

Primljen / Received: 10.4.2026.

Ispravljen / Corrected: 13.7.2026.

Prihvaćen / Accepted: 16.7.2026.

Dostupno online / Available online: 10.9.2026.

Fizikalna i mehanička svojstva izolacijskih ploča sa značajnim udjelom reciklata za podno grijanje i hlađenje

Autori:

**Rene Kelemen**, univ.mag. ing.aedif.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

rene.kelemen@grad.unizg.hr

Autor za korespondenciju

**Domagoj Tkalčić**, mag. ing. aedif.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

domagoj.tkalcic@grad.unizg.hrIzv.prof.dr.sc. **Bojan Milovanović**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

bojan.milovanovic@grad.unizg.hr**Marko Mudrinić**, dipl.ing.građ.

Plastform d.o.o.

marko.mudrinic@plastform.hr

Izvorni znanstveni rad

Rene Kelemen, Domagoj Tkalčić, Bojan Milovanović, Marko Mudrinić

Fizikalna i mehanička svojstva izolacijskih ploča sa značajnim udjelom reciklata za podno grijanje i hlađenje

U radu su ispitana fizikalna i mehanička svojstva EPS izolacijskih ploča s različitim udjelom recikliranog materijala iz dvaju izvora (građevinski i ambalažni). Analiziran je utjecaj udjela reciklata na gustoću, toplinsku provodljivost, tlačnu čvrstoću pri 10 % deformacije, savojnu i vlačnu čvrstoću. Rezultati pokazuju smanjenje gustoće i mehaničkih svojstava te porast toplinske provodljivosti s povećanjem udjela reciklata. Uočeno je nelinearno ponašanje ovisno o strukturi materijala. Dobiveni rezultati upućuju na mogućnost primjene recikliranog EPS-a u podnim pločama za grijanje i hlađenje, uz ograničenja pri većim udjelima reciklata.

Ključne riječi:

ekspandirani polistiren, reciklirani EPS, fizikalna svojstva, mehanička svojstva, ploče za podno grijanje i hlađenje

Original research paper

Rene Kelemen, Domagoj Tkalčić, Bojan Milovanović, Marko Mudrinić

Physical and mechanical properties of insulation boards with a significant recycled content for underfloor heating and cooling applications

This paper investigates the physical and mechanical properties of EPS insulation boards with different shares of recycled material from two sources (construction and packaging). The influence of recycled content on density, thermal conductivity, compressive strength at 10 % deformation, flexural strength, and tensile strength was analysed. The results show a decrease in density and mechanical properties, and an increase in thermal conductivity with increasing recycled content. A non-linear behaviour depending on material structure was observed. The results indicate the potential application of recycled EPS in underfloor heating and cooling systems, with limitations at higher recycled content.

Key words:

expanded polystyrene, recycled EPS, physical properties, mechanical properties, underfloor heating and cooling boards

1. Uvod

Ekspandirani polistiren (EPS) široko se primjenjuje u građevinarstvu i ambalažnoj industriji zbog male gustoće, dobrih toplinsko-izolacijskih svojstava, jednostavne obrade i povoljne cijene [12]. U građevinarstvu se koristi kao toplinsko-izolacijski materijal u različitim proizvodima i sustavima, a u ambalažnoj industriji primjenjuje se za zaštitu prehrambenih, elektroničkih i drugih osjetljivih proizvoda [12, 13]. Zbog takve primjene EPS se pojavljuje u različitim tokovima otpada, pri čemu se građevinski i ambalažni EPS mogu znatno razlikovati prema podrijetlu, stanju materijala, razini onečišćenja i mogućnosti ponovne prerade. Građevinski EPS najčešće nastaje kao otpad pri proizvodnji, ugradnji ili uklanjanju postojećih građevinskih proizvoda [11, 14]. Ovisno o podrijetlu, takav materijal može biti relativno čist, primjerice ako nastaje kao proizvodni ostatak ili neugrađeni materijal, ali može biti i onečišćen drugim građevinskim slojevima nakon dugotrajne uporabe [14]. Ambalažni EPS, s druge strane, u pravilu brže ulazi u tokove otpada nakon uporabe, ali njegova svojstva mogu biti promijenjena zbog uvjeta primjene, onečišćenja i prethodnog mehaničkog oštećenja. Zbog toga podrijetlo recikliranog EPS-a može imati važan utjecaj na svojstva novih proizvoda u koje se takav materijal ugrađuje.

S obzirom na široku primjenu EPS-a kao ambalažnog materijala, značajne količine tog materijala postaju otpad u relativno kratkom vremenskom razdoblju nakon uporabe. Od ukupne količine plastičnog otpada (4440 kt) 61 % (2692 kt) otpada dolazi iz ambalažnog sektora, a iz građevinskog sektora dolazi 8 % (372 kt). U usporedbi s približno 42 kt EPS/XPS otpada unutar građevinskog sektora, vidljivo je da se znatno veće količine materijala u sustav gospodarenja otpadom uvode kroz ambalažni sektor [11]. Za razliku od ambalažnog EPS-a, građevinski EPS nakon ugradnje ostaje dio građevnog proizvoda ili sustava, zbog čega se u pravilu poslije pojavljuje u sustavu gospodarenja otpadom. Pri tome je potrebno uzeti u obzir i otpad koji nastaje tijekom same ugradnje EPS-a, primjerice rezanjem i prilagodbom ploča na samom gradilištu [8, 11, 13]. Problem zbrinjavanja EPS-a proizlazi iz njegove kemijske postojanosti, nebiorazgradivosti i male gustoće, zbog čega zauzima velik volumen u sustavu gospodarenja otpadom. Budući da se EPS sastoji približno od 98 % zraka i 2 % polistirena [15], njegovo je zbrinjavanje povezano sa širim izazovima upravljanja plastičnim otpadom u Europskoj uniji. Europska je komisija 2018. godine donijela Europsku strategiju za plastiku u kružnom gospodarstvu kojom su postavljeni temelji za smanjenje onečišćenja plastikom [16]. Strategijom se naglašava prelazak na kružno gospodarstvo, recikliranje plastične ambalaže i smanjenje uporabe jednokratne plastike [16].

U tom kontekstu razvijaju se i normativni okviri usmjereni na projektiranje proizvoda s naglaskom na njihovu reciklabilnost. Norma HRN EN 18092:2025 "Smjernice za dizajn građevnih proizvoda od plastike prilagođen recikliranju – Proizvodi za toplinsku izolaciju od ekspandiranog polistirena (EPS)" [14] propisuje načela "design for recycling" pristupa, uključujući

kriterije reciklabilnosti te preporuke za primjenu energetski učinkovitih postupaka recikliranja, s posebnim naglaskom na mehaničko recikliranje.

Prema programu rada za europsku standardizaciju za 2022. godinu, namjera je povećati udio recikliranog materijala u ETICS sustavima [17]. Taksonomija EU-a ima za cilj postići kvotu recikliranja od 70 % [18]. Države članice ili regije već su danas uspostavile zahtjeve za reciklirani sadržaj ili to namjeravaju učiniti.

Unatoč tim ciljevima, prema važećim smjernicama kvalitete IVH-a [19] i FV-WDVS-a [20] te normi DIN 4108-10 [21], udio recikliranog EPS-a u građevinskim proizvodima najčešće se kreće u rasponu od 0 do 19 % masenog udjela. Ograničena dostupnost pouzdanih podataka o fizikalnim i mehaničkim svojstvima EPS-a s većim udjelom reciklata predstavlja jedan od razloga takvog raspona, stoga je u svrhu istraživanja provedeno ispitivanje i uz udio reciklata od 50 % kako bi se procijenio utjecaj povećanog sadržaja recikliranog materijala na svojstva proizvoda.

Iako se reciklirani EPS već primjenjuje u pojedinim građevinskim proizvodima, dostupni podaci o fizikalnim i mehaničkim svojstvima EPS ploča s većim udjelima reciklata još su ograničeni, osobito kada se uspoređuju reciklati različitog podrijetla. To je važno jer se građevinski i ambalažni EPS mogu razlikovati prema stanju materijala, stupnju oštećenja i mogućoj onečišćenosti, što se može odraziti na svojstva novih proizvoda. U ovom se radu stoga analizira utjecaj udjela i podrijetla recikliranog EPS-a na fizikalna i mehanička svojstva izolacijskih ploča namijenjenih primjeni u sustavima podnog grijanja i hlađenja.

Na toj je osnovi razvijen projekt recEPS: "Razvoj inovativne izolacijske ploče sa značajnim udjelom reciklata za podno grijanje i hlađenje" [22], usmjeren na smanjenje ekološkog opterećenja primjenom recikliranog materijala u proizvodnji izolacijskih ploča. U okviru projekta provedena su ispitivanja gustoće, tlačne čvrstoće pri 10 % deformacije, čvrstoće na savijanje, vlačne čvrstoće i toplinske provodljivosti.

Cilj je rada prikazati fizikalna i mehanička svojstva EPS-a s različitim udjelom recikliranog materijala iz dvaju izvora, pri čemu svaki sadrži frakcije različitih gustoća. Dobivena svojstva uspoređuju se sa svojstvima neiskorištenog EPS-a (udio reciklata 0 %).

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Postoji iskustvo s recikliranjem izolacijskih materijala od ekspandiranog polistirena (EPS), posebno u pogledu ambalažnih materijala. Također je poznato da se otpad iz proizvodnje i sortirani ostaci s gradilišta ponovno koriste u proizvodnji izolacijskih materijala od EPS-a. Količina recikliranog materijala koji se koristi u proizvodnji značajno ovisi o zahtjevima predviđene primjene. Materijal koji se koristi u ETICS sustavima onečišćen je s vanjske strane žbukom i mrežicom, a s unutarnje strane punilom i ljepljivom. Takav se materijal ne može preraditi u visokokvalitetni proizvod za ETICS.

