



[1] 2013 1[1]

AGG+ часопис за архитектуру, грађевинарство, геодезију и сродне научне области
ACEG+ Journal for Architecture, Civil Engineering, Geodesy and other related scientific fields

238-247

Прегледни научни рад | Review paper

UDK I UDC 624.012.45.04

DOI 10.7251/AGGPLUS1301238B

Рад примљен | Paper received 15/11/2013

Рад прихваћен | Paper accepted 31/12/2013

Гордана Броћета

Архитектонско-грађевински факултет Универзитета у Бањалуци, Војводе Степе Степановића 77/3, Бањалука, gbroceta@agfbl.org

Мирјана Малешев

Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за грађевинарство и геодезију, Трг Доситеја Обрадовића бр. 6, 21000 Нови Сад, Република Србија, miram@uns.ac.rs

Властимир Радоњанин

Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за грађевинарство и геодезију, Трг Доситеја Обрадовића бр. 6, 21000 Нови Сад, Република Србија, radonv@uns.ac.rs

ТЕХНОЛОГИЈЕ
ПРОИЗВОДЊЕ АГРЕГАТА
РЕЦИКЛИРАЊЕМ БЕТОНА

PRODUCTION TECHNOLOGIES OF
RECYCLED AGGREGATE USING
WASTE CONCRETE

Прегледни научни рад
Review paper
Рад примљен | Paper accepted
31/12/2013
UDK | UDC
624.012.45.04
DOI
10.7251/AGGPLUS1301238B

Гордана Броћета

Архитектонско-грађевински факултет Универзитета у Бањалуци, Војводе Степе Степановића 77/3, Бањалука, gbroceta@agfbl.org

Мирјана Малешев

Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за грађевинарство и геодезију, Трг Доситеја Обрадовића бр. 6, 21000 Нови Сад, Република Србија, miram@uns.ac.rs

Властимир Радоњанин

Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за грађевинарство и геодезију, Трг Доситеја Обрадовића бр. 6, 21000 Нови Сад, Република Србија, radonv@uns.ac.rs

ТЕХНОЛОГИЈЕ ПРОИЗВОДЊЕ АГРЕГАТА РЕЦИКЛИРАЊЕМ БЕТОНА

АПСТРАКТ

Савремени трендови у градитељству, који подразумевају очување природне средине у смислу правилног располагања природним ресурсима, намећу рециклажу експлоатисаних материјала као могућност одрживог рјешења.

У раду су анализирани технолошки поступци и материјални ресурси процеса производње агрегата од отпадног бетона, као и адекватност њихове примјене према захтјевима у погледу квалитета производа. Према тренутном стању у привреди, показује се да конвенционални начини рециклирања бетона у мобилним или стационарним постројењима омогућавају добијање агрегата вишеструке функционалности – за израду подлога за путеве, насипа, разних врста испуна, али и за справљање нових бетонских мјешавина, док напредне технологије рециклирања, које омогућавају добијање агрегата квалитета еквивалентног природном, подразумевају веће утрошке енергије, чиме се доводи у питање њихова еколошка и економска исплативост. Поред агрегата, наводи се и могућност примјене минералног праха, као продукта предметне технологије.

Кључне ријечи: грађевински и демолирани отпад, рециклирани агрегат, технологија производње

PRODUCTION TECHNOLOGIES OF RECYCLED AGGREGATE USING WASTE CONCRETE

ABSTRACT

Contemporary trends in the building development, which imply the preservation of the natural environment in terms of the proper disposal of natural resources, impose the exploited, recycled materials as an opportunity for sustainable solutions.

This paper studies the technological processes and material resources of the production processes of aggregates from the waste concrete, as well as the appropriateness of their application to the requirements in terms of quality of the product. According to the current situation in economy, it is shown that conventional ways of recycling concrete in a mobile or stationary plants, give the aggregate the multiple functionalities - to create a roadbeds, embankments, various types of fillings, but also for the preparation of new concrete mixtures. On the other hand, advanced recycling technologies, that provide us with quality equivalent natural aggregate, imply the higher energy consumption, which brings into question their ecological and economic viability. In addition to aggregate, it has been stated the ability to apply the mineral powder, as a product of the respective technology.

