

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Matea Baričević, Paula Topić

**EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE PARAMETARA MODELA DINAMIČKOG
HIGROTERMALNOG PONAŠANJA BETONA S RECIKLIRANIM AGREGATOM**

Zagreb, 2016.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu, pod vodstvom prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur, i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015./2016.

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. OSNOVNI POJMOVI | 4 |
| 3. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA | 6 |
| 3.1 Opći cilj | 6 |
| 3.2 Specifični cilj | 7 |
| 4. METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA | 8 |
| 5. BETON S RECIKLIRANIM AGREGATOM | 9 |
| 5.1 Građevinski otpad | 9 |
| 5.2 Obrada otpadnog građevinskog materijala | 12 |
| 5.3 Reciklirani agregat | 13 |
| 5.3.1 Reciklirani beton i reciklirana opeka | 15 |
| 5.4 Utjecaj recikliranog agregata na svojstva betona | 17 |
| 5.5 Primjer upotrebe betona s recikliranim agregatom u Hrvatskoj –ECO-SANDWICH® zidni panel | 20 |
| 6. HIGROTERMALNO PONAŠANJE | 23 |
| 6.1 Prolazak topline | 28 |
| 6.2 Metode proračuna higrotermalnog ponašanja | 30 |
| 6.3 Sorpcijske krivulje | 33 |
| 6.4 Higrotermalna svojstva betona | 35 |
| 6.5 Higrotermalna svojstva betona s recikliranim agregatom | 36 |
| 7. EKSPERIMENTALNI RAD | 38 |
| 7.1 Sušenje reprezentativnih uzoraka | 40 |
| 7.2 Vaganje tijekom procesa sušenja–provjera postizanja suhe mase | 42 |
| 7.3 Vaganje pri različitim vlažnostima | 42 |
| 7.4 Princip rada termohigrometra | 44 |
| 7.5 Priprema mješavina | 45 |
| 7.5.1 Postupak dobivanja rH 11% | 46 |
| 7.5.2 Postupak dobivanja rH 33% | 48 |
| 7.5.3 Postupak dobivanja rH 57% | 49 |
| 7.5.4 Postupak dobivanja rH 75% | 49 |
| 7.6 Analiza i preporuke za pripremu otopina | 50 |
| 7.6.1 Preporuke za odlaganje otopine | 51 |

| | | |
|-------|---|----|
| 7.7 | Sastav ispitanih betona s recikliranim agregatom | 51 |
| 8. | REZULTATI ISTRAŽIVANJA | 52 |
| 8.1 | Prikaz sušenja uzoraka od betona s recikliranim agregatom | 52 |
| 8.2 | Sorpcijske izoterme betona s recikliranim agregatom..... | 55 |
| 8.2.1 | Sorpcijske izoterme za rH 11% | 55 |
| 8.2.2 | Sorpcijske izoterme za rH 33% | 57 |
| 9. | ANALIZA I RASPRAVA | 59 |
| 9.1 | Dijagram toka eksperimentalnog rada | 62 |
| 10. | ZAKLJUČAK | 63 |
| 11. | ZAHVALE..... | 65 |

1. UVOD

Jedan od gorućih problema današnjice je sve brža industrijalizacija i urbanizacija zbog kojih se oduzimaju prirodna staništa te dolazi do kontinuiranog povećanja količine građevinskog otpada. U razvijenim europskim zemljama gospodarenje otpadom je prioritet jer se njime utječe na kvalitetu života, a građevinski otpad koji nastaje kao nusprodukt gospodarske aktivnosti postao je veliki problem današnjice koji narušava prirodnu ravnotežu. Građevinski sektor u Europi odgovoran je za 200 do 300 milijuna tona građevinskog otpada godišnje, što uzrokuje proces onečišćenja okoliša koji se odvija brže od procesa prirodne obnove [1]. Kao takav, građevinski otpad je prepoznat od strane Europske komisije kao jedno od prioritetnih područja za ulaganje, upravo zbog velikog potencijala za ponovnu upotrebu i recikliranje. Ponovnom upotrebom i recikliranjem građevinski otpad bi dobio dodanu vrijednost i postao temeljem cirkularne ekonomije svake europske države. S ciljem da se problem građevinskog otpada preobrazi u aktivnosti koje bi donijele benefite za okoliš i društvo (ekonomiju), tzv. zatvaranje petlje (eng. *Closing the loop*) Europska komisija donijela je ambiciozan akcijski plan za cirkularnu ekonomiju – Strategiju cirkularne ekonomije (eng. *Circular Economy Strategy*) te Okvirnu direktivu o otpadu (eng. *Waste Framework Directive* – WFD) kojom zahtijeva od zemalja članica Europske unije da poduzmu odgovarajuće mjere kako bi se postigli zahtjevi da se do 2020. godine količina recikliranog građevinskog otpada povećana najmanje 70%. U razvijenim zemljama poput Nizozemske, Belgije i Danske značaj ekološke svijesti i mogućnosti iskorištavanja otpada je na visokom nivou na što ukazuju podaci da te zemlje recikliraju više od 80% građevinskog otpada, dok je u Hrvatskoj situacija znatno drugačija [2]. Istraživanja pokazuju da se u Republici Hrvatskoj godišnje proizvede 2,5 mil. tona građevinskog otpada, od čega se tek 7% reciklira [3]. Jedna od mogućnosti korištenja građevinskog otpada je kao nove sirovine za proizvodnju građevinskih materijala i proizvoda. Recikliranjem građevinskog otpada i njegovim korištenjem kao agregata za proizvodnju betona, moguće je smanjiti iskorištavanje prirodnih sirovina, smanjiti štetan utjecaj na okoliš te takav beton s recikliranim agregatom koristiti za proizvodnju novih građevinskih proizvoda koji zasigurno svojim svojstvima mogu konkurirati "tradicionalnim" materijalima i proizvodima te pronaći svoje mjesto na tržištu. Samim time bi i industrija betona dodatno proširila svoju dimenziju održivosti.

Drugi gorući problem današnjice je iskorištavanje neobnovljivih izvora koji su prisutni u ograničenim količinama i posljedično tome nesigurnost u opskrbi energijom. Navedeno je potaklo orijentaciju prema istraživanju, razvoju i upotrebi obnovljivih izvora energije te promjenu svijesti o nužnosti smanjenja potrošnje energije. Zgrade su u Europi odgovorne za 40% potrošnje energije te za 32% emisije CO₂ [4]. Time ponovno građevinski sektor posjeduje izniman potencijal za uštede, koje Europa zahtijeva kroz ciljeve 20 – 20 – 20 koji su također među ključnim ciljevima strategije Europa 2020 (eng. *Europe 2020 strategy*). Ciljevi strategije Europa 2020 su smanjenje emisija stakleničkih plinova za 20%, smanjenje ukupne potrošnje energije za 20%, te povećanje udjela obnovljivih izvora energije za 20% [4].

Smanjenje potrošnje u zgradarstvu moguće je postići energetsom obnovom postojećih zgrada i projektiranjem energetske učinkovite novih zgrada. Zgrade niske potrošnje energije, primjerice niskoenergetske zgrade, pasivne zgrade i zgrade gotovo nulte energije, zahtijevaju poštivanje određenih principa projektiranja. Jedan od osnovnih koraka je energetske učinkovite vanjske ovojnice. Energetske učinkovite vanjske ovojnice je u neprestanoj interakciji s vanjskim okolišem i unutrašnjosti zgrade u kojoj borave ljudi. Interakcija se ogleda u prolasku vlage i topline kroz vanjsku ovojnicu. Prolazak topline i vlage su međusobno ovisni procesi koji se ne mogu u potpunosti spriječiti te oni definiraju tzv. higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice. Ukoliko vanjska ovojnica zgrade nije projektirana i izvedena prema svim važećim propisima i pravilima struke, te ukoliko nije poznato i uzeto u obzir njezino higrotermalno ponašanje, može doći do pojave građevinskih šteta koje narušavaju komfor i zdravlje ljudi koji borave u takvoj zgradi. Također, higrotermalno ponašanje upućuje je li energetske učinkovite zgrada zaista energetske učinkovite.

ECO-SANDWICH[®] je inovativni predgotovljeni ventilirani fasadni panel izveden od dvije različite vrste betona s recikliranim agregatom[5]. Prikladan je za izgradnju niskoenergetskih i pasivnih kuća, čime predstavlja građevinski proizvod koji ujedinjuje zbrinjavanje i produživanje životnog vijeka građevinskog otpada te smanjenje potrošnje energije u zgradarstvu. Međutim, stvarno ponašanje vanjske ovojnice zgrade izvedene ovakvim panelima nije poznato i ono uvelike ovisi o higrotermalnim karakteristikama materijala od kojih je panel izveden. Transport vlage kroz materijal opisuje se sorpcijskim krivuljama. Trenutno nema dostupnih istraživanja sorpcijskih krivulja za beton s recikliranim agregatom te je nužno provesti istraživanje kojim bi se ustanovile takve krivulje za betone s različitim recikliranim građevinskim otpadom koji se koristi kao agregat. Nepoznata je prikladnost pojedinih modela prilagodbe sorpcijskih krivulja za beton s recikliranim agregatom. Bez

poznavanja sorpcijskih krivulja nije moguće numeričkim proračunima odrediti pripadno dinamičko higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade izvedene betonom s recikliranim agregatom.

Navedeno upućuje na prioritet za daljnja znanstvena istraživanja, jer građevni proizvodi izrađeni od recikliranog betona mogu doprinijeti ostvarenju prethodno navedenih ciljeva koje je Europa propisala: cirkularna ekonomija i upravljanje otpadom, te smanjenje potrošnje energije. Tehnologija betona je najveći potrošač prirodnih resursa, kao što su kamen, pijesak i voda, ali i jedan od najvećih proizvođača otpada. Zbog svojih brojnih prednosti i činjenice da inženjeri i znanstvenici konstantno razvijaju nove tehnologije koje poboljšavaju održivost betona, beton će se koristiti u znatnoj mjeri i u budućnosti ali s preorijentacijom ka korištenju održivih komponenti [4].

2. OSNOVNI POJMOVI

Napomena: u sklopu ovog poglavlja opisani su pojmovi koji se spominju u radu ali unutar samog rada nisu detaljnije objašnjeni. Svi pojmovi koji su detaljnije objašnjeni unutar rada, nisu navedeni u ovom dijelu. Također, pojmovi nisu navedeni abecednim redom već redom kojim se pojavljuju u radu.

Niskoenergetska kuća je zgrada koja zahtjeva potrošnju energije od 40 - 60 kWh/(m²a) (zahtjevi su u svakoj državi ponešto drugačiji). Popularan naziv za njih je „trolitarska kuća“ jer se potrošnja energije od 40 kWh/(m²) godišnje može izraziti ekvivalentom potrošnje od 2,7 litara loživog ulja godišnje [6].

Pasivne zgrade su zgrade koje troše minimalno pet puta manje nego konvencionalne zgrade. Osnovne karakteristike pasivnih zgrada su: godišnja potrošnja energije za grijanje je manja od 15 kWh/m², a ukupna potrošnja za pripremu tople vode, grijanje, hlađenje i električnu energiju na godišnjoj razini iznosi manji od 120 kWh/(m²a) [6].

Zgrade gotovo nulte energije je zgrada vrlo niskih energetske svojstava. Nulta energija se omogućava iz obnovljivih izvora koji proizvode na zgradi ili u njezinoj neposrednoj blizini. Ovisno o lokaciji zgrade (primorska ili kontinentalna klima) ukupna potrošnja primarne energije za grijanje, hlađenje, ventilaciju i pripremu potrošne tople vode ne prelazi 30 ili 40 kWh/(m²a) [6].

Vanjska ovojnica zgrade čine građevni dijelovi koji odvajaju unutrašnjost zgrade od vanjskog okoliša i negrijanog prostora zgrade. Vanjska ovojnica kao element arhitekture zatvara prostor određene namjene i rješava estetski izgled konstrukcije, a kao element konstrukcije se odupire vanjskim utjecajima i omogućava održavanje mikroklimе i toplinske stabilnosti prostora kojeg zatvara.

Zona sučeljka je malo područje uz zrna agregata, tj. prijelazna zona između agregata i cementne paste. Sučeljak (interface) je najslabiji dio strukture očvrstnalog betona s velikim brojem mikropukotina koje utječu na mehanička svojstva betona [7].

Toplinska provodljivost je svojstvo građevinskih materijala da u manjoj ili većoj mjeri provode toplinu. Kao mjera toplinske provodljivost nekog materijala služi koeficijent toplinske provodljivosti tog materijala [8].

Potrebna energija za grijanje jest računski određena količina topline koju sustavom grijanja treba tijekom jedne godine dovesti u zgradu za održavanje unutarnje projektne temperature u zgradi tijekom razdoblja grijanja zgrade. [9]

Otpornost na požar je sposobnost dijela građevine da kroz određeno vrijeme ispunjava zahtijevanu nosivost (R) i/ili cjelovitost (E) i/ili toplinsku izolaciju (I) i/ili drugo očekivano svojstvo u slučaju požara [10].

Toplinski mostovi su dijelovi vanjskog građevinskog elementa koji imaju manji otpor prolasku topline nego tipični presjek elementa [9].

Točkasti toplinski mostovi su vrste toplinskih mostova koji imaju manji otpor prolasku topline na mjestimičnim područjima prodora kroz ovojnicu zgrade [9].

Koeficijent prolaska topline je količina topline koju građevni element gubi u 1 sekundi po m^2 površine, kod razlike temperature od 1K, izraženo u W/m^2K [9].

Parcijalni tlak vodene pare je tlak vodene pare u zraku pri postojećem stanju vlage i temperature zraka [18].

Fickov zakon 1855. Godine A. Fick je eksperimentalno utvrdio zakon difuzije u obliku; zakon kaže da je brzina difuzije proporcionalna gradijentu koncentracije [9].

Koeficijent linearnog toplinskog istezanja jednak je produženju/ skraćanju elementa jedinične dužine uslijed jediničnog porasta njegove temperature [10].

Specifični toplinski kapacitet je količina topline u $[J/kgK]$ koja je potrebna da se jediničnoj masi nekog tijela povisi temperatura za jedinicu ovisno o temperaturi pri kojoj je izmjeren, raste se porastom temperature [10].

Koeficijent otpora difuziji vodene pare pokazuje koliko je puta veći otpor difuzijskom prolazu vodene pare kroz promatrani građevinski materijal nego kroz sloj mirnog zraka jednake debljine i jednake temperature [9].

Relativni otpor difuziji vodene pare pojedinog građevinskog elementa je umnožak debljine sloja elementa i koeficijenta otpora difuziji vodene pare [9].

3. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

3.1 Opći cilj

Opći cilj ovog rada sastoji se od dva segmenta:

- 1) Podići svijest o nužnosti i prednostima recikliranja građevinskog otpada u našoj zemlji, ali i šire. Nažalost, u Hrvatskoj se građevinski otpad još uvijek najčešće nekontrolirano odlaže na divljim odlagalištima koji kasnije ne predstavljaju samo problem estetike krajolika, već i puno ozbiljniji problem općih katastrofa za okoliš u kojem boravimo. Prema istraživanjima, procjenjuje se da je oko 90% građevnog otpada ponovo iskoristivo ili se može reciklirati [3].
- 2) Podići svijest o nužnosti racionalizacije glede potrošnje energije, što se naročito može postići u zgradarstvu prihvaćanjem energetske učinkovitosti kao standarda gradnje novih zgrada i obnove postojećih.

Upravo zbog problematike predstavljene u Uvodu koja je potaknula pisanje ovog rada, nastala je i ideja o upotrebi recikliranog građevinskog otpada kao agregata za beton. Jedan od primjera upotrebe recikliranog agregata za građevne proizvode prikladne za energetski učinkovitu gradnju je inovativni predgotovljeni ventilirani ECO-SANDWICH[®] zidni panel, razvijen kroz znanstvena istraživanja koja su ujedinila hrvatsku građevinsku industriju i akademsku zajednicu. Istraživanja su provedena u sklopu europskog projekta ECO-SANDWICH[®], financiranog u okviru programa CIP-EIP-Eco-Innovation 2011 [5]. ECO-SANDWICH[®] zidni panel pruža mogućnost za daljnja znanstvena istraživanja njegovog higrotermalnog ponašanja tijekom vijeka uporabe, što je predstavljeno kroz Specifični cilj ovoga rada u nastavku[11,3,5].

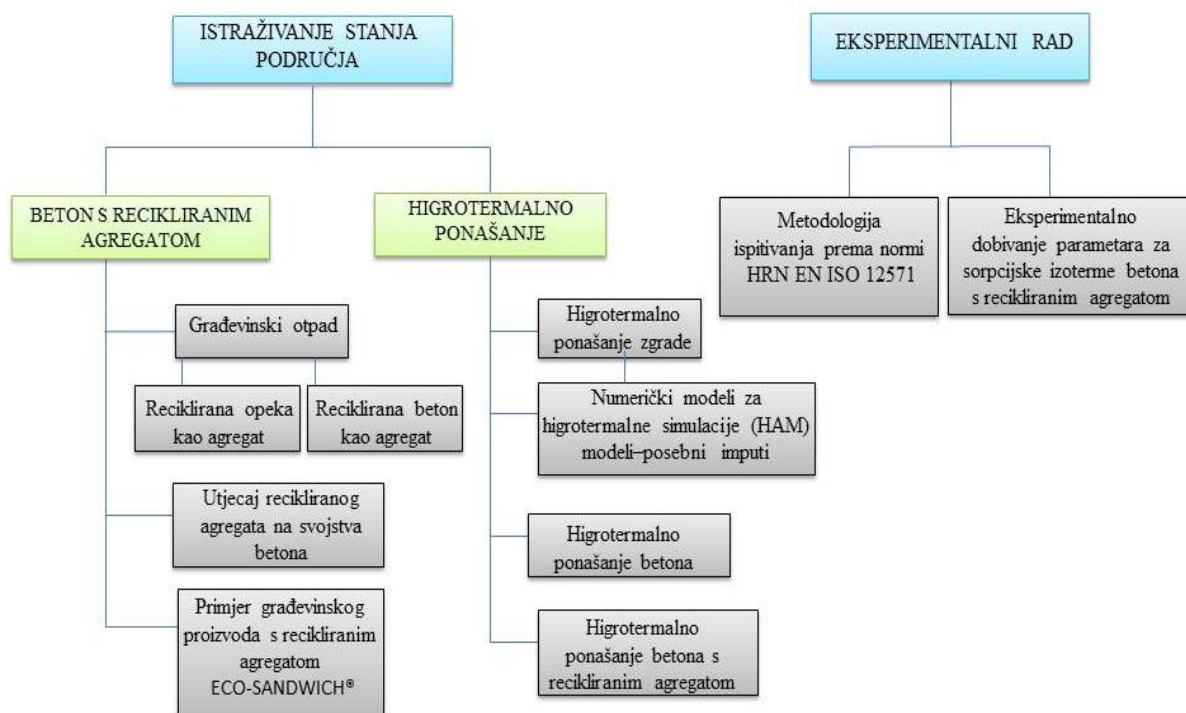
3.2 Specifični cilj

Kako bi se omogućila šira primjena betona s recikliranim agregatom u praksi te dobio uvid u njihovo stvarno ponašanje, potrebno je utvrditi higrotermalne karakteristike takvih betona kako bi se mogli definirati svi relevantni ulazni parametri potrebni za numeričke simulacije dinamičkog higrotermalnog ponašanja vanjskih ovojnica zgrada izvedenih od takvih betona.

Specifični cilj rada je eksperimentalno utvrđivanje sorpcijskih krivulja kao jednog od nužnih parametara modela dinamičkog higrotermalnog ponašanja betona s agregatom od recikliranog građevinskog otpada. Također, specifični cilj je i uspostava cjelovitog sustava ispitivanja te temeljem toga razvoj preporuka za eksperimentalno određivanje dinamičke ravnoteže betona s recikliranim agregatom u ovisnosti o termohigrometrijskim uvjetima okoliša.

4. METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA

U ovom istraživanju provest će se eksperimentalno laboratorijsko mjerenje sorpcijskih svojstava betona s recikliranim agregatima. Planom je predviđeno ispitivanje vremena potrebnog za postizanje ravnotežne vlage u betonu pri različitim relativnim vlažnostima okoline. Metodologija i plan istraživanja prikazani su shematski na Slici 1. Istraživanje stanja područja detaljno je opisano u poglavlju 4. Beton s recikliranim agregatom i poglavlju 5. Higrotermalno ponašanje. U poglavlju 6. Eksperimentalni rad detaljno su opisani metodologija ispitivanja prema normi HRN EN ISO 12571 i eksperimentalno dobivanje parametara za sorpcijske izoterme betona s recikliranim agregatom.

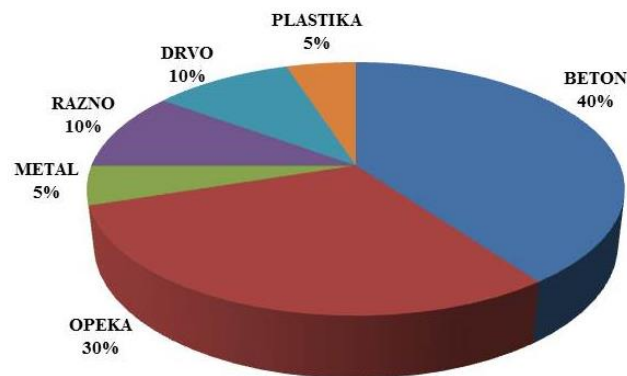


Slika 1 Metodologija i plan istraživanja područja

5. BETON S RECIKLIRANIM AGREGATOM

5.1 Građevinski otpad

Održivi razvoj i očuvanje prirodnih resursa postale su ključne odlike modernog društva. Karakteristika modernog doba sa stajališta tehnologije građenja je intenzivna gradnja, pri kojoj se nije vodilo dovoljno računa o očuvanju prirodnih resursa i o utjecajima građevina na kvalitetu života u svim fazama eksploatacijskog postojanja, počevši od iskopa mineralnih sirovina do odlaganja otpada nakon rušenja. Kao jedino prihvatljivo rješenje za probleme građevinskog otpada i smanjenje iscrpljivanja nalazišta prirodnog agregata, prihvaćen je postupak recikliranja, u prvom redu "starog" betona i opeke. Beton je nakon vode, najkorišteniji materijal na svijetu [12]. Činjenica da 1m^3 betona sadrži više od $0,70\text{ m}^3$ agregata, otvara mogućnost za rješavanje problema vezanog za iscrpljivanje prirodnih resursa agregata. Odnosno, može se reći da beton posjeduje izniman kapacitet za pohranu, skladištenje različitih sirovina iz okoliša i (nus)proizvoda ljudskih djelatnosti. Najveći udio građevinskog otpada čini upravo beton, a odmah iza njega nalazi se opeka što je prikazano na Slici 2.



