

Održiv i energetski učinkovit fasadni panel ECO-SANDWICH® – od razvoja do primjene

Ivana Banjad Pečur, Bojan Milovanović, Dubravka Bjegović¹, Nina Štirmer,
Marina Bagarić, Ivana Carević

¹ članica emerita HATZ-a u Odjelu građevinarstva i geodezije

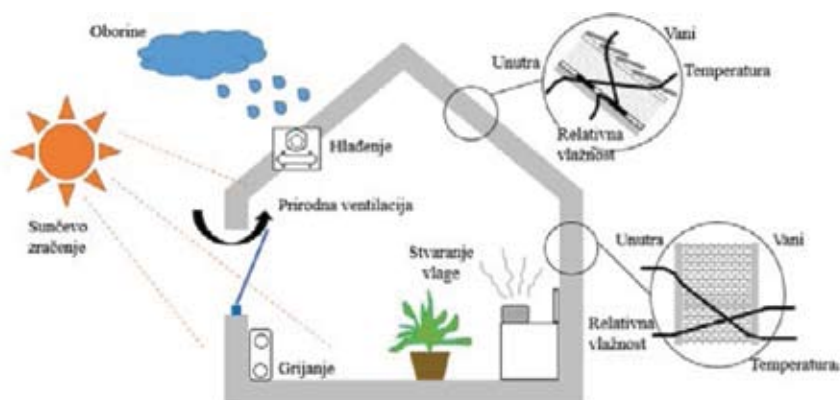
Sažetak: *Vrlo niska potrošnja energije, smanjeni utjecaj na okoliš uz povećano recikliranje i ponovnu uporabu građevnog otpada (CDW) postali su ključni strateški ciljevi razvoja Europe. U zemljama članicama Europske unije godišnje se proizvede 180 milijuna tona CDW-a. Potencijalno rješenje problema je u uporabi CDW-a kao novog građevinskog materijala. Kroz suradnju hrvatskih znanstvenih institucija i industrije razvijen je predgotovljeni fasadni sustav ECO-SANDWICH®. Specifičnost novorazvijenog fasadnog sustava leži u korištenju CDW-a za proizvodnju betonskih slojeva i ventiliranom sloju zraka koji nije uobičajen kod klasičnih betonskih sendvič panela. U radu je prikazana metodologija razvoja inovativnih fasadnih panela: od laboratorijskih ispitivanja dvije vrste betona s recikliranim agregatom na razini materijala, preko prve primjene razvijenog fasadnog panela te na koncu do terenskog monitoringa higrotermalnog ponašanja ovojnice obiteljske kuće u realnim uvjetima okoliša i korištenja.*

Ključne riječi: *Beton s recikliranim agregatom, Građevni otpad, Ventilirana fasada, Higrotermalno ponašanje, Zgrada gotovo nulte energije*

1. Uvod

Suvremeno građevinarstvo prolazi kroz značajnu promjenu dosadašnjih ustaljenih načela, što se naročito ogleda u sektoru zgradarstva kroz sve strože energetske i okolišne zahtjeve za zgrade. U Europi je danas oko 40 % potrošnje energije i 50 % iskorištenja prirodnih sirovina povezano uz sektor građevinarstva, koji ujedno proizvodi između 30 – 50 % sveukupnog europskog otpada [1]. (Samo)održivost, energetska i okolišna, postaje strateški prioritet političkih i industrijskih djelovanja. Europska unija kroz svoju *Direktivu o energetskim svojstvima zgrada* [2–3], *Direktivu o promicanju*

uporabe energije iz obnovljivih izvora [4,5] te inicijativu za dekarbonizaciju sektora zgradarstva do 2050. godine [6] potiče, odnosno zahtijeva promjenu tradicionalnih principa projektiranja zgrada. Promjena ustaljenih načela moguća je jedino ako se zgradu promatra kao dinamički sustav koji je u konstantnoj interakciji s vanjskim okolišem, a sve s ciljem osiguranja visoke razine ugodnosti i zdrave unutarnje klime za korisnike zgrada. Također, promjena ustaljenih načela zahtijeva promišljanje o utjecaju zgrade na okoliš i njezinim operativnim troškovima tijekom cijelog životnog ciklusa, s posebnim naglaskom na trajnost građevinskih materijala, elemenata vanjske ovojnice zgrade, termotehničkih sustava i same zgrade kao cjeline [7]. Interakcija zgrade s vanjskim okolišem i unutarnjim okolišem odvija se preko vanjske ovojnice koja je, kao aktivni sudionik u procesima prolaska topline, zraka i vlage (higrotermalno ponašanje), direktno izložena opterećenjima iz okoliša te stoga mora biti dovoljno robusna, ali istovremeno i dovoljno prilagodljiva promjenama, Slika 1.



Slika 1: Interakcija elemenata ovojnice zgrade s vanjskim i unutarnjim okolišem [8]

Kada se promatra vanjska ovojnica zgrada, 75 – 90 % svih građevinskih šteta uzrokovano je vlagom, što dodatno ukazuje na nužnost pravovremenog predviđanja i osiguranja optimalnog dinamičkog higrotermalnog ponašanja ovojnice, i to osobito u slučaju novih sustava ovojnice.

Europa snažno podupire smanjenje stvaranja otpada te njegovu ponovnu uporabu i recikliranje u sustavu zatvorene petlje, što je jedan od temelja cirkularne ekonomije [9]. Što se tiče građevnog otpada, *Okvirnom direktivom o otpadu* [10] zemljama članicama Europske Unije postavljeno je kao cilj priprema 70 % otpada za ponovnu uporabu, recikliranje i drugu uporabu. Građevinski sektor u Europi odgovoran je za 200 do 300 milijuna tona građevnog otpada godišnje [11, 12], što ga čini dominantnom vrstom otpada u Europi. Ta znatna količina otpada nastaje tijekom procesa proizvodnje građevinskih materijala i proizvoda, tijekom procesa gradnje, održavanja i obnove zgrada, kao i tijekom njihovog rušenja, Slika 2.



