

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

Jaka VAUPOT

**VPLIV TEMPERATURE IN GOSTOTE NA
MEHANSKE LASTNOSTI EKSPANDIRANEGA
POLISTIRENA**

Magistrsko delo

Slovenj Gradec, december 2023

FAKULTETA ZA TEHNOLOGIJO POLIMEROV

**VPLIV TEMPERATURE IN GOSTOTE NA
MEHANSKE LASTNOSTI EKSPANDIRANEGA
POLISTIRENA**

Magistrsko delo

Študent:	Jaka VAUPOT
Študijski program:	Tehnologija polimerov
Mentorica:	izr. prof. dr. Andrijana SEVER ŠKAPIN
Somentor:	Gregor STRMLJAN, univ. dipl. inž. kem.

Slovenj Gradec, december 2023

IZJAVA

Podpisani Jaka Vaupot izjavljam, da:

- je bilo predloženo magistrsko delo opravljeno samostojno pod mentorstvom;
- predloženo magistrsko delo v celoti ali v delih ni bilo predloženo za pridobitev kakršnekoli izobrazbe na drugi fakulteti ali univerzi;
- soglašam z javno dostopnostjo magistrskega dela v knjižnici Fakultete za tehnologijo polimerov v Slovenj Gradcu. Na Fakulteto za tehnologijo polimerov neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve magistrskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico ponuditi magistrsko delo javnosti na svetovnem spletu preko repozitorija DiRROS.

Slovenj Gradec, _____

Podpis: _____

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoriciizr. prof. dr. Andrijani Sever Škapin in somentorju Gregorju Strmljanu za pomoč pri izdelavi magistrskega dela.

Za pregled in pomoč pri posameznih vsebinah se zahvaljujem Luki Škrlepu.

Posebej se zahvaljujem moji družini, ki mi je študij omogočila. Družini, bici Viki in puncu Loti se zahvaljujem, da so me med študijem venomer podpirali, vzpodbujali in mi stali ob strani.

POVZETEK

Vpliv temperature in gostote na mehanske lastnosti ekspaniranega polistirena

Namen magistrskega dela je določiti vpliv povišane temperature in temperaturnega utrujanja na dimenzijsko stabilnost, mikrostrukturo in mehanske lastnosti ekspaniranega polistirena, različnih gostot. V prvem delu magistrskega dela smo se osredotočili na teoretični pregled vpliva povišane temperature in temperaturnega utrujanja na ključne lastnosti ekspaniranega polistirena, kot so: toplotna prevodnost, mehanske lastnosti in dimenzijska stabilnost, ter vpliv temperature na njegovo mikrostrukturo. V drugem delu so predstavljene metode dela, ki smo jih uporabili pri delu med nastajanjem magistrskega dela, in rezultati mehanskih testov, izvedenih pred temperaturnim utrujanjem in po njem, ter pri povišanih temperaturah. Rezultati meritev so potrdili hipoteze magistrskega dela, da bodo s povišanjem temperature padali: natezna in tlačna trdnost ter pripadajoči elastični moduli. Ugotovili smo, da dvomesečno temperaturno utrujanje pri povišanih temperaturah do 90 °C nima vpliva na tlačno trdnost in elastični modul, spremeni pa dimenzije ter strukturo ekspaniranega polistirena. Z višanjem gostote so tlačne trdnosti večje, vendar neposredne povezave med gostoto ekspaniranega polistirena in padcem tlačnih lastnosti nismo zaznali, saj je prišlo pri vseh vzorcih do podobnega poslabšanja tlačne trdnosti.

Ključne besede:

Ekspaniran polistiren, tlačna trdnost, natezna trdnost, temperaturno utrujanje materiala, povišana temperatura, mikrostruktura, dimenzijska stabilnost.

SUMMARY

The influence of temperature and density on the mechanical properties of expanded polystyrene

The aim of the Master's thesis is to determine the effect of elevated temperature and temperature fatigue on the dimensional stability, the microstructure and the mechanical properties of expanded polystyrene of different densities. The first part of the master's thesis focused on a theoretical review of the effect of elevated temperature and temperature fatigue on the key properties of expanded polystyrene, such as thermal conductivity, mechanical properties and dimensional stability, and the effect of temperature on its microstructure. The second part presents the working methods used in the work carried out during the master's thesis and the results of the mechanical tests carried out before and after temperature fatigue and at elevated temperatures. The results of the measurements confirmed the hypotheses of the Master's thesis that the tensile and compressive strengths and the corresponding elastic moduli will decrease with increasing temperature. It was found that two months of temperature fatigue at elevated temperatures up to 90 °C has no effect on the compressive strength and elastic modulus, but changes the dimensions and microstructure of the expanded polystyrene. The compressive strengths increase with increasing density, but no direct correlation between the density of the expanded polystyrene and the decrease in compressive properties was observed, as all samples showed a similar deterioration in compressive strength.

Keywords:

Expanded polystyrene, compressive strength, tensile strength, temperature fatigue of the material, elevated temperature, microstructure, dimensional stability.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Namen, cilji in teze ter omejitve magistrskega dela	2
1.2	Predpostavke in omejitve	2
1.3	Hipoteze ali trditve	2
1.4	Uporabljene metode	3
2	TEORETIČNI DEL	4
2.1	Fasadni sistem - zaključni premaz	4
2.2	EPS	6
2.2.1	Vpliv temperature na toplotno prevodnost	7
2.2.2	Vpliv temperature na strukturo EPS-a	8
2.2.3	Vpliv temperature na mehanske lastnosti	10
2.2.4	Vpliv povišane temperature na dimenzijsko stabilnost	15
2.3	Struktura EPS, različnih gostot	16
2.3.1	Struktura EPS-a pri kratkotrajnem tlačnem obremenjevanju	18
2.3.2	Vpliv gostote na mehanske lastnosti EPS-a	19
3	EKSPERIMENTALNI DEL	22
3.1	Uporabljeni materiali	22
3.1.1	Priprava vzorcev	23
3.2	Gostota	24
3.3	Mehanski testi	24
3.3.1	Tlačni test	25
3.3.2	Natezni test	27
3.4	Temperaturno utrujanje	29
3.5	Dimenzijska stabilnost	32
3.6	Vrstična elektronska mikroskopija (SEM)	33
4	REZULTATI IN DISKUSIJA	35
4.1	Gostota	35
4.2	Tlačni test pri povišani temperaturi	35
4.3	Natezni test pri povišani temperaturi	41
4.4	Tlačni test po temperaturnem utrujanju	44
4.5	Dimenzijska stabilnost	48
4.6	Vrstična elektronska mikroskopija (SEM)	49
5	SKLEP	51
	SEZNAM LITERATURE IN VIROV	53
	SEZNAM SLIK	56
	SEZNAM TABEL	58
	SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV	59
	SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC	60

1 UVOD

V zadnjem času opažamo pri izbiri fasadnega premaza večje zanimanje za temnejše nianse [1]. Žal pa ta prinaša tudi nekaj negativnih posledic, med katerimi bi radi izpostavili visoko vrednost absorbirane energije v času močnega sevanja sončne svetlobe in posledično povečanje temperature izpostavljenih materialov [1–4].