Prema smjernicama kvalitete Njemačkog udruženja proizvođača krute pjene (IVH) i Njemačkog udruženja za vanjske toplinsko-izolacijske kompozitne sustave (FV-WDVS), udio recikliranog EPS-a u fasadnim izolacijskim pločama ne smije prelaziti 5 % težinski [23]. U primjenama s manje strogim tehničkim zahtjevima ponekad su dopuštene ili se čak koriste znatno veće količine recikliranog materijala. Primjeri uključuju:

- 20 tež. % u podnoj izolaciji tipa DEO (unutarnja izolacija ispod estriha bez zahtjeva za zvučnom izolacijom) prema DIN 4108-10 [24]
- 20 tež. % u izolacijskim pločama za ravne krovove tipa DAA (vanjska izolacija krova ili stropa, otporna na vremenske uvjete, ispod hidroizolacije) prema DIN 4108-10 [24]
- EPS reciklirane ploče s do 100 tež. % recikliranih granula za podnu izolaciju tipa DEO prema DIN 4108-10 [24], kao drenažne ploče za perimetralnu izolaciju s razinom toplinske provodljivosti do 0,035 W/(m·K), kao i za područja primjene unutarnje izolacije zidova (WI), unutarnje izolacije (DI) i izolacije između rogova (DZ) prema DIN 4108-10 [24]
- rastresite reciklirane granule kao izravnavajuće nasipavanje, punilo / lagani agregat (npr. za poroznost opeke) (Sprengard i sur., 2013.) [25].

Polistirenski izolacijski materijali koji se trenutačno stvaraju kao otpad obično sadrže bromirani usporivač gorenja HBCD. HBCD je obuhvaćen Uredbom (EU) 2019/1021 o postojećim organskim onečišćujućim tvarima (POPs) [26]. Budući da navedena Uredba zahtijeva da se otpad koji sadrži POPs trajno ukloni iz gospodarskog ciklusa i isključi iz potencijalnih procesa recikliranja, u budućnosti će biti sve potrebnije odvojeno prikupljati ove izolacijske materijale na bazi mineralnog ulja i slati ih na energetske uporabu ili zbrinjavanje. To se postiže ili podržava odvojenim prikupljanjem koje zahtijeva Uredba o komercijalnom otpadu. U budućnosti će recikliranje materijala od EPS izolacijskih ploča biti moguće samo s EPS-om bez HBCD-a. Jedan primjer recikliranja materijala jest CreaSolv proces [27] za selektivnu ekstrakciju polistirena pomoću organskih otapala. U ovom se procesu, polistirenski polimer odvaja od usporivača gorenja HBCD-a solvolizom, brom se oporavlja i omogućuje se proizvodnja visokokvalitetnih PS granula. Pilot postrojenje CreaSolv nalazi se kod proizvođača aditiva za usporavanje gorenja ICL-IP Europe u Nizozemskoj. Međutim, trenutačno nije dostupno postrojenje CreaSolv industrijskih razmjera; zasad rad ne bi bio ekonomski isplativ zbog malih količina otpada [28]. Međutim, u bliskoj budućnosti bila bi poželjna uspostava pilot-postrojenja manjeg kapaciteta kako bi se optimalno iskoristio značajno rastući volumen ETICS otpada koji se očekuje u nadolazećim godinama. Za implementaciju bio bi potreban optimizirani logistički koncept koji mehanički obrađuje ETICS otpad na mjestu nastanka (smanjenje volumena), a zatim ga uvodi u regionalna postrojenja CreaSolv za preradu. To bi zahtijevalo kratke udaljenosti, kao i udaljenosti između mjesta rušenja i postrojenja za spaljivanje otpada koja su ovlaštena za

energetsku uporabu EPS otpada, koja trenutačno u Hrvatskoj ne postoje. Prema njemačkoj Saveznoj agenciji za okoliš, ovaj proces potpuno uništava POP tvar HBCD [29]. Spaljivanje kao zamjensko gorivo u tvornici cementa ili opeke ilegalno je jer HBCD možda neće potpuno izgorjeti tijekom ovog procesa [28].

3. Opis proizvodnje i postupaka recikliranja EPS-a

EPS općenito obuhvaća sve pjenaste (ekspandirajuće) homolimere i kopolimere stirena. Prema Maulu [30], EPS se dijeli na čestične pjene, ekstrudirane pjene i integralne pjene. Uglavnom se proizvode od predgotovljenog polistirena korištenjem sredstava za pjenjenje. Kao sredstva za pjenjenje koriste se ugljikovodici s niskim vrelištem (npr. pentan) ili kemikalije koje se razgrađuju uz razvijanje plina, poput azospojeva. Čestične pjene opći su naziv za sve pjene čija se proizvodnja odvija u dvije faze:

- prethodne ekspanzije : proizvode se prethodno ekspandirane čestice koje sadrže sredstva za pjenjenje (3,5 do 7 %) pentana kao sredstva za pjenjenje i ekspandiraju se 20 do 50 puta u odnosu na svoju izvornu veličinu pomoću pare (cca. 90 °C) – pri čemu sredstvo za pjenjenje isparava
- proizvodnje blok pjene: nakon hlađenja, u drugoj fazi prethodno ekspandirane čestice (granule) drugi se put pjene parom (cca. 110 do 120 °C) u zatvorenim kalupima, što uzrokuje spajanje kuglica u homogeni materijal.

Ekspandirani polistiren (EPS) osim velike primjene u građevinarstvu ima široku primjenu i u drugim granama kao što su automobilska industrija, prehrambena industrija, poljoprivredna industrija, ali i zdravstvena skrb [31–34]. U građevinarstvu se EPS najčešće koristi kao toplinska izolacija u ETICS sustavima, no sve je češća njegova primjena za proizvodnju laganih betona i kompozitnih materijala [33, 34]. Kada govorimo upotrebi EPS-a u zdravstvu i prehrambenoj industriji, govorimo o upotrebi EPS-a za transportnu ambalažu, osobito za temperaturno osjetljive proizvode [32]. Sličnu primjenu EPS ima i u poljoprivrednoj industriji gdje se koristi kao ambalaža za sadnice biljaka [32]. U automobilskoj industriji EPS se koristi za pojedine oblikovane dijelove automobila [31]. S obzirom na široku primjenu EPS-a u različitim industrijama, količine nastalog otpada značajne su i zahtijevaju učinkovito upravljanje. Prema izvješću Global EPS Sustainability Alliance [32], EPS se već reciklira u 72 zemlje diljem svijeta, što pokazuje njegov potencijal za ponovnu upotrebu i održivost materijala. Danas se EPS reciklira na tri načina: mehanički, kemijski i termički.

3.1. Mehaničko recikliranje

Mehaničko recikliranje predstavlja jednu od najčešće primjenjivanih metoda recikliranja otpada od ekspandiranog

polistirena (EPS), pri čemu se materijal obrađuje bez promjene njegove kemijske strukture. Postupak u pravilu uključuje sortiranje, pranje i sušenje EPS otpada, nakon čega slijedi smanjenje veličine drobljenjem ili mljevenjem u pahuljice, granule ili prah [12]. Tijekom procesa drobljenja dolazi do fizičkog oštećenja EPS kuglica, pri čemu se gubi njihov optimalan oblik, što može rezultirati smanjenjem konačne volumenske mase materijala. Svako mehaničko recikliranje u određenoj mjeri narušava svojstva EPS-a i dovodi do povećane heterogenosti materijala, međutim, u dostupnoj literaturi ne postoje istraživanja u kojima bi degradacija svojstava bila kvantificirana [35]. Unatoč tome, istraživanja pokazuju da se volumen EPS otpada može značajno smanjiti bez bitnog gubitka funkcionalnih svojstava, čime se omogućuje njegova ponovna uporaba u građevinskim primjenama poput laganih betona, kao i toplinsko-izolacijskih kompozita [36, 37]. U usporedbi s kemijskim i termičkim postupcima, mehaničko recikliranje odlikuje se manjom potrošnjom energije, ekološkom prihvatljivošću i ekonomskom isplativošću [12].

Reciklirani EPS dobiven mehaničkim postupcima može se ponovno koristiti u proizvodnji novih EPS proizvoda. Samljeveni EPS otpad može se preraditi u granulatu koji se zatim ponovno pjeni te koristi za proizvodnju novih izolacijskih ploča, primjerice za podnu izolaciju ili drenažne ploče za obodnu izolaciju [23]. Osim toga, reciklirani EPS može se koristiti kao lagani agregat u cementnim kompozitima, čime se proizvode laki betoni s poboljšanim toplinsko-izolacijskim svojstvima [36, 37]. U pojedinim istraživanjima razmatra se i uporaba recikliranog EPS-a u kompozitnim građevinskim pločama na bazi gipsa ili drugih mineralnih veziva.

3.2. Kemijsko recikliranje

Kemijsko (tercijarno) recikliranje EPS-a uključuje depolimerizaciju materijala u stiren-monomer katalitičkim procesima, čime dolazi do promjene kemijske strukture polimera [35]. Ovi postupci obuhvaćaju upotrebu različitih kemikalija za razgradnju EPS-a, a rezultati su manje molekule tekućina ili plinova koje se mogu koristiti za dobivanje novih goriva i kemikalija [35]. Ugwu i Obele [12], navode da kemijsko recikliranje uključuje i razne metode otapanja EPS-a u organskim ili biološki prihvatljivim otapalima, čime se omogućuje kontrolirana prerada materijala u nove proizvode.

