

Analiza primene recikliranih građevinskih materijala u razvoju energetski efikasne infrastrukture

Nazim Manić^a, Veis Šerifi^a, Emir Maslak^a, Alema Mašović^a, Berna Krbuzlić^a

^a Državni univerzitet u Novom Pazaru, Novi Pazar, Srbija

PODACI O RADU

DOI: 10.31075/PIS.72.02.06

Stručni rad

Primljen: 03.04.2026.

Prihvaćen: 16.05.2026.

Korespondent autor: nmanic@np.ac.rs

ORCID ID

Nazim Manić: 0000-0001-8346-8255

Veis Šerifi: 0000-0002-2639-9203

Emir Maslak: 0009-0004-2189-4282

Alema Mašović: 0009-0008-4381-7359

Berna Krbuzlić: 0009-0000-6915-0718

Ključne reči:

Reciklirani građevinski materijali
Energetska efikasnost
Infrastruktura
Održivi razvoj
Cirkularna ekonomija

REZIME

Građevinski sektor predstavlja jedan od najvećih potrošača prirodnih resursa i značajan izvor građevinskog otpada, zbog čega savremeni infrastrukturni projekti sve više primenjuju principe održivog razvoja. Jedan od ključnih pristupa unapređenju održivosti jeste primena recikliranih građevinskih materijala. Ovaj rad analizira ulogu recikliranih materijala, poput recikliranog betona, asfalta, čelika i stakla, u razvoju energetski efikasne infrastrukture. Posebna pažnja posvećena je njihovim tehničkim karakteristikama, mogućnostima primene i uticaju na smanjenje potrošnje energije i emisije ugljen-dioksida tokom životnog ciklusa infrastrukturnih objekata. U radu su razmatrani i faktori koji utiču na energetsku efikasnost, uključujući izbor materijala, projektantska rešenja i savremene tehnologije gradnje. Takođe, prikazani su primeri dobre prakse i identifikovani izazovi u primeni recikliranih materijala u infrastrukturnim projektima. Rezultati ukazuju da integracija recikliranih materijala može značajno doprineti smanjenju ekološkog otiska i unapređenju energetske efikasnosti savremene infrastrukture. Rezultati literature pokazuju da primena recikliranih materijala može smanjiti potrošnju energije u proizvodnji građevinskih materijala za približno 20–75%, u zavisnosti od vrste materijala.

1. Uvod

Savremeni razvoj građevinarstva suočava se sa brojnim izazovima koji uključuju povećanu potrošnju prirodnih resursa, rast količine građevinskog otpada i negativne uticaje na životnu sredinu. Građevinski sektor predstavlja jedan od najvećih potrošača sirovina i energije, ali i značajan izvor otpada. Zbog toga se u savremenim infrastrukturnim projektima sve više primenjuju principi održivog razvoja, koji podrazumevaju racionalno korišćenje resursa, smanjenje emisije štetnih gasova i unapređenje energetske efikasnosti. Jedan od najvažnijih pristupa u postizanju ovih ciljeva jeste primena recikliranih materijala u građevinarstvu. Njihova upotreba omogućava ponovno korišćenje već iskorišćenih resursa, čime se smanjuje potreba za eksploatacijom prirodnih sirovina i količina otpada koja završava na deponijama [1]. U savremenoj građevinskoj praksi najčešće se koriste reciklirani beton, asfalt, čelik, drvo i staklo, koji, nakon odgovarajuće obrade, mogu imati značajnu primenu u infrastrukturnim projektima.

Istraživanja pokazuju da se reciklirani agregati mogu uspešno koristiti u proizvodnji betona, pri čemu dolazi do određenih promena u mehaničkim karakteristikama materijala koje je potrebno uzeti u obzir prilikom projektovanja konstrukcija [2]. Razvoj savremenih tehnologija prerade građevinskog otpada dodatno poboljšava kvalitet recikliranog agregata i proširuje mogućnosti njegove primene [3]. Pored ekoloških koristi, primena recikliranih materijala značajno doprinosi i energetske efikasnosti infrastrukturnih sistema. Proizvodnja primarnih građevinskih materijala zahteva velike količine energije, dok reciklaža omogućava značajne uštede energije i smanjenje emisije ugljen-dioksida tokom životnog ciklusa materijala [4]. Cilj ovog rada je analiza značaja primene recikliranih materijala u infrastrukturnim radovima, sa posebnim osvrtom na njihov uticaj na energetsku efikasnost i održivost građevinskih sistema. U radu su analizirane najčešće vrste recikliranih materijala, njihove karakteristike, prednosti i ograničenja u primeni, kao i njihov doprinos smanjenju potrošnje energije i očuvanju prirodnih resursa.

U radu je primenjena metoda analize relevantne naučne literature i studija slučaja sa ciljem sagledavanja mogućnosti primene recikliranih materijala u infrastrukturnim projektima i njihovog uticaja na energetska efikasnost.

Rad je organizovan na sledeći način: u drugom poglavlju prikazana je metodologija istraživanja, dok treće poglavlje daje pregled najvažnijih recikliranih građevinskih materijala i njihovih karakteristika. U četvrtom poglavlju razmatra se koncept energetske efikasnosti u infrastrukturnim projektima i faktori koji na nju utiču. Peto poglavlje prikazuje primere dobre prakse, dok šesto poglavlje predstavlja studiju slučaja primene recikliranih materijala u infrastrukturnom projektu. U sedmom poglavlju analizirani su izazovi i ograničenja, dok osmo poglavlje razmatra perspektive i budući razvoj ove oblasti. Na kraju rada dat je zaključak.

2. Metodologija istraživanja

U ovom radu primenjena je metoda analize relevantne naučne literature sa ciljem sagledavanja uloge recikliranih građevinskih materijala u unapređenju energetske efikasnosti infrastrukturnih sistema. Analiza je obuhvatila naučne radove, konferencijske publikacije i tehničke izveštaje objavljene u međunarodnim i nacionalnim bazama podataka kao što su Google Scholar, Scopus i Web of Science. Posebna pažnja posvećena je radovima koji se bave primenom recikliranog betona, asfalta, čelika i stakla u infrastrukturnim projektima, kao i njihovim uticajem na energetska potrošnju i emisiju ugljen-dioksida tokom životnog ciklusa objekata. Na osnovu analize literature izvršena je sistematizacija dostupnih saznanja i identifikovani su ključni izazovi i pravci daljeg razvoja u oblasti održivog građevinarstva.

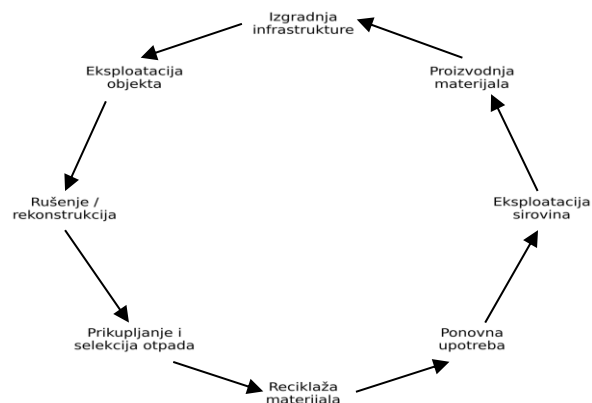
3. Pojam i značaj recikliranih materijala u građevinarstvu

Reciklirani materijali predstavljaju materijale koji su prethodno korišćeni u građevinskim projektima, a zatim su kroz procese prikupljanja, selekcije i obrade ponovo upotrebljeni u novim građevinskim ili infrastrukturnim projektima. Efikasna reciklaža podrazumeva organizovan sistem upravljanja građevinskim otpadom koji omogućava ponovno korišćenje materijala i smanjenje negativnog uticaja na životnu sredinu. Ovakav pristup predstavlja važan element savremenog koncepta održivog razvoja u građevinarstvu, jer doprinosi racionalnijem korišćenju prirodnih resursa i smanjenju količine otpada na deponijama [1]. U savremenoj građevinskoj praksi primenjuje se više vrsta recikliranih materijala koji, nakon odgovarajuće obrade, mogu imati značajnu tehničku i ekonomsku vrednost. Najčešće korišćeni reciklirani materijali su:

- **Reciklirani beton** – dobija se drobljenjem starog betona i koristi se kao agregat u proizvodnji novog betona ili kao materijal za podloge u putogradnji [2].