Glavni namen toplotne izolacije stavbe je zmanjšati prenos energije med notranjostjo in zunanostjo. Obenem toplotno-izolacijski fasadni sistem služi kot zaščita nosilne konstrukcije pred vremenskimi vplivi in nudi človeku udobje v bivalnih prostorih [2–5].

Veliko bivalnih stavb ima na fasadah vgrajen zunanji toplotno-izolacijski kompozitni sistem z ometom oziroma t. i. ETICS (ang. External Thermal Insulation Composite Systems with renderings), ki poleg toplotno-izolacijskega materiala vsebuje še omet, ojačan s stekleno mrežico, lepilo in/ali mehanska pritrdila ter zaključni dekorativni premaz. Lastnosti in zahteve ETICS-a so dobro definirane s harmonizirano evropsko tehnično specifikacijo EAD 040083-00-0404. Osrednji del takega kompozitnega sistema je plošča iz toplotno-izolacijskega materiala, ki bistveno prispeva k lastnostim celotnega sistema [5,6]. Posledično so toplotne izgube v veliki meri odvisne od izbire toplotno-izolacijskega materiala, ki mora imeti dovolj nizko ustrezno vrednost toplotne prevodnosti. To je fizikalna lastnost materiala, ki pove, koliko energije prehaja skozi material na enoto dolžine, to je pri temperaturni razliki 1 K. Njena enota je W/mK. Še zdaleč pa to ni edina pomembna lastnost pri toplotno-izolacijskemu materialu. Med pomembnejše lastnosti uvrščamo še mehanske lastnosti, odziv na ogenj, prepustnost za vodno paro in vodovpojnost [5,7].

Na toplotno prevodnost in večino drugih lastnosti močno vpliva temperatura. Povprečna vrednost temperature se na Zemlji počasi povišuje zaradi globalnega segrevanja, obenem se povečujejo tudi temperaturne razlike med poletjem in zimo [8]. Pozimi imamo nizke temperature, poleti pa ekstremno visoke (40 °C) [2]. Z večurnim obsevanjem sonca na fasado stavbe se lahko poleti temperatura na zunanji strani izolacije, in sicer v primeru temnih odtenkov, povzpne celo nad 80 °C. Ti pojavi pa lahko obremenijo toplotno izolacijski material. Pri teh temperaturah lahko na enem izmed bolj uporabljenih toplotno-izolacijskih materialov, ekspandiranem polistirenu (v nadaljevanju: EPS), opazimo ekstremno povečanje toplotne prevodnosti, večje krčenje materiala, torej spremembo dimenzijske stabilnosti in poslabšanje mehanskih lastnosti. To lahko, v najslabšem primeru, pomeni porušitev materiala, ki privede do izolativne nefunkcionalnosti. V literaturi smo našli nekaj primerov študij vpliva temperature na nekatere mehanske lastnosti EPS-a [2–5,9–16], manjka pa sistematskih raziskav na tem področju. V preteklem diplomskem delu smo se osredotočili na pregled teh materialov in njihovih lastnosti, v magistrskem delu pa bomo proučevali EPS-e različnih gostot, in povezavo med temperaturo in mehanskimi lastnostmi [2–5,7]. Osredotočili se bomo predvsem na študij vpliva povišane

temperature in temperaturnega utrujanja na izbrane mehanske lastnosti, to je tlačne in natezne lastnosti EPS-a.

1.1 Namen, cilji in teze ter omejitve magistrskega dela

Namen magistrskega dela je preučiti vpliv povišane temperature na mehanske lastnosti EPS-a, različnih gostot. Osredotočili se bomo na natezno in tlačno trdnost. Namen magistrskega dela je tudi preučiti vpliv temperaturnega utrujanja materiala na mehanske lastnosti in dimenzijsko stabilnost materiala. Z elektronskim vrstičnim mikroskopom (v nadaljevanju: SEM) bomo preverili tudi vpliv temperaturnega utrujanja na mikrostrukturo EPS-a.

Cilj magistrskega dela je oceniti primernost uporabe različnih tipov EPS-a (z različnimi gostotami) v ekstremnih vremenskih pogojih (izredno visoke temperature), ki postajajo aktualen problem zaradi podnebnih sprememb.

1.2 Predpostavke in omejitve

Predpostavljamo:

- da so podatki, navedeni v strokovnih člankih, revijah in knjigah pravilni;
- da bodo rezultati, pridobljeni s karakterizacijo EPS-a, pravilni;
- da bodo preizkušanci, ki jih bomo testirali, pripravljene brez napak, ki bi lahko vplivale na veljavnost rezultatov.

Omejitve, ki se bodo pojavile med raziskavo:

- manjše število strokovnih člankov in revij s to vsebino, saj smo preliminarno ugotovili, da je v literaturi temperaturni vpliv na mehanske lastnosti redko in pomanjkljivo opisan.

1.3 Hipoteze ali trditve

Na podlagi literature [2,3,9,10,12,13,15,16] predpostavljamo:

- z višanjem temperature se bosta tlačna trdnost in E -modul vseh tipov EPS-a zmanjšala;
- z višanjem temperature se bosta natezna trdnost in E -modul EPS-a zmanjšala;
- po temperaturnem utrujanju EPS-a, to je med 20 °C in 90 °C, bo prišlo do padca tlačne trdnosti in padca E -modula;
- z dolgotrajno izpostavo povišanim temperaturam se dimenzije vzorcev EPS-a zmanjšajo;
- gostota EPS-a vpliva na padec tlačne trdnosti;
- temperaturno utrujanje ima vpliv na strukturo EPS-a.

