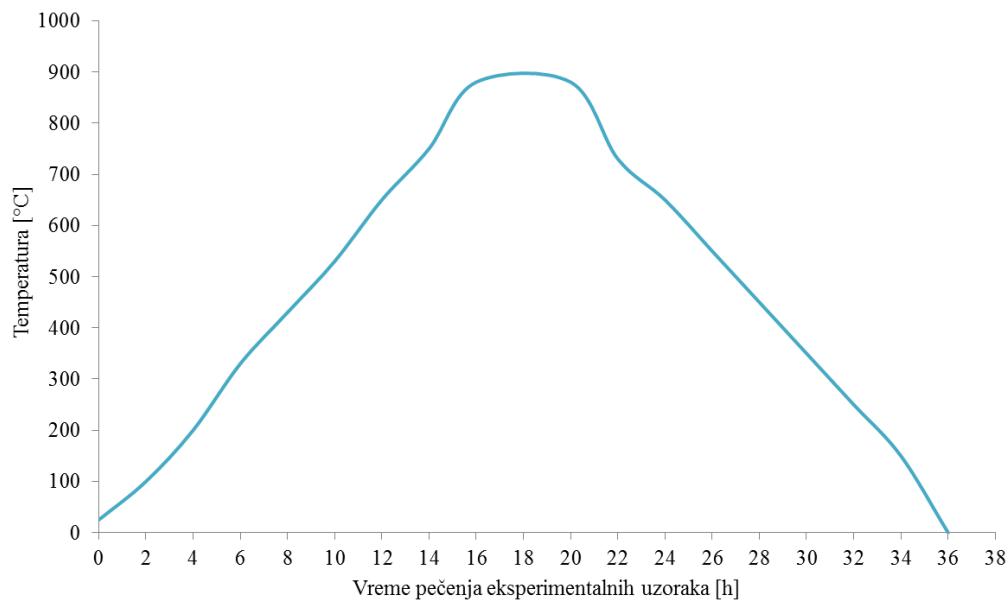
Kako je prethodno naglašeno, proces sušenja je vrlo specifičan proces, jer se u zavisnosti od mineraloškog sastava gline mora izabrati adekvatan režim sušenja, ili će u suprotnom doći do pojave mikropukotina na proizvodima koje će smanjiti njihovu mehaničku čvrstoću. Iz ovog razloga, u skladu sa preporukama tehnologa iz ciglane I. G. M. "Neimar", s obzirom da je glina iz njihove ciglane korišćena kao primarna sirovina u procesu dobijanja eksperimentalnih blokova, uzorci su sušeni po 24 časa, na temperaturama od 50°C, 70°C i 105°C, sukcesivno (slika 3.8).



Slika 3.8 Sukcesivno sušenje eksperimentalnih blokova

3.1.6 Pečenje eksperimentalnih uzoraka

Nakon oblikovanja i sušenja, sledi pečenje uzoraka koje predstavlja završnu operaciju u tehnološkom procesu dobijanja eksperimentalnih blokova od gline sa različitim masenim udelima staklenog reciklata. Pečenje eksperimentalnih uzoraka je sprovedeno u *Vimselectric* peći. Porast temperature je obezbeđen zadatim brzinama do postizanja maksimalne temperature od 880°C u skladu sa režimom pečenja proizvoda u ciglani I. G. M. "Neimar". Na slici 3.9 prikazan je dijagram pečenja eksperimentalnih uzoraka. Uzorci se stavljuju u peć na temperaturi okruženja, a zatim se na kraju drugog sata u peći postiže temperatura od 100°C, naredna dva sata temperatura se podiže do 200°C, pa zatim u razmacima od po dva sata temperatura se kreće redom, 330°C, 430°C, 530°C, 650°C, 750°C i posle šesnaest sati provedenih u peći, uzorci se peku na maksimalnoj zadatoj temperaturi od 880°C i to naredna četiri sata. Nakon dvadeset sati postepenog povećavanja temperature u peći i dostizanja maksimuma, naredna dva sata se temperatura spušta na 730°C, pa naredna dva na 650°C i dalje se sprovodi linearno hlađenje. Proses postepenog pečenja traje ukupno trideset šest sati.



Slika 3.9 Režim pečenja eksperimentalnih uzoraka blokova od gline sa staklenim reciklatom

Na slici 3.10 prikazani su eksperimentalni uzorci u peći i njihov izgled nakon postupka pečenja.



Slika 3.10 Prikaz gotovih pečenih eksperimentalnih blokova sa 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30% masenog udela staklenog reciklata

Nakon dobijanja eksperimentalnih uzoraka blokova od gline sa staklenim reciklatom, izvršeno je njihovo sortiranje u sedam serija sa po pet uzoraka, kako bi se na adekvatan, i standardima propisan način, sprovedeo eksperimentalno ispitivanje geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava dobijenih eksperimentalnih uzoraka. Takođe, sprovedeno je i eksperimentalno ispitivanje svojstava eksperimentalnih uzoraka određenim metodama čija primena nije definisana u okviru standarda, ali se smatraju značajnim u proveri validnosti i mogućnosti upotrebe staklenog reciklata, kao sekundarnog resursa, u proizvodnji blokova od gline.

3.1.7 Ispitivanje geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava dobijenih eksperimentalnih uzoraka u skladu sa propisanim standardima

S obzirom na to da se svojstva materijala mogu definisati isključivo ispitivanjima, postoji niz SRPS standarda koji utvrđuju vrste, oblike, mere i svojstva pojedinih keramičkih proizvoda, a postoje i standardi koji tretiraju metode ispitivanja ovih materijala (Muravlјov, 1995; Neimar, 2014). Da bi blokovi od gline mogli da se plasiraju na tržište, moraju se ispitati svojstva blokova u skladu sa standardima: SRPS B.D1.015 i SRPS B.D8.011. SRPS B.D8.011 je standard koji tretira metode ispitivanja pečenih blokova od gline, a standard SRPS B.D1.015 utvrđuje vrste, oblike, mere i svojstva blokova od gline (SRPS B.D8.011, 2002; SRPS B.D1.015, 2003; Izveštaj, 2014). U cilju provere kvaliteta dobijenih eksperimentalnih blokova i provere da li su zadovoljeni uslovi definisani pomenutim standardima, ispitane su geometrijska i fizičko – mehanička svojstva uzoraka eksperimentalnih blokova. Postupak ispitivanja geometrijskih svojstava eksperimentalnih blokova rađen je na deset uzoraka, dok je ispitivanje fizičko – mehaničkih svojstava rađeno na pet uzoraka iz svake serije eksperimentalnih blokova, u skladu sa preporukama iz literature (Muravlјov, 1995; Izveštaj, 2014). Kao merodavna, gleda se prosečna vrednost koja se upoređuje sa referentnim vrednostima propisanim za određeno svojstvo proizvoda (Muravlјov, 1995). U tabeli 3.3 prikazano je označavanje svake serije eksperimentalnih uzoraka koje će se dalje koristiti prilikom prikazivanja i tumačenja eksperimentalnih rezultata.

Tabela 3.3 Prikaz načina označavanja eksperimentalnih uzoraka blokova

Redni broj serije eksperimentalnih uzoraka	Naziv eksperimentalnog uzorka	Oznaka	Naziv serije eksperimentalnih uzoraka	Oznaka
1.	Uzorak br. 1 sa 0% masenog udela SR	0/1	Uzorci sa 0% masenog udela staklenog praha	EB0
	Uzorak br. 2 sa 0% masenog udela SR	0/2		
	Uzorak br. 3 sa 0% masenog udela SR	0/3		
	Uzorak br. 4 sa 0% masenog udela SR	0/4		
	Uzorak br. 5 sa 0% masenog udela SR	0/5		
2.	Uzorak br. 1 sa 5% masenog udela SR	5/1	Uzorci sa 5% masenog udela staklenog praha	EB5
	Uzorak br. 2 sa 5% masenog udela SR	5/2		
	Uzorak br. 3 sa 5% masenog udela SR	5/3		
	Uzorak br. 4 sa 5% masenog udela SR	5/4		
	Uzorak br. 5 sa 5% masenog udela SR	5/5		
3.	Uzorak br. 1 sa 10% masenog udela SR	10/1	Uzorci sa 10% masenog udela staklenog praha	EB10
	Uzorak br. 2 sa 10% masenog udela SR	10/2		
	Uzorak br. 3 sa 10% masenog udela SR	10/3		
	Uzorak br. 4 sa 10% masenog udela SR	10/4		
	Uzorak br. 5 sa 10% masenog udela SR	10/5		
4.	Uzorak br. 1 sa 15% masenog udela SR	15/1	Uzorci sa 15% masenog udela staklenog praha	EB15
	Uzorak br. 2 sa 15% masenog udela SR	15/2		
	Uzorak br. 3 sa 15% masenog udela SR	15/3		
	Uzorak br. 4 sa 15% masenog udela SR	15/4		
	Uzorak br. 5 sa 15% masenog udela SR	15/5		

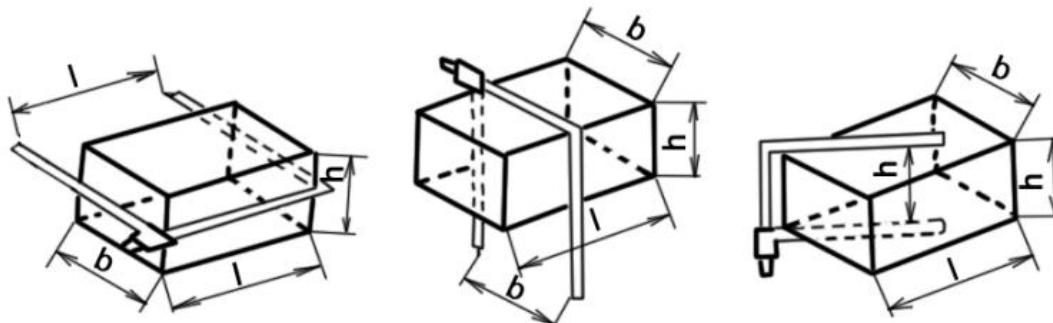
Redni broj serije eksperimentalnih uzoraka	Naziv eksperimentalnog uzorka	Oznaka	Naziv serije eksperimentalnih uzoraka	Oznaka
5.	Uzorak br. 1 sa 20% masenog udela SR	20/1	Uzorci sa 20% masenog udela staklenog praha	EB20
	Uzorak br. 2 sa 20% masenog udela SR	20/2		
	Uzorak br. 3 sa 20% masenog udela SR	20/3		
	Uzorak br. 4 sa 20% masenog udela SR	20/4		
	Uzorak br. 5 sa 20% masenog udela SR	20/5		
6.	Uzorak br. 1 sa 25% masenog udela SR	25/1	Uzorci sa 25% masenog udela staklenog praha	EB25
	Uzorak br. 2 sa 25% masenog udela SR	25/2		
	Uzorak br. 3 sa 25% masenog udela SR	25/3		
	Uzorak br. 4 sa 25% masenog udela SR	25/4		
	Uzorak br. 5 sa 25% masenog udela SR	25/5		
7.	Uzorak br. 1 sa 30% masenog udela SR	30/1	Uzorci sa 30% masenog udela staklenog praha	EB30
	Uzorak br. 2 sa 30% masenog udela SR	30/2		
	Uzorak br. 3 sa 30% masenog udela SR	30/3		
	Uzorak br. 4 sa 30% masenog udela SR	30/4		
	Uzorak br. 5 sa 30% masenog udela SR	30/5		

Geometrijska svojstva eksperimentalnih uzoraka blokova od gline

U okviru ispitivanja geometrijskih svojstava eksperimentalnih uzoraka blokova od gline, određene su mere uzoraka (dužina, visina, širina) i odstupanje od pravog ugla dužih ivica pri rogljevima. S obzirom na to da su uzorci pravljeni za laboratorijska eksperimentalna testiranja, nazivne vrednosti⁶ su definisane da budu sledeće: 40 x 25 x 40 mm. U odnosu na date referentne vrednosti rađeno je poređenje dimenzija svih serija dobijenih eksperimentalnih uzoraka blokova od gline u cilju određivanja odstupanja od nazivne vrednosti i određivanja odstupanja od pravog ugla.

Mere eksperimentalnih uzoraka blokova od gline

Mere elemenata (dužina, visina i širina) proveravaju se na deset uzoraka. Dužina i širina se mera na sredini dve naspramne strane, dok se visina meri na dva dijagonalna naspramna roglja (slika 3.11). Za svaku meru merodavna je aritmetička sredina iz dva merenja, koja je zaokružena na 1 mm (Muravlјov, 1995). Izmerene vrednosti moraju da budu u skladu sa tolerancijama koje su propisane standardom SRPS B.D1.015.



Slika 3.11 Proveravanje dimenzija keramičkih materijala (Muravlјov, 1995)

Za određivanje mera eksperimentalnih uzoraka, korišćeno je digitalno pomicno merilo. U tabeli 3.4 prikazane su izmerene vrednosti mera eksperimentalnih uzoraka blokova od gline.

⁶ Termin nazivne vrednosti je definisan u okviru standarda SRPS B.D8.011 i odnosi se na definisane referentne dimenzije.

Tabela 3.4 Dimenzije eksperimentalnih uzoraka blokova od gline

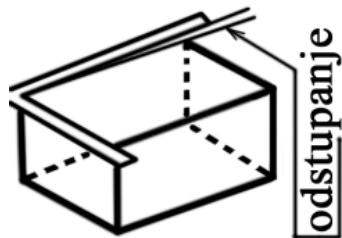
Mera	Dužina [mm]	Visina [mm]	Širina [mm]
Nazivna vrednost	40	25	40
Oznaka uzorka	Izmerene vrednosti		
Uzorci sa 0% masenog udela staklenog praha			
0/1	38,21	25,17	39,80
0/2	38,68	25,07	39,33
0/3	38,55	25,06	39,73
0/4	39,82	25,19	39,73
0/5	39,68	25,07	39,62
0/6	39,62	25,18	38,95
0/7	39,34	25,15	38,89
0/8	39,80	25,09	39,56
0/9	39,92	25,13	39,39
0/10	40,01	25,00	38,88
Aritmetička vrednost	39,36	25,11	38,88
Uzorci sa 5% masenog udela staklenog praha			
5/1	40,21	25,21	39,86
5/2	40,08	25,01	40,29
5/3	40,10	24,92	39,98
5/4	39,98	25,02	39,88
5/5	39,86	24,93	40,13
5/6	39,44	25,06	39,62
5/7	38,85	25,19	39,34
5/8	39,44	25,07	39,80
5/9	39,68	25,18	39,62
5/10	40,02	25,15	40,20
Aritmetička vrednost	39,77	25,07	39,87

Mera	Dužina [mm]	Visina [mm]	Širina [mm]
Nazivna vrednost	40	25	40
Oznaka uzorka	Izmerene vrednosti		
Uzorci sa 10% masenog udela staklenog praha			
10/1	40,10	25,14	39,95
10/2	39,98	24,72	39,59
10/3	39,86	24,91	39,65
10/4	39,95	25,26	40,59
10/5	39,59	24,93	39,55
10/6	39,44	25,07	40,14
10/7	38,85	25,18	39,60
10/8	39,44	25,18	39,34
10/9	40,02	25,15	39,80
10/10	40,02	24,90	40,11
Aritmetička vrednost	39,73	25,04	39,83
Uzorci sa 15% masenog udela staklenog praha			
15/1	39,59	24,81	39,92
15/2	39,44	25,03	39,73
15/3	38,85	24,90	40,14
15/4	39,95	25,16	39,60
15/5	40,18	24,86	39,70
15/6	40,59	25,62	39,76
15/7	39,82	25,32	39,86
15/8	39,68	24,55	40,11
15/9	39,95	24,93	40,14
15/10	40,20	25,07	39,86
Aritmetička vrednost	39,83	25,03	39,88
Uzorci sa 20% masenog udela staklenog praha			
20/1	39,95	25,31	40,01
20/2	40,20	25,39	39,95
20/3	39,95	25,62	40,18
20/4	40,18	25,32	40,11
20/5	40,59	25,59	40,14
20/6	39,82	25,39	39,76
20/7	39,70	25,62	39,86
20/8	39,76	25,32	40,02
20/9	39,86	24,55	40,14
20/10	40,02	25,16	40,38
Aritmetička vrednost	40,00	25,33	40,06

Mera	Dužina [mm]	Visina [mm]	Širina [mm]
Nazivna vrednost	40	25	40
Oznaka uzorka	Izmerene vrednosti		
Uzorci sa 25% masenog udela staklenog praha			
25/1	40,20	24,99	39,95
25/2	39,80	25,01	39,66
25/3	39,66	25,16	39,76
25/4	39,72	25,14	39,86
25/5	39,65	25,16	39,91
25/6	40,59	24,92	39,95
25/7	39,55	25,02	40,18
25/8	40,14	25,18	40,34
25/9	39,95	25,15	39,76
25/10	40,18	24,64	40,10
Aritmetička vrednost	39,94	25,04	39,95
Uzorci sa 30% masenog udela staklenog praha			
30/1	39,95	25,08	40,07
30/2	40,18	25,18	40,07
30/3	40,10	25,20	40,18
30/4	40,02	25,09	40,13
30/5	40,24	25,10	40,34
30/6	39,80	24,92	39,76
30/7	39,66	25,02	39,86
30/8	39,72	25,73	39,95
30/9	38,98	25,55	40,18
30/10	38,90	24,76	39,88
Aritmetička vrednost	39,76	25,16	40,04

Odstupanje od pravog ugla dužih ivica pri rogljevima eksperimentalnih uzoraka blokova od gline

Pravilnost oblika keramičkih proizvoda proverava se merenjem upravnosti njegovih ivica (slika 3.12). Dozvoljeno odstupanje od pravog ugla dužih ivica elemenata najčešće je 3 ili 5 mm, zavisno od vrste elementa i propisanog standarda (Muravlјov, 1995).



Slika 3.12 Merenje upravnosti ivica (Muravlјov, 1995)

U tabeli 3.5 prikazane su vrednosti izmerenih odstupanja od pravog ugla dužih ivica za po jedan nasumično odabran uzorak iz svake serije uzoraka.

Tabela 3.5 Odstupanje od pravog ugla dužih ivica pri rogljevima eksperimentalnih uzoraka blokova od gline

Serija uzorka	Odstupanje od pravog ugla [mm]
EB0	1,5
EB5	2,0
EB10	1,5
EB15	0,2
EB20	0,5
EB25	1,0
EB30	1,0

Fizičko – mehanička svojstva eksperimentalnih uzoraka blokova od gline

Izgled površine

Prsline i pukotine na površini uzoraka se utvrđuju vizuelnim pregledom. Za svaki proizvod propisani su konkretni uslovi koji moraju biti zadovoljeni, pa je tako za pečene blokove od gline propisano da površine uzoraka moraju biti brazdane i crvene boje (Muravlјov, 1995; Izveštaj, 2014).

Čvrstoća eksperimentalnih uzoraka blokova od gline pri pritisku (pritisna čvrstoća)

Mehanička svojstva keramičkih proizvoda predstavljaju funkciju zapreminske mase odnosno poroznosti. Sa povećanjem zapreminske mase, odnosno smanjenjem poroznosti, čvrstoća keramičkih proizvoda raste. Takođe, mehaničko svojstvo materijala karakteriše

njihovo ponašanje pri izlaganju dejstvu spoljnih sila. Pri delovanju spoljnih sila na neko telo, ono se deformiše tako što u samom materijalu dolazi do promene rastojanja između molekula, a pošto unutrašnje sile između molekula teže da zadrže prvobitni raspored molekula, dolazi do određenog naponskog stanja (naprezanja). Ako se naprezanje izmeri u određenom trenutku delovanja sile na telo, ta mera naprezanja, karakteristična za dejstvo sile u datom trenutku, predstavlja napon (unutrašnja sila u materijalu, sračunata na jedinicu površine preseka u kome sila deluje). Maksimalna veličina napona neposredno pre loma materijala naziva se čvrstoća materijala (sposobnost materijala da se suprostavi unutrašnjim naponima tj. deformacijama i slomu, koji se u materijalu javljaju kada na njega deluju spoljašnje sile i drugi činioci) (Muravlјov, 1995).

Mehanička svojstva šupljeg bloka od gline najčešće se ocenjuju na bazi ispitivanja čvrstoće pri pritisku, na osnovu koje se istovremeno definiše marka određenog proizvoda. Pod čvrstoćom pri pritisku podrazumeva se granični napon koji se javlja u uzorku koji je izložen aksijalnim silama pritiska, neposredno pred lom. Određuje se eksperimentalno, merenjem sile loma, dimenzija poprečnog preseka uzorka i pomoću izraza 3.2 (Muravlјov, 1995; Izveštaj, 2014):

$$f_b = \frac{F}{a \cdot b} \quad 3.2$$

gde su:

f_b – čvrstoća pri pritisku [MPa];

F – sila loma pri pritisku (granična sila) [kN];

$a \cdot b$ – površina poprečnog preseka uzorka [mm^2].

Čvrstoća pri pritisku kod blokova od gline se određuje na bazi ispitivanja pet uzoraka, a naležne površine uzorka se obrađuju cementnom kašom debljine najviše 5 mm, kako bi se izravnale površine uzorka i ispunili uslovi paralelnosti i horizontalnosti (Muravlјov, 1995).

Postupak merenja čvrstoće pri pritisku sproveden je na po pet uzoraka iz svake serije eksperimentalnih blokova. Kao merodavna, uzeta je prosečna vrednost čvrstoće za svaku seriju uzoraka. Izmerene su dimenzije površina uzorka bloka na koje je vršen pritisak i vrednosti su date u tabeli 3.6. Izračunata je površina preko koje se prenosila sila, da bi se nakon merenja sile loma, na kraju mogla izračunati čvrstoća uzorka pri pritisku.

Tabela 3.6 Površina eksperimentalnih uzoraka blokova preko koje se prenosi sila loma

Oznaka uzorka	a [mm]	b [mm]	a·b [mm ²]
EB0			
0/1	39,80	25,17	1001,77
0/2	39,33	25,07	986,00
0/3	39,73	25,06	995,64
0/4	39,73	25,19	1000,80
0/5	39,62	25,07	993,27
EB5			
5/1	39,86	25,21	1004,87
5/2	40,29	25,01	1007,65
5/3	39,98	24,92	996,30
5/4	39,88	25,02	997,80
5/5	40,13	24,93	1000,44
EB10			
10/1	39,95	25,14	1004,34
10/2	39,59	24,72	978,66
10/3	39,65	24,91	987,68
10/4	40,59	25,26	1025,30
10/5	39,55	24,93	985,98
EB15			
15/1	39,92	24,81	990,42
15/2	39,73	25,03	994,44
15/3	40,14	24,90	999,49
15/4	39,60	25,16	996,34
15/5	39,70	24,86	986,94
EB20			
20/1	40,01	25,31	1012,65
20/2	39,95	25,39	1014,33
20/3	40,18	25,62	1029,41
20/4	40,11	25,32	1015,59
20/5	40,14	25,59	1027,18

Oznaka uzorka	a [mm]	b [mm]	a·b [mm ²]
EB25			
25/1	39,95	24,99	998,35
25/2	39,66	25,01	991,90
25/3	39,76	25,16	1000,36
25/4	39,86	25,14	1002,08
25/5	39,91	25,16	1004,14
EB30			
30/1	40,07	25,08	1004,96
30/2	40,07	25,18	1008,96
30/3	40,18	25,20	1012,54
30/4	40,13	25,09	1006,86
30/5	40,34	25,10	1012,53

Pre ispitivanja čvrstoće uzoraka, izvršena je njihova priprema. Šupljine uzorka napunjene su stiroporom, a zatim je nanet tanak sloj maltera kako bi se maksimalno izravnale ivice i površine na koju će se vršiti pritisak (slika 3.13).



Slika 3.13 Priprema uzoraka za ispitivanje čvrstoće pri pritisku

Za ispitivanje čvrstoće pri pritisku korišćena je presa proizvođača ZRMK Ljubljana, Slovenija, mernog opsega 150 i 400 kN (slika 3.14). Ispitivanje je sprovedeno u okviru mernog opsega od 150 kN i obavljeno je nanošenjem statičkog opterećenja, sa prirastom sile od cca 0,3 MPa/s (kratkotrajno statičko opterećenje).



Slika 3.14 Uređaj za merenje sile loma pri opterećenju na pritisak – hidraulična presa

U zavisnosti od položaja blokova u konstrukciji, blokovi se mogu podeliti na blokove za zidanje i blokove za međuspratne konstrukcije. Blokovi za zidanje takođe mogu biti obični i fasadni. Zavisno od toga da li imaju statičku funkciju, dele se na blokove za noseće zidove i blokove za pregradne zidove. Shodno tome, definisane su nazivne marke i uslovi za blokove u zavisnosti od područja primene i prikazane su u tabeli 3.7 (Peulić, 2002).

Tabela 3.7 Uslovi za marke šupljih opeka i blokova (Peulić, 2002; SRPS B.D1.015)

Marka opeke [bar]	Čvrstoća pri pritisku [MPa]	
	prosečna	najmanja pojedinačna
M 20 ⁷	2,0	1,6
M 50	5,0	4,0
M 75	7,5	6,0
M 100	10	8,0
M 150	15	12
M 200	20	16

⁷ Marka M 20 postoji samo kod nefasadnih šupljih opeka.

Izračunate srednje vrednosti pritisne čvrstoće eksperimentalnih uzoraka biće upoređene sa vrednostima svih marki šupljih blokova datim u tabeli 3.7 i u skladu sa tim utvr]eno je da li izmerene vrednosti čvrstoće na pritisak eksperimentalnih uzoraka zadovoljavaju propisane i standardom definisane vrednosti.

