**PRIMJENA RECIKLIRANOG AGREGATA U BETONU - ISKUSTVA U HRVATSKOJ**

**APPLICATION OF RECYCLING AGGREGATE IN CONCRETE – EXPERIENCES IN CROATIA**

Prof.dr.sc. Ivana Banjad Pečur, Prof.dr.sc. Nina Štirmer, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet

**Sažetak:**

Recikliranjem građevinskog otpada i ponovnom uporabom za različite namjene smanjuje se potreba za eksploatacijom prirodnih resursa te se rješava problem odlaganja i zauzimanja novog prostora. Primjena u betonu ograničena je promjenjivom i neujednačenom kvalitetom recikliranog agregata. Reciklirani betonski agregat obično ima veći udio sitnih čestica te veću apsorpciju od prirodnog agregata. Povećano upijanje vode recikliranog agregata uzrokovano je većim stupnjem upijanja cementnog morta koji obavija zrna agregata.

U radu su prikazani rezultati istraživanja svojstava betona od recikliranog betonskog agregata i reciklirane opeke provedeni u Hrvatskoj.

**Ključne riječi:** građevinski otpad, reciklirani agregat, beton od recikliranog agregata, ECO-SANDWICH

**Summary:**

With construction and demolition waste recycling and its reuse for different purposes, natural resource consumption decreases and problems related to waste disposal is solving. Variations of recycling aggregate quality limit its application in concrete. When comparing to natural aggregate, recycling concrete aggregate usually has higher amount of fine particles and increased absorption which is caused by higher absorption of cement mortar around aggregate grains. In the paper are shown results of testing concrete produced with recycled concrete aggregate and recycled clay, conducted in Croatia.

In the paper the result of investigation properties of concrete with recycling concrete and clay aggregate are shown.

**Key words:** C&D waste, recycled aggregate, recycled aggregate concrete, ECO-SANDWICH

**1. Uvod**

Procjenjuje se da je do 90% građevnog otpada i otpada od rušenja ponovo iskoristivo ili se može reciklirati, ovisno o vrsti projekta i lokalnom tržištu otpadnih materijala. Uporabi recikliranog agregata dobivenog iz građevinskog otpada ili nastalog rušenjem građevina, posvećuje se sve veća pažnja obzirom da se pri tome štede prirodni resursi, a istodobno se materijal nastao rušenjem ne odlaže u okoliš. Iskustva europskih zemalja (Austrija, Njemačka, Danska, R. Irska i dr.) pokazuju da je potreban višegodišnji sustavan i dosljedan rad na postizanju što boljih rezultata u recikliranju građevinskog otpada kako bi se postigao visoki stupanj recikliranja i ponovne uporabe takvog materijala. Prema podacima iz projekta LIFE05 TCY/CRO/000114 CONWAS [1], procijenjeno je da se u Republici Hrvatskoj godišnje proizvede 2,5 mil. tona građevinskog otpada, od čega se tek 7 % reciklira. Problemi u primjeni recikliranih materijala mogu biti slabo razvijena svijest o važnosti uporabe recikliranih materijala u očuvanju okoliša, ograničeno razumijevanje mogućnosti primjene i neiskustvo, nepoznavanje standarda kvalitete, nestabilnost tržišta i nepostojanost cijena te tehničke regulative [2].

Recikliranjem građevinskog otpada pridonosi se očuvanju okoliša tako da se čuvaju prirodni mineralni resursi koji bi bili utrošeni za potpuno nove građevinske proizvode. Smanjuje se velika količina otpada koji nastaje rušenjem, rekonstrukcijom i izgradnjom građevina, a koji bi završio na odlagalištima. Stvara se reciklažno tržište koje može proizvesti 10 puta više poslova u industriji za istu cijenu kao i odlaganje otpada. Procesom reciklaže kontrolira se odlaganje otpada i troškova transporta čime se umanjuje ilegalno odlaganje otpada na divljim odlagalištima. Koristi se manje energije prilikom procesa proizvodnje materijala/agregata. Ukoliko postoje određeni zakonski, ekonomski i tehnološki okviri za reciklažu građevinskog otpada reciklaža je neizostavan proces koji je ekološki i ekonomski isplativ [3].

Pri proizvodnji agregata za izradu betona javlja se višestruki utjecaj na okoliš u obliku buke, prašine, povećanja prometa, onečišćenja podzemnih voda i vizualnih promjena krajolika koje u smislu održivosti nisu prihvatljive [4]. Čimbenici koje je moguće kontrolirati kako bi se smanjila potreba za prirodnim agregatom su ograničeni. Potrošnja lokalnog agregata može se smanjiti upotrebom alternativnih resursa, primjerice uporabom recikliranog agregata nastalog rušenjem građevina, zgure, industrijski proizvedenih agregata, recikliranog stakla, reciklirane opeke i sl. Najveći problem primjene recikliranog agregata u betonu su onečišćenja u obliku ostataka drva, papira, žbuke, plastike, ulja i dr. te veća apsorpcija od prirodnih agregata zbog ostataka starog cementnog morta na zrnima agregata.