- **Reciklirani asfalt** – nastaje usitnjavanjem postojećih asfaltnih slojeva i ponovo se koristi u proizvodnji novih asfaltnih mešavina ili rehabilitaciji kolovoza [2].
- **Reciklirani čelik** – proizvodi se topljenjem otpadnog čelika i može se koristiti u konstrukcijama bez gubitka osnovnih mehaničkih svojstava [3].
- **Reciklirano drvo** – koristi se za izradu oplata, nosača i drugih građevinskih elemenata.
- **Reciklirano staklo** – može se koristiti kao dodatak u asfaltu, betonu ili kao sirovina za proizvodnju novih staklenih proizvoda.

Primena recikliranih materijala donosi značajne ekološke i ekonomske koristi, jer doprinosi smanjenju količine građevinskog otpada, očuvanju prirodnih resursa i smanjenju emisije ugljen-dioksida tokom proizvodnje građevinskih materijala. Istovremeno, ovakav pristup podstiče razvoj cirkularne ekonomije u građevinskom sektoru, u kojoj se materijali nakon završetka životnog ciklusa ponovo vraćaju u proces proizvodnje i omogućavaju održiviji razvoj infrastrukturnih sistema [1, 2].



Slika 1. Cirkularni tok građevinskih materijala u infrastrukturnim projektima

3.1. Najčešće vrste recikliranih materijala

U savremenom građevinarstvu primena recikliranih materijala postaje sve značajnija zbog potrebe za smanjenjem eksploatacije prirodnih resursa i smanjenjem količine građevinskog otpada. Razvojem tehnologija za obradu i preradu građevinskog otpada, omogućena je ponovna upotreba različitih materijala, koji, nakon odgovarajuće obrade, mogu zadovoljiti tehničke i eksploatacione zahteve u infrastrukturnim projektima. Najčešće korišćeni reciklirani materijali u građevinskoj praksi su reciklirani beton, asfalt, čelik i staklo. Ovi materijali imaju značajnu primenu u izgradnji i održavanju infrastrukturnih objekata, jer omogućavaju racionalnije korišćenje sirovina, smanjenje troškova izgradnje i manji negativan uticaj na životnu sredinu. U nastavku su prikazane osnovne karakteristike i mogućnosti primene najvažnijih vrsta recikliranih materijala u građevinarstvu. Pregled primene i energetske efekata recikliranih materijala prikazan je u Tabeli 1.

Tabela 1. Pregled primene i energetskih efekata recikliranih građevinskih materijala [2, 4, 5, 6]

Materijal	Tipična primena u infrastrukturi	Energetske uštede	Ekološki efekti
Reciklirani beton	podloge puteva, novi beton, drenažni slojevi rehabilitacija	20–40%	smanjenje eksploatacije agregata
Reciklirani asfalt	kolovoza, nove asfaltna mešavine	30–50%	smanjenje emisije CO ₂
Reciklirani čelik	armatura, mostovi, čelične konstrukcije	do 75%	smanjenje emisije CO ₂
Reciklirano staklo	glassphalt, izolacioni materijali	20–30%	smanjenje otpada na deponijama

3.1.1. Reciklirani beton

Reciklirani beton predstavlja jedan od najznačajnijih sekundarnih građevinskih materijala koji se primenjuje u savremenoj infrastrukturi. Nastaje preradom betonskog otpada dobijenog rušenjem objekata ili rekonstrukcijom postojećih konstrukcija, pri čemu se dobijeni materijal koristi kao agregat u proizvodnji novog betona, ili kao materijal za različite infrastrukturne slojeve. Njegova primena omogućava smanjenje količine građevinskog otpada i racionalnije korišćenje prirodnih resursa, što predstavlja važan aspekt održivog razvoja u građevinarstvu [5]. Proces proizvodnje recikliranog agregata obuhvata drobljenje, prosejavanje i separaciju betonskog otpada, uz uklanjanje metalnih delova i nečistoća. Reciklirani agregat sastoji se od zrna prirodnog agregata obavijenih slojem starog cementnog maltera, zbog čega ima veću poroznost i veću sposobnost upijanja vode u odnosu na prirodni agregat. Kao posledica toga, beton proizveden sa recikliranim agregatom može imati nešto manju zapreminsku masu i smanjenu obradljivost smeše. Istraživanja pokazuju da potpuna zamena prirodnog agregata može dovesti do smanjenja čvrstoće na pritisak za približno 10–15%, dok su čvrstoće na zatezanje i savijanje u mnogim slučajevima slične vrednostima betona sa prirodnim agregatom [5, 7]. Osnovna fizičko-mehanička svojstva betona sa prirodnim i recikliranim agregatom, kao i njihov uticaj na energetske efikasnost, prikazana su u Tabeli 2. Uprkos navedenim ograničenjima, primena recikliranog betona donosi značajne ekološke i ekonomske koristi. Njegova upotreba smanjuje količinu građevinskog otpada, potrebu za eksploatacijom prirodnih agregata i ukupnu potrošnju energije u proizvodnji građevinskih materijala. Reciklirani beton se najčešće koristi u izgradnji podloga i tampon slojeva u putogradnji, pešačkim stazama, prilaznim putevima i drenažnim slojevima. Analize životnog ciklusa pokazuju da upotreba recikliranog agregata može smanjiti emisiju CO₂ i ukupnu ugrađenu energiju građevinskih materijala, čime se doprinosi većoj energetskoj efikasnosti infrastrukturnih sistema [2, 7].

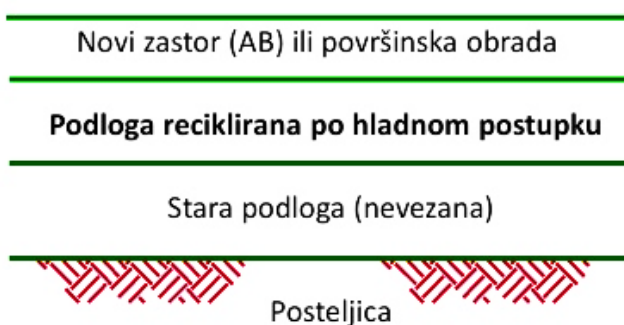
Tabela 2. Poređenje osnovnih svojstava betona sa prirodnim i recikliranim agregatom [5, 7]

Svojstvo	Beton sa prirodnim agregatom	Beton sa recikliranim agregatom	Uticaj na energetske efikasnost
Zapreminska masa	oko 2400 kg/m ³	2100–2300 kg/m ³	manja masa smanjuje energiju transporta
Upijanje vode	≈ 1%	3–10%	zahteva optimizaciju mešavine
Čvrstoća na pritisak	referentna	10–15% manja	prihvatljivo za mnoge infrastrukturne elemente
Modul elastičnosti	standardne vrednosti	nešto niži	mali uticaj na sekundarne konstrukcije
Potrošnja energije pri proizvodnji agregata	visoka	20–40% manja	smanjenje ugrađene energije
Emisija CO ₂	visoka	smanjena	manji ugljenični otisak