Slika 2. Prosječna struktura otpada nakon rušenja građevine [11]

Ovisno o vrsti materijala građevinskog otpada i porijeklu izvorne namjene spektar moguće primjene recikliranog materijala je iznimno širok. Građevinski otpad kategoriziran prema porijeklu izvorne namjene dijeli se na sljedeće:

- 1) otpad iz stambene gradnje i visokogradnje
- 2) otpad iz raznih industrija
- 3) otpad iz cestogradnje i mostogradnje.

Osim porijekla, širok je spektar i vrsta materijala koje se mogu reciklirati i nakon toga ponovno koristiti. Neki od najučestalijih materijala su čisti lom od opeke, miješani lom od rušenja u visokogradnji, tj. šuta miješana s opekom i betonski lom. Područja moguće primjene su također vrlo široka, pa se primjerice reciklirani građevinski otpad može koristiti za proizvodnju zidnih elemenata, za proizvodnju laganog betona, drenažne slojeve i nasipavanja. Primjena je moguća i kod stabiliziranja nasipa, izgradnje sportskih terena, izrade završnih slojeva poda, te izgradnje poljoprivrednih putova i prometnica [3].



Slika 3. Divlje odlagalište u Umagu [14]

Valja naglasiti da primjenom građevinskog otpada za proizvodnju novih materijala, primjerice za proizvodnju betona, građevinski materijal dobiva veću dodatnu vrijednost nego u slučaju kada se koristi primjerice za nasipavanje. Također prednost ponovne upotrebe građevinskog otpada je i u tome što se otpad ne odlaže u prirodu. Slika 3. prikazuje divlje odlagalište otpada u Umagu na poljoprivrednom zemljištu.

Važnost recikliranja građevinskog otpada prepoznata je i od strane Europske unije koja je prihvatila politiku cirkularne ekonomije (u daljnjem nastavku rada CE). Strategija Europa 2020 za održivu industriju i CE odnosi se na kružno gospodarstvo, tj. na 'zadržavanju' proizvoda što je duže moguće u životnom ciklusu i izbjegavanju stvaranja otpada. Održiva industrijska proizvodnja se temelji na iskorištavanju obnovljivih izvora energije, smanjenju upotrebe opasnih kemikalija prilikom proizvodnje i smanjenju stvaranja otpada. Začetnici ideje o CE ističu da je za primjenu iste potrebno promijeniti cijeli operativni sustav industrijskog gospodarstva. Osim pozitivnog utjecaja na očuvanje okoliša strategija CE uključuje ekonomski rast otvaranjem novih radnih mjesta i kreiranja zelenih tehnologija, te

uštedom do 630 milijardi eura godišnje na razini europske industrije [14]. Hrvatska je prihvatila europski projekt CE uz kojeg su postavljeni i vlastiti ciljevi za postizanje održive industrije i cirkularne ekonomije. Jedan od ciljeva zbog kojeg je eksperimentalno istraživanje ovog rada vrlo značajno je povećanje količine recikliranog materijala na 50 % do kraja 2020 godine. Prema podacima iz osnovnog dokumenta o gospodarenju otpadom u RH, u pojedinim lokalnim jedinicama više od 80% otpada odloženog na divlja odlagališta čini upravo građevinski otpad [15]. Donošenjem novog Pravilnika o gospodarenju otpadom postignuta su značajna usklađivanja s propisima EU-a. Jedan od bitnih zahtjeva je smanjenje velike količine otpada koja nastaje prilikom izgradnje ili rušenja građevina, time je kontrolirano odlaganje građevinskog otpada, čime se umanjuje broj divljih odlagališta. Na samom kraju cijelog procesa reciklaža građevinskog otpada je neizostavan proces koji je isplativ gledajući s ekološkog i ekonomskog aspekta zelene gradnje. Na taj način smanjuje se korištenje neobnovljivih prirodnih resursa, potrošnja energije, emisija CO₂ te broj deponija, a povećava se broj radnih mjesta [4]. Na Slici 4. je prikazan plan kružnog gospodarstva za što duže "zadržavanje" proizvoda u životnom ciklusu, tzv. zatvaranje petlje (eng. *Closing the loop*).



Slika 4. Životni ciklus građevnog proizvoda [6]

5.2 Obrada otpadnog građevinskog materijala

Obrada građevinskog otpada može se izvoditi u najbližem centralnom pogonu za preradu građevinskog otpada ili na samom gradilištu. Obrada građevinskog otpada ovisi o zahtijevanoj kvaliteti agregata, o dostupnosti opreme, rokovima izvedbe, te klimatskim uvjetima i prostoru na mjestu rušenja. Prednosti i nedostaci s obzirom na mjesto obrade prikazani su u Tablici 1.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci obrade građevinskog otpada prema mjestu izvođenja [3]

| Obrada građevinskog otpada | Prednosti | Nedostaci |
|---------------------------------------|--|--|
| Na gradilištu | Smanjen utjecaj na okoliš prilikom transporta materijala od odlagališta do postrojenja za drobljenje | Utjecaj na okoliš stvaranjem buke i prašine (problem ako se radovi izvode u urbanim sredinama) |
| | Niži troškovi transporta otpada | Kašnjenja zbog mogućih vremenskih neprilika |
| | | Viši troškovi mehanizacije po toni otpada |
| | | Ograničena upotreba mehanizama za preradu |
| U centralnom pogonu za preradu | Smanjen utjecaj na okoliš u vidu prašine i buke | Troškovi kontrole procesa rušenja, kako bi se izbjegla dostava materijala upitne kvalitete |
| | Upotreba širokog raspona opreme većih kapaciteta | |
| | Niži troškovi mehanizacije po toni otpada | |
| | Jednostavnija kontrola kvalitete recikliranog materijala | Viši troškovi transporta |
| | Stvaranje zaliha i skladištenje materijala | Utjecaj na okoliš prilikom transporta otpada do centralnog pogona za preradu |

Iz Tablice 1. vidljivo je da se u centralnom postrojenju koje nije u blizini građevine koja se ruši, zbog automatizacije procesa obrade građevinskog otpada može ostvariti znatno veća produktivnost od mogućih mobilnih postrojenja koja se nalaze u blizini građevine koja se ruši, tj. u blizini nove konstrukcije za koju je potrebno upotrijebiti reciklirani agregat.

5.3 Reciklirani agregat

Reciklirani građevinski otpad (u daljnjem nastavku rada reciklirani agregat) može se, kao što je prethodno navedeno, koristiti kao agregat za proizvodnju betona. Kvalitetan reciklirani agregat moguće je dobiti nakon provedene provjere dokumentacije objekta, odvajanja materijala koji nije moguće reciklirati (oko 10% ukupnog građevinskog otpada [3]). Kvalitetna reciklirana sirovina ovisi o kvaliteti materijala koji će se reciklirati, zbog toga potrebno je imati u vidu kvalitetu originalnog materijala. Potrebno je osigurati adekvatno postrojenje za skladištenje, obradu i kontrolu kvalitete materijala kojeg je potrebno reciklirati. Izgled recikliranog i prirodnog agregata prikazan je na Slici 5.



Slika 5. Izgled agregata: a) reciklirani agregat b) prirodni drobljeni agregat [5]

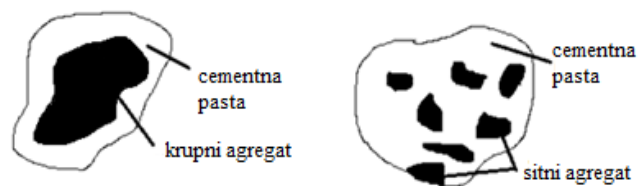
Iako ima različita (u pravilu slabija) svojstva od prirodnog agregata, reciklirani agregat mora zadovoljiti zahtjeve svih ispitivanja kao obični agregat iz prirodnih nalazišta. Prije izrade betonske mješavine s recikliranim agregatom ispitivanja koja se moraju provesti su sljedeća:

- 1) oblik zrna agregata
- 2) upijanje vode
- 3) volumna masa zrna agregata
- 4) granulometrijski sastav agregata.

Svojstva koja razlikuju reciklirani agregat od agregata iz prirodnih nalazišta su redom:

- 1) manja gustoća
- 2) veća apsorpcija
- 3) onečišćenost (prisutnost drugih materijala zaostalih nakon rušenja i recikliranja)

Osnovna razlika, okom vidljiva, jest "zalijepljeni" sloj stare cementne paste koja obavija zrna agregata, koji utječe na smanjenje mehaničkih i trajnosnih svojstava očvrnulog betona. Agregati s većom frakcijom imaju manju količinu zaostale cementne paste, a sitniji agregati zbog veće količine zaostale cementne paste upijaju više vode, te zbog većeg vodocementnog omjera originalnog betona veća je i količina priljubljene cementne paste u recikliranom agregatu. Manja otpornost na abraziju kod recikliranog agregata javlja se zbog povećane količine sitnih čestica koje imaju lošiju kvalitetu priljubljenog morta [16,17]. Na Slici 6. prikazana je zona sučeljka između prirodnog krupnog i sitnog agregata i cementne paste.



Slika 6. Zona sučeljka u recikliranom agregatu [16]

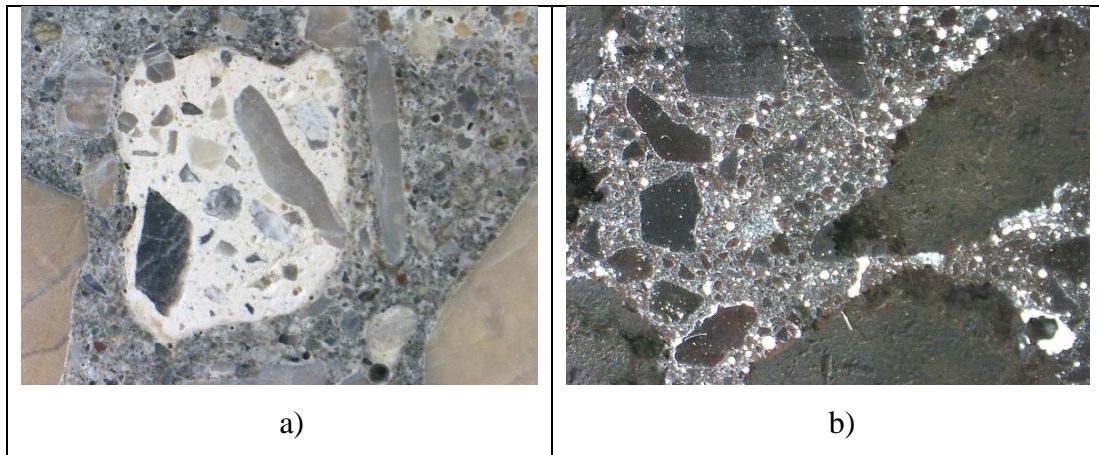
Naime u betonskoj mješavini koja je spravljena od recikliranog agregata postoji i druga zona sučeljka od recikliranog agregata i nove cementne paste (Slika 7.)



Slika 7. Zona sučeljka u betonskoj mješavini [16]

Manja tlačna čvrstoća kod recikliranog agregata uvjetovana je zaostalom cementnom pastom na zrnima kamena. Osim niže tlačne čvrstoće zaostala cementna pasta povećava poroznost agregata, smanjuje gustoću, a to se manifestira povećanim upijanjem. Zbog priljubljenog cementnog morta okom je vidljiva i hrapavija površina zrna agregata, a to uvjetuje manju volumensku masu zrna. Na Slici 8. prikazana je analiza zone sučeljka u recikliranom agregatu mikroskopom. Na kontrastiranom uzorku vidljiv je veći broj sitnih bijelih dijelova koji

predstavljaju pore u području zone sučeljka, a imaju znatan utjecaj na mehanička i trajnosna svojstva očvrstalog betona.



Slika 8. Zona sučeljka u recikliranom agregatu: a) mikroskopski snimak neobrađenog uzorka; b) mikroskopski snimak kontrastiranog uzorka pripremljenog za ispitivanje faktora razmaka pora

Najveći problem recikliranog agregata je uklanjanje povećanog sadržaja nečistoća zbog prisutnosti ostataka ostalih građevinskih materijala, a to su najčešće gips iz starih konstrukcija, kloridi ako je konstrukcija bila izložena agresivnom djelovanju soli iz okoline, te ostali materijali kao što su drvo, staklo, opeka, bitumen, papir i aluminij. Sadržaj nečistoća i neujednačenost kvalitete u sastavu recikliranog agregata su ograničavajući faktori koji utječu na širenje primjene recikliranih agregata. Stoga je važno ponovno naglasiti da je nužno poznavati porijeklo recikliranog agregata te provesti sva potrebna ispitivanja kako bi se mogao koristiti za proizvodnju novog betona. Mješavina betona od recikliranog agregata može se miješati, transportirati, ugrađivati i zbijati na isti način kao i obični beton [7,16,17].

5.3.1 Reciklirani beton i reciklirana opeka

Reciklirani agregat u betonu se primjenjuje zamjenom određenog postotka prirodnog agregata. Kao reciklirani agregat za beton najčešće se koriste dvije vrste građevinskog otpada (Slika 9):

- 1) beton nastao rušenjem
- 2) opeka nastala rušenjem i/ili opeka nastala kao otpad u proizvodnji



Slika 9. Lijevo: reciklirana opeka; Desno: reciklirani beton [5]

5.3.1.1 Reciklirana opeka kao agregat

Opeka je jedan od najzastupljenijih prirodnih materijala u građevinarstvu, ima dobra trajnosna i toplinska svojstva te dugi vijek uporabe. Zbog svoje zastupljenosti u tradiciji gradnje u zemljama diljem Europe (ali i svijeta) u znatnim količinama je zastupljena na divljim odlagalištima kao dio građevinskog otpada.

Zbog svoje prirodne poroznosti opeka ima toplinsku provodljivost u rasponu od 0,5 – 0,75 W/(mK), čime se reciklirana opeka odlikuje dobrim toplinsko izolacijskim svojstvima što smanjuje toplinsku provodljivost očvrnulog betona te u konačnici dovodi do smanjenja potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrada izgrađenih od takvih betona. Također, opeka je jedan od najkvalitetnijih agregata što se tiče otpornosti na požar. Recikliranu opeku kao agregat karakteriziraju velika poroznost i apsorpcija vode. Povećanjem postotka reciklirane opeke u mješavini betona raste postotak uvučenog zraka te količina vode koju ta opeka upije. Velika poroznost i količina uvučenog zraka utječu na smanjenje gustoće i tlačne čvrstoće recikliranog betona u odnosu na običan beton. Možda najveći nedostatak reciklirane opeke kao agregata je povećana apsorpcija vode. Povećano upijanje vode tijekom pripreme svježeg betona rezultira povećanjem vodocementnog faktora što, između ostalog, rezultira slabljenjem mehaničkih svojstava očvrstlog betona. Apsorpcijom vode u očvrstlom stanju omogućen je protok štetnim tvarima kao što su kloridi i sulfati koji djeluju agresivno na čeličnu armaturu, te dolazi do korozije armature i/ili djelovanje ciklusa smrzavanja i odmrzavanja pomoću apsorbirane vode, a navedeni procesi u konačnici vode do degradacije betonskih elemenata i smanjenja trajnosti betonskih građevina. Smanjenje apsorpcije može se postići ispravnim projektiranjem sastava betonske mješavine koje uključuje upotrebu superplastifikatora, kao i

potapanjem recikliranog agregata do potpune zasićenosti kako bi se smanjilo naknadno upijanje vode [1,17,18].

5.3.1.2 Reciklirani beton kao agregat

Prema normama HRN-EN 13242:2013 i HRN-EN 933-11:2009 reciklirani betonski agregat je agregat od građevnog otpada u kojem masa betona, betonskih proizvoda, žbuke, prirodnog kamena i agregata prelazi 90 % [17].

Kao što je navedeno u prethodnim poglavljima, agregat od recikliranog betona utječe na smanjenje mehaničkih i trajnosnih svojstava svježeg i očvrsnulog betona. Kao i kod agregata od reciklirane opeke, agregat od recikliranog betona ima povećanu poroznost (zbog "zalijepljene" stare cementne paste oko zrna agregata) a to uvjetuje povećanu apsorpciju i zadržavanje vode u mikroporama sučeljka zaostale cementne paste i na smanjenje tlačne čvrstoće i gustoće očvrsnulog betona. Zaostala cementna pasta na recikliranom agregatu zaobljuje oštre vrhove prirodnog agregata, a to utječe na bolje tečenje nove cementne paste oko agregata. Beton koji koristi reciklirani beton kao agregat postiže bolja mehanička, ali slabija toplinska svojstva u usporedbi s betonom koji koristi recikliranu opeku kao agregat [19].

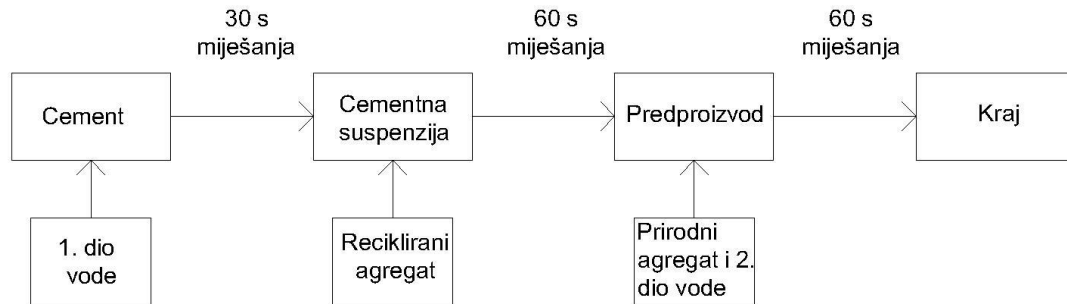
5.4 Utjecaj recikliranog agregata na svojstva betona

Kao što je već prethodno navedeno, beton s recikliranim agregatom mora zadovoljiti sve propisane zahtjeve kao i konvencionalni beton s prirodnim agregatom za određenu primjenu. Reciklirani agregat, bilo da je riječ o recikliranoj opeci ili o recikliranom betonu, zbog svoje strukture i svojih fizikalno– mehaničkih svojstava ima znatan utjecaj i na fizikalno– mehanička te trajnosna svojstva betona. Svojstva i postotak zamjene prirodnog agregata s recikliranim agregatom znatno utječu na svojstva betona s recikliranim agregatom. Za poboljšanje fizikalno– mehaničkih i trajnosnih svojstava razvijeni su pristupi projektiranju sastava i tehnologiji pripreme betona s recikliranim agregatom. U projektu pripreme mješavine preporuča se korištenje kemijskih dodataka kao što su:

1. Superplastifikator - za povećanje tlačne čvrstoće i smanjenje deformacija od skupljanja
2. Dodatak za smanjenje skupljanja (SRA) - za regulaciju povećanog skupljanja mladog betona s recikliranim agregatom

Osim kemijskih dodataka dodaju se i mineralni dodaci, kao što su leteći pepeo i silicijska prašina, koji utječu na povećanje tlačne čvrstoće i smanjenje udjela pora što se manifestira smanjenom vodopropusnosti i difuzijom klorida [7].

Pri miješanju se preporuča primijeniti metodu miješanja betona u dvije faze, kako je shematski prikazano na Slici 10.



Slika 10. Shematski prikaz metode miješanja betona [7]

Pregledom dosadašnjih eksperimentalnih istraživanja moguće je usporediti svojstva betona s recikliranim agregatom s običnim betonima.

Prema eksperimentalnom radu Venier [18] uspoređivana su svojstva običnog betona s prirodnim agregatom (u daljnjem nastavku rada obični beton) i betona s udjelom zamjene prirodnog agregata s 50% reciklirane opeke. Istraživanja pokazuju da je koeficijent kapilarnog upijanja recikliranog betona 30 do 50% veći od kapilarnog upijanja običnog betona. Apsorpcija vode recikliranog betona je 100% veća, a gustoća običnog betona je 10 do 15 % veća zbog manjeg udjela pora.

Jurić je u svom eksperimentalnom radu [1] uspoređivala svojstva običnog betona i betona s udjelom zamjene prirodnog agregata s 50% recikliranog betonskog agregata. Istraživanja pokazuju da je modul elastičnosti takvog recikliranog betona za 10 do 20 % manji od običnog betona, a da je apsorpcija običnog betona za 18 do 30 % manja od recikliranog betona.

