

MOŽNOSTI UPORABE ODPADKOV V GRADBENIŠTVU IN INDUSTRIJI GRADBENIH MATERIALOV

THE USE OF WASTE MATERIALS IN BUILDING AND CIVIL ENGINEERING

Jana Šelih, Vilma Ducman, Ana Mladenovič, Andrijana Sever Škapin, Primož Pavšič, Matjaž Makarovič, Andraž Legat

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija
jana.selih@zag.si

Prejem rokopisa – received: 2003-11-18; sprejem za objavo – accepted for publication: 2004-02-09

S ponovno uporabo odpadnih materialov dosežemo dva cilja: razbremenimo okolje, saj odpadka ni potrebno odlagati, hkrati pa zmanjšamo potrebo po naravnih virih materiala. Prispevek prikazuje nekatere možne načine uporabe odpadnih snovi v proizvodnji gradbenih materialov, katerih raziskave so potekale na Zavodu za gradbeništvo Slovenije. Obravnavali smo uporabo ciklonskega prahu kot stabilizatorja nevezanih materialov nizke kvalitete v voziščni konstrukciji, kjer rezultati kažejo, da dodajanje ciklonskega prahu bistveno izboljša dinamične lastnosti mešanice. Nadalje prikazujemo možnosti uporabe črne jeklarske žlindre, ki je po mehanskih lastnostih enakovredna erupturni kamnini in tako primerna za najbolj zahtevne aplikacije v cestogradnji. Pri proizvodnji betona lahko namesto konvencionalnega agregata, pridobljenega iz naravnih virov, uporabimo recikliran agregat, pridobljen iz odpadnega drobljenega betona, ali pa uporabimo kot zamesno vodo odpadno vodo iz proizvodnje betona. Dobljeni rezultati kažejo, da na trajnost in mehanske lastnosti betona najbolj vpliva zamenjava drobne frakcije agregata. V proizvodnji opečnih izdelkov lahko uporabimo žagovino, papirni in kameni mulj. Njihova prisotnost v surovem materialu rezultira v povečanju poroznosti, žagovina in papirni mulj pa tudi preprečujeta nastanek sušilnih razpok. Zato se izolativna sposobnost opečnega izdelka poveča. Odpadke industrije polimerov lahko s dodajanjem primernih dodatkov predelamo v materiale z lastnostmi, ki jih lahko prilagajamo zahtevam različnih gradbenih izdelkov.

Ključne besede: odpadne snovi, gradbeni materiali, črna jeklarska žlindra, beton, odpadni polimeri, opečni izdelki

If waste materials can be re-used, then two goals can be attained: demands on natural resources for the materials to produce a new product are reduced, as is the need for landfilling. This paper presents some ways of re-using waste materials in the production of construction materials which have been investigated and found viable on the basis of research conducted at the Slovenian National Building and Civil Engineering Institute. The suitability of EAF (Electric Arc Furnace) cyclone dust derived from the metal-working industry as a stabilising material for loose materials of low dynamic quality was investigated. It was found that the addition of cyclone dust significantly improved the dynamic properties of such mixtures. The possible use of steel slag, which is comparable to igneous rocks in terms of its mechanical properties, is then discussed. Steel slag can be used in very demanding applications, e.g., in road construction. Conventional aggregate produced from virgin materials can also be replaced by recycled rubble-based aggregates, and water which has been recycled in the production of concrete can be used as a mixing water. The properties of concrete prepared using these recycled constituent materials were compared to the properties of reference concrete that contained no recycled components. The results of the tests showed that the substitution of fine aggregate by recycled material has a strong influence on the properties of the concrete. Sawdust, paper and wood sludge can be used in the production of clay products. Their presence in the raw material results in the increased porosity of the product, so that its thermal insulation properties are enhanced. Drying shrinkage, and the cracks associated with such shrinkage, decreases if paper sludge or sawdust is added. Using various additives, waste produced in the polymer industry can be transformed into materials that can be adapted to the different requirements of various building products.

Keywords: waste materials, construction materials, steel slag, concrete, waste polymers, clay products

1 UVOD

V skladu z načeli trajnostnega razvoja se tudi na področju gradbeništva vedno bolj uveljavljajo težnje, da se kar najbolj uporabljajo obnovljivi viri. Mednje prištevamo odpadne snovi, ki so stranski produkt gradbene ali pa drugih industrijskih panog. Med odpadnimi snovmi, ki jih je možno reciklirati v gradbeništvo in industriji gradbenih proizvodov, najbolj pogosto srečamo industrijske odpadke in gradbene ruševine. V Sloveniji je v letu 2000 nastalo okrog 1,500.000 ton industrijskih in 4,800.000 ton gradbenih odpadkov ¹.

V takšno ravnanje nas usmerja tudi slovenska zakonodaja na področju ravnanja z odpadki, ki se v zadnjem času intenzivno spreminja in prilagaja evropski. Področje ureja krovni *Zakon o varstvu okolja* ², ki ga

spremlja okrog 30 podzakonskih aktov, med katerimi so najpomembnejši *Pravilnik o ravnanju z odpadki* ³, *Pravilnik o odlaganju odpadkov* ⁴, *Pravilnik o ravnanju z gradbenimi odpadki* ⁵ in *Uredba o taksi za obremenjevanje okolja zaradi odlaganja odpadkov* ⁶. Spremembe pa so še zlasti pomembne za imetnike odpadkov, ki morajo pridobiti *Oceno odpadka*, ki vsebuje relevantne podatke o vrsti odpadka, na podlagi katerih se lahko odpadki ustrezno deponirajo ³. Proizvajalec odpadnih snovi je stimuliran k iskanju rešitev, ki so alternativa odlaganju na deponijo, saj se mu s tem zmanjša ekološka taksa za obremenjevanje okolja.