3.1.2. Reciklirani asfalt

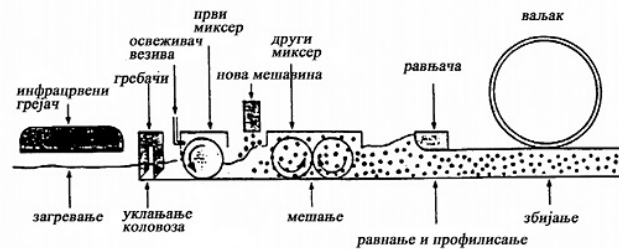
Asfalt predstavlja tehnički proizvedenu smešu bitumenskog veziva, mineralnog agregata i eventualnih dodataka, koja se široko koristi u izgradnji kolovoznih konstrukcija. Reciklaža asfalta podrazumeva ponovnu upotrebu materijala dobijenog uklanjanjem postojećih asfaltnih slojeva, poznatog kao reciklirani asfaltni materijal (RAP), koji se nakon obrade može ponovo koristiti u izgradnji novih slojeva kolovozne konstrukcije. Proces obuhvata uklanjanje postojećeg kolovoza, usitnjavanje materijala, dodavanje veziva i ponovnu ugradnju u kolovoznu konstrukciju [2]. U zavisnosti od temperature pri kojoj se proces odvija, reciklaža asfalta se može podeliti na toplu i hladnu reciklažu. Topla reciklaža podrazumeva korišćenje recikliranog asfaltnog materijala u proizvodnji novih asfaltnih mešavina, uz zagrevanje materijala, čime se omogućava ponovno aktiviranje bitumenskog veziva. Dobijeni materijal se koristi kao deo agregata u novim asfaltnim mešavinama, a postupak se može izvoditi na licu mesta ili u centralnom postrojenju u kontrolisanim uslovima [2] materijala, čime se omogućava ponovno aktiviranje bitumenskog veziva. Dobijeni materijal se koristi kao deo agregata u novim asfaltnim mešavinama, a postupak se može izvoditi na licu mesta ili u centralnom postrojenju u kontrolisanim uslovima [2]. Za razliku od toplih metoda, hladna reciklaža podrazumeva upotrebu recikliranog asfaltnog materijala bez zagrevanja. Materijal se nakon uklanjanja i drobljenja meša sa odgovarajućim vezivima, najčešće bitumenskom emulzijom ili penušavim bitumenom, a zatim ponovo ugrađuje u kolovoznu konstrukciju.

Ovaj postupak se može izvoditi u postrojenju ili direktno na licu mesta, čime se smanjuju transportni troškovi, vreme izvođenja radova i ukupna potrošnja energije [2]. Proces hladne reciklaže na licu mesta obično započinje struganjem postojećih slojeva kolovozne konstrukcije do određene dubine. Nakon toga dodaju se voda, bitumenska emulzija, cement ili drugi stabilizacioni materijali, koji se mešaju sa recikliranim materijalom u specijalizovanim mašinama za reciklažu. Dobijena mešavina se zatim razastire i zbija kako bi se postigla potrebna nosivost i stabilnost kolovozne konstrukcije [1]. Primena recikliranih materijala u kolovoznim konstrukcijama predmet je brojnih savremenih istraživanja, koja potvrđuju mogućnost njihove uspešne primene u asfaltnim mešavinama i stabilizovanim slojevima kolovoza [8].



Slika 2. Kolovozna konstrukcija nakon hladne reciklaže na licu mesta [2]

Iako hladna reciklaža predstavlja ekonomično i ekološki prihvatljivo rešenje, u praksi se mogu javiti određena ograničenja. Među najznačajnijim problemima izdvajaju se otežano homogeno mešanje veziva sa materijalom, neujednačena struktura postojećih kolovoznih slojeva, ograničena kontrola sadržaja vode i smanjena efikasnost zbijanja kod većih debljina sloja. Takođe, pojedine vrste veziva ne mogu se primenjivati u uslovima niskih temperatura ili povećane vlažnosti agregata [2]. Reciklaža asfalta može se sprovesti i u centralnim postrojenjima, gde se reciklirani asfaltni materijal drobi, prosejava i meša sa novim agregatom i vezivima u kontrolisanim proizvodnim uslovima. Prednost ovog pristupa je precizna kontrola granulometrijskog sastava i kvaliteta mešavine, dok su nedostaci dodatni troškovi transporta i skladištenja materijala. U praksi je često ograničen i udeo recikliranog materijala u toplim mešavinama, koji obično ne prelazi oko 50% ukupne mešavine [5]. Poseban oblik reciklaže predstavlja površinska reciklaža po vrućem postupku, poznata kao termoregeneracija. Ovaj postupak podrazumeva zagrevanje postojećeg asfaltnog sloja, njegovo mešanje sa novim vezivom i agregatom i ponovnu ugradnju na istoj lokaciji. Termoregeneracija se najčešće koristi za poboljšanje površinskih karakteristika kolovoza, poput otpornosti na habanje i zaptivenosti, pri čemu se ne utiče značajno na nosivost konstrukcije.



Slika 3. Površinska reciklaža po vrućem postupku (termoregeneracija)- šematski prikaz [2]

Primena tehnologija reciklaže asfalta ima značajan pozitivan uticaj na energetska efikasnost saobraćajne infrastrukture. Ponovna upotreba postojećeg asfaltnog materijala smanjuje potrebu za eksploatacijom, preradom i transportom prirodnih sirovina, koji su energetska zahtevni procesi. Posebno energetska efikasne su hladne metode reciklaže, jer se izvode bez zagrevanja materijala. Pored toga, reciklaža na licu mesta smanjuje transport materijala i rad građevinske mehanizacije, čime se dodatno smanjuju emisije štetnih gasova i ukupna potrošnja energije tokom životnog ciklusa kolovozne konstrukcije [5].

3.1.3. Reciklirani čelik

Reciklirani čelik predstavlja jednu od najznačajnijih sekundarnih sirovina u savremenoj građevinskoj industriji, posebno u oblasti infrastrukturnih radova. Zahvaljujući povoljnim mehaničkim svojstvima i mogućnosti višestruke reciklaže, bez značajnog gubitka kvaliteta, čelik ima važnu ulogu u održivoj izgradnji i razvoju cirkularne ekonomije. Njegova primena naročito je izražena u proizvodnji armaturnog čelika za ojačavanje betonskih konstrukcija, ali i u izgradnji mostova, nadvožnjaka, tunela, elemenata putne i železničke infrastrukture, kao i u vodovodnim i kanalizacionim sistemima, gde se koriste čelični profili, cevi i spojni elementi otporni na mehanička opterećenja i pritisak [3]. Značaj recikliranog čelika ne ogleda se samo u njegovim tehničkim karakteristikama, već i u izraženim ekološkim i ekonomskim prednostima. Njegovom upotrebom smanjuje se potreba za eksploatacijom prirodnih sirovina, smanjuju se troškovi proizvodnje i transporta, a istovremeno se doprinosi ispunjavanju savremenih kriterijuma održivog građenja. Proces reciklaže obuhvata više faza, uključujući prikupljanje, sortiranje, sabijanje, sečenje, topljenje, prečišćavanje i ponovno oblikovanje metala. Prikupljeni metalni otpad se, nakon sortiranja i uklanjanja neodgovarajućih primesa, obrađuje mehanički, a zatim topi u pećima na visokim temperaturama. Nakon topljenja i prečišćavanja, materijal se hladi, očvršćava i priprema za ponovnu upotrebu u proizvodnji novih proizvoda i građevinskih elemenata [3]. Sa aspekta zaštite životne sredine, reciklaža čelika predstavlja jedan od najefikasnijih načina smanjenja negativnih uticaja građevinske i metalurške industrije.