Pavlinić je u svom eksperimentalnom radu [17] uspoređivala svojstva recikliranog betona s udjelom zamjene prirodnog agregata s 50% recikliranog betonskog agregata i svojstva betona s recikliranim agregatom s udjelom zamjene prirodnog agregata s 50% reciklirane opeke kao agregata. Istraživanja pokazuju da je koeficijent plinopropusnosti takvog betona od reciklirane opeke za 40% manji od betona s agregatom od recikliranog

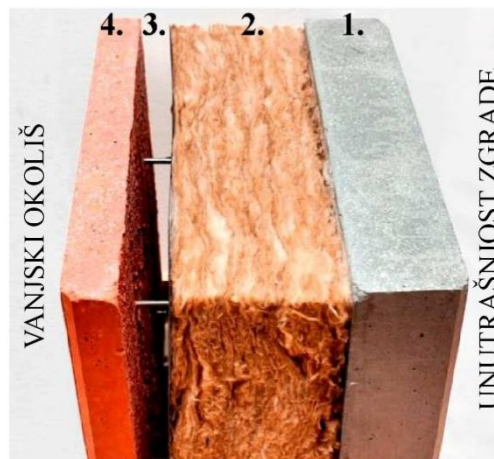
betona. Razlog tome je veći broj zračnih pora kod opeke. Faktor razmaka pora kod betona s agregatom od recikliranog betona je približno 27% veći od faktora razmaka pora kod betona s agregatom od reciklirane opeke. Gustoća betona s recikliranom opekom je manja od gustoće običnog betona i to je čini boljim toplinskim izolatorom. Beton s recikliranim betonom ima za 20% veći modul elastičnosti od betona s agregatom od reciklirane opeke.

Na temelju raznih istraživanja u Europi zaključeno je da ukoliko se u betonskoj mješavini upotrebljava 30% ili manje recikliranog agregata, nisu potrebna posebna ispitivanja i dokazi za primjenu istog [3]. Naime kako bi se postigli ciljevi strategije Europa 2020 potrebno je posvetiti veliku pažnju razvijanju održivosti industrije betona kako bi se smanjili utjecaji na okoliš. Jedan od načina približavanja cilju je proučavanje upotrebe recikliranih agregata s većim udjelima u betonu, što je značajno budući da agregat zauzima više od 75 % volumena očvrstnalog betona te proučavanje korištenja recikliranih agregata iz različitih izvora [7]. Također, uštedom energije, a pogotovo vode pri proizvodnji prirodnog agregata moguće je znatno utjecati na očuvanje okoliša.

5.5 Primjer upotrebe betona s recikliranim agregatom u Hrvatskoj –ECO-SANDWICH® fasadni panel

Zbog problematike predstavljene u prethodnim poglavljima hrvatske znanstvene institucije i industrija uspostavile su suradnju te provele niz znanstvenih istraživanja koja su rezultirala razvojem novog proizvoda koji objedinjuje primjenu recikliranog agregata i smanjenje potrošnje energije za grijanje i hlađenje – energetske učinkovite gradnju. Kao rezultat iscrpnih istraživanja nastao je inovativni predgotovljeni ventilirani ECO-SANDWICH® fasadni panel. Ventilirani ECO-SANDWICH® panel sastoji se od četiri sloja, Slika 11:

1. unutarnji nosivi sloj izrađen je od armiranog betona s agregatom od recikliranog betona (debljine 12 cm)
2. toplinskoizolacijski sloj koji čini ekološka mineralna vuna izrađena inovativnom Ecose® tehnologijom (debljine 20 cm)
3. ventilirajući sloj zraka (debljine 4 cm)
4. vanjski fasadni sloj od armiranog betona s agregatom od reciklirane opeke (debljine 6 cm)



Slika 11. Ventilirani ECO-SANDWICH® panel s pripadnim slojevima [5]

U sklopu provedenih istraživanja na Građevinskom fakultetu u Zagrebu varirani su različiti postotci zamjene prirodnog agregata s recikliranim agregatom (40 %, 50 % i 60 %). Temeljem opsežnih mehaničkih i trajnosnih ispitivanja, odabrane su dvije betonske mješavine koje su pokazale optimalna svojstva za potrebne zahtjeve planiranog projekta ECO-SANDWICH®. U obje mješavine je 50% prirodnog agregata zamijenjeno recikliranim

agregatom iz građevinskog otpada. Dva sloja betona povezana su rešetkastim nosačima od nehrđajućeg čelika koji na svom vrhu i u podnožju imaju plastične obloge kako bi se smanjili gubici topline kroz točkaste toplinske mostove. Između vanjskog fasadnog sloja i sloja toplinske izolacije nalazi se ventilirani sloj zraka koji sprečava vlaženje izolacijskog materijala. Upravo u korištenju recikliranog agregata i ventiliranom sloju (koji nije uobičajeni sloj u predgotovljenim betonskim sendvič panelima) leži inovativnost ECO-SANDWICH[®] zidnog panela. Za toplinskoizolacijski materijal koristi se mineralna vuna koja kao vezivo koristi prirodne smole umjesto štetnog formaldehida. Korištena mineralna vuna proizvodi se na temelju inovativne Ecose[®] tehnologije koja za proizvodnju navedene sirovine koristi reciklirane staklene boce, otpadno staklo i otpad nastao u proizvodnji same mineralne vune te je za proizvodnju iste potrebno 70% manje energije nego prilikom proizvodnje obične mineralne vune [4].

Jedna zanimljiva mogućnost za Hrvatsku prilikom proizvodnje toplinskoizolacijskog materijala za ECO-SANDWICH[®] zidne panele, ali i ostale tipove ventiliranih vanjskih ovojnica, je moguća prerada ovčje vune koja se u našoj i susjednim zemljama nekontrolirano odlaže u prirodu, tj. godišnje se proizvede čak 1200 tona ovčje vune koju je moguće iskoristiti za proizvodnju toplinskoizolacijskog materijala za pregotovljeni fasadni panel [4].

Sa stajališta održivosti ventilirani fasadni panel ECO-SANDWICH[®] na više polja nadilazi tradicionalni beton. Na vrhu ljestvice najbitnijih karakteristika nalazi se koeficijent prolaska topline U [$W/(m^2K)$] koji je za 16,6% manji od sličnih sendvič panela na tržištu. Ništa manje bitan parametar toplinski kapacitet c [J/kgK] panela je iznimno velik, čime je moguće iskoristiti dobitke od sunčevog zračenja te svojstvo akumulacije topline u sezoni grijanja, i na taj način smanjiti potrebnu energiju za grijanje od 2 do 15 % [20]. Plošna masa fasadnog sustava iznosi 458 kg/m^2 , čime prema masivnosti spada u kategoriju teške konstrukcije, a upravo takva masivnost osigurava veliki toplinski kapacitet i smanjene varijacije dnevne temperature na unutarnjoj površini zida, koja tokom velikih ljetnih vrućina sprječava pregrijavanje unutarnjih prostorija i osigurava ugodnu okolinu za stanovanje i ono najbitnije da se na taj način smanjuje dnevna potreba za hlađenjem i do 50% [20]. Također, u sezoni grijanja dolazi do prethodno spomenutog svojstva akumulacije topline. Jasno je vidljivo da vanjska ovojnica zgrade svojim aktivnim ponašanjem utječe na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje u zgradama. Zbog prethodno opisanih svojstava betona s recikliranim agregatom koji ima nešto veću poroznost od običnog betona zvučna izolacijska moć panela je bolja. Osim navedenih prednosti ECO-SANDWICH[®] ima bolja svojstva od običnog betona u pogledu otpornosti na požar zahvaljujući opeci koja je sama po sebi otpornija na požar u odnosu na

običan beton. Također ECO-SANDWICH[®] se na kraju uporabnog vijeka može u potpunosti reciklirati.

Na temelju svih provedenih ispitivanja, izrađena je Izjava o svojstvima za ECO-SANDWICH[®] zidni panel kojom je omogućeno njegovo plasiranje na tržište, te doprinos cirkularnoj ekonomiji. Može se reći da je time ostvaren transfer znanja jer je kroz znanstvena istraživanja razvijen novi građevni proizvod kojima ima elemente održivosti i inovativnosti te je uz zadovoljenje svih trenutno važećih propisa i normi plasiran u realni sektor. Međutim, stvarno ponašanje ECO-SANDWICH[®] panela u realnim klimatskim uvjetima i realnim uvjetima korištenja, tzv. higrotermalno ponašanje nije poznato.

6. HIGROTHERMALNO PONAŠANJE

Termohigrometrijski uvjeti okoliša: vlažnost zraka i temperatura, uvelike utječu na trajnosna svojstva građevina te na kvalitetu života osoba koje u njima borave. Većinu vremena ljudi provode u zatvorenom prostoru, zato je od izuzetne važnosti da taj prostor bude projektiran i izveden na adekvatan način s aspekta vlažnosti i unutarnje temperature prostora. Upravo stoga važna uloga pripada regulaciji vlažnosti, jer osim nelagode uzrokovane viškom vlage, pojava plijesni i gljivica uvelike može utjecati na zdravlje stanara. Niska razina vlažnosti s druge je strane uzrok suhoće kože, grla i nosa te povećava alergijske reakcije. Osim zdravstvenih tegoba i smanjene ugodnosti boravka, neadekvatna vlažnost uzrokuje degradaciju materijala što dovodi do narušavanja izgleda zidova, stropova i ostalih građevnih elemenata te u dužem periodu može dovesti u pitanje stabilnost same konstrukcije.

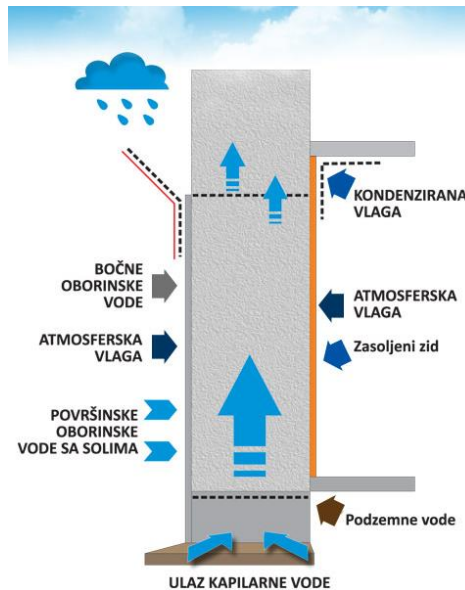
Različiti termohigrometrijski uvjeti vanjskog okoliša (klimatski uvjeti na lokaciji građevine) i unutarnjeg okoliša (unutrašnjost zgrade u kojoj ljudi borave) odgovorni su za procese prolaska topline i vlage kroz vanjsku ovojnicu zgrade. Prolazak topline, vlage i zraka kroz vanjsku ovojnicu zgrade karakterizira njezino higrotermalno ponašanje (eng. *hygrothermal performance/behaviour*). Uslijed neadekvatnih termohigrometrijskih uvjeta unutrašnjosti zgrade, primjerice previsoka vlažnost i temperatura, i/ili neadekvatnog higrotermalnog ponašanja vanjske ovojnice zgrade, primjerice kondenzacija vodene pare i pojačani gubici topline, postoji opasnost od pojave građevinskih šteta, Slika 12. Ukoliko dođe do pojave građevinskih šteta, neophodne su sanacije i/ili rekonstrukcije čiji troškovi mogu iznositi više od same izgradnje.



Slika 12 Građevinske štete na zidovima zbog djelovanja vlage: a) ljuštenje završnog sloja zida; b) pojava plijesni i gljivica na zidu[21]

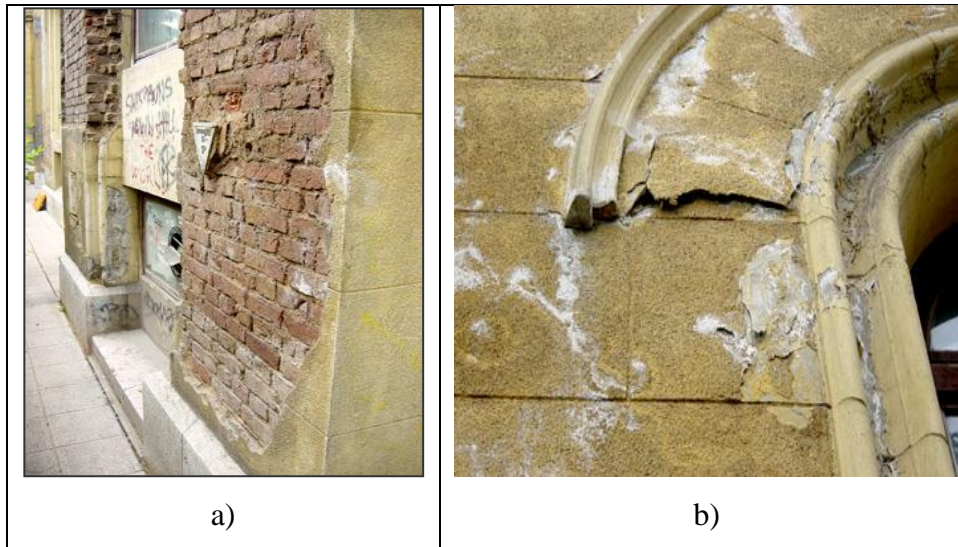
Različiti mehanizmi prijenosa vlage u materijalu, prikazani na Slici 13., uzrokuju vlaženje građevine na tri načina [22]:

- 1.) iz temeljnog tla uslijed kontakta s podzemnom vodom - djelovanje kapilarne vlage
- 2.) djelovanjem atmosferske vlage
- 3.) djelovanjem difuzne vlage



Slika 13. Mehanizmi ulaska i prijenosa vlage u materijalu [23]

Kretanje vode kroz vanjsku ovojnicu uzrokuje različite štete za građevine te smanjuje kvalitetu toplinske izolacije što povećava potrošnju energije. Glavni uzroci oštećenja zidova su kapilarna vlaga, kondenzacija i higroskopska vodoupojnost. Posebno su osjetljivi zidovi podruma ukoliko nemaju propisanu hidroizolaciju. U njima vlaga raspoređena po cijeloj dubini zidova, obogaćena je solima iz tla. Najčešće nailazimo na nitrata iz fekalija, kloride iz soli za posipanje i sulfata iz kiselih kiša. Ako voda ispari, soli se kristaliziraju. Povećanjem obujma nastaje tlak znatne "eksplozivne snage". Gotovo svaki materijal biva oštećen, posljedice su puknuta i odlomljena mjesta, a kristalno cvjetanje nagrđuje vanjski izgled fasade, Slika 14. [23]



Slika 14. Građevinske štete na zidovima zbog djelovanja vlage: a) otpadanje žbuke [22]; b) kristalno cvjetanje na zidu [22]

Vlaga koja djeluje na građevine predstavlja opterećenje na građevinu koje se često zanemaruje, ali zbog sve razvijenije svijesti o shvaćanju trajnosti građevina kao jednako važnom zahtjevu kao što je i mehanička otpornost i stabilnost – 1. temeljni zahtjev za građevine [24], te strožih zahtjeva za očuvanjem i uštedom energije u zgradama, na koju vlaga ima značajan utjecaj, kontrola vlage postala je svjetski problem. Kako bi se ostvarila tražena svojstva kao što su izuzetno niska potrošnja energije u zgradama, zrakonepropusne vanjske ovojnice i kvalitetna unutrašnja klima, mijenjaju se tradicionalni principi projektiranja i izgradnje zgrada. Suvremene zgrade postaju sve složeniji multidisciplinarni projekti koje je praktički teško ostvariti bez prožimanja različitih struka. Takve zgrade zbog sve strožih zahtjeva za uštedom i smanjenom potrošnjom energije rezultiraju bolje toplinski izoliranom i zrakonepropusnijom vanjskom ovojnicom, čime se smanjuje prolazak topline i zraka kroz vanjsku ovojnicu. Samim time, takve vanjske ovojnice su znatno osjetljivije na probleme vlage od tradicionalnih, slabije toplinski izoliranih i zrakopropusnijih vanjskih ovojnica zgrada. Najveći problem prilikom projektiranja konstrukcije u pogledu prolaska vlage javlja se zbog različitih kriterija u različitim uvjetima okoline pa je gotovo nemoguće uspostaviti standardizirani princip koji je primjenjiv na svaki tip konstrukcije i u svakom okruženju. Kontrola vlage ponajviše ovisi o svojstvima vanjske ovojnice zgrade i klimatskim uvjetima regije u kojoj se predmetna zgrada nalazi, kao i o ponašanju korisnika zgrade [25].

Pri određenoj temperaturi zrak može sadržavati samo određeno količinu vodene pare. U većini slučajeva zrak sadrži manje količine vodene pare no što odgovara zasićenju. Relativna vlažnost zraka (eng. *Relative humidity*, u nastavku rada *rH*) odnos je između količine vodene pare koja stvarno postoji u zraku određene temperature, u danom trenutku i maksimalne količine koju bi taj zrak pri toj temperaturi mogao primiti da bi bio zasićen, tj. može se izraziti kao odnos stvarnog i ravnotežnog tlaka vodene pare. Kada je zrak zasićen vodenom parom tada je masa vodene pare maksimalna za dani volumen zraka. Prema tome zrak zasićen vodenom parom ima relativnu vlažnost $rH = 100\%$. Prilikom zagrijavanja opada relativna vlažnost zraka, a prilikom hlađenja ona se povećava. Ukoliko se temperatura snizi do te razine da relativna vlažnost zraka dostigne vrijednost od 100% dolazi do izdvajanja vode u obliku magle ili rose što se naziva rosištem tj. temperaturom rosišta. Odgovarajuća temperatura i vlažnost dva su preduvjeta za stvaranje kondenzacije koja ukoliko se apsorbira u unutrašnjost građevinskog materijala i u propisanom vremenu se ne isuši dovodi do pojave građevinskih šteta. Sadržaj vlage građevnog elementa, koji se tijekom vremena u njemu pojavi, ovisi o vrsti i strukturi materijala, uvjetima okoline i načinu korištenja same prostorije [22].

Prilikom projektiranja građevina na vlagu od izuzetne je važnosti smanjiti vanjske i unutarnje utjecaje koji djeluju na trajnost vanjske ovojnice zgrade. Zbog razlike parcijalnih tlakova u unutrašnjosti zgrade i u vanjskom okolišu dolazi do kretanja vodne pare procesom difuzije kroz vanjsku ovojnicu iz područja višeg parcijalnog tlaka vodene pare u područje nižeg parcijalnog tlaka vodene pare, s težnjom da koncentracija vodene pare na svim mjestima bude jednaka. Što je veća razlika parcijalnih tlakova, to je i veća gustoća difuzijskog toka vlage kroz vanjsku ovojnicu zgrade. Svaki građevni element, u ovisnosti od strukture materijala elementa, pruža određeni otpor difuziji vodene pare. Samo kretanje vodene pare kroz građevinski element, ako ne dolazi do njene kondenzacije, nema nikakve negativne posljedice po element. Do opasnosti za oštećenje elementa i smanjenja njegove toplinskoizolacijske sposobnosti dolazi jedino u slučaju kondenzacije vodene pare unutar elementa [8]. Proces difuzije često je popraćen i kretanjem vode kroz sitne kapilare, što se naziva kapilarnošću. Istodobno odvijanje ovih procesa znatno otežava rješavanje problema kretanja vlage kroz porozni materijal.

Do kondenzacije vodene pare unutar elementa doći će ukoliko prilikom prolaska kroz različite slojeve građevnog elementa vodena para ne može proći kroz nepropustan sloj, tj sloj velikog otpora difuziji vodene pare.

Iz toga razloga potrebno je poštivati neka od tri osnovna principa projektiranja građevina na vlagu:

- 1) U potpunosti spriječiti prolazak vlage kroz građevne elemente, tj. vanjsku ovojnicu
- 2) Osigurati nesmetani prolazak vlage kroz građevne elemente, tj. vanjsku ovojnicu – projektirani slojeve građevnih elemenata od onog paronepropusnijeg prema paropropusnijem
- 3) U slučaju pojave kondenzacije vodene pare u vanjskoj ovojnici proračunima dokazati da se predviđena količina kondenzata može isušiti u propisima dopuštenom vremenskom razdoblju

6.1 Prolazak topline

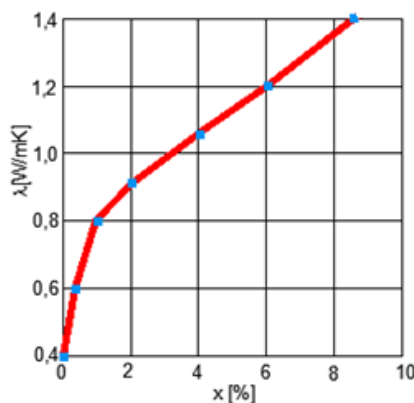
Prilikom proučavanja higrotermalnog ponašanja zgrade neophodno je i razumijevanje toplinskih tokova koji se odvijaju kroz njezinu vanjsku ovojnicu. Kao što je prethodno navedeno, termohigrometrijski uvjeti okoliša osim stanja relativne vlažnosti podrazumijevaju i stanje temperature zraka. Različite temperature vanjskog okoliša i temperature zraka unutar zgrade potiču prolazak topline kroz vanjsku ovojnicu zgrade.

Toplina je oblik energije vezan uz kaotično gibanje molekula. Subjektivni osjećaj topline čovjek dobiva u dodiru s ugrijanim tijelom, a objektivno mjerilo dobiva se promatranjem djelovanja ugrijanih tijela na druga tijela. To se očituje u promjeni boje, volumena i agregatnog stanja [22]. Prolazak topline kroz vanjsku ovojnicu zgrade očituje se u promjenama temperature pojedinih slojeva vanjske ovojnice. Glavna karakteristika materijala koja utječe na prolazak topline je toplinska provodljivost λ [W/(mK)].

Toplinska provodljivost λ [W/(mK)] svojstvo je građevinskih materijala da provode toplinu uslijed razlike temperatura na dvije granične površine elementa, a ovisi o [8]:

- 1) vrsti materijala
- 2) njegovoj gustoći
- 3) homogenosti
- 4) vlažnosti
- 5) temperaturi
- 6) atmosferskom tlaku

Što je materijal zasićeniji vodom to mu više raste toplinska provodljivost [8]. Na slici 15. vidljiv je rast toplinske provodljivosti opeke uslijed povećanja vlažnosti, što je potvrda međusobne ovisnosti procesa prijenosa topline i procesa prijenosa vlage.