Key words: Construction and Demolition Waste, Recycled Aggregate, Production Technologie

1. УВОД

Грађевински отпад, добијен као продукт грађења нових или планског рушења постојећих објеката или рушења као посљедице природних катастрофа заузима значајан проценат укупне количине отпада – продукта људске активности. Истраживања показују да је количина свакодневно произведеног тзв. грађевинског и демолираног отпада значајно већа од количине свакодневно произведеног комуналног отпада, те да је у земљама са израженом стопом градње нових објеката наведени однос и до 1 : 4. Као одрживо рјешење везано за проблем евидентно велике количине грађевинског отпада и исцрпљивања налазишта природних агрегата показао се ефикасним поступак рециклирања депонованих грађевинских материјала, и то првенствено бетона.

Рушење постојећих објеката представља прву фазу рециклирања грађевинског отпада, којем се приступа плански и селективно, како би се у што већој мјери смањило мијешање различитих врста отпадног материјала – бетона, опеке, челика, стакла, дрвета и др. Детаљнија селекција, нарочито ако се о томе није довољно водило рачуна при рушењу, неопходно је да се изврши и у постројењу за рециклажу, при чему се различити материјали складиште одвојено. Такође, приликом рушења потребно је експлоатисани материјал свести на димензије од 0,4 m до 0,8 m, што се уобичајено ради хидрауличким чекићима и пулвајзерима, као на слици 1.



Слика 1. Рушење вијадукта хидрауличким чекићем и пулвајзером [1]

2. ПОСТРОЈЕЊА ЗА РЕЦИКЛАЖУ

Постројења за рециклажу агрегата могу бити мобилна и стационарна [2], при чему се значајно не разликују од дробилишних постројења за производњу агрегата из природних налазишта. Наиме, постоје примјери из праксе гдје се рециклажа детаљно селектованог отпадног бетона врши у дробилицама за природни агрегат – као што је то конкретно примјер у Републици Српској – гдје се рециклира отпадни бетон из фабрике за префабрикацију и лабораторије за испитивање материјала, који се још увијек у конкретним примјерима експлоатише једино за израду подлога за путеве.

Технологија производње рециклираног агрегата подразумева дробљење комада отпадног бетона на зрна одговарајућих гранулација, што значи да су двије основне операције – дробљење и просијавање. У зависности од контаминираниости отпадног материјала и намјене агрегата који се производи, технолошки процес се још састоји од одвајања металног материјала магнетним сепаратором, ручног или механичког уклањања страних материја и прања или ваздушног продувавања финалног производа.

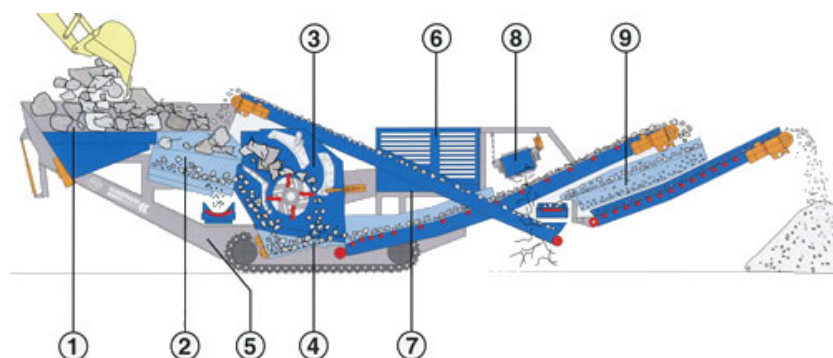
2.1. МОБИЛНА РЕЦИКЛАЖНА ПОСТРОЈЕЊА

Мобилна рециклажна постројења имају уобичајено нижи ниво обраде отпадног материјала у односу на стационарна рециклажна постројења јер не омогућавају додатну обраду у смислу прања или ваздушног продувавања, тако да квалитет агрегата зависи искључиво од хомогености отпадног материјала. Због наведене лимитираности углавном се користе у случају рушења и поновне изградње на истом мјесту, када се очекује велика количина отпада, као нпр. приликом рушења и поновне изградње великих индустријских објеката, саобраћајница и сл.