1.4 Uporabljene metode

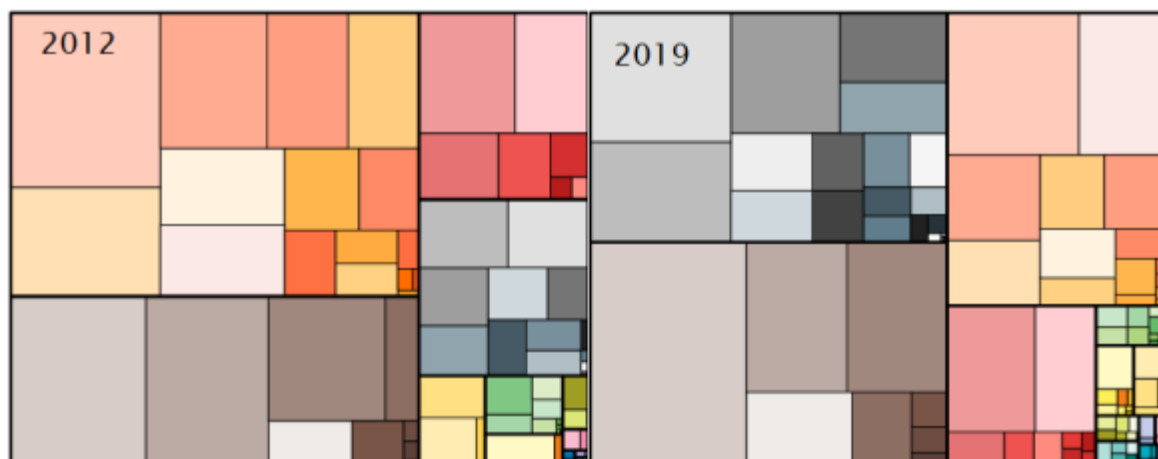
V magistrskemu delu smo zbirali, pregledali in študirali literaturo o vplivu povišane temperature na lastnosti ekspandiranega polistirena. Poudarek smo dali na vplivu temperature na mehanske lastnosti, dimenzijsko stabilnost in strukturo. Preizkušance smo pripravili na ustrezne dimenzije, jih analizirali pri standardnih laboratorijskih in povišanih temperaturah, izvedli temperaturno utrujanje ter analizirali njegov vpliv na tlačne lastnosti, strukturo ter dimenzijsko stabilnost. Teste smo opravili z raziskovalno opremo Zavoda za gradbeništvo Slovenije. Dobljene rezultate smo ovrednotili.

2 TEORETIČNI DEL

2.1 Fasadni sistem - zaključni premaz

Pri izbiri primerne fasadnega premaza moramo, poleg izgleda, obvezno pomisliti tudi na vpliv premaza na fizikalno-kemijske lastnosti fasadnega sistema, kot je na primer paroprepustnost. Gre za lastnost, ki jo obvezno preverimo pred gradnjo. Lahko pa se zgodi, da kakšni lastnosti komponente posvečamo premalo pozornosti, saj menimo, da nima tolikšnega vpliva. Med te lastnosti uvrščamo v zadnjih letih, zaradi povišanja temperatur okolice, barvne odtenke fasadnega sistema. Temnejše barve lahko ob višjih temperaturah povzročijo, da se bo fasadni sistem oziroma njegova površina začela prekomerno segrevati zaradi absorpcije sončnega sevanja, kar bo lahko vodilo do različnih negativnih posledic na fasadni ovoj. V prvi vrsti so to termo-mehanski stres, ki nastanejo zaradi dnevnega pregrevanja (raztezanja) in nočnega ohlajanja (krčenja) fasadnega sistema. Posledice so lahko razpoke ali celo odstopanje od podlage. Ena od rešitev, da se izognemo pregrevanju ob uporabi temnejših odtenkov, je tudi uporaba posebej formuliranih odtenkov z IR-odbojno tehnologijo [1].

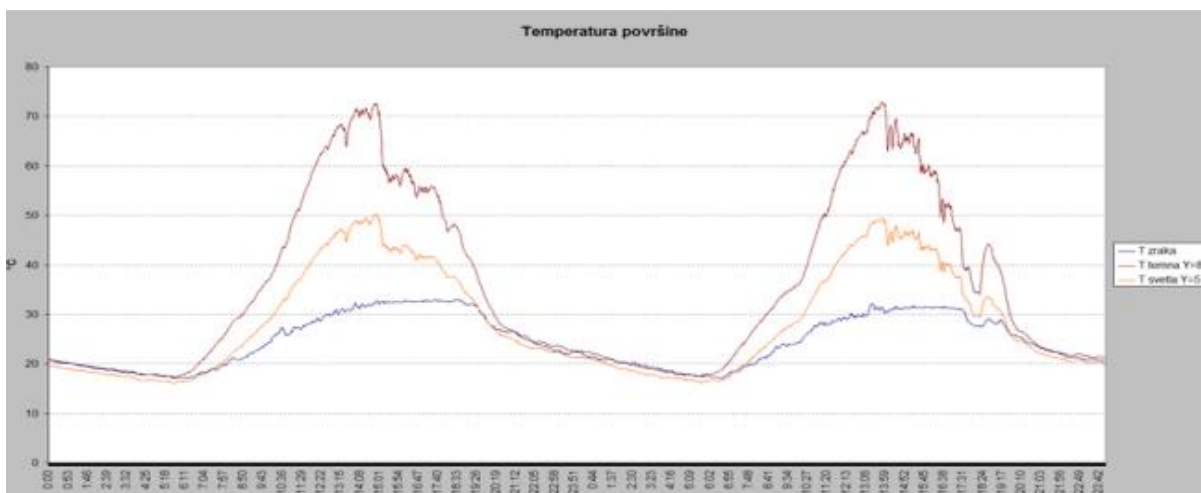
Kakor lahko vidimo s slike 1, je popularnost odtenkov zaključnega premaza v letu 2019 izrazito usmerjena k temnim kontrastnim kombinacijam. Razlika med letoma 2012 in 2019 je očitna. V prvem so prevladovali odtenki rdeče barve oziroma svetlejši odtenki [1].