**2. Građevinski otpad**

Prema Strategiji gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj [5], cilj je uvesti sustave oporabe svih vrsta građevinskog otpada do 80% ukupnih količina te osigurati da se maksimalne količine građevinskog otpada oporabe i/ili recikliraju kao novi građevinski materijal koji je ravnopravan s drugim građevinskim materijalom. Prema podacima u Planu gospodarenja otpadom u RH [6], u pojedinim jedinicama lokalne samouprave više od 80% otpada odloženog na divlja odlagališta čini upravo građevinski otpad. U svrhu smanjivanja proizvedenog otpada, predlaže se izrada smjernica vezanih uz projektiranje građevina, a sve u cilju konkretnijeg i kvalitetnijeg uključivanja korištenja materijala prihvatljivih sa stajališta zaštite okoliša te izbjegavanja novog građevinskog otpada. Prema Pravilniku o gospodarenju građevnim otpadom [7], građevni proizvod nastao materijalnom oporabom građevnog otpada može se ponovo uporabiti u građevne svrhe ukoliko udovoljava normama i uvjetima propisanim posebnim propisom. Norma HRN EN 12620:2002+A1:2008 Agregati za beton [8], predviđa upotrebu recikliranog agregata za izradu betona te daje razredbu ovisno o njegovom podrijetlu.

Prema Strategiji gospodarenja otpadom Republike Hrvatske [5], sastav građevinskog otpada prikazan na slici 1. je sljedeći: materijal iskopa 75%, uključujući i iskopanu zemlju s onečišćenih /kontaminiranih lokacija, otpad od rušenja i građenja 15-25% te asfalt, katran i beton 5-10%. Najvećim dijelom (95%) je inertan otpad (otpad od keramike, rušenja zgrada, žbuka, gips, razbijeni beton, željezo, čelik, kovine, drvo, plastika, papir i dr.), ali može biti i opasan, kao što je asfaltno vezivo ili otpad koji sadrži azbest, što traži posebnu kontrolu i obradu [3].

Slika 1. Sastav građevinskog otpada [5]

Na temelju geografskih specifičnosti Hrvatske, u Dalmaciji i Primorju kao građevinski otpad prevladava kamen, u istočnom dijelu opeka odnosno miješani otpad, a u sjeverozapadnom dijelu beton i opeka. Sastav građevinskog otpada razlikuje se također ruši li se postojeća ili se gradi nova građevina. Na slici 2. prikazan je sastav građevinskog otpada pri rušenju građevina u kojemu prevladaju beton, drvo i opeka.

Slika 2. Sastav građevinskog otpada pri rušenju građevine [1]

Obrada otpadnog građevinskog materijala na gradilištu, odnosno izvan njega ovisi o dostupnosti mnogih strojeva, zahtijevanoj kvaliteti agregata na mjestu rušenja, prostoru i vremenu raspoloživom na mjestu rušenja i transportnoj udaljenosti između gradilišta do smještaja centralnog pogona za obradu i odlagališta [9]. Prednosti i nedostatci obrade otpadnog materijala na gradilištu ili izvan gradilišta prikazane su u Tablici 1.

**Tablica 1:** Prednosti i nedostatci obrade otpadnog građevinskog materijala
na gradilištu / izvan gradilišta [3]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Obrada otpadnog građevinskog materijala** | **Prednosti** | **Nedostatci** |
| **Na gradilištu** | Niži troškovi rukovanja i transporta materijala, niži troškovi mehanizacije, manje poremećaja u transportu | Konflikti između radova na gradilištu i prostornih zahtjeva za materijal i mehanizaciju, viši troškovi mehanizacije po toni otpada, veća buka i prašina, manja fleksibilnost u upotrebi recikliranog materijala, kašnjenja |
| **Izvan gradilišta** | Smanjen utjecaj na okolni prostor, praktičnija upotreba širokog raspona opreme velikog kapaciteta, niži troškovi mehanizacije po toni otpada, jednostavnija kontrola kvalitete recikliranog materijala, moguće je stvarati zalihu i tako reklamirati recikliranje | Neophodna je odgovarajuća kontrola procesa rušenja (kako bi se izbjegla dostava materijala upitne kvalitete), viši troškovi upravljanja i transporta materijala, viši troškovi mehanizacije, fiksni troškovi recikliranja na gradilištu |

**Sirovina** dobivena recikliranjem građevinskog otpada najčešće se upotrebljava kao:

* materijal za nosive slojeve cesta, putova, staza, parkirališta;
* dodatak za nove asfaltnobetonske mješavine;
* dodatak raznim vrstama betona;
* materijal za izradu betonskih elemenata i sklopova.

U tablici 2. prikazane su mogućnosti primjene različitih recikliranih agregata ovisno o porijeklu.

**Tablica 2:** Mogućnosti ponovne upotrebe otpadnih materijala iz visokogradnje i niskogradnje nakon postupka recikliranja [1]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Vrsta materijala** | **Porijeklo** | Primjena |
| Čisti lom opeke | Proizvodnja opeke | Dodatni materijal za proizvodnju zidnih elemenata, betona, laganog betona, stabiliziranje, drenažni slojevi, ispuna, nasipavanje. |
| Miješani lom od rušenja u visokogradnji s lomom opeke (šuta miješana s opekom) | Stambena gradnja, visokogradnja | Dodatni materijal za proizvodnju zidnih elemenata, betona, laganog betona, stabiliziranje, ispuna, nasipavanje, završni slojevi podova. |
| Miješani lom od rušenja u visokogradnji | Industrija, visokogradnja | Stabiliziranje nasipa, izgradnja sportskih terena. |
| Mineralni otpad | Industrogradnja, visokogradnja | Nasipavanje, izgradnja sportskih terena – drenaža. |
| Reciklirani pijesak | Industrogradnja, visokogradnja | Podloga za postavljanje cijevi pri uvođenju infrastrukture (plin, voda itd.) |
| Asfaltni lom | Cestogradnja | Nevezani gornji slojevi, nevezani donji nosivi slojevi, izgradnja poljoprivrednih putova, dodatni materijali za proizvodnju asfalta |
| Betonski lom | Cestogradnja, izgradnja mostova, industrogradnja | Nevezani gornji nosivi slojevi, nevezani donji nosivi slojevi, cementom vezani nosivi slojevi, izgradnja poljoprivrednih putova, dodatni materijali za proizvodnju betona, drenažni slojevi |
| Miješani asfaltni/betonski lom | Cestogradnje, parkirališta, izgradnja mostova | Nevezani gornji slojevi, nevezani donji slojevi, vezani nosivi slojevi, izgradnja poljoprivrednih putova |