Masa, zapreminska masa i upijanje vode eksperimentalnih uzoraka blokova od gline

Masa građevinske keramike, koja se inače najčešće izražava u vidu zapreminske mase, predstavlja značajnu karakteristiku koja u opštem slučaju utiče na niz drugih svojstava keramičkih proizvoda. Kod običnih opeka i blokova za zidanje, zapreminske mase (gustine) se kreću od 1400 – 1900 kg/m³. Date zapreminske mase odgovaraju materijalima u suvom stanju, što podrazumeva da se njihovo određivanje vrši tek nakon propisanog sušenja uzorka (Muravljev, 1995; Peulić, 2002), koje je opisano u okviru teorijskih osnova istraživanja. Gustina kermačkih proizvoda može da se odredi direktnom metodom ili metodom hidrostatičkih terazija (Muravljev, 1995).

Zapreminska masa (gustina) eksperimentalnih uzoraka blokova od gline određivana je pomoću metode hidrostatičkih terazija i izračunata je na osnovu izraza prikazanog u formuli 3.2:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{m_s}{m_1 - m_2} \quad (3.2)$$

gde su:

ρ – zapreminska masa (gustina) uzorka [g/cm³];

ρ_0 – gustina vode $\rho_0=1$ [g/cm³];

m_s – masa suvog uzorka [g];

m_1 – masa uzorka posle potapanja u vodi [g];

m_2 – masa uzorka potopljenog u sudu sa vodom (prividna masa) [g].

U tabeli 3.8 date su mase suvih uzoraka koji su korišćeni za izračunavanje gustine za eksperimentalne uzorce blokova od gline sa 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30% masenog udela staklenog reciklata.

Tabela 3.8 Mase suvih uzorka kod određivanja gustine pomoću hidrostatičkih terazija

Oznaka serije uzorka	EB0	EB5	EB10	EB15	EB20	EB25	EB30
Masa suvog uzorka [g]	4,86590	5,54480	6,52745	4,23920	6,31020	4,74740	3,93415

Svojstvo upijanja vode predstavlja funkciju poroznosti keramičkih materijala i zavisi isključivo od otvorene poroznosti materijala, što je u slučaju keramike u mnogome uslovljeno temperaturom pečenja. Šuplji blokovi, koji se svrstavaju u porozne keramičke proizvode, treba da imaju upijanje vode između 6 i 20 % (Muravljev, 1995; SRPS B.D1.015, 2003).

Pod upijanjem vode podrazumeva se sposobnost materijala da se natopi vodom i da tu vodu zadrži u svojoj masi (Peulić, 2002). Za većinu keramičkih materijala, masa upijene vode se utvrđuje merenjem razlike u masi uzorka koji je zasićen vodom i suvog uzorka, što je prikazano formulom 3.3:

$$W = m_v - m_s \quad (3.3)$$

gde su:

W – masa upijene vode [g];

m_v – masa uzorka zasićenog vodom [g];

m_s – masa suvog uzorka [g].

Upijanje vode obično se izražava u procentima, a definiše se kao odnos mase upijene vode i mase suvog uzorka što je prikazano formulom 3.4 (Muravljev, 1995):

$$U = \frac{W}{m_s} = \frac{m_v - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

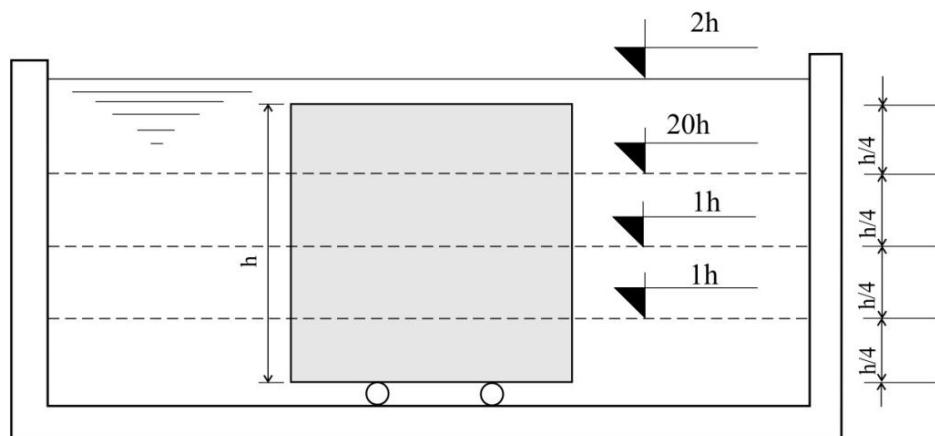
gde su:

U – procenat upijanja vode [%];

m_v – masa uzorka zasićenog vodom [g];

m_s – masa suvog uzorka [g].

U okviru ispitivanja svojstva upijanja vode eksperimentalnih uzoraka blokova od gline primjenjen je postupak postupnog potapanja, koji se inače najčešće koristi kod ispitivanja upijanja vode kod šupljih keramičkih blokova. Upijanje vode ispitano je na pet uzoraka iz svake serije uzoraka, koji se prethodno suše do konstantne mase. Metoda ispitivanja upijanja vode postupnim potapanjem prikazana je na slici 3.15.



Slika 3.15 Postupak ispitivanja upijanja vode postupnim potapanjem uzorka (Muravljev, 1995)

Metoda postupnog potapanja uzorka sastozi se iz sledećih koraka (Muravljev, 1995; SRPS B.D8.011, 2002):

1. Merenje mase potpuno suvog uzorka (m_s);
2. Uzorak staviti na određeni oslonac i potopiti $\frac{1}{4}$ uzorka na period od 1h;
3. Nakon 1h, potopiti $\frac{1}{2}$ uzorka na još 1h;
4. Nakon 1h, $\frac{3}{4}$ uzorka držati potopljeno 20h;
5. Nakon 20h potopiti ceo uzorak i držati ga potopljenog još 2h;
6. Izmeriti masu uzorka zasićenog vodom (m_v);
7. Nakon merenja m_v , uzorak ponovo u potpunosti potopiti i ostaviti 24h;
8. Izmeriti novu m_v , i postupak ponavljati dok se ne dobije konstantna m_v .

Na ovaj način utvrđuje se maksimalna količina vode koju materijal može da upije. Smatra se da je materijal zasićen vodom kada se pri uzastopnom merenju mase materijala izloženog delovanju vode konstataže da se ona više ne menja odnosno da je m_v konstantna. U tabeli 3.9 prikazane su vrednosti izmerenih masa potpuno suvih (m_s) uzorka iz svih serija eksperimentalnih blokova na kojima je sprovedena metoda postupnog potapanja.

Tabela 3.9 Mase potpuno suvih uzorka

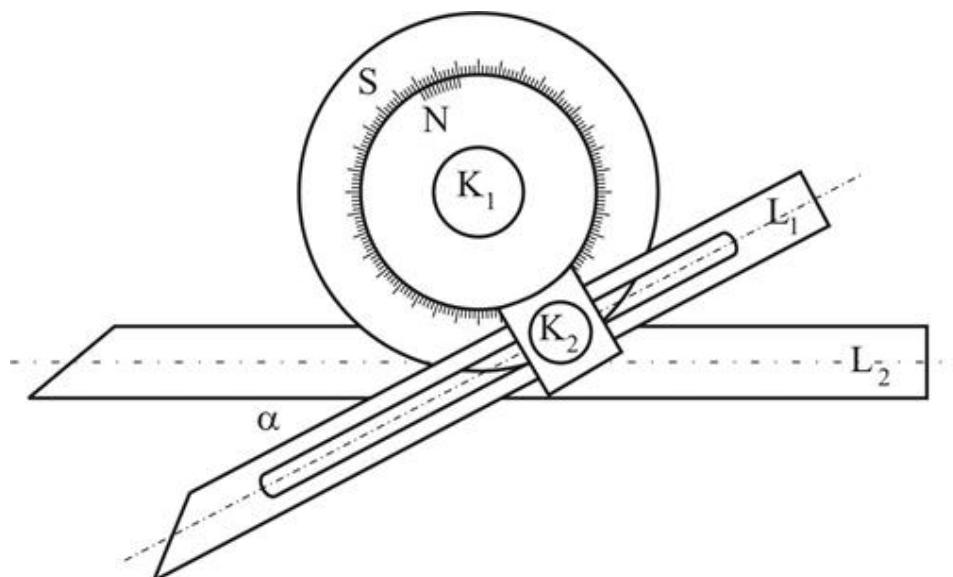
Oznaka uzorka	Masa potpuno suvog uzorka (m_s) [g]
EB0	
0/1	51,48
0/2	51,82
0/3	49,88
0/4	49,99
0/5	54,01
EB5	
5/1	55,64
5/2	54,90
5/3	54,52
5/4	54,98
5/5	51,83
EB10	
10/1	52,21
10/2	52,42
10/3	51,91
10/4	50,07
10/5	52,06
EB15	
15/1	52,97
15/2	51,38
15/3	51,96
15/4	51,08
15/5	51,52
EB20	
20/1	55,77
20/2	57,01
20/3	56,99
20/4	56,87
20/5	51,10
EB25	
25/1	50,37
25/2	53,68
25/3	52,00
25/4	52,08
25/5	52,62

Oznaka uzorka	Masa potpuno suvog uzorka (m_s) [g]
EB30	
30/1	53,30
30/2	52,35
30/3	54,71
30/4	53,94
30/5	53,48

3.1.8 Metode ispitivanja fizičko – mehaničkih svojstava eksperimentalnih uzoraka koje nisu definisane propisanim standardom

Merenje odstupanja od pravih uglova uzorka kontaktnim goniometrom

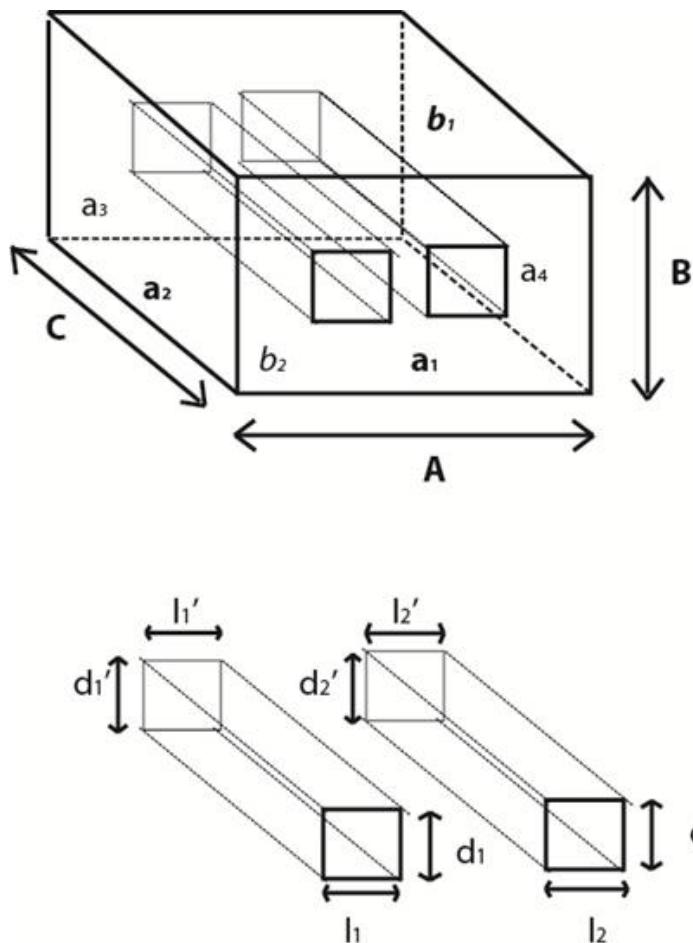
U cilju podrobnije provjere geometrijskih svojstava eksperimentalnih uzoraka, korišćena je i metoda merenja uglova kontaktnim goniometrom koji je šematski prikazan na slici 3.16.



Slika 3.16 Šema kontaktnog goniometra

Kontaktni goniometar se sastoji od kružne skale, sa nonijusom N, sa preciznošću od 20 uglovnih minuta i sa optičkom skalom. Prikazan tip goniometra ima i kočnicu K2, čiji je zadatak da fiksira položaj lenjira u odnosu na skalu. Oba lenjira, L1 i L2, pokretna su po svojoj dužini i sa jednog kraja su koso zasečena, što omogućava lako zahvatanje objekta sa svih strana. Lenjur L1 je prosečen, tako da lenjur L2 ne klizi preko lenjira L1 kao kod makaza, već prolazi kroz njega što u znatnoj meri olakšava merenje uglova između pljosni i ivice. Pljosan se položi na lenjur L1, a lenjur L2 se naslanja na ivicu uzorka.

Oznake koje su korišćene za definisanje merenih uglova prikazane su na slici 3.17.



Slika 3.17 Šema oznaka korišćenih u tabeli 3.9

Ispitivanje tvrdoće uzorka metodom paranja

Metoda paranja je jedna od najstarijih i najjednostavnijih metoda za određivanje kvaliteta i otpornosti materijala. Zasniva se na pojavi da tvrdi kristal para mekši, a da mekši kristal ne može parati tvrdi. Skalu za određivanje tvrdoće ovom metodom je uveo Mos (eng. Mohs), koja po njemu i nosi ime (tabela 3.10).

Tabela 3.10 Mosova skala tvrdoće minerala

Mineral	Sastav	Tvrdoća po Mosu
Talk	$Mg_3(OH) \cdot (Si_4O_{10})$	1
Gips	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2
Halit	NaCl	2
Kalcit	$CaCO_3$	3
Fluorit	CaF_2	4
Apatit	$Ca_5FC(PO_4)_3$	5
Ortoklas	$KaLO_2(SiO_2)_3$	6
Kvarc	SiO_2	7
Topaz	$Al_2(FOH)_2 \cdot (SiO_4)$	8
Korund	Al_2O_3	9
Dijamant	C	10

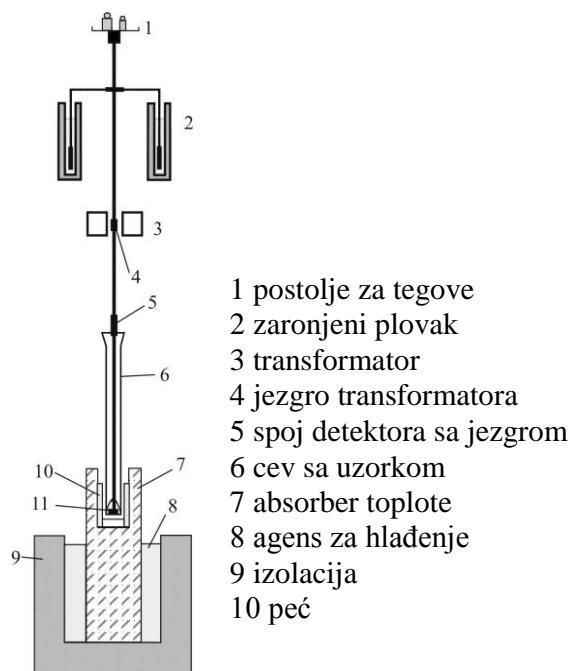
Mos je odredio skalu od deset prirodnih minerala čije tvrdoće na paranje čine stepene Mosove skale. Stepeni Mosove skale nisu ravnomerno raspoređeni po apsolutnim iznosima. Nedostatak Mosove skale je u tome što kristali kao anizotropna tela nemaju istu tvrdoću po svim pljosnima i pravcima. Anizotropija tvrdoće može znatno varirati čak kada je merena i po tako gruboj skali kao što je Mosova. Bez obzira na pomenute nedostatke, Mosova skala i metod ispitivanja tvrdoće se najčešće primenjuje i najprošireniji je kao pojam o veličini tvrdoće.

Metoda dilatometrijskog merenja čvrstih uzoraka eksperimentalnih blokova

Dilatometrija u osnovi predstavlja određivanje promene dužine uzorka u funkciji temperature. Međutim, savremene aparature omogućavaju da se analizom ovog efekta u raznim modifikacijama, izvode zaključci od velikog značaja za određivanje temperature razmekšavanja, deformacija pri zagrevanju pod opterećenjem, karakterizaciju modula elastičnosti i niz drugih parametara. Tako se često ovaj metod podrazumeva i pod pojmom termo – mehaničke analize (TMA).

Iz zavisnosti dužine uzorka od temperature (odnosno iz nagiba pravolinijskog dela $l=l(t)$) određuje se koeficijent toplotnog širenja uzorka. Ako u ispitivanom temperaturnom intervalu postoji fazni prelaz, linearност se gubi, pa se na ovaj način ispituju i fazni prelazi unutar čvrste faze.

Na slici 3.18. prikazna je šema termomehaničkog analizatora koji je korišćen za ispitivanje uzorka eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom.



Slika 3.18. Šema termomehaničkog analizatora

Pri merenju izmena dimenzija eksperimentalnih uzoraka, analizator se postavlja na platformu kvarcne cevi. Odgovarajući kvarcni detektor je spojen sa jezgrom linearног diferencijalnog transformatora. Pri svakoj promeni položaja jezgra menja se izlazni napon transformatora što se registruje pisačem. Detektorski sistem se oslanja na plastični plovak koji je učvršćen na vertikalnoj osi i potpuno zaronjen u tečnost velike gustine čime se obezbeđuje da stvarno opterećenje na uzorak ne zavisi od položaja detektora. Kod merenja efekata termičkog širenja na uzorcima eksperimentalnih blokova, na snimcima su uočene promene nagiba, i u rezultatima su izdvojeni temperaturni intervali i određeni različiti koeficijenti termičkog širenja u tim temperaturnim intervalima.

Hemijska stabilnost eksperimentalnih uzoraka

Iako standardima nije predviđeno, izvršeno je i testiranje hemijske stabilnosti dobijenih uzoraka. Ova karakterizacija je urađena imajući u vidu namenu proizvoda, kao i činjenicu da je kiselost atmosferskih padavina u stalnom porastu usled zagađivanja životne sredine.

Hemijska stabilnost je testirana u vodi i 5N⁸ rastvoru sumporne kiseline, koja je odabrana kao kiselina koja se dominantno pojavljuje u atmosferskim padavinama i utiče na povećanje kiselosti. Koncentracija koja je izabrana je višestruko niže pH vrednosti (jača kisela sredina) od one koja se detektuje u padavinama.

⁸ Petonormalni rastvor.

Postupak je izvođen tako što je ceo uzorak potapan u potpunosti u vodu/kiselinu i na pet minuta meren gubitak u dimenzijama bloka i masi (slika 3.19). Kako u ovako kratkim vremenskim intervalima nije primećeno rastvaranje, periodi dejstva agensa su produžavani dok se nije dostigao period od 24h.

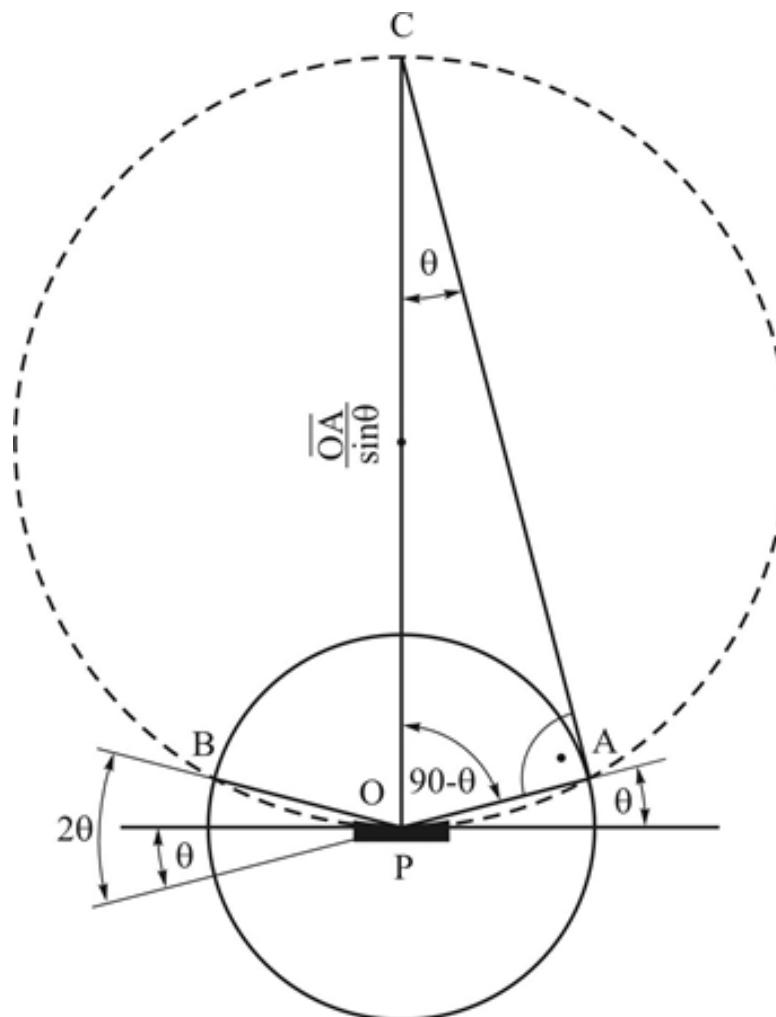


Slika 3.19 Ispitivanje hemijske stabilnosti uzorka eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom

Snimanje difraktometara X – zraka na eksperimentalnim uzorcima

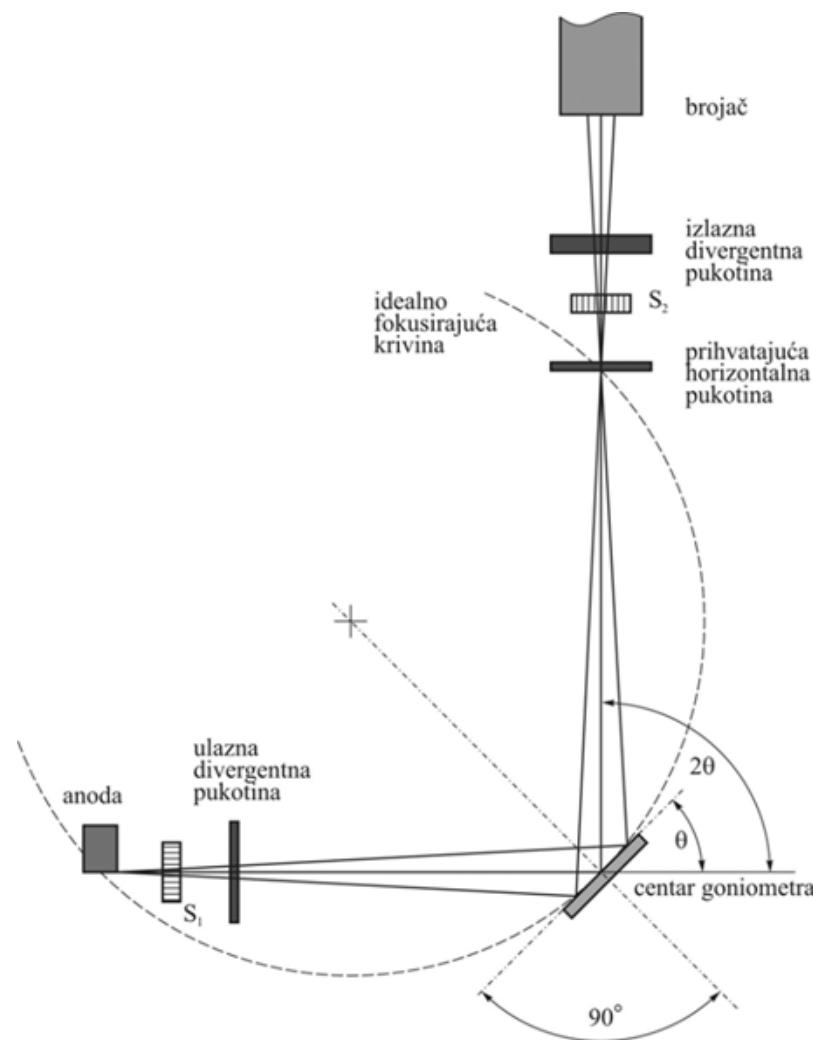
Radi određivanja i poređenja mineraloškog sastava standardnih blokova od gline i eksperimentalnih blokova korišćena je metoda difrakcije X – zraka odnosno sprovedeno je snimanje difraktometara X – zraka na uzorcima eksperimentalnih blokova sa i bez staklenog reciklata. Kako je ranije navedeno, u glinama u Srbiji najčešće su prisutni kvarc, feldspar i liskuni, što će se potvrditi primenom ove metode.

Šema uređaja za difrakciju X – zraka na praškastim uzorcima, koja je korišćena za ispitivanje dobijenih eksperimentalnih blokova, prikazana je na slici 3.20.



Slika 3.20 Šema uređaja za difrakciju na praškastim uzorcima

Najčešća postavka uređaja je takva da se detektorski krug skaniranja nalazi u vertikalnoj ravni. U tački A se nalazi linijski fokus rendgenske cevi, odakle zraci padaju na ravan, a normalno na ravan crteža kroz tačku O prolazi zajednička osa obrtanja uzorka i brojača. Tako je rastojanje AO odnosno OB poluprečnik detektorskog kruga skaniranja. Tačka O je ujedno i centar ispitivanog uzorka EB sa SR (P) (slika 3.21). Iz osnovnih postavki Bragovog modela difrakcije, jasno je da ako je uzorak postavljen pod upadnim uglom θ , aktuelno merenje je na dvostruko većem uglu 2θ , u odnosu na inicijalni zrak. Zato je neophodno da se prilikom skaniranja obezbedi sinhronizacija pri kojoj obrtanje uzorka prati obrtanje brojača za dvostruko veći ugao.