Капацитет ових постројења може бити значајно различит – од 200 t/h до 1.500 t/h рециклираног материјала. Њихово кретање обично је обезбијеђено гусјеничним кретним уређајем, мада постоје и модели снабдјевени пнеуматичким уређајем за кретање. Постројења са гусјеничним уређајем за кретање имају робуснију структуру и углавном су опремљена тежим машинама и уређајима, док постројења са пнеуматичким уређајем за кретање морају бити опремљена лакшим машинама и уређајима, па су стога уобичајено и мањих капацитета.

Структура једног типичног мобилног постројења, приказана на слици 2, састоји се од:

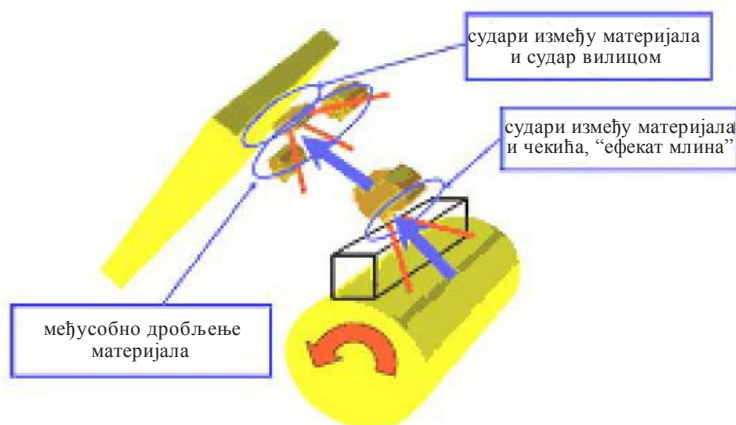
1. утоварног силоса, тј. коша за прихватање отпадног материјала,
2. сита за примарно просијавање ситног материјала,
3. уређаја за дробљење,
4. вибрационог уређаја за пражњење,
5. шасије са уређајем за кретање,
6. напојне јединице – агрегата,
7. електро контролора,
8. магнетног сепаратора израђеног од снажних природних или електро магнета којим се из издробљеног материјала уклањају сви метални дијелови и
9. сита за финално просијавање – одвајање на различите фракције.



Слика 2. Основни дијелови мобилног рециклажног постројења [3, 4]

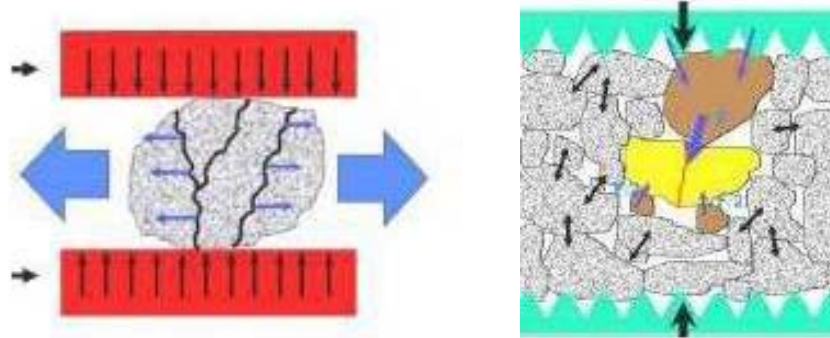
Дробилице представљају најважнији дио сваког постројења, те су стога карактеристике свих пратећих уређаја усаглашене са њиховим карактеристикама. Највећу примјену имају: ротационо-ударне дробилице, чељусне дробилице са ексцентром, конусне дробилице, а посљедњих година све више се на тржишту налазе и центрифугалне ударне дробилице.