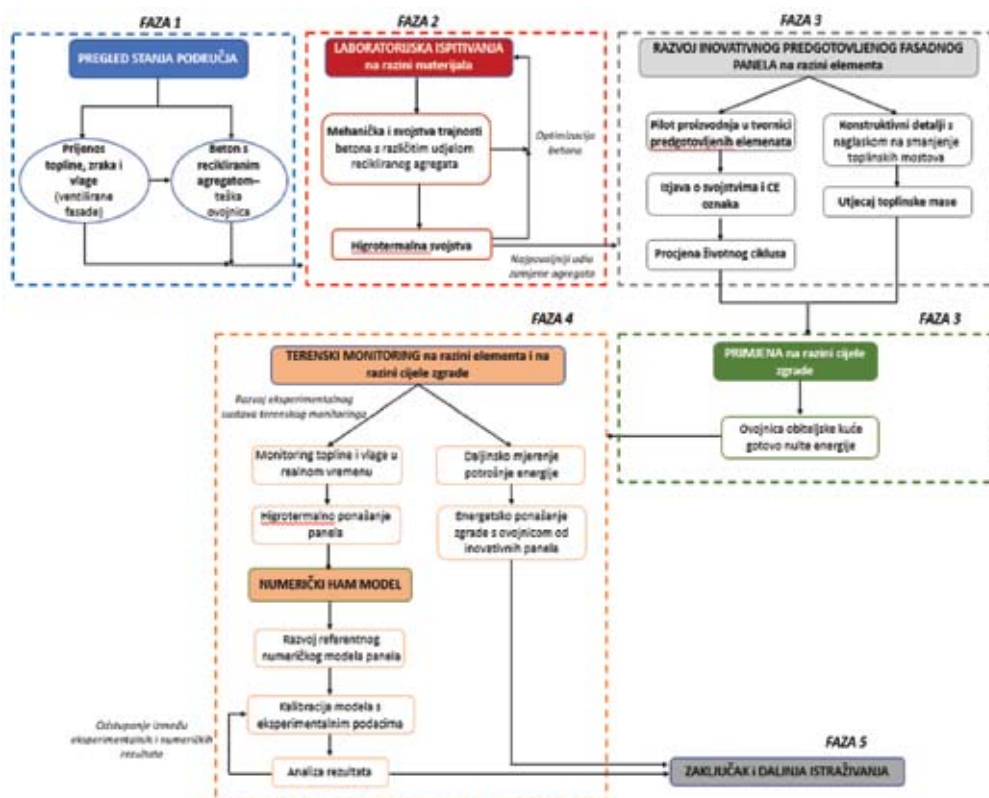
Slika 2: Građevni otpad

Recikliranjem građevnog otpada i njegovim korištenjem za proizvodnju novog građevnog proizvoda, otpad postaje sirovina čime dobiva novu dodatnu vrijednost i ostaje u životnom ciklusu, odnosno zatvara se petlja. Jedna od mogućnosti je korištenje recikliranog građevnog otpada kao agregata za proizvodnju novog betona. Unatoč činjenici da je potencijal korištenja recikliranog agregata intenzivno istraživano te postoje određene preporuke i norme za korištenje recikliranog agregata [13-15], promjenjiva i neujednačena kvaliteta recikliranog agregata te općenito slabija svojstva betona s takvim agregatom, kao i nedostatak prikladnije regulative, naročite one koja bi omogućila projektiranje na osnovi svojstava, sprječavaju njegovu veću upotrebu u industriji betona [16]. Samo u Europi, proizvede se više od 750 milijuna m³ betona godišnje, što čini približno 4 tone betona po glavi stanovnika [17] te taj broj raste iz godine u godinu s razvojem građevinskog sektora. Imajući na umu da agregat čini 60 – 80 % volumena betona, odnosno 70 – 85 % njegove mase, jasno je da postoji izniman potencijal za primjenu građevnog otpada u betonu. U tom pogledu, građevine izgrađene od betona s recikliranim agregatom mogu se smatrati bankama materijala, odnosno bankama otpada.

Prateći svjetske trendove i s ciljem ispunjenja obveza koje su postavljene sektoru zgradarstva za smanjenje potrošnje energije te cijelom sektoru građevinarstva za ostvarenje visoke razine recikliranja građevnog otpada, na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu razvijen je inovativni fasadni sustav vanjske ovojnice od predgotovljenog ventiliranog sendvič panela [18]. Razvoj i optimizacija panela rezultat je suradnje hrvatskih znanstvenih institucija i industrijskih partnera kroz projekt „*ECO-SANDWICH® - Energy Efficient, Recycled Concrete Sandwich Facade Panel*“ financiran europskim sredstvima iz programa CIP ECO-Innovation [18, 19]. Inovacija panela leži u primjeni velikog postotka recikliranog građevnog otpada kao agregata za proizvodnju betonskih slojeva te u zračnom sloju s prirodno provjetravanim zrakom.

2. Metodologija istraživanja

Znanstvena istraživanja predvodili su Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu te su ona zahvaljujući suradnji s proizvođačem toplinske izolacije tvrtkom Knauf Insulation d.o.o. i proizvođačem predgotovljenih elemenata tvrtkom Beton Lučko d.o.o. i praktično primijenjena u praksi. Metodologija istraživanja grafički je prikazana na Slici 3, a pojedine faze detaljnije su opisane u nastavku rada.