Slika 3.21 Geometrijska postavka uređaja za difrakciju na praškastim uzorcima

Priprema uzorka eksperimentalnih blokova za primenu metode merenja difrakcije podrazumevala je njihovo mrvljenje do optimalno predviđenih dimenzija (20×10 mm), a zatim je uzorak praha presovanjem doveden u stanje potrebne mehaničke čvrstoće. Pri pripremanju uzorka presovanjem, vodilo se računa da se izbegne eventualna tendencija praškastih delića ka preferentnoj orijentaciji, jer osnovna pretpostavka metode leži u idealno haotičnom rasporedu svih kristalografskih ravnih.

3.2 Primena analize tokova materijala za definisanje i razvoj modela

Za potrebe razvoja modela upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarne sirovine u proizvodnji blokova od gline (model), koristiće se metoda Analize tokova materijala (*eng. Material Flow Analysis – MFA*) i programski alat STAN.

MFA predstavlja metodološki koncept koji se koristi za dizajniranje i pružanje informacija o antropogenim sistemima. Primenom metode MFA analize sprovodi se sistematska procena tokova i zaliha materijala u okviru sistema koji je definisan u prostoru i vremenu i povezuje izvore, puteve, posrednu i finalnu dispoziciju materijala. Shodno tome, MFA predstavlja atraktivan metod koji se koristi kao alat za podršku u odlučivanju (*eng. Decision-Support Tool*) u upravljanju resursima, upravljanju otpadom i upravljanju životnom sredinom (Brunner i Rechberger, 2004; Baccini i Brunner, 2012). Kao dodatak pomenutom, MFA se može koristiti, za upoređivanje mogućih opcija, kako na nivou procesa, tako i na nivou celokupnih sistema.

MFA predstavlja naučni metod, koji će uzimati u obzir proračun, opisivanje i interpretaciju procesa u okviru predloženog modela upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline.

Osnovni termini koji su definisani MFA metodologijom (Brunner i Rechberger, 2004) i koji su korišćeni kod razvoja modela kroz MFA analizu su:

- Proizvodi ili Dobra (*eng. Goods*);
- Materijal (*eng. Material*);
- Proces (*eng. Process*);
- Tokovi i fluksevi (*eng. Flow and Flux*);
- Zalihe (*eng. Stocks*);
- Sistem i granice sistema (*eng. System and System Boundary*).

Proizvodi se u ekonomiji definišu kao supstance ili mešavina supstanci, odnosno fizički produkt koji ima upotrebnu vrednost, a u MFA analizi, proizvodi su definisani kao ekonomski entiteti koji imaju ekonomsku vrednost koju im je odredilo tržište. Vrednost proizvoda može biti pozitivna (na primer automobil, gorivo i drugo) ili negativna (na primer komunalni čvrsti otpad, kanalizacioni mulj i drugo).

Materijal se odnosi i na supstance i na proizvode, pa samim tim podrazumeva sirovinske materijale i sve supstance koje su već transformisane ljudskim aktivnostima, fizičkim ili hemijskim procesima.

Proces se definiše kao transport, transformacija ili skladištenje materijala. Proces može biti aktivnost (na primer transport), mašinski uređaj (na primer insineracija), postrojenje (na primer deponija), usluga (na primer sakupljanje otpada) ili medijum životne sredine (atmosfera, hidrosfera, litosfera).

Tok materijala se definiše kao količina materijala koja protiče u određenom vremenskom periodu kroz posmatrani proces ili sistem, a *fluks materijala* predstavlja količinu materije koja protiče u određenom vremenskom periodu preko definisane jedinične površine ili područja. Područje se može definisati kao određena površina (region), stanovnik, domaćinstvo i drugo.

Zalihe materijala predstavljaju masu materijala uskladištenu u procesu ili sistemu za vreme balansiranja sistema i od krucijalnog značaja su za metabolizam sistema. Zalihe mogu ostati konstantne ili se mogu povećati (akumulacija materijala) ili smanjiti (potrošnja materijala). Idealan primer zaliha u antropogenim sistemima jesu zalihe otpada na deponijama.

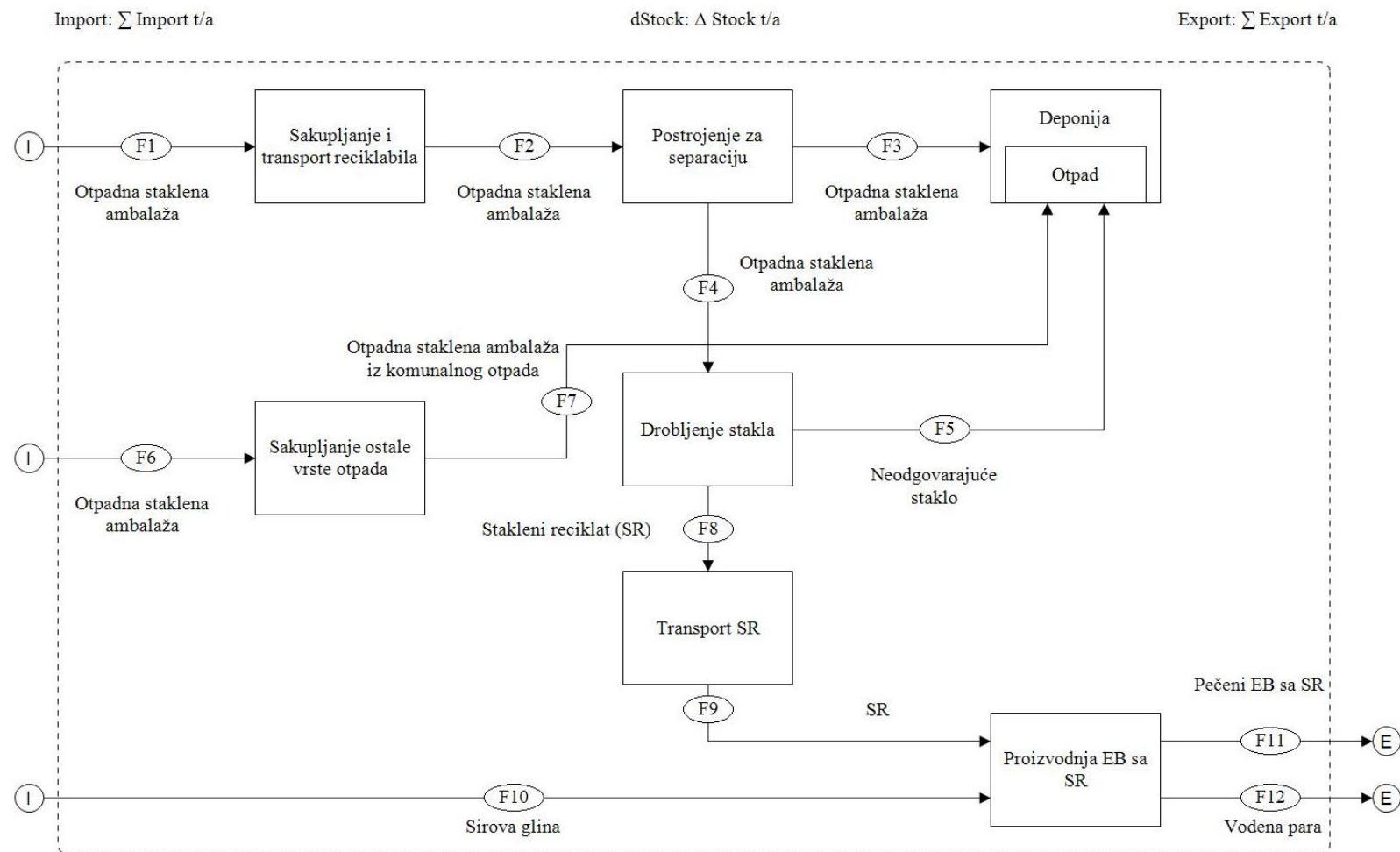
Sistem u okviru MFA obuhvata materijalni sistem koji se sastoji iz dva elementa, procesa i tokova materijala unutar definisanih granica sistema. Sistem se može sastojati iz jednog ili više procesa i tokova i može biti podeljen na podsisteme. *Granice sistema* moraju biti definisane u prostoru i vremenu. Granice sistema imaju veoma važnu ulogu u dizajniranju sistema u MFA analizi, jer procesi unutar sistema moraju biti balansirani, za razliku od procesa koji se nalaze van granica (Brunner i Rechberger, 2004; Stanislavlević, 2012).

Analizom tokova materijala su utvrđeni tokovi i zalihe otpadne staklene ambalaže. MFA metoda primenjena je za analizu i evaluaciju trenutnog stanja upravljanja otpadnom staklenom ambalažom u okviru Regionala i za analizu njene dalje upotrebe kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline. Rezultati primene MFA bi trebali da ukažu na osnovne procese tokom životnog ciklusa staklene ambalaže, detektujući relevantne zalihe otpadne staklene ambalaže u životnoj sredini i konačna odredišta, prateći puteve reciklaže i upotrebe stakla kao reciklata u proizvodnji građevinske keramike odnosno proizvodnji blokova od gline.

Programski alat STAN je namenski napravljen MFA softver koji omogućava transparentno balansiranje, usaglašavanje podataka i vizualizaciju materijalnih sistema na nivou dobara i supstanci, uzimajući u obzir nesigurnost podataka (Cencic i Rechberger, 2008). STAN je korišćen kako bi se jednostavno prikazali maseni tokovi otpadne staklene ambalaže i procesi koji su uključeni u sistem upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline.

3.2.1 Definisanje sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom u okviru razvoja modela

Sistem u okviru razvoja modela upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline (model) sastoji se iz sledećih osnovnih procesa: generisanje, sakupljanje i transport otpadne staklene ambalaže, separacija, drobljenje stakla u cilju dobijanja staklenog reciklata u formi praha, iskopavanje gline, proizvodnja eksperimentalnih blokova sa određenim masenim udelom staklenog reciklata i deponovanje one količine stakla koja ne ulazi u proces ovog vida reciklaže. Celokupan pregled definisanog sistema u okviru razvoja modela dat je na slici 3.22. Sistem je vremenski i prostorno ograničen što je predstavljeno isprekidanom linijom.



Slika 3.22 Prikaz sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom u okviru razvoja modela

3.2.2 Definisanje prostorne i vremenske granice u okviru razvoja modela

Definisani sistem se odnosi na sistem upravljanja otpadnom staklenom ambalažom koja se produkuje na teritoriji Regiona koga čine Grad Novi Sad i opštine Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas, i njenom upotrebom, kao staklenog reciklata, u ciglani I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu u proizvodnji blokova od gline sa masenim udelom staklenog praha.

Prema Strategiji upravljanja otpadom u Republici Srbiji usvojenoj 2010. godine i Zakonu o upravljanju otpadom usvojenog 2009. godine, kao najoptimalnije rešenje za odlaganje otpada predloženo je formiranje regionalnih sanitarnih deponija koje će obuhvatati region sa najmanje 200.000 stanovnika (Strategija, 2010-2019; Zakon o upravljanju otpadom, 2016). U tom smislu je Grad Novi Sad sa opštinama Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas oformio region, koji ima za cilj uspostavljanje regionalnog sistema upravljanja otpadom. Iz tog razloga, u okviru razvoja modela će se posmatrati količina otpadne staklene ambalaže generisana na teritoriji pomenutog Regiona.

Prostor koji je predviđen za realizaciju procesa proizvodnje eksperimentalnih blokova sa određenim masenim udelom staklenog reciklata odnosi se na ciglanu I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu. Svi podaci o režimima proizvodnje, ulaznim količinama i troškovima za proizvodnju blokova od gline, koji su se koristili kod neophodnih proračuna u okviru razvoja modela, dobijeni su direktno iz proizvodnog pogona ciglane I. G. M. "Neimar". Iako bi sa aspekta uticaja na životnu sredinu i troškova transporta staklenog reciklata do ciglane bilo bolje odabrati lokaciju za proizvodnju eksperimentalnih blokova sa određenim masenim udelom staklenog reciklata bližu deponiji Regiona, ukoliko postoji, odabrana je pomenuta lokacija zbog dostupne dokumentacije, podataka i slobodnog pristupa proizvodnji, kao i zbog odlične saradnje sa glavnim tehnologom u okviru ciglane I. G. M. "Neimar".

Za vremensku granicu sistema definisan je vremenski period od jedne godine (*eng. Annually - a*), kao vremenska granica za tokove materijala koji figurišu u okviru modela.

3.2.3 Definisanje procesa u okviru modela

U skladu sa ciljevima istraživanja u okviru doktorske disertacije, definisani su sledeći procesi koji će se posmatrati u okviru razvoja modela:

1. Generatori otpadne staklene ambalaže;
2. Sakupljanje i transport otpadne staklene ambalaže;
3. Postrojenje za separaciju;
4. Drobiljenje otpadnog stakla;
5. Deponovanje otpadne staklene ambalaže;
6. Transport staklenog reciklata (staklenog praha);
7. Iskopavanje gline;
8. Proizvodnja eksperimentalnih blokova sa određenim masenim udjelom staklenog reciklata.

Generatori otpadne staklene ambalaže

Generisanje otpadne staklene ambalaže predstavlja aktivnost u kojoj proizvod nema upotrebnu vrednost i biva odbačen kao otpad. U okviru modela, domaćinstva, mala i srednja preduzeća posmatraju se kao izvori odnosno generatori otpadne staklene ambalaže.

Sakupljanje i transport otpadne staklene ambalaže

Sakupljanje, sortiranje i recikliranje ambalažnog otpada u Srbiji su nedovoljno razvijene aktivnosti i ta vrsta otpada odlaže se na postojećim deponijama zajedno sa ostalim komunalnim otpadom (Miroslavljević i dr., 2013). Jedna od najvećih prepreka procesu reciklaže je nedostatak kapaciteta za sakupljanje i sortiranje otpadne ambalaže. U zemljama u tranziciji teško je uspostovati i ostvariti visok maseni procenat izdvojenih sirovina iz toka komunalnog otpada pri primarnoj separaciji zbog sakupljanja svih frakcija komunalnog otpada koji se odlaže u jednoj kanti. Iz tog razloga, Lokalnim i Regionalnim planovima upravljanja otpadom, predviđen je transport i sakupljanje otpada u dve kante. U jednoj kanti bi se sakupljala suva frakcija otpada (različite vrste reciklabilnih materijala, kao što su staklo, plastika, papir, karton i slično), dok bi se u drugoj kanti sakupljala mokra frakcija otpada (ostaci od hrane, materije organskog porekla, baštenski otpad i slično) odnosno biorazgradivi otpad. I suva i mokra frakcija otpada bi se naknadno tretirala u postrojenju za separaciju otpada. Suva frakcija bi se tretirala u cilju izdvajanja sekundarnih sirovina (na slici 30. proces: *Sakupljanje i transport reciklabila*), a mokra frakcija u cilju izdvajanja biorazgradivih frakcija otpada koje će biti kompostirane, dok bi se ostale frakcije otpada deponovale (na slici 30. proces: *Sakupljanje ostale vrste otpada*). Na ovaj način će se sakupljanjem reciklabilnih sirovina u suvoj kanti značajno olakšati i ubrzati rad

postrojenja za separaciju u određenoj regionalnoj sanitarnoj deponiji (Plan, 2011). Shodno pomenutom, u okviru modela uzeto je u obzir generisanje i sakupljanje otpadne staklene ambalaže iz dve kante, kao što je prikazana na slici 3.22.

Postrojenje za separaciju

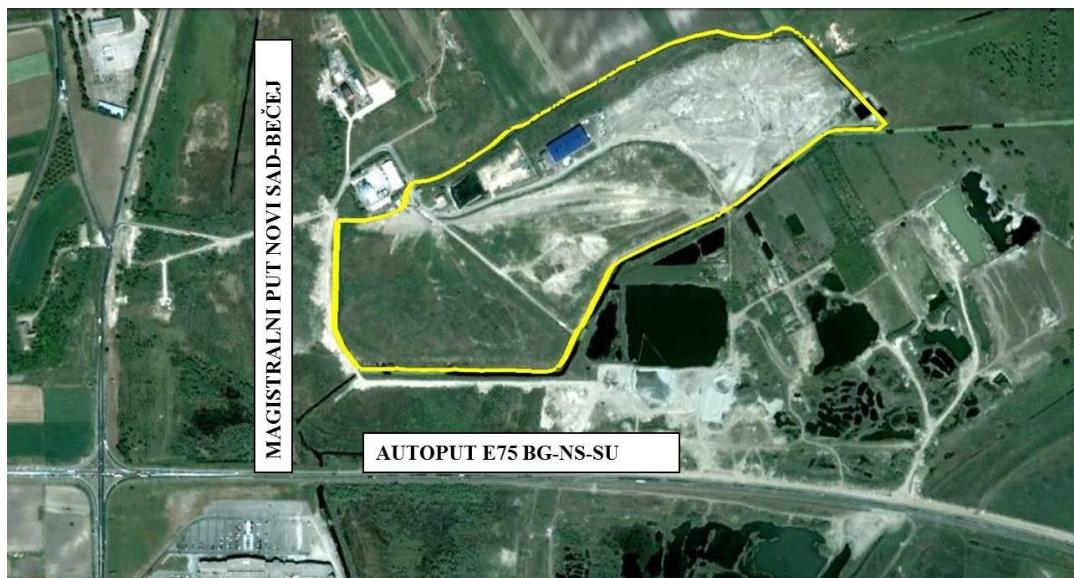
Postrojenje za separaciju čvrstog otpada na postojećoj deponiji u Novom Sadu sastoji se iz dve linije za separaciju. Otpadna staklena ambalaža se u okviru ovog postrojenja izdvaja i šalje na dalju obradu u, modelom predviđeno, postrojenje za mlevenje odnosno drobljenje stakla, u cilju dobijanja staklenog praha.

Drobljenje stakla

U okviru razvoja modela, korišćen je trenutno dostupan poluindustrijski mlin čiji su način i brzina rada uzeti u obzir kod procesa dobijanja staklenog praha, što je detaljno opisano u podpoglavlju 3.1.2.

Deponovanje otpadne staklene ambalaže

Deponija u većini slučajeva predstavlja finalno odredište za mnoge materijale sadržane u čvrstom komunalnom otpadu, pa tako i za otpadnu staklenu ambalažu. U modelu su prikazana dva toka otpadne staklene ambalaže. Prvi tok predstavlja otpadno staklo koje nije uspelo da se izdvoji na postrojenju za separaciju gde je izmešano sa drugim reciklabilima. Drugi tok predstavlja tok lomljenog stakla nakon procesa drobljenja koje se spram granulometrijskog sastava ne može upotrebiti kao sekundarni resurs u proizvodnji blokova. Stakleni otpad se odlaže na postojeću deponiju komunalnog otpada u Novom Sadu, koja će za pomenuti Region biti regionalna deponija. Deponija se nalazi u depresiji Veliki rit, severoistočno od naselja Klisa, oko 7 km udaljena od centra grada. Sav otpad, osim opasnog i industrijskog otpada, koji se sakupi na teritoriji Regiona, uz izuzetak otpada koji se izdvoji na postrojenju za separaciju, odlaže se na regionalnu deponiju koja je prikazana na slici 3.23.



Slika 3.23 Položaj i oblik glavne deponije u Novom Sadu (Plan, 2011)

Lokacija deponije u Novom Sadu nalazi se na udaljenosti od oko 200 metara od autoputa E75 Beograd – Novi Sad – Subotica i oko 200 metara od magistralnog puta Novi Sad – Temerin - Bečej. Deponija je udaljena oko 700 metara od početka naseljenog dela grada i oko 6 km od centra Novog Sada. Na ulazu na deponiju nalazi se kolska vaga, na kojoj se vrši merenje svih vozila koja dovoze otpad na deponiju (Plan, 2011).

Transport staklenog reciklata (staklenog praha)

Kao što je prethodno pomenuto, u okviru modela je uzet u obzir proces transporta staklenog praha dobijenog mlevenjem otpadnog stakla koje se produkuje na teritoriji Regionala, do ciglane I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu. Razdaljina između deponije i ciglane iznosi 55 km. Kamion, kapaciteta 16 tona, je razmatran vid transporta staklenog reciklata u okviru razvoja modela.

Iskopavanje gline

U okviru modela razmatran je iskop gline koji koristi ciglana I. G. M. "Neimar". Ciglana I. G. M. "Neimar" ima svoj iskop i ugovor sa firmom za iskop i prebacivanje zemlje i gline. Prebacivanje se vrši kamionom na udaljenost od oko 1 km.

Proizvodnja eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom

Proizvodnja i ispitivanje svojstava eksperimentalnih uzoraka sa masenim udelom staklenog reciklata (0%; 5%; 10%; 15%; 20%; 25% i 30%), u cilju provere značaja za primenu, realizovani su u laboratorijskim uslovima sa primenom režima proizvodnje definisanim u ciglani I. G. M. "Neimar".

3.2.3 Ulagani podaci za razvoj modela

Količina komunalnog otpada koji se generiše u Regionu, maseni udeli otpadne staklene ambalaže u količini komunalnog otpada, kao i ukupna godišnja produkcija staklene ambalaže prikazani su u tabeli 3.11. Količine tokova materijala u modelu prikazane su u SI jedinici za masu odnosno u kilogramima [kg]. Kako je prethodno naglašeno, za vremensku granicu posmatranog sistema koristi se godina [god].

Tabela 3.11 Količine generisanog komunalnog i staklenog otpada u opština Regiona (Projekat, 2008; Plan, 2011; Strategija, 2010 – 2019; Miroslavljević i dr., 2015)

Region	Broj stanovnika [st]	Komunalni otpad [kg/st/dn]	Komunalni otpad [kg/god]	Staklena ambalaža [%]	Staklena ambalaža [kg/god]
Novi Sad	299 294	1,16	126 628 000	5,07	6 420 000
Bačka Palanka	60 966	1,15	25 590 000	2,78	711 000
Bački Petrovac	14 681	0,58	3 108 000	5,99	186 000
Beočin	16 086	1,15	6 752 000	5,07	342 000
Žabljak	27 513	0,58	5 825 000	5,99	349 000
Srbobran	17 855	0,58	3 780 000	5,99	226 000
Temerin	28 275	0,60	6 192 000	4,13	256 000
Vrbas	45 852	0,67	11 213 000	4,13	463 000
UKUPNO	510 522	1,01	189 089 000	4,89	8 953 000

Kao što se može videti u tabeli 3.11 ukupna godišnja količina otpadne staklene ambalaže generisane na teritoriji Regiona iznosi oko 9 000 000 kg. U okviru modela, definisano je sakupljanje staklene ambalaže iz toka dve vrste frakcija komunalnog otpada i shodno tome, u tabeli 3.12 su date godišnje količine otpadne staklene ambalaže, kao ulagni tok za definisani sistem upravljanja staklenom ambalažom.

Tabela 3.12 Ulazne količine otpadne staklene ambalaže razmatrane u okviru modela (Plan, 2011)

Ulagni tok	Jedinica	Sakupljanje i transport reciklabila	Sakupljanje ostale vrste otpada
Otpadna staklena ambalaža	[kg/god]	6 300 000	2 700 000

U trenutnom sistemu sakupljanja komunalnog otpada, 31% od ukupne mase staklene ambalaže se transportuje u postrojenje za separaciju dok se ostatak sakupljene staklene ambalaže direktno odlaže na deponiju bez prethodnog tretmana. Iz postrojenja za separaciju svega 7 t ide dalje na reciklažu, što je praktično beznačajna količina koja se reciklira (oko 0,1%) (Stanislavljević, 2012).

Uvođenjem izmena u sistemu sakupljanja komunalnog otpada u skladu sa Regionalnim planom (2011) biće znatno olakšan posao razdvajanja reciklabila u postrojenju za separaciju. Shodno tome, u modelu će se razmatrati količina otpadne staklene ambalaže koja bi trebala da se ostvari pomenutim načinom sakupljanja.

Maseni udio i količina staklenog praha koji je korišćen u proračunima u okviru modela, utvrđen je eksperimentalnim testiranjima uzoraka sa različitim masenim udelima staklenog reciklata (5%; 10%; 15%; 20%; 25% i 30%). Na osnovu toga je dalje urađen proračun potrebne količine gline kao ulaznog toka u model.