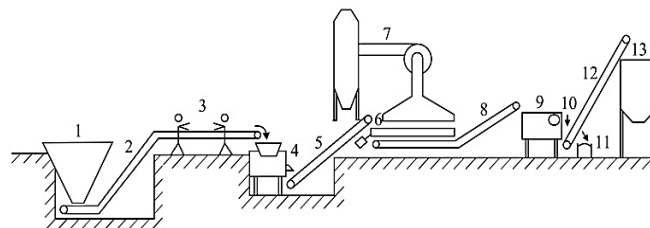
U poređenju sa primarnom proizvodnjom čelika iz rude, sekundarna proizvodnja je energetski efikasnija. Prema dostupnim podacima, reciklažom jedne tone čelika moguće je značajno smanjiti emisiju ugljen-dioksida, ostvariti velike uštede energije i smanjiti potrošnju osnovnih sirovina, kao što su ruda gvožđa i uglj [4]. Pored toga, reciklaža čelika smanjuje količinu otpada koji završava na deponijama i time doprinosi zaštiti zemljišta i podzemnih voda od potencijalnog zagađenja. Poseban značaj čelika u održivom građevinarstvu proizilazi iz činjenice da se može reciklirati više puta bez gubitka osnovnih svojstava, što ga čini jednim od ključnih materijala cirkularne ekonomije. Uvođenjem recikliranog čelika u infrastrukturne i građevinske projekte, postiže se istovremeno očuvanje prirodnih resursa, smanjenje emisija štetnih gasova i visok nivo tehničke pouzdanosti konstrukcija, zbog čega on predstavlja važan element savremenih održivih infrastrukturnih sistema [4].

3.1.4. Reciklirano staklo

Staklo predstavlja materijal koji se može gotovo neograničeno reciklirati bez značajnog gubitka kvaliteta, zbog čega ima važnu ulogu u savremenim konceptima održivog razvoja i cirkularne ekonomije. Reciklaža stakla omogućava smanjenje potrošnje prirodnih sirovina, kao što su kvarcni pesak, soda i krečnjak, kao i smanjenje potrošnje energije i emisije štetnih gasova tokom proizvodnog procesa [6]. U praksi se primenjuju dva osnovna pristupa reciklaži stakla. Prvi pristup podrazumeva ponovnu upotrebu neoštećenih staklenih proizvoda, poput boca i ambalaže, nakon njihovog prikupljanja, sortiranja i pranja. Iako ovaj postupak omogućava očuvanje materijala bez dodatne prerade, njegova primena je ograničena zbog logističkih zahteva i složenosti organizacije sistema povratne ambalaže. Znatno rasprostranjeniji pristup zasniva se na prikupljanju i usitnjavanju otpadnog stakla u tzv. stakleni krš, koji se zatim koristi kao sekundarna sirovina u proizvodnji novih staklenih proizvoda.

Mogućnost višestruke reciklaže stakla zasniva se na njegovim fizičko-hemijskim svojstvima. Pri povišenim temperaturama staklo prelazi u viskozno stanje i može se ponovo oblikovati, dok se hlađenjem vraća u čvrsto stanje bez značajnog gubitka svojih osnovnih karakteristika. Zbog toga je staklo pogodno za tzv. „zatvorenu petlju reciklaže“, u kojoj se materijal može više puta vraćati u proizvodni ciklus. Reciklaža stakla donosi značajne energetske i ekološke koristi. Upotreba staklenog krša u proizvodnji smanjuje potrebnu temperaturu za topljenje sirovina, čime se smanjuje potrošnja energije u proizvodnom procesu. Istovremeno se smanjuje potreba za eksploatacijom prirodnih mineralnih sirovina i količina otpada koja završava na deponijama. Procene pokazuju da reciklaža jedne tone stakla može značajno smanjiti potrošnju primarnih sirovina i energiju potrebnu za proizvodnju novih staklenih proizvoda [6, 9].

Proces reciklaže stakla obuhvata više faza, uključujući prikupljanje, sortiranje, uklanjanje nečistoća, drobljenje i separaciju materijala. Nakon inicijalnog izdvajanja krupnih primesa, otpadno staklo se usitnjava, prosejava i dodatno prečišćava od lakih materijala i metalnih čestica. Dobijeni stakleni krš se zatim skladišti i koristi kao sekundarna sirovina u proizvodnji novih staklenih proizvoda ili drugih građevinskih materijala [6].



Slika 4. Šema tehnološkog procesa reciklaže otpadnog stakla

U oblasti građevinske i saobraćajne infrastrukture reciklirano staklo nalazi sve širu primenu. Jedan od primera predstavlja tzv. „glassphalt“, asfaltna mešavina, koja sadrži usitnjeno reciklirano staklo i koja može doprineti smanjenju upotrebe prirodnog agregata u kolovoznim konstrukcijama. Pored toga, reciklirano staklo koristi se u proizvodnji termoizolacionih materijala, poput staklene vune, koja ima značajnu primenu u energetski efikasnim građevinskim objektima. Primena materijala koji sadrže reciklirano staklo može doprineti i unapređenju energetske efikasnosti urbanih sredina. Na primer, asfaltne mešavine sa dodatkom stakla mogu povećati refleksiju svetlosti i smanjiti efekat urbanog toplotnog ostrva, čime se posredno smanjuje potreba za hlađenjem objekata u urbanim zonama. Na taj način reciklirano staklo predstavlja značajan materijal za razvoj održive i energetske efikasne infrastrukture [9].

4. Energetska efikasnost u infrastrukturnim radovima

Energetska efikasnost predstavlja jedan od ključnih principa savremenog planiranja i izgradnje infrastrukture. U uslovima rastuće potrošnje energije i povećanih zahteva za zaštitom životne sredine, infrastrukturni projekti se sve više projektuju sa ciljem smanjenja potrošnje energije i emisije štetnih gasova. Primena energetske efikasne tehnologije i materijala omogućava racionalnije korišćenje resursa, smanjenje operativnih troškova i povećanje održivosti infrastrukturnih sistema.

Poseban značaj ima integracija savremenih građevinskih materijala, uključujući i reciklirane materijale, koji doprinose smanjenju ukupne potrošnje energije tokom životnog ciklusa infrastrukturnih objekata. Reciklaža građevinskih materijala omogućava značajne energetske uštede u poređenju sa proizvodnjom primarnih sirovina. Tipične energetske uštede pri reciklaži najčešće korišćenih građevinskih materijala prikazane su u Tabeli 3.

Tabela 3. Energetske uštede pri reciklaži različitih građevinskih materijala [4, 5, 10, 11]

Materijal	Tipična primena u infrastrukturi	Prosečna energetska ušteda u odnosu na primarnu proizvodnju	Ekološki efekti
Reciklirani beton	agregat u novom betonu, podloge puteva, drenažni slojevi	20–40%	smanjenje eksploatacije agregata
Reciklirani asfalt (RAP)	nove asfaltne mešavine, rehabilitacija kolovoza	30–50%	smanjenje emisije CO ₂ i potrošnje bitumena
Reciklirani čelik	armatura, konstrukcije, mostovi	do 75%	smanjenje emisije CO ₂ i potrošnje rude gvožđa
Reciklirano staklo	glassphalt, izolacioni materijali	20–30%	smanjenje otpada na deponijama
Guma iz otpadnih pneumatika	modifikovani asfalt, zaštitni slojevi	20-25%	smanjenje otpada i poboljšanje trajnosti kolovoza

4.1. Definicija energetske efikasnosti

Energetska efikasnost u infrastrukturnim projektima podrazumeva primenu metoda, materijala i tehnologija koje omogućavaju smanjenje potrošnje energije tokom izgradnje, korišćenja i održavanja infrastrukturnih objekata. Ovaj koncept obuhvata različite elemente infrastrukture, uključujući puteve, železnice, mostove, tunele, vodovodne i kanalizacione sisteme, kao i javnu rasvetu i objekte javne namene. Usled stalnog rasta potrošnje energije, energetska efikasnost postaje sve značajniji aspekt planiranja infrastrukturnih sistema, jer omogućava racionalnije korišćenje resursa i smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu [12]. Najveći deo potrošnje energije javlja se tokom proizvodnje građevinskih materijala, transporta materijala i opreme, izvođenja radova, kao i tokom eksploatacije i održavanja objekata. Zbog toga se u savremenom građevinarstvu sve više primenjuju rešenja koja omogućavaju smanjenje potrošnje energije tokom celokupnog životnog ciklusa infrastrukturnih sistema.