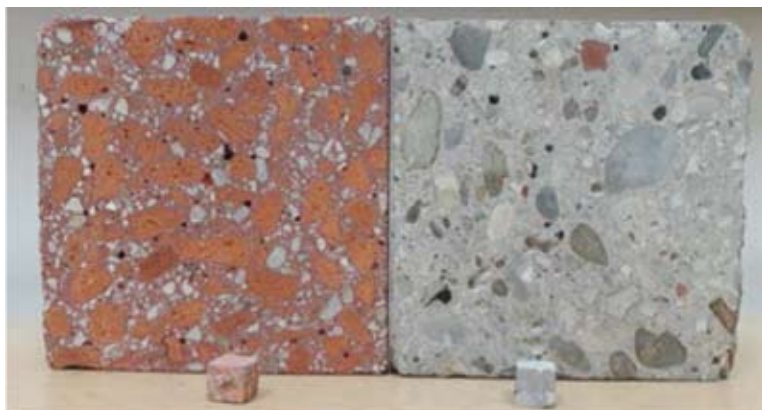
Slika 3: Grafički prikaz metodologije istraživanja

3. Razvoj inovativnog predgotovljenog fasadnog panela

Razvoj inovativnog predgotovljenog fasadnog panela ECO-SANDWICH® zahtijevao je optimizaciju betona s recikliranim agregatom (razina materijala) te određivanje slojeva panela i ispitivanja na razini elementa, kako bi se kao novi građevni proizvod mogao plasirati na tržište.

3.1 Optimizacija betona – razina materijala

Istraživanje na razini materijala bilo je usmjereno na dvije različite vrste betona s recikliranim agregatom – jedna s agregatom od starog recikliranog betona, a druga s recikliranom opekom (Slika 4). Optimizacija betonskih mješavina provedena je varirajući postotak zamjene krupnog prirodnog agregata recikliranim (40 %, 50 %, 60 %). Za obje vrste betona postotak zamjene od 50 % pokazao se kao optimalan u pogledu mehaničkih svojstava i svojstava trajnosti [20].



Slika 4: Beton s recikliranim agregatom: lijevo – reciklirani agregat od drobljene opeke, desno – reciklirani agregat od starog drobljenog betona

Tablica 1 prikazuje neka od osnovnih mehaničkih svojstava, svojstava trajnosti i higrotermalnih svojstava ispitanih betona. Na osnovi rezultata ispitivanja, obje vrste betona mogu se svrstati u razred tlačne čvrstoće C 30/37. Općenito, beton s recikliranom opekom ima manju tlačnu čvrstoću u odnosu na beton čiji je reciklirani agregat stari drobljeni beton. Oba betona zadovoljavaju zahtjeve za razred izloženosti okolišu XF4 (56 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja sa solima za odmrzavanje). U usporedbi s običnim betonom izrađenim od prirodnog agregata (gustoće približno 2400 kg/m^3), betoni s recikliranim agregatom su manje gustoće, ali zadržavaju dobra mehanička svojstva i svojstva trajnosti. Ako ne postoje posebni zahtjevi i ne očekuju se znatna opterećenja, tada je za većinu primjena prikladan razred tlačne čvrstoće C 30/37. Što se tiče toplinskih svojstava, beton s agregatom od recikliranog starog betona i beton s recikliranom opekom imaju 13 – 27 % i 29 – 40 % manju toplinsku provodljivost od literaturnih vrijednosti za suhi beton s približno istom gustoćom. Koeficijent difuzije vodene pare za ove je betone 38 do 70 % manji od literaturnih vrijednosti za sličan vlažni beton [20]. Ovi rezultati upućuju da reciklirani agregati imaju pozitivan utjecaj na higrotermalna svojstva betona, i to na način da poboljšavaju toplinsko ponašanje te doprinose difuzno otvorenijem ponašanju betona.

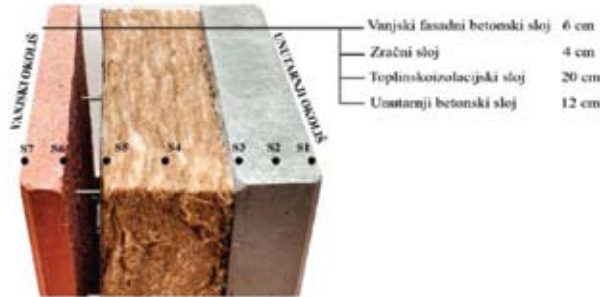
Tablica 1: Osnovna mehanička svojstva, svojstva trajnosti i higrotermalna svojstva betona s recikliranim agregatom

Udio recikliranog agregata	40 %		50 %		60 %	
	Opeka	Beton	Opeka	Beton	Opeka	Beton
Volumenska masa u suhom stanju [kg/m ³]	1912,7	2064,6	1971,0	2105,0	2099,7	2243,3
Tlačna čvrstoća, 1 dan [MPa]	10,8	15,8	16,9	23,4	5,9	18,5
Tlačna čvrstoća, 28 dana [MPa]	44,3	44,3	39,7	51,2	40,7	42,8
Vlačna čvrstoća savijanjem, 28 dana [MPa]	5,8	5,8	5,9	6,4	5,2	5,4
Modul elastičnosti, 28 dana [GPa]	21,3	27,4	18,2	33,8	15,6	27,9
Srednja toplinska vodljivost pri +10°C u suhom stanju [W/(mK)]	0,703	0,867	0,746	0,858	/*	/*
Faktor otpora difuziji vodene pare [-]	18	26	29	37	/*	/*
Smrzavanje i odmrzavanje s prisustvom soli za odmrzavanje	XF4	XF4	XF4	XF4	XF4	XF4
Kapilarno upijanje [kg/(m ² h ^{0,5})]	1,3	1,3	0,9	1,0	0,60	0,8