Nakon recikliranja također preostane dio „nekorisnog materijala“ koji se eventualno može primijeniti za nasipavanje terena planiranih za izravnavanje i oblikovanje, zatim za izvedbu podloge cesta, a posebice poljskih putova te za izradu nasipa radi zaštite naselja od buke kod prometnica. Takvi «nekorisni materijali» odnose se na materijale koji nisu opasni za okoliš pri trajnom odlaganju, odnosno materijali kojih daljnja prerada ne daje sirovinu za prerađevine veće upotrebne vrijednosti.

**3. Reciklirani agregat**

Kvaliteta recikliranog agregata ovisi o podrijetlu građevinskog otpada i načinu njegove obrade. Prihvat građevinskog otpada i otpada od rušenja te postupak proizvodnje recikliranog agregata i dostava istoga potrošaču, mogu se smatrati primarnim procesima. Sekundarni procesi podrazumijevaju nabavu, prodaju, održavanje i gospodarenje. U cestogradnji se kamena podloga koristi za povećanje nosivosti i mora biti dobro zbijena, te otporna na vlagu i smrzavanje. Istraživanjem i iskustvom na brojnim projektima, drobljeni betonski (i ostali) materijal je potpuno prihvaćen i visoko ocijenjen kao kameni materijal za izradu podloge. Preporučuje se ne miješati betonski drobljeni materijal s ostalim primarnim ili sekundarnim sirovinama jer se i s inženjerskog i sa gledišta zaštite okoliša tako umanjuju svojstva drobljenog materijala [10].

***Vrste recikliranog agregata su****:*

**a)** reciklirani asfaltni agregat – stari asfalt od cesta;

**b)** reciklirani agregat od betonskog materijala;

**c)** reciklirani agregat koji sadrži materijal od zidane gradnje

**d)** miješani reciklirani agregat čiji sastav čine tipovi agregata pod b) i c).

U usporedbi s prirodnim agregatom, reciklirani materijali imaju promjenjiva svojstva, o čemu se mora voditi briga pri sastavljanju betonske mješavine i izradi betonskog morta. Granične vrijednosti onečišćenja temeljene su na aspektima čvrstoće i trajnosti, kao što su: utjecaj na usporavanje očvršćivanja cementa, korozija armature, bubrenje uslijed apsorpcije vode (npr. drvo), formiranje etringita (kalcij aluminij sulfat), alkalno silikatne reakcije, smanjivanje tlačne čvrstoće (npr. asfalt). Za svaki tip recikliranog agregata postoje propisani zahtjevi. Specifikacije koje su iste kao za prirodne agregate odnose se na raspodjelu veličine zrna, oblik, alkalno-agregatne reakcije i sadržaj materijala koji mogu izmijeniti očvršćivanje betona. Udio sitnih čestica je maksimalno 5%, i ne sadrži čestice gline. Udio tvari koje sadrže sumpor je maksimalno 1%. Procjeđivanje i onečišćenje su ograničeni nacionalnim specifikacijama.

**4. BETON OD RECIKLIRANOG AGREGATA**

U recikliranom agregatu velika je prisutnost nečistoća u obliku laganih čestica što je uzrokovano malom gustoćom prvobitnog morta, a povezano je s velikom apsorpcijom prirodnog agregata primijenjenog za spravljanje betona. Pod nečistoćama u obliku laganih čestica podrazumijeva se čestice čija je gustoća manja od 2000 kg/m3. Preporuka je da se postotak laganih čestica ograniči na 0,97 % za spravljanje betona s 20 % učešća recikliranog agregata.

Prema australskim preporukama [11] dozvoljena ukupna količina svih nečistoća u recikliranom agregatu mora biti manja od 2 %, dok prema preporukama RILEM-a (Međunarodno udruženje laboratorija i stručnjaka za građevinske materijale, sustave i konstrukcije) dozvoljena ukupna količina svih nečistoća u recikliranom agregatu mora biti manja od 1 % [12].

Gustoća recikliranog agregata je obično manja od gustoće prirodnog agregata, i to osobito gustoća sitnog agregata zbog većeg sadržaja cementne paste i morta na površini zrna.