4.2. Faktori koji utiču na energetska efikasnost

Energetska efikasnost infrastrukturnih sistema zavisi od više međusobno povezanih faktora koji utiču na potrošnju energije tokom celokupnog životnog ciklusa infrastrukture. Poseban značaj ima integrisani pristup koji omogućava optimizaciju energetske performansi već u ranim fazama projektovanja. Među najvažnijim faktorima izdvajaju se: izbor građevinskih materijala, projektantska rešenja, primenjene tehnologije gradnje.

Materijali sa manjim ugljeničnim otiskom i boljim performansama mogu značajno doprineti smanjenju ukupne potrošnje energije i negativnog uticaja na životnu sredinu. Istovremeno, odluke donete u fazi projektovanja mogu uticati na buduću energetska potrošnju i operativnu efikasnost infrastrukturnih objekata.

4.2.1. Izbor materijala i njegov uticaj na energetska efikasnost

Izbor građevinskih materijala predstavlja jedan od ključnih faktora energetske efikasnosti infrastrukturnih sistema. Materijali utiču na potrošnju energije tokom proizvodnje, transporta i ugradnje, ali i tokom eksploatacije objekata. Poseban značaj imaju materijali sa dobrim termoizolacionim svojstvima, koji omogućavaju smanjenje potreba za grejanjem i hlađenjem objekata. U praksi se često koriste termoizolacioni materijali kao što su: ekspandirani polistiren (EPS), kamena vuna i poliuretanska pena (PUR), koji doprinose smanjenju toplotnih gubitaka. Pored termoizolacionih materijala, značajnu ulogu imaju i materijali sa visokim stepenom refleksije sunčevog zračenja. Njihova primena može smanjiti apsorpciju toplote tokom letnjih meseci i smanjiti potrebu za klimatizacijom objekata, posebno u urbanim sredinama, gde je izražen efekat urbanog toplotnog ostrva.

Sve veći značaj ima i primena recikliranih i ekološki prihvatljivih materijala, kao što su reciklirani beton, industrijski nusproizvodi i materijali dobijeni od građevinskog otpada. Njihova primena omogućava smanjenje potrošnje energije potrebne za proizvodnju novih materijala i smanjenje količine otpada na deponijama. U saobraćajnoj infrastrukturi razvijaju se i asfaltne mešavine sa smanjenom apsorpcijom toplote, koje doprinose smanjenju zagrevanja kolovoznih površina i poboljšanju energetske efikasnosti urbanog prostora [10].

4.2.2. Uloga dizajna objekta u energetska efikasnosti i infrastrukturi

Dizajn objekta predstavlja važan faktor u postizanju energetske efikasnosti infrastrukturnih sistema. Odluke donete u ranoj fazi projektovanja mogu značajno uticati na buduću potrošnju energije i funkcionalnost objekata. Pravilna orijentacija objekata u odnosu na sunčevo zračenje i klimatske uslove omogućava efikasnije korišćenje prirodnih energetske potencijala i primenu pasivnih energetske strategija. Pored toga, planiranje položaja objekata u odnosu na postojeću saobraćajnu i komunalnu infrastrukturu, može smanjiti potrebu za dodatnim infrastrukturnim intervencijama i optimizovati korišćenje resursa.

Savremeni pristupi projektovanju infrastrukture sve više uključuju primenu digitalnih alata koji omogućavaju analizu različitih projektantskih scenarija još u fazi planiranja. Tehnologije, kao što su BIM i modeli energetske simulacije, omogućavaju optimizaciju projektnih rešenja i povećanje ukupne energetske efikasnosti infrastrukturnih sistema tokom njihovog životnog ciklusa [13, 14, 15, 16].

4.2.3. Tehnike energetske efikasne gradnje

Tehnike energetske efikasne gradnje imaju važnu ulogu u realizaciji savremenih infrastrukturnih projekata, jer omogućavaju smanjenje potrošnje energije tokom izgradnje i povećanje održivosti infrastrukturnih sistema. Jedan od ključnih pristupa odnosi se na optimizaciju organizacije gradilišta i logistike izvođenja radova. Efikasno planiranje transporta materijala i koordinacija građevinskih aktivnosti mogu značajno smanjiti potrošnju energije tokom realizacije projekata.

Dodatni doprinos energetske efikasnosti ostvaruje se primenom tehnologija koje omogućavaju ponovnu upotrebu materijala i smanjenje građevinskog otpada, kao što je reciklaža asfaltnih slojeva na licu mesta. Modernizacija infrastrukturnih sistema, uključujući primenu LED rasvete i inteligentnih sistema upravljanja, takođe doprinosi smanjenju potrošnje električne energije. Sve veću ulogu imaju i digitalne tehnologije poput BIM sistema i modela energetske simulacije, koje omogućavaju analizu energetske tokova i optimizaciju projektnih rešenja već u fazi projektovanja [11, 17].

Energetska efikasnost infrastrukturnih sistema postiže se integriranim pristupom koji obuhvata izbor odgovarajućih materijala, optimalno projektovanje objekata i primenu savremenih tehnika energetske efikasne gradnje.

5. Primeri dobre prakse u energetske efikasnoj infrastrukturi

U savremenoj infrastrukturnoj praksi energetska efikasnost predstavlja jedan od ključnih kriterijuma u planiranju i realizaciji projekata. Brojni primeri širom sveta pokazuju da je moguće uspešno kombinovati tehničku funkcionalnost, ekonomsku isplativost i zaštitu životne sredine kroz primenu savremenih tehnologija i održivih pristupa projektovanju. Analiza ovakvih projekata pruža značajne smernice za razvoj budućih infrastrukturnih sistema zasnovanih na principima energetske efikasnosti i održivog razvoja. Jedan od značajnih primera iz Srbije predstavlja Most na Adi u Beogradu, koji je jedan od najvažnijih infrastrukturnih projekata u savremenom urbanom razvoju grada. Tokom realizacije projekta primenjena su rešenja koja doprinose energetske efikasnosti i dugoročnoj održivosti objekta. Upotrebljeni su visokokvalitetni konstrukcioni materijali sa produženim radnim vekom. Sistem javne rasvete je zasnovan na LED tehnologiji, čime je ostvareno značajno smanjenje potrošnje električne energije.

Ovakva rešenja doprinose efikasnijem upravljanju infrastrukturnim sistemima i smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu. Na međunarodnom nivou, jedan od najpoznatijih primera održive urbanizacije predstavlja Masdar City u Ujedinjenim Arapskim Emiratomima. Ovaj grad je projektovan sa ciljem minimalne potrošnje energije i smanjenja emisije ugljen-dioksida, uz široku primenu obnovljivih izvora energije, posebno solarne energije. Projektantska rešenja zasnovana su na principima pasivne ventilacije, optimizovanog urbanog rasporeda i efikasnog korišćenja građevinskih materijala, čime se postiže visok nivo energetske efikasnosti urbanog sistema [18, 19]. Značajan primer održive infrastrukture predstavlja i London Olympic Park u Ujedinjenom Kraljevstvu, izgrađen za potrebe Olimpijskih igara 2012. godine. Tokom realizacije projekta primenjen je koncept održive gradnje, koji je uključivao široku upotrebu recikliranih građevinskih materijala, ponovnu upotrebu materijala sa gradilišta i energetske efikasne sisteme upravljanja infrastrukturom. Ovaj projekat pokazuje da je moguće uspešno integrisati principe cirkularne ekonomije i energetske efikasnosti u realizaciju velikih infrastrukturnih projekata.