*Slika 1: Shematski prikaz popularnosti fasadnih odtenkov v letih 2012 in 2019 [1]
(Površina lika predstavlja delež barvanih površin, brez upoštevanja bele barve.)*

Slika 2 prikazuje primer dvodnevne segrevanja/hlajenja fasadnih površin poleti. Na sliki lahko razberemo, da so avtorji članka preskušali dva različna odtenka: temnejšega, z vrednostjo svetlosti $Y=8$, in svetlejšega, z vrednostjo svetlosti $Y=51$. Temperatura zraka se je v preučevanem obdobju gibala nekje od $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $33\text{ }^{\circ}\text{C}$. S slike lahko razberemo, da se je fasadna površina temnega odtenka segrela celo nad $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Najvišja temperatura na površini svetlejšega odtenka pa je dosegla $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. V

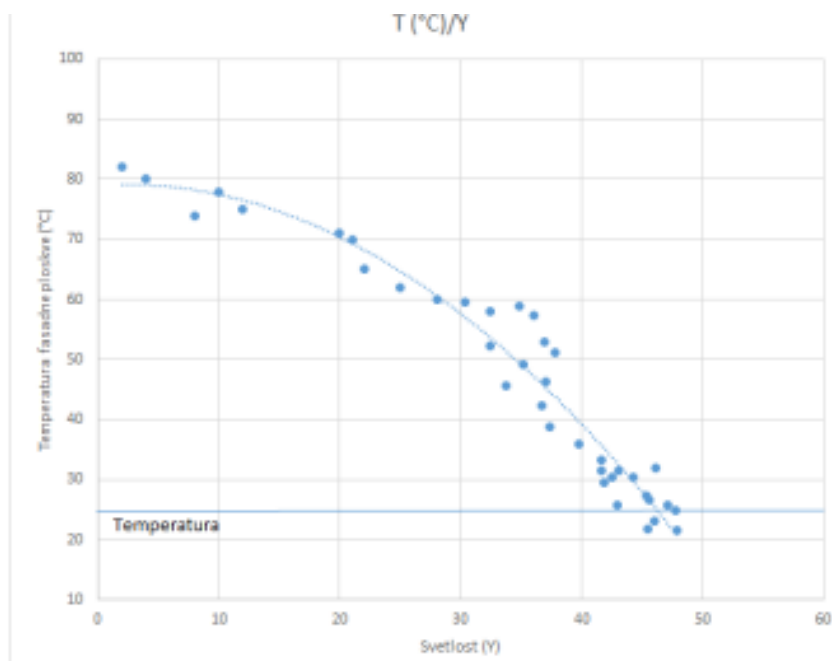
primeru fasadnega sloja s temnejšim odtenkom lahko povzroči težavo povišana temperatura pri fasadnih sistemih z EPS-om, saj se ta prične trajno deformirati nad temperaturo 70 °C [1].



Slika 2: Primer dvodnevne segrevanja/hlajenja fasadnih površin, različnih svetlosti [1]

Absorpcija toplote je torej odvisna od temnosti odtenka, ki jo podamo z vrednostjo Y^1 .

Slika 3 prikazuje temperaturo fasadne ploskve, odvisne od svetlosti odtenka, pri temperaturi 25 °C. S slike lahko razberemo, da je najmanjša vrednost svetlosti odtenka, pri kateri ne pride do pregrevanja površine (približno od 65 °C do 70 °C), enaka vrednosti $Y=25$ [1].



Slika 3: Temperatura fasadne ploskve v odvisnosti od svetlosti odtenka, in sicer pri temperaturi 25 °C [1]

2.2 EPS

Danes je EPS v stavbni industriji eden izmed najbolj uporabljenih toplotno-izolacijskih materialov.

Izum tega penjenega materiala sega v leto 1950, ko so izumili tehnologijo za pripravo penjenega polistirena nemški inženirji, to je v podjetju IG Farbenindustrie AG. Od tega leta je ostala tehnologija nespremenjena. Sestavljena je iz več faz: prva faza je predekspanzija, predstavlja nastanek polistirenskih granul s penilcem pentanom, nato sledi zorenje in stabilizacija s parno obdelavo, hlajenje in na koncu še faza oblikovanje s ponovno fazo parne obdelave. Kot prvi se je, proizveden s to tehnologijo, to je leta 1951, pojavil »Styropor R« [2–5,7].

Od takrat velja ta material za zelo popularnega, predvsem zaradi nizke cene in njegovih ugodnih lastnosti. EPS je zelo lahek material, njegova struktura je porozna, sestoji iz 98 % plina. To je razlog za nizko gostoto izolativnega materiala, nizko toplotno prevodnost, relativno majhno vpojnost vode ter visoke tlačne, natezne in upogibne trdnosti. Ker EPS ni higroskopičen, vpije le majhno količino vode. Ta lahko prodre v peno le skozi drobne kanale med staljenimi kroglicami [2–5,7].

Gre torej za zelo porozen material, sestavljen iz trdne matrice, polne majhnih praznin, ki predstavljajo večino celotne prostornine. Praznine običajno vsebujejo zrak ali drug plin z nizko prevodnostjo. K toplotni prevodnosti materiala prispevajo prevodnost trdne snovi in plina, konvekcija plina in dolgovalovno sevanje znotraj praznin. Kot rezultat celotne toplotne prevodnosti zaradi por lahko zanemarimo konvekcijsko komponento, saj ta ni mogoča. Zato določata toplotno prevodnost celične pene EPS prevodni in sevalni prispevek [2–5,7].

Navidezna prevodnost je odvisna od vrste trdne snovi, gostote, temperature, vsebnosti vode, debeline in starosti.

EPS odlikuje tudi izjemna dimenzijska stabilnost. Nanj zanemarljivo vplivajo različni okoljski dejavniki. Pri pogojih 70 °C in 90 % relativne vlažnosti je dimenzijska sprememba pene EPS kot toplotno izolacijskega materiala manj kot 1 % [2–5,7].

Prav tako je EPS dobro kemijsko stabilen. Nanj ne vpliva večina kislin in alkalij, prav tako pa je obstojen proti plesni [2–5,7].

Po odzivu na ogenj uvrščamo EPS, in sicer v skladu z EN 13501-1:2019, v evropski požarni razred E [2–5,7].

V tabeli 1 so zbrane lastnosti EPS-a in območja vrednosti [5].

Tabela 1: Lastnosti EPS [5]

Lastnost	Vrednost
Gostota	od 10 kg/m ³ do 30 kg/m ³
Toplotna prevodnost	od 0,032 W/mK do 0,040 W/mK
Difuzijska upornost prehoda vodne pare	od 20 do 100
Kratkotrajna absorpcija vode	pod 1 kg/m ²
Tlačna napetost pri 10% deformaciji ali tlačna trdnost	od 68 kPa do 200 kPa
Natezna trdnost	nad 100 kPa
Upogibna trdnost	nad 100 kPa
Najvišja delovna temperatura (dolgotrajna izpostava)	od 80 °C do 85 °C
Reakcija na požar	Evrrozred E

Iz tabele 1 lahko razberemo, da je območje najvišje delovne temperature nekje pri 80 °C, kar predstavlja resno omejitev, če se fasada segreje do te temperature, ki predstavlja prag pri materialu, kjer lahko pride do večjih sprememb v dimenzijah, do izgube oblike, trdnosti ali celo razgradnje. Vsaka izmed teh sprememb lahko privede do tega, da material ni več toplotno-izolacijsko učinkovit. Za različne materiale je ta temperatura seveda drugačna in je pri amorfnih polimernih materialih odvisna predvsem od temperature steklastega prehoda (T_g). Pri EPS-u T_g običajno znaša nekje med 100 °C in 110 °C. Čim bolj se približujemo tem temperaturam, večji je padec večine lastnosti EPS-a [2–5,7,11,15].