Poroznost agregata, propusnost za vodu i apsorpcija vode su svojstva koja utječu na prionjivost cementnog kamena i agregata u betonu, otpornost betona na djelovanje smrzavanja, kemijsku i erozijsku otpornost betona. Europske norme ne propisuju nikakve okvire u kojima bi se trebala kretati vrijednost upijanja vode recikliranog agregata. Povećano upijanje vode recikliranog agregata uzrokovano je većim stupnjem upijanja cementnog morta koji obavija zrna agregata. Prema španjolskim istraživanjima [11], upijanje vode recikliranog agregata kreće se u rasponu od 4,8 % do 9,6 %. Prema njihovim normama vrijednost je ograničena na 5 %. Neke preporuke za projektiranje recikliranim agregatom su strože od navedenih i propisuju vrijednost apsorpcije vode mješavine recikliranog i prirodnog agregata od 3 % [13, 14].

Za kvalitetu betona nužno je strogo kontroliranje sastavnih komponenti u agregatu. U tablici 3 je prikazana klasifikacija sastavnih komponenti krupnih recikliranih agregata, koja nije bila obuhvaćena prethodnom verzijom norme HRN EN 12620:2002.

**Tablica 3:** Klasifikacija sastavnih komponenti krupnih recikliranih agregata [8]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Komponenta** | **Sadržaj**(postotak mase) | **Razred** |
| Rc | ≥90≥80≥70≥50<50 | Rc90Rc80Rc70Rc50RcDeklarirani |
| Bez zahtjeva | RcNR |
| Rc + Ru | ≥95≥90≥70≥50<50 | Rcu95Rcu90Rcu70Rcu50RcuDeklarirani |
| Bez zahtjeva | RcuNR |
| Rb | ≤10≤30≤50>50 | Rb10Rb30Rb50RbDeklarirani |
| Bez zahtjeva | RbNR |
| Ra | ≤1≤5≤10 | Ra1-Ra5-Ra10- |
| X + Rg | ≤0.5≤1≤2 | XRg0.5-XRg1-XRg2- |
|  | **Sadržaj**[Cm3/kg] | **Kategorija** |
| FL | ≤0.2a≤2≤5 | FL0.2-FL2-FL5- |
| a Kategorija ≤0.2 je namijenjena samo za posebne primjene visokokvalitetnih završavanja površina |
| **Komponenta** | **Opis** |
| **Rc** | Beton, betonski proizvodi, mort, betonski zidni blokovi |
| **Ru** | Nevezani agregat, prirodni kamen, hidraulički vezan agregat |
| **Rb** | Zidni elementi za zidanje od gline (opeka, pločice), kalcijev silikatni elementi za zidanje, aerirani beton |
| **Ra** | Bitumenski materijali |
| **FL** | Lebdeći materijali |
| **X** | Drugi materijali: -kohezivni materijali (glina, humus) -metali (željezni i neželjezni) -neplutajuće drvo, plastika, guma -gipsane žbuke |
| **Rg** | Staklo |

Analizirajući podatke iz literature, može se zaključiti da je beton od recikliranog agregata po svim svojim svojstvima najsličniji lakoagregatnim betonima. Čak i beton od recikliranog agregata i s udjelom zamjene 100 % i s velikim udjelom cementa može postići srednju tlačnu čvrstoću 45 N/mm2, ali nije pretjerano ekonomski isplativ za proizvodnju. Betoni od recikliranog agregata (do 25 % recikliranog agregata) pripadaju grupi betona sa srednjom tlačnom čvrstoćom 30-45 N/mm2. Potrebno je ispitati koji je optimalni koeficijent zamjene prirodnog agregata recikliranim koji daje mješavinu zadovoljavajućih svojstava i čija je proizvodnja ekonomski isplativa. Udio zamjene prirodnog agregata recikliranim može biti između 1 i 100 %. Nije svejedno koji se udio zamjene koristi, jer se njegovim pravilnim izborom može dobiti beton od recikliranog agregata sa svojstvima približno sličnim, boljim ili daleko lošijim od betona od recikliranog agregata. Glavni problem primjene recikliranog agregata je upravo u njihovoj promjenjivoj i neujednačenoj kvaliteti. Naime, ne može se uvijek jamčiti ujednačenost porijekla agregata. U slučaju korištenja agregata nastalog rušenjem konstrukcijskih elemenata neke građevine, njegovo porijeklo je vrlo različito i svakako neće biti ujednačenog sastava. Preporuka je da koeficijent zamjene bude u intervalu 50-75 % [10].

**4. ISKUSTVA PRIMJENE RECIKLIRANOG AGREGATA U RH**

**4.1 Svojstva betona s agregatom od recikliranog betona**

Dosadašnja istraživanja primjene recikliranog agregata u betonu provedena u Republici Hrvatskoj, [15, 16] obuhvatila su primjenu recikliranog agregata dobivenog obradom nakon rušenja armiranobetonske konstrukcije. Na temelju tog istraživanja i istraživanja raznih autora u Europi, zaključeno je da se do 30 % recikliranog agregata može primjenjivati u betonu bez posebnih dokaza i ispitivanja. Također je zaključeno da bi daljnja istraživanja trebala obuhvatiti mogućnost poboljšanja svojstava betona od recikliranog agregata, uz korištenje kemijskih i mineralnih dodataka te raznih poboljšanih tehnologija izvedbe. Naime, sve europske zemlje dopuštaju korištenje recikliranog agregata osim u području posebnih betona.