5.1. Prednosti energetske efikasne infrastrukture

Energetske efikasne infrastrukture donosi brojne koristi koje se manifestuju na ekonomskom, ekološkom i tehničkom nivou. Primena energetske efikasne rešenja doprinosi racionalnijem korišćenju resursa, smanjenju negativnog uticaja na životnu sredinu i povećanju dugoročne održivosti infrastrukturnih sistema. Sa ekonomskog aspekta, jedna od najvažnijih prednosti energetske efikasne infrastrukture jeste smanjenje operativnih troškova tokom njenog životnog ciklusa. Primena savremenih tehnologija i optimizovanih sistema upravljanja energijom omogućava značajne uštede u potrošnji električne energije, grejanju, hlađenju i javnoj rasveti. Iako početna ulaganja u energetske efikasne rešenja mogu biti veća u odnosu na konvencionalne sisteme, dugoročne uštede i smanjeni troškovi održavanja čine ovakve investicije ekonomski opravdanim. Pored ekonomskih koristi, energetske efikasne infrastrukture ima i značajne ekološke prednosti. Korišćenje obnovljivih izvora energije, kao i primena recikliranih i lokalno dostupnih materijala, doprinosi smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte i ukupnog ugljeničnog otiska infrastrukturnih projekata. Na taj način smanjuje se pritisak na prirodne resurse i doprinosi ublažavanju negativnih posledica klimatskih promena. Energetske efikasne rešenja takođe doprinose unapređenju kvaliteta i otpornosti infrastrukturnih sistema. Objekti projektovani u skladu sa principima energetske efikasnosti karakterišu se većim stepenom optimizacije i funkcionalnosti, dužim vekom trajanja i većom otpornošću na klimatske uticaje. Takvi sistemi zahtevaju manje intervencije tokom eksploatacije i omogućavaju efikasnije upravljanje resursima, kao i bržu reakciju u vanrednim situacijama, čime se povećava ukupna pouzdanost infrastrukture.

6. Primena recikliranih materijala u infrastrukturnim projektima – studija slučaja

Primena recikliranih materijala u infrastrukturnim projektima predstavlja jedan od važnih koraka ka razvoju održivog građevinskog sektora. Ovakav pristup doprinosi smanjenju potrošnje prirodnih resursa, smanjenju količine građevinskog otpada i smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte. Korišćenjem materijala iz sekundarnih izvora moguće je smanjiti potrebu za eksploatacijom novih sirovina, produžiti životni ciklus građevinskih materijala i unaprediti ukupnu ekološku održivost infrastrukturnih projekata. Savremeni infrastrukturni projekti sve češće uključuju integraciju recikliranih materijala u različite faze izgradnje, čime se postiže ravnoteža između tehničkih zahteva, ekonomskih koristi i zaštite životne sredine. U nastavku je prikazan primer projekta koji ilustruje primenu principa cirkularne ekonomije u savremenoj infrastrukturnoj praksi.



Slika 5. Milan M4 metro linija [18]

Izgradnja metro linije M4 u Milanu predstavlja jedan od značajnih evropskih infrastrukturnih projekata u kojem su primenjeni principi održive gradnje i energetske efikasnosti. Tokom realizacije projekta korišćen je beton sa smanjenim emisijama ugljen-dioksida, kao i materijali dobijeni reciklažom iskopanog materijala nastalog tokom izgradnje tunela. Ovakav pristup omogućio je smanjenje emisije CO₂ za približno 30% u poređenju sa konvencionalnim metodama gradnje. Pored smanjenja emisija gasova, primena recikliranih materijala doprinela je i smanjenju potrebe za eksploatacijom prirodnih agregata, čime je umanjeno negativan uticaj na prirodne resurse i lokalno okruženje. Ovaj projekat pokazuje da je moguće uspešno integrisati reciklirane materijale u velike infrastrukturne projekte, uz očuvanje visokog nivoa tehničkih standarda, bezbednosti i dugoročne funkcionalnosti infrastrukturnih sistema.

7. Izazovi i ograničenja

Iako primena recikliranih materijala i energetski efikasnih rešenja donosi brojne ekološke i ekonomske prednosti, njihova implementacija u infrastrukturnim projektima suočava se sa određenim tehničkim, logističkim i organizacionim izazovima. Ovi izazovi odnose se pre svega na ograničenja u tehnologiji reciklaže, nedovoljno razvijenu infrastrukturu za upravljanje građevinskim otpadom, kao i na složenost integracije savremenih energetskih i digitalnih sistema u infrastrukturne projekte. Razumevanje ovih ograničenja predstavlja važan korak ka unapređenju prakse održivog građevinarstva i širem uvođenju principa cirkularne ekonomije u infrastrukturni sektor.

7.1. Tehnička i logistička ograničenja pri reciklaži građevinskog otpada

Jedan od glavnih izazova u oblasti reciklaže građevinskog otpada predstavlja nedostatak adekvatnih tehnologija za obradu pojedinih materijala. Materijali kao što su kompoziti, PVC i slojevite konstrukcije često se teško razdvajaju i zahtevaju primenu specijalizovane opreme i složenih tehnoloških postupaka. Na primer, reciklaža betona zahteva upotrebu snažnih drobilica i sistema za separaciju armature, koji nisu dostupni u svim regionima, što ograničava širu primenu ovog procesa [20]. Dodatno ograničenje predstavlja smanjenje kvaliteta materijala tokom procesa reciklaže, poznato kao downcycling. U takvim slučajevima reciklirani materijali mogu imati slabija mehanička svojstva u odnosu na primarne materijale, što ograničava njihovu primenu u nosivim konstrukcijama i zahteva pažljivo projektovanje i kontrolu kvaliteta [7, 20]. Značajan problem predstavlja i nedostatak standardizacije i tehničkih normi za primenu recikliranih materijala. U mnogim zemljama standardi i propisi još uvek nisu dovoljno razvijeni, zbog čega projektanti i izvođači često preferiraju konvencionalne materijale sa jasno definisanim karakteristikama i dugogodišnjom primenom u praksi. Logistička ograničenja takođe imaju značajan uticaj na primenu recikliranih materijala. U mnogim regionima ne postoje razvijeni sistemi za prikupljanje, selekciju i preradu građevinskog otpada. Na gradilištima se otpad često odlaže bez prethodnog razdvajanja, što otežava njegovu kasniju reciklažu. Pored toga, visoki troškovi transporta i obrade otpada često čine reciklažu ekonomski manje isplativom u poređenju sa deponovanjem otpada, naročito u oblastima koje nemaju lokalne reciklažne centre [20]. Nedostatak ekonomskih podsticaja dodatno otežava razvoj sistema reciklaže. U situacijama kada ne postoje subvencije, poreske olakšice ili druge stimulative mere, reciklirani materijali teško mogu cenovno konkurisati novim materijalima proizvedenim iz primarnih sirovina. Takođe, ograničen prostor na gradilištima za privremeno skladištenje i razdvajanje otpada, često dovodi do mešanja različitih materijala, čime se dodatno smanjuje mogućnost njihove ponovne upotrebe [20].