*nije ispitano

3.2 Razvoj panela – razina elementa

Iako su postignuta iznimno zadovoljavajuća mehanička svojstva, svojstva trajnosti i higrotermalna svojstva betona s velikim udjelom zamjene krupnog prirodnog agregata recikliranim (50 %), cilj je bio razviti robustan fasadni sustav čije sveukupno ponašanje neće biti ugroženo materijalnim karakteristikama betona s recikliranim agregatom. Iz navedenog, razvoj panela usmjerio se na samonosivi sustav, dakle sustav koji nema ulogu aktivnog nosivog konstruktivnog elementa, i predgotovljenu montažnu gradnju. Predgotovljena montažna gradnja je tehnologija proizvodnje u kojoj se građevinski elementi proizvode u tvornici u kontroliranim uvjetima, što poboljšava njihovu kvalitetu. Nakon proizvodnje, građevinski elementi se prevoze do gradilišta i ugrađuju u nosivu konstrukciju. U usporedbi s monolitnom gradnjom, predgotovljena gradnja ubrzava cijeli proces gradnje, smanjuje potrebnu radnu snagu na gradilištu te smanjuje sveukupni trošak gradnje. Predmetni inovativni ventilirani fasadni panel sastoji se od dva predgotovljena betonska sloja međusobno povezana nehrđajućim čeličnim nosačima (Slika 5).



Slika 5: Inovativni predgotovljeni fasadni panel s prikazom slojeva

Za unutarnji (samo)nosivi betonski sloj panela je kao reciklirani agregat korišten drobljeni beton, dok je za vanjski fasadni betonski sloj korištena reciklirana opeka. Toplinska izolacija proizvedena je od recikliranog materijala (staklene boce, staklene ploče; do 85 % ukupnog sadržaja sirovina) i prirodnih materijala te bez upotrebe formaldehida i fenola, a ujedno ima manju ugrađenu energiju od tradicionalnih veziva na bazi ulja, poboljšava sveukupnu održivost zgrada te nema umjetnih bojila. Ecose® tehnologija proizvodnje toplinske izolacije je inovacija industrijskog partnera Knauf Insulation d.o.o. uključenog u razvoj panela. Između sloja toplinske izolacije Ecose® staklene vune i vanjskog betonskog sloja, nalazi se sloj ventiliranog zraka debljine 4 cm radi sprječavanja vlaženja sloja toplinske izolacije. Prirodno provjetravani zračni sloj nije uobičajen kod klasičnih betonskih predgotovljenih sendvič panela te stoga predstavlja dodatnu inovativnost panela.



Slika 6: Faze proizvodnje panela u tvornici predgotovljenih elemenata

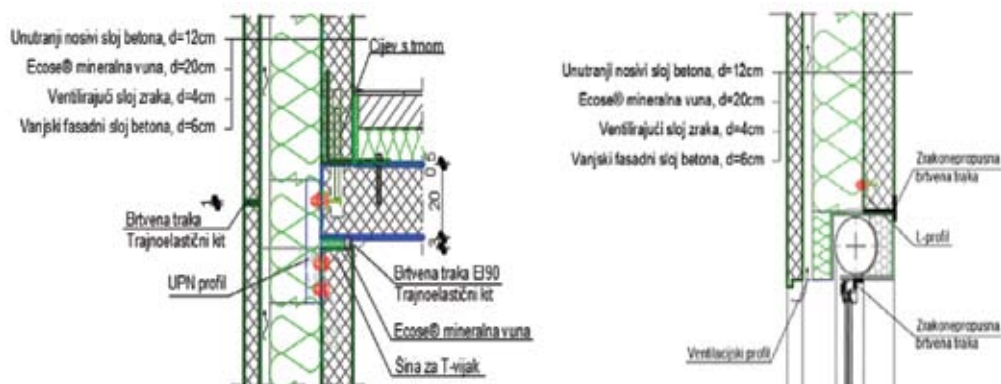
Proizvođač inovativnog panela Beton Lučko d.o.o. bio je industrijski partner projekta, koji je zaslužan i za tehnologiju proizvodnje kojom se osigurava potrebni zračni sloj (Slika 6). Za potrebe stavljanja razvijenog proizvoda na tržište, za ECO-SANDWICH® fasadni panel izrađena je izjava o svojstvima i CE znak. Budući da se ECO-SANDWICH® fasadni element kategorizira kao nenosivi zidni element nekonstrukcijske namjene (sustav 4), ocjenjivanje i provjeru stalnosti svojstava građevnog proizvoda proveo je sam proizvođač panela [18, 19, 21].

Zahvaljujući dobroj toplinskoj izolaciji i toplinski povoljnijem ponašanju betona s recikliranim agregatom u usporedbi s toplinskim ponašanjem običnih betona, ECO-SANDWICH® panel prema izjavi o svojstvima [18] ima deklariranu vrijednost koeficijenta prolaska topline $U < 0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ u stacionarnom stanju, što ga čini konkurentnim ostalim predgotovljenim sendvič panelima dostupnima na tržištu [22] i prikladnim za izgradnju zgrada gotovo nulte ili vrlo niske potrošnje energije. Pokazalo se da ECO-SANDWICH® panel ima bolja zvučno-izolacijska svojstva (53 dB) u usporedbi s običnim betonskim sendvič panelom (47 dB) i metalnim sendvič panelima (21 dB i 22 dB ovisno o vrsti panela) [22]. Upravo su dva betonska sloja odgovorna za veliku plošnu masu ECO-SANDWICH® panela od $458 \text{ kg}/\text{m}^2$, što zgradu s takvim fasadnim elementima ovojnice svrstava u kategoriju teških zgrada.