EPS je odporen tudi na staranje, vendar izpostavljenost sončnemu sevanju (ultravijoličnemu sevanju) povzroči porumenelost površine. Ta predstavlja krhkost zgornjega sloja, notranja površina pa ostane nepoškodovana [2–5,7].

EPS ponuja v gradbeništvu široko paleto uporabe. S proizvodnimi parametri vplivamo na gostoto materiala in posledično na lastnosti izdelkov, ki jih uporabljamo za toplotno izolacijo streh, tal, sten ter kleti stavbenih objektov [2–5,7].

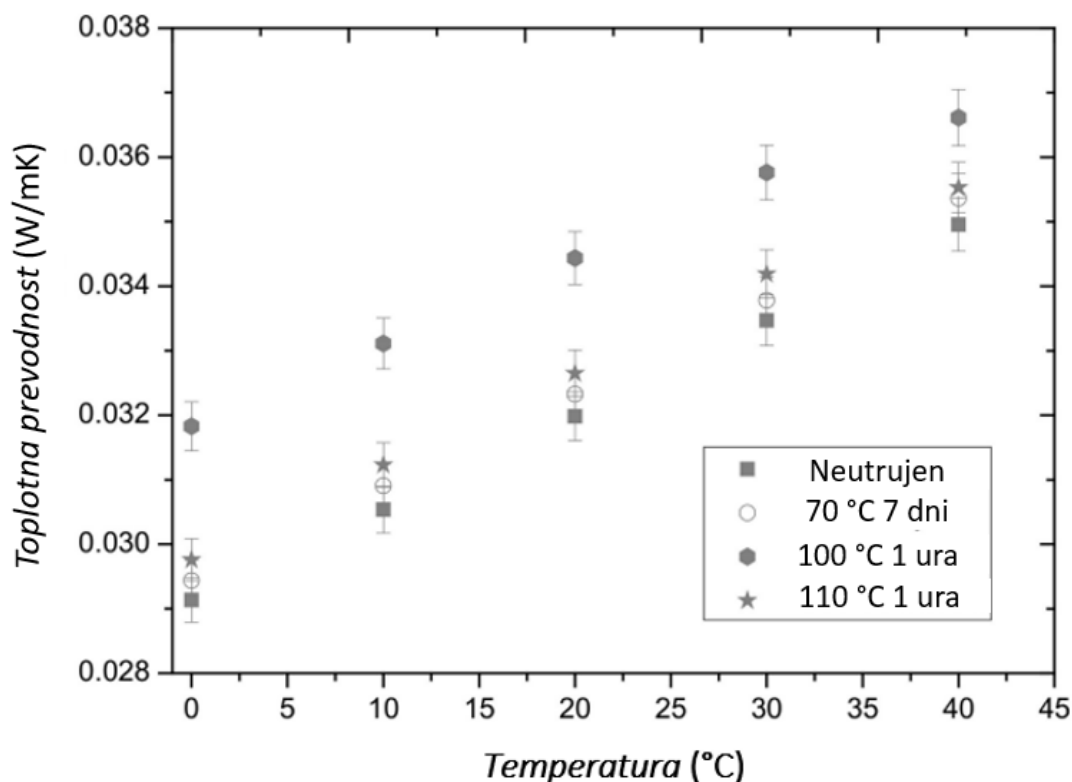
Podrobno smo EPS opisali v diplomskem delu [7].

2.2.1 Vpliv temperature na toplotno prevodnost

Čim višja je temperatura okolice toplotno-izolacijskega sistema, bolj EPS prevaja toploto in vrednost toplotne prevodnosti se poveča. Kot smo uvodoma že izpostavili, gre za ključno lastnost toplotno-izolacijskega materiala, saj lahko z dovolj nizko vrednostjo dosežemo tanke stavbne ovoje z visoko toplotno upornostjo [11].

Vpliv temperature na toplotno prevodnost EPS-a je razvidna s slike 4. Razberemo lahko, da je toplotna prevodnost za »neutrujen« EPS pri 0 °C enaka 0,029 W/mK. Z višanjem temperature ta eksponentno raste in pri 20 °C znaša 0,032 W/mK. Pri 40 °C je vrednost toplotne prevodnosti enaka 0,038 W/mK. S slike lahko razberemo, da ima

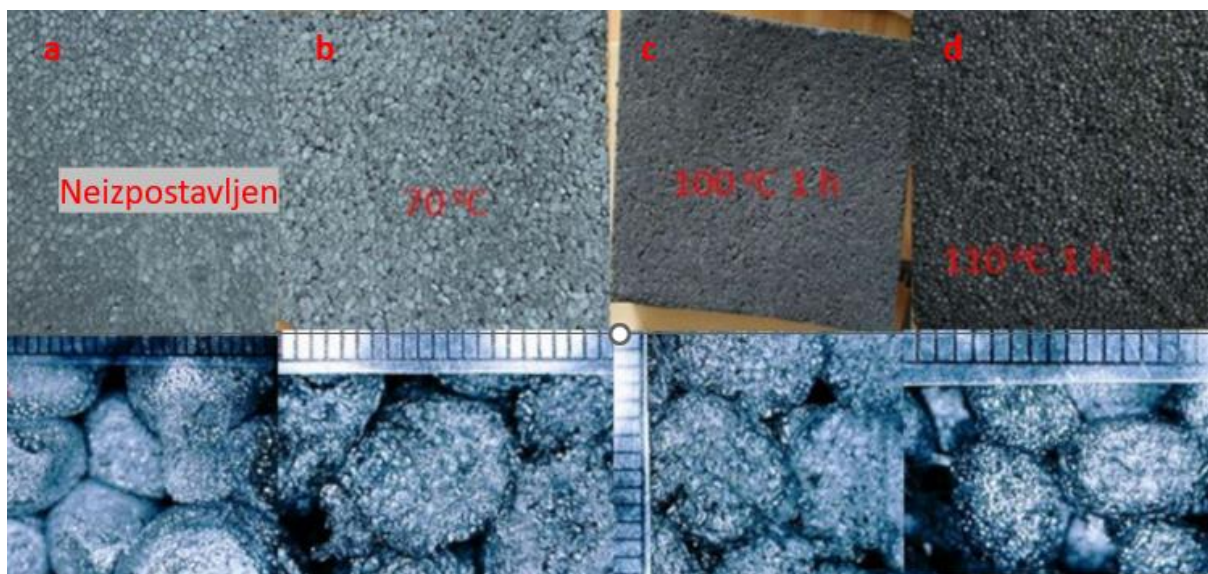
enotedensko temperaturno utrujanje materiala pri 70 °C minimalen oziroma zanemarljiv vpliv na toplotno prevodnost, kot tudi enourno temperaturno utrujanje pri 100 °C. Enourno utrujanje materiala v okolici temperature steklastega prehoda (110 °C) pa ima na toplotno prevodnost večji vpliv. Razlike toplotne prevodnosti pri posameznih temperaturah med neizpostavljenim EPS-om in EPS-om, izpostavljenim na 110 °C, so nekje od 8 % do 10 % [11].