7.2. Tehnička i logistička ograničenja energetski efikasnih rešenja

Primena energetski efikasnih rešenja u infrastrukturnim projektima neretko zahteva integraciju različitih digitalnih i tehnoloških sistema, kao što su BIM (Building Information Modeling), GIS (Geographic Information Systems) i IoT (Internet of Things) platforme. Međutim, sistemi razvijeni od strane različitih proizvođača često nisu u potpunosti kompatibilni, što otežava njihovu međusobnu komunikaciju i integraciju u jedinstveni infrastrukturni sistem [9]. U zemljama sa nižim nivoom tehnološkog razvoja dodatni problem predstavlja nedovoljno razvijena digitalna i tehnička infrastruktura. Nedostatak savremenih IT mreža, senzorske opreme i sistema za upravljanje energijom otežava prikupljanje podataka i optimizaciju potrošnje energije u realnom vremenu, što smanjuje efikasnost implementiranih rešenja. Logistički izazovi takođe mogu značajno uticati na primenu energetski efikasnih tehnologija. Nepristupačnost pojedinih lokacija, slaba povezanost sa saobraćajnom infrastrukturom i nedostatak kvalifikovane radne snage mogu otežati transport opreme, instalaciju sistema i njihovo kasnije održavanje. Ovi faktori posebno dolaze do izražaja kod velikih infrastrukturnih projekata koji zahtevaju složenu koordinaciju različitih tehnoloških i građevinskih sistema [9, 13]. Uprkos navedenim ograničenjima, kontinuirani razvoj tehnologije, unapređenje standarda i veća institucionalna podrška mogu značajno doprineti širem uvođenju energetski efikasnih i održivih rešenja u infrastrukturne projekte.

8. Perspektive i budući razvoj

Uprkos brojnim izazovima, globalni trendovi jasno ukazuju na to da će reciklaža građevinskih materijala i primena energetski efikasnih rešenja u infrastrukturi igrati sve važniju ulogu u budućem razvoju urbanih sredina. Povećana potreba za očuvanjem prirodnih resursa, borba protiv klimatskih promena, rastući pritisak javnosti i zakonske regulative usmerene ka održivosti čine ovu oblast strateški značajnom za naredne decenije.

8.1. Inovacije u oblasti reciklaže građevinskih materijala

Inovacije u oblasti reciklaže građevinskih materijala predstavljaju značajan pravac razvoja održivog građevinskog sektora i efikasnijeg upravljanja resursima. Razvoj savremenih tehnologija omogućio je unapređenje procesa separacije, obrade i ponovne upotrebe građevinskog otpada. Automatizovani sistemi za sortiranje, koji koriste veštačku inteligenciju i robotske tehnologije, omogućavaju precizno razdvajanje materijala kao što su beton, metal, drvo i plastika, čime se povećava stepen iskorišćenja otpada i efikasnost procesa reciklaže.

Značajan napredak ostvaren je i kroz primenu mobilnih drobilica, koje omogućavaju reciklažu betona direktno na gradilištima. Ovakav pristup smanjuje potrebu za transportom materijala i doprinosi smanjenju emisije gasova. Pored toga, razvijene su nove tehnologije, kao što je karbonatno očvršćavanje (carbonation curing), koje poboljšava mehanička svojstva recikliranih agregata i omogućavaju njihovu širu primenu u građevinskim konstrukcijama. Savremena istraživanja doprinela su razvoju novih građevinskih materijala dobijenih od otpada, uključujući cigle i blokove proizvedene od građevinskog otpada, izolacione panele od reciklirane plastike i asfaltne mešavine sa dodatkom reciklirane gume. Ovi materijali pokazuju zadovoljavajuće mehaničke karakteristike i dug radni vek, uz smanjen negativan uticaj na životnu sredinu. Poseban pravac inovacija odnosi se na razvoj ekološki prihvatljivih i pametnih materijala. Primeri uključuju samopopravljajući beton (bio-beton), fotokatalitičke premaze, koji razgrađuju zagađivače i materijale sa ugrađenim sensorima za praćenje stanja konstrukcije. Istovremeno, digitalne tehnologije, poput BIM sistema, omogućavaju praćenje porekla i tokova materijala tokom celog životnog ciklusa objekta, čime se podstiče primena principa cirkularne ekonomije u građevinarstvu. Razvoj ovih tehnologija i materijala doprinosi smanjenju potrošnje prirodnih resursa, emisije štetnih gasova i stvaranju održivijih građevinskih rešenja, koja su u skladu sa savremenim ekološkim i energetskim zahtevima [9, 13].

8.2. Tehnološke i naučne tendencije

U savremenom građevinarstvu i infrastrukturnom razvoju tehnološke i naučne tendencije sve više se oslanjaju na primenu recikliranih materijala, kao važnih faktora za unapređenje energetske efikasnosti. Ovakav pristup proističe iz potrebe za očuvanjem prirodnih resursa, smanjenjem emisije gasova sa efektom staklene bašte i primenom principa cirkularne ekonomije. U tom kontekstu sve veći značaj ima korišćenje otpadnih materijala, kao što su reciklirano staklo, leteći pepeo, metalurška zgura, reciklirani beton i guma iz otpadnih pneumatika, koji mogu delimično zameniti energetski intenzivne sirovine, poput cementa i prirodnih agregata. Njihova primena doprinosi smanjenju ukupne potrošnje energije, naročito u fazama proizvodnje i transporta građevinskih materijala. Jedna od ključnih tendencija savremenih istraživanja odnosi se na razvoj građevinskih kompozita u kojima reciklirani materijali imaju ulogu zamene za konvencionalne komponente betona i asfaltnih mešavina. Ovakvi materijali, ne samo da smanjuju potrebu za eksploatacijom prirodnih sirovina, već često doprinose poboljšanju određenih mehaničkih i termičkih svojstava konstrukcija, čime se produžava njihov vek trajanja i smanjuju potrebe za održavanjem. Paralelno sa razvojem novih materijala, sve veći značaj imaju i savremeni digitalni alati u planiranju i projektovanju infrastrukture.

Tehnologije, kao što su BIM (Building Information Modeling) i LCA (Life Cycle Assessment), omogućavaju analizu energetskog bilansa objekata tokom čitavog životnog ciklusa i optimizaciju izbora materijala još u fazi projektovanja. Na taj način moguće je identifikovati rešenja koja obezbeđuju manju potrošnju energije i manji negativan uticaj na životnu sredinu. Značajan napredak ostvaruje se i u oblasti automatizacije procesa reciklaže građevinskog otpada. Savremeni sistemi za sortiranje i obradu materijala, koji često koriste senzorske tehnologije i elemente veštačke inteligencije, omogućavaju precizniju selekciju sekundarnih sirovina i povećanje efikasnosti procesa reciklaže. Pored toga, u putogradnji se sve češće primenjuju niskoenergetske tehnologije, poput hladnih asfaltnih mešavina, kao i rešenja u okviru zelene infrastrukture za upravljanje padavinskim vodama. Navedeni tehnološki pravci ukazuju na to da reciklirani materijali imaju sve značajniju ulogu u razvoju održivih infrastrukturnih sistema. Očekuje se da će dalja istraživanja i standardizacija ovih tehnologija omogućiti širu i efikasniju primenu recikliranih materijala u savremenom građevinarstvu, uz istovremeno unapređenje energetske efikasnosti i smanjenje ekološkog uticaja infrastrukturnih projekata.