Sironić [17] je istraživao utjecaj primjene lokalno dostupnih otpadnih materijala na svojstva s njima proizvedenog betona. Eksperimentalno je istražio utjecaj recikliranog vapnenačkog i dolomitnog agregata na svojstva betona, te dana usporedba s određenim svojstvima referentnih betonskih mješavina izrađenih od prirodnog drobljenog vapnenačkog ili dolomitnog agregata. U sklopu istraživanja je dan i prijedlog alternativnog postupka određivanja efektivnog upijanja recikliranog sitnog agregata uronjenog u cementnu suspenziju.

Zaključeno je da rezultati ispitivanja ukazuju na različit stupanj postignute kvalitete recikliranog betona u odnosu na kvalitetu originalnog betona, koji ovisi o porijeklu agregata recikliranog i originalnog betona. Razlika u postignutoj kvaliteti (prema određenoj tlačnoj čvrstoći i vodonepropusnosti) je najizraženija u slučaju recikliranja betona s riječnim agregatom. Nešto je manje izražena u slučaju betona s dolomitnim agregatom, dok je u slučaju usporedbe betona s vapnenačkim agregatom razlika kvalitete originalnog i recikliranog betona najmanja. Provedena ispitivanja su pokazala da je s lokalno dostupnim recikliranim betonskim agregatom moguće proizvesti beton visoke vodonepropusnosti, čak i bez posebnih kemijskih dodataka.

Također je zaključeno da je primjena recikliranog betona moguća u znatnom broju slučajeva, uz (radi moguće veće varijabilnosti svojstava) strože uvjete kvalitete, te uz posebne postupke u projektiranju sastava i u tehnologiji izrade betonske mješavine, pri čemu je svakako preporučljivo korištenje superplastifikatora. Pri tome treba uzeti u obzir oprez u primjeni recikliranog betona u agresivnom okolišu, tj. izbjegavati njegovu primjenu u slučajevima povećane opasnosti od korozije armature, dok se utjecaj agresivnog okoliša detaljnije ne ispita na lokalnim materijalima.

**4.2 Svojstva betona s recikliranom opekom**

U istraživanju [18, 19] utjecaja reciklirane opeke na svojstva očvrslog betona, zaključeno je sljedeće.

* Tlačna čvrstoća - Istraživanja pokazuju da beton s recikliranom opekom ima manju tlačnu čvrstoću (ako se koristi krupna reciklirana opeka tlačna čvrstoća je manja za oko 10-35 %, a kod sitne reciklirane opeke tlačna čvrstoća pada za 30-40%) u odnosu na beton s prirodnim agregatom, a uzrok je veća apsorpcija reciklirane opeke u odnosu na prirodni agregat. Ovaj problem rješava se upotrebom opeke s većom početnom čvrstoćom (68 N/mm2).
* Čvrstoća na savijanje - Čvrstoća na savijanje betona s recikliranom opekom je oko 8-15% manja u odnosu na beton s prirodnim agregatom.
* Modul elastičnosti - Modul elastičnosti također pada kod betona s recikliranom opekom (30-40 % je manji u odnosu na obični beton s prirodnim agregatom, a prilikom upotrebe sitne reciklirane opeke može pasti i do 50% ).
* Apsorpcija vode - Apsorpcija vode bitno se povećava s udjelom reciklirane opeke u betonu, a dodavanje plastifikatora u betonsku mješavinu pokazalo se dobrim rješenjem čime se smanji apsorpcija i produlji trajnost betona.
* Otpornost na habanje - S obzirom na bolju prionjivost cementne paste i reciklirane opeke, beton s recikliranom opekom pokazuje bolju otpornost na habanje od običnog betona.

**4.2 Projekt ECO-SANDWICH**

Projekt preporučen za financiranje u okviru fonda CIP-EIP-Eco-Innovation-2011 pod naslovom ENERGY EFFICIENT, RECYCLED CONCRETE SANDWICH FACADE PANEL - ECO SANDWICH [20]predstavlja razvoj predgotovljenog ventiliranog zidnog panela od recikliranog betona i ekološke mineralne vune. Ovaj fasadni panel namijenjen je za obnovu postojećih i gradnju novih zgrada prema standardu nisko-energetskih i pasivnih zgrada. Panel se sastoji od 4 sloja:

* unutarnji nosivi sloj od armiranog betona s recikliranim agregatom (debljine 12 cm)
* ekološka mineralna vuna ECOSE® (debljina 20 cm)
* ventilirajući sloj (debljine 2 cm)
* vanjski sloj betona od armiranog betona s recikliranim agregatom (debljine 6 cm)

U svrhu postizanja traženih fizikalnih, mehaničkih i toplinskih svojstava provedena su ispitivanja dvije vrste betona s recikliranim agregatom: za unutarnji nosivi sloj ispitan je beton s recikliranim agregatom od betona, a za vanjski sloj ispitan je beton s recikliranim agregatom od drobljene opeke kojim se postižu i dekorativni zahtjevi.

Ispitana su sljedeća svojstva: gustoća, tlačna čvrstoća, toplinska provodljivost (HRN EN 12667:2002 i HRN ISO 8302:1998) i paropropusnosti (HRN EN ISO 12572:2002; uvjet C).

