

<https://doi.org/10.32762/zt.2025.23>

Tlačna i savojna čvrstoća mehanički recikliranog EPS-a

Compressive and bending strength of mechanically recycled EPS

Jelena Vukadin¹

(1) *Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, jelena.vukadin@grad.unizg.hr*

Sažetak

Ekspandirani polistiren ima, zahvaljujući širokoj primjeni, masovnoj proizvodnji i niskoj biorazgradivosti, visok potencijal za recikliranje. Ispitana su mehanička svojstva recikliranog EPS-a s ciljem procjene primjenjivosti istog u građevinskoj industriji. Prikazane su tlačna čvrstoća pri 10% deformaciji i savojna čvrstoća na uzorcima s udjelima 5%, 10%, 25% i 50% reciklata, koji su uspoređeni s referentnim uzorcima EPS-a s 0% reciklata. Reciklat je dobiven trenutno ekološki i ekonomski najprihvatljivijom metodom recikliranja (mekaničkim recikliranjem) čistog građevinskog otpada i poljoprivredne ambalaže. Ispitan je utjecaj različitih gustoća EPS-a na promatrana svojstva – za nazivne gustoće ploča s EPS-om 20 kg/m³ i 25 kg/m³. Dobiveni rezultati doprinose boljem razumijevanju ponašanja recikliranog EPS-a, identificiranju ograničenja i mogućnosti primjene te pružaju temelje za daljnja istraživanja i razvoj održivih rješenja u području energetski učinkovite gradnje.

Ključne riječi: reciklirani EPS, mehaničko recikliranje, tlačna čvrstoća, savojna čvrstoća, gustoća, EPS otpad, potencijal za recikliranje

Abstract

Expanded polystyrene (EPS), due to its widespread use, mass production, and low biodegradability, has a high potential for recycling. The mechanical properties of recycled EPS were tested to assess its applicability in the construction industry. The compressive strength at 10% deformation and bending strength were evaluated on samples containing 5%, 10%, 25%, and 50% recycled content and compared to reference samples made of virgin EPS (0% recycled content). The recycled material was obtained through mechanical recycling – the currently most environmentally and economically acceptable method – from clean construction waste and agricultural packaging. The influence of different EPS densities on the observed properties was examined – for nominal densities of panels with EPS of 20 kg/m³ and 25 kg/m³. The obtained results contribute to a better understanding of recycled EPS behavior, help identify its limitations and potential applications, and provide a foundation for further research and the development of sustainable solutions in energy-efficient construction.

Keywords: recycled EPS, mechanical recycling, compressive strength, bending strength, density, EPS waste, recycling potential

1. Uvod

Globalno društvo suočava se s ozbiljnim izazovima vezanima uz gospodarenje otpadom i potrebom za prijelazom na kružno gospodarstvo. Otprilike 12% plastičnog otpada u svijetu se reciklira. Veći dio (25%) se spaljuje, dok većina (oko 60%) završava u okolišu – na odlagalištima, neuređenim mjestima za otpad ili kao otpad raspršen po kopnu, rijekama i oceanima. [1] Značajna količina plastičnog otpada prikuplja se za recikliranje, no čak polovica tog otpada šalje se u razvijenije strane zemlje izvan EU zbog nedostatka kapaciteta, tehnologije ili resursa za lokalnu obradu. Procjenjuje se da se čak 95% vrijednosti plastične ambalaže izgubi zbog kratkotrajne, jednokratne uporabe. [2] Ekspandirani polistiren ima, zahvaljujući širokoj primjeni, masovnoj proizvodnji i niskoj biorazgradivosti, visok potencijal za recikliranje. Lako ga je prepoznati i odvojiti od ostatka otpada. Iako je niska gustoća prednost EPS-a, istovremeno predstavlja izazov za isplativost recikliranja zbog potencijalno značajnog negativnog utjecaja prijevoza na okoliš. Mehaničko recikliranje EPS-a trenutno predstavlja ekonomski i ekološki najprihvatljiviju metodu recikliranja. Podrazumijeva prikupljanje otpada, razdvajanje, čišćenje, drobljenje, granuliranje za potrebnu konverziju i ponovnu preradu, što rezultira proizvodnjom novih proizvoda bez promjene kemijskog sastava materijala. [3] Tijekom procesa drobljenja, dolazi do fizičkog oštećenja kuglica, čime se gubi optimalan oblik istih što uzrokuje pad konačne gustoće. Svako mehaničko recikliranje narušava u određenoj mjeri svojstva EPS-a i dovodi do heterogenosti materijala. [4]