Slika 15. Ovisnost toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke [8]

Temperatura je veličina koja karakterizira stanje zagrijanosti nekog tijela. SI jedinica je Kelvin. Prema 2. zakonu termodinamike međudjelovanjem dvaju tijela toplina prelazi iz toplijeg prema hladnijem, odnosno toplina se uvijek kreće s mjesta više temperature prema mjestu niže temperature i to sve dok se temperature ne izjednače [22].

Ukoliko se želi smanjiti potrošnja energije u zgradama, tada je potrebno u sezoni grijanja spriječiti "gubitak" topline iz unutrašnjosti grijanog prostora u vanjski okoliš, odnosno u sezoni hlađenja je potrebno spriječiti "ulazak" topline iz vanjskog okoliša u unutrašnjost hlađenog prostora. Navedene principe je potrebno uzeti u obzir prilikom projektiranja energetske učinkovitih vanjskih ovojnica, a to podrazumijeva pažljivo biranje pojedinih slojeva vanjske ovojnice koji se zajedno moraju ponašati kao funkcionalna cjelina, tj. vanjska ovojnica koja će biti zaista energetske učinkovita i trajna.

Vanjski utjecaji od koji su najizraženiji: sunčevo zračenje, razlika temperature, vjetar i kiša te voda iz tla stvaraju određena naprezanja u materijalima. Uslijed temperaturnih razlika nastalih klimatskim uvjetima, nastaju i deformacije unutar konstruktivnih elemenata zgrada koje moramo pravilnim projektiranjem svesti na minimum kako bi produžili životni vijek i poboljšali energetske učinkovitost same zgrade. Pri višim temperaturama materijal se rasteže, a pri nižim temperaturama materijal se steže. Ukoliko ih ne kontroliramo zbog navedenih promjena može doći do oštećenja objekata, pa čak i do sloma elemenata vanjske ovojnice zgrade [22]. Promjena temperature u pojedinim slojevima vanjske ovojnice također je jedna od karakteristika higrotermalnog ponašanja ovojnice zgrade. Promjena temperature u pojedinim slojevima indikator je prijenosa (gubitka ili dobitka topline) kroz vanjsku ovojnicu.

Budući da su prolazak vlage i topline međusobno ovisni procesi, prilikom projektiranja energetske učinkovitih vanjskih ovojnica moraju biti zadovoljeni i principi projektiranja prolaska vlagu i principi projektiranja prolaska topline, tj. mora biti ispravno pretpostavljeno higrotermalno ponašanje čime se, između ostalog, smanjuje mogućnost nastanka građevinskih šteta.

6.2 Metode proračuna higrotermalnog ponašanja

U inženjerskoj praksi, higrotermalne značajke građevnih dijelova često se ocjenjuju na temelju Glaserove metode. Glaserova metoda koristi se za izračunavanje količine kondenzata koji nastaje tijekom hladne zime i teorijsku količinu hlapljive vode u vrijeme hladnih ljeta. Smatra se da nema opasnosti od pojave vlage ako je količina kondenzata i hlapljivih voda manja od definiranih vrijednosti te ako se dokaže da će se u propisanom vremenu veća količina vode isušiti [26].

Glaserova metoda temelji se na Fickovom zakonu i zasniva se na nizu pojednostavljenja. Još uvijek se široko primjenjuje u građevinarstvu za analizu rizika od pojave kondenzacije. U Republici Hrvatskoj važeći Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 1379 [9] propisuje proračun difuzije vodene pare kroz građevne dijelove prema Glaserovoj metodi i ne uzima u obzir transport likvidne vlage i zraka. Uz sva ostala pojednostavljenja, potrebno je posebno naglasiti da ova metoda ne uzima u obzir poroznost građevinskih materijala, početnu ugrađenu vlagu materijala ni sposobnost apsorpcije vlage u materijalu, tj. ne koristi tzv. sorpcijske krivulje materijala [26]. Stoga treba napomenuti da Glaserova metoda nije simulacija stvarnosti, nego alat s nizom pojednostavljenja i pretpostavki za otkrivanje rizika od pojave kondenzacije te je njezina adekvatnost primjene za određene slučajeve proračuna upitna.

Zbog ograničenja u primjeni Glaserove metode za realniju analizu higrotermalnog ponašanja koriste se moderni numerički simulacijski modeli kao što je primjerice WUFI[®] (njem. *Wärme und Feuchte Instationär*) [Künzel 1995]. Također se za složenije slučajeve različiti modeli mogu pronaći u Henseovom izvješću IEA-Annex24 (HAMTIE) [1996] ili u Pedersenovoj knjizi „Combined heat and moisture transfer in building constructions“ [1989.]. Takvi numerički modeli, tzv. HAM modeli (eng. *Heat, air and moisture transfer models*) simuliraju stvarno dinamičko higrotermalno ponašanje građevnih elemenata. Dinamičko ponašanje podrazumijeva ponašanje u vremenu.

Za ulazne parametre simulacijski modeli zahtijevaju (Slika 16.):

- 1) orijentaciju i nagib konstrukcijskih elemenata
- 2) higrotermalne parametre materijala
- 3) granične vrijednosti površinskog prijenosa topline, zraka i vlage između vanjskog i unutarnjeg prostora
- 4) rubne uvjete
- 5) vremenski period proračuna
- 6) numeričke parametre za kontrolu

Za vanjske rubne uvjete bitan je odabir reprezentativnih meteoroloških podataka za određenu lokaciju zgrade, a unutarnji rubni uvjeti ovise o namjeni zgrade i navikama njenih korisnika.

Izlazni parametri modela su (Slika 16.):

- 1) temperatura i distribucija toplinskog toka te njihove varijacije u vremenu
- 2) sadržaj vlage te relativna vlažnost i distribucija toka vlage u vremenu

Na temelju dobivenih rezultata može se procijeniti ušteda energije, ekonomičnost same gradnje te opasnost od potencijalnog razvoja gljivica i korozije koje mogu uzrokovati znatne štete na samoj konstrukciji uslijed neadekvatnog prijelaza vlage [24].



Slika 16. Dijagram toka za provođenje dinamičkih higrotermalnih simulacija ovojnice zgrade [27]

Straube i Burnett [28] navode tri najčešća razloga za provođenje higrotermalne analize:

1. Uspostava odgovarajuće razine razumijevanja procesa koji se javljaju u vanjskoj ovojnici zgrade (npr. Hoće li doći do kondenzacije vodene pare?, Kolika količina kondenzata će se javiti u danim uvjetima?, Gdje i kada će se pojaviti kondenzacija?)
2. Prepoznavanje i/ili izbjegavanje potencijalnog problema (npr. kondenzacija i kapilarno upijanja zbog kiše).
3. Proračun energijskog toka (toka topline) kroz ovojnicu kao i njegov utjecaj na udobnost boravka unutar zgrade.

Preporuke WTA-grupe Hartwig M. Künzl [*Moisture Risk Assessment of Roof Constructions by Computer Simulation in comparison to the Standard Glaser-Method*] [25], za izradu simulacijskih modela su sljedeće:

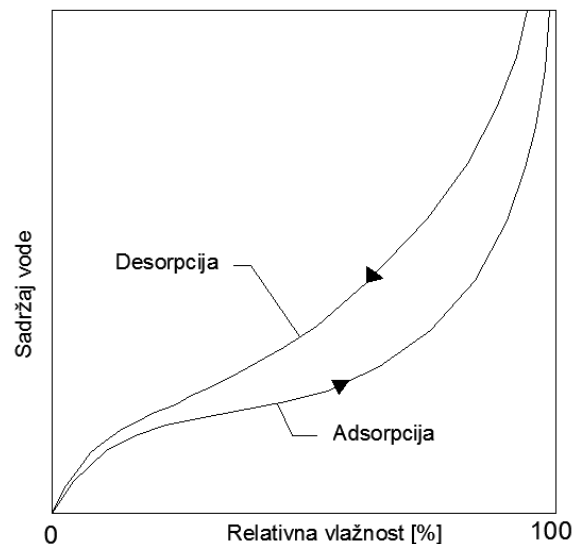
- 1) Korištenje osnovnih i pojednostavljenih modela prijenosa topline i vlage za građevinske svrhe
- 2) Definicije relevantnih higrotermalnih procesa
- 3) Granične vrijednosti rubnih uvjeta (vanjska i unutarnja klima, površinski prijenosi)
- 4) Početni uvjeti (npr. ugrađena vlaga)
- 5) Točnost numeričkog rješenja (npr. razmak čvorova proračuna)
- 6) Interpretacija rezultata i vjerodostojnost provjere
- 7) Dokumentacija proračuna i rezultata

Simulacije dopuštaju određivanje ponašanja vlage u realnijim uvjetima uključujući ugrađenu vlagu, sunčevo zračenje, kišu nošenu vjetrom, utjecaj vlage na prijenos topline, i dr. Ti modeli primjenjivi su i na masivne konstrukcije dok je Glaserova metoda u pravilu primjenjiva samo za lagane konstrukcije [25] i u originalu je razvijena za hladnjače (konstrukcije u čijim slojevima nema upijanja vode, što nije reprezentativno za većinu građevinskih materijala koji su porozni). Budući da je većina najčešće korištenih građevinskih materijala porozna (npr. opeka, beton, drvo, kamen,...), njihovu poroznost je potrebno uzeti u obzir jer upravo ona ima ponajveći utjecaj na higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrada izvedene takvim materijalima. Prolazak vlage kroz porozne materijale, tj. proces vlaženja i proces sušenja materijala, opisuje se njihovim sorpcijskim krivuljama koje su neophodan ulazni parametar za dinamičke higrotermalne modele.

6.3 Sorpcijske krivulje

Svaki porozni građevinski materijal izložen određenoj relativnoj vlažnosti zraka pri danoj temperaturi zraka (termohigrometrijski uvjeti okoliša), nastoji procesom sorpcije "upiti" ili "otпустiti" onu količinu vlage koja je potrebna da se postigne tzv. ravnotežna vlaga (eng. *dynamic equilibrium moisture*) u građevinskom materijalu za danu vlažnost okoliša u kojem se nalazi. To je ona količina vlage u materijalu pri kojoj materijal više ne može niti upiti niti otpustiti vlagu za dane termohigrometrijske uvjete okoliša. Sa svakom promjenom termohigrometrijskih uvjeta okoliša, mijenja se i ravnotežna vlaga u materijalu što se prikazuje sorpcijskim krivuljama materijala [8].

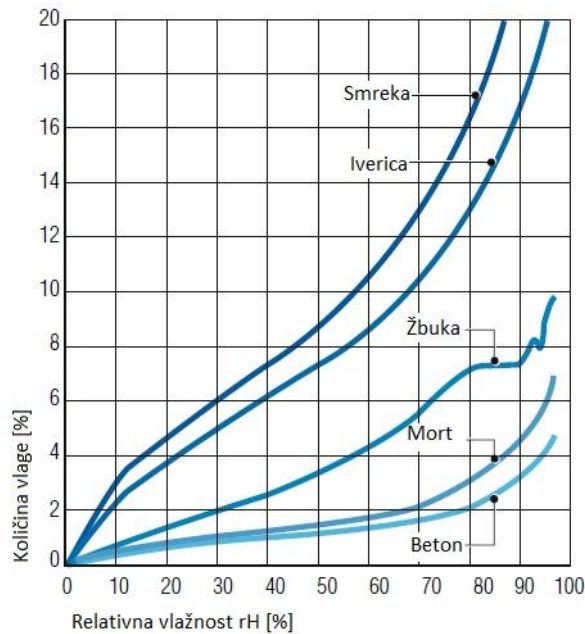
Veza između sadržaja ravnotežne vlage u građevinskom materijalu i relativne vlažnosti okoline pri konstantnoj temperaturi naziva se sorpcijska izoterma. Poznato je da većina higroskopskih materijala pokazuje histerezu u obliku adsorpcijske i desorpcijske krivulje. Ravnoteža uspostavljena tijekom sušenja daje desorpcijske krivulje, a ravnoteža uspostavljena tijekom vlaženja daje adsorpcijske krivulje. Područje između krivulje adsorpcije i desorpcije prikazuje petlju histereze, Slika 17. [29].



Slika 17. Krivulje adsorpcije i desorpcije [29]

Na višim relativnim vlažnostima tijekom krivulje sorpcije postaje neizvjestan zbog različitih pojava histereze posebno na vlažnostima većim od $rH = 98\%$. Iz tog razloga često u prikazu rezultata, krivulja završava pri vlažnosti od $rH = 98\%$. Temperatura također ima utjecaj na krivulje sorpcije.

Sorpcijske krivulje glavne su karakteristike materijala pri analizi stanja vlage u strukturi, tj. za računanje i procjenjivanje stanja prilikom procesa sušenja i vlaženja materijala [29]. Na Slici 18. prikazani su primjeri sorpcijskih izoterma pojedinih vrsta građevinskih materijala.



Slika 18. Sorpcijske krivulje za različite materijale [30]

Različite vrste materijal zbog svojih različitih struktura imaju različite sorpcijske krivulje. Drvo puno brže i puno više vode može upiti nego li beton. Zbog različitih higrotermalnih svojstva pojedinih materijala potrebno je za svaki posebno provesti ispitivanja kako bi im se utvrdila svojstva. Određivanje svojstava higroskopske sorpcije građevinskih materijala provodi se isključivo eksperimentalno i to prema normi HRN EN ISO 12571 [31]. Međutim, navedena norma ne daje detaljno precizirane upute za provođenje eksperimentalnog određivanja sorpcijskih krivulja. Prikladnije je reći da norma daje samo okvirne smjernice, što će biti detaljnije prikazano u poglavlju 7. Eksperimentalni rad.

6.4 Higrotermalna svojstva betona

Očigledno je da proces kretanja vlage u betonu predstavlja najveći problem za trajnost građevnih elemenata zgrade, ali manje se pažnje obraća na činjenicu da taj isti proces negativno djeluje i na njihova toplinsko izolacijska svojstva. Kako je proces kretanja vlage usko povezan sa procesom prijenosa topline, što je vidljivo prilikom isparavanja i sušenja, preferira se korištenje izraza higrotermalni procesi jer izričito izotermalan proces prijenosa vlage jedva da postoji. Konstrukcijska vlaga koja u betonu ostaje kao posljedica viška vode za hidrataciju cementa jedan je od glavnih uzročnika štete nastale zbog vlage. Iz tog razloga potrebno je osigurati pravodobno sušenje betonskih elemenata. Voda sama po sebi, osim u pogledu smrzavanja i odmrzavanja, nije štetna za beton; ali beton koji se ugrađuje u konstrukcije najčešće je armiran. Čelik koji se koristi kao armatura u betonu osjetljiv je na veliki udio vlage tj. vode te nakon što dođe do karbonatizacije betona nastupiti će korozija armature. Produkti korozije na čeličnoj armaturi prouzročiti će degradaciju samog betonskog elementa što u ekstremnijim slučajevima može dovesti i do sloma. Nema sumnje da higrotermalni procesi imaju znatan utjecaj na trajnost betonskih elemenata te je iz tog razloga predviđanje higrotermalnog ponašanja materijala postao jedan od preduvjeta prilikom projektiranja trajnosti konstrukcija [32], ali i prilikom projektiranja energetskog ponašanja zgrade kao cjeline.

Ukupni sadržaj vlage koji se u betonu sastoji od vode i vodne pare izražava se kao postotak na masu betona. Voda u betonu može biti kemijski vezana, međuslojna, adsorbirana, slobodna te u obliku vodene pare unutar betonske matrice. Glavni izvor vlage u betonu je voda koja je potrebna za pripremu betona, zatim voda koja je potrebna za njegovo njegovanje te također do vlage dolazi i uslijed izloženosti betona vanjskom okolišu, mokrim podlogama, uslijed kondenzacije, u kontaktu s mortom ili drugim vezivima na bazi vode [7]. Relativna vlažnost u betonu neizmjenjivo varira tijekom vremena jer se vlaga u betonu otpušta ili upija sve dok beton ne postigne ravnotežu sa okolnim prostorom. Ako je vlažnost zraka u prostoriji veća od vlažnosti u betonu, tada će beton upijati vlagu a ako je zrak u okolini suh (njegova vlažnost je manja od vlažnosti u betonu), tada će beton otpustiti potrebnu količinu vlage. Međutim, ako se beton nalazi u izrazito suhom okolišu ($rH = 2\%$) većina slobodne vode će ispariti iz njega, ali dio vode ipak ostaje zarobljen u njegovoj strukturi, no ta je količina zanemariva te se beton smatra potpuno suhim [30].

Higrotermalna svojstva pojedinih slojeva vanjske ovojnice zajedno sa uvjetima vanjskog i unutarnjeg okoliša utječu na higrotermalno ponašanje zgrade u cjelini. Prijenos topline, zraka i vlage nije moguće u potpunosti spriječiti, ali se poznavanjem higrotermalnih svojstava materijala i pravilnim projektiranjem slojeva ovojnice taj prijenos može optimizirati.

Pod higrotermalnim svojstvima materijala prvenstveno se misli na:

- 1) Toplinska provodljivost, λ [W/(mK)]
- 2) Koeficijent linearnog toplinskog istezanja, α_t [1/K]
- 3) Specifični toplinski kapacitet, c [J/(kgK)]
- 4) Koeficijent otpora difuziji vodene pare [-]
- 5) Sorpcijske krivulje

U Tablici 2. su prikazane uobičajne vrijednosti higrotermalnih svojstva običnog betona.

Tablica 2. Higrotermalna svojstva običnog betona [6]

| | |
|---|-------------------------|
| Toplinska provodljivost, λ [W/MK] | 2,00 – 0,35 |
| Koeficijent linearnog toplinskog istezanja, α_t [1/°C] | $5 - 14 \times 10^{-6}$ |
| Specifični toplinski kapacitet, c [J/(kgK)] | 1000 (pri tem T=20°C) |
| Koeficijent otpora difuziji vodene pare, μ | 90 |

6.5 Higrotermalna svojstva betona s recikliranim agregatom

O higrotermalnim svojstvima betona s recikliranim agregatom zna se vrlo malo, proveden je tek određeni broj istraživanja. Pregledom dostupne literature utvrđeno je da prema dosadašnjim provedenim istraživanjima toplinskih svojstva betona s recikliranim agregatom, koeficijent toplinske provodljivosti za beton s 50% recikliranog betona kao zamjene za agregat ima do 36% manju toplinsku provodljivosti, a beton s 50% reciklirane opeke kao zamjene za agregat ima do 45% manju toplinsku provodljivosti od tradicionalnog betona sa prirodnim agregatom približno iste gustoće [5].

U danoj Tablici 3. izrađenoj na temelju dostupnih rezultata istraživanjima [3] mogu se usporediti higrotermalna i osnova fizikalno – mehanička svojstva unutarnjeg i vanjskog sloja betona ECO-SANDWICH® panela.

Tablica 3. Rezultati ispitivanja betona s recikliranim agregatom [3]

| SVOJSTVO | | Unutarnji sloj reciklirani beton | Vanjski sloj reciklirana opeka |
|---|---------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Tlačna čvrstoća (MPa) | 1 dan | 17,1 | 10,7 |
| | 2 dana | 24,5 | 21,2 |
| | 7 dana | 33,4 | 34,7 |
| | 28 dana | 42,2 | 42,7 |
| Gustoća (kg/m ³) | | 2105 | 1971 |
| Relativni otpor difuziji vodene pare (m) | | 1,77 | 1,40 |
| Koeficijent otpora difuziji vodene pare (μ) | | 37 | 29 |
| Toplinska provodljivost (W/mK) | | 0,858 | 0,746 |

Iz Tablice 3 je vidljivo da oba sloja recikliranog betona imaju znatno bolja svojstva u pogledu toplinske provodljivosti od običnog betona (Tablica 2.). Naime zbog povećanog kapilarnog upijanja, propusnosti i apsorpcije vode potrebno je zaštititi navedene slojeve betona ako su direktno izloženi vanjskom okolišu, konkretno agresivnom djelovanju ciklusa smrzavanja i odmrzavanja koji mogu utjecati na degradaciju istih.

Svojstva sorpcije betona s recikliranim agregatom dosad nisu uopće proučavana, ili barem nema trenutno objavljenih i dostupnih rezultata takvih istraživanja. Iako sorpcijske krivulje ukazuju na transport vlage kroz porozne materijale te su stoga neizostavne kod proučavanja i modeliranja prolaska vlage kroz porozne građevinske materijale. S ciljem doprinosa razumijevanju transporta vlage kroz betone s recikliranim agregatom i omogućavanju korektnog numeričkog proračuna higrotermalnog ponašanja takvih betona, predmet ispitivanja ovog rada je upravo određivanje krivulja sorpcije za dvije vrste betone kod kojih je 50 % prirodnog agregata zamijenjeno s recikliranim građevinskim otpadom. Kod jedne vrste betona kao reciklirani agregat koristi se reciklirana opeka a kod druge vrste betona kao reciklirani agregat se koristi reciklirani beton. Sastavi ispitivanih betona istovjetni su sastavima koji se koriste za proizvodnju unutarnjeg i vanjskog sloja ECO-SANDWICH[®] zidnih panela.

7. EKSPERIMENTALNI RAD

Cilj ovog eksperimentalnog istraživanja je određivanje sorpcijskih krivulja, konkretno adsorpcijskih krivulja, za beton s 50 % recikliranog agregata te temeljem prikupljenog iskustva tokom provođenja eksperimentalnog istraživanja prikazati metodologiju dobivanja predmetnih krivulja za betone izrađene od recikliranog agregata. Vrijednosti sorpcijskih krivulja nužan su preduvjet za određivanje higrotermalnog ponašanja zgrade, a za ove vrste betona one još ne postoje. Iz tog razloga njihovo određivanje neophodno je za daljnje istraživanje higrotermalnog ponašanja vanjskih ovojnica zgrada izrađenih od betona s recikliranim agregatom. Ovakva vrsta eksperimentalnog ispitivanja se po prvi put provodi na Građevinskom fakultetu u Zagrebu.