Sastavi betona i rezultati ispitivanja prikazani su u tablicama 4. i 5. i na slici 3

**Tablica 4:** Sastavi betona izrađenog s recikliranim agregatom

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Komponenta | Unutarnji sloj | Vanjski sloj |
| Masa za 1 m3 betona (kg) |
| CEM II/ A-S 42,5 R | 380 | 400 |
| Voda | 160 | 170 |
| Superplastifikator | 1,14 | 1,14 |
| Pijesak prirodni 0/4 mm | 462 | 462 |
| Pijesak drobljeni 0/4 mm | 486 | 486 |
| Reciklirani beton 4/8 mm | 211 | - |
| Reciklirani beton 8/16 mm | 600 | - |
| Reciklirana opeka 4/8 mm | - | 211 |
| Reciklirana opeka 8/16 mm | - | 600 |

**Tablica 5.** Rezultati ispitivanja betona izrađenog s recikliranim agregatom

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| SVOJSTVO | Unutarnji slojreciklirani beton | Vanjski slojreciklirana 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/m3) | 2105 | 1971 |
| Relativni otpor difuziji vodene pare (m) | 1,77 | 1,40 |
| Faktor otpora difuziji vodene pare  | 37 | 29 |
| Toplinska provodljivost (W/mK) | 0,858 | 0,746 |

Slika 3. Rezultati ispitivanja prirasta tlačne čvrstoće betona s recikliranim agregatom

**5. EKSPERIMENTALNI RAD**

Osnovna razlika betona od prirodnog i betona od recikliranog agregata je u postojanju stare, zaostale cementne paste vezane za zrna prirodnog agregata u slučaju betona od recikliranog agregata [21]. Postojanje stare cementne paste negativno utječe na fizičke i mehaničke karakteristike betona od recikliranog agregata. Primjenom krupnijih frakcija recikliranog agregata smanjuje se količina stare cementne paste u odnosu na sadržaj cementne paste vezan za zrna sitnog recikliranog agregata. Povećanje udjela stare cementne paste dovodi do smanjenja gustoće i povećanja apsorpcije recikliranog agregata. Beton od recikliranog agregata ima znatno veću vrijednost apsorpcije što je posljedica zamijene prirodnog agregata recikliranim. Reciklirani agregat ima povećanu poroznost u odnosu na prirodni agregat.

**5.1 Program ispitivanja i odabrani materijali**

U eksperimentalnom dijelu rada korišten je portland cement vrste CEM II/M(S-V) razreda čvrstoće 42,5N proizvođača Holcim. Gustoća cementa je 3,0 kg/m3.

Za potrebe ispitivanja korišten je prirodni agregat frakcija 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm, 16-32 mm, i reciklirani agregat frakcija 4-8 mm, 8-16 mm, 16-32 mm. U sklopu rada provedena su ispitivanja granulometrijskog sastava agregata te su određene količine sitnih čestica prema normi HRN EN 933-1:2003. Također, ispitana je gustoća agregata i apsorpcija vode prema normi HRN EN1097-6:2000.

Program ispitivanja za agregat prikazan je u tablici 6.

**Tablica 6:** Program ispitivanja svojstava agregata

|  |  |
| --- | --- |
| Ispitivanje | Norma |
| Prirodni agregat (0-4 mm; 4-8 mm; 8-16 mm; 16-32) |  |
| Granulometrijski sastav | HRN EN 933-1:2003/A1:2007 |
| Apsorpcija | HRN EN 1097-6:2002 |
| Vlažnost |  |
| Reciklirani agregat (4-8mm; 8-16mm; 16-32 mm) |  |
| Granulometrijski sastav | HRN EN 933-1:2003/A1:2007 |
| Sadržaj sitnih čestica | HRN EN 933-1:2003 |
| Gustoća | HRN EN 1097-6: 2000 |
| Apsorpcija | HRN EN 1097-6: 2000 |
| Vlažnost |  |

Ispitivanje agregata prije izrade betona provedeno je u cilju dobivanja optimalne mješavine frakcija. U eksperimentalnom dijelu rada izrađene su 3 mješavine. I mješavina (referentni beton) izrađena je s prirodnim agregatom, II mješavina - beton s 15 % recikliranog agregata i III mješavina - beton s 30 % recikliranog agregata. Kod betona od recikliranog agregata, prirodni agregat zamijenjen je dijelom frakcije 16-32 mm s 15% za II mješavinu, odnosno 30 % za III mješavinu s recikliranim agregatom.

Ispitivanje gustoće recikliranog agregata i apsorpcije vode provedeno je prema normi HRN EN 1097-6:2000. Podaci o prividnoj gustoći, gustoći suhih, gustoći zasićenih površinski suhih čestica i upijanju vode (kao postotak od suhe mase) nakon uranjanja od 24±0,5h određeni su sukladno s normom.

Rezultati ispitivanja gustoće recikliranog agregata metodom pomoću piknometra za frakcije veličine zrna 4-8 mm prikazane su u tablici 7.

**Tablica 7:** Fizikalna svojstva recikliranog agregata, frakcija 4-8 mm

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Frakcija(mm) | Prividna gustoćačestica(g/cm3) | Gustoća suhihčestica(g/cm3) | Gustoća zasićenih površinski suhih čestica(g/cm3) | Upijanje vode% |
| 4-8 | 2,69 | 2,39 | 2,51 | 4,55 |

Metodom žičane košare ispitane su frakcije veličine zrna 8-16 mm i 16-32 mm. Rezultati su prikazani u tablici 8.