Na Zavodu za gradbeništvo Slovenije v zadnjem času intenzivno razvijamo rešitve za uporabo voluminoznih inertnih in nenevarnih odpadkov v gradbeništvo in industriji gradbenih izdelkov. Ti dve panogi sta namreč

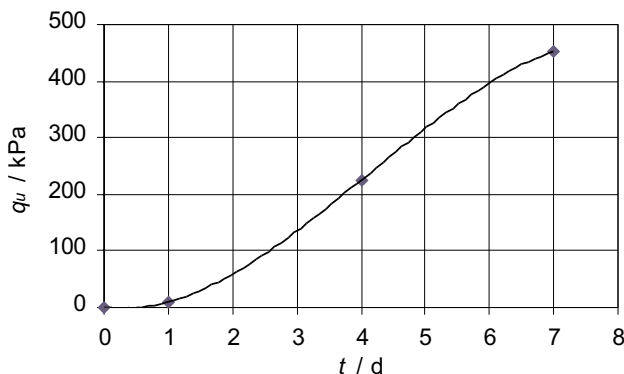
nadvse prikladni za absorbiranje velike količine materialov.

Možnosti za uporabo obstajajo pri nizkih gradnjah (npr. pri vseh fazah gradnje prometnic), v betonih, v opečni industriji in industriji polimerov. Ker načrtujemo gradbene objekte za daljše časovno obdobje, je treba pri uporabi odpadkov v gradbeništvu posvetiti posebno pozornost dolgoročni trajnosti in stabilnosti materialov oz. proizvodov, saj se lahko posledice uporabe nepri- mernih proizvodov pokažejo šele čez mnogo let.

Uspešna uporaba industrijskih odpadkov v gradbeništvu je odvisna od več dejavnikov. Končni namen oz. uporaba zahtevata ustrezne mehanske, trajnostne in druge lastnosti gradbenega materiala, zato ga uvrščamo med najpomembnejše vplivne dejavnike. Prav tako je odločujoč ekonomski vidik, ki se spreminja od države do države in je še zlasti odvisen od stopnje njene razvitosti in dostopnosti naravnih virov. V splošnem je ekonomski dejavnik odvisen od cene odlaganja, cene transporta odpadkov do mesta ponovne uporabe in obstoječih okoljevarstvenih predpisov ⁷ ter morebitnega porasta stroškov zaradi dodatnih analiz, pogostejše tekoče kontrole ali modificiranja tehnologije vgrajevanja v primerjavi z naravnimi materiali.

Pri uporabi recikliranega materiala v gradbenih materialih želi uporabnik (tj. tako graditelj kot končni uporabnik) še pred uporabo pridobiti podatke, ki mu bodo zagotavljali uspešno in varno uporabo materiala in iz nje izdelane konstrukcije. Tako je treba odgovoriti na naslednja vprašanja:

- kakšni so potencialni vplivi nadomestitve konvencionalnega vhodnega materiala z recikliranim na okolje in človekovo zdravje; tu gre zlasti za določevanje vsebnosti radionuklidov ter za analizo vodo- topnih komponent (izlužkov) v recikliranem materialu ⁸;
- ali so materiali, izdelani iz recikliranih komponent, po mehanskih in kemijskih lastnostih enakovredni konvencionalnim – naravnim materialom in



Slika 1: Povečanje tlačne trdnosti mešanice agregata in ciklonskega prahu v odvisnosti od časa vezanja

Figure 1: Dependence of the compressive strength of the aggregate and cyclon dust mixture on the binding time

- ali ima uporaba odpadnih snovi negativen vpliv na trajnostno – dolgoročno obnašanje gradbenega objekta (primer: alkalno-silikatna reakcija oz. nastanek razpok, ki jo spremlja).

Splošen pregled možnih uporab odpadkov v gradbeništvu je podan v ^{9,10}. V pričujočem članku bomo prikazali rezultate in izsledke posameznih raziskav s področja uporabe odpadkov v gradbeništvu, ki smo jih izvedli na Zavodu za gradbeništvo Slovenije.

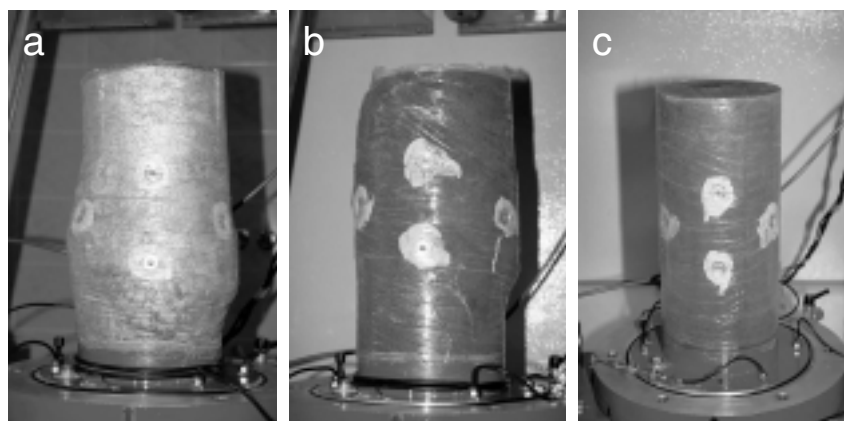
2 UPORABA ODPADKOV PRI GRADNJI PROMETNIC ALI NIZKIH GRADNJAH

2.1 Stabilizacija zemljin in tamponskih materialov z odpadnimi materiali

Pri zemeljskih delih se odpirajo velike možnosti uporabe inertnih odpadnih snovi, s katerimi je možno izboljšati mehanske lastnosti zemljin in agregatov. Sem spadajo razni pepeli, gradbeni odpadki, žindre, livarski peski in drugo.