Za provedbu ispitivanja korištena je norma HRN EN ISO 12571 "Značajke građevnih materijala i proizvoda s obzirom na toplinu i vlagu – Određivanje svojstva higroskopske sorpcije (ISO 12571:2013, EN ISO 12571:2013)" [33] u kojoj je propisana aparatura i postupak ispitivanja. Međutim, valja naglasiti da navedena norma daje samo okvirne smjernice za postupak ispitivanja i pojedini koraci ispitivanja nisu konkretno ili su nedovoljno jasno definirani (primjerice veličine uzorka, kontrola uvjeta vlažnosti u eksikatoru, postizanje vlažnosti pripremom otopina, veličina eksikatora i sl.).

U normi su navedene dvije vrste ispitivanja koje se mogu koristiti:

- 1) Metoda eksikatora (referentna metoda)
- 2) Metoda klimatske komore

U sklopu ovog istraživanja primijenjena je metoda ispitivanja u eksikatoru zbog lokalno dostupne aparature i uvjeta ispitivanja u laboratoriju Zavoda za materijale na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Paralelno su provedena ispitivanja adsorpcijskih izoterma i za beton s recikliranom opekom i za beton s recikliranim agregatom čime se u svakom trenu mogao usporediti tijek njihovih ponašanja pri izloženosti istovjetnim relativnim vlažnostima.

Za metodu sa eksikatorom, norma strogo navodi da se krivulje sorpcije određuju pri uspostavljanju uvjeta minimalno četiri relativne vlažnosti u eksikatoru rastućeg redoslijeda pri preporučenoj konstantnoj temperaturi okoline eksikatora od $(23\pm 0,5)^{\circ}\text{C}$ ili $(27\pm 0,5)^{\circ}\text{C}$. Tijekom cijelog perioda ispitivanja osigurani su uvjeti u prostoriji s eksikatorima od

($23 \pm 0,5$)°C te se u tom slučaju može govoriti o sorpcijskim izotermama. Relativne vlažnosti u eksikatoru postižu se korištenjem različitih soli za pripremu otopina. Norma preporučuje pojedine soli za postizanje pojedinih relativnih vlažnosti.

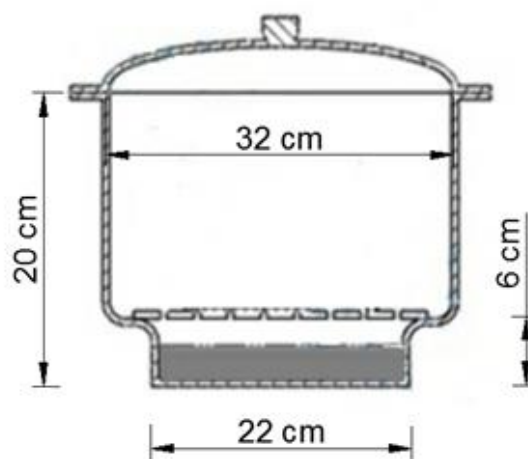
Kako bi se dobilo što više rezultata ravnotežne vlage a samim time i točnije sorpcije izoterme, za potrebe ispitivanja odabrano je ukupno 6 različitih relativnih vlažnosti što će se detaljnije prikazati u nastavku rada.

Za provedbu ovog ispitivanja norma propisuje potrebnu aparaturu koja je prikazana na Slici 19.



Slika 19. Aparatura prema HRN EN ISO 12571 [33]

Prva manjkavost norme je nedefiniranje veličine samog eksikatora. Za ispitivanje su korišteni postojeći eksikator. Laboratorija za materijale koji su dimenzija prikazanih na Slici 20:



Slika 20. Dimenzije eksikatora korištenog pri ispitivanju

7.1 Sušenje reprezentativnih uzoraka

Prema normi HRN EN ISO 12571 [33] za potrebe ispitivanja potrebno je pripremiti reprezentativne uzorke (minimalno tri uzorka za svaku vrstu betona), minimalne mase 10 g te gustoće (pri suhoj masi) manje od 300 kg/m^3 . Minimalna površina ispitnog uzorka mora biti $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ [33]. Međutim, postavilo se pitanje što podrazumijeva reprezentativni uzorak? Koje su to dimenzije? Norma ne navodi preporuke veličina dimenzija za različite vrste materijala.

Kako bi se osigurala bolja ponovljivost rezultata te osigurala pouzdanost, umjesto normom predviđenih 3 uzoraka, odabrano je šest uzoraka od betona s agregatom od recikliranog betona i šest uzoraka od betona s agregatom od reciklirane opeke. Definirane su dimenzije uzoraka $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$. U slučaju betona minimalne dimenzije uzorka prvenstveno ovise o korištenom maksimalnom zrnju agregata. Također uzorci moraju biti dovoljne veličine za predodžbu realnog stanja pora u betonu [34]. Budući da je za oba betona ECO-SANDWICH[®] panela korišteno maksimalno zrnno agregata 16 mm, smatra se da odabrane dimenzije predstavljaju reprezentativni uzorak.

Budući da postupak sorpcije zahtjeva izlaganje potpuno suhog uzorka rastućem redosljedu relativne vlažnosti u eksikatoru, uzorke je bilo potrebno prethodno osušiti do stanja suhog materijala, tj. do konstante mase. Hedenbald [35] je dokazao da se vrijeme sušenja uzoraka produlji za duplo ako se uzorak poveća sa 100 mm na 150 mm, a trostruko ako se poveća sa 100mm na 200 mm. Također je dokazao da se vrijeme sušenja produljuje sa starosti betona te da je pri manjem vodocementom omjeru sušenje kraće. Navedeno je već naznačilo da će postupak sušenja reprezentativnih uzoraka potrajati određeno vrijeme. Sušenje reprezentativnih uzoraka prikazano je na Slici 21.



Slika 21. Sušionik s uzorcima recikliranog betona

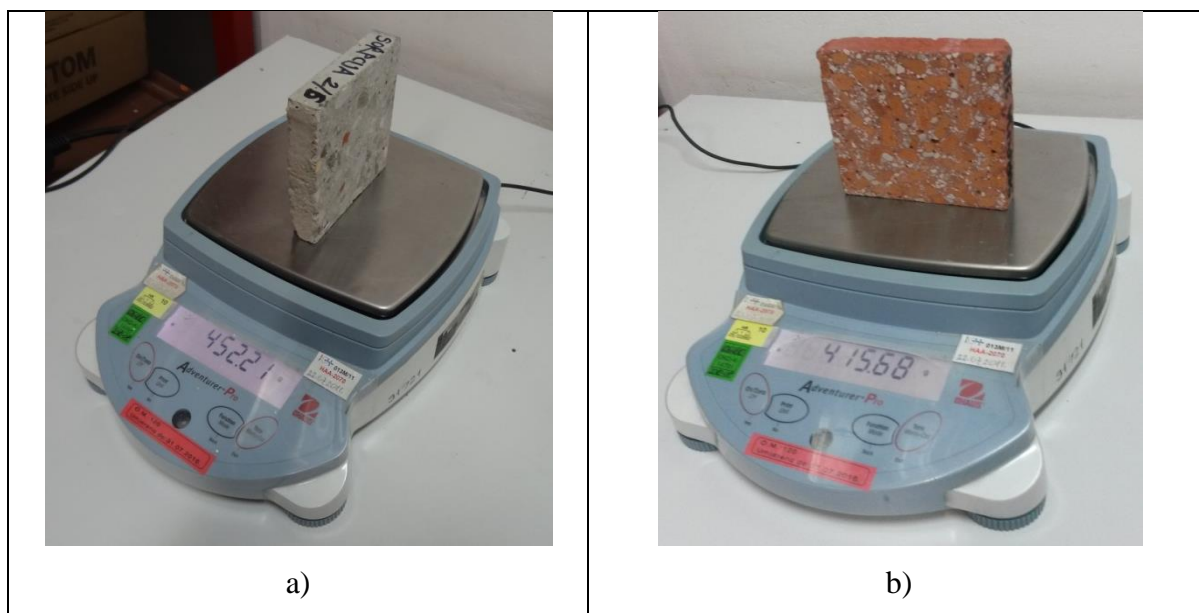
U sklopu ovog ispitivanja dvanaest uzoraka se sušilo dvadeset dana, prvih pet dana uzorci su sušenina temperaturi od 60° , a preostalih petnaest dana na temperaturi od 70° . Uzorci se nisu podvrgavali višim temperaturama prilikom sušenja jer je prema istraživanjima Chi Fernga [36] sušenje uzoraka materijala na bazi cementa optimalno pri 70°C . Brže je nego sušenje pri sobnoj temperaturi, a pritom se izbjegavaju potencijalne komplikacije moguće pri sušenju na 105°C koje je inače uobičajeno korišteno za sušenje betonskih uzoraka. Istraživanjima je ustanovljeno da pri povišenim temperaturama sušenja može doći do promjene u pornoj strukturi betona koje pri sušenju na 105°C mogu biti kritične i nepovratne te je stoga odlučeno da se proces sušenja odvija na nižim temperaturama unatoč značajnom produženju vremena sušenja.

Zbog dugotrajnog sušenja uzoraka vidljivo je da je beton poprilično trom materijal kojem je potrebno određeno vrijeme da otpusti ili primi određenu količinu vlage. To je ujedno i bilo indikativno da će ispitivanje sorpcije biti također vremenski zahtjevno ispitivanje.

7.2 Vaganje tijekom procesa sušenja–provjera postizanja suhe mase

Prema [33] uzorak se smatra suhim ukoliko se masa između tri kontinuirana vaganja, koja ne smiju biti u razmaku kraćem od 24 sata, ne mijenja ili ukoliko je promjena mase manja od 0,1% mase dobivene prethodnim vaganjem.

Proces sušenja uzoraka prikazan na Slici 22. trajao je dvadeset dana i tijekom trajanja sušenja uzorci su se vagali svaka 24 ili eventualno svakih 48 sati. Za vaganje je korištena digitalna vaga preciznosti 0,01 g.



Slika 22. Vaganje uzoraka: a) uzorak s recikliranim betonom; b) uzorak s recikliranom opekom

7.3 Vaganje pri različitim vlažnostima

Za proces određivanja postizanja ravnotežne vlage u ispitnim uzorcima izloženih različitim relativnim vlažnostima u eksikatorima, provođeno je vaganje koje nije smjelo biti u razmaku kraćem od 24 sata. Svakim vađenjem uzoraka iz eksikatora prilikom otvaranja poklopca relativna vlažnost unutar eksikatora se naruši (spontano dolazi do procesa izjednačavanja relativne vlažnosti eksikatora i prostorije u kojoj se eksikator nalazi). Opisani poremećaji relativne vlažnosti u eksikatoru prilikom vaganja prikazani su u Tablici 4.

Tablica 4. Poremećaj relativne vlažnosti prilikom vaganja

| Otopine | Uspostavljena relativna vlažnost za ispitivanje [%] | Relativna vlažnost tijekom vaganja uzoraka [%] | Stanje relativne vlažnosti nakon 24 sata [%] |
|---------------------------------------|---|--|--|
| KOH | 11 | 24 | 11 |
| MgCl ₂ x 6H ₂ O | 34 | 38 | 34 |

Iz tog razloga uzorci su se vagali u minimalnim razmacima od 48 sati kako bi se omogućilo ponovno stabiliziranje i uspostava odabrane relativne vlažnosti unutar eksikatora nakon zatvaranja eksikatora pri završetku vaganja uzoraka. Prilikom procesa vaganja navedenih uzoraka, nakon skidanja poklopca eksikatora, preko uzoraka i unutrašnjeg termohigrometra postavljena je prozirna folija kojoj je zadaća spriječiti potpuno narušavanje stanja relativne vlažnosti unutar eksikatora. Nakon svakog vaganja i vraćanja uzoraka u eksikator, uklonjena je prozirna folija i vraćen poklopac. Ipak, radi mjera predostrožnosti rub posude eksikatora namazan je s motornim mazivom kako bi se omogućila što bolja prionjivost posude i ruba poklopca. Također, obod spoja posude i poklopca obložen je trakama prozirne folije kako bi se eliminirala svaka mogućnost prodora vlage. I gornji 'čep' poklopca eksikatora je obložen prozirnima folijom. Ovime postupcima se osigurala potpuna zrakonepropusnost eksikatora. Opisane mjere prevencije i eksikator prilikom vaganja uzoraka prikazani su na Slici 23.



Slika 23. Eksikator tijekom vaganja uzoraka: a) postavljanje prozirne folije preko posude eksikatora; b) uzorci unutar eksikatora zaštićeni prozirnima folijom tijekom vaganja

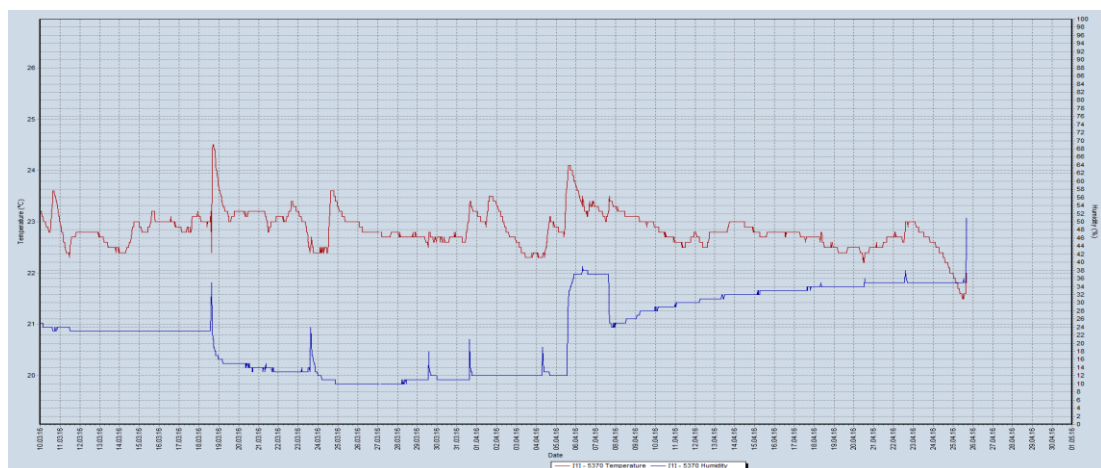
7.4 Princip rada termohigrometra

Prije provedbe ispitivanja potrebno je provjeriti točnost aparature koja će se koristiti. Za ovo ispitivanje korištena su dva digitalna i jedan analogni termo-higrometar, koji su prethodno kalibrirani s umjerenim termo-higrometrom kako bi dokazali vjerodostojnost rezultata. U svaki od eksikatora postavljen je transponder koji služi kao odašiljač stanja unutarnje vlažnosti te je povezan s vanjskim termo-higrometrom na kojem se očitava stanje za nadgledanje temperature i vlage, prikaz vlage, temperature, točke rosišta, maksimalnih, minimalnih i prosječnih vrijednosti. Na Slici 24. je prikazan vanjski termohigrometar te pripadni transponder unutar eksikatora.



Slika 24 Vanjski termohigrometar s transponderom unutar eksikatora

Na Slici 25. je prikazan ispis stanja promjene relativne vlažnosti tijekom ispitivanja iz termohigrometra. Vidljivi skokovi predstavljaju narušavanje relativne vlažnosti unutar eksikatora prilikom otvaranja poklopca za potrebe vaganja uzoraka.



Slika 25. Zapis iz termohigrometra

7.5 Priprema mješavina

Prema preporukama iz norme HRN EN ISO 12571 [33] odabrane su soli, Tablica 4., za postizanje potrebnih relativnih vlažnosti u eksikatorima. Relativne vlažnosti u eksikatorima se postižu pripremom zasićenih otopina i to miješanjem destilirane vode i određene količine soli pri određenoj temperaturi destilirane vode. Temperatura destilirane vode i količina soli koje su potrebne za dobivanje zasićenih otopina koje rezultiraju postizanje željene relativne vlažnosti dane su u Tablici 5.

Tablica 5. Količine odabranih soli za postizanje odabrane vlažnosti prema normi HRN EN ISO 12571 [33]

| SOLI | Temperatura destilirane vode prilikom pripreme °C | Količina soli u gramima na 100ml destilirane vode | Relativna vlažnost rH |
|--|--|--|------------------------------|
| 1. KOH | 15 | 107 | 11% |
| 2. MgCl₂ x 6H₂O | 20 | 167 | 33% |
| 3. NaBr | 100 | 121 | 57% |
| 4. NaCl | 100 | 39,12 | 75% |
| 5. KCl | 100 | 56,7 | 85% |
| 6. KNO₃ | 100 | 247 | 95% |

U trenutku pisanja ovog rada, od odabranih šest otopina, pripremljeno je njih ukupno četiri i to redom prvih četiri iz Tablice 4. Praćenjem procedure u normi za dane omjere soli i destilirane vode dobivene su otopine koje nisu rezultirale propisanim relativnim vlažnostima (izuzev otopine sa soli NaBr i NaCl). Prilikom eksperimentalnog rada ustanovljeno je da se količina soli koju norma propisuje ne postiže prezasićena otopina koja je potrebna kako bi se postigla predviđena relativna vlažnost u eksikatoru (izuzev otopine sa soli NaBr). Prilikom miješanja propisane količine soli u 100 ml destilirane vode poželjno bi bilo dodati onu količinu soli koja je potrebna da se u danoj količini destilirane vode prestane otapati te počne taložiti na dnu eksikatora. Norma propisuje minimalno tri uzorka za provedbu ispitivanja, prilikom ovog eksperimentalnog rada korišteno je šest uzoraka, svih šest uzoraka jedne vrste betona stavljeno je u jedan eksikator a ostalih šest uzoraka druge vrste betona stavljeno je u drugi eksikator. Što se tiče potrebnog volumena otopine, norma jedino propisuje visinu otopine od 3 cm do 5 cm od dna eksikatora. Te se na temelju proračuna volumena dna eksikatora išlo unatrag računati potrebna količina destilirane vode i količina soli. Odlučeno je da će se svaka

otopina pripremati za 1000 mL destilirane vode i pripadne količine soli prema normi uz po potrebi naknadno dodavanje soli kako bi se postigla prezasićena otopina.

7.5.1 Postupak dobivanja rH 11%

Prema uputama iz norme, otopina KOH soli priprema se pri temperaturi destilirane vode od 15°C, a zasićena otopina postiže se dodavanjem 107 g soli na 100 ml destilirane vode [48]. Prilikom miješanja otopine stvara se jaka egzotermna reakcija, tijekom koje se oslobađaju jake pare agresivne za oči i dišne puteve. Zbog intenzivne reakcije otopine potrebno je nositi prikladnu zaštitu za oči, kožu i dišne puteve, te proces pripreme otopine nije preporučljivo provoditi u zatvorenom prostoru. Na Slici 26. prikazana je KOH sol koja u krutom stanju ima formu listića te istaložena na dnu eksikatora u zasićenoj otopini.



Slika 26. Prikaz KOH soli: a) u krutom stanju – forma listića; b) istaložena KOH sol

Neposredno nakon miješanja 1000 ml destilirane vode i 1070 g KOH soli u eksikatoru je zabilježena vlažnost rH 55%. U periodu od osam dana relativna vlažnost unutar eksikatora spustila se na 22%, a to stanje vlažnosti nije zadovoljilo vrijednost relativne vlažnosti iz propisa norme za danu otopinu (Tablica 4.), a u eksikatoru se otopila sva prethodno istaložena kruta tvar (listići KOH soli), a to je ukazalo da otopina nije zasićena te da je potrebna dodatna količina soli. Dodavanjem 200 g KOH soli u postojeću otopinu već idućeg dana relativna vlažnost u eksikatoru je pala na 18%, ali se i dodana sol potpuno otopila. Iz tog razloga dodano je još 219 g KOH soli što je rezultiralo padom relativne vlažnosti na zadovoljavajuće

okvire od rH 13%. Nakon stavljanja uzoraka u eksikator relativna vlažnost se povećala na rH 24%, no to nije neočekivana reakcija jer smo podizanjem poklopca prilikom stavljanja uzoraka narušili relativnu vlažnost unutar eksikatora. Već nakon 24 sata postigla se relativna vlažnost od 11% unutar eksikatora u kojem se nalazio uzorak, a to zadovoljava potreban red veličine relativne vlažnosti za dobivanje prve točke adsorpcijske izoterme betona s recikliranom opekom i betonom s recikliranim betonom kao agregatom. Tek kada su ostvareni uvjeti predviđene relativne vlažnosti unutar eksikatora, onda su suhi ispitni uzorci stavljeni u eksikator. Na Slici 27. su prikazana oba eksikatora s uzorcima betona s recikliranim betonom kao agregatom i betonom s recikliranom opekom kao agregatom. Na Slici 27. je vidljiv i način zaštite eksikatora prozirnom folijom te vanjski termohigrometri koji prikazuju stanje vlažnosti unutar eksikatora. Između eksikatora nalazi se umjereni termohigrometar.