9. Zaključak

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da primena recikliranih materijala u infrastrukturnim projektima predstavlja važan korak ka unapređenju održivosti i energetske efikasnosti građevinskog sektora. Materijali, poput recikliranog betona, asfalta, čelika i stakla, omogućavaju smanjenje potrošnje prirodnih resursa, količine građevinskog otpada i emisije ugljen-dioksida u poređenju sa konvencionalnim građevinskim materijalima. Razvoj savremenih tehnologija prerade i kontrole kvaliteta omogućava sve širu primenu recikliranih materijala u različitim infrastrukturnim sistemima, uključujući saobraćajnu, komunalnu i urbanu infrastrukturu. Njihova primena doprinosi smanjenju ugrađene energije građevinskih materijala i poboljšanju ekoloških performansi infrastrukturnih projekata tokom celokupnog životnog ciklusa objekata. Rezultati rada ukazuju da energetska efikasnost infrastrukturnih sistema zavisi od više međusobno povezanih faktora, među kojima se izdvajaju: izbor građevinskih materijala, projektantska rešenja i primena savremenih tehnika gradnje. Integriranim pristupom, u kojem se reciklirani materijali uključuju već u fazi projektovanja, moguće je ostvariti značajne ekološke i ekonomske koristi. U skladu sa principima održivog razvoja i cirkularne ekonomije, primena recikliranih materijala predstavlja važan pravac daljeg razvoja građevinskog sektora i izgradnje energetske efikasne infrastrukture. Buduća istraživanja treba usmeriti ka razvoju naprednih tehnologija reciklaže, primeni digitalnih alata u projektovanju i detaljnijim analizama životnog ciklusa infrastrukturnih objekata, kako bi se dodatno unapredila energetska efikasnost i održivost infrastrukturnih sistema.

Primena recikliranih materijala u infrastrukturnim projektima predstavlja jedan od ključnih pravaca razvoja savremenog održivog građevinarstva, uz značajan doprinos smanjenju globalnog energetskog i ekološkog opterećenja. Ovaj rad doprinosi sistematizaciji savremenih saznanja o primeni recikliranih građevinskih materijala u infrastrukturnim projektima i ukazuje na njihov značajan potencijal za unapređenje energetske efikasnosti i održivosti građevinskog sektora.

Analysis of the Application of Recycled Construction Materials in the Development of Energy-Efficient Infrastructure

Nazim Manić, PhD

State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia

Emir Maslak, PhD

State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia

Veis Šerifi, PhD

State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia

Alema Mašović, M. Eng.

State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia

Berna Krbuzlić, M. Eng.

State University of Novi Pazar, Novi Pazar, Serbia

Abstract:

The construction sector is one of the largest consumers of natural resources and a significant source of construction waste; therefore, modern infrastructure projects increasingly apply the principles of sustainable development. One of the key approaches to improving sustainability is the use of recycled construction materials. This paper analyses the role of recycled materials, such as recycled concrete, asphalt, steel, and glass, in the development of energy-efficient infrastructure. Special attention is given to their technical characteristics, potential applications, and their impact on reducing energy consumption and carbon dioxide emissions throughout the life cycle of infrastructure assets. The paper also examines factors influencing energy efficiency, including material selection, design solutions, and modern construction technologies. Additionally, examples of best practices are presented, and challenges in the application of recycled materials in infrastructure projects are identified. The results indicate that the integration of recycled materials can significantly contribute to reducing the environmental footprint and improving the energy efficiency of modern infrastructure. Findings from the literature show that the use of recycled materials can reduce energy consumption in the production of construction materials by approximately 20–75%, depending on the type of material.

Keywords: Recycled construction materials, Energy efficiency, Infrastructure, Sustainable development, Circular economy

Literatura

- [1] Alyhya, W. S., Salman, G. A., & Jadooe, A. (2025). Revolutionizing recycled aggregate concrete: A dual approach using HCl treatment and silica fume. *Civil Engineering Journal*, 11(5), 1510-1524. Preuzeto sa <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-05-08>
- [2] Bogdanović, V., & Bogdanović, I. (2019). Urbanističko-arhitektonske mere u funkciji energetske efikasnosti zgrada. Zbornik radova 36. međunarodnog kongresa i izložbe o KGH, 186-194.
- [3] Boljević, V. (2024). Analiza mogućnosti primjene savremenih tehnologija za reciklažu stakla u Crnoj Gori (Master rad). Podgorica: Univerzitet Crne Gore, Metalurško-tehnološki fakultet.
- [4] Bonifazi, G., Grosso, C., Palmieri, R., & Serranti, S. (2025). Current trends and challenges in construction and demolition waste recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, 53.
- [5] Du, J. (2026). A review on the influence of recycled aggregate on the shrinkage performance of concrete. *Journal of Engineering Research and Reports*, 28(1), 126-135. Preuzeto sa <https://doi.org/10.9734/jerr/2026/v28i11763>
- [6] Enobie, B. K., Okwandu, A. C., Abdulwaheed, S. A., & Iwuanyanwu, O. (2024). Effective waste management in construction: Techniques and implementation. *Journal of Engineering Research and Reports*, 26(8), 1642-1652.
- [7] Esri, & Autodesk. (2021). BIM and GIS integration crucial for sustainable, energy-efficient infrastructure: The future of infrastructure. *Geospatial World*.
- [8] Ferreira, L. M., Vasquez, A. R., Torres, M. A., & Romano, S. L. (2026). Experimental assessment of recycled aggregate concrete for secondary structural components. *International Journal of Structural Design and Engineering*, 7(1), 22-26. Preuzeto sa <https://doi.org/10.22271/27078280.2026.v7.i1a.60>
- [9] Hassan, A., & et al. (2024). Studying the usability of recycled aggregate to produce new concrete. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71. Preuzeto sa <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00463-1>
- [10] Hu, W., Li, J., Wang, L., & Li, X. (2025). Sustainable design of recycled concrete using shape optimization and carbon dioxide emission based on life cycle assessment. *Journal of Civil Engineering and Management*, 31(6), 631-645. Preuzeto sa <https://doi.org/10.3846/jcem.2025.24108>
- [11] Ignjatović, D., & Jovanović- Popović, M. (2005). Karakteristike građevinskog resursa u kontekstu energetske optimizacije. *Zbornik radova: Energetska efikasnost zgrada*.
- [12] Marinković, M. S. (2021). Primena otpadnih i recikliranih materijala za izradu stabilizovanih slojeva kolovoznih konstrukcija (Doktorska disertacija). Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka.
- [13] Milošević, M., Milošević, D., Dimić, V., Stević, D., & Stanojević, A. (2017). Analiza indikatora energetske efikasnosti i obnovljivih izvora energije kod postojećih zgrada. Zbornik radova MKOIEE. doi:10.24094/mkoiee.017.5.1.205
- [14] Mokhtar, G., El Basha, M. M., & Younis, S. (2025). Strength and sustainability of recycled alkali- activated concrete across temperature and curing regimes. *Scientific Reports*, 15. Preuzeto sa <https://doi.org/10.1038/s41598-025-18371-6>
- [15] Radević, A. (2017). Karakteristike asfaltnih mešavina sa agregatom od recikliranog betona (Doktorska disertacija). Univerzitet U Beogradu, Građevinski fakultet.
- [16] Radonjanin, V., Malešev, M., & Marinković, S. (2010). Mogućnosti primene starog betona kao nove vrste agregata u savremenom građevinarstvu. *Zaštita materijala*, 51(3), 178-181. Preuzeto sa https://idk.org.rs/wp-content/uploads/2016/09/ZM_51_3_178.pdf
- [17] Rexhaj, G. (2024). The role of building information modelling in the implementation of sustainable, environmentally friendly, and social infrastructure projects. *Architectural Studies*, 10(1), 69-78. Preuzeto sa <https://doi.org/10.56318/as/1.2024.69>
- [18] Seghier, T. E., Khosakitchalart, C., Lui, Z., Ohueri, C. C., Lim, Y. W., & Zainazlan, A. F. (2025). From BIM to computational BIM: A systematic review of visual programming application in building research. *Buildings*, 15(2).
- [19] World Steel Association, Steel - The Permanent Material in the Circular Economy. (n.d.). Preuzeto sa <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/worldsteel-circular-economy.pdf>
- [20] Xiao, J., Yu, C., Wang, B., Lui, H., Poon, C. S., de Brito, J., . . . Lui, J. (2026). Recycled aggregate concrete design, application and challenges. *Nature Reviews Clean Technology*, 2, 67-83. Preuzeto sa <https://doi.org/10.1038/s44359-025-00125-2>