Elektrofiltrski pepel je v zemeljskih delih že našel svojo uporabnost. Najpogosteje ga uporabljamo za stabilizacijo zemljin z visoko mejo židkosti in nizko nosilnostjo. Dodajanje elektrofiltrskega pepela poveča nosilnost zemljine, zato je ni treba odstraniti oziroma jo je možno vgraditi v nasipe. Elektrofiltrski pepel je uporaben tudi kot dodatek za izboljšanje dinamičnih karakteristik nevezanih materialov v voziščni konstrukciji. Takšen primer srečamo pri uporabi nedrobljenega murskega proda, ki je brez dodatkov zaradi svojih slabih dinamičnih karakteristik neuporaben za vgradnjo v nevezane plasti cest za težke in zelo težke prometne obremenitve. Ko mu dodamo elektrofiltrski pepel, pridobimo material, katerega dinamične karakteristike so primerljive z najboljšimi naravnimi agregati v Sloveniji. Podobno uporabnost za stabiliziranje agregatov za nevezane plasti smo opazili tudi pri uporabi ciklonskega prahu, ki predstavlja grobe delce prahu, ki nastaja pri odpraševanju elektro-obločnih peči. Opravljene raziskave uporabnosti kažejo, da z dodatkom ciklonskega prahu nedrobljenemu sejanemu pomurskemurodu povečamo enosno tlačno trdnost q_u (**slika 1**) in izboljšamo njegove dinamične karakteristike.

Izredno pomemben vpliv na dinamične karakteristike kemično stabiliziranega pomurskega proda, kjer si želimo čim manjše trajne deformacije (vrednost A majhna) in visok modul elastičnosti (visoka vrednost E_c), ima čas vezanja (**slika 2**). Po enem dnevu vezanja ne opazimo praktično nikakršnega izboljšanja glede na nestabiliziran preskušane (takojšnja porušitev – **slika 2a**). Po štirih dneh vezanja se lastnosti mešanic že izboljšajo, vendar pa se prekomerne deformacije pojavijo po 15000 ciklih obremenjevanja (**slika 2b**). Po sedmih dneh vezanja pa izkazuje stabiliziran pomurski prod dinamične karakteristike najboljših tamponskih materialov (ni vidnih deformacij – **slika 2c**).



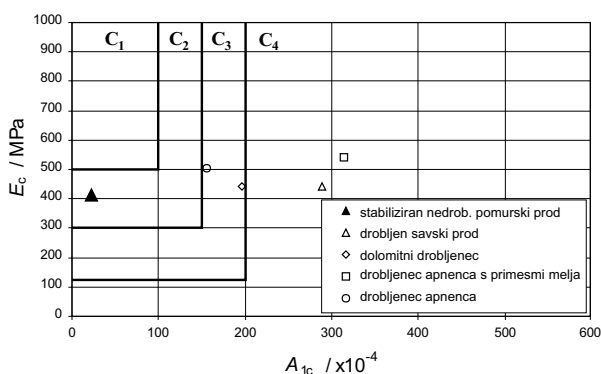
Slika 2: Porušitev preskušanca, pripravljenega z murskim prodom, ki je stabiliziran s ciklonskim prahom, pri dinamični obremenitvi; čas vezanja je a) 1 dan, b) 4 dni, c) 7 dni

Figure 2: Failure of specimens containing gravel from the Mura river, stabilised with cyclone dust, during dynamic loading tests; binding times of (a) 1 day, (b) 4 days, and (c) 7 days

S klasifikacijskim diagramom po francoskem standardu NF P 98-129¹¹ lahko na podlagi karakterističnega modula elastičnosti E_c in karakterističnih trajnih deformacij A_{1c} opredelimo kvaliteto tamponskega materiala, oziroma njegove dinamične lastnosti v vgrajenem stanju pri vlažnosti $w = w_{opt}-2\%$ in zgoščenosti $\rho = 0,97 \rho_{d max}$. Z uporabo diagrama razdelimo materiale v skupine od C1 do C4, kjer predstavlja C1 najvišjo kvaliteto. Kvaliteto stabiliziranega pomurskega proda s ciklonskim prahom smo prikazali na klasifikacijskem diagramu (slika 3) ter jo primerjali z nekaterimi drugimi značilnimi tamponskimi materiali v Sloveniji. Ugotovimo lahko, da je kategorija stabiliziranega nedrobljenega pomurskega proda višja od kategorije drugih prikazanih materialov.

2.2 Uporaba črne jeklarske žindre v cestogradnji

Med pomembne odpadne industrijske materiale spada črna jeklarska žindra, ki nastaja pri proizvodnji



Slika 3: Opredelitev kvalitete stabiliziranega pomurskega proda in nekaterih značilnih tamponskih materialov v Sloveniji na podlagi klasifikacijskega diagrama¹¹

Figure 3: Classification, according to¹¹, of the quality of stabilised gravel from the Mura river and of some typical unbound granular materials found in Slovenia

nelegiranih jekel v elektroobločnih pečeh. V svetu jo v gradbeništvu že dolgo uporabljajo. Količinsko je je namreč razmeroma veliko, zelo ustrezna je z vidika kakovostnih zahtev in razpoložljive tehnologije, poleg tega pa je ta material s stališča ocene odpadka deklariran kot kemijsko inerten.

Poudariti je treba, da je žindra mnogo vrst in da obravnavana nima nič skupnega z bazičnimi jeklarskimi žindrami, ki so se v našem prostoru v preteklosti že vgrajevale, predvsem kot nasipni material. Poškodbe na objektih, ki so nastale zaradi stihijskega vgrajevanja materiala ob hkratnem pomanjkanju ustrezne kontrole, so povzročile razmeroma veliko gospodarsko škodo, kar ima za posledico dejstvo, da ima verjetno ta trenutek pojem "žindra" negativno konotacijo.

V kemijski sestavi črne jeklarske žindre prevladujeta oksida kalcija in železa, poleg tega so količinsko pomembnejši še oksidi magnezija, silicija in aluminija. Glavna minerala sta trikalcijev silikat in wustit, podrejeno se pojavljajo še nekateri drugi aluminati in silikati. Količinsko majhna, toda s stališča volumenske stabilnosti agregata izjemno pomembna, je vsebnost prostega apna in periklaza. Volumenska stabilnost je namreč, poleg neoporečnosti izlužka, ena izmed najbolj kritičnih lastnosti agregata, ki pogojujejo njegovo uporabnost v gradbeništvu. Da bi preprečili pojav volumenske nestabilnosti, je predpisana posebna manipulacija s svežo žindro, s katero se material za določeno časovno obdobje deponira, tako da oba omenjena nestabilna minerala lahko vežeta vodo iz atmosfere in se pretvorita v stabilni komponenti.