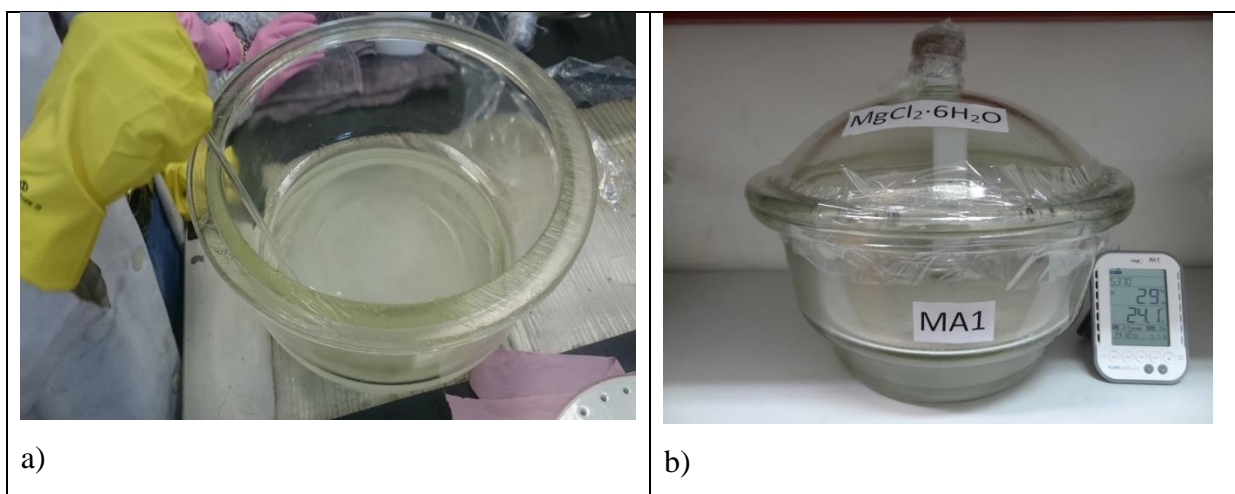


Slika 27. Eksikator za vrijeme postizanja relativne vlažnosti; Lijevo: uzorci betona s recikliranim betonom; Desno: uzorci betona s recikliranom opekom

7.5.2 Postupak dobivanja rH 33%

Prema uputama iz norme, otopina sa soli $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ priprema se pri temperaturi destilirane vode od 20°C , a zasićena otopina postiže se dodavanjem 167 g soli na 100 ml destilirane vode [33]. Prilikom miješanja ne dolazi do intenzivne egzotermne reakcije te se ne oslobađaju reaktivne agresivne pare, stoga je miješanje ove otopine moguće unutar zatvorenih prostora.

Neposredno nakon miješanja 1000 ml destilirane vode i 1670 g $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ soli u eksikatoru otopila se sva količina dodane krute tvari. Za postizanje zasićene otopine dodano je još 334 g soli, koja je rezultirala relativnu vlažnost unutar eksikatora od 45%. Nakon 24 sata naknadno dodana količina soli se potpuno otopila, te je dodano još 976 g iste. Zbog nepredviđenog dodavanja velike količine soli razina otopine u eksikatoru podigla se iznad propisanih 5 cm, pa je idući korak odlijevanja otopine do propisanih razina od 3 do 5 cm (od dna eksikatora) bio neophodan, ali se i navedena količina dodane soli otopila u roku od 24 sata. Iz tog razloga dodano je još 100 g soli koja je rezultirala relativnom vlažnosti unutar eksikatora od 37% i nije se potpuno otopila, što nam ukazuje na prezasićenost otopine. Postignuta relativna vlažnost od 37% zadovoljava potreban red veličine za dobivanje druge točke adsorpcijske izoterme. Na Slici 28. prikazana je priprema otopine $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ te metoda provjere uspostave uvjeta predviđene relativne vlažnosti. Tek kada su ostvareni uvjeti predviđene relativne vlažnosti unutar eksikatora, onda su ispitni uzorci prebačeni iz eksikatora s nižom relativnom vlažnosti u eksikatore s idućom višom relativnom vlažnosti.



Slika 28. $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ sol: a) miješanje otopine; b) otopina i mjerenje stanja vlažnosti unutar eksikatora

7.5.3 Postupak dobivanja rH 57%

Prema uputama iz norme, otopina NaBr soli priprema se pri temperaturi destilirane vode od 100°C, a zasićena otopina postiže se dodavanjem 121 g soli na 100 ml destilirane vode [48]. Prilikom miješanja otopine ne dolazi do intenzivne egzotermne reakcije te se ne oslobađaju reaktivne agresivne pare. Pri hlađenju otopine nakon kratkog vremena (manje od jednog sata) na površini iste u eksikatoru se stvorio tanki sloj kristalizirane soli koji je vidljiv na Slici 29. Unutar 24 sata u eksikatoru je postignuta relativna vlažnost od 59% te je otopina zasićena i zadovoljava potreban red veličine za dobivanje treće točke adsorpcijske izoterme.



Slika 29. Prikaz NaBr soli: a) sol u krutom stanju – praškasta forma; b) prikaz kristalizirane soli na površini otopine

7.5.4 Postupak dobivanja rH 75%

Prema uputama iz norme, otopina NaCl soli priprema se pri temperaturi destilirane vode od 100°C, a zasićena otopina postiže se dodavanjem 39,12 g soli na 100 ml iste [33]. Prilikom miješanja otopine ne dolazi do agresivne kemijske reakcije.

Neposredno nakon miješanja 1000 ml destilirane vode zagrijane dok nije prokuhala dodano je 391,2 g NaCl prema uputama u normi. Otopina je ohlađena na sobnu temperaturu te je naknadno stavljena u eksikator. Unutar 24 sata u eksikatoru je postignuta relativna vlažnost od 75% te je otopina zasićena i zadovoljava potreban red veličine za dobivanje četvrte točke adsorpcijske izoterme.

7.6 Analiza i preporuke za pripremu otopina

U Tablici 6. prikazane su stvarno korištene količine soli koje su bile potrebne da se pri zadanoj temperaturi destilirane vode postigne potrebna relativna vlažnost unutar eksikatora. Prilikom miješanja temperatura otopina je u skladu sa normom HRN EN ISO 12571 [33], dok za postizanje zasićenih otopina količina pojedinih soli varira.

Tablica 6. Količine soli korištene prilikom ispitivanja

| SOLI | Temperatura destilirane vode prilikom pripreme °C | Količina soli u gramima na 100 ml destilirane vode | Relativna vlažnost rH |
|---|---|--|-----------------------|
| 1.KOH | 15 | 148,9 | 13% |
| 2.MgCl ₂ x 6H ₂ O | 20 | 308,0 | 37% |
| 3.NaBr | 100 | 121,0 | 57% |
| 4.NaCl | 100 | 391,2 | 75% |

Prilikom pripreme otopina za eksikatore, na temelju stečenog iskustva tijekom ovog eksperimentalnog istraživanja provedenog u sklopu ovog rada, preporuča se prvobitno stavljanje količine soli prema normi HRN EN ISO 12571 [33], te u slučaju nezasićene otopine postepeno dodavanje dodatne količine soli do (pre)zasićenja. Također je potrebno pratiti uspostavu relativne vlažnosti unutar praznog eksikatora te uzorke u eksikatore stavljati tek nakon što se predviđena relativna vlažnost ostavi i stabilizira kroz par dana, kako bi eventualne naknadne promjene vlažnosti u eksikatoru bile isključivo zbog postizanja ravnotežne vlage između uzorka i eksikatora, a ne zbog nedovršenog procesa stabilizacije otopine.

U Tablici 7. prikazan je postotak variranja potrebnih količina soli u gramima za 100 ml destilirane vode za postizanje (pre)zasićene otopine u odnosu na propisane količine soli u normi.

Tablica 7. Odstupanje propisanih od korištenih količina soli

| SOLI | Potrebna količina soli u gramima prema HRN EN ISO 12571 | Količina soli u gramima pri kojoj je postignuta zasićena otopina | Odstupanje[%] |
|---|---|--|---------------|
| 1. KOH | 107 | 148,9 | 39,15% |
| 2. MgCl ₂ x6H ₂ O | 167 | 308,0 | 84,43% |
| 3. NaBr | 121 | 121,0 | 0% |
| 4. NaCl | 39,12 | 39,12 | 0% |

7.6.1 Preporuke za odlaganje otopine

Prilikom skladištenja korištenih otopina treba voditi računa o njihovim kemijskim svojstvima te ih se ne smije nepropisno odlagati ili izljevati u sustav odvodnje. Taj problem riješen je skladištenjem istih u plastične kanistre s naznačenom koncentracijom korištene soli i destilirane vode.

7.7 Sastav ispitanih betona s recikliranim agregatom

Uzorci betona s recikliranom opekom izrađeni su od 400 kg cementa (CEM II 42,5 R), korišten je v/c omjer 0,47. Agregat koji je korišten sadrži 50 % drobljene reciklirane opeke, veličine zrna 4-8 mm i 8-16 mm i 50 % prirodnog agregata pri čemu je korišteno pola riječnog, a pola drobljenog agregata, veličine zrna 0-4 i 4-8 mm. Korišten je dodatak za beton KEDOBET.

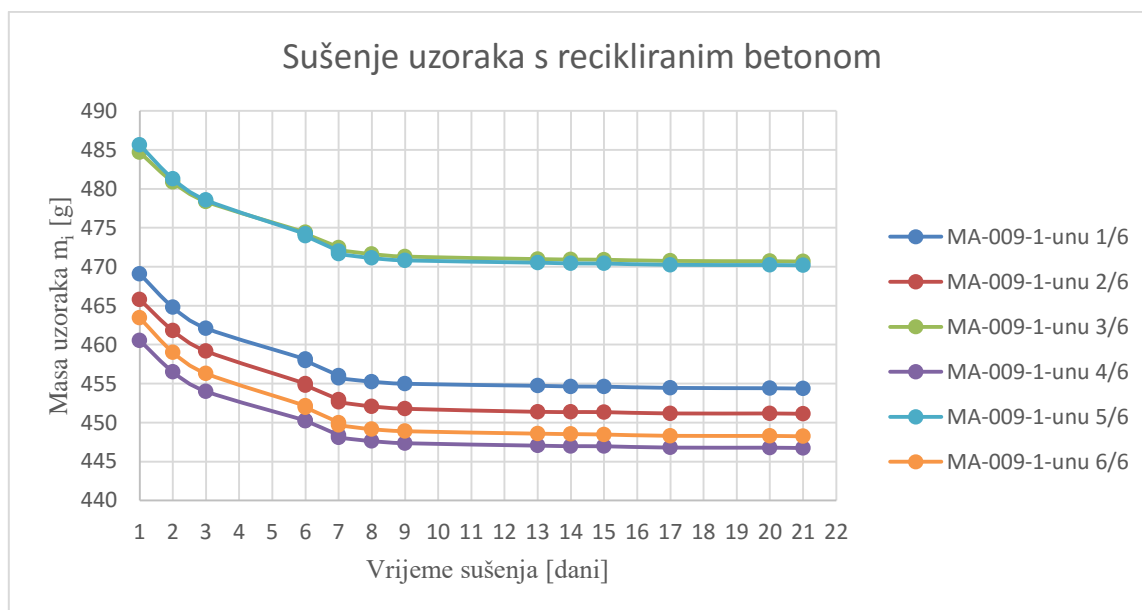
Uzorci betona s recikliranim betonom izrađeni su od 380 kg cementa (CEM II 42,5 R), korišten je v/c omjer 0,5. Agregat koji je korišten sadrži 50 % drobljenog recikliranog betona, veličine zrna 4-8 mm i 8-16 mm i 50 % prirodnog agregata pri čemu je korišteno pola riječnog, a pola drobljenog agregata, veličine zrna 0-4 i 4-8 mm. Korišten je dodatak za beton KEDOBET.

8. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

8.1 Prikaz sušenja uzoraka od betona s recikliranim agregatom

U poglavlju 7.1 Sušenje reprezentativnih uzoraka, detaljno je objašnjen postupak sušenja uzoraka prije prvog stavljanja u eksikator. Parametar koji je potrebno imati u vidu prilikom vaganja uzoraka do konstantne mase prema normi HRN EN ISO 12571 [33] je da razlika u masi uzoraka mora biti manja od 0,4 g za zadovoljavajući red veličine konstantne mase za dimenzije uzoraka na kojima se provodilo ispitivanje.

Na Slikama 30. i 31. grafički su prikazani dijagrami sušenja za uzorke betona s recikliranim betonom i uzorke betona s recikliranom opekom, dok su u Tablicama 8. i 9. numerički prikazi istih. Na Slici 30. prikazano je sušenje uzoraka betona s agregatom od recikliranog betona. U dijagramu je vidljivo je da se masa svih šest uzoraka s vremenom smanjuje, u prvih 7 dana masa se smanjila u svakom od uzoraka za oko 14 g, a nakon 7 dana tj. tijekom iduća 2 tjedna masa pada tek za 1 g.

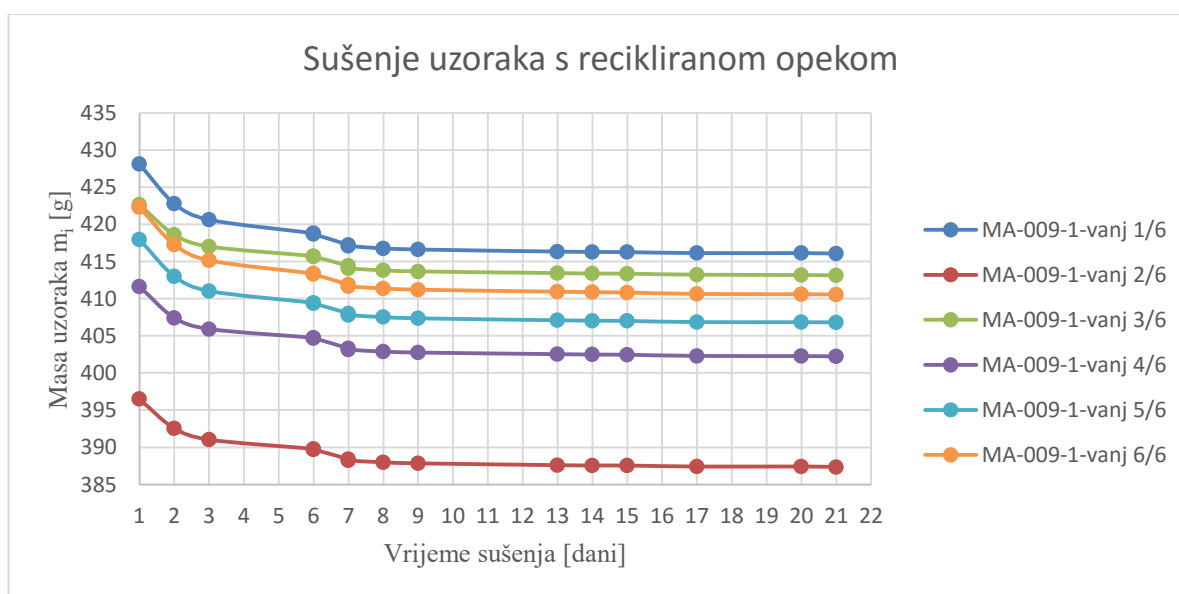


Slika 30. Sušenje uzoraka unutarnjeg sloja betona

Tablica 8. Sušenje uzoraka unutarnjeg sloja betona

| T [°C] | Broj dana | MA-009-1- unu 1/6 | MA-009-1- unu 2/6 | MA-009-1- unu 3/6 | MA-009-1- unu 4/6 | MA-009-1- unu 5/6 | MA-009-1- unu 6/6 |
|--------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] |
| 60 | 1 | 469,09 | 465,8 | 484,67 | 460,55 | 485,62 | 463,44 |
| 60 | 2 | 464,8 | 461,8 | 480,87 | 456,51 | 481,29 | 459,03 |
| 60 | 3 | 462,1 | 459,17 | 478,36 | 454 | 478,55 | 456,3 |
| 60 | 6 | 458,13 | 454,99 | 474,4 | 450,27 | 474,2 | 452,15 |
| 70 | 6 | 457,94 | 454,79 | 474,23 | 450,23 | 473,97 | 451,95 |
| 70 | 7 | 456 | 452,93 | 472,46 | 448,38 | 471,98 | 449,99 |
| 70 | 7 | 455,71 | 452,63 | 472,15 | 448,09 | 471,65 | 449,68 |
| 70 | 8 | 455,25 | 452,08 | 471,62 | 447,62 | 471,11 | 449,15 |
| 70 | 9 | 454,98 | 451,77 | 471,3 | 447,35 | 470,81 | 448,89 |
| 70 | 13 | 454,72 | 451,38 | 470,98 | 447,04 | 470,52 | 448,58 |
| 70 | 14 | 454,63 | 451,35 | 470,92 | 446,97 | 470,42 | 448,52 |
| 70 | 15 | 454,61 | 451,34 | 470,9 | 446,96 | 470,41 | 448,47 |
| 70 | 17 | 454,45 | 451,17 | 470,74 | 446,79 | 470,24 | 448,3 |
| 70 | 20 | 454,41 | 451,17 | 470,71 | 446,78 | 470,22 | 448,29 |
| 70 | 21 | 454,35 | 451,12 | 470,66 | 446,73 | 470,18 | 448,23 |

Na Slici 31. prikazano je sušenje uzoraka betona s agregatom od reciklirane opeke. U dijagramu je vidljivo je da se masa svih šest uzoraka s vremenom smanjuje, u prvih 7 dana masa se smanjila u svakom od uzoraka za 9 do 12 g, a nakon 7 dana tj. tijekom iduća 2 tjedna masa pada tek za 0,5 g.



Slika 31. Sušenje uzoraka vanjskog sloja betona

Tablica 9. Sušenje uzoraka vanjskog sloja betona

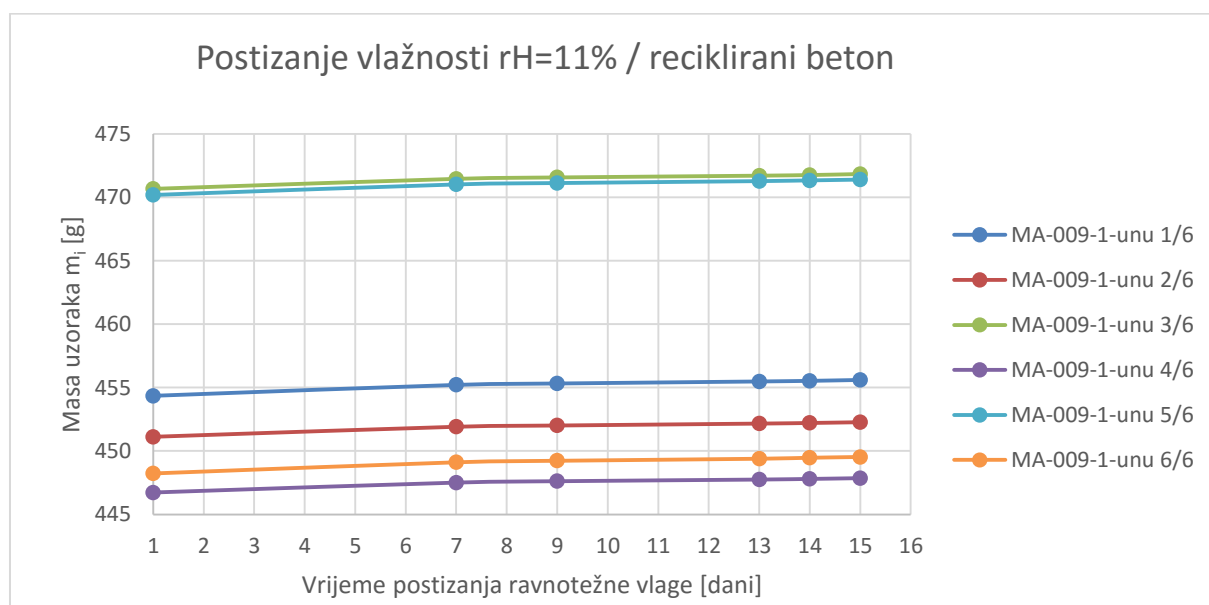
| T [°C] | Broj dana | MA-009-1- vanj 1/6 | MA-009-1- vanj 2/6 | MA-009-1- vanj 3/6 | MA-009-1- vanj 4/6 | MA-009-1- vanj 5/6 | MA-009-1- vanj 6/6 |
|-----------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] |
| 60 | 1 | 428,12 | 396,49 | 422,66 | 411,64 | 417,98 | 422,3 |
| 60 | 2 | 422,8 | 392,54 | 418,6 | 407,42 | 413,02 | 417,29 |
| 60 | 3 | 420,62 | 391,03 | 417,02 | 405,92 | 411,03 | 415,15 |
| 60 | 6 | 418,81 | 389,79 | 415,74 | 404,75 | 409,45 | 413,38 |
| 70 | 6 | 418,7 | 389,72 | 415,68 | 404,7 | 409,37 | 413,29 |
| 70 | 7 | 417,24 | 388,41 | 414,41 | 403,32 | 408,02 | 411,9 |
| 70 | 7 | 417,1 | 388,24 | 414,1 | 403,15 | 407,81 | 411,67 |
| 70 | 8 | 416,77 | 387,98 | 413,82 | 402,89 | 407,52 | 411,38 |
| 70 | 9 | 416,62 | 387,84 | 413,67 | 402,75 | 407,36 | 411,21 |
| 70 | 13 | 416,34 | 387,6 | 413,45 | 402,54 | 407,1 | 410,94 |
| 70 | 14 | 416,29 | 387,55 | 413,38 | 402,48 | 407,04 | 410,88 |
| 70 | 15 | 416,27 | 387,55 | 413,37 | 402,46 | 407,01 | 410,83 |
| 70 | 17 | 416,14 | 387,41 | 413,23 | 402,3 | 406,85 | 410,64 |
| 70 | 20 | 416,14 | 387,42 | 413,19 | 402,28 | 406,84 | 410,61 |
| 70 | 21 | 416,07 | 387,35 | 413,14 | 402,23 | 406,81 | 410,57 |

Usporedbom dobivenih krivulja prilikom sušenja uzoraka od dvije različite vrste agregata možemo zaključiti da je beton s agregatom od reciklirane opeke ranije postigao konstantnu masu prilikom sušenja od betona s agregatom od recikliranog betona. Ovo saznanje potvrđuje poznatu činjenicu da je beton jako trom materijal, te da mu je potrebno određeno vrijeme da postigne konstantnu masu ovisno o uvjetima okoliša u kojem se nalazi.