3.3 Kriterijumi za evaluaciju modela

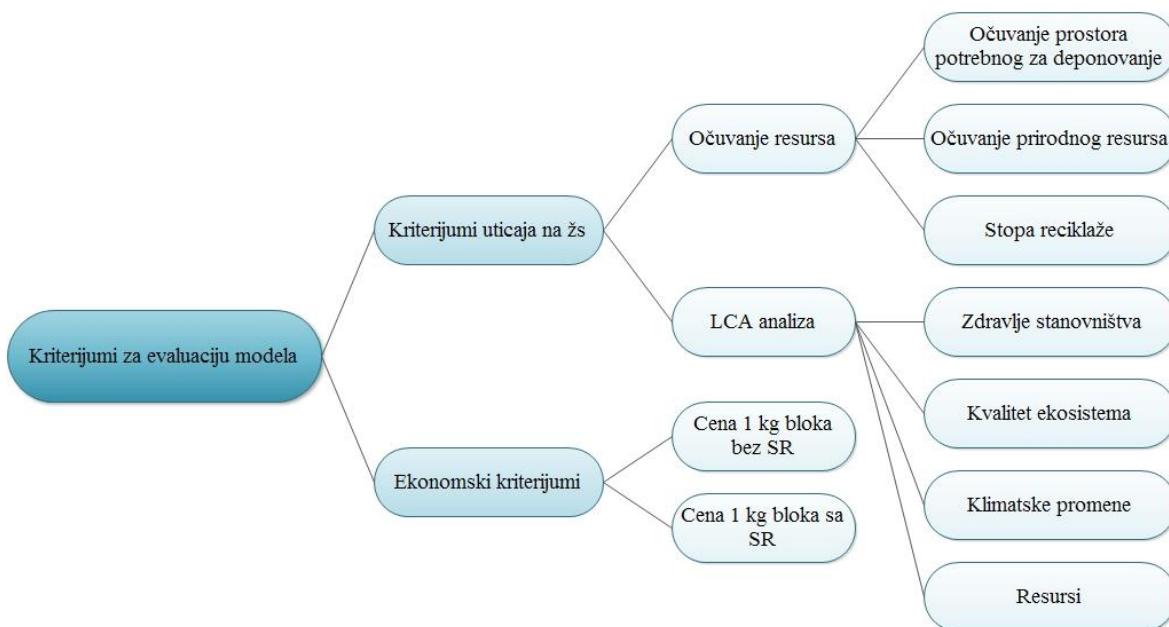
Prirodni resursi iz životne sredine se transportuju i koriste kao sirovine u proizvodnim pogonima, pretvarajući ih u građevinske proizvode, čime se dalje generiše zagađenje i zahteva znatna potrošnja energije s odgovarajućim emisijama gasova staklene bašte. Izbor građevinskih proizvoda sa manjim uticajem na životnu sredinu je jedan od načina da se smanji negativan uticaj gradnje na životnu sredinu. Stoga, procena uticaja na životnu sredinu mora biti uravnotežena sa ekonomskom procenom. Da bi zadovoljili svoje kupce, proizvođači i dizajneri moraju razviti i odabratи građevinske proizvode sa opravdanom balansom između rezultata performansi uticaja na životnu sredinu (*eng. Environmental Performance Score*) i rezultata ekonomskih performansi (*eng. Economic Performance Score*), što uopšte nije lak zadatak. U tu svrhu, Američki nacionalni institut za standarde i tehnologiju (*eng. U.S. National Institute of Standards and Technology – NIST*) razvio je softver BEES (*eng. Building for Environmental and Economic Sustainability – BEES*) koji se može koristiti kao alat za procenu održivosti u domenu zaštite životne sredine i ekomske održivosti pri upotrebi određenog građevinskog materijala (Lippiatt, 2007).

BEES metodologija kvantificuje uticaje građevinskih proizvoda na životnu sredinu koristeći multidisciplinarni pristup poznat kao procena životnog ciklusa (*eng. Life cycle assessment – LCA*). To znači da uzima u obzir višestruke uticaje na životnu sredinu i ekomske uticaje tokom života određenog građevinskog proizvoda. Razmatranje višestrukih uticaja i faza životnog ciklusa je neophodno jer odluke o izboru proizvoda zasnovane na pojedinačnim uticajima ili fazama mogu isključiti neke uticaje koji mogu izazvati jednaku ili veću štetu. Drugim rečima, multidimenzionalni pristup životnog ciklusa je potreban za sveobuhvatnu, uravnoteženu analizu (BEES, 2016).

LCA predstavlja sistemski pristup za određivanje uticaja na životnu sredinu koji je standardizovan od strane Međunarodne organizacije za standarde (*eng. International Standards Organization – ISO*) (EN ISO 14040, 2006). Konkretno, BEES određuje ukupan uticaj građevinskih proizvoda na životnu sredinu koristeći pristup procene životnog ciklusa specificiran u standardima serije ISO 14040 (Greig, 2014). Analiziraju se sve faze u životu određenog proizvoda: nabavka sirovina, proizvodnja, transport, upotreba, reciklaža i upravljanje otpadom. Za određivanje ekonomske performanse koristi se metod troškova životnog ciklusa (*eng. Life - Cycle Cost Method*) koji uključuje troškove inicijalnog ulaganja, zamenu, procese proizvodnje, održavanje i popravku i odlaganje (BEES, 2016).

Na osnovu rezultata analize tokova materijala razmatranih u okviru modela, takođe je procenjena efikasnost definisanog sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom u okviru modela, u odnosu na opšte ciljeve koji se odnose na upravljanje otpadom. Opšti ciljevi upravljanja otpadom, pa samim tim i staklenom ambalažom kao otpadom, odnose se na zaštitu zdravlja ljudi i kvaliteta životne sredine, očuvanje resursa i održivost (Brunner i Fellner, 2007; Stanic-Maruna i Fellner, 2012; Stanisavljević, 2012).

Uzimajući u obzir pristup BEES metodologije primenjene kod modela proizvodnje keramičkih pločica sa staklenim reciklatom (Lippiatt, 2007) i opšte ciljeve upravljanja otpadom, definisani su kriterijumi za evaluaciju modela koji su prikazani u obliku dijagrama na slici 3.24.



Slika 3.24 Kriterijumi za evaluaciju modela

3.3.1 Očuvanje resursa

U okviru evaluacije modela, izabrani su sledeći indikatori očuvanja resursa: ušteda deponijskog prostora, očuvanje prirodnog resursa i stopa reciklaže.

Ušteda deponijskog prostora

Jedan od problema na deponiji u Novom Sadu, a i uopšte na deponijama širom Srbije, jeste akumulacija čvrstog otpada na deponijama bez bilo kakvih prethodnih postupaka tretmana otpada. S obzirom na to da zemljište predstavlja ograničen resurs, tako je i deponijski prostor limitiran. Iz tog razloga potrebno je maksimalno smanjiti zapreminsku masu otpada koji se odlaže na deponije. U skladu sa pomenutim, izračunata je zapremina deponijskog prostora koja bi mogla da se uštedi upotreboom otpadne staklene ambalaže u proizvodnji blokova, umesto njenog odlaganja na deponiju u Novom Sadu. Vrednosti gustine komunalnog otpada i gustine drobljenog otpadnog stakla usvojene su na osnovu literaturnih podataka i prikazane su u tabeli 3.13.

Tabela 3.13 Gustine komunalnog otpada i drobljene staklene ambalaže (EPA, 2016)

Tip otpada	Jedinica	Gustina
Komunalni otpad	kg/m ³	800
Staklena ambalaža		1 068

Upotreboom otpadne staklene ambalaže na način prikazan u modelu, godišnji stepen očuvanja deponijskog prostora, koji utiče i na ukupno povećanje stope očuvanja resursa, može se izračunati pomoću formule 3.5:

$$O_{DP} = \frac{V_{so}}{V_{ko}} = \frac{m_{so} \cdot \rho_{ko}}{\rho_{so} \cdot m_{ko}} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

gde je:

O_{DP} – godišnja stopa očuvanja deponijskog prostora [%];

V_{so} – zapremina otpadne staklene ambalaže [m^3];

V_{ko} – zapremina deponijskog prostora [m^3];

m_{so} – masa staklenog otpada [kg];

ρ_{ko} – gustina komunalnog otpada [kg];

ρ_{so} – gustina staklenog otpada [kg];

m_{ko} – masa komunalnog otpada [kg].

Očuvanje prirodnog resursa

Komunalni čvrst otpad predstavlja izvor sekundarnih sirovina koje se mogu koristiti za dalju proizvodnju i time se doprinosi smanjenju upotrebe primarnih resursa. Shodno tome, smanjuju se negativni uticaji na životnu sredinu koji su povezani sa eksploatacijom primarnih resursa za potrebe sprovođenja proizvodnje.

Upravo, upotrebom staklenog reciklata, poreklom iz otpadne staklene ambalaže, kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline, postižu se uštede u eksploataciji zemljišta i gline, kao primarnog resursa u proizvodnji blokova. Količina gline koja se godišnje može uštedeti upotrebom staklenog reciklata u proizvodnji blokova, predstavlja razliku između mase gline kao ulazne primarne sirovine u proizvodnji blokova bez staklenog reciklata i mase gline kao ulazne sirovine u proizvodnji eksperimentalnih blokova sa određenim masenim procentom staklenog reciklata. Stopa uštede zemljišta u okviru iskopa za eksploataciju gline može se odrediti na osnovu formule 3.6:

$$IG = \frac{m_{g2}}{m_{g1}} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

gde je:

IG – godišnja stopa uštede zemljišta u okviru iskopa gline [%];

m_{g2} – masa gline u proizvodnji blokova sa SR [kg];

m_{g1} – masa gline u proizvodnji blokova bez SR [kg].

Stopa reciklaže

Reciklaža i ponovna upotreba predstavlja važan deo održivog upravljanja komunalnim čvrstim otpadom, čime se postiže ispunjenje definisanih opštih ciljeva upravljanja otpadom i redukovanje troškova sistema upravljanja otpadom. Trenutni stepen reciklaže staklenog otpada na deponiji u Novom Sadu je na veoma niskom nivou. Godišnje se reciklira oko 7 000 kg otpadne staklene ambalaže (Stanislavljević, 2012). Upotrebom staklenog reciklata u proizvodnji eksperimentalnih blokova zamenjuje se glina, kao primarna sirovina, u određenom masenom procentu, čime se smanjuje negativan uticaj na životnu sredinu, ali se i znatno povećava procenat reciklaže otpadnog stakla (formula 3.7)

$$SR = \left(\frac{m_{sr2} - m_{sr}}{m_{so}} \right) \cdot 100\% \quad 3.7$$

gde su:

SR – porast stope reciklaže staklenog otpada primenom modela [kg];

m_{sr2} – masa otpadnog stakla u proizvodnji EB sa SR [kg];

m_{sr} – masa otpadnog stakla koja se trenutno reciklira [kg].

3.3.3 Uticaj primene modela na životnu sredinu kroz LCA analizu

Porast svesti o značaju zaštite životne sredine i uticajima proizvodnje i odlaganja određenih proizvoda, uslovila je povećanje interesovanja za razvoj metoda za bolje razumevanje i utvrđivanje uticaja proizvoda na životnu sredinu u određenoj fazi ili tokom čitavog njegovog životnog ciklusa. Upravo u za te potrebe, razvijena je metoda analize životnog ciklusa (LCA), koju, kako je prethodno navedeno, primenjuje i BEES metodologija pri analizi uticaja proizvodnje i životnog ciklusa alternativnih građevinskih proizvoda na životnu sredinu.

Primena LCA može da pomogne:

- Kod identifikovanja mogućnosti za poboljšanje svojstava proizvoda spram njegovog uticaja na životnu sredinu u različitim momentima životnog ciklusa proizvoda;
- Kod informisanja donosilaca odluka u industriji, vladinim ili nevladinim organizacijama (na primer, u svrhu strateškog planiranja, postavljanja prioriteta, dizajna proizvoda i slično);
- Kod izbora relevantnih indikatora za određivanje uticaja na životnu sredinu;
- Kod marketinga (na primer, za sprovođenje ekološkog označavanja, za potvrđivanje određenih tvrdnji u oblasti zaštite životne sredine i slično) (EN ISO 14 040, 2006).

LCA sumira aspekte životne sredine i potencijalne uticaje na životnu sredinu određenog proizvoda tokom njegovog životnog ciklusa. Ekonomski i socijalni aspekti i uticaji su, najčešće, van okvira LCA, ali se mogu kombinovati sa LCA za opsežnije procene (EN ISO 14 040, 2006).

LCA analiza sprovodi se kroz četiri međusobno zavisne faze, definisane standardom EN ISO 14 040:

1. Definisanje cilja i predmeta (*eng. The Goal and Scope Definition Phase*);
2. Inventar životnog ciklusa (*eng. The Life Cycle Inventory Analysis Phase – LCI*);
3. Ocenjivanje uticaja životnog ciklusa (*eng. The Life Cycle Impact Assessment Phase – LCIA*);
4. Interpretacija (*eng. The Interpretation Phase*).

Definisanje cilja, uključujući granicu sistema i nivo detalja koji se razmatraju u okviru LCA zavisi od proizvoda koji se razmatra i od svrhe same analize. U ovoj fazi se sprovodi izbor metode i postupak analize koji će se primenjivati, definiše se dubina i širina analize, namena dobijenih rezultata i funkcionalna jedinica ulaznih podataka (EN ISO 14 040, 2006).

Analiza inventara životnog ciklusa proizvoda predstavlja drugu fazu u primeni LCA. U ovoj fazi se identificuju procesi u okviru posmatranog sistema i prikupljaju se ulazni i izlazni podaci o materijalnim i energetskim tokovima u okviru sistema proizvoda koji se posmatra (EN ISO 14 040, 2006).

Treća faza LCA predstavlja ocenjivanje uticaja životnog ciklusa (LCIA) određenog procesa ili proizvoda. Svrha ove faze je da pruži dodatne informacije o potencijalnim negativnim uticajima posmatranog proizvoda u cilju poboljšanja rezultata inventara životnog ciklusa, kako bi se bolje razumeo njihov značaj sa aspekta opterećenja životne sredine i potrošnje resursa u proizvodnom sistemu. U tu svrhu, uticaji upotrebe resursa i pri tome nastalih emisija u okviru definisanog procesa se grupišu i kvantifikuju preko određenog broja kategorija uticaja. Znači, LCIA faza ima za cilj da poveže svaki rezultat inventara životnog ciklusa sa odgovarajućom kategorijom uticaja na životnu sredinu, naravno u meri u kojoj je to moguće i na taj način obezbeđuje informacije za fazu interpretacije rezultata. Do sada je razvijen veći broj LCIA metoda, među kojima su poznate CML, Eco – indicator 95 i 99, IMPACT 2002+ i druge metode (EN ISO 14 040, 2006).

Tabela 3.14 Kategorije mehanizama uticaja na životnu sredinu prikazane IMPACT2002+ metodom (Humbert i dr., 2012)

Kategorije uticaja na životnu sredinu na međupoziciji	Referentne supstance na međupoziciji	Kategorije uticaja na životnu sredinu na krajnjoj poziciji (Kategorije štete)	Jedinica mere štete	Normalizacija jedinice mere štete
Toksičnost po ljude (karcinogena+nekarcinogena kategorija)	kg hloroetilena u vazduh _{-ekv} (kg C ₂ H ₃ Cl _{-ekv})	Zdravlje ljudi (eng. Human health)	DALY	point
Respiratorna neorganska kategorija	kg PM _{2,5} u vazduh _{-ekv}			
Jonizujuće zračenje	Bq ugljenik – 14 u vazduh _{-ekv} (Bq C-14 _{-ekv})			
Oštećenje ozonskog omotača	kg CFC – 11 u vazduh _{-ekv}			
Respiratorna organska kategorija – fotohemijska oksidacija	kg etilena u vazduh _{-ekv} (kg C ₂ H ₄ _{-ekv})			
Ekotoksičnost akvatičnih sistema	kg trietilen glikol u vodu _{-ekv} (kg TEG u vodu)			
Ekotoksičnost zemljišta	kg trietilen glikol u zemljište _{-ekv} (kg TEG u zemljište)			
Povećanje kiselosti zemljišta	kg SO ₂ u vazduh _{-ekv}			
Zauzimanje zemljišta	m ² organskog zemljišta _{-ekv} ·god.			
Povećanje kiselosti akvatičnih sistema	kg SO ₂ u vazduh _{-ekv}			
Eutrofifikacija akvatičnih sistema	kg PO ₄ ³⁻ u vazduh _{-ekv}			
Globalno zagrevanje	kg CO ₂ u vazduh _{-ekv}	Klimatske promene (eng. Climate Change)	kg CO ₂ _{-ekv} u vazduh	point
Neobnovljivi izvori energije	MJ ili kg sirove nafte _{-ekv} (860kg/m ³)	Resursi (eng. Resources)	MJ	point
Ekstrakcija minerala	MJ ili kg gvožđe _{-ekv} (u rudi)			

U okviru doktorske disertacije korišćena je IMPACT 2002+ metoda. IMPACT 2002+ metoda vrednuje uticaje i na međupozicijama (potencijal globalnog zagrevanja, zauzimanje zemljišta, povećanje kiselosti i slično) i na krajnjim pozicijama mehanizama životne sredine (ljudsko zdravlje, kvalitet ekosistema, klimatske promene i potrošnja resursa), što izdvaja ovu metodu od drugih koje kao rezultat vrednuju samo uticaje na međupozicijama (*eng. Midpoint Category*) ili samo na krajnjim pozicijama koje predstavljaju kategorije štete (*eng. Damage Category*) (Humbert i dr., 2012). IMPACT 200+ metoda pruža mogućnost povezivanja rezultata inventara životnog ciklusa preko četrnaest kategorija uticaja na međupozicijama sa četiri kategorije uticaja na krajnjim pozicijama odnosno sa kategorijama štete (tabela 3.14).

Termin "međupozicija" odnosi se na uticaj pozicioniran na "sredini puta" ukupnog uticaja na životnu sredinu, između LCI rezultata i krajnje pozicije uticaja. Kategorije uticaja na međupozicijama karakterišu elementarni tokovi koji doprinose istom krajnjem uticaju. Svi rezultati kategorija uticaja na međupoziciji izraženi su u jedinicama odabrane referentne supstance i međusobno su povezani i svrstani u četiri kategorije uticaja na krajnjim pozicijama: zdravlje stanovništva, kvalitet ekosistema, klimatske promene i resursi. Te kategorije predstavljaju kategorije štete koje opisuju uticaj definisanog cilja i predmeta studije, na primer, procesa proizvodnje određenog proizvoda na životnu sredinu i slično. Kategorije uticaja na krajnjim pozicijama izračunavaju se množenjem faktora karakterizacije i LCI rezultata (Humbert i dr., 2012). Vrednosti faktora karakterizacije za svaku supstancu koja doprinosi određenom uticaju nalaze se u bazi programa SimaPro u okviru Impact 2002+ metode u vidu excel dokumenta. Faktori karakterizacije zasnovani su na principima ekvivalencije i izraženi su u kilogramima ekvivalentne supstance u poređenju sa referentnom supstancicom.

Različite vrste jedinica, u kojima se izražavaju kategorije uticaja, se koriste u IMPACT 2002+ metodi:

- "kg substance s-ekv" (kg ekvivalentne referentne supstance s): količina referentne supstance s koja predstavlja uticaj određene razmatrane zagađujuće supstance na nivou kategorija uticaja na međupoziciji;
- DALY (*eng. Disability Adjusted Life Years*): jedinica mere kategorije uticaja "zdravlje stanovništva" predstavlja zbir izgubljenih godina života zbog prevremene smrti i izgubljenih godina tokom zdravog načina života usled oštećenja zdravlja zbog izloženosti zagađenju;
- PDF (*eng. Potentially Disappeared Fraction*): potencijalno ugrožena biološka vrsta na površini od $1m^2$ tokom vremenskog perioda od godinu dana. PDF predstavlja jedinicu mere za kategoriju uticaja "kvalitet ekosistema" i određuje broj vrsta koje

će nestati na površini od 1m^2 tokom određenog vremenskog perioda ($\text{PDF}\cdot\text{m}^2\cdot\text{god}$), odnosno gubitak biodiverziteta (Humbert i dr., 2012);

- MJ: jedinica za kategoriju uticaja "resursi" i predstavlja jedinicu mere za količinu potrebne energije;
- kg CO₂-ekv u vazduh: doprinos kategorije uticaja na međupoziciji, "globalno zagrevanje" kategoriji uticaja "klimatske promene", pa je jedinica mere u kojoj se iskazuje ova kategorija štete ista kao i kod kategorije uticaja na međupoziciji (Humbert i dr., 2012).

U tabeli 3.14, prikazana je takođe i normalizacija jedinica mere krajnjih kategorija uticaja koja se sprovodi korišćenjem takozvanih "point" jedinica (Pt ili μPt). "Point" predstavlja prosečan uticaj određene kategorije uticaja koji je izazvan od strane stanovnika tokom jedne godine, uzimajući u obzir prosečan uticaj čoveka tokom njegovog životnog ciklusa. Znači, ukupan rezultat uticaja određene kategorije uticaja na životnu sredinu deli se sa ukupnim brojem stanovnika Evrope (Humbert i dr., 2012). Normalizacijom se omogućava analiza udela svakog uticaja na ukupnu štetu razmatrane kategorije i time se olakšava tumačenje rezultata i upoređivanje različitih kategorija, na primer, na istom grafiku i u istim jedinicama. Humbert i dr. (2012), kao autori Impact 2002+ metode, ističu normalizaciju na nivou kategorija štete, što je primenjeno u doktorskoj disertaciji. U doktorskoj disertaciji je korišćen faktor normalizacije koji je u Impact 2002+ metodi određen za 464 815 432 stanovnika, odnosno populaciju EU (25+3) i ne obuhvata specifičnosti populacije u Republici Srbiji.

Četvrtu fazu LCA predstavlja interpretacija dobijenih rezultata, koji se sumiraju i razmatraju kao osnova za zaključke, preporuke i donošenje odluka u skladu sa definisanim ciljem i predmetom istraživanja (EN ISO 14 040, 2006). Rezultati ukupnog uticaja na životnu sredinu dobijaju se upotrebom formula 3.8, 3.9 i 3.10, po čijem principu LCA softver SimaPro obračunava neophodne vrednosti uticaja na životnu sredinu, povezujući na taj način LCI i LCIA rezultate analize definisanog predmeta (Greig, 2014).

$$\text{EnvScore}_j = \sum_{k=1}^p \text{IAScore}_{jk} \quad (3.8)$$

gde su:

EnvScore_j – ukupan uticaj na životnu sredinu za građevinski proizvod j;

p – broj kategorija uticaja (na krajnjoj poziciji) na životnu sredinu koje se razmatraju;

$IA\text{Score}_{jk}$ – karakterizacija, normalizacija i izjednačavanje rezultata za građevinski proizvod j u odnosu na određeni uticaj na životnu sredinu k:

$$IA\text{Score}_{jk} = \frac{IA_{jk} \cdot IVwt_k}{Norm_k} \cdot 100 \quad (3.9)$$

gde su:

$IVwt_k$ – kategorija uticaja (na međupoziciji) od važnosti za uticaj k;

$Norm_k$ – vrednost normalizacije za uticaj k;

IA_{jk} – rezultat karakterizacije za građevinski proizvod j za određeni uticaj na životnu sredinu k:

$$IA_{jk} = \sum_{i=1}^n I_{ij} \cdot IA\text{factor}_i \quad (3.10)$$

gde su:

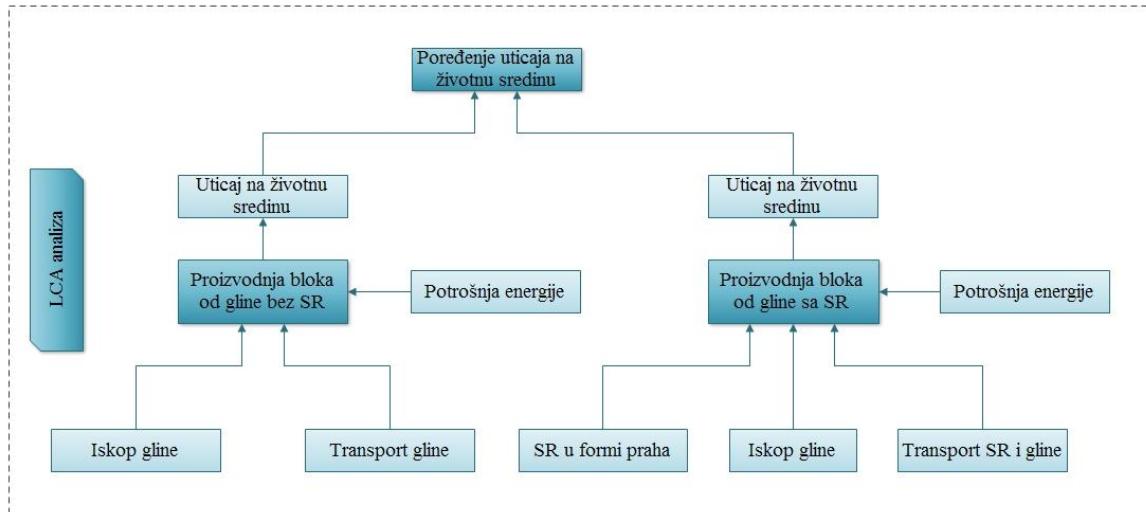
n – broj tokova inventara za kategoriju uticaja na životnu sredinu k;

I_{ij} – količine tokova u inventaru za građevinski proizvod j;

$IA\text{factor}_i$ – faktor karakterizacije za procenu uticaja tokova u inventaru.

Dobijeni rezultati uticaja modela na životnu sredinu kroz LCA analizu prikazani su u doktorskoj disertaciji u vidu tabele i grafikona gde su sumirani u četiri krajnje kategorije uticaja (kategorije štete), koje su objašnjene u trećoj fazi LCA analize.

Za određivanje uticaja na životnu sredinu tokom procesa proizvodnje eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom, korišćena je LCA analiza procesa proizvodnje bloka bez staklenog reciklata i LCA analiza bloka sa staklenim reciklatom određenog najpogodnijeg, masenog udela pripremljenog staklenog praha iz otpadnog stakla. Urađeno je poređenje LCA rezultata uticaja oba procesa proizvodnje blokova sa ciljem utvrđivanja da li i u kolikoj meri postoji razlika u uticaju na životnu sredinu, primenom modela u odnosu na trenutni sistem proizvodnje bloka od gline (slika 3.25).