U postupcima otapanja EPS-a dobiva se polistirenska masa koja se može ponovno koristiti kao sekundarna sirovina u proizvodnji polistirenskih proizvoda. U praksi se takav reciklirani polistiren često miješa s djevičanskim polistirenskim granulatom kako bi se osigurala stabilna kvaliteta sirovine i odgovarajuća procesibilnost materijala tijekom daljnje prerade. Kod pojedinih postupaka kemijskog recikliranja, poput CreaSolv procesa [27], moguće je selektivno odvajanje bromiranih usporivača gorenja (npr. HBCD) iz otopljenog polimera, čime se omogućuje dobivanje pročišćenog polistirena pogodnog za ponovnu uporabu u proizvodnji novih proizvoda.

Prednosti kemijskog recikliranja uključuju visoku učinkovitost recikliranja i nizak energetska zahtjev u usporedbi s mehaničkim i termičkim metodama, a glavni su nedostaci složenost procesa, potreba za stručnim znanjem i iskustvom te visoki troškovi i potencijalni okolišni rizici korištenih kemikalija [35].

3.3. Termičko recikliranje

Tkalić i sur. [35] navode da piroliza i uplinjavanje predstavljaju termo-kemijske procese depolimerizacije EPS-a i ponekad se svrstavaju u termičko recikliranje. Piroliza omogućuje obradu kontaminirane plastike i pretvara otpad u korisne ugljikovodike, ali zahtijeva visoke energetske resurse i dugo vrijeme reakcije. Uplinjavanje pretvara otpad u energiju taljenjem na vrlo visokim temperaturama, čime se smanjuje potreba za odlaganjem i troškovi spaljivanja. Termičko recikliranje ne samo da smanjuje volumen EPS otpada, već omogućuje i oporabu energije koja se može koristiti za pogon drugih procesa u postrojenjima kružnog gospodarstva. Unatoč tim prednostima, zbog visokih energetska zahtjeva, emisija stakleničkih plinova i rizika od toksičnih tvari u zraku ove se metode uglavnom ne smatraju ekološki prihvatljivim oblikom recikliranja.

4. Eksperimentalni program i materijali

4.1. Opis ispitnih uzoraka

Ispitivanje je provedeno na 4 vrste uzoraka koji se razlikuju u sastavu smjese koja je korištena za njihovu izradu. Uzorci s oznakom S1 napravljeni su od smjese osnovnog EPS-a i građevinskog EPS-a, a uzorci oznake S2 izrađeni su od smjese osnovnog EPS-a i ambalažnog EPS-a. Izrada smjese S1 podrazumijeva mehaničko recikliranje građevinskog EPS-a koji nastaje kao nusprodukt proizvodnje toplinske izolacije ili kao neugrađena toplinska izolacija. Takav EPS nije kontaminiran, a njegova svojstva nisu narušena starenjem, vremenskim uvjetima ili pak uvjetima primjene. S druge strane, za proizvodnju smjese S2 u ovoj je razvojnoj fazi korišten čisti ambalažni EPS namijenjen primjeni u poljoprivredi, koji prethodno nije bio u uporabi. Cilj ove početne faze razvoja proizvoda bio je najprije provjeriti može li se takav materijal koristiti za izradu EPS ploča s recikliranim sadržajem te kako njegovo podrijetlo i udio utječu na ispitivana svojstva. Razvoj postupka pripreme i dekontaminacije ambalažnog EPS-a nakon uporabe nije bio obuhvaćen ovim istraživanjem, nego predstavlja sljedeći korak u razvoju proizvoda i mogućnost daljnjeg unaprjeđenja procesa.

Nakon procesa drobljenja reciklirani se sadržaj s prosječnom gustoćom od 15 do 17 kg/m³ miješa s osnovnim EPS-om nominalne gustoće 20 kg/m³ i 25 kg/m³. Osnovni EPS sastoji se od uniformnih, zatvorenih kuglica koje su razdvojene tankim membranama, a reciklirani EPS (iz izvora S1 i iz izvora S2) karakteriziraju napukle i zdrobljene kuglice. slika 1. i slika 2. prikazuju razliku u kuglicama osnovnog i recikliranog EPS:



Slika 1. Uniformne kuglice osnovnog EPS-a



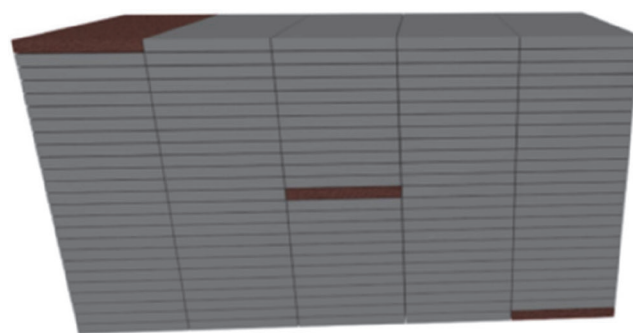
Slika 2. Napukle kuglice mehanički recikliranog EPS-a

Kako bi se otkrilo na koji način reciklirani sadržaj utječe na ispitivana svojstva, izrađeni su uzorci koji sadrže 5 %, 10 %, 25 % i 50 % recikliranog sadržaja te referentni uzorci koji sadrže samo osnovni EPS. Na taj su način dobivene dvije vrste uzoraka koje zadovoljavaju smjernice navedene u DIN-4108-10 [24], to jest udio reciklata manji je od 20 % tež., te dvije vrste uzoraka koje sadrže više od 20 % reciklata (25 % i 50 %) s ciljem istraživanja svojstava i ponašanja proizvoda s većom količinom recikliranog materijala. S obzirom na to uzorci su označavani na sljedeći način:

- **serija S1-20** – uzorci dobiveni miješanjem osnovnog EPS-a nominalne gustoće 20 kg/m^3 i mehanički recikliranog EPS-a iz izvora S1
- **serija S1-25** – uzorci dobiveni miješanjem osnovnog EPS-a nominalne gustoće 25 kg/m^3 i mehanički recikliranog EPS-a iz izvora S1
- **serija S2-20** – uzorci dobiveni miješanjem osnovnog EPS-a nominalne gustoće 20 kg/m^3 i mehanički recikliranog EPS-a iz izvora S2
- **serija S2-25** – uzorci dobiveni miješanjem osnovnog EPS-a nominalne gustoće 25 kg/m^3 i mehanički recikliranog EPS-a iz izvora S2.

Ukupno je proizvedeno 18 EPS blokova dimenzija $2600 \times 1300 \times 1050 \text{ mm}$, od čega su dva bloka izrađena od osnovnog EPS-a (0 % recikliranog sadržaja), a preostalih je 16 blokova proizvedeno miješanjem osnovnog EPS-a i recikliranog sadržaja iz izvora S1 i S2 u volumnim udjelima 5 %, 10 %, 25 % i 50 %. EPS blokovi proizvedeni su standardnim postupkom parnog ekspanzijskog prešanja, pri čemu je reciklirani EPS homogeno izmiješan s prethodno ekspanziranim izvornim granulama prije kalupljenja. Međutim, zbog nepravilnog oblika i oštećene strukture recikliranih granula povećanje udjela recikliranog materijala dovelo je do smanjenja kohezije, a time i do niže volumenske mase, što je posljedično utjecalo na mehanička i toplinska svojstva.

Iz svakog bloka izrezane su po tri ploče (vrh, sredina i dno) dimenzija $500 \times 1000 \times 50 \text{ mm}$ po dijagonalnoj ravni primjenom metode rezanja vrućom žicom. Odabrane ploče, vizualno označene na slici 3., predstavljaju specifične položaje unutar bloka kako bi se osigurala sljedivost položaja uzoraka i omogućila analiza reprezentativnih uzoraka, uzimajući u obzir prostornu varijabilnost svojstava unutar EPS bloka.



Slika 3. Položaj ploča u bloku EPS (vrh, sredina i dno)

Uzorci za ispitivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava uzeti su iz prethodno izrezanih ploča. Ukupno su ispitana 54 uzorka za određivanje gustoće, 54 uzorka za određivanje toplinske provodljivosti, 270 uzoraka za određivanje tlačne čvrstoće pri 10 % deformacije, 162 na čvrstoću na savijanje i 54 uzorka za određivanje vlačne čvrstoće.

4.2. Ispitivana svojstva i metode ispitivanja uzoraka

Provođenjem ispitivanja željelo se utvrditi kako određeni udio recikliranog sadržaja utječe na fizikalna i mehanička svojstva. Ispitana su fizikalna svojstva: gustoća i toplinska provodljivost te mehanička svojstva: tlačna čvrstoća pri 10 % deformacije (σ_{10}), čvrstoća na savijanje (σ_b) te vlačna čvrstoća (σ_t).

Sva ispitivanja provedena su u kontroliranim laboratorijskim uvjetima pri temperaturi $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ i relativnoj vlažnosti zraka $50 \pm 5 \text{ \%}$ i u skladu s odgovarajućim hrvatskim i europskim normama.

Gustoća (ρ) određena je prema normi HRN EN ISO 29470:2020 [38]. Uzorci pravokutnog oblika dimenzija $1000 \times 500 \times 50$

Tablica 1. Ispitivana svojstva

Ispitano svojstvo	Norma	Broj uzoraka po bloku	Dimenzije uzorka [mm]
Gustoća	HRN EN ISO 29470:2020 [38]	3	1000 × 500 × 50
Toplinska provodljivost	HRN EN 12667:2002 [39]	3	300 × 300 × 50
Tlačna čvrstoća pri 10 % deformacije	HRN EN ISO 29469:2022 [40]	15	100 × 100 × 50
Čvrstoća na savijanje	HRN EN 12089:2013 [41]	9	300 × 150 × 50
Vlačna čvrstoća	HRN EN 1607:2013 [42]	3	100 × 100 × 50

mm vagani su na neautomatiziranoj električnoj preciznoj vagi (Kern PCD10KO), a duljina, širina i debljina određeni su pomoću mjernog stola Stiro-Lab XYZ.320 i pomičnog mjerila Suki, 0 – 150 mm.