**Tablica 8:** Fizikalna svojstva recikliranog agregata, frakcija 8-16 mm i 16-32 mm

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Frakcija(mm) | Prividna gustoćačestica(g/cm3) | Gustoća suhihčestica(g/cm3) | Gustoća zasićenih površinski suhih čestica(g/cm3) | Upijanje vode% |
| 8-16 | 2,63 | 2,43 | 2,50 | 3,08 |
| 16-32 | 2,63 | 2,43 | 2,51 | 3,13 |

**5.2. Svojstva svježeg betona**

Rezultati ispitivanja konzistencije slijeganjem, gustoće, te poroznosti betona za sve 3 mješavine (I, II, III) prikazani su u tablici 9.

**Tablica 9:** Rezultati ispitivanja svojstava svježeg betona

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | Konzistencija slijeganjem(mm) | Pore (%) | Gustoća,ρ (kg/m3) | Razred slijeganjem (mm) |
| **I Referentni beton** | 30 | 1,2 | 2428,9 | S1 |
| **II Beton s 15% rec. agregata** | 23 | 1,4 | 2370,0 | S1 |
| **III Beton s 30% rec. agregata** | 58 | 1,2 | 2375,0 | S2 |

Mješavina I (referentni beton) i mješavina II (beton izrađen s 15 % rec. agregata) svrstane su u razred S1 (10-40 mm), odnosno mješavina III (beton izrađen s 30 % rec. agregata) u razred S2 (50-90mm).

U tablici 10. prikazani su rezultati ispitivanja svježeg i očvrslog betona za sve 3 mješavine.

**Tablica 10:** Rezultati ispitivanja svojstava svježeg i očvrslog betona

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **I Referentni beton** | **II Beton s 15 % rec. agregata** | **III Beton s 30 % rec. agregata** |
| Konzistencija slijeganjem(mm) | 30 | 23 | 58 |
| Pore (%) | 1,2 | 1,4 | 1,2 |
| Gustoća ρ (kg/m3) | 2428,9 | 2370,0 | 2375,0 |
| Srednja vrijednost tlačne čvrstoćefc (N/mm2) | 39,72 | 39,03 | 38,19 |
| Srednja vrijednost modula elastičnostiE (N/mm2) | 29265,8 | 27824,9 | 27557,4 |

Na slici 4. prikazane su srednje vrijednosti modula elastičnosti i tlačne čvrstoće betona za svaku mješavinu.

Slika 4. Srednje vrijednosti modula elastičnosti i tlačne čvrstoće

Na slici 5 je prikazana je snimka uzorka betona od recikliranog agregata pomoću optičkog mikroskopa na kojem su uočljiva zrna recikliranog agregata sa starom cementnom pastom.



Slika 5. Beton s 30 % recikliranog agregata

Nakon provedenih ispitivanja i obrade rezultata može se zaključiti sljedeće:

* Reciklirani agregat ima od 2 do 3 puta veću apsorpciju od prirodnog agregata te nešto manju gustoću.
* Udio pora u svježem betonu kao i gustoća približno su jednaki za sve tri mješavine.
* Ispitivanja konzistencije svježeg betona slijeganjem pokazala su nejednolike rezultate. Slijeganje kod prve mješavine MI (referentni beton) i druge MII (beton s 15 % recikliranog agregata) je približno jednako, dok je kod treće mješavine MIII (beton s 30% recikliranog agregata) gotovo dvostruko veće u usporedbi s referentnim betonom.
* Rezultati tlačne čvrstoće i modula elastičnosti se poklapaju s podacima iz literature. Iako vrijednosti dobivene ispitivanjem tlačne čvrstoće i modula elastičnosti nemaju velika odstupanja, utvrđeno je da se povećanjem postotka recikliranog agregata njihove vrijednosti smanjuju. Povećanjem udjela recikliranog agregata smanjuje se modul elastičnosti.
* Analizom rezultata utvrđeno je da se zamjenom dijela prirodnog agregata do 30 % recikliranim agregatom ne smanjuje značajno tlačna čvrstoća betona.
* Analizom rezultata utvrđeno je da se zbog heterogene strukture, kod betona s 30% recikliranog agregata modul elastičnosti smanjio približno 6 % u usporedbi s referentnim betonom.
* Kod običnih betona može se zanemariti utjecaj zone sučeljka na modul elastičnosti betona, dok to ne vrijedi za beton s recikliranim agregatom.
* Budući da je čvrstoća betona regulirana svojstvima zone sučeljka, proizlazi da na čvrstoću betona velike promijene u zoni sučeljka mogu imati relativno mali utjecaj. Međutim to ne vrijedi i za druga svojstva betona kao što su krutost i trajnost.

**ZAKLJUČAK**

Pri uporabi recikliranog materijala važna su dva aspekta: troškovi odlaganja otpada i dostupnost i cijena agregata iz prirodnih nalazišta, koji su predvidljivi, dostupni u količini i zadovoljavaju tehničku regulativu. No, ispravno upravljanje građevinskim otpadom doprinosi smanjenju nastalih količina otpada, a reciklirani materijal omogućava građevinskim tvrtkama smanjenje troškova samog građevnog materijala te troškova odlaganja, uz veliki doprinos očuvanju okoliša. Više je razloga za poticanje recikliranja građevnog materijala: provođenje tehničke regulative, omogućavanje ekonomske alternative odlaganju građevnog otpada, obzirom da je recikliranje više održivo i troškovi odlaganja se povećavaju, eliminiranje ilegalnog odlaganja i pripadajućih negativnih utjecaja na okolinu, kontrola odlaganja i troškova transporta te očuvanje prirodnih resursa i smanjenje ovisnosti o prirodnim materijalima.