Dodatno je istražen utjecaj na okoliš inovativnog predgotovljenog zidnog panela ECO-SANDWICH®. U analizu su uključene sve utjecajne kategorije definirane u EN 15804, a promatrane su kroz cjelokupni uporabni vijek panela, od vađenja materijala, proizvodnje materijala i panela, distribucije, korištenja i razgradnje [19, 23].

3.3 Razrada konstruktivnih detalja – smanjenje utjecaja toplinskih mostova

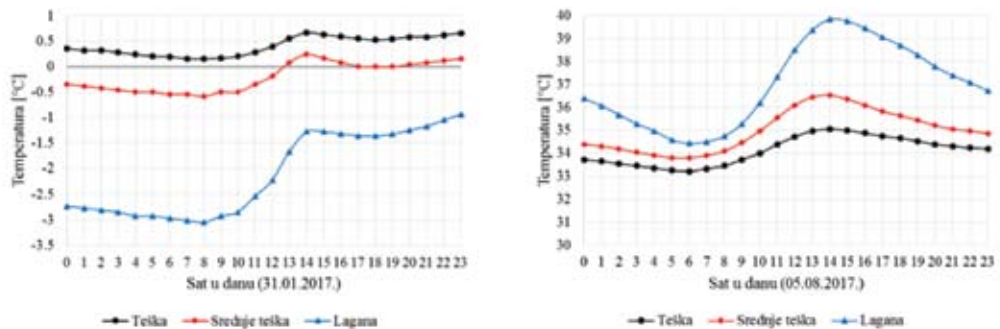
U suradnji s proizvođačem panela, razrađeni su najčešći detalji spoja panela i nosive konstrukcije [18], pri čemu je naglasak prvenstveno stavljen na umanjeње utjecaja toplinskih mostova, osiguranje zrakonepropusnosti vanjske ovojnice i otpornosti na požar (Slika 7). Kako bi se omogućio ulazak i izlazak zraka iz zračnog sloja panela, odnosno prirodno ventiliranje u fasadnom panelu, nužno je predvidjeti otvore na samom dnu i vrhu panela te na sljubicama vanjskog betonskog sloja.



Slika 7: Konstruktivni detalji: lijevo – spoj panela s betonskom pločom, desno – spoj panela s gornjim dijelom prozora (detalj s kutijom za rolete)

3.4 Utjecaj toplinske mase

Za zgrade različite masivnosti (vrlo lagana, lagana, srednje teška, teška, masivna) analiziran je utjecaj toplinske mase na specifičnu godišnju potrebnu toplinsku energiju za grijanje $Q''_{H,nd}$ i hlađenje $Q''_{C,nd}$ [20, 24]. U sklopu ovog rada, prikazan je utjecaj masivnosti ovojnice na temperaturu nekondicioniranog zraka, i to u vidu dnevnog profila temperature unutarnjeg zraka zgrada različite masivnosti u kontinentalnoj (Zagreb Maksimir) i primorskoj klimi (Split Marjan) Hrvatske. Numerički proračuni provedeni su na razini cijele zgrade (3-D proračuni) koristeći računalni program WUFI® Plus.



Slika 8: Utjecaj različite masivnosti na satne temperature nekondicioniranog zraka u kontinentalnoj klimi: lijevo – zimski dan, desno – ljetni dan

Rezultati prikazani na Slici 8 ukazuju da masivnost ovojnice zgrade ima značajan utjecaj na dnevni razvoj temperature nekondicioniranog zraka. Najmanje razvijene dnevne amplitude temperature potvrđuju da unutarnje temperature ventilirane teške zgrade reagiraju najsporije na promjene vanjskih uvjeta te najviše prigušuju temperaturne ekstreme. Odnosno, može se reći da su prisutni najstabilniji uvjeti temperature unutarnjeg zraka za najveću promatranu masivnost zgrade, što je potvrđeno za oba sezonska dana u obje klime.

4. Primjena razvijenog inovativnog predgotovljenog panela

4.1 Prva ECO-SANDWICH® kuća

Prijelaz sa znanstvenih istraživanja u laboratorijskim uvjetima na stvarnu primjenu razvijenog ECO-SANDWICH® panela ostvarena je 2016. godine u gradu Koprivnici, izgradnjom ovojnice obiteljske kuće nazvane „Prva ECO-SANDWICH® kuća“ vrlo niske potrebe za energijom, Slika 9. Glavni projektant obiteljske kuće bio je prof.

Ljubomir Mišćević s Arhitektonskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Riječ je o zgradi s tri stambene jedinice (stan 1 u prizemlju, stan 2 na 1. katu i stan 3 na 2. katu) koje su u potpunosti grijane te je jedini negrijani prostor zajednički ulaz u kuću i stubišna vertikala. Zgrada je projektirana 2015. u skladu s principima pasivne gradnje, što podrazumijeva velike otvore na južnom pročelju, zatvorenije sjeverno pročelje, dobru toplinsku izolaciju i zrakonepropusnost vanjske ovojnice te mehaničku ventilaciju s rekuperacijom topline. Temeljem proračunskih vrijednosti iz projekta, a sukladno tadašnjim kriterijima iz *Pravilnika o energetskom pregledu zgrade i energetskom certificiranju* („NN 48/14 i 150/14“), koji je obuhvaćao samo Q'_{Hnd} , Prva ECO-SANDWICH® kuća svrstana je u A+ energetski razred.