Toplinska provodljivost (λ) određena je na uzorcima dimenzija 300 × 300 × 50 mm primjenom metode mjerenja protoka topline koristeći uređaj Stiro-Lab LM PLUS 305. U skladu s normom HRN EN 12667 [39] korištena je prosječna temperatura od 10 °C i razlika temperature između tople i hladne ploče od 10 °C.

Za ispitivanje mehaničkih svojstava tlačne čvrstoće pri 10 % deformacije (σ_{10}), čvrstoće na savijanje (σ_b) i vlačne čvrstoće (σ_t) korišten je univerzalni ispitni uređaj za ispitivanje svojstva toplinsko izolacijskih materijala (Excel Didactic, model FS.10), opremljen mjernom čelijom kapaciteta 10 kN.

Tlačna čvrstoća pri 10 % deformacije (σ_{10}) određena je na pravokutnim uzorcima dimenzija 100 × 100 × 50 mm. Uzorci su prije početka ispitivanja predopterećeni tlakom od 250 Pa, nakon čega su opterećivani konstantnom brzinom deformacije od 10 mm/min, u skladu s normom HRN EN ISO 29469 [40].

Ispitivanje čvrstoće na savijanje (σ_b) provedeno je na uzorcima dimenzija 300 × 150 × 50 mm, uz raspon oslonaca od 250 mm i brzinu opterećenja 10 mm/min. Ispitivanje je provedeno prema Metodi B, sukladno normi HRN EN 12089 [41].

Vlačna čvrstoća (σ_t) ispitana je na pravokutnim uzorcima dimenzija 100 × 100 × 50 mm, u skladu s normom HRN EN 1607 [42].

U tablici 1. je za svako ispitano svojstvo navedena norma po kojoj je ispitivanje provedeno, broj uzoraka uzetih iz pojedinog bloka, kao i dimenzije uzoraka na kojima je ispitivanje provedeno.

5. Rezultati i rasprava

S obzirom na to da je cilj razviti izolacijsku ploču za podno grijanje i hlađenje, dobiveni rezultati promatraju se i kroz mogućnost primjene takvog materijala u konačnom proizvodu. Kod takvih ploča važno je da toplinska provodljivost ostane što niža, ali i da se zadrže odgovarajuća mehanička svojstva, posebno tlačna čvrstoća pri 10 % deformacije, čvrstoća na savijanje i vlačna čvrstoća. To je važno jer ploča u sustavu poda mora osigurati toplinsku izolaciju, ali i stabilnu podlogu za prijenos opterećenja kroz slojeve poda.

5.1. Utjecaj recikliranog sadržaja na fizikalna svojstva ispitivanih uzoraka

U nastavku su prikazani rezultati utjecaja recikliranog sadržaja na gustoću i toplinsku provodljivost. Rezultati su prikazani u obliku stupčastih dijagrama gdje je na apscisi prikazan udio recikliranog sadržaja u smjesi, a na ordinati je prikazano fizikalno svojstvo materijala (gustoća i toplinska provodljivost). Uz to, vertikalne linije na vrhu svakog stupčastog dijagrama predstavljaju standardnu devijaciju, koja ukazuje na raspršenost izmjerenih vrijednosti oko srednje vrijednosti fizikalnog svojstva. Relativno male vrijednosti standardne devijacije upućuju na dobru ponovljivost mjerenja i homogenost uzoraka, a blago povećanje raspršenosti kod viših udjela reciklata može se povezati s neujednačenom strukturom recikliranog EPS-a.

Polinomne krivulje trenda korištene su kao opisni prikaz promjene svojstava u ispitnom rasponu udjela reciklata te ih ne treba tumačiti kao model za predviđanje ponašanja materijala izvan ispitanih vrijednosti.

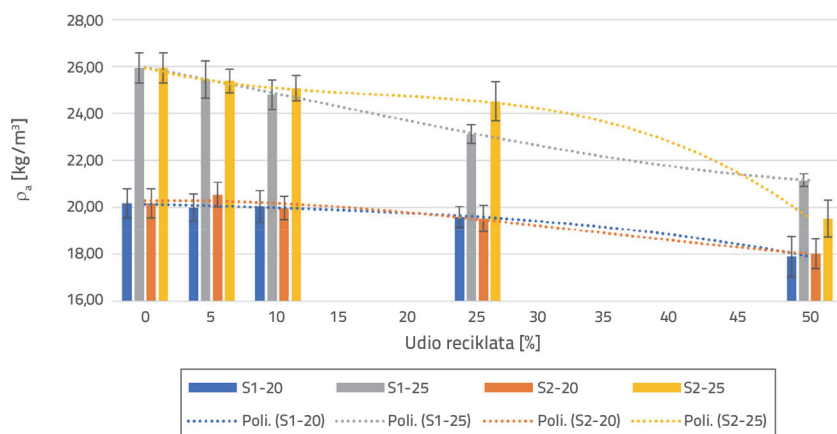
Slika 4. prikazuje dijagram iz kojeg se može uočiti opći trend smanjenja gustoće s porastom udjela recikliranog sadržaja. Budući da promjena gustoće s porastom udjela reciklata ne pokazuje potpuno linearan tijek, na dijagramu su prikazane polinomne krivulje trenda 3. stupnja kao opisna aproksimacija eksperimentalnih podataka, a pripadni su izrazi i koeficijenti determinacije (R^2) prikazani u tablici 2. Prosječna gustoća korištenih recikliranih materijala (S1 i S2) kretala se u rasponu od 15 do 17 kg/m³, što je niže u odnosu na gustoću izvornog EPS-a korištenog u referentnim uzorcima, pa je i očekivano da s povećanjem udjela reciklata dolazi do smanjenja ukupne gustoće materijala.

Pri nižim udjelima reciklata (do oko 10 %) promjene su gustoće relativno male (do 2 %), a izraženiji se pad (pad gustoće za 7 % kod uzorka S1-25 uspoređujući uzorak koji sadrži 10 % reciklata i uzorak koji sadrži 25 % reciklata) uočava pri većim udjelima recikliranog materijala, osobito između 25 % i 50 %. Uzorci s većom početnom gustoćom (S1-25 i S2-25) zadržavaju veću apsolutnu gustoću, ali pokazuju i veći relativni pad s povećanjem udjela reciklata. S druge strane, uzorci S1-20 i S2-20 pokazuju stabilnije ponašanje pri nižim i srednjim udjelima reciklata.

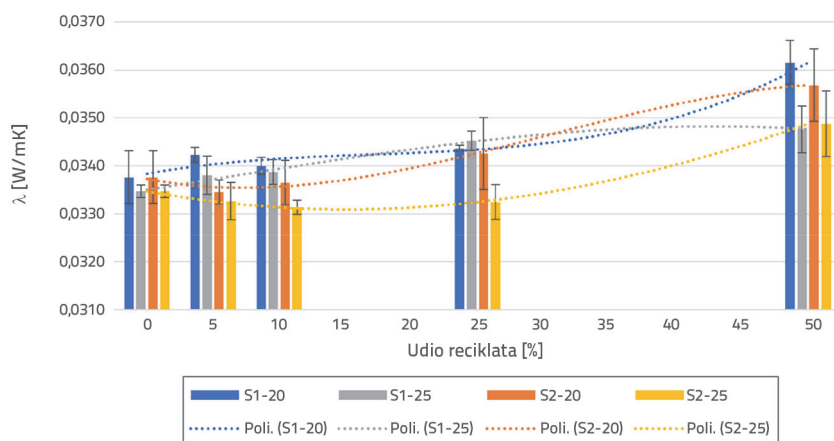
Pad gustoće nije isključivo posljedica niže gustoće recikliranog materijala, već i promjena u njegovoj strukturi. Mehaničkim recikliranjem dolazi do promjena u čelijskoj strukturi EPS-a,

Tablica 2. Izrazi krivulja trenda i R^2 za gustoću EPS-a s reciklatom

Oznaka uzorka	Izraz crte trenda	R^2
S1-20	$y = -0,0017x^3 + 0,0081x^2 - 0,0913x + 20,234$	0,9970
S1-25	$y = 0,0024x^3 - 0,026x^2 - 0,4905x + 26,468$	0,9998
S2-20	$y = 0,0027x^3 - 0,0631x^2 + 0,1686x + 20,168$	0,9670
S2-25	$y = -0,0153x^3 + 0,2033x^2 - 1,0489x + 26,798$	1



Slika 4. Utjecaj udjela recikliranog sadržaja na gustoću EPS-a



Slika 5. Utjecaj udjela recikliranog sadržaja na toplinsku provodljivost EPS-a

zbog čega dolazi do neujednačenosti u veličini i rasporedu ćelija, što se odražava na svojstva materijala.

Slika 5. prikazuje utjecaj udjela recikliranog sadržaja na toplinsku provodljivost EPS-a s određenim udjelom reciklata. Moguće

radijacijskog prijenosa topline kroz ćelije, pri čemu njegov doprinos raste približno s kvadratom promjera ćelija, što može značajno povećati toplinsku provodljivost kod materijala manje gustoće [43].