2. Eksperimentalna analiza

Ispitano je ukupno 432 uzorka iz šest serija, a analizirani su prema gustoći, tlačnoj čvrstoći pri 10% deformacije i savojnoj čvrstoći. Sva su mjerenja provedena u skladu s europskim normama Europskog odbora za normizaciju (CEN) [5], [6], [7]. Predmet eksperimentalne analize je EPS s reciklatom, dobiven miješanjem EPS-a i recikliranog sadržaja u različitim omjerima. Reciklirani sadržaj rezultat je mehaničkog recikliranja EPS-a iz dva različita izvora: građevinskog EPS-a (S1) i ambalažnog EPS-a iz poljoprivredne upotrebe (S2). Građevinski EPS uključuje otpad nastao kao nusprodukt proizvodnje toplinske izolacije u proizvodnom pogonu te neugrađenu toplinsku izolaciju. Za razliku od ambalažnog otpada, nije kontaminiran niti su njegova svojstva narušena starenjem, vremenskim ili uvjetima primjene. EPS iz izvora (S1) i (S2), prosječne gustoće 15–17 kg/m³, miješan je s novim (djevičanskim) EPS-om nominalnih gustoća 20 kg/m³ i 25 kg/m³. Reciklirani EPS uspoređen je s kontrolnim uzorcima EPS-a odgovarajuće nominalne gustoće. Ukupno je proizvedeno 18 EPS blokova nominalnih dimenzija 2600×1300×1050 mm: dva bloka od čistog novog EPS-a i 16 blokova s različitim omjerima recikliranog i novog EPS-a. EPS blokovi su proizvedeni standardnim postupkom parnog ekspanzijskog oblikovanja, a reciklirani EPS je ravnomjerno pomiješan s prethodno ekspandiranim kuglicama novog EPS-a prije oblikovanja. Međutim, zbog nepravilnog oblika i oštećene strukture recikliranih kuglica, povećanje udjela recikliranog materijala dovelo je do smanjene kohezije i stoga niže nasipne gustoće, što je zauzvrat utjecalo na mehaničke i toplinske performanse. Ova međuovisnost otežava izoliranje učinka morfologije EPS-a od učinka same nasipne gustoće.

Iz svakog bloka izrezana su 24 uzorka pomoću tople žice, što ukupno čini 432 uzorka, od kojih je 270 ispitano na tlačnu čvrstoću pri 10 % deformacije, a 162 na savojnu čvrstoću. Radi lakšeg prikaza rezultata, uzorci su podijeljeni u serije. Serija 0-20 odnosi se na uzorke novog EPS-a nominalne gustoće 20 kg/m³. Serija 0-25 obuhvaća uzorke novog EPS-a nominalne gustoće 25 kg/m³. Serija S1-20 podrazumijeva uzorke dobivene miješanjem reciklata iz izvora S1 s EPS-om nominalne gustoće 20 kg/m³ u različitim omjerima (5%, 10%, 25% i 50% recikliranog udjela). Ostale serije su analogne seriji S1-20.

Tablica 1. Detalji testiranih serija uzoraka

Serija		Sadržaj				Udio reciklata		Mjerena gustoća	Broj analiziranih uzoraka	
						Izvor		ρ_{nom}	[% vol]	ρ_a [kg/m ³]
0-20		vEPS				20	0	20,2	15	9
0-25		vEPS				25	0	25,9	15	9
S1-20	rEPS	S1	+	vEPS	20	5, 10, 25, 50	17,9 - 20,0	60	36	
S2-20	rEPS	S2	+	vEPS	20	5, 10, 25, 50	18,0 - 20,5	60	36	
S1-25	rEPS	S1	+	vEPS	25	5, 10, 25, 50	21,2 - 25,4	60	36	
S2-25	rEPS	S2	+	vEPS	25	5, 10, 25, 50	19,5 - 25,4	60	36	
Σ									270	162