Zaradi dobre kristaliničnosti in strukture, ki je nekoliko primerljiva s porfirsko strukturo naravnih eruptivnih kamnin, ima ta vrsta žindre odlične mehanske lastnosti. V tabeli 1 je podana primerjava pri nekaterih ključnih parametrih med agregatom iz črne jeklarske žindre in agregatom iz eruptivne kamnine, ki

po svojih karakteristikah velja za najkvalitetnejši kamninski material.

Predvsem odlične fizikalne lastnosti (dinamična žilavost oziroma odpornost proti obrabi in udarcem, ki je primerljiva ali celo boljša kot pri agregatih iz naravnih kamnin, ter s tem povezane vozne lastnosti) zagotavljajo agregatu iz črne jeklarske žindre široko uporabnost. V cestogradnji velja agregat iz črne jeklarske žindre za visokokakovosten material za obrabne oz. obrabno-zaporne bitumenizirane zmesi, tudi za najbolj zahtevne odseke, kjer je pomembna visoka odpornosti površine asfaltne zmesi proti zaglajevanju. To so vozne površine na kritičnih mestih, kot so črne točke, območja križišč ter zaviralni in pospeševalni pasovi na avtocestah. Pri gradnji cest je sicer možno črno jeklarsko žindro uporabiti tudi za druge plasti cestišča, kot so priprava temeljnih tal, protizmrazovalnih plasti, tamponskih plasti, nasipov, drenažnih plasti ipd. Zaradi visoke prostorninske mase je črna jeklarska žindra idealen material za oblaganje brežin, zlasti pri hidrotehničnih objektih (za regulacijo vodnih poti, valobrane, erozijsko zaščito in urejanje brežin vodotokov). Material je možno pripraviti tudi kot tolčenec za železniške proge.

Poleg že navedenih dejstev so pogoji za uspešno uporabo črne jeklarske žindre v gradbeništvu še: določena kontrola vhodnih surovin pri polnjenju elektroobločne peči, sukcesivno drobljenje odležane žindre v ustreznih drobilnikih, ki zagotavljajo primerno obliko zrn agregata, učinkovito odstranjevanje zaostalega železa in kontrola proizvodnje agregata.

3 UPORABA ODPADNIH SNOVI V PROIZVODNJI BETONA

Beton je kompoziten material, sestavljen iz polnila – agregata, ki zavzema približno 70 % prostornine betona, in veziva. Z odpadnimi snovmi lahko delno ali v celoti nadomestimo tako agregat kot vezivni material.

Konvencionalno uporabljamo za agregat naravno kamnino, to je kamnolomski drobljenec ali pa drobljen rečni prod. Količine agregata, ki ga vgradimo v beton, so zato zelo velike. Med odpadne snovi, potencialno uporabne kot agregat za beton, spadajo recikliran (drobljen) odpadni beton, različne vrste trdnih žlinder, jalovine, odpadna opeka, steklo, stiropor in guma. Zamenjava naravnega agregata z recikliranim lahko vpliva na lastnosti betona v smislu njegovih mehanskih lastnosti, trajnosti in dimenzijske stabilnosti.

Ena od možnosti za uporabo odpadnih snovi v betonu je tudi uporaba *odpadne vode*, ki nastaja pri proizvodnji betona (pranje mešalnikov itd.), pri pripravi betona. Odvisno od čistosti odpadne vode lahko zamesno vodo delno ali v celoti nadomestimo z odpadno.

3.1 Uporaba odpadnega drobljenega betona kot agregat v betonu

Na Zavodu za gradbeništvo Slovenije smo izvedli raziskavo uporabnosti odpadnega drobljenega betona kot agregat v betonu. Z drobljenim odpadnim betonom, ki izvira iz koprške regije, smo zamenjali naravni agregat delno in v celoti. Sestavo betona smo projektirali tako, da smo regulirali konsistenco s spreminjanjem vodocementnega razmerja, pri čemer smo predpisali razred poseba svežega betona S2¹². Pripravili smo več vrst betona, ki so vsebovale a) po eno frakcijo recikliranega agregata in b) recikliran agregat v vseh frakcijah ter referenčen beton, ki vsebuje le naraven agregat.

Vse mešanice so vsebovale enake osnovne materiale. Prav tako so bile enake uporabljene količine cementa in plastifikatorja na kubični meter betona. Največje zrno agregata je bilo 16 mm. Posamezne frakcije agregata so zavzemale 45 % (frakcija 0/4 mm), 20 % (frakcija 4/8 mm) in 35 % (frakcija 8/16 mm) mase celotnega agregata. Izvedena sejalna analiza za vse frakcije je pokazala, da so največje razlike v velikosti delcev pri drobnih (0/4 mm) frakciji, kjer je recikliran agregat vseboval več delcev z velikostjo pod 0,125 mm, ter manj delcev v velikostnem območju od 0,25 do 2 mm.

Ob predpisanem razredu poseba in konstantni količini plastifikatorja se je vodocementno razmerje (v/c) povečalo, ko smo uvedli recikliran agregat (**tabela 2**). Največji porast v primerjavi z referenčnim betonom smo opazili v primeru, ko je vsebovala recikliran agregat drobna frakcija in vse frakcije. Takšno obnašanje je konsistentno z rezultati sejalne analize. V teh dveh vrstah betona smo opazili tudi večjo vsebnost zračnih por. Pri uporabi recikliranega agregata se je tlačna trdnost zmanjšala. V primerjavi z referenčnim betonom se je najbolj zmanjšala v primeru, ko je vseboval beton recikliran droben agregat. Prav tako se je v teh primerih zmanjšala globina prodora vode, ki je merilo za vodoprepustnost betona.