Ротационе ударне дробилице су једноставне конструкције (слика 3), састављене од: цилиндричне коморе са улазним отвором на врху и челичном решетком на дну, ротора са хидраулички регулисаним гредама или зглобно везаним чекићима, погонског, трансмисионог и управљачког уређаја и магнетног заштитног уређаја. Одликују се великим квалитетом дробљења, нарочито у погледу облика зрна финалног производа, могућношћу комбиновања код вишефазног дробљења, прецизношћу и економичношћу у раду, те малим трошковима одржавања и ремонтовања.



Слика 3. Механизам лома у поступку дробљења ударном дробилицом [5]

Чељусне дробилице (слика 4) представљају дробилице са навећом примјеном код мобилних постројења гусјеничара за дробљење и просијавање каменог и рециклажног грађевинског отпадног материјала, чије су чврстоће до 300 МПа. Њихова конструкција се састоји од: пирамидалне радне коморе, покретне чељусту, ексцентричног уређаја за ношење и покретање, покретне чељусту, погонског, магнетног, заштитног и аутоматског управљачког уређаја, а одликују се: високим степеном дробљења, кратким оперативним временом готовости, малим трошковима рада и одржавања, великом радном спремношћу у свим климатским и осталим градилишним условима, високим степеном поузданости и сигурности рада, захваљујући аутоматским системима подешавања, управљања и контроле рада.



Слика 4. Механизам лома у поступку дробљења чељусном дробилицом [5]

Конусне дробилице се такође успјешно користе за дробљење и просијавање грађевинског и демолираног отпада чије су чврстоће до 300 МПа. Попут ротационих ударних дробилица, једноставне су конструкције, састављене од: конусне коморе за дробљење, вертикалног вратила са радним конусом, погонског, хидромоторног, трансмисионог, магнетнозаштитног, управљачког и регулационог аутоматског уређаја. Одликује их: велика ефикасност и капацитет дробљења, велика оперативна спремност за рад, велика способност уклапања у различите комбинације и циклусе дробљења, мали трошкови рада и одржавања и јако велики квалитет дробљења, захваљујући аутоматском систему управљања и регулисања процеса дробљења [6].

Према истраживањима спроведеним у Холандији, поређењем зрна рециклираног агрегата, произведеног примјенама ротационо-ударних, чељусних и конусних дробилица, показало се да се чељусним дробилицама постиже најбољи гранулометријски састав рециклираног агрегата – у смислу погодности за поновну употребу у бетонима, да су конусне дробилице погодне за секундарно дробљење, док су ротационо-ударне препоручљиве за производњу рециклираног агрегата који ће се користити као подлога за путеве [7].

Центрифугалне вертикалне дробилице се у новије вријеме све више примјењују, јер представљају једно од најбољих рјешења дробилица за примарно, секундарно и терцијарно отворено или затворено дробљење отпадног материјала, чије су чврстоће до 300 МПа. Принцип дробљења ових дробилица је по систему удара – "зрно на облогу коморе" или "зрно на зрно". Специфичност дробљења "зрно на зрно" огледа се у индиректном и интерактивном дјеловању отпадног бетона у току цјелокупног процеса дробљења. Наиме, избачена под дејством центрифугалне силе, зрна материјала из посебне коморе на врху ротора, ударају прво у зидове коморе за дробљење, а затим у раније разбијена зрна, која су у лету или слободном паду. Ове дробилице су такође релативно једноставне конструкције и углавном су састављене од: храниоца роторне коморе, специјално обликоване коморе за дробљење, вертикалног ротора са пријемном комором на врху, електромоторног погонског уређаја и аутоматског система управљања и контроле рада дробилице. Несумњиво да представљају најсавременије, најекономичније и најперспективније дробилице за мобилна постројења, и то првенствено због: велике ефикасности, изузетно великог учинка и квалитета дробљења у односу на све претходно наведене дробилице, најмањих трошкова дробљења, најмањих трошкова одржавања, ремонтовања и замјене исхабаних дијелова, најбољег

начина комбиновања код вишефазног дробљења и сијања и најмање емисије штетних елемената опасних по околину и радну средину [6].