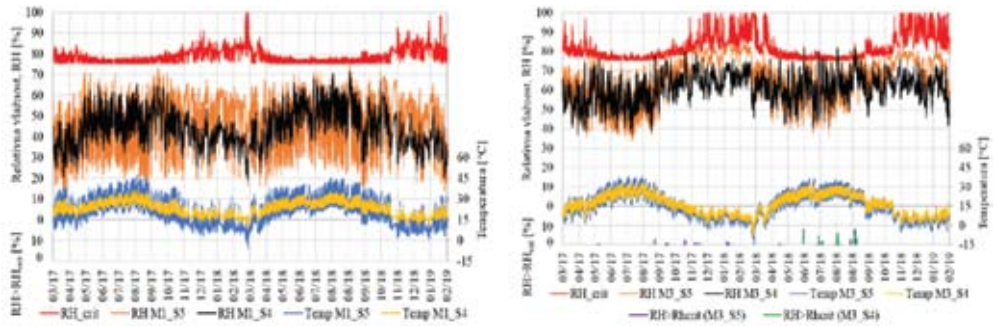


Slika 9: Prva primjena razvijenog fasadnog panela – Prva ECO-SANDWICH® kuća

5. Terenski monitoring u stvarnim uvjetima okoliša – razina elementa i razina zgrade

Cilj terenskog monitoringa bio je potvrditi koncept higrotermalne robusnosti inovativnog panela. Navedeno je istraženo kroz utjecaj klimatskih uvjeta realnog vanjskog okoliša i različitih uvjeta korištenja unutarnjeg okoliša zgrade na transport topline i vlage kroz ventilirani teški fasadni element od betona s recikliranim agregatom. Nadalje, u suradnji s tvrtkom HEP-ESCO d.o.o. uspostavljeno je i mjerenje potrošnje energije (plin, električna energija) i parametara unutarnje ugodnosti i kvalitete unutarnjeg zraka (temperatura, relativna vlažnost i CO₂ zraka) korištenjem računalnog poslovnog sustava ESCO® Monitor. Cilj je bio istražiti utjecaj ponašanja korisnika na potrošnju energije i parametre ugodnosti unutar zgrade čija je ovojnica izvedena od razvijenog inovativnog predgotovljenog panela.

Tri panela u prizemnom stanu odabrana su za monitoring higrotermalnog ponašanja: južno orijentirani panel M1, istočno orijentirani panel M2 i sjeverno orijentirani panel M3 (Slika 9). Osim po orijentaciji, odabrani paneli razlikuju se i prema uvjetima unutarnjeg okoliša – M1 i M2 graniče s grijanim prostorom, dok M3 graniči s negrijanim stubištem. Temperatura i relativna vlažnost, kao indikatori transporta topline i vlage, mjereni su u ukupno 7 pozicija po presjeku odabranih panela (Slika 5).



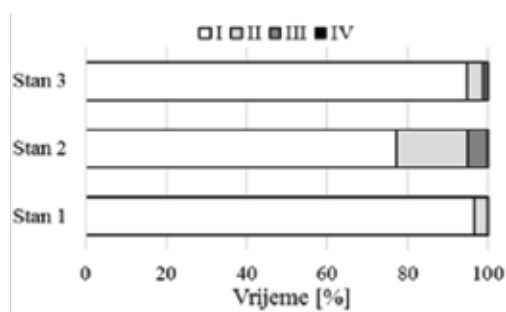
Slika 10: Usporedba relativnih vlažnosti (RH) razvijenih u sloju toplinske izolacije s kritičnim vrijednostima: lijevo – južni panel M1, desno – sjeverni panel M3

Kroz period od 2 godine (03/2017 – 02/2019), u toplinskoj izolaciji južnog panela M1 niti jednom nije došlo do prekoračenja kritičnih vrijednosti relativne vlažnosti (Slika 10 lijevo), dok je kod sjevernog panela to prekoračenje iznosilo sveukupno 107 h u sredini sloja toplinske izolacije, odnosno 291 h u segmentu neposredno do zračnog sloja (Slika 10 desno). Analizom je utvrđeno da ne postoji duži vremenski kontinuitet prekoračenja koji bi rezultirao narušavanjem trajnosti toplinske izolacije. Dodatne numeričke simulacije potvrdile su da ventilacija u zračnom sloju pasivno hladi ovojnicu, i to naročito za južnu orijentaciju panela.

Na godišnjoj razini (01/2019. – 01/2020.), stanari Prve ECO-SANDWICH® kuće potrošili su ukupno 119,77 kWh/m² primarne energije. Sukladno trenutnoj hrvatskoj regulativi, primarna energija za obiteljsku kuću gotovo nulte energije (nZEB) u kontinentalnoj Hrvatskoj mora biti manja od 45 kWh/(m²a), no to uključuje samo energiju potrebnu za grijanje, pripremu potrošne tople vode i mehaničku ventilaciju. Imajući na umu da je za analiziranu zgradu provedeno mjerenje sveukupne potrošnje energije, što podrazumijeva i energiju za rasvjetu, kuhanje, hlađenje, sve uređaje u stanovima itd., može se reći da je Prva ECO-SANDWICH® kuća zgrada vrlo niske potrošnje energije u stvarnim uvjetima korištenja te da bi uz ugradnju obnovljivih izvora energije ona zasigurno dosegla nZEB razinu. Nadalje, ustanovljeno je da je u stanovima 1 i 3 više od 95 % vremena prisutna najniža koncentracija CO₂ (Kategorija I iz Tablice 2), dok je u stanu 2 ta razina prisutna oko 77 % vremena (Slika 11). Navedeno upućuje na iznimno visoku kvalitetu unutarnjeg zraka koja je posljedica načina korištenja sustava mehaničke ventilacije, a koja je u potpunosti kontrolirana od ukućana (svaki stan zasebno). Može se zaključiti da su energetska ponašanja zgrade i kvaliteta unutarnjeg okoliša uvelike uvjetovani ponašanjem korisnika. Iz tog je razloga nužna edukacija samih korisnika nZEB zgrada te projektanata i izvođača, ali i svih ostalih dionika uključenih u životni ciklus zgrade, što se aktivno provodi kroz EU projekte BIMZeED, The nZEB Roadshow i CONGREGATE.