Dobljeni rezultati kažejo, da na lastnosti betona, pripravljene z recikliranim agregatom, najbolj vpliva zamenjava naravnega agregata z recikliranim v drobnih frakciji. Zato je priporočljivo, da se v praksi zamenjuje le grobe frakcije agregata, kjer je velikost zrna večja od 4 mm.

3.2 Uporaba reciklirane vode v proizvodnji betona

Pri proizvodnji betona se porablja velike količine vode za pranje opreme, tj. mešalnika, hrušk ter drugih sestavnih delov opreme. Te količine dosežejo do 100 L na proizveden kubični meter betona¹³. Navadno se po končanem pranju vodo, ki je kontaminirana predvsem s finimi cementnimi in prašnatimi delci, zavrže. Če vsebnost trdnih delcev ni previsoka, lahko takšno odplako ponovno uporabimo kot zamesno vodo v betonu. Ker je v splošnem na voljo premalo podatkov o vplivu odplake na obnašanje betona, se proizvodni obrati njeni uporabi izogibajo.

Tabela 1: Primerjava mehansko-fizikalnimi lastnosti agregata iz črne žlindre in naravnega eruptivnega agregata**Table 1:** The mechanical-physical properties of steel slag aggregate compared to those of natural igneous aggregate

Parameter	Črna žindra	Eruptivna kamnina
Prostorninska masa brez por in votlin, kg/m ³	3100–3600	2800–2900
Masni delež vpitja vode, w/%	0,2–0,8	0,2–0,5
Izguba mase pri preskusu odpornosti proti zmrzovanju in odtaljevanju (25 ciklusov), w/%	0,0	0,0
Izguba mase pri preskusu odpornosti proti zmrzovanju po 5 ciklusih v Na ₂ SO ₄ , w/%	0,0	0,0
Izguba mase pri preskusu odpornost proti obrabi in udarcem (koeficient Los Angeles), w/%	11–15	12–18

Tabela 2: Vodocementno razmerje (v/c) in lastnosti svežega in strjenega betona, ki vsebuje recikliran agregat**Table 2:** The water-to-cement ratio and other properties of fresh and hardened concrete containing recycled rubble-based aggregate

		Vodocem. razmerje v/c	Posed d/mm	Vsebnost zraka p/%	Prost. masa ρ (kg/m ³)	Tlačna trdnost f_c /MPa	Globina prodora vode h/mm
Frakcija, ki vsebuje recikliran agregat	- (*)	0,43	80	1,7	2444	53,3	32
	0/4	0,74	50	2,7	2275	31,1	25
	4/8	0,62	90	1,9	2375	44,9	15
	8/16	0,64	60	1,9	2338	48,8	13
	vse	0,90	70	3,4	2110	31,3	27

(*) referenčen beton

Tabela 3: Lastnosti svežega in strjenega betona, pripravljene z vodovodno in reciklirano odplako**Table 3:** The properties of fresh and hardened concrete containing tap and recycled water

Vrsta vode	Vodocem. razmerje v/c	Posed d/mm	Vsebnost zraka p/%	Prost. masa ρ (kg/m ³)	Tlačna trdnost f_c /MPa	Globina prodora vode h/mm
Vodovodna	0,41	130	7,0	2263	42,6	25,3
Reciklirana	0,40	40	4,8	2325	47,5	15,7

Zato smo izvedli preliminarno študijo vpliva uporabe reciklirane vode na lastnosti betona. V študiji je sodelovalo več slovenskih betonarn; v tem prispevku bomo predstavili le del dobljenih rezultatov. V vsaki sodelujoči betonarni smo odvzeli vzorec odplake ter pripravili vzorce iz betona, ki je vseboval a) čisto in b) reciklirano vodo. Uporabili smo eno od pogostejše uporabljenih sestav betona ter osnovne materiale, ki jih betonarna uporablja tudi sicer.

Analiza vode v izbrani betonarni je pokazala, da sta bila tako gostota kot pH reciklirane odplake višja kot v primeru vodovodne vode. Parameter pH in gostota reciklirane vode sta bila 11,4 in 1,03 kg/L, njena sestava pa je ustrezala standardu SIST EN 1008¹⁴. Sestavi betonov, ki sta vsebovali vodovodno oz. reciklirano vodo, sta bili skoraj enaki. Manjše razlike so se pojavljale le v zrnastosti sestavi agregata. Betonski mešanici sta bili pripravljene s 390 kg/m³ cementa ter sta bili plastificirani in aerirani. Lastnosti svežega in strjenega betona so zbrane v **tabeli 3**. Ugotovimo lahko, da je zamenjava vodovodne vode z reciklirano precej povečala konsistenco oz. zmanjšala posed svežega betona, rahlo zmanjšala vsebnost zraka in temu ustrezno povečala prostorninsko maso svežega betona. Vse te vplive lahko pripišemo povečani količini finih delcev v betonski

mešanici. Pri obravnavanih lastnostih strjenega betona lahko pri uporabi reciklirane vode opazimo porast tlačne trdnosti (okrog 10 %) in zmanjšano globino prodora vode oz. zvečano vodotesnost betona.

4 UPORABA ODPADKOV V OPEČNI IN KERAMIČNI INDUSTRIJI

Osnovna surovina v keramični industriji je glina. Za eventualno korekcijo njenih lastnosti je glini pogosto treba dodati tudi druge surovine, npr. pustila, pigmente. V ta namen je včasih mogoče uporabiti tudi različne industrijske odpadke, saj lahko:

- pozitivno vplivajo na proces in/ali končne lastnosti proizvoda (npr. papirni mulj, žagovina, kamni mulj..) in
- znižajo stroške na račun nadomestila osnovnih surovin z odpadki (npr. kamni mulji, če vsebujejo znaten delež gline).