2.2. СТАЦИОНАРНА РЕЦИКЛАЖНА ПОСТРОЈЕЊА

Стационарна постројења за рециклажу бетона су комплексне механизоване структуре у којима је могуће остварити контролисани ниво квалитета производа, тј. исти не зависи искључиво од хомогености експлоатисаног материјала, пошто се располаже простором за претходно сортирање и привремено складиштење. Наведено утиче на смањење трошкова обраде, јер трошкови рециклаже знатно расту са хетерогеношћу, односно присутношћу за агрегате штетних материјала. Надаље, сепарисање различитих типова отпада омогућује рециклажу не само типичних грађевинских материјала, као што су бетон и керамички материјали, него и дрвета, пластике, стакла и метала у њиховим секторима употребе. Такође, за разлику од мобилних постројења, лоцирају се у густо насељеним подручјима (при чему се води рачуна о избору локације због буке и прашине, као пратећих фактора оваквих постројења), а могу радити са капацитетом производње и до 200 000 тона рециклираног агрегата годишње.

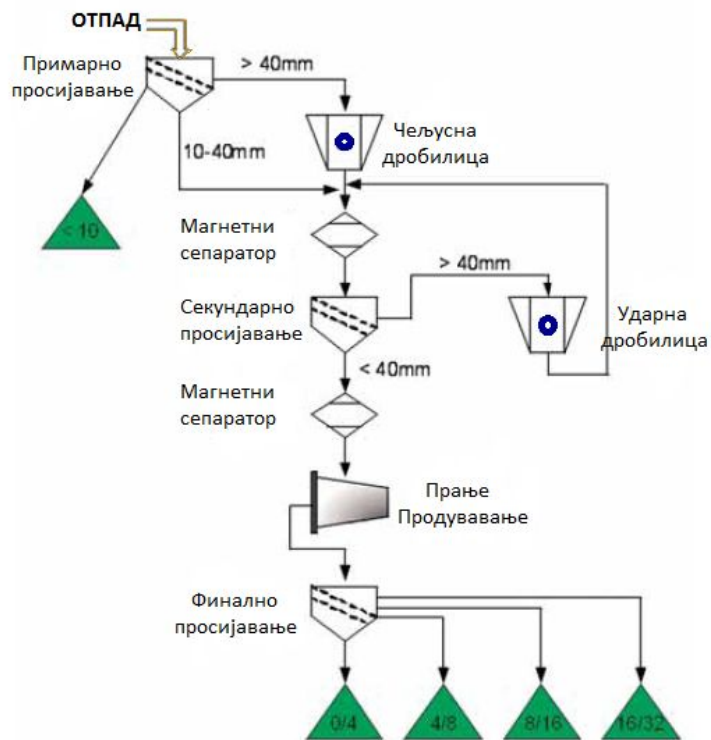
На слици 5 је приказано највеће стационарно постројење за рециклажу отпадног бетона у Европи, које се налази у Амстердаму, у Холандији, а чији је капацитет производње око 700 t/h [2, 3].



Слика 5. Стационарно постројење за рециклажу, Амстердам, Холандија [3]