Slika 3.25 Granice sistema pri LCA analizi modela

Ulagani podaci za LCA analizu modela

Za LCA analizu i ocenjivanje uticaja procesa proizvodnje blokova od gline bez i sa masenim udelenim staklenog reciklata kao ulaznom sirovini, korišćen je softver SimaPro 8.0.3.14 i metoda Impact 2002+. Ocenjivanje uticaja na životnu sredinu odnosi se na uticaj proizvodnje 1kg gotovog proizvoda odnosno bloka. Podaci koji su korišćeni za proračun neophodne količine sirove gline i potrošenih energenata za proizvodnju 1kg gotovog pečenog bloka, dobijeni su direktno iz ciglane I. G. M. "Neimar" i odnose se na njihovu proizvodnju u 2015. godini (tabela 3.15).

Tabela 3.15 Potrošnja ulaznih sirovina i energenata u proizvodnom pogonu ciglane I. G. M. "Neimar"

Tip proizvoda		GB25L	GB25	GB29
Jedinica mere				
Sirova gлина	kg	8,0	9,2	10,4
Pečeni proizvod	kg	5,9	6,9	7,8
Potrošnja energenata za proizvodnju 50 750 000 kg pečenih proizvoda				
El. energija	MWh		3 605	
Petrol koks	kg		1 993 000	
Prirodni gas ⁹	Nm ³		121 000	

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli 3.15, količina sirove gline neophodne za proizvodnju 1 kg pečenog bloka od gline je preračunata (tabela 3.16). Ta količina gline se odnosi na proizvodnju bloka bez staklenog reciklata, a nakon odabira pogodnog masenog

⁹ Jedinica mere za prirodni gas, Nm³, predstavlja normalni kubni metar – masa gasa koja pri normalnom stanju odnosno pri temperaturi od 0 °C i pritisku od 1,01325 bar ima zapreminu od 1 m³.

udela staklenog praha, izračunata je potrebna količine sirove gline i staklenog praha neophodnih za proizvodnju 1 kg pečenog bloka sa staklenim reciklatom.

Tabela 3.16 Podaci za LCA analizu o ulaznim sirovinama kod proizvodnje 1 kg pečenog bloka od gline

Ulazne sirovine	Jedinica mere	Masa	1 kg gotovog proizvoda
Sirova gлина	kg	1,355932203	Blok bez SR
Sirova gлина	kg	X ¹⁰	
Stakleni prah	kg	Y ¹¹	Blok sa SR

Uticaji na životnu sredinu prilikom proizvodnje gline i staklenog reciklata zasnivaju se na podacima sadržanim u bazi podataka SimaPro softvera. Za podatke o sirovoj glini korišćena je Ecoinvent baza podataka za: "Clay, at mine/CH U", koja obuhvata uticaje na životnu sredinu sledećih procesa: iskopavanje gline bagerom, transport na prvu mašinu za drobljenje, korišćenje zemljišta iskopa i rekultivacija zemljišta u tom području. Tehnologija iskopa gline odnosi se na tipičnu tehnologiju iskopavanja švajcarske gline. Što se tiče staklenog reciklata, podaci su korišćeni iz baze: " Glass, cullets, sorted, at sorting plant/RER U", koja obuhvata uticaje na životnu sredinu procesa neophodnih za sortiranje i mlevenje sakupljenog otpadnog stakla (energija, materijal). Podaci se odnose na švajcarske i nemačke sortirane lokacije i primenjivi su za evropske uslove (SimaPro, 2018). Tehnologija proizvodnje staklenog reciklata zasniva se na tehnologiji koja se koristila sredinom devedesetih u Nemačkoj i Švajcarskoj.

Potrošnja energenata, neophodnih za sprovođenje procesa sušenja i pečenja u procesu proizvodnje 1 kg gotovog bloka od gline, navedeni su u tabeli 3.17. Za uticaj potrošnje električne energije na životnu sredinu korišćeni su podaci iz Ecoinvent baze za: "Electricity, low voltage, production CS, at grid/CS U". U pomenute podatke su uključeni uticaji proizvodnje električne energije u državnoj zajednici Srbije i Crne Gore, uticaj mreže prenosa električne energije, uticaji direktne emisije SF6 u vazduh, kao i gubici električne energije tokom niskonaponskog prenosa i transformacije iz srednjeg napona. Za uticaj upotrebe prirodnog gasa korišćena je baza podataka: "Heat, natural gas, at boiler modulating >100kW/RER U", koja obuhvata procese sagorevanja prirodnog gasa u kotlu toplotne snage >100kW, emisije i električnu energiju potrebnu za rad kotla i svi podaci su ekstrapolirani iz Švajcarske u Evropu (RER). Izvorni podatak za potrošnju prirodnog gasa izražen je u Nm³, a u Ecoinvent bazi podataka SimaPro softvera se zahteva unos vrednosti potrošnje prirodnog gasa u MJ. Donja toplotna moć prirodnog gasa kreće se u granicama

¹⁰ X predstavlja količinu sirove gline koja je u poglavlju 4., proračunata u zavisnosti od odabranog najpogodnijeg masenog udela staklenog praha.

¹¹ Y predstavlja najoptimalniji maseni deo staklenog praha koji je određen na osnovu ispitivanja svojstava svih eksperimentalnih blokova u skladu sa propisanim standardima.

od $31 - 34 \text{ MJ/m}^3$, a u Srbiji se uzima vrednost od 33 MJ/m^3 pri pritisku od 1 bara i temperaturi od 0°C (Ivković, 2012). Množeći uzetu vrednost za donju topotnu moć, 33 MJ/m^3 , sa potrošenom količinom prirodnog gasa u iznosu od $121\,000 \text{ Nm}^3$, dobija se podatak o potrošnji $3\,993\,000 \text{ MJ}$ prirodnog gasa u ciglani I. G. M. "Neimar" za 2015. godinu. U tabeli 3.17 prikazana je potrošnja prirodnog gasa koja je preračunata za proizvodnju 1 kg gotovog proizvoda.

Tabela 3.17 Podaci za LCA analizu o potrošnji energenata kod proizvodnje 1 kg pečenog bloka od gline

Energenti	Jedinica mere	Potrošnja
El. energija	kWh	0,071034483
Prirodni gas	MJ	0,078679803
Petrol koks	kg	0,039270936

Potrošnja energenata je uzeta da je identična i za proizvodnju blokova bez staklenog reciklata i za proizvodnju blokova sa staklenim reciklatom. Postoje literaturni podaci koji ukazuju na moguće uštede u potrošnji energenata prilikom proizvodnje građevinskih proizvoda sa masenim udelom staklenog reciklata (Smith, 2004; Hwang i dr., 2006; Chidiac i Federico, 2007; Hodge i dr., 2010; Memon i dr., 2013). Međutim, s obzirom na kompleksnost sprovodenja takve analize, to nije bio predmet istraživanja u okviru doktorske disertacije, pa je usvojena potrošnja energenata potrebna za proizvodnju blokova od gline bez staklenog reciklata u ciglani I. G. M. "Neimar".

Što se tiče Ecoinvent baze podataka za potrošnju petrol koksa korišćeni su podaci iz baze: "Petroleum coke, at refinery/RER U". Pomenuta baza podataka sadrži podatke o proizvodnom lancu petrol koksa i pripadajućim emisijama i potrošnji resursa ali ne sadrži podatke o emisijama koje nastaju sagorevanjem petrol koksa. S toga su emisije dodate iz literature EPA (2018).

Uticaj prevoza staklenog reciklata od Novog Sada do postrojenja za proizvodnju blokova, u ovom slučaju to je ciglana I. G. M. "Neimar", takođe je uračunat u okviru ocenjivanja uticaja na životnu sredinu. Iz Ecoinvent baze korišćeni su podaci specificirani za transport kamionom kapaciteta 16 tona: " Transport, lorry >16t, fleet average/RER U". U uticaje rada vozila na životnu sredinu su uračunati proizvodnja, održavanje i odlaganje vozila kao i potrošnja dizel goriva, za čije razmatranje su korišćeni različiti standardi za tretman nastalih emisija. Razdaljina za prevoz staklenog reciklata kamionom iznosi 55 km u jednom pravcu, a transport gline se realizuje u krugu ciglane i iznosi svega 1 km, koji je takođe uzet u obzir prilikom LCA analize.

S obzirom da proizvodni proces u ciglani I. G. M. "Neimar" ne proizvodi nikakav otpadni materijal pošto se svi materijali (škartovi) ponovo koriste u postrojenju, uticaj otpada nije uzet u obzir.

Distribucija, upotreba i odlaganje blokova nakon životnog veka proizvoda nisu razmatrani u okviru ove LCA analize, čiji su cilj i predmet definisani i ograničeni na uticaj samog procesa proizvodnje blokova.

Kao što je prethodno rečeno, primena metode IMPACT200+ uključuje sve potrošene resurse i emitovane emisije u Evropi (EU 25 + 3) tokom 2000. godine u okviru sprovođenja određenog procesa. Izlazi iz datog procesa obračunati su prema broju osoba u Evropi u 2000. godini odnosno za 464 815 432 osoba. Zemlje uključene u EU25 + 3 su: Austrija, Belgija, Kipar, Češka, Danska, Estonija, Finska, Francuska, Nemačka, Grčka, Mađarska, Irska, Italija, Letonija, Litvanija, Luksemburg, Malta, Poljska, Portugalija, Slovačka, Slovenija, Španija, Švedska, Holandija, Velike Britanija, Švajcarska, Norveška, Island (SimaPro, 2018).

3.3.4 Troškovi proizvodnje eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom u skladu sa uslovima definisanim u okviru modela

Relativno je jednostavno odabratи proizvode zasnovane na minimalnim ekonomskim uticajima životnog ciklusa, jer se građevinski proizvodi kupuju i prodaju na tržištu. Međutim, veoma kompleksan problem je naći odgovor na pitanje kako uključiti uticaj proizvodnje proizvoda na životnu sredinu pri donošenju odluke o nabavci istog. Uticaji na životnu sredinu, kao što su globalno zagrevanje, zagađenje vode i smanjenje resursa, su uglavnom isključeni iz ekonomске kalkulacije. To znači da se troškovi saniranja tih uticaja ne odražavaju u tržišnim cenama proizvoda koji su proizveli određene uticaje na životnu sredinu. Štaviše, čak i ako bi se donela odluka o uključivanju troškova uticaja na životnu sredinu u tržišnu cenu proizvoda, skoro je nemoguće to učiniti zbog teškoća u proceni ovih uticaja u ekonomskom smislu. Pitanje je kako odrediti cenu čistog vazduha i vode ili kako odrediti vrednost ljudskog života? Ekonomisti su diskotovali o ovim pitanjima decenijama, ali se do danas nije došlo do odgovarajućeg odgovora (Greig, 2014). Povezivanje socio – ekonomskih i tehničko – tehnoloških aspekata, vrlo često predstavlja osnovnu prepreku za unapređenje kvaliteta životne sredine, što je u direktnoj vezi sa dodatnim troškovima (na primer, odvojeno sakupljanje reciklabila, proizvodnja staklenog praha i transport reciklata za sobom povlači i dodatne troškove).

Kako bi se obezbedio što potpuniji uvid u model upotrebe otpadne staklene ambalaže kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline, pored analize indikatora uticaja

na životnu sredinu, analiziran je i ekonomski indikator, odnosno troškovi proizvodnje blokova sa staklenim reciklatom, u skladu sa uslovima definisanim u modelu. S obzirom na to da je analiza uticaja na životnu sredinu razmatrana za proces proizvodnje 1 kg bloka bez i sa staklenim reciklatom, i ekomska analiza je sprovedena na identičan način. Na osnovu dostupnih podataka iz ciglane I. G. M. "Neimar" i iz literature, izračunata je cena proizvodnje 1 kg bloka bez staklenog reciklata i 1 kg bloka sa staklenim reciklatom kako bi se takođe moglo uraditi međusobno poređenje i izvesti zaključna razmatranja o ekonomskom faktoru primene modela razmatranog u okviru doktorske disertacije.

Hodge i dr. (2010) su u okviru istraživanja istakli značaj ulaganja napora u cilju povećanja upotrebe otpadnih materijala, kao pratećih resursa primarnih resursa u industriji smatrali su to važnim korakom ka održivom industrijskom razvoju. U navedenom istraživanju, prikazan je nov pristup primene reciklaže u okviru granica industrije, sa fokusom na čitavu industriju, u cilju identifikovanja lokacija u kojima postoji korist i sa ekonomskog aspekta i sa aspekta zaštite životne sredine. Konkretno istraživanje je sprovedeno na identifikaciji objekata za proizvodnju keramičke opeke u Sjedinjenim američkim državama koji bi ostvarili značajnu ekonomsku korist upotrebom staklenog reciklata u proizvodnji. Uzimajući u obzir sprovedenu ekonomsku analizu za proračun cene proizvoda sa staklenim reciklatom i realne troškove u okviru ciglane I. G. M. "Neimar", objedinjeni su potrebnii podaci za proračun cene proizvodnje 1 kg bloka sa staklenim prahom, uzimajući u obzir mesto produkcije otpadnog stakla i transport istog, koji su definisani u okviru modela.

Ulazni podaci za proračun cene proizvodnje 1 kg bloka bez i sa staklenim reciklatom

Kako je prethodno rečeno, podaci o količinama materijala i troškovima proizvodnje građevinskih proizvoda u ciglani I. G. M. "Neimar" odnose se na 2015. godinu odnosno za proizvodnju 50 750 000 kg pečenih proizvoda (tabela 3.18). Dobijeni podaci prikazani u tabeli 20. preračunati su za proizvodnju 1 kg pečenog bloka.

Tabela 3.18 Prikaz troškova rada, materijalnih i kapitalnih troškova u ciglani I. G. M. "Neimar" u 2015. godini¹²

Troškovi	Jedinica	Iznos
Materijalni troškovi		41 000 000
Kapitalni troškovi	[€]	5 000 000
Troškovi rada		42 000 000

U tabeli 3.19 prikazani su svi faktori koji su uzimani u obzir prilikom proračuna cene bloka sa i bez staklenog reciklata.

Tabela 3.19 Faktori koji utiču na cenu bloka sa i bez staklenog reciklata

			EB bez SR	EB sa SR
Materijal	Jedinica	Cena [€/kg] ¹³		
Sirova glina	[kg]	0,001806685	✓	✓
Stakleni prah	[kg]	0,035000000	✗	✓
Električna energija	[kWh]	0,005176423	✓	✓
Prirodni gas	[Nm ³]	0,000746341	✓	✓
Petrol koks	[kg]	0,004068293	✓	✓
Energetski troškovi				
Materijalni troškovi	[€]	0,006568144	✓	✓
Kapitalni troškovi	[€]	0,000800993	✓	✓
Troškovi rada	[€]	0,006728343	✓	✓
Troškovi transporta	[€]	0,008800000	✗	✓

Svi podaci prikazani u tabeli 3.19, izuzev troškova transporta staklenog praha, baziraju se na podacima dobijenim iz ciglane I. G. M. "Neimar". Troškovi transporta staklenog praha preuzeti su iz literature (tabela 3.20) i na osnovu njih je urađen proračun u skladu sa uslovima transporta definisanim u podpoglavlju 3.2.3 u okviru definisanja procesa obuhvaćenih modelom.

¹² Dobijeni troškovi preračunati su iz dinara u eure po srednjem kursu u 2015. godini: 1 €=123,00 din.

¹³ [€/kg] – cena je izražena u € po kilogramu pečenog bloka, izuzev za troškove transpota koji se odnose na transport staklenog praha, odnosno cena transporta je izražena u € po kilogramu staklenog praha.

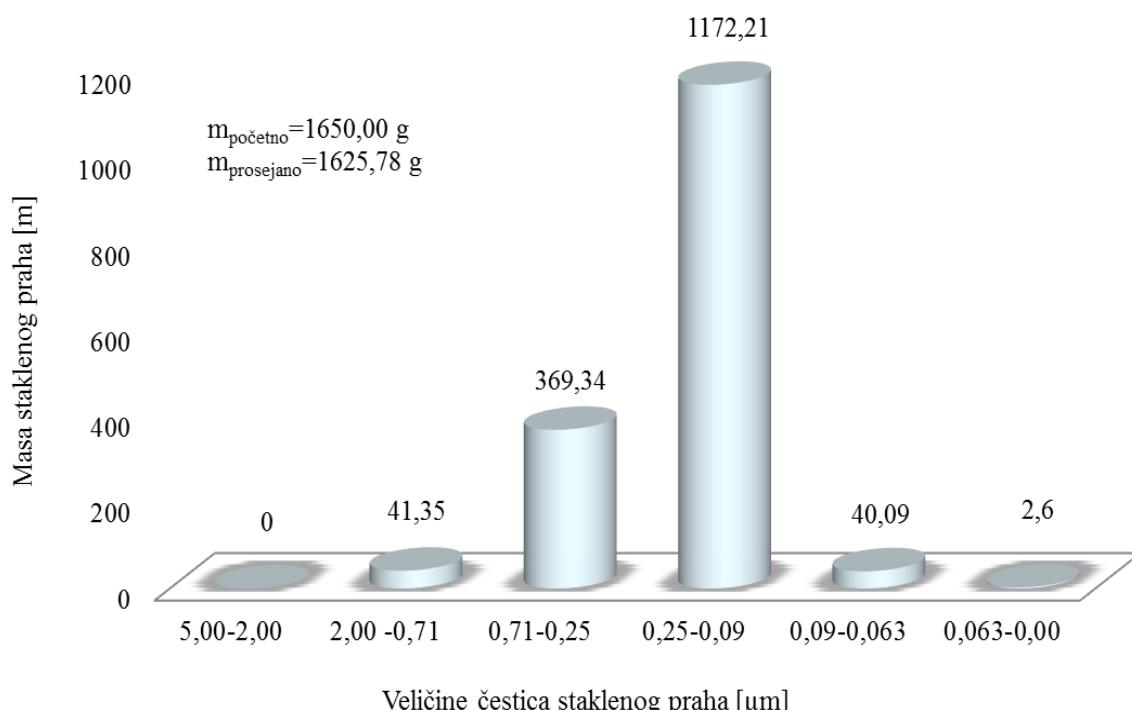
Tabela 3.20 Troškovi transporta staklenog reciklata (Hodge i dr., 2010)

	Jedinica	Vrednost
Troškovi transporta	[€/km]	1,21
Kapacitet kamiona	[t]	16,0
Cena transporta SR po km	[€/t·km]	0,08

Pod pretpostavkom da će svaka ciglana usvojiti promenu životnog ciklusa proizvoda, odnosno delimičnu zamenu primarnog resursa staklenim reciklatom, samo ako ima ekonomski benefit od toga, ovakav prikaz troškova predstavlja primarni korak prilikom utvrđivanja uslova da li ciglana može imati koristi i interes da snosi troškove upotrebe staklenog praha u protoku sirovina ili ne.

4. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

Kao prvi korak u procesu dobijanja eksperimentalnih uzoraka blokova od gline sa staklenim reciklatom bilo je neophodno uraditi optimizaciju procesa dobijanja staklenog reciklata u formi praha kako bi se odredili gubici pri mlevenju otpadne staklene ambalaže i veličina čestica staklenog praha pogodna za proizvodnju bloka od gline. Nakon granulometrijske separacije dobijenog praha iz staklenog reciklata na mehaničkom uređaju za prosejavanje, urađena je statistička i grafička obrada dobijenih rezultata. Na slici 4.1 data je distribucija mase dobijenog praha po veličini čestica, za reprezentativni uzorak.



Slika 4.1 Distribucija mase praškastog uzorka dobijenog mlevenjem otpadnog ambalažnog stakla po veličini čestica praha

Nakon izbora optimalnog režima mlevenja, dobijen je stakleni prah ujednačene veličine čestica, uz male gubitke, od oko 1,5%, u procesu mlevenja i prosejavanja. Najveći procenat dobijenih čestica je veličine ispod 0,71 mikrometara [μm], što je pogodna veličina za proizvodnju blokova (Živanović, 1981; Neimar, 2014).

Dobijeni rezultati optimizacije procesa dobijanja staklenog reciklata u formi praha su primjenjeni kod proračuna staklenog praha koji se može dobiti mlevenjem raspoložive količine otpadne staklene ambalaže produkovane na teritoriji Regiona.

4.1 Rezultati ispitivanja geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava eksperimentalnih blokova

4.2.1 Rezultati geometrijskih svojstava eksperimentalnih blokova

U skladu sa propisanim standardom (SRPS B.D8.011, 2002), urađeno je određivanje mera eksperimentalnih uzoraka (tabela 3.4) na osnovu čega je utvrđeno odstupanje od nazivne vrednosti prema SRPS B.D1.015 (2003). U tabeli 4.1 prikazane su vrednosti za dozvoljeno odstupanje mera od nazivne vrednosti prema SRPS B.D1.015, dok su u tabeli 4.2 dati rezultati koji se odnose na odstupanje od nazivne vrednosti određeno za eksperimentalne blokove.

Tabela 4.1 Odstupanje od nazivne vrednosti prema SRPS B.D1.015 (2003)

Klasa	Jedinica	Dužina	Visina	Širina
I	[mm]	± 6	± 5	± 5
II		± 8	± 7	± 7

Tabela 4.2 Rezultati odstupanja od nazivne vrednosti eksperimentalnih blokova

Mera	Dužina (mm)	Visina (mm)	Širina (mm)
Nazivna vrednost	40	25	40
Oznaka uzorka	Izmerene vrednosti		
Odstupanje od nazivne vrednosti kod EB0			
Najveće	$\pm 1,79$	$+0,19$	$\pm 1,12$
Najmanje	-0,01	-0,01	-0,20
Odstupanje od nazivne vrednosti kod EB5			
Najveće	$\pm 1,15$	$\pm 0,21$	$\pm 0,66$
Najmanje	-0,02	-0,01	-0,02
Odstupanje od nazivne vrednosti kod EB10			
Najveće	$\pm 1,15$	$\pm 0,28$	$\pm 0,66$
Najmanje	-0,02	-0,07	-0,05
Odstupanje od nazivne vrednosti kod EB15			
Najveće	$\pm 1,15$	$\pm 0,62$	$\pm 0,27$
Najmanje	-0,05	-0,03	-0,08

Mera	Dužina (mm)	Visina (mm)	Širina (mm)
Nazivna vrednost	40	25	40
Oznaka uzorka	Izmerene vrednosti		
Odstupanje od nazivne vrednosti kod EB20			
Najveće	±0,59	±0,62	±0,38
Najmanje	-0,02	-0,16	-0,01
Odstupanje od nazivne vrednosti kod EB25			
Najveće	±0,59	±0,36	±0,34
Najmanje	-0,05	-0,01	-0,05
Odstupanje od nazivne vrednosti kod EB30			
Najveće	±0,59	±0,36	±0,34
Najmanje	-0,05	-0,02	-0,05

Upoređivanjem dobijenih vrednosti odstupanja mera eksperimentalnih blokova od nazivne vrednosti sa vrednostima dozvoljenih odstupanja prikazanih u tabeli 4.1, konstatuje se da su dobijeni rezultati u granicama propisanim standardom SRPS B.D1.015.

Što se tiče određivanja odstupanja od pravog ugla dužih ivica pri rogljevima, prema SRPS B.D1.015 standardu, maksimalno dozvoljeno odstupanje od pravog ugla za proizvode prve klase je 5 mm, a za proizvode druge klase je 9 mm. Na osnovu izmerenih vrednosti prikazanih u podpoglavlju 3.1.7 u tabeli 3.5 za sve uzorce iz svake serije eksperimentalnih blokova izračunata je srednja vrednost odstupanja od pravog ugla koja iznosi 1,1 mm, a najveće odstupanje iznosi 2 mm. Shodno dobijenim rezultatima, zaključuje se da se nalaze u granicama standarom propisanih vrednosti odstupanja od pravog ugla.

Pored direktnog merenja odstupanja od pravog ugla dužih ivica pri rogljevima u skladu sa standardom, radena je i provera odstupanja od pravog ugla na pojedinim eksperimentalnim uzorcima kontaktnim goniometrom, metodom koja nije definisana propisanim standardom. Rezultati izmerenih uglova na određenim uzorcima, prikazani su u tabeli 4.3, a oznake kojima su uglovi obeleženi su prikazane na slici 3.17.

*Tabela 4.3 Uglovi između ravni kod eksperimentalnih uzoraka blokova sa staklenim reciklatom
mereni kontaktnim goniometrom*

Uglovi	EB5	EB10	EB15	EB20
a ₂ a ₃	92°4'	91°4'	87°5'	89°3'
a ₃ a ₄	89°4'	89°4'	92°3'	91°3'
a ₄ a ₁	90°4'	92°3'	89°2'	86°4'
a ₁ a ₂	88°0'	88°0'	90°4'	89°1'
a ₁ b ₁	90°4'	91°3'	89°1'	87°0'
b ₁ a ₃	91°4'	91°3'	89°5'	90°3'
a ₃ b ₂	89°4'	90°0'	89°0'	87°9'
b ₂ a ₁	90°4'	90°0'	92°0'	89°2'
a ₂ b ₁	87°2'	90°0'	90°0'	90°9'
b ₁ a ₄	87°4'	98°2'	89°4'	89°0'
a ₄ b ₂	87°2'	89°2'	89°1'	91°3'
b ₂ a ₂	88°0'	89°1'	90°0'	88°2'

Uočava se da maksimalno odstupanje od pravog ugla iznosi $\pm 2^\circ$ što se smatra prihvatljivim odstupanjem.

4.2.2 Rezultati fizičko – mehaničkih svojstava eksperimentalnih blokova

Od fizičko – mehaničkih svojstava eksperimentalnih uzoraka blokova određivana su svojstva koja su definisana standardima SRPS B.D8.011 i SRPS B.D1.015 (izgled površine, čvrstoća eksperimentalnih uzoraka pri pritisku (pritisna čvrstoća), masa, zapreminska masa i upijanje vode eksperimentalnih uzoraka i svojstva koja nisu definisana propisanim SRPS standardima, a kojima je utvrđivan uticaj sastava blokova na svojstva relevantna za praktičnu primenu (ispitivanje tvrdoće uzoraka metodom paranja, metoda dilatometrijskog merenja čvrstih uzoraka eksperimentalnih blokova, hemijska stabilnost eksperimentalnih uzoraka i snimanje difraktometara X – zraka na eksperimentalnim uzorcima).