8.2 Sorpcijske izoterme betona s recikliranim agregatom

8.2.1 Sorpcijske izoterme za rH 11%

U poglavlju 7.5.1 Postupak dobivanja rH 11% detaljno je objašnjen postupak dobivanja relativne vlažnosti unutar eksikatora. Na Slikama 32. i 33. grafički su prikazani dijagrami sorpcijskih izotermi betonskih uzoraka koji su postavljeni u eksikatore s postignutom relativnom vlažnosti od 11%, dok su u Tablicama 10. i 11. numerički prikazi istih. Na Slici 32. prikazane su krivulje sorpcijskih izotermi za uzorke betona s agregatom od recikliranog betona. U dijagramu je vidljivo je da se masa svih šest uzoraka s vremenom povećava, u prvih 7 dana masa se povećala u svakom od uzoraka za oko 1g, a nakon 7 dana tj. tokom iduća 2 dana masa se povećala za 0,1 g te posljednja 3 vaganja masa se povećala tek za 0,05 g.

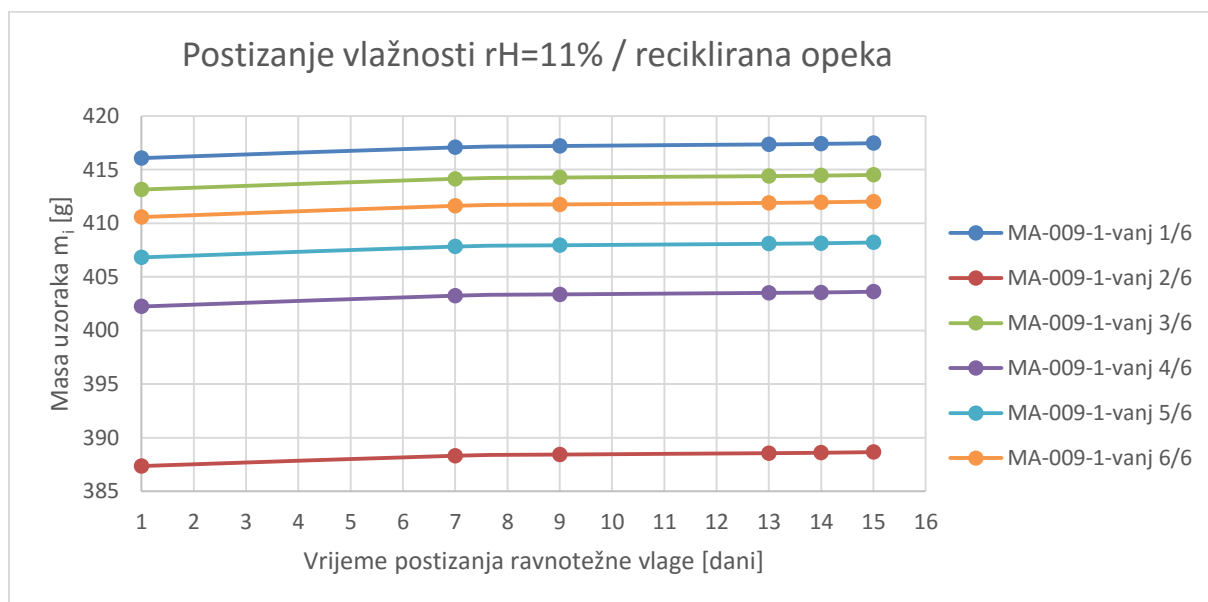


Slika 32. Sorpcijske izoterme unutarnjeg sloja betona

Tablica 10. Promjena mase unutarnjeg sloja betona u okolišu rH 11%

| rH [%] | Broj dana | MA-009-1-unu 1/6 | MA-009-1-unu 2/6 | MA-009-1-unu 3/6 | MA-009-1-unu 4/6 | MA-009-1-unu 5/6 | MA-009-1-unu 6/6 |
|--------|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] |
| 10 | 1 | 454,35 | 451,12 | 470,66 | 446,73 | 470,18 | 448,23 |
| 11 | 7 | 455,21 | 451,91 | 471,45 | 447,51 | 471,01 | 449,11 |
| 11 | 9 | 455,32 | 452,01 | 471,56 | 447,62 | 471,12 | 449,23 |
| 11 | 13 | 455,48 | 452,16 | 471,7 | 447,75 | 471,27 | 449,39 |
| 11 | 14 | 455,53 | 452,21 | 471,75 | 447,8 | 471,33 | 449,47 |
| 11 | 15 | 455,6 | 452,27 | 471,83 | 447,86 | 471,39 | 449,53 |

Na Slici 33. prikazane su krivulje sorpcijskih izotermi za uzorke betona s agregatom od reciklirane opeke. U dijagramu je vidljivo je da se masa svih šest uzoraka s vremenom povećava, u prvih 7 dana masa se povećala u svakom od uzoraka za oko 1 g, a nakon 7 dana tj. tokom iduća 2 dana masa se povećala za 0,1 g te posljednja 3 vaganja masa se povećala tek za 0,05 g.



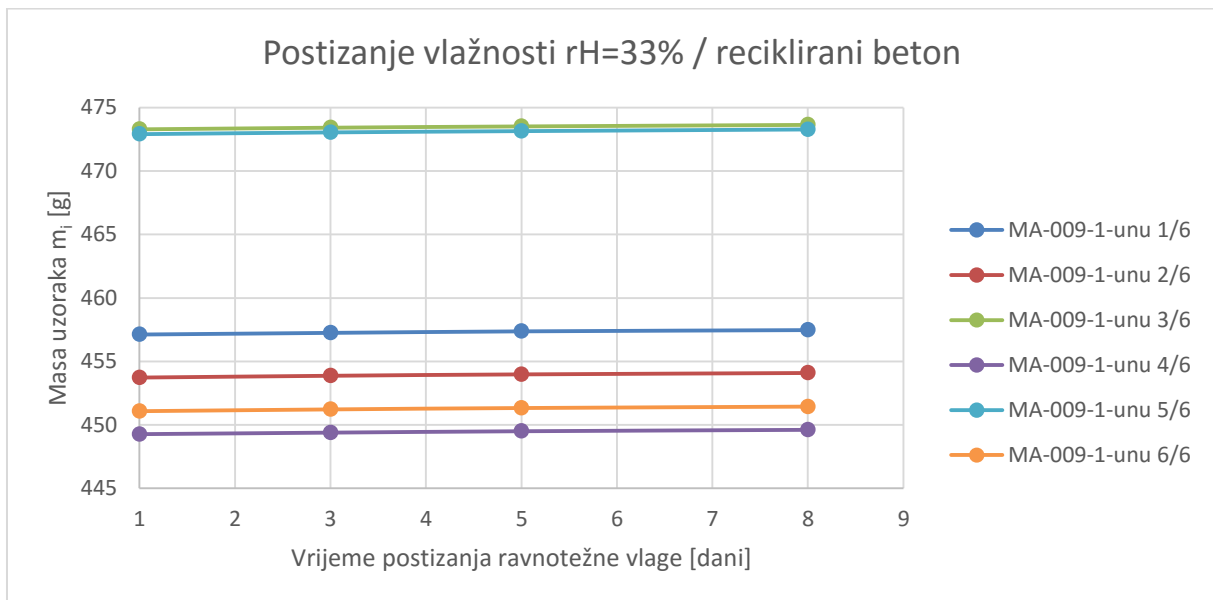
Slika 33. Sorpcijske izoterme vanjskog sloja betona

Tablica 11. Promjena mase vanjskog sloja betona u okolišu rH 11%

| rH [%] | Broj dana | MA-009-1-vanj 1/6 | MA-009-1-vanj 2/6 | MA-009-1-vanj 3/6 | MA-009-1-vanj 4/6 | MA-009-1-vanj 5/6 | MA-009-1-vanj 6/6 |
|--------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] |
| 11 | 1 | 416,07 | 387,35 | 413,14 | 402,23 | 406,81 | 410,57 |
| 11 | 7 | 417,07 | 388,31 | 414,14 | 403,24 | 407,82 | 411,62 |
| 12 | 9 | 417,2 | 388,42 | 414,26 | 403,36 | 407,94 | 411,75 |
| 12 | 13 | 417,35 | 388,55 | 414,39 | 403,5 | 408,08 | 411,89 |
| 12 | 14 | 417,4 | 388,59 | 414,44 | 403,54 | 408,13 | 411,95 |
| 12 | 15 | 417,46 | 388,65 | 414,5 | 403,61 | 408,2 | 412,02 |

8.2.2 Sorpcijske izoterme za rH 33%

U poglavlju 7.5.2 Postupak dobivanja rH 33% detaljno je objašnjen postupak dobivanja relativne vlažnosti unutar eksikatora. Na Slikama 34. i 35. grafički su prikazani dijagrami sorpcijskih izotermi betonskih uzoraka koji su postavljeni u eksikatore s postignutom relativnom vlažnosti od 33%, dok su u Tablicama 12. i 13. numerički prikazi istih. Na Slici 34. prikazane su krivulje sorpcijskih izotermi za uzorke betona s agregatom od recikliranog betona. U dijagramu je vidljivo je da se masa svih šest uzoraka s vremenom povećava. Svakim idućim vaganjem povećanje mase svih uzoraka iznosi oko 0,1 g .

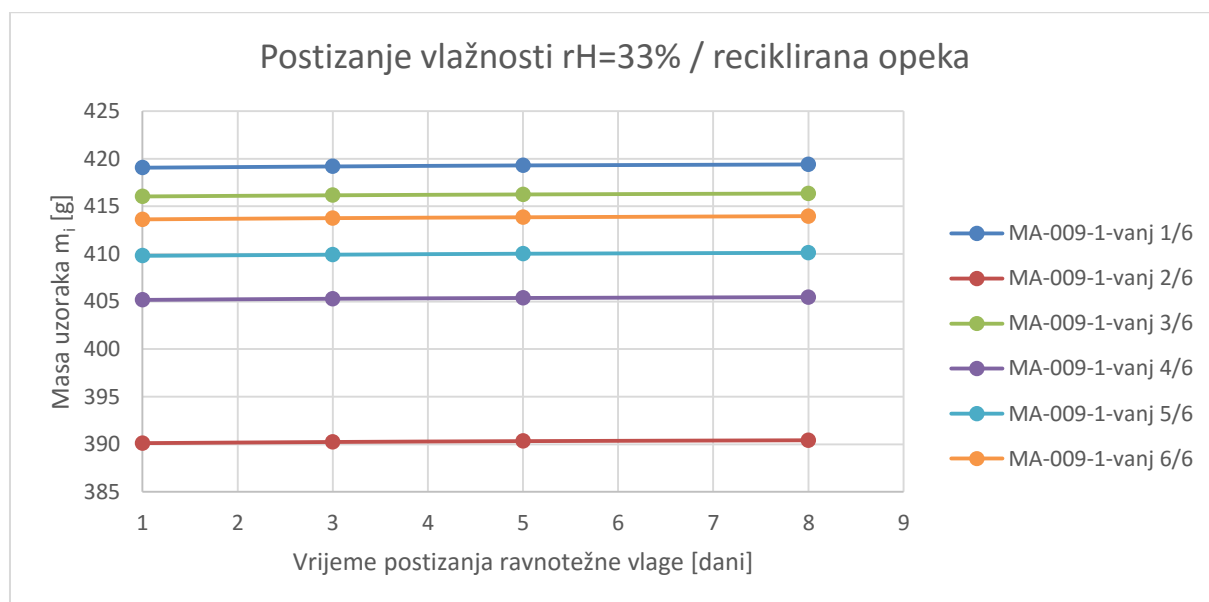


Slika 34. Sorpcijske izoterme unutarnjeg sloja betona

Tablica 12. Promjena mase unutarnjeg sloja betona u okolišu rH 33%

| rH [%] | Broj dana | MA-009-1-unu 1/6 | MA-009-1-unu 2/6 | MA-009-1-unu 3/6 | MA-009-1-unu 4/6 | MA-009-1-unu 5/6 | MA-009-1-unu 6/6 |
|--------|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] |
| 33 | 1 | 457,12 | 453,73 | 473,29 | 449,27 | 472,91 | 451,08 |
| 34 | 3 | 457,25 | 453,87 | 473,42 | 449,39 | 473,05 | 451,22 |
| 34 | 5 | 457,37 | 453,98 | 473,52 | 449,5 | 473,15 | 451,33 |
| 35 | 8 | 457,47 | 454,09 | 473,64 | 449,61 | 473,28 | 451,44 |

Na Slici 35. prikazane su krivulje sorpcijskih izotermi za uzorke betona s agregatom od reciklirane opeke. U dijagramu je vidljivo je da se masa svih šest uzoraka s vremenom povećava. Svakim idućim vaganjem povećanje mase svih uzoraka iznosi oko 0.1g .



Slika 35. Sorpcijske izoterme vanjskog sloja betona

Tablica 13. Promjena mase vanjskog sloja betona u okolišu rH 33%

| rH [%] | Broj dana | MA-009-1-vanj 1/6 | MA-009-1-vanj 2/6 | MA-009-1-vanj 3/6 | MA-009-1-vanj 4/6 | MA-009-1-vanj 5/6 | MA-009-1-vanj 6/6 |
|--------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] | masa m_i [g] |
| 33 | 1 | 419,06 | 390,12 | 416,04 | 405,17 | 409,8 | 413,63 |
| 34 | 3 | 419,19 | 390,24 | 416,16 | 405,29 | 409,92 | 413,76 |
| 34 | 5 | 419,3 | 390,33 | 416,25 | 405,37 | 410,02 | 413,85 |
| 35 | 8 | 419,4 | 390,42 | 416,35 | 405,46 | 410,12 | 413,97 |

Usporedbom sorpcijskih izotermi dobivenih izlaganjem betonskih uzoraka različitim vlažnostima te paralelnim vaganjem istih možemo zaključiti da su obje vrste betonskih uzoraka postizale konstantnu masu mijenjajući je za isti red veličine prilikom svakog vaganja. Na temelju saznanja iz poglavlja 8.1 Prikaz sušenja uzoraka od betona s recikliranim agregatom i 8.2 Sorpcijske izoterme betona s recikliranim agregatom možemo zaključiti da je betonu s agregatom od recikliranog betona potrebno više vremena za sušenje nego betonu s agregatom od reciklirane opeke, ali je vrijeme za uspostavu konstantne mase uzoraka prilikom izlaganja istih različitim vlažnostima jednako.

9. ANALIZA I RASPRAVA

U poglavljima 8.2.1 Sorpcijske izoterme rH 11% grafički su prikazani dijagrami sorpcijskih izotermi betonskih uzoraka koji su postavljeni u eksikatore s postignutom relativnom vlažnosti od 11%. Analizom dijagrama vidljivo je da adsorpcija za pojedine uzorke betona od iste vrste agregata ima isti red veličine promjene mase. Naime promjene koje nisu vidljive na grafičkom prikazu dane su u tablicama niže. U Tablici 14. prikazana je srednja vrijednost i standardna devijacija promjene mase uzoraka od betona s recikliranim betonom kao agregatom nakon izlaganja rH 11%.

Tablica 14. Razlike u promjeni mase uzoraka nakon izlaganja rH 11%

| Promjena mase nakon | Promjena mase uzoraka nakon izlaganja rH 11% [g] | | | | | | Srednja vrijednost | Standardna devijacija |
|---------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------------|
| | MA-009-1-unu 1/6 | MA-009-1-unu 2/6 | MA-009-1-unu 3/6 | MA-009-1-unu 4/6 | MA-009-1-unu 5/6 | MA-009-1-unu 6/6 | | |
| 7. dana | 0.86 | 0.79 | 0.79 | 0.78 | 0.83 | 0.88 | 0.82 | 0.038 |
| 9. dana | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.006 |
| 13. dana | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.15 | 0.16 | 0.15 | 0.010 |
| 14. dana | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.011 |
| 15. dana | 0.07 | 0.06 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.007 |

U Tablici 15. prikazana je srednja vrijednost i standardna devijacija promjene mase uzoraka od betona s recikliranim opekom kao agregatom nakon izlaganja rH 11%.

Tablica 15. Razlike u promjeni mase uzoraka nakon izlaganja rH 11%

| Promjena mase nakon | Promjena mase uzoraka nakon izlaganja rH 11% [g] | | | | | | Srednja vrijednost | Standardna devijacija |
|---------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
| | MA-009-1-vanj 1/6 | MA-009-1-vanj 2/6 | MA-009-1-vanj 3/6 | MA-009-1-vanj 4/6 | MA-009-1-vanj 5/6 | MA-009-1-vanj 6/6 | | |
| 7.dana | 1.00 | 0.96 | 1.00 | 1.01 | 1.01 | 1.05 | 1.01 | 0.026 |
| 9.dana | 0.13 | 0.11 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.007 |
| 13.dana | 0.15 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.007 |
| 14.dana | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.06 | 0.05 | 0.007 |
| 15.dana | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.005 |

U Tablici 16. prikazana je srednja vrijednost i standardna devijacija promjene mase uzoraka od betona s recikliranim betonom kao agregatom nakon izlaganja rH 33%.

Tablica 16. Razlike u promjeni mase uzoraka nakon izlaganja rH 33%

| Promjena mase nakon | Promjena mase uzoraka nakon izlaganja rH 33% [g] | | | | | | Srednja vrijednost | Standardna devijacija |
|---------------------|--|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|-----------------------|
| | MA-009-1-unu 1/6 | MA-009-1-unu 2/6 | MA-009-1-unu 3/6 | MA-009-1-unu 4/6 | MA-009-1-unu 5/6 | MA-009-1-unu 6/6 | | |
| 3. dana | 0.13 | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.14 | 0.14 | 0.13 | 0.007 |
| 5. dana | 0.12 | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.11 | 0.006 |
| 8. dana | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.11 | 0.13 | 0.11 | 0.11 | 0.009 |

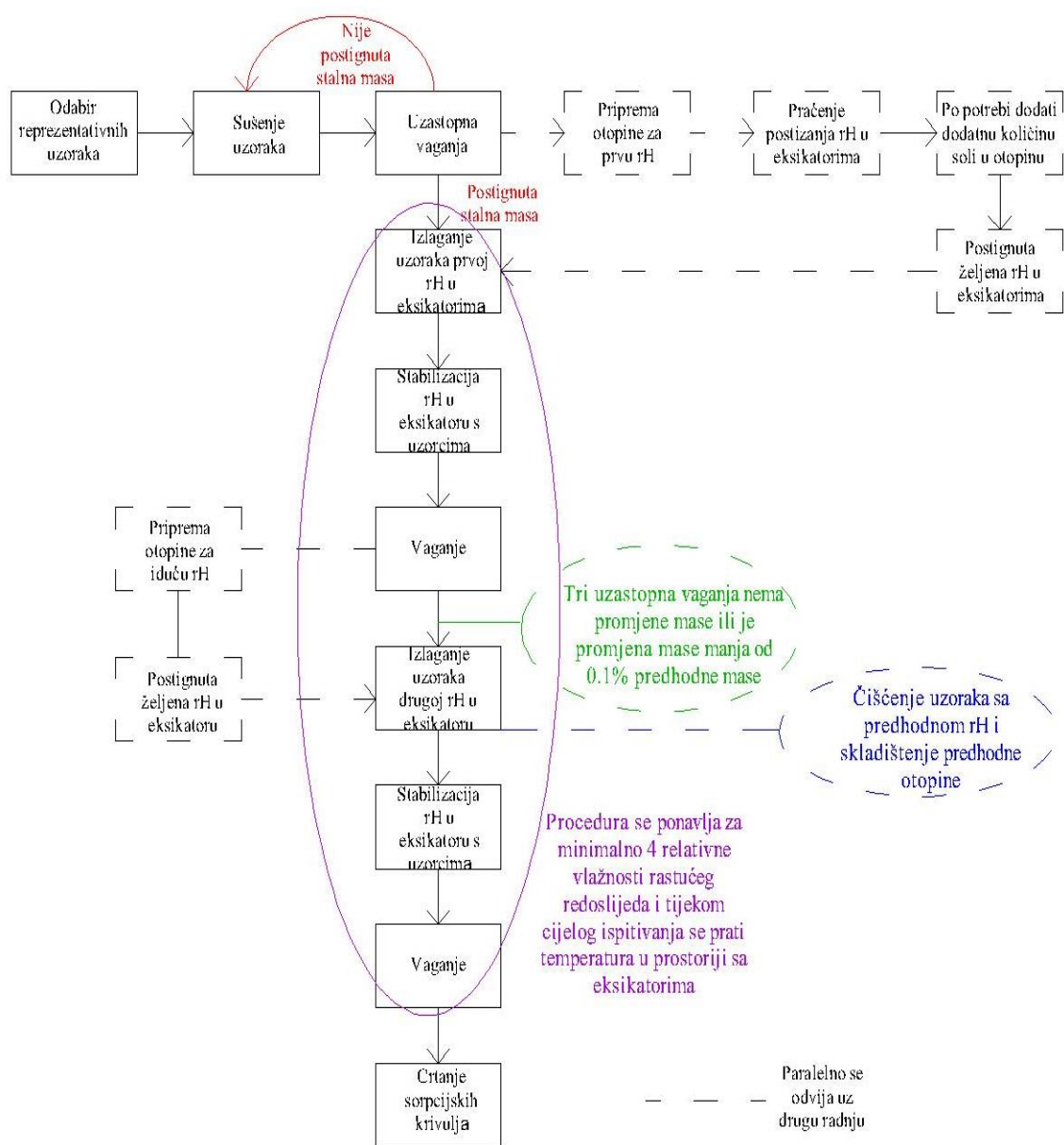
U Tablici 17. prikazana je srednja vrijednost i standardna devijacija promjene mase uzoraka od betona s recikliranim opekom kao agregatom nakon izlaganja rH 33%.