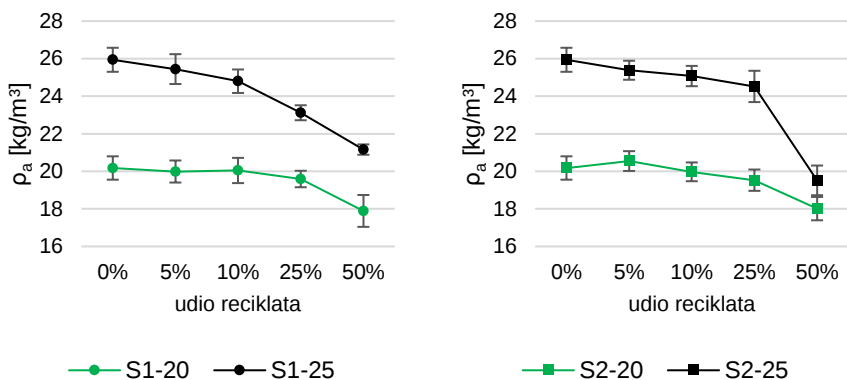
Slika 7. Prikaz strukture proizvedenog materijala (novi EPS lijevo, 25% reciklata sredina, 50% reciklata desno)

3. Eksperimentalni rezultati

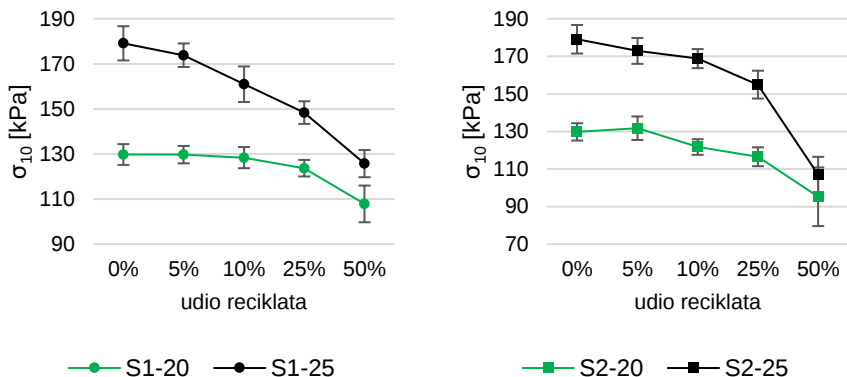
Prikazani su ključni rezultati ispitivanja koji daju uvid u ponašanje i kvalitetu recikliranog EPS-a ovisno o udjelu reciklata. Dijagrami prikazuju promjene srednjih vrijednosti promatranih svojstava za oba izvora reciklata, S1 i S2 (**Slika 8**, **Slika 9**, **Slika 10**). Za svako svojstvo prikazana je i standardna devijacija.

Veći udio reciklata generalno smanjuje gustoću bloka. Serija S1-25 počinje s većom početnom čvrstoćom od S1-20, ali bilježi strmiji pad s povećanjem reciklata, dok S1-20 ima

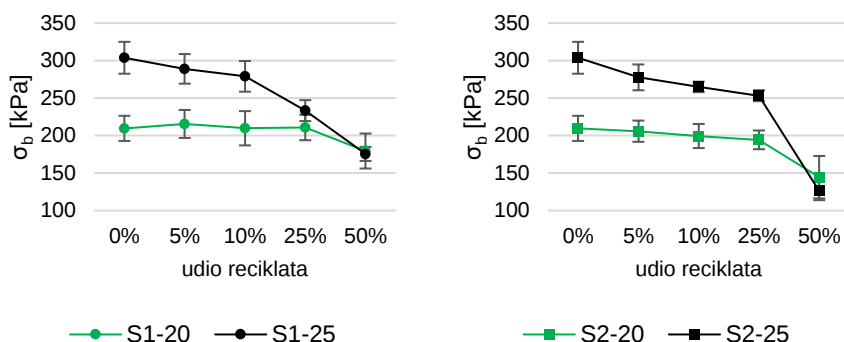
niže, ali stabilnije vrijednosti, tj. opada postupnije. Najveća standardna devijacija opaža se pri najvišem udjelu reciklata, što ukazuje na veću varijabilnost svojstava. Slično vrijedi i za serije S2-25 i S2-20.