Vizuelnim pregledom je utvrđeno da svi eksperimentalni uzorci imaju brazdane površine crvene boje, čime je zadovoljen kriterijum izgleda površine uzorka.

Kako je prethodno pomenuto, ispitivanje čvrstoće eksperimentalnih blokova pri pritisku sprovedeno je na po pet uzoraka iz svake serije eksperimentalnih blokova. Kao merodavna, uzeta je srednja (prosečna) vrednost čvrstoće (f_{bsr}) za svaku seriju uzoraka. U tabeli 4.4 prikazane su izmerene vrednosti sile loma (F) i na osnovu izmerenih površina

uzoraka blokova na koje je vršen pritisak (tabela 3.6) izračunate su čvrstoće uzoraka pri pritisku (f_{sr}).

Tabela 4.4 Rezultati merenja čvrstoće eksperimentalnih blokova pri pritisku

Oznaka uzorka	F [kN]	f_b [MPa]	f_{bsr} [MPa]
EB0	0/1	24,0	23,95769
	0/2	27,0	27,38328
	0/3	12,0	12,05262
	0/4	32,5	32,47406
	0/5	13,0	13,08804
EB5	5/1	24,5	24,38124
	5/2	29,5	29,27595
	5/3	22,0	22,08167
	5/4	18,0	18,03973
	5/5	19,5	19,49141
EB10	10/1	11,0	10,95243
	10/2	38,0	38,82841
	10/3	32,5	32,90534
	10/4	20,0	19,50642
	10/5	15,0	15,21327
EB15	15/1	22,0	22,21291
	15/2	13,0	13,07266
	15/3	14,0	14,00720
	15/4	35,0	35,12871
	15/5	15,0	15,19846
EB20	20/1	32,5	32,09391
	20/2	19,5	19,22450
	20/3	21,5	20,88572
	20/4	32,5	32,00125
	20/5	38,5	37,48116

Oznaka uzorka	F [kN]	f _b [MPa]	f _{bsr} [MPa]
EB25	25/1	22,0	22,03635
	25/2	23,0	23,18790
	25/3	16,0	15,99422
	25/4	30,0	29,93772
	25/5	30,0	29,87644
EB30	30/1	41,0	40,79782
	30/2	29,0	28,74239
	30/3	28,0	27,65334
	30/4	48,5	48,16948
	30/5	33,0	32,59150

Dobijeni rezultati prosečne čvrstoće pri pritisku kreću se između 21,79 MPa i 35,59 MPa u zavisnosti od udela staklenog praha u uzorku. S obzirom da je prema uslovima za određivanje marke šupljih opeka i blokova (tabela 3.7) najmanja prihvatljiva prosečna vrednost čvrstoće 2 MPa, a najveća 20 MPa, može se zaključiti da svi uzorci u pogledu ispitivanja čvrstoće pri pritisku zadovoljavaju neophodne deklarisane standarde.

Tabela 4.5 Rezultati određivanja gustine eksperimentalnih blokova hidrostatičkim terazijama

Oznaka uzorka	Masa suvog uzorka [g]	Masa uzorka posle potapanja u vodi [g]	Masa uzorka potopljenog u sudu sa vodom [g]	Zapreminska masa (gustina) uzorka [g/cm ³]
EB0	4,86590	6,20125	3,33845	1,69970
EB5	5,54480	6,97290	3,72040	1,70478
EB10	6,52745	8,12590	4,33645	1,72175
EB15	4,23920	5,39720	2,96900	1,74582
EB20	6,31020	7,71215	4,12365	1,75845
EB25	4,74740	5,95070	3,23875	1,75055
EB30	3,93415	4,98440	2,75900	1,76784

U tabeli 4.5. prikazani su rezultati zapreminske mase odnosno gustine eksperimentalnih uzoraka blokova od gline, koja je određena metodom hidrostatičkih

terazija. Kako se iz tabele 4.5 može videti, svi blokovi od gline sa staklenim reciklatom iz svake serije uzorka imaju zapreminske mase koje se nalaze u okviru standarima predviđenih granica dozvoljene zapreminske mase deklarisane za obične opeke i blokove za zidanje.

Kao i kod ispitivanja čvrstoće eksperimentalnih blokova, i određivanje svojstva upijanja vode (U) kod eksperimentalnih blokova rađeno je na po pet uzorka iz svake serije blokova i kao merodavna je uzeta srednja vrednost upijanja vode (U_{sr}) za svaku seriju uzorka. Rezultati određivanja svojstva upijanje vode prikazani su u tabeli 4.6.

Tabela 4.6 Rezultati merenja upijanja vode postupnim potapanjem eksperimentalnih blokova

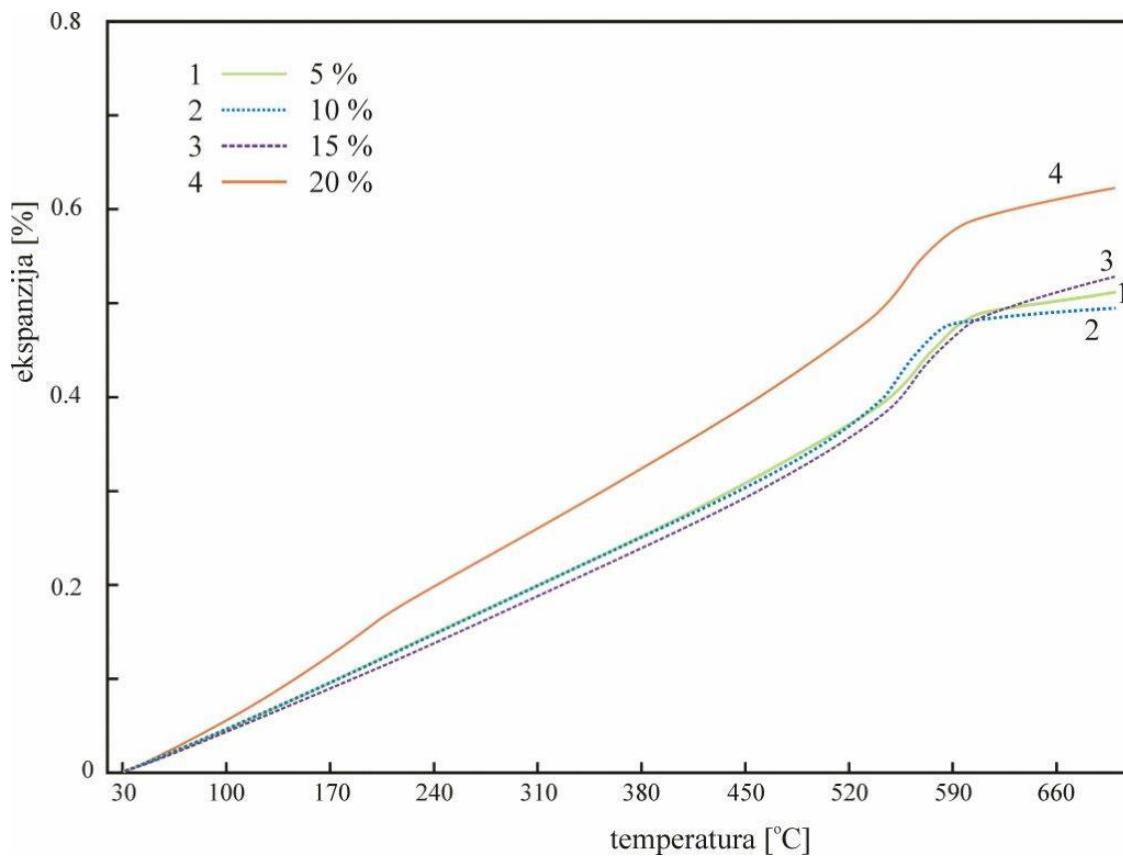
Oznaka uzorka	m_w nakon 24h [g]	m_w nakon 48h [g]	m_w konstantno[g]	U [%]	U_{sr} [%]
EB0					
0/1	60,10	60,31	60,43	17,39	
0/2	60,47	60,73	60,89	17,50	
0/3	58,18	58,37	58,55	17,38	17,33
0/4	58,18	58,39	58,53	17,08	
0/5	63,01	63,24	63,36	17,31	
EB5					
5/1	64,78	64,95	65,11	17,02	
5/2	64,12	64,29	64,48	17,45	
5/3	63,66	63,86	64,08	17,53	17,30
5/4	64,17	64,37	64,53	17,37	
5/5	60,33	60,55	60,73	17,17	
EB10					
10/1	60,73	60,97	61,14	17,10	
10/2	60,56	60,75	60,89	16,16	
10/3	60,15	60,40	60,53	16,61	16,63
10/4	58,22	58,44	58,54	16,92	
10/5	60,28	60,44	60,59	16,38	
EB15					
15/1	61,47	61,70	61,89	16,84	
15/2	59,32	59,57	59,68	16,15	
15/3	60,00	60,00	60,29	16,03	16,20
15/4	58,85	59,06	59,18	15,86	
15/5	59,43	59,66	59,83	16,13	

Oznaka uzorka	m_w nakon 24h [g]	m_w nakon 48h [g]	m_w konstantno[g]	U [%]	U_{sr} [%]
EB20					
20/1	64,15	64,52	64,72	16,05	
20/2	65,45	65,76	65,97	15,72	
20/3	65,62	65,88	66,00	15,81	15,79
20/4	65,38	65,67	65,88	15,84	
20/5	58,63	58,87	59,03	15,52	
EB25					
25/1	57,54	57,73	57,85	14,85	
25/2	61,50	61,77	61,94	15,39	
25/3	59,38	59,61	59,71	14,83	15,08
25/4	59,63	59,85	60,03	15,26	
25/5	60,19	60,37	60,54	15,05	
EB30					
30/1	60,32	60,67	60,84	14,15	
30/2	59,83	60,06	60,21	15,01	
30/3	62,34	62,53	62,82	14,82	14,43
30/4	61,17	61,36	61,51	14,03	
30/5	60,68	60,96	61,04	14,14	

Dobijene vrednosti prosečnog upijanja vode kreću se između 14,43% i 17,33% u zavisnosti od udela staklenog praha u uzorku. S obzirom na to da porozne keramičke proizvode, gde se ubrajaju i blokovi od gline, treba da karakteriše upijanje vode između 6% i 20%, dobijeni rezultati ispitivanja upijanja vode kod eksperimentalnih blokova nalaze se u granicama vrednosti propisanih standardom.

Za određivanje kvaliteta i otpornosti eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom, odnosno tvrdoće uzoraka, primenjena je metoda paranja. Za ispitane eksperimentalne blokve sa staklenim reciklatom iz svake serije uzorka utvrđena je tvrdoća između 3 i 4 po Mosovoj skali.

Metoda dilatometrijskog merenja uzorka eksperimentalnih blokova je primenjena radi određivanja promene dužine pojedinih uzoraka u funkciji temperature. Na slici 4.2 date su dilatometrijske krive blokova sa staklenim reciklatom. Procentualni udeli označeni na slici određuju procenat staklenog reciklata u masi bloka.



Slika 4.2 Dilatometrijske krive blokova sa staklenim reciklatom

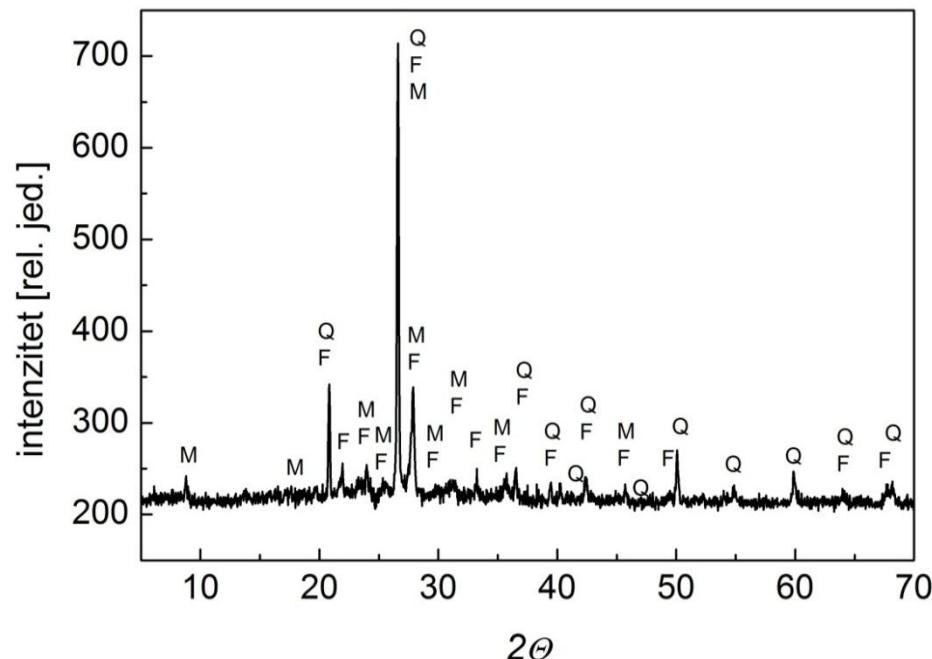
Vrednosti linearnih koeficijanata termičkog širenja, određenih na osnovu dilatometrijskih merenja, dati su u tabeli 4.7, kao i vrednosti dve "onset" temperature. Onset 1 predstavlja temperaturu kada prvi put dođe do značajne promene u nagibu zavisnosti $l = f(t)$, odnosno $\Delta l/l = f(t)$, a onset 2 predstavlja temperaturu kada drugi put dođe do značajne promene u nagibu zavisnosti $l = f(t)$, odnosno $\Delta l/l = f(t)$. Na snimcima su uočene promene nagiba, pa su s toga izdvojeni temperaturni intervali i određeni različiti koeficijenti termičkog širenja u tim temperaturnim intervalima. Izdvojeni su delovi krivih od 30 do 200 °C i posebno od 50 do 450 °C. Uporedo su date reprezentativne linije (merenja su vršena na različitim uzorcima istog sastava i računate su srednje vrednosti). Brzina grejanja je bila 5 °C/min. U širem temperaturnom intervalu, od 50 °C do 450 °C, mereni su ukupni efekti širenja i izračunat je prosečni linearni koeficijent termičkog širenja.

Tabela 4.7 Rezultati merenja efekata termičkog širenja na uzorcima blokova sa različitim sadržajem staklenog reciklata

Oznaka uzorka	$\alpha [10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}]$ (30–200 °C)	$\alpha [10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}]$ (50–450 °C)	Onset 1 [°C]	Onset 2 [°C]
EB5	6,9	7,4	552	601
EB10	6,7	7,2	541	586
EB15	6,4	6,9	550	602
EB20	9,2	9,3	547	594

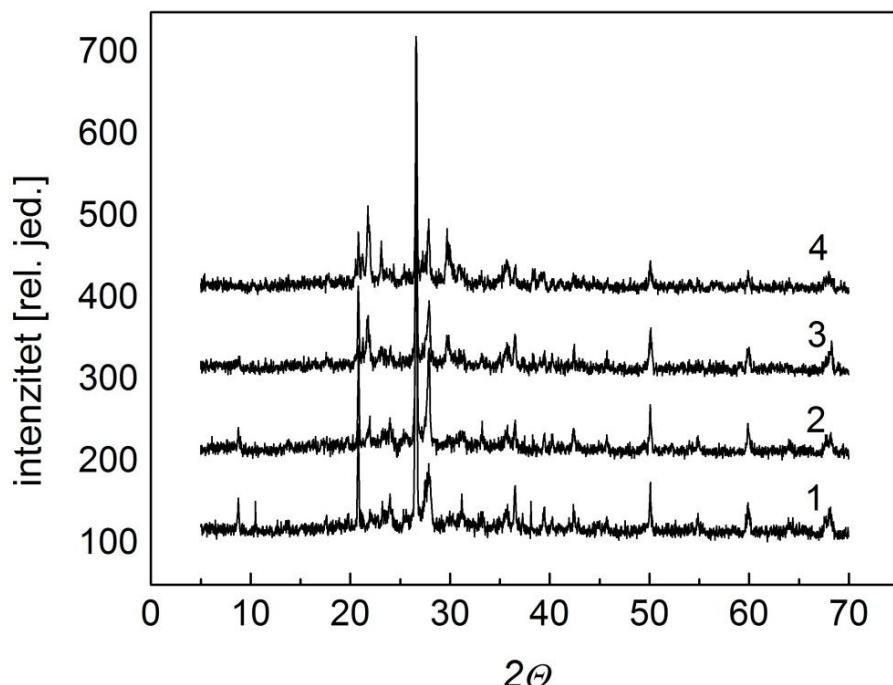
Testiranje hemijske stabilnosti uzorka dobijenih eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom, urađeno je imajući u vidu namenu proizvoda, kao i činjenicu da je kiselost atmosferskih padavina u stalnom porastu usled zagadivanja životne sredine. Nakon produžavanja perioda dejstva agensa na 24h takođe nije uočen gubitak dimenzija ili mase niti okrnjivanje ivica uzorka blokova sa staklenim reciklatom. Zaključeno je da eksperimentalni blokovi imaju izuzetnu hemijsku stabilnost na korišćene rastvore, odnosno da je proizvod visoko otporan na dejstvo atmosferskih padavina normalne kiselosti i takozvanih kiselih kiša.

Metoda difrakcije X – zraka primenjena je radi određivanja i poređenja mineraloškog sastava standardnih blokova od gline sa i bez staklenog reciklata. Na slici 4.3 prikazan je snimak difraktograma koji ukazuje na prisutvo kvarca (Q), feldspara (F) i muskovita (M) u eksperimentalnim uzorcima.



Slika 4.3 Mineraloški sastav blokova od gline sa staklenim reciklatom

Difraktogrami eksperimentalnih uzoraka blokova sa različitim masenim udelima staklenog reciklata prikazani su na slici 4.4. Redom su na slici prikazani difraktogrami eksperimentalnih blokova bez staklenog reciklata (1), sa masenim udelom staklenog praha od 10% (2), sa masenim udelom staklenog praha od 20% (3) i sa masenim udelom staklenog praha od 30% (4).



Slika 4.4 Difraktogrami eksperimentalnih uzoraka blokova sa različitim masenim udelima staklenog reciklata

Na osnovu prikazanih difraktograma, može se kvalitativno oceniti da udeo kristalnih komponenti u sastavu, koje dominantno odgovaraju kvarcu, opadaju sa povećanjem u dela staklenog raciklata u sastavu blokova, što je i očekivano.

Sumiranje dobijenih rezultata ispitivanja geometijskih i fizičko – mehaničkih svojstava eksperimentalnih blokova sa različitim masenim udelom staklenog reciklata u svom sastavu (5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%) i upoređivanje vrednosti rezultata sa vrednostima definisanim propisanim standardom prikazano je u tabeli 4.8.

Tabela 4.8 Poređenje dobijenih rezultata ispitivanja svojstava eksperimentalnih uzoraka sa vrednostima propisanim standardom SRPS B.D1.015

Svojstva EB sa SR	Jedinica	Vrednost propisana standardom	Dobijena vrednost	Zadovoljava (✓)/ne zadovoljava (✗)
Mere	[mm]	$\pm 6; \pm 5; \pm 5$	Od $\pm 0,01$ do $\pm 1,75$; od $\pm 0,01$ do $\pm 0,62$; od $\pm 0,01$ do $\pm 1,12$	✓
Odstupanje od pravog ugla dužih ivica pri rogljevima	[mm]	≤ 5 (I klasa) ≤ 9 (II klasa)	Od 1 do 2	✓
Čvrstoća pri pritisku	[MPa]	2 – 20	19,92 – 35,59	✓
Gustina	[g/cm ³]	1,200 – 1,900	1,700 – 1,768	✓
Upijanje vode	[%]	6 – 20	14,43% – 17,33%	✓

Uzimajući u obzir dobijene rezultate ispitivanja fizičko – mehaničkih svojstava blokova iz svake serije eksperimentalnih uzoraka, blokovi sa 30% masenog udela staklenog praha u svom sastavu pokazali su se kao najbolji uzorci. To svakako ide u prilog i razmatranju aspekta zaštite životne sredine gde je cilj bio odrediti koliki je maksimalni maseni udeo otpadnog stakla, od analiziranih 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%, koji može biti zastupljen u proizvodnji blokova od gline, umesto odlaganja na deponiju. Shodno rečenom, dalja analiza i rezultati u okviru sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom primenom modela definisanog u doktorskoj disertaciji baziraće se na upotrebi mase staklenog reciklata u iznosu od 30%.

4.2 Projekcija rezultata sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom primenom definisanog modela

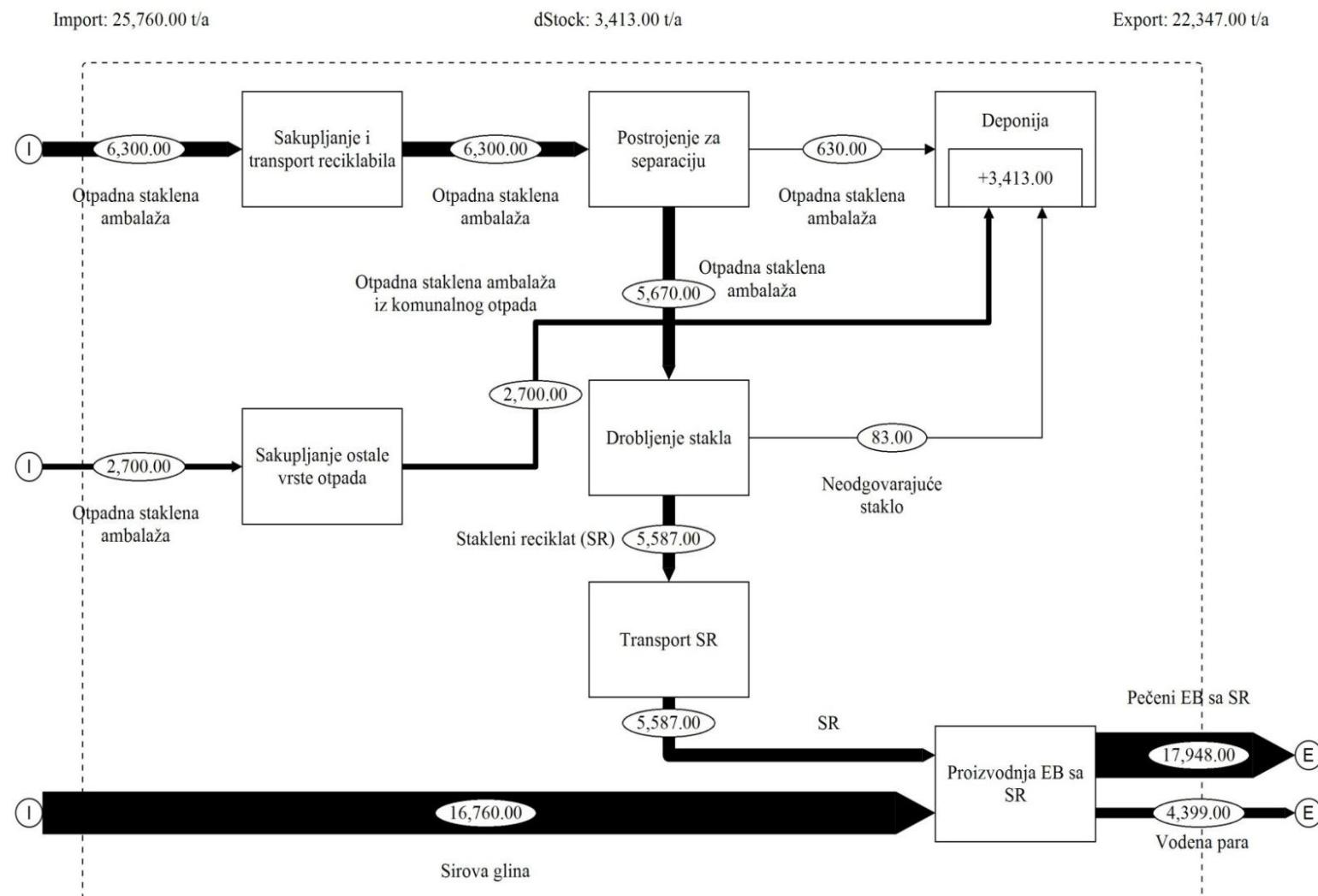
Rezultati u okviru sistema upravljanja otpadnim stakлом primenom modela upotrebe 30% mase otpadne staklene ambalaže kao sekundarnog resursa u proizvodnji blokova od gline, dobijeni su upotrebom literurnih podataka, podataka dobijenih na osnovu izvođenja eksperimenata u okviru disertacije i podataka poreklom iz proizvodnog procesa koji se odvija u ciglani I.G.M. "Neimar", prethodno određenih za svaki definisan proces u okviru modela. Prikaz dobijenih rezultata dat je na slici 4.5.