Tablica 3. Izrazi krivulja trenda i R^2 za toplinsku provodljivost EPS-a s reciklatom

Oznaka uzorka	Izraz crte trenda	R^2
S1-20	$y = 6 \cdot 10^{-6}x^3 - 7 \cdot 10^{-5}x^2 + 4 \cdot 10^{-4}x + 0,0335$	0,9812
S1-25	$y = -1 \cdot 10^{-6}x^3 + 7 \cdot 10^{-6}x^2 + 2 \cdot 10^{-4}x + 0,0333$	0,9888
S2-20	$y = -6 \cdot 10^{-6}x^3 + 1 \cdot 10^{-4}x^2 - 5 \cdot 10^{-4}x + 0,0341$	0,9939
S2-25	$y = -5 \cdot 10^{-7}x^3 + 5 \cdot 10^{-5}x^2 - 3 \cdot 10^{-4}x + 0,0338$	1

je uočiti opći trend porasta toplinske provodljivosti s povećavanjem udjela reciklata, iako taj trend ponovno nije linearan. Pri manjim je udjelima reciklata promjena toplinske provodljivosti manja, a izraženiji se porast može uočiti pri većim udjelima (25 % i 50 % udjela reciklata). Na dijagramu su za svaki pojedini EPS prikazane i polinomne krivulje trenda 3. stupnja, koje služe za opis promjene toplinske provodljivosti u ispitanoj rasponu udjela reciklata. Pripadajući algebarski izrazi i koeficijenti determinacije prikazani su u tablici 3.

Na prvi pogled porast toplinske provodljivosti uz smanjenje gustoće može se činiti neočekivanim s obzirom na to da se povećanjem udjela zraka u materijalu očekuje smanjenje prijenosa topline. Međutim, ukupna toplinska provodljivost materijala proizlazi iz više mehanizama prijenosa topline i može se prikazati kao zbroj doprinosa krute faze, plina, zračenja i strujanja (konvekcije), (izraz (1) [43]:

$$\lambda_{\text{ef}} = \lambda_{\text{kruta}} + \lambda_{\text{plin}} + \lambda_{\text{zračenje}} + \lambda_{\text{strujanje}} \quad (1)$$

Pri manjim gustoćama EPS sadrži manju količinu krutog polistirena, što rezultira većim ćelijama i tanjim stijenkama. Tanje stijenke omogućuju veći udio

Tablica 4. Izrazi krivulja trenda i R^2 za tlačnu čvrstoću EPS-a s reciklatom pri 10 % deformacije

Oznaka uzorka	Izraz crte trenda	R^2
S1-20	$y = -0,1926x^2 + 0,1074x + 129,99$	0,9996
S1-25	$y = -0,0603x^3 + 1,2836x^2 - 12,832x + 191,82$	0,9914
S2-20	$y = -0,0236x^3 + 0,3122x^2 - 4,1962x + 135,12$	0,9688
S2-25	$y = -0,0783x^3 + 0,9285x^2 - 7,9281x + 186,06$	0,9999

Istodobno, smanjenjem gustoće raste udio plinske faze. Iako je zrak dobar izolator, veće ćelije smanjuju otpor prolasku topline kroz plin, što dovodi do povećanja efektivne toplinske provodljivosti. U ekstremnim slučajevima može doći i do mikrokonvekcije unutar samih ćelija, što dodatno povećava prijenos topline [43].

Dodatno, mehaničko recikliranje dovodi do strukturnih nepravilnosti kao što su: neujednačena veličina ćelija, pucanje stijenka i djelomično otvorenu strukturu ćelija. Upravo takve nepravilnosti dovode do narušavanja zatvorene ćelijske strukture karakteristične za izvorni EPS i omogućuju učinkovitiji prijenos topline kroz materijal.

5.2. Utjecaj recikliranog sadržaja na mehanička svojstva

Analiziran je utjecaj udjela recikliranog materijala i mehaničkih svojstava: tlačne čvrstoće pri 10 % deformacije, čvrstoće na savijanje i vlačne čvrstoće. Rezultati u nastavku prikazani su stupčastim dijagramima gdje je na x-osi prikazan volumni udio recikliranog sadržaja izražen u postocima, a na y-osi prikazana je vrijednost mehaničkog svojstva. Uz to, na svakom su grafu prikazane crte trenda pojedinog mehaničkog svojstva u ovisnosti o udjelu reciklata, a izrazi su crta trenda i koeficijenti determinacije za svaki pojedini uzorak prikazane u tablici ispod dijagrama.

Analizom dijagrama na slici 6. može se uočiti pad tlačne čvrstoće s povećanjem udjela recikliranog materijala. Kvantitativno gledano, kod uzoraka s manjom početnom gustoćom (S1-20 i

S2-20) pri 50 % udjela recikliranog materijala zabilježen je pad tlačne čvrstoće pri 10 % deformacije za 16,87 % odnosno 26,58 % u odnosu na referentne uzorke. Kod uzoraka veće početne gustoće (S1-25 i S2-25) pad tlačne čvrstoće izraženiji je te iznosi 29,82 % odnosno 40,31 % uspoređujući vrijednosti referentnih uzoraka i uzoraka s 50 % recikliranog materijala. Takvo ponašanje u skladu je s prethodno uočenim padom gustoće, pri čemu veći udio recikliranog materijala dovodi do izraženijeg smanjenja mehaničkih svojstava.

Na dijagramu su dodatno prikazane krivulje trenda, pri čemu je za uzorak S1-20 korištena polinomna funkcija 2. stupnja, a za ostale su uzorke primijenjeni polinomi 3. stupnja. Krivulje su korištene za opis promjene tlačne čvrstoće u ispitanoj rasponu udjela reciklata, a pripadajući izrazi i vrijednosti koeficijenta determinacije (R^2) prikazani su u tablici 4.

Uz promjene vrijednosti tlačne čvrstoće, važno je znati i kakvo je ponašanje samog materijala, pa su u nastavku analizirani i radni dijagrami naprezanje-deformacija.

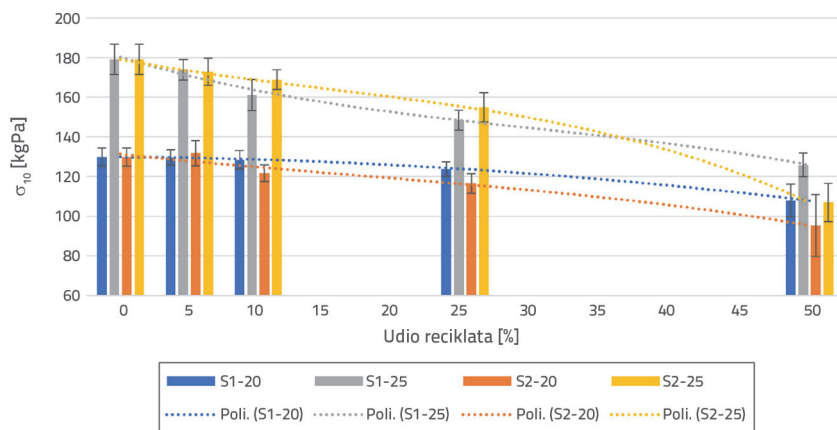
Gibson i Ashby [44] opisali su ponašanje staničnih materijala (u koje spada i EPS) na način da su dijagram naprezanje-deformacija podijelili na tri karakteristična područja: elastično područje (eng. *Elastic zone*), plato područje (eng. *Plateau zone*) i područje zgušnjavanja (eng. *Densification*), kao što je prikazano na slici 7.

U početnom elastičnom području deformacija raste proporcionalno s naprezanjem, pri čemu nagib tog dijela dijagrama odgovara početnom modulu elastičnosti materijala. U tom području deformacije su uglavnom reverzibilne i povezane s elastičnim deformiranjem stijenki ćelija [44].

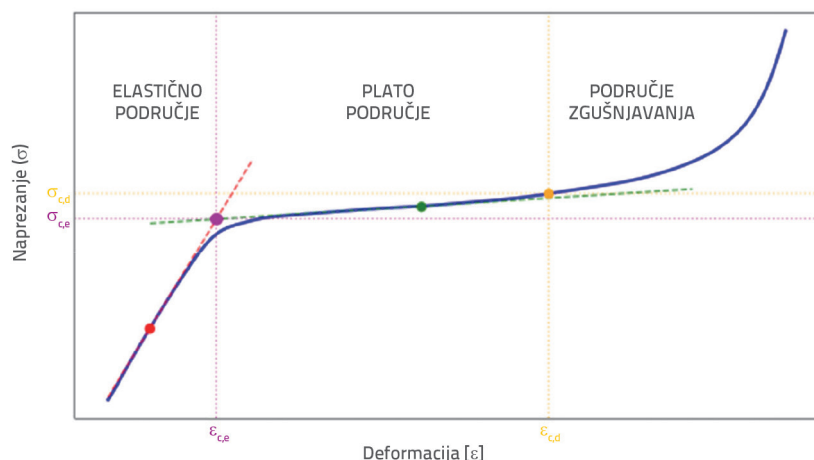
Nakon toga slijedi plato područje u kojem dolazi do postupnog kolapsa ćelijske strukture, odnosno savijanja i lomljenja stijenki ćelija, uz relativno mali porast naprezanja pri povećanju deformacije. Upravo u tom području materijal apsorbira najveći dio energije deformacije [44].

Pri većim deformacijama dolazi do zgušnjavanja materijala, to jest, do međusobnog zbijanja urušenih ćelija, pri čemu dolazi do smanjenja volumena šupljina i naglog povećanja krutosti materijala, što rezultira naglim porastom naprezanja [44].