Tablica 17. Razlike u promjeni mase uzoraka nakon izlaganja rH 33%

| Promjena mase nakon | Promjena mase uzoraka nakon izlaganja rH 33% [g] | | | | | | Srednja vrijednost | Standardna devijacija |
|---------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
| | MA-009-1-vanj 1/6 | MA-009-1-vanj 2/6 | MA-009-1-vanj 3/6 | MA-009-1-vanj 4/6 | MA-009-1-vanj 5/6 | MA-009-1-vanj 6/6 | | |
| 3. dana | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.13 | 0.12 | 0.005 |
| 5. dana | 0.11 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.10 | 0.09 | 0.09 | 0.009 |
| 8. dana | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.09 | 0.10 | 0.12 | 0.10 | 0.010 |

9.1 Dijagram toka eksperimentalnog rada

Doprinos ovog istraživanja očituje se u postavljenoj metodologiji ispitivanja za dobivanje parametara sorpcijskih izoterma betona s recikliranim agregatom prema normi HRN EN ISO 12571. Kao što je već navedeno u prethodnim poglavljima norma daje okvirnu strukturu i upute za izvođenje ispitivanja, zbog toga je na Slici 36. prikazan detaljan postupak eksperimentalnog ispitivanja metode s eksikatorom te kao takav može se koristiti kao smjernica za iduća ispitivanja prema navedenoj normi



Slika 36. Dijagram toka eksperimentalnog ispitivanja

10. ZAKLJUČAK

Održivi razvoj i očuvanje prirodnih resursa postale su ključne odlike modernog društva. Jedna od strategija Europa 2020. odnosi se na kružno gospodarstvo, tj. na "zadržavanje" proizvoda što je duže moguće u životnom ciklusu i izbjegavanju stvaranja otpada. Prioritet za daljnja znanstvena istraživanja su građevni proizvodi izrađeni od recikliranog građevinskog otpada, kao što je primjerice beton s recikliranim agregatom, koji mogu doprinijeti ostvarenju ciljeva održivog razvoja. Kako bi se omogućila šira primjena betona s recikliranim agregatom u praksi te dobio uvid u stvarno ponašanje vanjskih ovojnica zgrada izvedenih od takvog betona, potrebno je utvrditi higrotermalne karakteristike betona s recikliranim agregatom.

Temeljem provedenih vlastitih laboratorijskih ispitivanja zaključeno je:

- Norma HRN EN ISO 12571 daje samo okvirne smjernice za postupak ispitivanja sorpcijskih izoterma i pojedini koraci ispitivanja nisu konkretno ili su nedovoljno detaljno definirani.
- Zbog dugotrajnog procesa sušenja betonskih uzoraka potvrđena je činjenica da je beton trom materijal te sukladno tomu treba imati na umu da je postupak dobivanja sorpcijskih izoterma također vremenski zahtjevno ispitivanje.
- Norma preporučuje pojedine vrste i količine soli za postizanje određenih relativnih vlažnosti, no prilikom ovog ispitivanja utvrđeno je da propisane količine pojedinih soli nužno ne ispunjavaju zadane uvjete relativne vlažnosti.
- Prilikom pripremanja otopina preporuča se postupno dodavati dodatne količine soli, u odnosu na propisanu količinu, do stanja (pre)zasićene otopine kako bi se postigao red veličine zahtijevane relativne vlažnosti unutar eksikatora.
- Intenzivne reakcije pojedinih otopina zahtijevaju korištenje prikladne zaštite za oči, kožu i dišne puteve te izvođenje pripreme otopine nije preporučljivo provoditi u zatvorenom prostoru.
- Vađenjem uzoraka iz eksikatora za potrebe vaganja, nakon otvaranja poklopca relativna vlažnost unutar eksikatora se naruši. Zbog navedenog problema uzorci su se vagali u minimalnim razmacima od 48 sati kako bi se omogućilo ponovno stabiliziranje i uspostava odabrane relativne vlažnosti unutar eksikatora nakon stavljanja poklopca pri završetku vaganja uzoraka.

- Pri završetku ispitivanja zbog kemijskih svojstava korištenih otopina, preporuča se njihovo odlaganje u za to propisanim spremnicima.
- Betonu s agregatom od recikliranog betona potrebno više vremena za sušenje nego betonu s agregatom od reciklirane opeke, ali je vrijeme za uspostavu konstantne mase uzoraka prilikom izlaganja istim različitim vlažnostima jednako.
- Usporedbom sorpcijskih krivulja dobivenih izlaganjem betonskih uzoraka različitim vlažnostima te paralelnim vaganjem istih možemo zaključiti da su obje vrste betonskih uzoraka postizale konstantnu masu mijenjajući je za isti red veličine prilikom svakog vaganja. Potrebno je tokom cijelog postupka ispitivanja uspostaviti sustav kontinuiranog praćenja stanja relativne vlažnosti u eksikatoru s ispitnim uzorcima putem daljinskog očitavanja. Također, potrebno je osigurati uvjete potrebne temperature u prostoriji sa eksikatorima koju je potrebno jednako tako kontinuirano pratiti termohigrometrima.

Treba imati na umu da za eksperimentalna istraživanja koja se provode po prvi put uvijek postoji rizik istraživanja a on se može okarakterizirati kao splet nepredviđenih okolnosti i potencijalni zastoji ispitivanja zbog nedovoljno definiranih kriterija. Potrebno je utvrditi metodologiju rada kako bi se pri daljnjim ispitivanjima izbjegle nepredviđene okolnosti. Za uspostavu sorpcijskih izoterma metodom u eksikatoru preporuča se priprema otopine vlažnosti višeg reda veličine dok paralelno traje uspostava konstante mase uzoraka na relativnoj vlažnosti nižeg reda veličine.

U sklopu ovoga rada su eksperimentalno zadobivene vrijednosti sorpcije betona s recikliranim agregatom za prve dvije relativne vlažnosti. To su prvi takvi rezultati za beton s recikliranim agregatom u svijetu. Predstavljeno ispitivanje se nastavlja provoditi i nakon ovog rada, sve dok se ne uspostave sve odabrane relativne vlažnosti i ne zadobiju sve vrijednosti potrebne za iscrtavanje sorpcijskih izoterma.

Okarakterizirano sorpcijsko ponašanje betona s recikliranim agregatom će omogućiti provođenje numeričkih HAM proračuna higrotermalnog ponašanja vanjskih ovojnica zgrada izvedenih od takvih betona.

11. ZAHVALE

Zahvaljujemo se Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta u Zagrebu koji nam je omogućio izradu ovog rada.

Posebno se želimo zahvaliti svojoj mentorici prof. dr. sc. Ivana Banjad Pečur koja nas je usmjeravala svojim savjetima te laborantima Zvezdani Matuzići i Miri Matuziću koji su nam nesebično pomagali tijekom laboratorijskih ispitivanja i uvijek bili na raspolaganju.

Neizmerno hvala neposrednoj voditeljici Marini Alagušić, mag. ing. aedif. na strpljenju, idejama i konstruktivnim kritikama te na pruženom znanju i iskustvu.

Hvala našim bližnjima na neizmornoj podršci.

LITERATURA

- [1] Jurić, E., Svojstva betona sa recikliranim betonskim agregatom, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet 2014.
- [2] Štirmer, N., Bjegović, D., Gospodarenje građevinskim otpadom i mogućnosti upotrebe građevinskog otpada, 6. Hrvatski forum o održivoj gradnji, Zagreb, 2012.
- [3] Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Primjena recikliranog agregata u betonu – iskustva u Hrvatskoj, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2012.
- [4] Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Milovanović, B., Sustav ECO–SANDWICH – održivi predgotovljeni zidni panelni sustav od recikliranog agregata, Zagreb; 2012.
- [5] Preuzeto 2016. godine sa:<http://www.eco-sandwich.hr/hr/>
- [6] Milovanović, B., Prezentacije s vježbi kolegija Građevinska fizika, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ak god 2015/2016.
- [7] Bjegović, D., Štirmer, N., Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [8] Šimetin, V., Građevinska fizika, Građevinski institut-Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 1983.
- [9] Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 1379
- [10] Člank 26. stavka 1. Zakona o zaštiti od požara («Narodne novine» br. 92/10)
- [11] Bevanda, I., Šaravanja, K; Reciklirani beton, Zbornik radova Skupa „Dani betona 2005“, Sarajevo, II. 2005.
- [12] Štirmer, N., Utjecaj građevnog materijala na okoliš, Radovi Zavoda za znanstveni i umjetnički rad u Požegi, str. 293-311, Požega, 2012.
- [13] Divlje odlagalište u Umagu izmaklo kontroli, objavljeno 12.10.2011; preuzeto sa <http://ipress.rtl.hr/>, 2016.
- [14] Europska komisija Bruxelles, 2.7.2014. izravno dostavljeni dokumenti Europske unije komunikacija komisije Europskom parlamentu, vijeću, Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i odboru regija - program rada komisije za 2015
- [15] Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2007. – 2015. godine, Narodne novine, 85/07, 126/10, 31/11.
- [16] Pastuović, B., Utjecaj sitne frakcije recikliranog agregata na svojstva morta, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2014.
- [17] Pavlinić, A., Procjena mogućnosti uporabe recikliranog agregata u betonu, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2013.

- [18] Venier, R., Utjecaj agregata od reciklirane opeke na svojstva betona, diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2014.
- [19] Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Milovanović, B., Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings, Magazine of concrete research, br. 67, str. 575-58, 2014.
- [20] Milovanović B., Eco-sandwich sustav pregotovljenih fasadnih elemenata od recikliranog agregata za novogradnju i obnovu do "faktora 10", Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2014.
- [21] Preuzeto 2016. godine sa: <http://energy.gov/energysaver/moisture-control>
- [22] Gosele, K., Schule, W., Zvuk, toplota, vlaga; Biblioteka Neimar, Beograd, 1979.
- [23] Separate sa vježbi iz kolegija Poznavanje materijala, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, ak god 2015/2016
- [24] Zakon o gradnji NN 153/13
- [25] Künzel, M.H., Holm, H.A., Moisture Control and Problem Analysis of Heritage Constructions, PATORREB, Porto, str. 85- 102, 2009.
- [26] Künzel; M.H., Moisture risk assessment of roof constructions by computer simulation in comparison to the standard Glaser method, International Building Physics Conference, Eindhoven., 2000.,
- [27] Banjad Pečur, I., Alagušić, M., Analiza higrotermalnog ponašanja ovojnice zgrade od recikliranih betonskih elemenata, Simpozij doktorskog studija građevinarstva, , Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2015.
- [28] Straube, J., Burnett, E., Review of Modeling Methods for Building Enclosure Design, University of Waterloo
- [29] Hansen, K.K., SORPTION ISOTHERMS; Building Materials Laboratory; Tehnical University of Denmark, Tehnical report 162/86
- [30] DATAsheet, Moisture in Concrete and Moisture-sensitive Finishes and Coating, APR, 2007.
- [31] HRN EN ISO 12571 Značajke građevnih materijala i proizvoda s obzirom na toplinu i vlagu -- Određivanje svojstava higroskopske sorpcije (ISO 12571:2013; EN ISO 12571:2013)
- [32] Künzel, M.H., Holm, H.A., Krus, M., Hygrothermal Properties and Behaviour of Concrete, WTA-Almanach, str. 161-181; Holzkirchen, Germany, 2008.
- [33] NORMA: HRN EN ISO 12571 [Značajke građevnih materijala i proizvoda s obzirom na toplinu i vlagu – Određivanje svojstva higroskopske sorpcije(ISO 12571:2013, EN ISO 12571:2013)]

[34] Poyet, S., Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete, *Cement and Concrete Research*, br.39, str. 1052–1059, 2009.

[35] Hedenbald, G., *Drying of Construction Water in Concrete*, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden, 1997.

[36] Feng C., Janssen, H., Wu, C., Feng, Y., Meng, Q., Validating various measures to accelerate the static gravimetric sorption isotherm determination, 2013.

Popis normi:

HRN EN 933-11:2009; Ispitivanja geometrijskih svojstava agregata - 11. dio: Određivanje sastojaka krupnoga recikliranog agregata (EN 933-11:2009+AC:2009)

HRN EN 13242:2013; Agregati za nevezane i hidraulički vezane materijale za uporabu u građevinarstvu i cestogradnji (EN 13242:2013)

HRN EN ISO 12571; Značajke građevnih materijala i proizvoda s obzirom na toplinu i vlagu – Određivanje svojstva higroskopske sorpcije (ISO 12571:2013, EN ISO 12571:2013)]

HRN EN ISO 1379 Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema

HRN EN ISO 12571 Značajke građevnih materijala i proizvoda s obzirom na toplinu i vlagu -
- Određivanje svojstava higroskopske sorpcije (ISO 12571:2013; EN ISO 12571:2013)

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 1 Metodologija i plan istraživanja područja..... | 8 |
| Slika 2. Prosječna struktura otpada nakon rušenja građevine [11]..... | 9 |
| Slika 3. Divlje odlagalište u Umagu[14]..... | 10 |
| Slika 4. Životni ciklus građevnog proizvoda [6]..... | 11 |
| Slika 5. Izgled agregata: a) reciklirani agregat b) prirodni drobljeni agregat [5]..... | 13 |
| Slika 6. Zona sučeljka u recikliranom agregatu [16]..... | 14 |
| Slika 7. Zona sučeljka u betonskoj mješavini [16]..... | 14 |
| Slika 8. Zona sučeljka u recikliranom agregatu: a) mikroskopski snimak neobrađenog uzorka; b) mikroskopski snimak kontrastiranog uzorka za ispitivanje Rapid Air | 15 |
| Slika 9. Lijevo: reciklirana opeka; Desno: reciklirani beton [5] | 16 |
| Slika 10. Shematski prikaz metode miješanja betona [7]..... | 18 |
| Slika 11. Ventilirani ECO-SANDWICH® panel s pripadnim slojevima [5]..... | 20 |
| Slika 12 Građevinske štete na zidovima zbog djelovanja vlage:a) ljuštenje završnog sloja zida; b) pojava plijesni i gljivica na zidu[21]..... | 23 |
| Slika 13. Mehanizmi prijenosa vlage u materijalu [23] | 24 |
| Slika 14. Građevinske štete na zidovima zbog djelovanja vlage:a) otpadanje žbuke [22]; b) kristalno cvjetanje na zidu [22] | 25 |
| Slika 15. Ovisnost toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke [8] | 28 |
| Slika 16. Dijagram toka za provođenje dinamičkih higrotermalnih simulacija ovojnice zgrade [27] | 31 |
| Slika 17. Krivulje adsorpcije i desorpcije [29]..... | 33 |
| Slika 18. Sorpcijske krivulje za različite materijale [30] | 34 |
| Slika 19. Aparatura prema HRN EN ISO 12571 [33]..... | 39 |
| Slika 20. Dimenzije eksikatora korištenog pri ispitivanju | 39 |
| Slika 21. Sušionik s uzorcima recikliranog betona | 41 |
| Slika 22. Vaganje uzoraka :a)uzorak recikliranog betona; b)uzorak reciklirane opeke..... | 42 |
| Slika 23. Eksikator i tijekom vaganja uzoraka:a) postavljanje prozirne folije preko posude eksikatora; b)uzorci unutar eksikatora zaštićeni prozирnom folijom tijekom vaganja | 43 |
| Slika 24 Vanjski termohigrometar s transmitemom unutar eksikatora..... | 44 |
| Slika 25. Zapis iz termohigrometra | 44 |
| Slika 26. Prikaz KOH soli: a) u krutom stanju – forma listića; b) istaložena KOH sol..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Slika 27. Eksikatori za vrijeme postizanja relativne vlažnosti; Lijevo: uzorci betona s recikliranim betonom; Desno: uzorci betona s recikliranom opekom | 47 |
| Slika 28. MgCl ₂ x 6H ₂ O sol: a) miješanje otopine; b) otopina i mjerenje stanja vlažnosti unutar eksikatora | 48 |
| Slika 29. Prikaz NaBrsoli: a) sol u krutom stanju – praškasta forma; b) prikaz kristalizirane soli na površini otopine | 49 |
| Slika 30. Sušenje uzoraka unutarnjeg sloja betona | 52 |
| Slika 31. Sušenje uzoraka vanjskog sloja betona | 53 |
| Slika 32. Sorpcijske izoterme unutarnjeg sloja betona..... | 55 |
| Slika 33. Sorpcijske izoterme vanjskog sloja betona | 56 |
| Slika 34. Sorpcijske izoterme unutarnjeg sloja betona..... | 57 |
| Slika 35. Sorpcijske izoterme vanjskog sloja betona | 58 |
| Slika 36. Dijagram toka eksperimentalnog ispitivanja..... | 62 |

Popis tablica

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Prednosti i nedostaci obrade građevinskog otpada prema mjestu izvođenja [3].... | 12 |
| Tablica 2. Higrotermalna svojstva običnog betona [6] | 36 |
| Tablica 3. Rezultati ispitivanja betona s recikliranim agregatom [3]..... | 37 |
| Tablica 4. Poremećaj relativne vlažnosti prilikom vaganja | 43 |
| Tablica 5. Količine odabranih soli za postizanje odabrane vlažnosti prema normi HRN EN ISO 12571 [33]..... | 45 |
| Tablica 6. Količine soli korištene prilikom ispitivanja | 50 |
| Tablica 7. Odstupanje propisanih od korištenih količina soli | 50 |
| Tablica 8. Sušenje uzoraka unutarnjeg sloja betona..... | 53 |
| Tablica 9. Sušenje uzoraka vanjskog sloja betona | 54 |
| Tablica 10. Promjena mase unutarnjeg sloja betona u okolišu rH 11%..... | 55 |
| Tablica 11. Promjena mase vanjskog sloja betona u okolišu rH 11% | 56 |
| Tablica 12. Promjena mase unutarnjeg sloja betona u okolišu rH 33%..... | 57 |
| Tablica 13. Promjena mase vanjskog sloja betona u okolišu rH 33% | 58 |
| Tablica 14. Razlike u promjeni mase uzoraka nakon izlaganja rH 11% | 59 |
| Tablica 15. Razlike u promjeni mase uzoraka nakon izlaganja rH 11% | 60 |
| Tablica 16. Razlike u promjeni mase uzoraka nakon izlaganja rH 33% | 60 |
| Tablica 17. Razlike u promjeni mase uzoraka nakon izlaganja rH 33% | 61 |

SAŽETAK

Matea Baričević, Paula Topić

Eksperimentalno određivanje parametara modela dinamičkog higrotermalnog ponašanja betona s recikliranim agregatom

Građevinski sektor suočava se s izazovima 21. stoljeća: nesigurnost u opskrbi energijom kao posljedica neracionalne potrošnje energije te osiromašenje prirodnih izvora sirovina. Zgradarstvo je identificirano kao jedan od najvećih potrošača energije, a cjelokupan sektor građevinarstva kao jedan od najvećih generatora otpada. Ponovnim iskorištavanjem građevinskog otpada, on bi zadobio dodanu vrijednost, produžio svoj životni vijek i potencijalno otvorio nova radna mjesta te osigurao komponentu održivosti građevinskog sektora. Jedan od načina iskorištavanja građevinskog otpada je njegovo recikliranje i upotreba kao agregata za proizvodnju betona.

Kroz suradnju hrvatskih znanstvenih institucija i industrije proveden je niz znanstvenih istraživanja koja su rezultirala razvojem novog građevinskog proizvoda. ECO-SANDWICH[®] je inovativni predgotovljeni ventilirani fasadni panel izrađen od dvije različite vrste betona s recikliranim agregatom. Kao reciklirani agregat korištena je reciklirana opeka i reciklirani beton. Međutim, stvarno ponašanje takvih panela glede prolaska topline, zraka i vlage, tzv. higrotermalno ponašanje, u uvjetima korištenja je nepoznato. Osobito kod zgrada niske potrošnje energije neophodno je utvrditi njihovo higrotermalno ponašanje.

Glavni parametar koji opisuje transport vlage kroz materijal je sorpcijska krivulja te je ona neophodni ulazni parametar za uspostavu numeričkog modela dinamičkog higrotermalnog ponašanja betona s recikliranim agregatom. Sorpcijske krivulje za betone s recikliranim agregatom nisu do sada izučavane. U sklopu ovoga rada uspostavljen je cjelokupni sustav ispitivanja sorpcijskih izoterma te prikazani početni rezultati ispitivanja.

KLJUČNE RIJEČI: sorpcijske izoterme, relativna vlažnost, reciklirani agregat, građevinski otpad, higrotermalno ponašanje

SUMMARY

Matea Baričević, Paula Topić

Experimental determination of parameters of a model of the dynamic hygrothermal behavior of recycled aggregate concrete

The construction industry is facing challenges of the 21st century: the uncertainty of energy supplies as a result of irrational energy consumption and the depletion of natural resources. Building construction has been identified as one of the largest energy consumers and the entire construction industry as one of the largest waste generators. By reusing construction waste, we add a new value to it and prolong its lifespan. In that process new jobs could be created and the sustainability component of the construction industry could also be ensured. One of the ways of using construction waste is recycling it and using it as an aggregate in concrete production.

Through the cooperation of Croatian scientific institutions and industry numerous scientific studies have been conducted and they have resulted in development of new construction products. ECO-SANDWICH[®] is an innovative prefabricated ventilated wall panel made of two different types of recycled aggregate concrete. Recycled bricks and recycled concrete are used as recycled aggregate. However, the actual behavior of such panels regarding the passage of heat, air and moisture, the so-called hygrothermal behavior, is unknown in terms of actual use. It is particularly important to determine hygrothermal behavior of buildings with low energy consumption.

The main parameter that describes moisture transport through material is the sorption curve, which is the essential input parameter for establishing a numerical model of the dynamic hygrothermal behavior of recycled aggregate concrete. Sorption isotherms for recycled aggregate concrete have not been studied. This paper provides established, overall system testing of sorption isotherms and presents the initial results of tests.

KEY WORDS: sorption isotherms, relative humidity, recycled aggregate, construction waste, hygrothermal behavior