Tablica 2: Preporučene vrijednosti parametara kvalitete zraka prema normi HRN EN 16798-1:2019 [25]

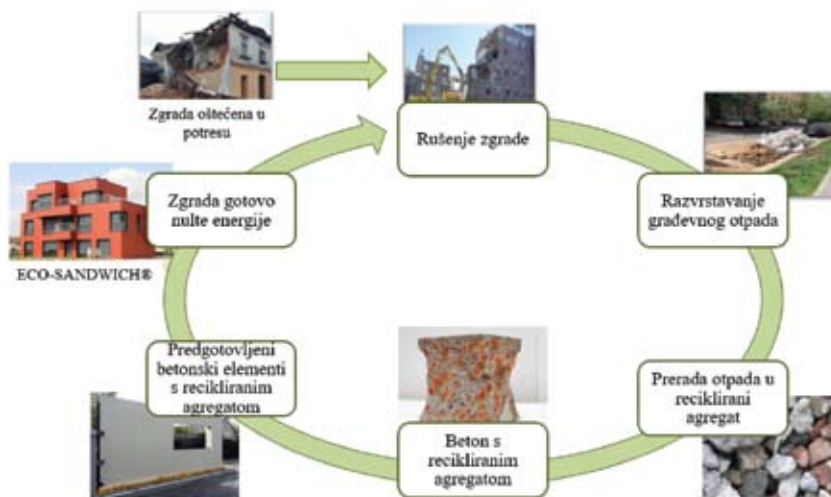
Kategorija	CO ₂ [ppm]
I	950
II	1200
III	1750
IV	> 1750

**Slika 11:** Razdioba kvalitete unutarnjeg zraka u dnevnim sobama Prve ECO-SANDWICH® kuće

6. Mogućnosti korištenja lokalno dostupnih sirovina – obnova potresom pogođenih područja

Svjedoci smo razmjera posljedica potresa koji su u 2020. godini zahvatili područja Sisačko-moslavačke županije, Karlovačke i Zagrebačke županije te Grada Zagreba. Pogođeni stambeni i nestambeni fond zgrada pokazao je svoju krhkost te su mnoge zgrade oštećene, od kojih je znatan dio i potpuno neuporabljiv, poglavito na području Sisačko-moslavačke županije. Obnova potresom pogođenih područja zahtijeva sveobuhvatan pristup koji povezuje znanstvenu zajednicu i industriju, primjenu njihova znanja i provjerenih rješenja. Proces obnove mora imati sustavan i interdisciplinarni pristup uz uključenje održivosti i kružnog gospodarstva. Održivost u obnovi moguće je postići ponovnom uporabom i oporabom građevinskih materijala koji su ostali na potresom razorenim lokalitetima, recikliranjem materijala te posebno korištenjem prirodnih materijala koji se nalaze u neposrednom/ bliskom okruženju [26]. Primjenom recikliranog agregata, koji se dobiva rušenjem postojećih neuporabljivih građevina, kao agregata u proizvodnji betonskih slojeva ECO-SANDWICH® panela, riješio bi se problem zbrinjavanja građevnog otpada i smanjilo iskorištavanje prirodnih sirovina. Nadalje, predgotovljeni fasadni sustav ovojnice ubrzava cjelokupni proces gradnje,

a samim time i zbrinjavanje stanovnika potresom pogođenih područja. Seizmički otporna i energetska učinkovita gradnja osnovni su preduvjet za sigurne, zdrave i ugodne zgrade. Navedenim pristupom moguće je postići kružno, održivo te energetska neutralno gospodarstvo na potresom pogođenim područjima, Slika 12.



Slika 12: Primjena ECO-SANDWICH® predgotovljenih fasadnih elemenata u obnovi potresom pogođenih područja kao dio kružnog, održivog i energetska neutralnog gospodarstva

7. Zaključak

Ovaj rad opisuje razvoj i primjenu inovativnog ventiliranog fasadnog panela. Inovativnost panela ogleda se u korištenju velikog udjela recikliranog građevnog otpada kao agregata za proizvodnju betonskih slojeva, čime se ujedno nudi rješenje za problem zbrinjavanja građevnog otpada i smanjenje korištenja prirodnih sirovina. Dobra toplinska svojstva čine panel prikladnim za izgradnju zgrada gotovo nulte energije, čime se utječe na smanjenje potrošnje energije u sektoru zgradarstva. Suradnjom hrvatskih znanstvenih institucija i industrije provedena su opsežna znanstvena istraživanja na razini materijala (optimizacija betona s recikliranim agregatom) i na razini elementa (proizvodnja prototipa panela), koja su na koncu rezultirala primjenom panela za izgradnju cijele zgrade i potvrdom koncepta (terenska mjerenja u stvarnim uvjetima okoliša). Inovativni panel, rezultat hrvatskog znanja, zbog korištenja recikliranog građevnog otpada i svoje predgotovljene tehnologije proizvodnje, ujedno pruža održivo, energetska učinkovito, seizmički sigurno i brzo rješenje za područja Republike Hrvatske pogođena potresom.