Pri tem njihovo dodajanje le neznatno vpliva na proces in končne lastnosti proizvodov. Poleg tega, da s tem obvarujemo naravne vire in učinkovito uporabimo odpadke, lahko na takšen način omogočimo odstranjevanje nekaterih nevarnih odpadkov brez škodljivega vpliva na okolje.

Tabela 4: Pregled izbranih mas z različnimi dodatki žagovine in/ali papirnega mulja ter lastnosti pri oblikovanju in po žganju**Table 4:** Overview of selected test mixtures prepared with various admixtures (sawdust, paper sludge), and the average properties of laboratory-prepared test specimens

MASA		1	2	3	4
Prostorninski delež gline, $\varphi_G/\%$		100	70	70	80
Prostorninski delež dodane žagovine, $\varphi_Z/\%$		-	30	-	15
Prostorninski delež dodanega papirnega mulja, $\varphi_P/\%$		-	-	30	5
OBLIKOVANJE					
Masni delež vode na suho maso, $w_v/\%$		26,9	34,7	34,5	30,2
SKRČEK PRI SUŠENJU, $\varepsilon/\%$					
Prizme	vzdolžno	7,7	7,2	8,6	7,1
	prečno	6,4	7,5	9,6	6,7
TEMPERATURA ŽGANJA, $T_{zg}/^\circ\text{C}$					
		850	920	920	920
NAVIDEZNA GOSTOTA, $\rho_{nav}/(\text{kg}/\text{dm}^3)$					
		1,81 (*1,85)	1,44	1,59	1,63
MASNI DELEŽ VPITE VODE, $w_{vp}/\%$					
		16,7	30,5	24,9	22,2
TLAČNA TRDNOST, f_c/MPa					
		23,9	10,7	29,3	23,4

* $T_{zg} = 920^\circ\text{C}$

Za določitev ustreznosti odpadka v proizvodnji opečnih ali keramičnih izdelkov je treba določiti lastnosti same gline ter odpadka ter nato oceniti, kako določen odpadke vpliva na proces in končne lastnosti proizvoda. Na Zavodu za gradbeništvo Slovenije smo preverili uporabnost odpadne žagovine, papirnega mulja ter kamenega mulja iz proizvodnje kremenčevega peska. Podrobnejši prikaz, kako posamezni dodatki vplivajo na lastnosti osnovne gline, smo podali v prispevkih ^{15,16}. V nadaljevanju podajamo kratek pregled vpliva posamičnih dodatkov.

4.1 Dodatek žagovine in/ali papirnega mulja

Žagovino in/ali papirni mulj dodamo opekarskim glinam zato, da med žganjem zgorijo in tvorijo pore, ki izboljšujejo toplotno izolativne lastnosti izdelka. Istočasno pa vlaknata struktura žagovine in papirnega mulja pri sušenju preprečuje nastanek sušilnih razpok ¹⁷⁻¹⁹.

Pri dodatku papirnega mulja in žagovine smo vzeli pusto glino iz proizvodnje modularnih blokov. Papirni mulj je bil pripravljen v obliki filtrne pogače, kjer je bila pribl. četrtnina snovi gorljivih, druge sestavine pa so bile kalcit in glineni minerali. Uporabljena lesna žagovina je bila suha in sipka z velikostjo delcev pretežno med 0,2 mm in 1 mm. Preskušance v obliki prizem smo pripravili po mokrem postopku v vakuumskem ekstrudorju.

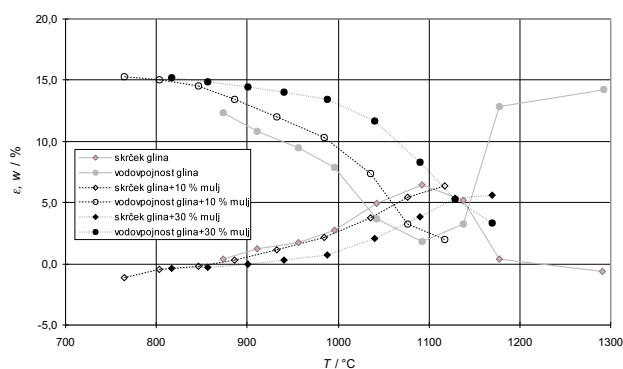
Iz **tabele 4** je razvidno, da dodatek žagovine in papirnega mulja precej zviša potrebno vsebnost vlage med oblikovanjem, zaradi česar je pričakovati tudi večje skrčke med sušenjem, kar je še posebej izrazito v primeru 30-odstotnega dodatka papirnega mulja. Z dodatkom žagovine se navidezna gostota po žganju zelo zniža, saj vnese žagovina v strukturo znaten delež por; za samo glino je gostota 1,85 kg/dm³, medtem ko je za vzorec s prostorninskim deležem 30 % dodatka žagovine 1,44 kg/dm³. Vzorec z dodatkom papirnega mulja s prostorninskim deležem 30 % pa ima navidezno gostoto 1,59 kg/dm³. Papirni mulj ima namreč večjo nasipno

maso in višji delež negorljivih substanc, in tako je delež vnešenih por nižji. Bistvena lastnost, na katero moramo biti pozorni pri gradbenih opečnih elementih, je tlačna trdnost; z vnosom por v strukturo namreč znižamo mehanske lastnosti. Tlačna trdnost se pri 30-odstotnem prostorninskem deležu dodatka žagovine zniža za 55 %. Dodatek papirnega mulja (masa 3) sicer izboljša mehanske lastnosti (delno verjetno tudi na račun kalcita ²⁰), vendar poslabša skrčke med sušenjem. Mislimo, da je optimalne lastnosti mogoče doseči s kombinacijo obeh dodatkov; v našem primeru s 15 % žagovine in 5 % odpadnega papirnega mulja (masa 4).