Slika 4: Vpliv temperature na toplotno prevodnost EPS-a [11]

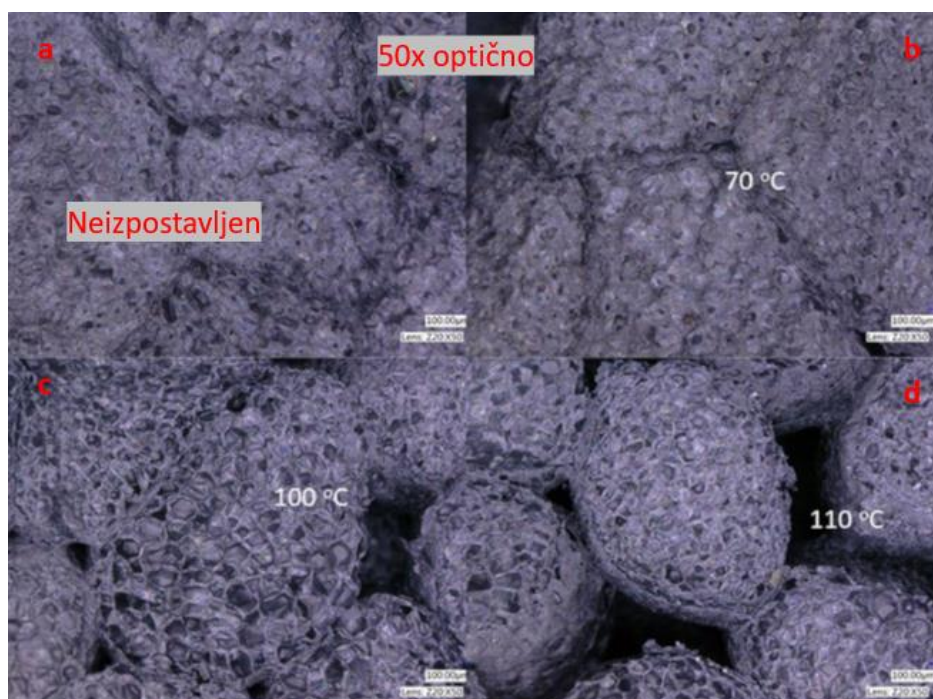
2.2.2 Vpliv temperature na strukturo EPS-a

Za lažjo predstavo, kaj se dogaja z EPS-om pri višjih temperaturah, bomo v tem delu poglavja predstavili rezultate članka avtorjev Lakatos in Csík [11]. Avtorja sta študirala vpliv povišane temperature (70 °C, 100 °C in 110 °C) na strukturo grafitnega EPS-a, gostote 16,83 kg/m³. Na podlagi meritev diferenčne dinamične kalorimetrije (DSC) je začetek steklastega prehoda tega materiala pri okoli 100 °C, vrh steklastega prehoda - T_g pa znaša 111,45 °C. Vrednosti sta služili za določitev časa dolgotrajne termične izpostavljenosti. Vzorce sta pri temperaturi 70 °C izpostavljala šest tednov, pri temperaturah 100 °C in 110 °C pa eno uro. Pri slednjih se je material že začel degradirati, kar lahko vidimo na sliki 5. S fotografij (20-kratna povečava) lahko razberemo spremembo strukture EPS-a pri vseh vzorcih, izpostavljenih pri različnih temperaturah. Bistvene spremembe lahko opazimo pri vzorcu, izpostavljenem temperaturi 110 °C [11].



Slika 5: Fotografije vzorcev: a-neizpostavljen, b-izpostavljen pri 70 °C, c-izpostavljen pri 100 °C, d-izpostavljen pri 110 °C [11]

Slika 6 pa prikazuje posnetke z optične mikroskopije (50-kratna povečava) neizpostavljenih in izpostavljenih vzorcev, to je pri enakih temperaturah kot na sliki 5. S slike lahko razberemo krčenje kroglic pri temperaturno izpostavljenih vzorcih. Prav tako je razvidno, da se pri vzorcih, izpostavljenih pri temperaturah 100 °C in 110 °C, poroznost (vrzeli/praznine med kroglicami) povečuje [11].



Slika 6: Posnetki s svetlobnim mikroskopom: a-neizpostavljen, b-izpostavljen pri 70 °C, c-izpostavljen pri 100 °C, d-izpostavljen pri 110 °C) [11]

Krčenje polistirenskih kroglic, ki ga prikazuje slika 6, je tudi vzrok za padec gostote materiala, ki je bila izmerjena vsem vzorcem po izpostavljenosti povišanim temperaturam. Vrednosti gostot lahko razberemo iz tabele 2. Pri vzorcu, izpostavljenem pri 70 °C, je gostota primerljiva gostoti neizpostavljenega vzorca in znaša 16,51 kg/m³. Pri vzorcu, izpostavljenem pri 100 °C, znaša gostota 23,27 kg/m³, pri vzorcu, izpostavljenem pri 110 °C, pa 43,21 kg/m³. Obenem se je pri vzorcema, izpostavljenema pri 100 °C in 110 °C, močno spremenila geometrija plošče. Pri vzorcu, izpostavljenem pri 100 °C, so se mere plošče spremenile iz 30 cm × 30 cm × 4,5 cm na 24,8 cm × 26 cm × 4,15 cm, pri vzorcu, izpostavljenem pri 110 °C, pa na 21 cm × 21 cm × 3 cm [11].