Literatura

- [1] Vyncke, J.; Vrijders, J.: Recycling of Construction and Demolition Waste - An Overview of RILEM Achievements and State of the Art in the EU, *Proceedings of Second International Conference on Concrete Sustainability*, Galvez, J.C.; Aguado de Cea, A. i dr. (Ur.), str. 47-57, ISBN 978-84-945077-7-9, Madrid, Španjolska, lipanj 2016., International Center for Numerical Methods in Engineering, Madrid, (2016)
- [2] European Parliament, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), *OJEU*, L 153/13 (2010).
- [3] European Parliament, Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, *OJEU*, L156/75 (2018).
- [4] European Parliament, Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, *OJEU*, L 140/16 (2009).
- [5] European Parliament, Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast), *OJEU*, L 328/82 (2018).
- [6] European Commission, A Clean Planet for all, A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, COM(2018) 773 final, Brussels, 2018.
- [7] Banjad Pečur, I.; Bagarić, M.; Bomberg, M.: GUEST EDITORS' PREFACE: Special issue "A Paradigm Shift in Integrated Building Design - Towards Dynamically Operated Buildings," *Advances in Building Energy Research*. (2020), Online ISSN 1756-2201 <https://doi.org/10.1080/17512549.2020.1731710>
- [8] Holm, A.; Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.: The Hygrothermal Behaviour of Rooms: Combining Thermal Building Simulation and Hygrothermal Envelope Calculation, *Proceedings of the Eighth International IBPSA Conference - Building Simulation 2003*, str. 499–506, Eindhoven, Netherlands, kolovoz 2003:
- [9] European Commission, Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy, COM(2015) 614 final, (2015).
- [10] European Parliament and Council, Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives, *OJEU*, L312/3 (2008)
- [11] Jurić, E.: Svojstva betona sa recikliranim agregatom, *Diplomski rad*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2014.
- [12] EUROSTAT, Podaci o količinama generiranog otpada, *Dostupno na* http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_generation_and_landfilling_indicators *Pristupljeno*: 2016-07-05
- [13] RILEM TC 121, Specifications for concrete with recycled aggregates, *Materials and Structures*. (1994), str. 557–559.
- [14] Nederlands Normalisatie-instituut, Dutch Supplement to NEN-EN 12620 "Supplementary Materials for Concrete" (2005)
- [15] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 206:2016 Beton - Specifikacija, svojstva, proizvodnja i sukladnost (EN 206:2013+A1:2016), (2016)
- [16] Behera, M.; Bhattacharyya, S.K.; Minocha, A.K.; Deoliya, R.; Maiti, S.: Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review, *Construction and Building Materials*, **68** (2014), str. 501–516, ISSN: 0950-0618, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003.

- [17] Bjegović, D.; Štirmer, N.; Serdar, M.: Ecological Aspects of Concrete Production, *Proceedings of Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Zachar, J.; Claisse, P. i dr. (Ur.), ISBN 978-1-4507-1490-7, Ancona, Italija, lipanj 2010.
- [18] Zavod za materijale – Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, ECO-SANDWICH® Energy efficient, recycled concrete sandwich facade panel, (2012) *Dostupno na*: <https://www.eco-sandwich.hr/> *Pristupljeno*: 2019-12-01
- [19] Banjad Pečur, I.; Bagarić, M.; Milovanović, B.: Development and Application of a Prefabricated Facade Panel Containing Recycled Construction and Demolition Waste, *Journal of Facade Design and Engineering*, 8 (2020) 2, str. 101-126, ISSN online 2213-3038 <https://doi.org/10.7480/jfde.2020.2.4788>.
- [20] Banjad Pečur, I.; Štirmer, N.; Milovanović, B.: Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings, *Magazine of Concrete Research*, 67 (2015) 11, str. 575-584, ISSN 0024-9831, <https://doi.org/10.1680/mac.14.00220>
- [21] Bjegović, D., Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Milovanović, B., Carević, I., Alagušić, M.: Ventilirani predgotovljeni fasadni panel ECO-SANDWICH, *Proceedings of the International Symposium on Researching and Application of Contemporary Achievements in Civil Engineering in the Field of Materials and Structures*, Grdić, Z. (Ur.), str. 533-544, Vrnjačka Banja, Srbija, 2014., Društvo za ispitivanje i istraživanje materijala i konstrukcija Srbije, Vrnjačka Banja, (2014)
- [22] Banjad Pečur, I.; Štirmer, N.; Milovanović, B.; Carević, I.; Alagušić, M.: Energy Efficiency Aspects of Recycled Aggregate Concrete, *Proceedings of the International Symposium on Eco-Crete*, Wallevik, O.H.; Bager, D.H. i dr. (Ur.), str. 393–400, Reykjavik, Island, 2014, ICI Rheocenter, Reykjavik (2014)
- [23] Milovanović, B.; Banjad Pečur, I.; Štirmer, N.; Bagarić, M.; Carević, I.: Izjava o utjecaju na okoliš predgotovljenog zidnog panela izrađenog od recikliranog betona, *Zbornik radova Sabora Hrvatskih graditelja 2016 - EU i Hrvatsko graditeljstvo*, Lakušić, S. (Ur.), str. 179-188, Cavtat, Hrvatska, 2016. Hrvatski savez građevinskih inženjera, Cavtat, (2016)
- [24] Bagarić, M.; Banjad Pečur, I.; Milovanović, B.: Hygrothermal performance of ventilated prefabricated sandwich wall panel from recycled construction and demolition waste – A case study, *Energy and Buildings*, 206 (2020) 109573, ISSN 0378-7788 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109573>
- [25] HRN EN 16798-1:2019 Energijska svojstva zgrada – Ventilacija u zgradama – 1. dio: Ulazni mikroklimatski parametri za projektiranje i procjenu energijske učinkovitosti zgrada koje se odnose na kvalitetu zraka, toplinsko okruženje, rasvjetu i akustiku, (2019)
- [26] Hrvatska sekcija ECOVAST-a i dr.: Apel za sveobuhvatan, uključiv i znanstveno utemeljen pristup obnovi potresom pogođenih područja Sisačko-moslavačke županije, 2021., *Dostupno na* http://ecovast.hr/index.php?option=com_content&view=article&id=188:apel-za-sveobuhvatnu-obnovu-nakon-potresa&catid=10:novosti-ecovast-hr&Itemid=72 *Pristupljeno*: 2021-02-05