Slika 8. Promjena gustoće s obzirom na udio reciklata (S1 lijevo, S2 desno)



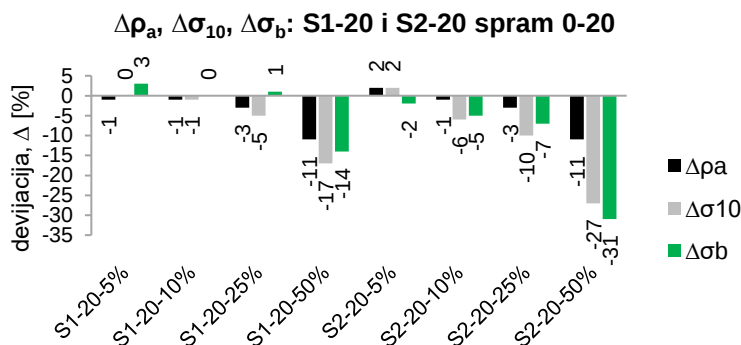
Slika 9. Tlačna čvrstoća pri 10% deformaciji sa standardnom devijacijom s obzirom na udio reciklata (S1 lijevo, S2 desno)



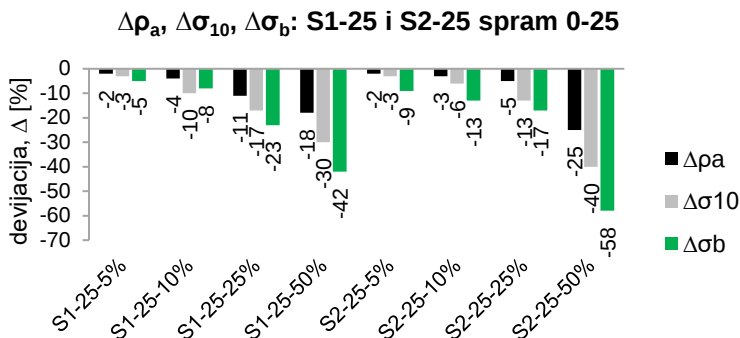
Slika 10. Savojna čvrstoća sa standardnom devijacijom s obzirom na udio reciklata (S1 lijevo, S2 desno)

U usporedbi serija uzoraka prema izvoru recikliranog materijala vidljivo je da materijal dobiven mehaničkim recikliranjem građevinskog otpada (S1) pokazuje manji pad čvrstoće s porastom udjela reciklata u odnosu na materijal dobiven recikliranjem poljoprivredne ambalaže (S2), što ukazuje na veću kvalitetu materijala s reciklatom S1. Navedeno se najjasnije vidi kod uzoraka s 50% reciklata – serije uzoraka S2-20 i S2-25 bilježe znatno veći pad čvrstoće pri prijelazu s 25% na 50% reciklata u usporedbi sa serijama S1-20 i S1-25. Prema izračunatoj standardnoj devijaciji, koeficijent varijacije ne prelazi 5%, odnosno 9% za tlačnu čvrstoću pri 10% deformacije, što ukazuje na relativno stabilne i predvidljive rezultate. Iznimka je serija S2-20 s 50% reciklata, kod koje je koeficijent varijacije značajan: 16,4% za tlačnu i 19,6% za savojnu čvrstoću.

Dijagrami u nastavku (**Slika 11** i **Slika 12**) prikazuju promjene promatranih svojstava uzoraka s različitim udjelima reciklata u usporedbi sa svojstvima novog EPS-a odgovarajuće nazivne gustoće. Negativna vrijednost na dijagramu označava smanjenje u odnosu na vrijednost novog EPS-a, a pozitivna povećanje.



Slika 11. Devijacija svojstava serija S1-20 i S2-20 spram novog EPS-a 0-20



Slika 12. Devijacija svojstava serija S1-25 i S2-25 spram novog EPS-a 0-25

Lakši EPS ($\rho_{\text{nom}} = 20 \text{ kg/m}^3$) ima veću početnu poroznost i općenito je slabije kvalitete u odnosu na gušći EPS ($\rho_{\text{nom}} = 25 \text{ kg/m}^3$), pa dodatak recyklata manje utječe na ukupnu kvalitetu materijala (**Slika 11**). S druge strane, gušći EPS ima kompaktniju i homogeniju strukturu, pa ugradnja recyklata (koji je često nepravilniji i slabije kvalitete) više narušava njegova svojstva (**Slika 12**).