Tabela 2: Izmerjene gostote vzorcev [11]

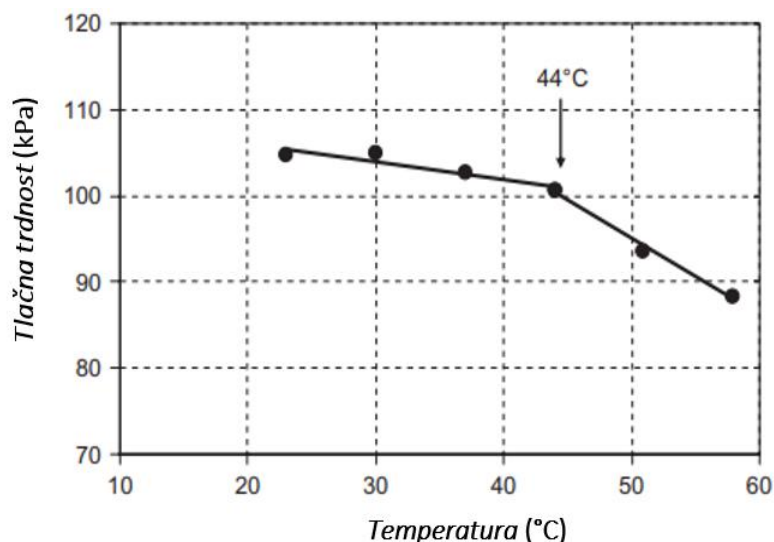
Vzorec	Gostota (kg/m ³)
Neizpostavljen	16,83
Izpostavljen pri 70 °C	16,51
Izpostavljen pri 100 °C	23,27
Izpostavljen pri 110 °C	43,21

2.2.3 Vpliv temperature na mehanske lastnosti

Tlačne lastnosti

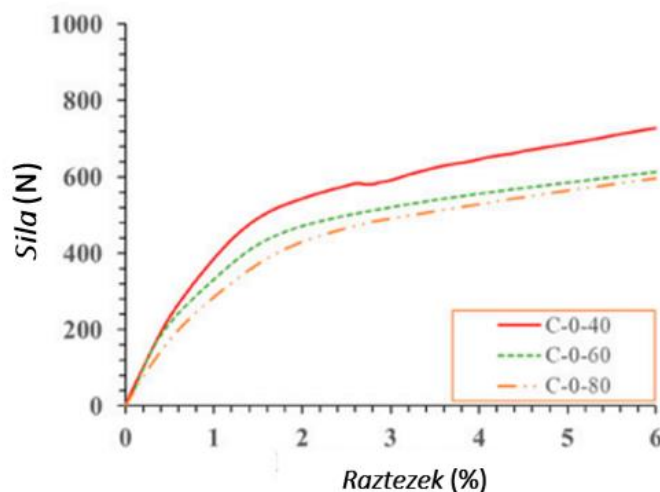
Vpliv temperature na tlačno napetost pri 10 % raztežku vzorca oziroma tlačno trdnost sta proučevala Yeo S. in Hsuan Y. in ugotovitve podala v članku [3]. Testirala sta EPS Geofam, gostote $20,33 \pm 0,19$ kg/m³. Meritve tlačnega testa po ASTM D 1621 sta opravila pri sobni temperaturi (23 °C) in pri povišanih temperaturah: 30 °C, 37 °C, 44 °C, 51 °C in 58 °C. Pri vsaki temperaturi sta izvedla vsaj tri meritve [3].

Slika 7 prikazuje tlačno trdnost, odvisno od temperature. S slike lahko razberemo, da ta pada z višanjem temperature. Pri 23 °C znaša 105 kPa, pri 44 °C pade na 100 kPa, pri 58 °C pa vrednost tlačne trdnosti pade pod 90 kPa. Padec tlačne trdnosti, odvisno od temperature, sledi bilinearnemu razmerju s prehodom pri 44 °C. V članku to nenadno spremembo naklona pojasnjujeta raziskovalca s spremembo stopnje disipacije zraka (plinasta faza) in/ali z mehčanjem sten mikro celic (trdna faza) [3].



Slika 7: Tlačna napetost pri 10 % raztezkju v odvisnosti od temperature [3]

Vpliv povišane temperature (40 °C, 60 °C in 80 °C) na lastnosti EPS-a sta proučevala Tahir M. in Hamed E. in ugotovitve podala v članku [2]. Slika 8 grafično prikazuje potek tlačnega testa, ki sta ga raziskovalca izvajala po EN:14509:2013. S slike lahko vidimo, da sta raziskovalca tlačni test po tem standardu zaključila pri 6 % relativnem raztezkju vzorca. Sila z višanjem temperature pada. Glede na silo 824 N, izmerjeno pri 6 % raztezkju za vzorec pri 24 °C, se vrednosti sile pri tlačnem testu, to je pri temperaturi 60 °C oziroma 80 °C, zmanjša za približno 20 % in 35 % [2].



Slika 8: Vpliv temperature (40 °C, 60 °C in 80 °C) na uporabljenno silo v odvisnosti od relativnega raztezka vzorca EPS-a [2]

Temperatura ima vpliv tudi na modul elastičnosti (E -modul), kar lahko vidimo iz spremembe naklona začetnega dela krivulj na sliki 8. Vrednosti modula elastičnosti so zbrane v tabeli 3. Pri 40 °C E -modul pade za 16,8 % glede na referenčno vrednost modula, izmerjenega pri 24 °C, in sicer s 3,32 MPa na 2,76 MPa. Pri 60 °C je padec

E-modula za 26,5 %, to je na vrednost 2,44 MPa. Pri 80 °C pa *E*-modul pade na 1,88 MPa, kar predstavlja 43,4 % padec [2].