4.2 Dodatek kamenega mulja

Kameni mulj smo dodali glini, ki je precej plastična ("mastna") in za oblikovanje in ugodno sušenje potrebuje t. i. pustila. Za takšen namen se lahko uporablja kremenov pesek ali kameni prah ²¹. V našem primeru smo uporabili kameni mulj, ki ostane pri separaciji kremenovega peska in vsebuje zelo fine delce kremenovega peska (masni delež pribl. 70 %) ter glino in glinence. Preskušance v obliki prizem smo pripravili po mokrem postopku v vakuumskem ekstrudorju.

Vpliv dodajanja kamenega mulja na skrček in vodovpojnost je prikazan na **sliki 4**. Ugotovimo lahko, da že dodatek masnega deleža 10 % nekoliko zniža skrčke med žganjem in opazno zviša vpijanje vode. Dodatek 30 % vpliva na omenjeni lastnosti še izraziteje. Iz poteka krivulje za glino lahko sklepamo, da ima preskušana glina kratek interval med klinker- (masni delež vpite vode 6 %) in sinter-točko (masni delež vpite vode 2 %), in sicer od 1017 °C do 1071 °C, kar pomeni, da v primeru žganja nad pribl. 900 °C potrebuje t. i. odpiralni reagent oziroma pustilo, ki ta interval podaljša. Hitro upadanje vpijanja vode namreč praviloma pomeni tudi povečevanje skrčka, zaradi česar lahko pride do deformacij izdelka. Iz poteka krivulje za maso z dodatkom 30 % mulja je razvidno, da le-ta deluje kot



Slika 4: Potek skrčka (ϵ) in vpijanja vode (w) gline ter gline z dodatki mulja v odvisnosti od temperature žganja (T)

Figure 4: Shrinkage (ϵ) and water absorption (w) of clays containing different types of sludge versus firing temperature (T)

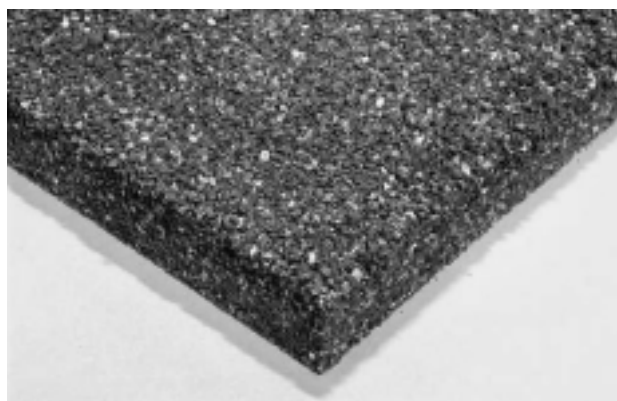
odpiralni reagent, saj zviša klinker-točko iz 1017 °C na 1075 °C, in sinter-točko od 1071 °C nad 1200 °C (ocenjeno z diagrama). Kameni mulj sicer pozitivno vpliva na skrčke med sušenjem in žganjem, prav tako podaljšuje interval med klinker- in sinter-točko, vendar zvišuje poroznost žganih izdelkov in s tem posledično povzroči znižanje mehanskih lastnosti. Prav zato je treba najti optimalno količino dodatka. Po naših laboratorijskih ocenah je v tem primeru masni delež celo do 30 %, vendar bo to treba potrditi še z industrijskimi preskusi.

5 UPORABA ODPADKOV INDUSTRIJE POLIMEROV

Odpadne polimere je možno reciklirati tako, da jih kombiniramo z drugimi materiali (denimo s polimeri z enako ali kompatibilno sestavo) tako, da dobimo nov, uporaben material. Pripravili smo vrsto novih materialov s kombinacijo poliuretanskih (PU) odpadkov, ustreznih polimerov ter manjših dodatkov za izboljšanje lastnosti končnega izdelka. Pri tem so bili naši ciljni izdelki materiali, ki bi bili uporabni v gradbeništvu, denimo za toplotno in zvočno izolacijo, zaščito hidroizolacije ali podlago športnih podov.

Pomemben korak v reciklažnem postopku je priprava odpadnega materiala. Če so odpadki trden material, jih je treba tako predelati, da dobimo delce ustrezne oblike, ustrezne velikosti, porazdelitve velikosti ipd. Ugotovili smo, da za pripravo zgoraj navedenih gradbenih materialov delci PU ne smejo biti večji od 4 mm. Za pripravo določenih izdelkov je treba kontrolirati tudi druge parametre odpadnega materiala, kot so vlažnost, specifična masa in druge mehanske lastnosti.

Naslednji korak je izbira materiala, ki ga nameravamo dodati odpadnemu materialu. Ta izbira je odločilnega pomena, saj dodani material mehansko poveže odpadne delce in s tem določi funkcionalnost in lastnosti končnega produkta. Izbira dodanega polimera je odvisna tudi od tehnološkega postopka, ki ga uporabimo pri



Slika 5: Plošča, izdelana iz ostankov pri proizvodnji poliuretanskih podplavov – 60 % ostankov recikliranega PU, 40 % nove PU-pene

Figure 5: A slab produced from polyurethane sole waste products (60% waste PU, 40% virgin PU foam)

recikliranju; v našem primeru smo preskusili tako strojni kot ročni način mešanja. Pri strojnem mešanju smo lahko uporabili dodatke, ki hitro reagirajo z odpadnim PU (začetni reakcijski čas do 25 s). Dodatki imajo na končni material različne vplive. Njihova uporaba lahko vodi do:

- materialov z majhno vsebnostjo zraka;
- izboljšanja vezave PU delcev, kar se lahko sklada s povečanjem togosti in trdnosti končnega materiala;
- povečanja elastičnosti in izolacijskih sposobnosti materiala, kar se lahko sklada z znižanjem gostote in trdote.

Pri ročnem mešanju smo morali uporabiti drugačne dodatke, saj do reakcije ne sme priti prej kot v nekaj minutah.

Poleg sestave dodanega polimera vpliva na lastnosti končnega materiala tudi masno razmerje med odpadnim materialom in dodatkom. Žal tega razmerja zaradi tehnoloških razlogov ne moremo vedno izbrati tako, da bi uporabili maksimalen delež odpadkov, ki bi s kemijskega stališča še dopuščal ustrezno reakcijo. Pri strojnem dodajanju smo lahko v končni produkt vgradili največ 30 % odpadnega materiala. Pri ročnem dodajanju je bil ta delež znatno višji – do 70 %.