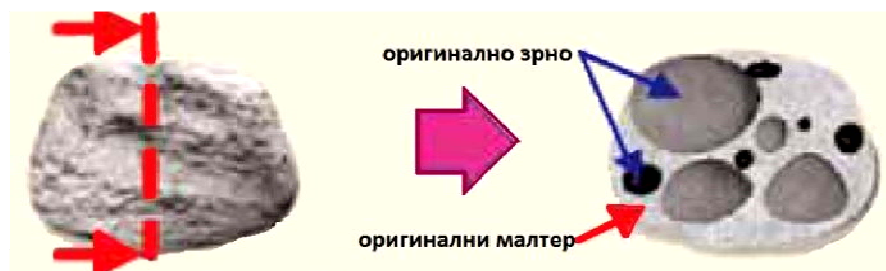
Технолошки поступак типичног стационарног постројења за рециклажу бетона, шематски приказан на слици 6, уобичајено има двије фазе дробљења. Отпадни материјал се у првој, примарној фази просијавања одваја преко косе решетке (грубог сита), величине отвора 40 mm, на крупније комаде који се транспортним тракама одводе до примарних, чељусних дробилица и материјал ситнији од 40 mm, који се након пролаза кроз косе решетке даље раздваја, тако да се још у фази примарног просијавања уклањају фини материјали величине мање од 10 mm, као што је земља, гипс, малтер итд. При томе је важно да је тзв. храњење машина равномјерно, како не би долазило до њиховог преоптерећивања на уштрб квалитета и хомогености, те да су обезбијеђени регулатори, јер се ради о повезивању великог броја машина. Преостали материјал се даље обрађује двоструким дробљењем (најприје, како је већ наведено, чељусним, а накнадно ударним или конусним дробилицама) и двоструком магнетном сепарацијом, те на крају, уклањањем преосталих штетних материја (дрво, пластика, папир, гипс, стакло), прањем или ваздушним продувавањем, а рјеђе и термички (синтеровањем). Поступак суhog уклањања штетних материја – ваздушним

продувавањем (може омогућавати и ручно уклањање заосталих већих комада) – најчешће се користи, али је и најмање ефикасан, јер велика количина прашине изискује посебне мјере заштите. Мокри поступак – прањем – погодан је првенствено за уклањање штетних материја растворљивих у води, при чему је неопходно водити рачуна да се заостали гипс тешко може одстранити овим поступком, јер има тенденцију да експандира у додиру са водом. Генерално, најбољи резултати уклањања непожељних примјеса се постижу комбинацијом наведених поступака. Финални производ може бити и других величина у односу на оне приказане на шеми операција, што зависи искључиво од величина отвора сита.



Слика 6. Шема операција типичног стационарног рециклажног постројења [2]

Зрно рециклираног агрегата, добијено класичним поступком рециклирања, на горе описани начин, састоји се од зрна или дијела зрна природног агрегата и цементног камена оригиналног бетона, који га дјелимично или потпуно обавија, као на слици 7 [2].



Слика 7. Изглед зрна рециклираног агрегата [2]

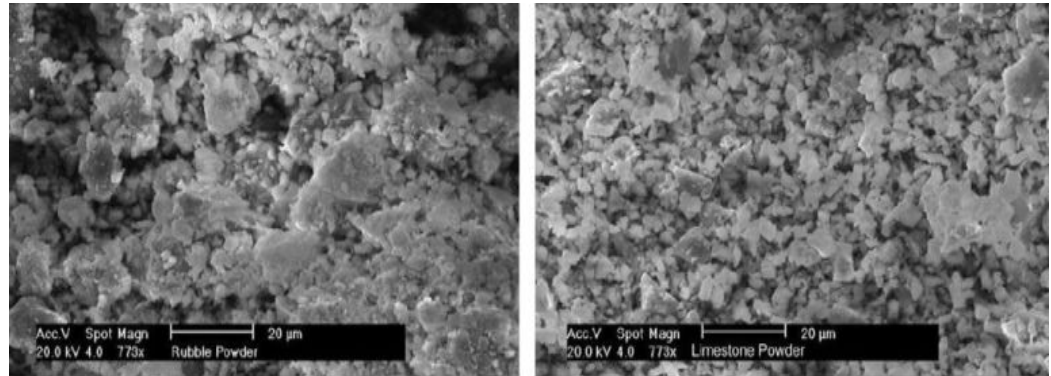
3. НАПРЕДНЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ РЕЦИКЛИРАЊА БЕТОНА

Поред наведене класичне технологије производње рециклираног агрегата, према којој се добија производ који је при компарацији са природним агрегатом нижег квалитета у погледу физичко-механичких карактеристика (првенствено због веће порозности цементног малтера, који потпуно или дјелимично обавија оригинално зрно агрегата), у свијету је посљедњих година развијено и неколико напредних технологија ("HRM", термички третман у ротационој пећи, разни хемијски третмани), чијим је примјенама могуће добити рециклирани агрегат, такав да је по квалитету идентичан агрегату из природних ресурса. Суштина ових технолошких поступака је уклањање оригиналног цементног малтера, односно свођење његовог присуства на најмању могућу мјеру – с обзиром на то да представља мање квалитетан дио зрна рециклираног агрегата.