Važeći propisi i tehnička regulativa svojim odredbama potiču uporabu recikliranih materijala. No, uočeno je da trenutno nedostaju smjernice i norme koje se odnose na korištenje recikliranih materijala. Rješenje tog problema je u izdavanju preciznih uputa, smjernica, specifikacija i opisa načina ugradnje recikliranih materijala za niskogradnju i visokogradnju. Reciklirani materijali moraju biti u skladu s postojećim normama i specifikacijama ili moraju biti razvijene druge nove norme kojima će biti prilagođena kvaliteta recikliranih materijala.

Za veću primjenu u praksi betona s recikliranim agregatom, potrebno je utvrditi korelaciju između svojstava recikliranih materijala i parametara trajnosti relevantnih za beton ugrađen u konstrukciju, odrediti kriterije za uporabu recikliranih materijala u betonskim mješavinama te izraditi preporuke temeljeno na rezultatima eksperimentalnih istraživanja.

**LITERATURA**

[1] Projekt LIFE05 TCY/CRO/000114 CONWAS: Razvoj održivog sustava upravljanja građevinskim otpadom u Hrvatskoj, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2006-2008.

[2] Bjegović, D.; Mikulić, D.; Štirmer, N.; Prutki Pečnik, G.: Razvijanje sustava gospodarenja građevinskim otpadom u Republici Hrvatskoj, IX. Međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom Zagreb 2006., Milanović, Zlatko (ur.), Gospodarstvo i okoliš, 2006. 109-118

[3] Final Report to DGXI, European Comission: Construction and Demolition Waste Management Practices, and Their Economic Impact, report by Symonds, ARGUS, COWI and PRC Bouwcentrum, 1999.

[4] Langer, W.: Sustainability of aggregates in construction. U: J. M. Khatib (ed.), Sustainability of construction materials, Woodhead publishing limited, 2009, 1-30

[5] Strategija gospodarenja otpadom Republike Hrvatske, Narodne novine 130/05

[6] Plan gospodarenja otpadom u Republici Hrvatskoj za razdoblje 2007. – 2015. godine, Narodne novine, 85/07, 126/10, 31/11

[7] Pravilnik o gospodarenju građevnim otpadom, Narodne novine 38/08

[8] HRN EN 12620:2002+A1:2008 Agregati za beton

[9] Štirmer, N.; Bjegović, D.; Rosković, R.: Pilot project for construction and demolition waste recycling in Croatia, Sardinia 2009 - Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium, S. Margherita di Pula - Cagliari, 05-09.10.2009., Cossu, R.; Diaz, L. F.; Stegmann, R. (ed.), CISA Publisher, 2009. 275-276

[10] Terzić; A.; Pavlović, Lj.: Primjena mikroskopskih metoda u analizi mikrostrukture različitih tipova betona sa recikliranim agregatom, Pregledni rad UDK: 666.972.12 = 861 (2009)

[11] Gutiérrez, P.A.; Sánchez de Juan, M.: Utilization of recycled concrete aggregate for structural concrete, Laboratorio Central de Estructuras y Materials (CEDEX), Spain, congress.cimne.upc.es, 2001

[12] RILEM: Report 22, Sustainable raw materials-construction and demolition waste. Edited by Hendriks C.F.; Pietersen H.S; The publishing company of RILEM, 2000.

[13] Bjegović, D.; Štirmer, N.; Mikulić, D.: Construction and Demolition Waste Usage Possibilities, Fifth International Conference on Construction in the 21st Century (CITC-V), “Collaboration and Integration in Engineering, Management and Technology”, May 20-22, 2009, Istanbul, Turkey

[14] Bjegović, D.; Štirmer, N.; Šprajc, H.; Serdar, M.: Preporuke za primjenu recikliranog agregata, X. međunarodni simpozij Gospodarenje otpadom Zagreb 2008, Milanović, Zlatko (ur.), Gospodarstvo i okoliš, 2008., 643-653

[15] Kovač, D.: Beton od recikliranog agregata, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2008.

[16] Bjegović, D.; Štirmer, N.; Serdar, M.: Ecological aspects of concrete production, Second International Conference on Sustainable construction materials and technologies, Ancona, 28-30.06.2010., Zachar, John; Claisse, Peter; Naik, R. Tarunh; Ganjian, Eshmaiel (ed.), Milwaukee: UWM Center for By-Products Utilization, 1483-1492

[17] Sironić, H.: Primjena recikliranih materijala u proizvodnji betona, magistarski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2010

[18] Kesegić, I; Bjegović, D.; Netinger, I.: Upotreba reciklirane opeke kao agregata za beton, Građevinar, Vol. 61, Br.1, 2009.

[19] Miličević, I.; Štirmer, N.; Bjegović, D.: Optimizing the Concrete Mixture made with Recycled Aggregate Using Experiment Design, 9th IASME/WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment (HTE'11), Firenca, 23-25.08. 2011., Lazard, M.; Buikis, A.; Shmaliy, Y. S.; Revetria, R. ; Mastorakis, N. (ur.), WSEAS Press, www.wseas.org, 110-115

[20] ECO-SANDWICH, projekt preporučen za financiranje u okviru fonda CIP-EIP-Eco-Innovation-2011 [21] Vivian W.Y. Tam; Gao, X. F.; C. M. Tam: Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Cement and Concrete Research 35 (2005) 1195– 1203