Ukupne godišnje količine generisane otpadne staklene ambalaže na teritoriji Regionala, koje predstavljaju ulazne tokove u postojeći sistem upravljanja otpadom, iznose oko 9 000 000 kg. S obzirom na to da je Regionalnim planom (2011), predviđen transport i sakupljanje otpada u dve kante, na slici 4.5 su predstavljene količine otpadne staklene ambalaže za oba toka sakupljanja otpada. U okviru prvog toka (sakupljanje suvih frakcija komunalnog otpada), kao što su različite vrste reciklabilnih materijala, kao na primer, staklo, plastika, papir i drugo, izdvojilo bi se oko 6 300 000 kg otpadne staklene ambalaže koja se dalje tretira u postrojenju za separaciju, pri čemu oko 10%, odnosno 630 000 kg sitnog izdrobljenog otpadnog stakla završi na deponiji usled nemogućnosti njegovog izdvajanja iz toka otpada, dok preostalih 5 670 000 kg otpadnog stakla ide dalje na tretman u predviđeno postrojenje za drobljenje i pravljenje staklenog praha odnosno staklenog reciklata. U okviru drugog toka (mokra frakcija komunalnog otpada), koji predstavlja sakupljanje mešanog komunalnog otpada (kao na primer, ostaci od hrane, materije organskog porekla, baštenski otpad i slično), maseni udio slomljenog otpadnog stakla iznosi oko 2 700 000 kg i ono se direktno odlaže na deponiju.

Uzimajući u obzir eksperimentalni podatak da su gubici pri mlevenju stakla oko 1,5%, iz postrojenja za drobljenje raspoložive količine otpadnog stakla može se dobiti 5 587 000 kg staklenog praha, odgovarajuće veličine čestica, pogodne za mešanje sa glinom pri formiranju radne mase za proizvodnju blokova. Stakleni prah nezadovoljavajuće veličine čestica završio bi na deponiji u količini od oko 83 000 kg.

Sa dobijenom količinom staklenog praha i primenom definisanog masenog odnosa ulazne sirovine glina/staklo = 70%/30%, istraživanje je pokazalo da se može proizvesti 17 948 000 kg gotovih pečenih blokova od gline sa 30% masenog udela staklenog reciklata, pri čemu se mora imati u vidu i gubitak vlage iz sirove gline tokom sušenja i pečenja blokova u iznosi od oko 25 – 26%, što je takođe pokazano na slici 4.5.

Dobijeni podaci (slika 4.5) korišćeni su kao osnova za dalja neophodna izračunavanja u okviru kriterijuma za evaluaciju modela definisanih u podpoglavlju 3.3.



Slika 4.5 Rezultati sistema upravljanja otpadnom staklenom ambalažom u okviru definisong modela

4.3 Evaluacija modela na osnovu definisanih kriterijuma

Definisani kriterijumi za evaluaciju modela su sledeći: ušteda deponijskog prostora, očuvanje prirodnog resursa, stopa reciklaže, LCA analiza i troškovi proizvodnje eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom u skladu sa uslovima definisanim u okviru modela. Dobijeni rezultati u okviru razmatranih kriterijuma predstavljeni su u narednim podpoglavljima.

4.3.1 Rezultati uštede deponijskog prostora, prirodnog resursa i stopa reciklaže

Generisanje otpadne staklene ambalaže na teritoriji Regionala procenjeno je na oko 9 000 000 kg godišnje, od čega se samo 7 000 kg staklenog otpada reciklira a ostalo odlaže na deponiju u zapremini od oko 8 420 m³ godišnje. Primenom prikazanog modela, odnosno upotrebom 5 587 000 kg staklenog praha u proizvodnji blokova, odlagala bi se znatno manja količina staklenog otpada u zapremini od oko 3 196 m³. Što se tiče očuvanja gline, kao prirodnog resursa, primenom prikazanog modela, za godišnju proizvodnju 17 948 000 kg pečenih blokova sa 30% masenog udela staklenog reciklata u svom sastavu, potrebno je utrošiti 16 760 000 kg gline, dok bi za godišnju proizvodnju iste količine pečenih blokova bez staklenog reciklata bilo potrebno uložiti 24 336 000 kg gline, odnosno 7 576 000 kg gline više nego kod proizvodnje blokova sa staklenim reciklatom. Rezultati godišnje stope uštede deponijskog prostora (O_{DP}) i uštede gline kao prirodnog resursa (IG), kao i porast stope reciklaže staklenog otpada usled primene modela (SR) prikazani su u tabeli 4.9.

Tabela 4.9 Godišnja ušteda deponijskog prostora, gline i porast stope reciklaže staklenog otpada usled primene modela

Jedinica	O_{DP}	IG	SR
[%]	2,20	31,13	62

S obzirom da je životni vek deponije oko dvadeset godina, upotrebom staklenog otpada na prikazan način, može se produžiti vek deponije za 161 dan, što je značajan doprinos uzimajući u obzir maseni udio staklenog otpada u komunalnom otpadu.

4.3.2 Rezultati ocenjivanja uticaja procesa proizvodnje blokova bez i sa staklenim reciklatom na životnu sredinu

U okviru LCA analize procesa proizvodnje blokova od gline razmatrano je sledeće:

- uticaj procesa proizvodnje blokova od gline bez staklenog reciklata na životnu sredinu;
- uticaj procesa proizvodnje blokova od gline sa 30% masenog udela staklenog reciklata na životnu sredinu i
- uticaj procesa proizvodnje blokova od gline sa 30% masenog udela staklenog reciklata sa uračunatim transportom staklenog praha od Novog Sada do Zrenjanina, kako je definisano u okviru modela prikazanog u doktorskoj disertaciji.

U prvoj etapi analize, razmatran je uticaj na životnu sredinu samog procesa proizvodnje blokova od gline bez masenog udela staklenog reciklata i sa 30% masenog udela staklenog reciklata. Međutim, s obzirom na to da se glina i stakleni reciklat, kao ulazne sirovine u proizvodnji blokova moraju dopremiti do određene ciglane, u drugoj etapi analize uračunat je i uticaj transporta sirovina do odredišta. Kako je modelom definisano, proizvodnja blokova bi se odvijala u ciglani I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu. Ciglana koristi iskop gline u okviru svoje fabrike, tako da je razdaljina sa koje se transportuje glina svega 1 km. Stakleni reciklat bi se dovozio iz postrojenja za separaciju lociranog u Novom Sadu, pa razdaljina za transport iznosi 55 km u jednom pravcu odnosno 110 km u oba pravca. Na osnovu prethodno predstavljenih rezultata, najoptimalniji maseni udeo staklenog praha, koji je određen ispitivanjem svojstava svih eksperimentalnih blokova, u skladu sa propisanim standardima, iznosi 30%. Shodno tome, u tabeli 4.10, su prikazani podaci koji su unešeni u Ecoinvent bazu podataka pri analizi proizvodnje blokova sa staklenim reciklatom.

Tabela 4.10 Podaci za LCA analizu o ulaznim sirovinama kod proizvodnje 1 kg pečenog bloka sa 30% masenog udela staklenog reciklata

Ulazne sirovine	Jedinica mere	Masa	1 kg gotovog proizvoda
Sirova glina	kg	0,93380	Blok sa 30% mase SR
Stakleni prah	kg	0,31128	

Rezultati koji se odnose na indikatore na međupozicijama i krajnjim pozicijama mehanizama životne sredine, kao i normalizovane vrednosti pri analizi procesa proizvodnje 1 kg bloka bez staklenog reciklata (EB0), 1 kg bloka sa staklenim reciklatom (EB30) i 1 kg bloka sa staklenim reciklatom i uračunatim transportom staklenog praha od Novog Sada do Zrenjanina (EB30+transport), su međusobno upoređeni i prikazani u tabelama 4.11, 4.12 i 4.13. Kod prikaza normalizovanih vrednosti, faktor oštećenja koji se nalazi u Ecoinvent bazi podataka se normalizuje deljenjem uticaja po jedinici emisije sa ukupnim uticajem svih supstanci specifične kategorije za koje postoje faktori karakterizacije, po osobi godišnje (stan.god., za Evropu).

Sumaran prikaz i poređenje rezultata ocenjivanja uticaja pomenutih vidova procesa proizvodnje blokova dat je u tabeli 4.14.

Tabela 4.11 Rezultati indikatora na međupoziciji mehanizama životne sredine pri analizi procesa proizvodnje blokova bez staklenog reciklata (EB0), sa staklenim reciklatom (EB30) i EB30 sa uračunatim transportom staklenog reciklata od Novog Sada do Zrenjanina

Rezultati indikatora na međupoziciji mehanizama životne sredine	Kategorija uticaja	Jedinica	EB0	EB30	EB30+transport
	Karcinogena kategorija	kg C ₂ H ₃ Cl _{ekv}	0,000314109	0,000348158	0,000371991
	Nekarcinogena kategorija	kg C ₂ H ₃ Cl _{ekv}	0,000452050	0,000667026	0,000789536
	Respiratorna neorganska kategorija	kg PM _{2,5} u vazduh _{ekv}	0,000288241	0,000279772	0,000310664
	Jonizujuće zračenje	Bq C-14 _{ekv}	0,104445961	0,149353716	0,158667867
	Oštećenje ozonskog omotača	kg CFC – 11 u vazduh _{ekv}	2,36353·10 ⁻⁸	2,28946·10 ⁻⁸	2,58953·10 ⁻⁸
	Respiratorna organska kategorija – fotohemijska oksidacija	kg C ₂ H ₄ ekv	4,63361·10 ⁻⁵	4,35812·10 ⁻⁵	5,25886·10 ⁻⁵
	Ekotoksičnost akvatičnih sistema	kg TEG u vodu	1,078338102	9,65988311	10,23552596
	Ekotoksičnost zemljišta	kg TEG u zemljište	0,591578006	0,428045700	1,180269137
	Povećanje kiselosti zemljišta	kg SO ₂ u vazduh _{ekv}	0,003106207	0,002833184	0,003882534
	Zauzimanje zemljišta	m ² organskog zemljišta _{ekv·god.}	0,000263951	0,000222667	0,000223349
	Povećanje kiselosti akvatičnih sistema	kg SO ₂ u vazduh _{ekv}	0,001422013	0,001387321	0,001535046
	Eutrofikacija akvatičnih sistema	kg PO ₄ ³⁻ u vazduh _{ekv}	1,57787·10 ⁻⁵	1,54393·10 ⁻⁵	1,66292E·10 ⁻⁵
	Globalno zagrevanje	kg CO ₂ u vazduh _{ekv}	0,237389340	0,236419336	0,255923371
	Neobnovljivi izvori energije	MJ	3,659376788	3,610442406	3,896477008
	Ekstrakcija minerala	MJ	1,58275·10 ⁻⁶	2,1018·10 ⁻⁶	2,30175·10 ⁻⁶

Tabela 4.12 Rezultati indikatora na krajnjoj poziciji mehanizama životne sredine pri analizi procesa proizvodnje blokova bez staklenog reciklata (EB0), sa staklenim reciklatom (EB30) i EB30 sa uračunatim transportom staklenog reciklata od Novog Sada do Zrenjanina

Rezultati indikatora na krajnjoj poziciji mehanizama životne sredine	Kategorija uticaja	Jedinica	EB0	EB30	EB30+transport
	Zdravlje stanovništva	DALY	$2,04 \cdot 10^{-7}$	$1,99 \cdot 10^{-7}$	$2,21 \cdot 10^{-7}$
	Kvalitet ekosistema	PDF·m ² ·god	0,008252	0,007060	0,014131
	Klimatske promene	kg CO ₂ -ekv u vazduh	0,237389	0,236419	0,255923
	Resursi	MJ	3,659378	3,610445	3,896479

Tabela 4.13 Rezultati normalizovanih vrednosti na krajnjoj poziciji mehanizama životne sredine pri analizi procesa proizvodnje blokova bez staklenog reciklata (EB0), sa staklenim reciklatom (EB30) i EB30 sa uračunatim transportom staklenog reciklata od Novog Sada do Zrenjanina

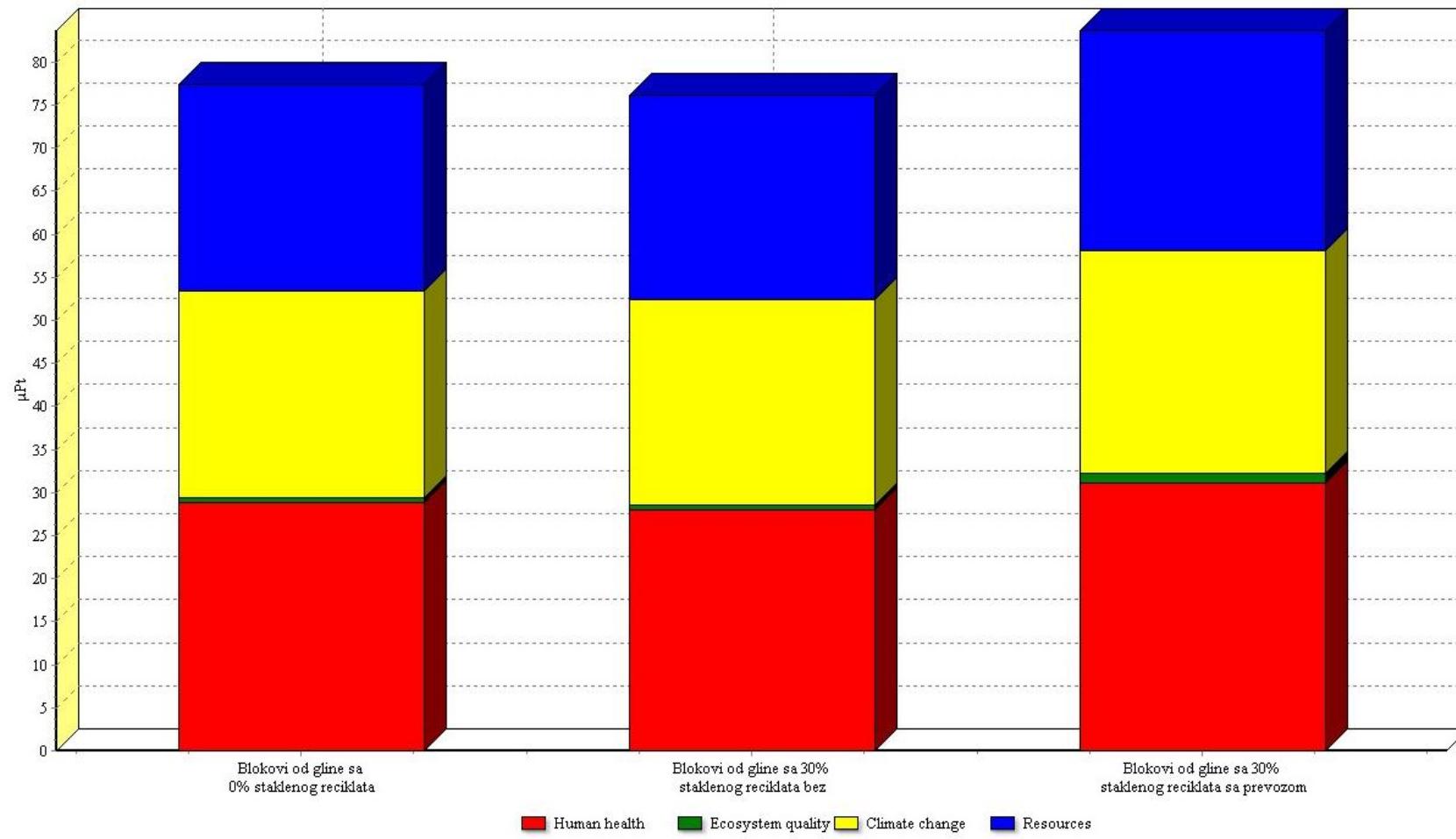
Rezultati normalizacije na krajnjoj poziciji mehanizama životne sredine	Kategorija uticaja	Jedinica	EB0	EB30	EB30+transport
	Zdravlje stanovništva		$2,88 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$3,11 \cdot 10^{-5}$
	Kvalitet ekosistema		$6,02 \cdot 10^{-7}$	$5,15 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$
	Klimatske promene	Stan.god.	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-5}$	$2,58 \cdot 10^{-5}$
	Resursi		$2,41 \cdot 10^{-5}$	$2,38 \cdot 10^{-5}$	$2,56 \cdot 10^{-5}$

Tabela 4.14 Sumaran prikaz i poređenje rezultata ocenjivanja uticaja proizvodnje blokova bez staklenog reciklata (EB0), sa staklenim reciklatom (EB30) i EB30 sa uračunatim transportom staklenog reciklata od Novog Sada do Zrenjanina

Rezultati ocenjivanja uticaja proizvodnje blokova na životnu sredinu	Kategorija uticaja	Jedinica	EB0	EB30	EB30+transport
	Zdravlje stanovništva		77,42978	76,18562	83,66407
	Kvalitet ekosistema		28,77237	28,03517	31,14541
	Klimatske promene	µPt	0,602372	0,515379	1,031566
	Resursi		23,97632	23,87835	25,84826
	Ukupno		130,7808	128,6145	141,6893

Ukupan normalizovan uticaj procesa proizvodnje 1 kg bloka bez staklenog reciklata, kroz odabrane indikatore, iznosi $130,7808 \mu\text{Pt}$, za proizvodnju 1 kg bloka sa 30% masenog udela staklenog reciklata iznosi $128,6145 \mu\text{Pt}$, a sa uračunatim transportom staklenog praha od Novog Sada do Zrenjanina uticaj na životnu sredinu se povećao i iznosi $141,6893 \mu\text{Pt}$. Kako je prethodno istaknuto, rezultati primene modela ukazuju na to da je moguće godišnje proizvesi 17 948 000 kg pečenih blokova sa staklenim reciklatom, shodno raspoloživoj količini otpadnog stakla i njegovom masenom udelu od 30%. Uzimajući u obzir proizvodnju pomenute količine blokova, uticaj proizvodnje na životnu sredinu blokova bez staklenog reciklata iznosi 2 347 Pt, blokova sa 30% masenog udela staklenog reciklata iznosi 2 308 Pt dok sa uključivanjem uticaja transporta na životnu sredinu iznosi 2 543 Pt. To znači da će emisije koje nastaju usled procesa proizvodnje blokova bez staklenog reciklata imati efekat na životnu sredinu kao 2 347 stanovnika Evrope u toku jedne godine, a emisije nastale usled procesa proizvodnje blokova sa 30% masenog udela staklenog reciklata će imati efekat na životnu sredinu kao 2 543 stanovnika Evrope u toku jedne godine.

Dobijeni rezultati uticaja proizvodnje blokova u definisanim uslovima predstavljeni su i grafički na slici 4.6, koja je izgenerisana iz softvera SimaPro na osnovu definisanih ulaznih parametara. Uočava se da je uticaj proizvodnje blokova bez i sa masenim udelom staklenog reciklata približno jednak, uz razliku u potrošnji resursa koja je prikazana plavom bojom, međutim uključivanjem uticaja transporta staklenog reciklata, ukupni uticaj na životnu sredinu proizvodnje blokova sa 30% masenog udela staklenog praha i transportom od Novog Sada do Zrenjanina, je povećan, što je i očekivano.



Comparing 1 kg 'Blokovi od gline sa 0% staklenog reciklata', 1 kg 'Blokovi od gline sa 30% staklenog reciklata bez prevoza' and 1 kg 'Blokovi od gline sa 30% staklenog reciklata sa prevozom';
Method: IMPACT 2002+ V2.11 / IMPACT 2002+ / Single score / Excluding infrastructure processes / Excluding long-term emissions

Slika 4.6 Poređenje rezultata uticaja proizvodnje blokova na životnu sredinu kroz odabране indikatore (zdravlje stanovništva, kvalitet ekosistema, klimatske promene i resursi)

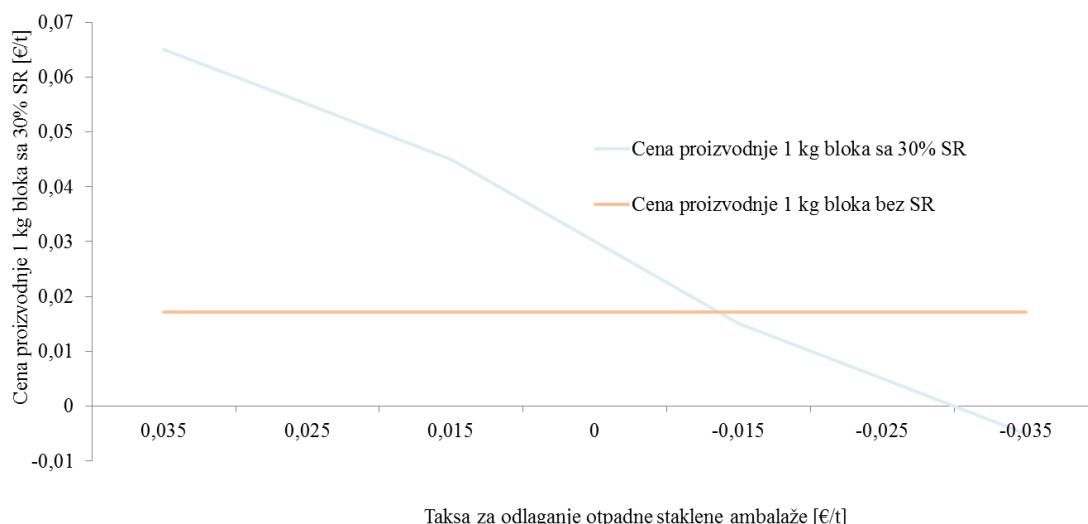
4.3.3 Rezultati određivanja ekonomskih kriterijuma

U okviru određivanja ekonomskih kriterijuma sprovedeni su proračuni za određivanje cene proizvodnje 1 kg bloka bez staklenog praha (EB0) i određivanje cene proizvodnje 1 kg bloka sa 30% masenog udela staklenog praha (EB30). Na osnovu ulaznih podataka predstavljenih u podpoglavlju 3.3.4 u tabeli 3.19, izračunate su cene proizvodnje blokova i predstavljene u tabeli 4.15.

Tabela 4.15 Cena proizvodnje 1 kg bloka bez staklenog praha i 1 kg bloka sa 30% masenog udela staklenog praha

Materijal	Jedinica	Količina po kg pečenog bloka	Ukupan trošak [€]	Cena 1 kg pečenog bloka [€/kg]
Sirova glina	[kg]	1,355932203	0,002449742	EB0
Električna energija	[kWh]	0,071034483	0,000367705	
Prirodni gas	[Nm ³]	0,078679803	5,8722·10 ⁻⁵	
Petrol koks	[kg]	0,039270936	0,000159766	
Materijalni troškovi	[€]	0,006568144	0,006568144	
Kapitalni troškovi	[€]	0,000800993	0,000800993	
Troškovi rada	[€]	0,006728343	0,006728343	
Sirova glina	[kg]	0,9338	0,001687082	EB30
Stakleni prah	[kg]	0,31128	0,0108948	
Električna energija	[kWh]	0,071034483	0,000367705	
Prirodni gas	[Nm ³]	0,078679803	5,8722·10 ⁻⁵	
Petrol koks	[kg]	0,039270936	0,000159766	
Materijalni troškovi	[€]	0,006568144	0,006568144	
Kapitalni troškovi	[€]	0,000800993	0,000800993	
Troškovi rada	[€]	0,006728343	0,006728343	0,030004819
Troškovi transporta	[€]	0,002739264	0,002739264	

Sumiranjem troškova predstavljenih u tabeli 4.15, izračunate su cena proizvodnje 1 kg bloka bez staklenog praha, koja iznosi 0,017133415 € i cena proizvodnje 1 kg bloka sa 30% masenog udela staklenog praha koja iznosi 0,030004819 €. Uočava se da je cena za proizvodnju blokova sa staklenim prahom znatno viša jer su u nju uračunati i troškovi proizvodnje i prevoza staklenog praha i održavanje transportnog vozila. U okviru proračuna cene nije uzeto u obzir plaćanje takse za odlaganje otpada, jer u ovom trenutku visina i primena plaćanja takse za odlaganje otpadnog stakla na deponiju u Novom Sadu ne postoji. Primera radi, na slici 4.7 prikazano je kretanje cene proizvodnje 1 kg bloka sa 30% masenog udela staklenog praha u odnosu na cenu proizvodnje 1 kg klasičnog bloka, bez staklenog praha, u zavisnosti od primene i visine takse za odlaganje otpada na deponiju. Taksa za odlaganje otpadne staklene ambalaže kreće se od 20 € po toni otpada pa do 200 € po toni otpada, u zavisnosti od države (Hogg, 2003). U razmatranje je uzeta vrednost za odlaganje 1 tone staklene ambalaže u visini od 35 €. Povećavanje stepena reciklaže i smanjivanje količine otpadne staklene ambalaže koja bi se odlagala na deponiju, uticali bi na smanjenje cene proizvodnje bloka sa 30% mase staklenog praha i bili bi značajan korak u primeni ovakvog načina reciklaže stakla u konkretnoj ciglani.



Slika 4.7 Kretanje cene proizvodnje 1 kg bloka sa 30% masenog udela staklenog praha u odnosu na cenu proizvodnje 1 kg bloka bez staklenog praha primenom plaćanja takse za odlaganje otpada

5. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Primena načela zaštite životne sredine (član devet Zakona o zaštiti životne sredine) u industriji, kao grani privrede koja zahteva veću količinu prirodnih resursa i izvora energije da bi se dobio krajnji proizvod, predstavlja jedan od pristupa konceptualizaciji stvarne održivosti i omogućava utvrđivanje koraka koji su prihvativi za postizanje ovog cilja. Korisni alati analize tokova materijala i procene životnog ciklusa određenog procesa proizvodnje, omogućavaju brzo saznavanje i pružanje detaljnih informacija o uticajima određene industrije na životnu sredinu koja za svoju proizvodnju troši ograničene prirodne resurse ili na drugi način nepovoljno utiče na životnu sredinu.