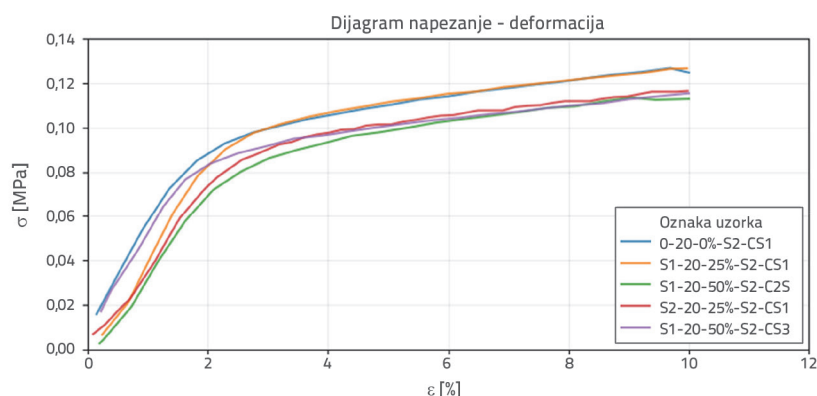
Na slici 8. prikazani su radni dijagrami



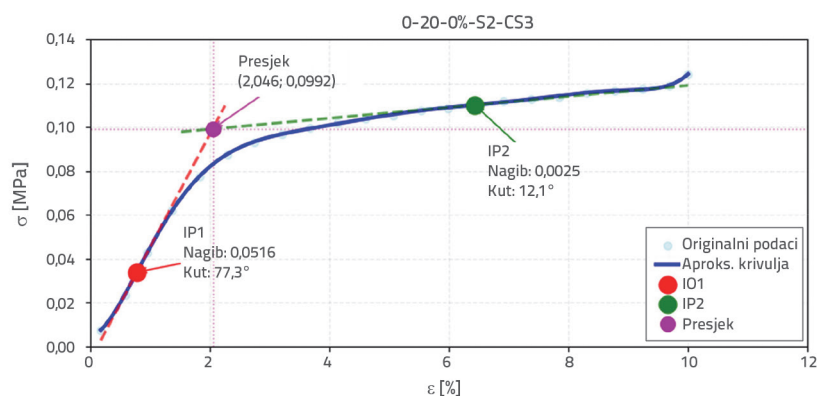
Slika 6. Utjecaj udjela recikliranog sadržaja na tlačnu čvrstoću pri 10 % deformacije



Slika 7. Karakteristični dijagram naprezanje-deformacija za EPS [44]



Slika 8. Dijagram naprezanje-deformacija za referentni uzorak i uzorke s različitim udjelom recikliranog EPS-a



Slika 9. Dijagram naprezanje-deformacija referentnog uzorka

naprezanje-deformacija za referentni uzorak i uzorke s različitim udjelom recikliranog EPS-a. Usporedbom krivulja može se uočiti pomak krivulja prema nižim vrijednostima naprezanja, a karakterističan oblik dijagrama ostaje očuvan.

Slika 9. prikazuje reprezentativni radni dijagram referentnog uzorka s označenim tangentama u elastičnom i plato području. Presjek tih tangenti definira prijelaz iz elastičnog u elastično-

plastično ponašanje materijala odnosno početak kolapsa čelijske strukture. Kod referentnog uzorka taj je prijelaz jasno izražen i relativno stabilan, što ukazuje na homogenu unutarnju strukturu materijala.

Na slici 10. i slici 11. prikazani su radni dijagrami uzoraka s 50 % građevinskog odnosno ambalažnog recikliranog EPS-a. U obama slučajevima dolazi do smanjenja nagiba početnog linearnog dijela dijagrama odnosno smanjenja početnog modula elastičnosti. Kod uzorka s ambalažnim recikliranim materijalom taj je učinak izraženiji. Istovremeno, plato područje postaje manje definirano, a prijelaz između područja pokazuje veću varijabilnost, što upućuje na neujednačen proces deformiranja i raniju inicijaciju kolapsa čelijske strukture.

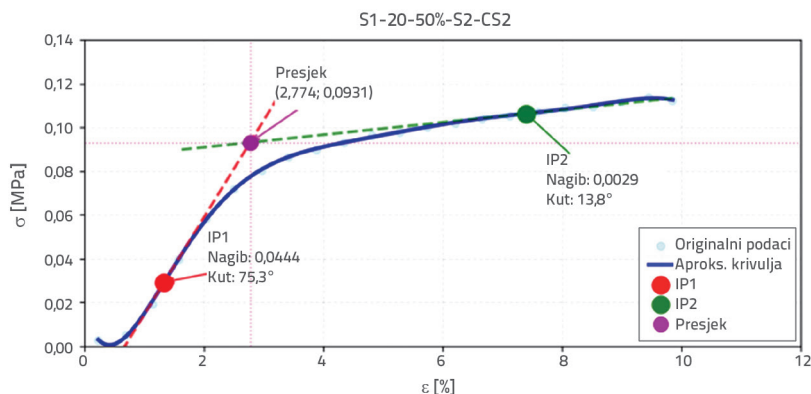
Vrijednosti nagiba tangente u elastičnom području (IP1) prikazane u tablici 5. i tablici 6. pokazuju jasan trend smanjenja s povećanjem udjela recikliranog materijala.

Kod referentnih uzoraka nagib tangente u elastičnom području kreće se u uskom rasponu od 0,0516 – 0,0525, kod uzoraka s 25 % građevinskog reciklata (S1) pojavljuje se veća raspršenost (0,0439 – 0,0553), a kod 50 % udjela dolazi do stabilnijeg, ali nižeg raspona vrijednosti (oko 0,044 – 0,047).

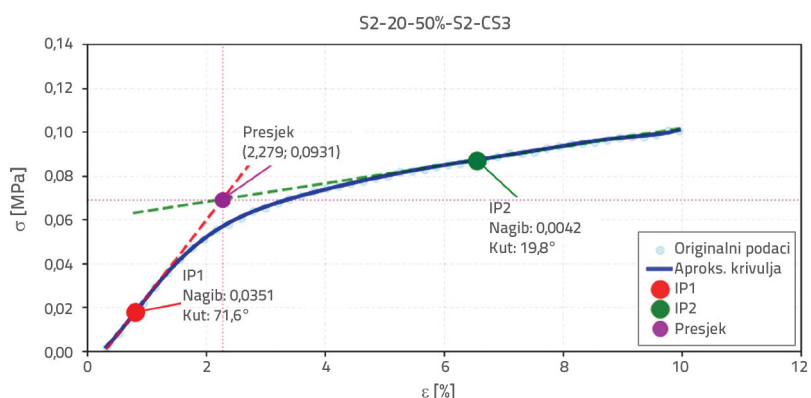
Kod uzoraka s ambalažnim recikliranim EPS-om (S2) pad je nagiba pravca (IP1) izraženiji. Već pri 25 % udjela vrijednosti se smanjuju na približno 0,0409 – 0,0436, a pri 50 % padaju na raspon od oko 0,0309 do 0,0351. Time se potvrđuje značajnije smanjenje početnog modula elastičnosti kod ambalažnog reciklata u odnosu na građevinski.

Za razliku od nagiba tangente u elastičnom području vrijednosti nagiba pravca u plato području (IP2) ne pokazuju jednoznačan trend. Kod referentnih uzoraka raspon vrijednosti relativno je

širok (0,0025 – 0,0056), a s povećanjem udjela reciklata dolazi do izraženije varijabilnosti bez jasnog monotonog ponašanja. Kod uzoraka s građevinskim recikliranim materijalom vrijednosti nagiba pravca u plato području (IP2) u pravilu se blago smanjuju, a kod ambalažnog reciklata, osobito pri 50 % udjela, dolazi i do lokalnog povećanja vrijednosti (do približno 0,0055).



Slika 10. Dijagram naprezanje-deformacija uzorka s 50 % građevinskog recikliranog EPS-a



Slika 11. Dijagram naprezanje-deformacija uzorka s 50 % ambalažnog recikliranog EPS-a

Takvo ponašanje upućuje na promjene u načinu deformiranja materijala u plato području. Povećana raspršenost i izostanak jasnog trenda mogu se povezati s neujednačenim kolapsom čelijske strukture i većom heterogenošću materijala, osobito kod ambalažnog reciklata.

Za kraj preostalo je prikazati rezultate ispitivanja čvrstoće na savijanje (slika 12. i tablica 7.) i vlačne čvrstoće (slika 13. i tablica 8.) u ovisnosti o udjelu recikliranog materijala. Rezultati

provedenih ispitivanja prikazani su u nastavku:

Usporedbom rezultata može se uočiti jasan trend smanjenja čvrstoće na savijanje s povećanjem udjela reciklata, pri čemu su najveće vrijednosti zabilježene na referentnim uzorcima, a najveći se pad uočava kod uzorka S1-25 i S2-25.

Pad čvrstoće posebno je izražen pri većim udjelima recikliranog materijala, osobito kod 50 %, gdje dolazi do značajnog smanjenja nosivosti u odnosu na referentne vrijednosti. Uočeni trend nije potpuno linearan, što je prikazano i pripadajućim polinomnim krivuljama trenda na dijagramu (slika 12.).

Izrazi krivulja trenda i vrijednosti koeficijenta determinacije prikazane u tablici 7. pokazuju dobro slaganje s eksperimentalnim podacima u ispitanoj rasponu ($R^2 \approx 0,97-0,999$). Pri tome se krivulje koriste za pregledniji prikaz uočenog trenda i usporedbu promjene savojne čvrstoće u ovisnosti o udjelu reciklata.