Uočavaju se također nešto lošija svojstva kod serija koje sadrže reciklat iz izvora S2. EPS iz poljoprivredne ambalaže (S2) je tijekom prethodne uporabe vjerojatno bio izložen UV zračenju, vlazi ili kemikalijama, dok čisti građevinski otpad (S1) prije reciklaže nije bio značajno oštećen.

4. Zaključak

Provedeno istraživanje ispituje utjecaj mehanički recikliranog EPS-a na svojstva konačnog materijala. Mehanički recikliran EPS iz dvaju izvora dodavan je u udjelima 5–50% EPS-u gustoće 20 kg/m^3 i 25 kg/m^3 . Analizirana su gustoća, tlačna čvrstoća pri 10% deformaciji i savojna čvrstoća.

Povećanjem udjela recyklata bilježi se pad gustoće, a s njom i tlačne čvrstoće, osim u seriji S1-20 s 5% recyklata, gdje čvrstoća ostaje nepromijenjena unatoč padu gustoće. Sličan trend vrijedi i za savojnu čvrstoću, međutim samo kvalitativno, obzirom da ne postoji točna veza između gustoće i savojne čvrstoće.

EPS manje gustoće bolje podnosi dodatak recyklata, odnosno ima manji pad svojstava u odnosu na djevičanski materijal, za razliku od gušćeg EPS-a. Nadalje, materijal koji sadrži reciklat dobiven mehaničkim recikliranjem poljoprivredne ambalaže pokazao je nešto lošija svojstva u odnosu na onaj s reciklatom građevinskog otpada. Manja standardna devijacija također ukazuje na veću kvalitetu sirovine – u ovom slučaju građevinskog otpada.

Svi EPS proizvodi, osim onih koji se ne koriste za nosive primjene, moraju zadovoljiti dva kriterija vezana uz tlačnu čvrstoću pri 10% deformacije i savojnu čvrstoću (Tablica C.1, Prilog C [8]) kako bi se osigurala odgovarajuća funkcionalnost. Sve ispitane serije zadovoljavaju propisane uvjete za nenosive primjene ($\sigma_b \geq 50 \text{ kPa}$). Međutim, EPS serija S2-25 s 50% recyklata (EPS 25 kg/m^3 pomiješan s reciklatom iz poljoprivredne ambalaže) ne može se koristiti za nosive primjene. Ostale serije zadovoljavaju kriterije, iako su sve s 50% recyklata na granici primjenjivosti.

Literatura

- [1] J.-P. Lange, "Managing Plastic Waste—Sorting, Recycling, Disposal, and Product Redesign," *ACS Sustain Chem Eng*, vol. 9, no. 47, pp. 15722–15738, Nov. 2021, doi: 10.1021/acssuschemeng.1c05013.
- [2] E. Cornago, P. Boerkey, and A. Brown, "Preventing single-use plastic waste: Implications of different policy approaches," Oct. 2021. doi: 10.1787/c62069e7-en.
- [3] K. Hamad, M. Kaseem, and F. Deri, "Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works," *Polym Degrad Stab*, vol. 98, no. 12, pp. 2801–2812, Dec. 2013, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.09.025.
- [4] C. Lindener, J. Hein, and E. Fischer, "Waste Management of HBCD-Containing EPS/XPS Waste in Europe and Forecast Model up to 2050.," 2020.
- [5] European Committee for Standardization (CEN), "EN ISO 845:2009, Cellular plastics and rubbers - Determination of apparent density," Brussels, 2009.
- [6] European Committee for Standardization (CEN), "EN ISO 29469:2022, Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour," Brussels, 2022.
- [7] European Committee for Standardization (CEN), "EN 12089:2013, Thermal insulating products for building applications - Determination of bending behaviour," Brussels, 2013.
- [8] European Committee for Standardization (CEN), "EN 13163:2012+A2:2016, Thermal insulation products for buildings - Factory made expanded polystyrene (EPS) products - Specification," Brussels, 2016.