Za izbrani dodatek (ki izboljša izolacijske sposobnosti oz. zmanjša toplotno prehodnost) smo s strojnim procesiranjem izdelali plošče (**slika 5**), pri katerih smo določili nekatere fizikalne lastnosti materiala. Izmerjene vrednosti toplotne prehodnosti (0,045 W/mK), dinamične togosti (od 30 MN/m³ do 35 MN/m³), pa tudi elastičnosti so znotraj meja sprejemljivosti za vgradnjo pod plavajoče pode. Podobno spodbudne lastnosti končnega materiala smo dobili pri ročnem mešanju PU in dodatkov ter ulivanju v kalupe.

6 SKLEP

Podani pregled opravljenih raziskav uporabnosti odpadnih materialov v gradbeništvu in gradbenih materialih kaže, da so možnosti uporabe raznolike in da

so bile raziskave uspešne. V proizvodnji gradbenih materialov je možno uporabiti tudi druge odpadne materiale, vendar smo se v prispevku omejili na opis le nekaterih, ki so bile v zadnjem času izvedene na Zavodu za gradbeništvo Slovenije in s katerimi bi radi ponazorili potek preiskav, kadar se uporabljajo odpadki. V vseh opisanih primerih je bilo treba izvesti preiskave, ki so morale zagotoviti: (a) primernost končnega kompozita, materiala oz. izdelka, izdelanega delno ali v celoti iz odpadnih materialov, za svojo nameravano uporabo in (b) da prisotnost odpadnih snovi ne vpliva škodljivo na okolje in človekovo zdravje. Čeprav so včasih te preiskave nekoliko ekstenzivnejše, je nujno pridobiti zadosti podatkov, da lahko potrdimo nespornost uporabe določenega odpadka v gradbeništvu.

Upoštevati je potrebno tudi ekonomski vidik uporabe teh materialov, to pomeni, usmeriti odpadne materiale v takšne aplikacije, kjer stroški tekoče kontrole ali morebitne dodatne zahteve glede varnosti zaposlenih in uporabnikov ne bodo prebili praga rentabilnosti. Izjemno pomembno je informiranje in ozaveščanje tistih, ki so pristojni za odločanje o uporabi odpadnih surovin (projektanti, nadzorne službe). Prerado se namreč zgodi, da neki material, ki v številnih preiskavah izkazuje absolutno ustreznost za neki namen, zaradi predsodkov in neznanja ostaja na deponiji.

7 LITERATURA

- ¹ www.arso.gov.si/porocila
- ² Zakon o varstvu okolja, UL RS št. 32/93, 1/96
- ³ Pravilnik o ravnanju z odpadki, UL RS št. 84/98
- ⁴ Pravilnik o odlaganju odpadkov, UL RS št. 5/00
- ⁵ Pravilnik o ravnanju z odpadki, ki nastanejo pri gradbenih delih, UL RS št. 3/03
- ⁶ Uredba o taksi za obremenjevanje okolja zaradi odlaganja odpadkov, UL RS 70/01
- ⁷ Samarin, *Wastes in Concrete: Converting liabilities into assets*, Proceedings of the International Seminar, University of Dundee, Scotland, VB, Thomas Telford, 1999, 1–21
- ⁸ A. Mladenovič, N. Vižintin, *Application of metallurgical slags to civil engineering*, Kovine zlitine tehnologije, 29 (1995) 1–2, 144
- ⁹ V. Ducman, *Opadki lahko (ponovno) zaživijo*, Delo, priloga Znanost, 1.7. 2002
- ¹⁰ J. Šelih, *Uporaba odpadnih snovi v gradbenih materialih*. V: *Možnosti uporabe odpadkov: Zbornik 3. strokovnega posvetovanja*, Ljubljana, 19. 9. 2002. Ljubljana: CETERA, 2002, 67–76
- ¹¹ NF P98–129 (1994), *Assises de chaussées – Graves non traitées – Définition – Composition – Classification*, AFNOR
- ¹² SIST EN 206–1, *Beton – 1. del – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost*, SIST, 2003
- ¹³ A. R. Chini *et al*, *Reuse of wastewater generated at concrete plants in Florida in the production of fresh concrete*, Magazine of concrete research, 53 (2001) 5, 311
- ¹⁴ SIST EN 1008, *Voda za pripravo betona – Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona*, SIST, 2003
- ¹⁵ V. Ducman, T. Kopar, *Sawdust and paper-making sludge as pore-forming agents for lightweight clay bricks*, Ind. ceram., 21 (2001) 2, 81
- ¹⁶ V. Ducman, T. Kopar, *Potencial use of waste stone dust in the clay-based industry*, Mater. tehnol., 35 (2001) 3/4, 201
- ¹⁷ K. Junge, *Porous lightweight clay bricks and blocks – A step forward a better environment*, Ziegel Industrie, 1 (1994), 35
- ¹⁸ D. Hauck, E. Jung, *Improvement of the coefficient of thermal conductivity of lightweight clay bricks and blocks*, Annual for Brick and Tile, Structural Ceramics and Clay Pipe Industry, 1991, 108–121
- ¹⁹ K. Junge, N. Pauls, *Pore-forming of lightweight, vertical coring bricks and blocks. Ecological evaluation of the production process*, Annual for Brick and Tile, Structural Ceramics and Clay Pipe Industry, 1994, 90–96
- ²⁰ M. M. Elwan, E. A. El-Alfi, H. El Didamony, *Effect of sand and by-pass cement dust as non-plastic materials in clay bricks*, Ind. Ceram., 21 (2001) 2, 87
- ²¹ U. Hahn, *Possibilities for the use of pulverized natural stone materials in the ceramic industry*, Ziegel Industrie, 9 (1989), 458