Метода загријавања и стругања или "HRM" (*Heating and Rubbing Method*) је технологија рециклаже отпадног бетона, развијена у Јапану, према којој се комади старог бетона, претходно сведени на величину зрна до 50 mm, загријавају у пећима на температури од 300°C, услијед које цементни малтер због дехидратације постаје изузетно крт. Надаље се тако загријани бетон транспортује у цилиндрични млин (састављен од унутрашњег и спољашњег цилиндра и челичних кугли) на примарно стругање цементног малтера са зрна агрегата, те се тако одвојени малтер пропушта кроз сита на унутрашњем цилиндру. Даље се добијени крупан агрегат и уклоњени малтер транспортним тракама одводе на стругање у секундарни млин, гдје се очврсла паста са зрна ситног агрегата струже помоћу претходно одвојених зрна крупног агрегата, те се даљим просијавањем добија ситан и крупан агрегат, али и значајна количина финог праха. Количина финог праха, добијеног продувавањем у секундарном млину, обично износи око 30% примјеном предметне технологије, а може се примијенити и као додаток бетону, за стабилизацију тла и сл.

Метода развијена у Европи је слична претходној, само што се загријавање претходно издробљеног и очишћеног старог бетона врши у ротационој пећи на доста вишој температури, од око 700°C (због чега није погодна у случају да су оригинални бетони справљени са кречњачким или силикатним агрегатима), услијед које долази до потпуне дехидратације и дезинтеграције цементног малтера. Помоћу механичке енергије од ротације пећи, цементни малтер практично у потпуности отпада са зрна агрегата, односно на зрнима агрегата остаје свега око 2% цементног малтера. На тај начин се добија чист агрегат еквивалентан природном агрегату, а остатак дехидратисаног цементног малтера се може користити као замјена за дио клинкера у производњи новог цемента. Према овој методи, у односу на претходно описану, знатно је већа искориштеност зрна агрегата, односно количина секундарног продукта је значајно мања – добија се око 13% финог праха од цементног малтера.

Према истраживањима италијанских научника *V. Corinaldesi* и *G. Moriconi*, објављеним 2011. године [8], производ у виду финог праха (SEM снимак на слици 8 – лијево), који је продукт рециклирања бетона, показао се као адекватан додаток самозбијајућим бетонима на бази рециклираног агрегата и то у комбинацији са кречњачким филером (SEM снимак на слици 8 – десно) и електрофилтерским пепелом.



Слика 8. SEM снимак рециклираног праха (лијево) и кречњачког филера (десно) [8]

У табели 1 је приказан хемијски састав и специфичне површине по Блену (*Blaine*-у) прашкастих компоненти примијењених у наведеним истраживањима (цемента, рециклираног праха и кречњачког филера), просијаних кроз сито 0,125 mm.

Табела 1. Примјер карактеристика прашкастих компоненти у самозбијајућем бетону [8]

Физичке и хемијске карактеристике		Прашкасте компоненте			
		Цемент	Рециклирани прах	Минерални додатак	
Специфична површина по Блену		cm ² /g	4200	7300	6100
Оксиди	SiO ₂	%	29,67	84,99	38,70
	Al ₂ O ₃		3,74	4,47	8,02
	Fe ₂ O ₃		1,80	3,91	3,34
	TiO ₂		0,09	0,11	0,12
	CaO		59,25	2,94	40,61
	MgO		1,15	1,10	2,93
	Везани SO ₃ у CaSO ₄		3,25	1,30	1,20
	K ₂ O		0,79	0,77	1,37
	Na ₂ O		0,26	0,41	1,00