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće prikazani su na slici 13. Kao i kod savojne čvrstoće, uočava se opći trend smanjenja s povećanjem udjela recikliranog materijala. Kod uzoraka s građevinskim recikliranim EPS-om (S1) pad je postupan, pri čemu su promjene pri nižim udjelima reciklata manje izražene, a pri većim se udjelima uočava izraženije smanjenje čvrstoće.

Kod uzoraka s ambalažnim recikliranim EPS-om (S2) uočeno je odstupanje od općeg trenda, pri čemu pojedini uzorci pokazuju lokalno povećanje čvrstoće. Takvo ponašanje može se povezati s većom raspršenošću rezultata i potencijalnim

Tablica 5. Nagibi i kutovi IP1 i IP2 tangenti radnih dijagrama za pojedinačne uzorke koji sadrže 0 %, 25 % i 50 % građevinskog (S1) EPS-a

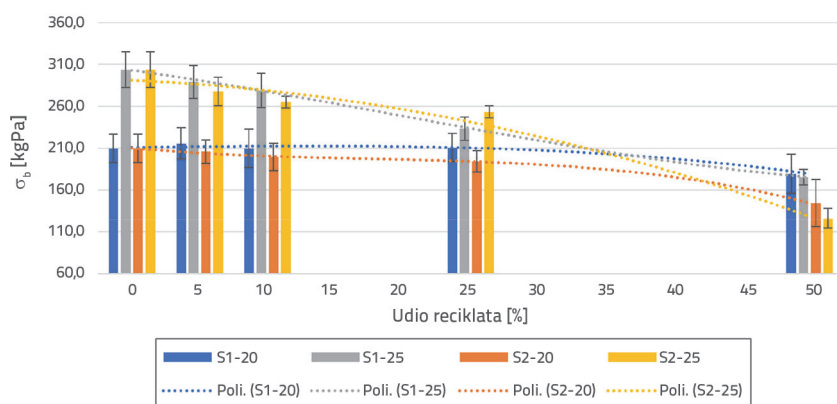
Oznaka uzorka	IP1 – nagib	IP1 – kut [°]	IP2 – nagib	IP2 – kut [°]
REF-1	0,0521	77,4	0,0048	22,4
REF-2	0,0525	77,5	0,0056	25,5
REF-3	0,0516	77,3	0,0025	12,1
S1-25-CS1	0,0553	78,1	0,0049	22,6
S1-25-CS2	0,0483	76,4	0,004	19
S1-25-CS3	0,0439	75,1	0,0027	13,1
S1-50-CS1	0,0474	76,2	0,0038	18
S1-50-CS2	0,0444	75,3	0,0029	13,8
S1-50-CS3	0,0445	75,3	0,0026	12,4

Tablica 6. Nagibi i kutovi IP1 i IP2 tangenti radnih dijagrama za pojedinačne uzorke koji sadrže 0 %, 25 % i 50 % ambalažnog (S2) EPS-a

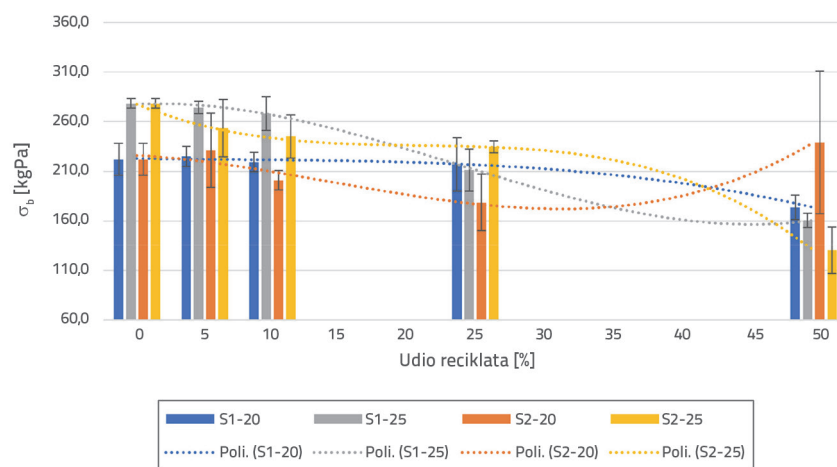
Oznaka uzorka	IP1 – nagib	IP1 – kut [°]	IP2 – nagib	IP2 – kut [°]
REF-1	0,0521	77,4	0,0048	22,4
REF-2	0,0525	77,5	0,0056	25,5
REF-3	0,0516	77,3	0,0025	12,1
S2-25-CS1	0,0436	75,0	0,0041	19,4
S2-25-CS2	0,0420	74,5	0,0027	13,1
S2-25-CS3	0,0409	74,1	0,0026	12,5
S2-50-CS1	0,0309	69,3	0,0055	25,3
S2-50-CS2	0,0342	71,2	0,0037	17,8
S2-50-CS3	0,0351	71,6	0,0042	19,8

Tablica 7. Izrazi krivulja trenda i R^2 za savojnu čvrstoću EPS-a s reciklatom

Oznaka uzorka	Izraz crte trenda	R^2
S1-20	$y = -0,0381x^3 + 0,0822x^2 + 0,9357x + 210$	0,9729
S1-25	$y = 0,0756x^3 - 1,1312x^2 - 9,2313x + 313,35$	0,9994
S2-20	$y = -0,1497x^3 + 2,025x^2 - 10,957x + 219,32$	0,9985
S2-25	$y = -1,263x^2 - 1,1028x + 293,4$	0,9700



Slika 12. Utjecaj udjela recikliranog sadržaja na savojnu čvrstoću



Slika 13. Utjecaj udjela recikliranog sadržaja na vlačnu čvrstoću

utjecajem heterogenosti materijala ili eksperimentalnih odstupanja, što je vidljivo i kroz povećane vrijednosti standardne devijacije.

Polinomne krivulje trenda prikazane na dijagramu upućuju na nelinearan tijek promjene vlačne čvrstoće u ispitnom rasponu udjela reciklata. Vrijednosti koeficijenta determinacije ($R^2 \approx 0,9079-0,9994$), prikazane u tablici 8., prikazuju slaganje prikazanih krivulja s dobivenim eksperimentalnim podacima.

6. Zaključak

U ovom radu ispitana su fizikalna i mehanička svojstva EPS-a s različitim udjelom recikliranog materijala iz dvaju izvora (građevinski i ambalažni), pri čemu su rezultati uspoređeni s referentnim uzorcima bez reciklata.

Utvrđen je opći trend smanjenja gustoće s povećanjem udjela recikliranog sadržaja, pri čemu promjena nije linearna. Pri udjelima reciklata od 5 % i 10 %, promatrano preko svih serija, gustoća se u prosjeku smanjila za približno 2 %, pri 25 % za 6 %, a pri 50 % za 17 % u odnosu na odgovarajuće referentne uzorke. Najveće

Tablica 8. Izrazi krivulja trenda i R^2 za vlačnu čvrstoću EPS-a s reciklatom

Oznaka uzorka	Izraz crte trenda	R^2
S1-20	$y = -0,0687x^3 + 0,5046x^2 - 1,8432x + 224,42$	0,9921
S1-25	$y = 0,3632x^3 - 6,2281x^2 + 14,762x + 268,7$	0,9994
S2-20	$y = 0,3435x^3 - 3,9651x^2 + 3,2186x + 226,47$	0,9079
S2-25	$y = -0,5086x^3 + 7,9152x^2 - 42,05x + 312,17$	0,9994

smanjenje gustoće, od približno 25 %, zabilježeno je pri 50 % reciklata u seriji S2-25. Izraženiji pad gustoće pri većim udjelima može se povezati s promjenama u čelijskoj strukturi materijala i neujednačenosti veličine i rasporeda čelija.

Istodobno je uočen porast toplinske provodljivosti s povećanjem udjela reciklata, također nelinearnog karaktera. Pri udjelima reciklata od 5 % i 10 % odstupanja toplinske provodljivosti u odnosu na odgovarajuće referentne uzorke nisu prelazila 1,2 %, pri 25 % prosječno je povećanje iznosilo 1,4 %, a pri 50 % 5,2 %. Najveće povećanje, od 7,1 %, zabilježeno je pri 50 % reciklata u seriji S1-20. Takvo ponašanje može se objasniti promjenama u strukturi materijala, pri čemu veće čelije i tanje stijenke povećavaju udio radijacijskog prijenosa topline, a strukturne nepravilnosti omogućuju učinkovitiji prijenos topline kroz materijal.

Kod mehaničkih svojstava uočen je pad tlačne čvrstoće pri 10 % deformacije s povećanjem udjela recikliranog materijala, uz istodobno smanjenje početnog modula elastičnosti, a karakterističan oblik dijagrama naprezanje-deformacija ostaje očuvan. Pri udjelima reciklata od 5 %, 10 %, 25 % i 50 % tlačna čvrstoća se u prosjeku smanjila za 1,3 %, 5,8 %, 11,4 % i 28,4 % u odnosu na odgovarajuće referentne uzorke. Najveći pad, od 40,3 %, zabilježen je pri 50 % reciklata u seriji S2-25. Povećanjem udjela reciklata dolazi do veće varijabilnosti u plato području, što upućuje na neujednačen kolaps čelijske strukture, osobito kod ambalažnog reciklata.

Smanjenje čvrstoće s povećanjem udjela recikliranog materijala uočeno je i kod savojne i vlačne čvrstoće. Pri nižim udjelima reciklata od 5 % i 10 % promjene su bile manje izražene, a pri 25 % prosječno se smanjenje povećalo na 11,7 % za savojnu i 16,0 % za

vlačnu čvrstoću. Pri 50 % reciklata prosječno smanjenje iznosilo je 36,5 % za savojnu i 28,0 % za vlačnu čvrstoću. Najizraženiji pojedinačni pad zabilježen je kod serije S2-25, i to 58,5 % za savojnu te 53,1 % za vlačnu čvrstoću. Iznimku predstavlja serija S2-20, kod koje je pri 50 % reciklata zabilježen porast vlačne čvrstoće od 6,3 %, ali uz najveću standardnu devijaciju dobivenih rezultata.