U cilju iznalaženja načina poboljšanja održivosti u oblasti industrijske proizvodnje, u okviru doktorske disertacije je analizirana mogućnost primene reciklaže otpadnog ambalažnog stakla za potrebe dobijanja novog proizvoda. Testirana je upotreba drobljenog otpadnog stakla u formi praha, kao sekundarne sirovine u proizvodnji blokova od gline u ciglani, kao potencijalnim rešenjem za postojeći problem u oblasti upravljanja staklenom ambalažom kao čvrstim otpadom.

U okviru doktorske disertacije razvijen je model, baziran na podacima koji se odnose na konkretan primer upotrebe otpadne staklene ambalaže u proizvodnji blokova od gline. Razmatrana je upotreba procenjene produkcije otpadne staklene ambalaže na teritoriji Regionala (koga čine: Grad Novi Sad i opštine Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas) u proizvodnji blokova od gline u skladu sa podacima i zastupljenim režimima proizvodnje u okviru ciglane I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu.

U skladu sa definisanim zadacima i ciljevima doktorske disertacije, sprovedeno je eksperimentalno dobijanje uzorka blokova od gline sa različitim masenim udelima staklenog reciklata (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25% i 30%), ispitivanje geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava dobijenih uzorka značajnih za primenu proizvoda i njihove usaglašenosti sa postojećim standardima u Srbiji (SRPS B.D1.015 i SRPS B.D8.011). Izvršena je optimizacija procesa dobijanja staklenog reciklata u formi praha sa ciljem minimizacije gubitaka pri mlevenju stakla, kao i dobijanje optimalne veličine čestica staklenog reciklata, odnosno dimenzija pogodnih za upotrebu kao sirovine u proizvodnji blokova. Nakon optimizacije, gubici su iznosili oko 1,5%, a najveći procenat čestica staklenog praha bio je veličine ispod $0,71 \mu\text{m}$, što se smatra pogodnom veličinom

za proizvodnju blokova od gline. Nakon pripreme mešavine sirovina, gline i određenog masenog udela staklenog reciklata, oblikovani su uzorci eksperimentalnih blokova sa različitim masenim udelom staklenog praha. Svi uzorci eksperimentalnih blokova proizvedeni su na osnovu tehnoloških karti pečenja ciglane I. G. M. "Neimar" u Zrenjaninu. Nakon toga je sprovedeno testiranje geometrijskih i fizičko – mehaničkih svojstava dobijenih uzoraka, značajnih za primenu proizvoda.

Na osnovu sprovedenog eksperimentalnog dela istraživanja zaključeno je da se staklena ambalaža kao sekundarna sirovina može iskoristiti za dobijanje blokova od gline, ako se kao kriterijum uzimaju kvalitet dobijenih uzoraka eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom i postojeći standardi. Naime, istraživanja relevantnih svojstava su pokazala da su sva svojstva zadovoljavajuća i da optimalna masena količina stakla, koja može da se meša sa glinom u cilju formiranja ulazne sirovine kod praktične proizvodnje blokova od gline dobrog kvaliteta, iznosi 30%. Takođe je, na osnovu dobijenih rezultata ispitivanja svojstava svih uzoraka blokova sa staklenim prahom u svom sastavu zaključeno sledeće:

- Pritisna čvrstoća eksperimentalnih uzoraka raste sa povećanjem masenog udela staklenog praha u njima;
- Zapreminska masa odnosno gustina uzoraka raste sa povećanjem masenog udela staklenog praha;
- Upijanje vode kod eksperimentalnih uzoraka opada sa povećanjem masenog udela staklenog praha;
- Vidljivo je smanjenje poroznosti eksperimentalnih uzoraka koje se direktno ogleda kroz smanjenje upijanja vode i povećanje čvrstoće uzoraka pri pritisku sa porastom masenog udela staklenog praha;
- Ukupna izdržljivost eksperimentalnih uzoraka direktno zavisi od masenog procenta staklenog praha u uzorku – sa većim masenim procentom stakla u proizvodu i izdržljivost raste.

Primenom alata analize tokova materijala na definisan model, dobijeni su rezultati o potencijalnoj količini blokova od gline koji mogu da se proizvedu sa 30% masenog udela staklenog praha, od otpadnog ambalažnog stakla koje se ne bi odlagalo na projektovanu regionalnu deponiju. Količina staklenog praha koja bi se dobila preradom raspoložive količine otpadne staklene ambalaže produkovane na teritoriji Regiona iznosi 5 587 000 kg, i sa tom količinom bi moglo da se proizvede 17 948 000 kg pečenih blokova koji kao ulaznu sirovinu koriste mešavinu gline i staklenog reciklata. Na osnovu ovih podataka, dobijeni su rezultati očuvanja resursa, kao jednog od odabranih kriterijuma za evaluaciju predloženog modela. Rezultati očuvanja resursa ukazuju da se primenom modela, godišnje

može uštedeti 2,2% deponijskog prostora i oko 31% gline, pri čemu će stopa reciklaže staklene ambalaže porasti za 62% u odnosu na trenutno nepostojanje razvijenog mehanizma sprovođenja reciklaže stakla. Uzimajući u obzir da je očekivani životni vek deponije dvadeset godina, procenjuje se da će ova ušteda prostora produžiti životni vek Regionalne deponije za 161 dan odnosno oko pola godine.

Sumiranjem svih rezultata dobijenih u okviru eksperimentalnog istraživanja i u okviru analize odabralih kriterijuma za evaluaciju predloženog modela u doktorskoj disertaciji, zaključuje se da se polazne pretpostavke odnosno postavljene hipoteze mogu potvrditi.

Kao dodatni segment istraživanja, i kao dodatna dva kriterijuma za evaluaciju modela, sprovedene su analiza uticaja modela na životnu sredinu i ekomska analiza proizvodnje eksperimentalnih blokova sa staklenim reciklatom u skladu sa definisanim uslovima proizvodnje u okviru modela.

Dobijeni rezultati u okviru LCA analize uticaja proizvodnje standardnih blokova od gline (2 347 Pt) i proizvodnje blokova sa masenim udelom staklenog reciklata (2 308 Pt) približno su jednaki, međutim uključivanjem uticaja transporta staklenog reciklata, od Novog Sada do Zrenjanina kako je definisano modelom, ukupni uticaj na životnu sredinu proizvodnje blokova sa 30% masenog udela staklenog praha neznatno se povećao (2 543 Pt). Ovde treba naglasiti da je ovakvo povećanje direktno uslovljeno relativno velikom razdaljinom između predviđene lokacije Regionalne deponije i ciglane, te je u daljim istraživanjima potrebno razmotriti upotrebu bližeg izvora staklenog reciklata, odnosno otpadne staklene ambalaže.

Na osnovu rezultata dobijenih u okviru ekomske analize proizvodnje blokova sa staklenim reciklatom, može se zaključiti da čisto ekonomski razlozi ne idu u prilog definisanom modelu. Cena proizvodnje 1 kg bloka bez stakla iznosi 0,017 €, dok je cena proizvodnje 1 kg bloka sa 30% masenog udela staklenog praha od 0,030 € znatno viša. Ovaj efekat je direktna posledica veoma niske cene primarne sirovine koju ciglane plaćaju oko 0,0018 € za kilogram, te je potrebno razmatranje dodatnih opcija koje bi smanjile troškove predloženog postupka.

Sprovedeno istraživanje u opštem smislu predstavlja doprinos aktuelnim ispitivanjima upotrebe otpada kao sekundarnog resursa ne samo u ciglarstvu, nego i u drugim granama industrije. Doprinos se ogleda u tome što je u okviru doktorske disertacije pronađen i predstavljen način sprovođenja upotrebe sekundarnog resursa, u ovom slučaju otpadnog stakla, u procesima industrijske proizvodnje, konkretno u ciglani, kroz analizu samog procesa proizvodnje upotreбom reciklata i njegovog uticaja na životnu sredinu sa

osnovnim osvrtom na ekonomski uticaj. S toga se, razvijeni model može primeniti, uz modifikacije uslovljene procesom proizvodnje određenog proizvoda, na svaku industriju u kojoj postoje uslovi i mogućnosti upotrebe otpada kao resursa u njihovoј proizvodnji.

Doprinos sprovedenih istraživanja, u specifičnom smislu, predstavljaju dobijeni eksperimentalni rezultati kojima je potvrđena pretpostavka da se stakleni reciklat može koristiti kao aditiv u proizvodnji blokova od gline, pri čemu je optimalni maseni udio staklenog praha 30%, čime su mehanička svojstva blokova znatno poboljšana. Shodno tome, otvara se budući tok istraživanja u smislu proučavanja svojstava pečenih blokova sa stakлом u uslovima smrzavanja i odmrzavanja i proučavanja uticaja upotrebe staklenog reciklata na topotnu provodljivost blokova.

Rezultati dobijeni analizom uticaja procesa proizvodnje blokova sa staklenim reciklatom na životnu sredinu, kao i rezultati analize uticaja na cenu proizvodnje blokova upotrebom staklenog reciklata, takođe predstavljaju značajan doprinos kompletном sprovedenom istraživanju i usmeravaju na dalji tok istraživanja. S obzirom na specifičnosti karakteristične za ciglane, u kojima se razlikuju režimi proizvodnje građevinskih proizvoda, razvijeno istraživanje treba sprovesti u ciglanama u kojima je glina, kao ulazna sirovina u proizvodnji, lošijeg kvaliteta, usled prisustva veće količine vlage i nepogodnog sastava. Kod upotrebe takve sirovine u proizvodnji, režimi sušenja proizvoda su duži u odnosu na predstavljene režime u disertaciji, a pečenje proizvoda se odvija na znatno višoj temperaturi od 880°C koja je primenjena u istraživanjima. Shodno tome i pregledom postojeće literature u oblasti istraživanja, promena režima sušenja i pečenja blokova treba da bude razmatrana zbog toga što su uštide u energiji, koje bi mogle da se postignu skraćivanjem vremena sušenja i snižavanjem temperature pečenja proizvoda od gline, možda i najznačajniji potencijal za ukupne benefite predložene primene u doktorskoj disertaciji, a o kojima se može razmišljati ako se ima u vidu promenjena ulazna sirovina u industrijskoj proizvodnji. Uz realizaciju predloženih pravaca budućih istraživanja i uz primenu razvijenog modela iz doktorske disertacije, pretpostavlja se da je moguće ostvariti merljivu ekonomsku dobit a samim tim i dodatnu korist po životnu sredinu.

6. LITERATURA

- Baccini P., Brunner P.H. Metabolism of the Anthroposphere – Analysis, Evaluation, Design. The MIT Press Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2012.
- BEES. "Building for Environmental and Economic Sustainability." 2016. <https://www.nist.gov/services-resources/software/bees> (accessed Avgust 2018).
- BIA. "Brick Industry Association." Technical notes on Brick Construction, 2006.
- Bingel P., Bown, A. Sustainability of construction materials. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009.
- Borwn I. W. M., Mackenzie K. J. D. "Process design for the production of a ceramic-like body from recycled waste glass. Part 2 The effect of fabrication variables on the physical properties of the fired body." *Journal of Material Science* 17 (1982): 2171-2183.
- Brunner P. H., Fellner J. "Setting priorities for waste management strategies in developing countries." *Waste Management & Research* 25 (2007): 234-240.
- Brunner P. H., Rechberger H. Practical handbook of Material Flow Analysis. Taylor&Francis e-library, 2004.
- Cencic O., RechbergerH. "Material Flow Analysis with Software STAN." *Environmental Informatics and Industrial Ecology*, 2008: 440-447.
- Chidiac S.E., Federico L. M. "Effects of waste glass additions on the properties and durability of fired clay brick." *Canadian Journal of Civil Engineering* 34 (2007): 1458-1466.
- Christensen, Thomas H. Solid Waste Technology & Management Volume 1. WILEY, A John Wiley and Sons, Ltd., Publication, 2011.
- Demir I. "Reuse of waste glass in building brick production." *Waste Management & Research* 27 (2009): 572-577.
- Denić, Vladimir. Priručnik o upotrebi opekarskih proizvoda - II dopunjeno izdanje . Društvo "SIG", 2005.

Dondi M., Guarini G., Raimondo M., Zanelli C. "Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles." *Waste Management* 29 (2009): 1945-1951.

EN ISO 14040:2006, Environmental management —Life cycle assessment —Principles and framework. The European Standard, Brussels: European Committee for Standardization, 2006.

EPA. "Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories." 2018.
https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf (accessed Septembar 2018).

EPA. "Environmental Protection Agency - Glass Production." 2011.
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/infosheetnglassproduction.pdf> (accessed Novembar 2015).

EPA. Volume-to-Weight Conversion Factors. EPA - Environmental Protection Agency, Office of Resource Conservation and Recovery, 2016.

Evropska direktiva. Directive 2008/98/EC of The European Parliament and of The Council. 2008. (accessed Jun 2017).

FERVER. Guideline specifications for the product status of furnace ready cullet. Statement, European Federation of Glass Recyclers, 2007.

FEVE. "The European Container Glass Federation - Collection for Recycling Rates in Europe." 2013. <http://feve.org/glass-recycling-hits-73-eu/#gallery-4> (accessed Avgust 2018).

FEVE. "Glass Packaging Demand Growth: The Market Trusts Glass." 2017.
<https://feve.org/production-2016-copy/> (accessed Avgust 2018).

FEVE. "Recycling: Why glass always has a happy CO₂ ending." 2009.
<https://feve.org/recycling-glass-always-happy-co2-ending/> (accessed Jun 2018).

FEVE. "The European Container Glass Federation - Recycling." 2010.
<https://www.britglass.org.uk/our-work/recycling> (accessed Maj 2015).

Flanagan, Joe. Glass Recycling – Life Cycle Carbon Dioxide Emissions. Final Report, Manchester: Enviro Consulting Ltd, 2003.

Greig, Anne Landfield. BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) Please Questionnaire: User Guide. User Guide, Gaithersbur: NIST - The National Institute of Standards and Technology, 2014.

Heriyanto, Pahlevani F., Sahajwalla V. "From waste glass to building materials - An innovative sustainable solution for waste glass." *Journal of Cleaner Production* 191 (2018): 192-206.

Hischier. Life cycle inventories of packaging and graphical papers. Ecoinvent report No. 11, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

Hodge M., Ochsendorf J., Fernández J. "Quantifying potential profit from material recycling: a case study in brick manufacturing." *Journal of Cleaner Production* 18 (2010): 1190-1199.

Hogg, Dominic. Costs for Municipal Waste Management in the EU. Final Report to Directorate General Environment, European Commission, Eunomia Research & Consulting Ltd., 2003.

Humbert S., Schryver A.D., Bengoa X., Margni M., Jolliet O. Impact 2002+: User Guide, Draft for version Q2.21 (version adapted by Quantis). User Guide for Impact 2002+ methodology, Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), 2012.

Hwang J. Y., Huang X., Garkida A., Hein A. "Waste Colored Glasses as Sintering Aid in Ceramic Tiles Production." *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering* 5, no. 2 (2006): 119-129.

IPPC. Intergrated Pollution Prevention and Control-Best available techniques in glass manufacturing industry. IPPC reference document, European Commission, 2001.

IPTS. Institute for Prospective Technological Studies-Study on the Selection of Waste Streams for End-of-Waste Assessment. Final Report, Luxembourg: Publications Office of the European Union, European Commission, Joint Research Centre, 2009.

Ivanovski F., Sapuric Z., Dimitrovski D. "Functionality of Packaging Waste Management System in FYR Macedonia." *Journal of Environmental Protection and Ecology* 17, no. 3 (2016): 1029-1036.

Ivković, Ivan. "Istraživanje performansi autobusa sa pogonom na komprimovani prirodni gas sa stanovišta bezbednosti i uticaja na životnu sredinu." Doktorska disertacija, 2012.

Izveštaj. Izveštaj o ispitivanju šupljeg bloka od gline. Laboratorija za ispitivanje materijala, I. G. M. "Neimar" Zrenjanin, 2014.

Leshina V. A., Pivnev A. L. "Ceramic wall materials using glass waste." Glass and Ceramics 59, no. 9-10 (2002): 356-358.

Lin, Kae-Long. "The effect of heating temperature of thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) optical waste glass as a partial substitute partial for clay in eco-brick." Journal of Cleaner Production 15 (2007b): 1755-1759.

Lin, Kae-Long. "Use of thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) waste glass in the production of ceramic tiles." Journal of Hazardous Materials 148 (2007a): 91-97.

Lippiatt, Barbara C. Building for Environmental and Economic Sustainability. Technical Manual and User Guide, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, 2007.

Loryuenyong V., Panyachai T., Kaewsimork K., Siritai C. "Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks." Waste Management 29 (2009): 2717-2721.

Luz A. P., Ribeiro S. "Use of glass waste as a raw material in porcelain stoneware tile mixtures." Ceramics International, no. 33 (2007): 761-765.

Matteucci F., Dondi M., Guarini, G. "Effect of soda-lime glass on sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles." Ceramics International 28 (2002): 873-880.

Memon S. A., Loa T. Y., Cuib H. "Utilization of waste glass powder for latent heat storage application in buildings." Energy and Buildings 66 (2013): 405-414.

MGS. "Machined Glass Specialists-Fused quartz production." 2010.
<https://mgsfusedquartz.com/> (accessed Septembar 2018).

Miroslavljević Z., Mihajlović V., Šrbac D. "Prikaz trenutnog stanja upravljanja staklenom ambalažom u Srbiji." 8. Simpozijum "Reciklažne tehnologije i održivi razvoj". Borsko jezero: Univerzitet u Beogradu, Tehički fakultet u Boru, 2013. 101-106.

Miroslavljević Z., Mihajlović V., Šrbac D. "Situation of Glass Container Management in Serbia." Annals of Faculty Engineering Hunedoara - International Journal of Engineering 3, no. 11 (2013): 341-344.

Miroslavljević Z., Mihajlović V., Šrbac D. "Trenutno stanje i perspektive korišćenja otpadne staklene ambalaže u Srbiji." International Scientific Conference

"Metrology and Quality in Production Engineering and Environmental Protection" - ETIKUM, Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2014. 191-194.

Miroslavljević Z., Mihajlović V., Štrbac D., Stanislavljević N. "Management of Glass Containers in Serbia: Current Status and Perspectives." PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology - ICET. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 2013.

Miroslavljević Z., Štrbac D. " Overview of the previous studies about waste glass utilization in ceramic bricks and tiles" International Symposium on Analytical and Environmental Problems " Segedin: University of Szeged, Department of Inorganic and Analytical Chemistry, 2018. 353-357.

Miroslavljević Z., Štrbac D. "Overview of Waste Glass Container Management in Serbia according to the Decree on establishment of Container Waste Reduction Plan." International Symposium on Analytical and Environmental Problems " Segedin: University of Szeged, Department of Inorganic and Analytical Chemistry, 2016. 235-238.

Miroslavljević Z., Štrbac D., Štrbac G., Stanislavljević N. " Otpadna staklena ambalaža u Južnobačkom regionu - količine i mogućnosti iskorišćenja." International Scientific Conference "Metrology and Quality in Production Engineering and Environmental Protection" - ETIKUM, Novi Sad: Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2015. 121-124.

Mohajerani A., Vajna J., Cheung T. H. H., Kurmus H., Arulrajah A.. "Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review." Construction and Building Materials 156 (2017): 443-467.

Mukherjee, Swapna. The Science of Clays: Applications in Industry, Engineering, and Environment. Springer Netherlands, 2013.

Muravljev, Mihailo. Građevinski materijali. Građevinski fakultet, Beograd, 1995.

Mustafi S., Ahsan M., Dewan A. H., Ahmed S., Khatun N., Absar N. "Effect of waste glass powder on physico – mechanical properties of ceramic tiles." Bangladesh Journal of Science Research 24, no. 2 (2011): 169-180.

Neimar. Industrija građevinskog materijala, Zrenjanin. Konsultacije i pružanje neophodnih informacija stručnih lica zaposlenih u ciglani (2014).

Pacheco-Torgal F., Cabeza L.F., Labrincha J., de Magalhães A. Eco-efficient Construction and Building Materials. Woodhead Publishing, 2014.

Park S.B., Lee B.C., Kim J.H. "Studies on Mechanical Properties of Concrete Containing Waste Glass Aggregate." *Cement and Concrete Research* 34 (2004): 2181-2189.

Peulić, Đuro. Konstruktivni elementi zgrada. Croatiaknjiga, 2002.

Pfaender, H.G. Schott Guide to Glass. Springer Netherlands, 1996.

Phonphuak N., Kanyakam S., Chindaprasirt P. "Utilization of waste glass to enhance physicalemechanical properties of fired clay brick." *Journal of Cleaner Production* 112 (2016): 3057-3062.

Plan. Regionalni plan upravljanja otpadom za Grad Novi Sad i opštine Bačka Palanka, Bački Petrovac, Beočin, Žabalj, Srbobran, Temerin i Vrbas. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu 2011.

Projekat. Utvrđivanje količine i morfološkog sastava otpada u Republici Srbiji. Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine i zaštite na radu, 2008.

Raimondo M., Zanelli C., Matteucci F., Guarini G., Dondi M., Labrincha J.A. "Effect of waste glass (TV/PC cathodic tube and screen) on technological properties and sintering behaviour of porcelain stoneware tiles." *Ceramics International* 33 (2007): 615-623.

Scalet B. M., Garcia M. M. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass. JRC Reference Report, Luxembourg: Publications Office of the European Union, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, 2013.

SEPA. Izveštaj o upravljanju ambalažom i ambalažnim otpadom. Agencija za zaštitu životne sredine, 2017.

SEPA. Izveštaj o upravljanju ambalažom i ambalažnim otpadom. Agencija za zaštitu životne sredine, 2009.

SimaPro. Ecoinvent baza podataka. Softver SimaPro 8.0.3.14, 2018.

Smith, A.S. "Recycled glass as a brick fluxing agent." The International Conference of Sustainable Waste Management and Recycling: Glass Waste. London, 2004. 149-165.

SRPS B.D1.015, Šuplje opeke i šuplji blokovi od gline - Tehnički uslovi - Izmene i dopune 1. Standard, Institut za standardizaciju Srbije, 2003.

SRPS B.D8.011, Metode ispitivanja opeka, blokova i ploča od gline. Standard, Institut za standardizaciju Srbije, 2002.

Stanic-Maruna I., Fellner J. "Solid waste management in Croatia in response to the European Landfill Directive." *Waste Management & Research* 30, no. 8 (2012): 825-.

Stanisavljević, Nemanja. "Modelovanje sistema za upravljanje otpadom primenom analize tokova materijala." Doktorska disertacija, 2012.

Strategija. Strategija upravljanja otpadom za period 2010-2019 godine. Vlada Republike Srbije, Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine, 2010-2019.

Štrbac D., Miroslavljević Z., Štrbac G. "Application of transmittance on separation of glass containers." *Environmental Engineering and Management Journal* 16, no. 10 (2017): 2239-2245.

Štrbac D., Štrbac G., Miroslavljević Z., Ivetić T., Đačanin Far Lj., Skuban F. "Korišćenje otpadne staklene ambalaže kao sekundarne sirovine za dobijanje građevinskog bloka." Međunarodno naučno savetovanje: "Rizik i bezbednosni inženjerинг". Kopaonik: Visoka tehnička škola strukovnih studija, 2015.

Topcu I., Canbaz M. "Properties of concrete containing waste glass." *Cement and Concrete Research* 34 (2004): 267-274.

Uredba. "Uredba o utvrđivanju plana smanjenja ambalažnog otpada za period 2015-2019." 2015-2019.

Vellini, M., Saviola, M. "Energy and environmental analysis of glass container production and recycling." *Energy* 34 (2009): 2137-2143.

Vieitez E. R., Eder P., Villanueva A., Saveyn H. End-of-Waste Criteria for Glass Cullet. JRC Technical Proposals, Seville (Spain): Luxembourg: Publications Office of the European Union, European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, 2011.

Vossberg, Cherilyn. A Life Cycle Based Energy and Greenhouse Gas Emission Assessment of C&D Waste and Container Glass Recycling in the City of Cape Town. Doktorska disertacija, 2012.

Vujic G., Jovicic N., Redzic N., Jovicic G., Batinic B., Stanisavljevic N., Abuhress O. A. "A Fast Method for the Analysis of Municipal Solid Waste in Developing Countries-Case Study of Serbia." Environmental Engineering and Management Journal 8, no. 9 (2010): 1021-1029.

WRAP. A good practice guide for local authorities - Choosing and improving your glass collection service. Practice Guide, Banbury, Oxon: Waste & Resources Action Programme - WRAP, 2008.

Youssef N. F., Abadi M. F., Shaterc M. A. O. "Utilization of Soda Glass (Cullet) in the Manufacture of Wall and Floor Tiles." Journal of the European Ceramic Society 18 (1998): 1721-1727.

Zakon o upravljanju otpadom ("Sl. glasnik RS", br. 36/2009, 88/2010 i 14/2016). Službeni glasnik Republike Srbije, 2016.

Zakon o zaštiti životne sredine ("Sl. glasnik RS", br. 135/2004, 36/2009, 36/2009 - dr. zakon, 72/2009 - dr. zakon, 43/2011 - odluka US, 14/2016 i 76/2018). Službeni glasnik Republike Srbije, 2018.

Zebek, E., Szwejkowska, M., Raczkowski, M. "Legal and Organizational solutions of Municipal Waste Management in Poland in compliance with Waste Directive 2008/98/EC." Journal of Environmental Protection and Ecology 16, no. 2 (2015): 652-658.

Zhang, L. "Production of bricks from waste materials – A review." Construction and Building Materials 47 (2013): 643-655.

Živanović, Branislav. Materijali u građevinarstvu. Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1981.