Методе које подразумевају различите хемијске третмане класично произведеног рециклираног агрегата у сврху уклањања дијела цементног малтера засноване су на принципу претходног потапања рециклираног агрегата у благе растворе хлороводоничне (HCl), сумпорне (H₂SO₄) или фосфорне киселине (H₃PO₄), обично у трајању од 24 h, на температури од око 20°C, након чега је могуће, испирањем помоћу дестиловане воде, лако одстранити цементни малтер, при чему примјеном оваквих метода уобичајено нема проблема у погледу повећања садржаја хлорида и сулфата у агрегату. Истраживачи са Универзитета у Хонг Конгу [9] установили су да би према тамошњим тржишним приликама третирање 10 тона рециклираног агрегата хемијским поступком износило око 50 евра.

4. ЗАКЉУЧАК

Процесу рециклаже бетона треба приступити плански, почевши од фазе рушења постојећих објеката, у склопу које правовремена и адекватна селекција отпада подрзумијева бољи квалитет финалног производа.

Технологије рециклирања експлоатисаног бетона путем дробилишних постројења омогућавају добијање агрегата задовољавајућег квалитета за његову поновну примјену, при чему је избор између стационарног или дробилишног постројења, као и избор типа дробилица функција низа фактора –локације објекта за рушење, постојања адекватне депоније, захтјева у погледу квалитета новог бетона на бази рециклираног агрегата итд. Постојећа постројења за производњу природног дробљеног агрегата могу се уз адекватну подршку привредне политике мотивисати на рециклажу, с обзиром на то да као такви посједују значајан дио потребне механизације.

Напредне технологије рециклирања, које омогућавају производњу квалитетног рециклираног агрегата потпуно еквивалентног природном, ипак за сада немају ширу примјену, првенствено због тога што је њихов технолошки процес значајно скупљи од процеса класичних технологија, а вјероватно се ни у ближој будућности овај однос неће значајно промијенити, с обзиром на то да су нпр. термички третмани агрегата доста енергетски захтјевни те се губи смисао о одрживом развоју, а такође и стога што класично произведен рециклиран агрегат, уз адекватну примјену, може имати високу функционалност.

5. БИБЛИОГРАФИЈА

- [1] М. К. Prabhakar, "Recycled Concrete Aggregate: An Idea Whose Time Has Come," *The Masterbuilder*, vol. 14, pp. 180–184, 2012.
- [2] С. Маринковић, В. Радоњанин, М. Малешев и И. Игњатовић, "Рециклирани агрегат у конструкцијским бетонима – технологија, својства, примена," *Савремено грађевинарство*, бр. 2, стр. 58–72, 2009.
- [3] <http://www.kleemann.info/en/products/mobile-jaw-crushers/index.php>
- [4] <http://www.rilem.net>
- [5] G. Bressi, G. Volpe and E. Pavesi, *Производња камених агрегата рециклирањем*. Milano: Sarma, Tecnitalia Consultants, 2011.
- [6] С. Мирковић, "Савремена мобилна постројења за дробљење и просејавање каменог материјала," у *Зборник радова Грађевинско-архитектонског факултета бр. 23*, Славиша Трајковић ур. Ниш: Грађевинско-архитектонски факултет, стр. 129–141, 2008.
- [7] К. Јанковић, "Истраживање технолошких поступака за добијање рециклираног агрегата и његова примена," *Материјали и конструкције*, вол. 47, бр. 1–2, стр. 75–90, 2004.
- [8] H. Kuosa, "Reuse of Recycled Aggregates and other C&D Wastes." Research Report, Project – Advanced Solutions for Recycling Complex and New Materials, 2010–2012, VTT-R-05984-12. Technical Research Centre of Finland, Finland, pp. 1–72, 2012.
- [9] W. Y. Tam Vivian, C. M. Tam and K. N. Le, "Removal of Cement Mortar Remains from Recycled Aggregate Using Pre-Soaking Approaches," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 50, pp. 82–101, 2007.