Dobiveni rezultati pokazuju da su pri udjelima reciklata do 10 % promjene gustoće, toplinske provodljivosti i mehaničkih svojstava najmanje. Pri udjelima od 25 % i osobito 50 % uočavaju se izraženije promjene ispitivanih svojstava, uz veću varijabilnost kod ambalažnog reciklata. Za primjenu u izolacijskim pločama za podno grijanje i hlađenje udio reciklata stoga treba odabrati tako da se zadrži niska toplinska provodljivost i odgovarajuća mehanička svojstva potrebna za stabilnu podlogu i prijenos opterećenja kroz slojeve poda.

Zahvala

Autori izražavaju zahvalnost tvrtki PLASTFORM d.o.o. za pruženu tehničku potporu i ustupanje materijala te mjerne opreme korištene u ovom istraživanju.

Ovo istraživanje financirano je sredstvima Europske unije – NextGenerationEU, putem Mehanizma za oporavak i otpornost u okviru Nacionalnog plana oporavka i otpornosti Republike Hrvatske, broj projekta NPOO.C3.2.R3-I1.04.0147 (recEPS). Potporu je dodijelilo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i mladih Republike Hrvatske u okviru Poziva "Ciljana znanstvena istraživanja".

LITERATURA

- [1] Fond za zaštitu okoliša i energetska učinkovitost: EnU u zgradarstvu, <https://www.fzoeu.hr/hr/enu-u-zgradarstvu/7571>, pristupljeno 8.12.2025.
- [2] European Parliament and Council: Directive (EU) 2024/1275 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union, Luxembourg, 2024.
- [3] European Parliament and Council: Directive (EU) 2023/1791 on energy efficiency (recast), Official Journal of the European Union, Luxembourg, 2023.
- [4] Citadini de Oliveira, C., Catão Martins Vaz, I., Ghisi, E.: Retrofit strategies to improve energy efficiency in buildings: An integrative review, *Energy and Buildings*, 321 (2024), p. 114624, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114624>
- [5] Ministarstvo prostornoga uređenja, graditeljstva i državne imovine: Energetska obnova zgrada, <https://mpgi.gov.hr/o-ministarstvu/djelokrug/energetska-ucinkovitost-u-zgradarstvu/energetska-obnova-zgrada-8321/8321>, pristupljeno 10.12.2025.

- [6] Michalak, J., Czernik, S., Marcinek, M., Michalowski, B.: Environmental burdens of external thermal insulation systems: Expanded polystyrene vs. mineral wool – Case study from Poland, *Sustainability*, 12 (2020) 11, <https://doi.org/10.3390/su12114532>
- [7] Michalak, J.: External thermal insulation composite systems (ETICS) from industry and academia perspective, *Sustainability*, 13 (2021) 24, <https://doi.org/10.3390/su132413705>
- [8] Business Market Insights: Europe ETICS System Materials Market, Market Research Report, 2023.
- [9] EAE – European Association for External Thermal Insulation Composite Systems: ETICS on the Way to a Circular Economy, Brussels, 2023.
- [10] European Commission: The European Green Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, pristupljeno 25.8.2024.
- [11] Albrecht, W., Schwitalla, C.: Berichte, Gutachten etc., Fraunhofer IRB, Stuttgart, 2005.
- [12] Ugwu, S.C., Obele, C.M.: A mini-review on expanded polystyrene waste recycling and its applications, *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 8 (2023) 1, pp. 315–329, <https://doi.org/10.30574/wjaets.2023.8.1.0057>
- [13] Market Growth Reports: Expanded Polystyrene for Packaging Market Size, Share, Growth and Industry Analysis, <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/expanded-polystyrene-for-packaging-market-110240>, pristupljeno 24.2.2026.
- [14] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 18092:2025 – Smjernice za dizajn građevnih proizvoda od plastike prilagođen recikliranju – Proizvodi za toplinsku izolaciju od ekspaniranog polistirena (EPS), Zagreb, 2025.
- [15] Vukadin, J., Tkalčić, D., Milovanović, B., Banjad Pečur, I.: Characterization of mechanically recycled EPS under compressive and bending loadings.
- [16] Europska komisija: Europska strategija za plastiku u kružnom gospodarstvu, Strasbourg, 2018.
- [17] European Commission: Commission Notice – The 2022 Annual Union Work Programme for European Standardisation, Brussels, 2022.
- [18] European Commission: Delegated Regulation – EU Taxonomy, Annex I, Brussels, 2021.
- [19] Industrierverband Hartschaum e.V.: <https://www.ivh.de/>, pristupljeno 24.2.2026.
- [20] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V.: <https://fachverband-wdvs.de/>, pristupljeno 24.2.2026.
- [21] DIN Media GmbH: DIN 4108-10:2021-11 – Thermal insulation and energy economy in buildings – Part 10: Application-related requirements for thermal insulation materials, Berlin, 2021.
- [22] Razvoj inovativne izolacijske ploče s značajnim udjelom reciklata za podno grijanje i hlađenje (recEPS), pristupljeno 11.1.2026.
- [23] Albrecht, W., Schwitalla, C.: Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS, Fraunhofer IRB, Stuttgart, 2015.
- [24] Deutsches Institut für Normung (DIN): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe, Berlin, 2015.
- [25] Sprengard, C., Tremel, S., Holm, A.H.: Technologien und Techniken zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden durch Wärmedämmstoffe, München, 2013.
- [26] Europski parlament i Vijeće Europske unije: Uredba (EU) 2019/1021 o postojanim organskim onečišćujućim tvarima, Bruxelles, 2019.
- [27] Martin, S., Andreas, M., Monica, D.-S.: Using the CreaSolv® process to recycle polymers from Canadian waste plastics containing brominated flame retardants.
- [28] Schöpel, M. et al.: Weiterentwicklung des Umweltzeichens Blauer Engel für Wärmedämmverbundsysteme, Berlin, 2018.
- [29] Umweltbundesamt: Wie werden HBCD-haltige Dämmstoffe entsorgt und können sie recycelt werden?, pristupljeno 15.3.2026.
- [30] Maul, J., Frushour, B.G., Kontoff, J.R., Eichenauer, H., Ott, K.-H., Schade, C.: Polystyrene and styrene copolymers, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, 2000.
- [31] Schaumplast Group: Automotive – Lightweight construction with particle foam, <https://schaumplast.com/us/automotive/>, pristupljeno 21.12.2025.
- [32] The Global EPS Sustainability Alliance: <https://globaleps.org/>, pristupljeno 21.12.2025.
- [33] Maghfouri, M. et al.: Drying shrinkage properties of expanded polystyrene (EPS) lightweight aggregate concrete: A review, *Case Studies in Construction Materials*, 16 (2022), p. e00919, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.E00919>
- [34] Mohajerani, A., Ashdown, M., Abdihashi, L., Nazem, M.: Expanded polystyrene geofoam in pavement construction, *Construction and Building Materials*, 157 (2017), pp. 438–448, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.113>
- [35] Tkalčić, D., Vukadin, J., Milovanović, B., Banjad Pečur, I.: State of the art review in the field of EPS recycling and requirements for the application of EPS in underfloor heating and cooling boards, u: *Zbornik radova 29. DIMK*, Beograd, 2025, pp. 200–209, <https://doi.org/10.46793/29DIMK.200T>
- [36] González-Betancur, D., Hoyos-Montilla, A.A., Tobón, J.I.: Sustainable hybrid lightweight aggregate concrete using recycled expanded polystyrene, *Materials*, 17 (2024) 10, <https://doi.org/10.3390/ma17102368>
- [37] Hamidi, N., Galloway, B.: Reprocessing post-consumer expanded polystyrene: Mechanical and thermal properties of lightweight concrete made with post-consumer expanded polystyrene, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 61 (2022) 6, pp. 811–824, <https://doi.org/10.1080/00222348.2022.2113305>
- [38] Hrvatski zavod za norme: HRN EN ISO 29470:2020 – Toplinsko-izolacijski proizvodi za zgrade – Određivanje prividne gustoće, Zagreb, 2020.
- [39] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12667 – Toplinske značajke građevnih materijala i proizvoda – Određivanje toplinskog otpora metodom sa zaštićenom vrućom pločom i tokomjernom metodom, Zagreb, 2002.
- [40] Hrvatski zavod za norme: HRN EN ISO 29469:2022 – Toplinsko-izolacijski proizvodi za primjenu u građevinarstvu – Određivanje ponašanja pri tlačnom opterećenju, Zagreb, 2022.
- [41] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 12089:2013 – Toplinsko-izolacijski proizvodi za graditeljstvo – Određivanje ponašanja pri savijanju, Zagreb, 2013.
- [42] Hrvatski zavod za norme: HRN EN 1607:2013 – Toplinsko-izolacijski proizvodi za graditeljstvo – Određivanje vlačne čvrstoće okomito na ravninu ploče, Zagreb, 2013.
- [43] Notario, B., Pinto, J., Solorzano, E., De Saja, J.A., Dumon, M., Rodríguez-Pérez, M.A.: Experimental validation of the Knudsen effect in nanocellular polymeric foams, *Polymer*, 56 (2015), pp. 57–67, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.10.006>
- [44] Gibson, L.J., Ashby, M.F.: *Cellular Solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.