Tabela 3: Vpliv povišane temperature na *E*-modul [2]

Tlačni test	<i>E</i> -modul (MPa)	Poslabšanje modula (%)
pri 24 °C	3,32 ± 0,02	Ref
pri 40 °C	2,76 ± 0,17	16,80
pri 60 °C	2,44 ± 0,08	26,50
pri 80 °C	1,88 ± 0,05	43,40

Poleg vpliva povišane temperature na *E*-modul sta raziskovalca proučevala tudi vpliv temperaturnega utrujanja na tlačne lastnosti EPS-a [2]. Izvedla sta 45 temperaturnih ciklov (en cikel je bil sestavljen iz 12-urne izpostavljenosti pri 24 °C in 12-urne izpostavljenosti pri 80 °C) na EPS-u ter mu po ciklih 1, 5, 10, 15, 25, 35, 45 izmerila tlačne lastnosti. V tabeli 4 so podane vrednosti elastičnega modula. S povečevanjem števila temperaturnih ciklov konstantno pada elastični modul. Vrednost modula po petih ciklih pade že za 16,8 % glede na referenčno vrednost modula, izmerjenega pri 24 °C, in sicer na 2,76 MPa. Po 25. ciklu je padec modula za 34,8 %, po 35. ciklu za 38,3 %, po 45. ciklu pa za 38,4 %, in sicer vrednost pade na 2,05 MPa. Na podlagi teh rezultatov lahko rečemo, da se po 35 ciklih modul ne spreminja več tako drastično in je njegova vrednost le nekoliko višja od elastičnega modula, izmerjenega pri tlačnem testu pri 80 °C, ki znaša 1,88 MPa [2].

Tabela 4: *E*-modul v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov [2]

Temperaturni cikel	<i>E</i> -modul (MPa)	Poslabšanje modula (%)
0	3,32 ± 0,02	Ref
1	3,22 ± 0,08	3
5	2,76 ± 0,22	16,8
15	2,58 ± 0,14	22
25	2,16 ± 0,13	34,8
35	2,05 ± 0,19	38,3
45	2,04 ± 0,11	38,4

Po končanem temperaturnem utrujanju sta raziskovalca za preučitev vpliva temperaturnega utrujanja na mehanske lastnosti EPS-a izvedla še dodatne tlačne teste pri povišanih temperaturah (40 °C, 60 °C in 80 °C). Za ovrednotenje padca mehanskih lastnosti sta primerjala vrednosti *E*-modula, zbrane v tabeli 5. Po 45. temperaturnem cikliranju sta izmerila vrednosti modula EPS pri 40 °C in ugotovila, da je enaka vrednosti modula EPS, izmerjenega pri sobni temperaturi, in znaša 2,04 MPa. Padec lahko opazimo pri tlačnem testiranju pri 60°C in 80 °C, kjer pade *E*-modul za 44,6 % na 1,84 MPa in za 49,8 % na 1,67 MPa [2].

Tabela 5: E-modul po 45 temperaturnih ciklih in izvajanjih tlačnega testa pri povišanih temperaturah [2]

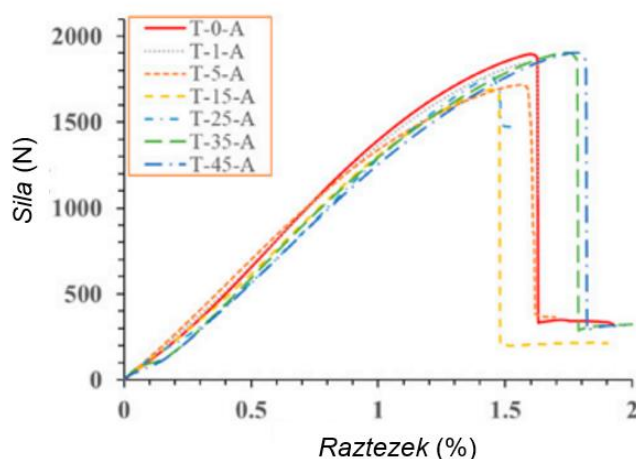
Izpostavitev pred tlačnim testom	E-modul (MPa)	Poslabšanje modula (%)
24 °C	3,32 ± 0,02	Ref
45 ciklov + 24 °C	2,04 ± 0,11	38,4
45 ciklov + 40 °C	2,04 ± 0,06	38,4
45 ciklov + 60 °C	1,83 ± 0,03	44,6
45 ciklov + 80 °C	1,67 ± 0,07	49,8

Natezne lastnosti

Tahir M. in Hamed E. sta prav tako proučevala vpliv povišane temperature in temperaturnega utrujanja na natezne lastnosti in ugotovitve podala v članku [2]. Enako kot pri tlačnem testiranju sta izvedla raziskovalca za namen temperaturnega utrujanja 45 temperaturnih ciklov (en cikel je bil sestavljen iz 12-urne izpostavljenosti pri 24 °C in 12-urne izpostavljenosti pri 80 °C) na EPS-u ter po ciklu 1, 5, 10, 15, 25, 35, 45 izmerila natezne lastnosti. Te sta pri povišani temperaturi izmerila pri 40 °C, 60 °C in 80 °C [2].

Na sliki 9 je predstavljen vpliv temperaturnega utrujanja na odziv EPS-a na natezno obremenjevanje. Iz poteka krivulj lahko razberemo, da ima temperaturno utrujanje na natezne lastnosti, v primerjavi s tlačnimi lastnostmi, opazno nižji vpliv. Elastični modul in natezna trdnost se s povečevanjem števila temperaturnih ciklov skoraj ne spremenita [2].

Maksimalna sila oziroma sila pri pretrgu je znašala pred temperaturnim utrujanjem 1887 N, E-modul pa 7,17 MPa. Po 45 ciklih je modul padel za 5,72 %, to je na 6,76 MPa. Iz grafičnega prikaza na sliki 9 pa lahko vidimo, da utrujanje ni imelo vpliva na maksimalno doseženo silo, saj so si vrednosti na grafu, to je v odvisnosti od različnih temperaturnih ciklov, zelo podobne [2].



Slika 9: Vpliv temperaturnega utrujanja na odziv EPS na natezno obremenjevanje [2]

V tabeli 6 so predstavljene vrednosti elastičnega modula, izmerjenega pri različnih temperaturah. Povišane temperature imajo večji vpliv na E -modul kot temperaturno utrujanje. E -modul je pri nateznem testu, to je pri 40 °C, padel na 6,40 MPa, pri 60 °C na 4,91 MPa in pri 80 °C na 4,4 MPa. Pri slednjem gre za 38,6 % padec modula glede na referenčno vrednost modula, izmerjenega pri 24 °C. Padec E -modula z višanjem temperature je pri nateznem testiranju podoben kot pri tlačnem - pri slednjem je bil padec 43,4 %. Iz tabele lahko vidimo, da se vrednosti modula pri testu s povišano temperaturo bistveno ne razlikujejo po 45 temperaturnih ciklih od rezultatov vrednosti modula, izmerjenega pri povišani temperaturi. Največji padec modula sta raziskovalca izmerila pri 80 °C in izpostavi 45 temperaturnih ciklov, torej modul je padel za 40,6 %, to je na 4,26 MPa [2].

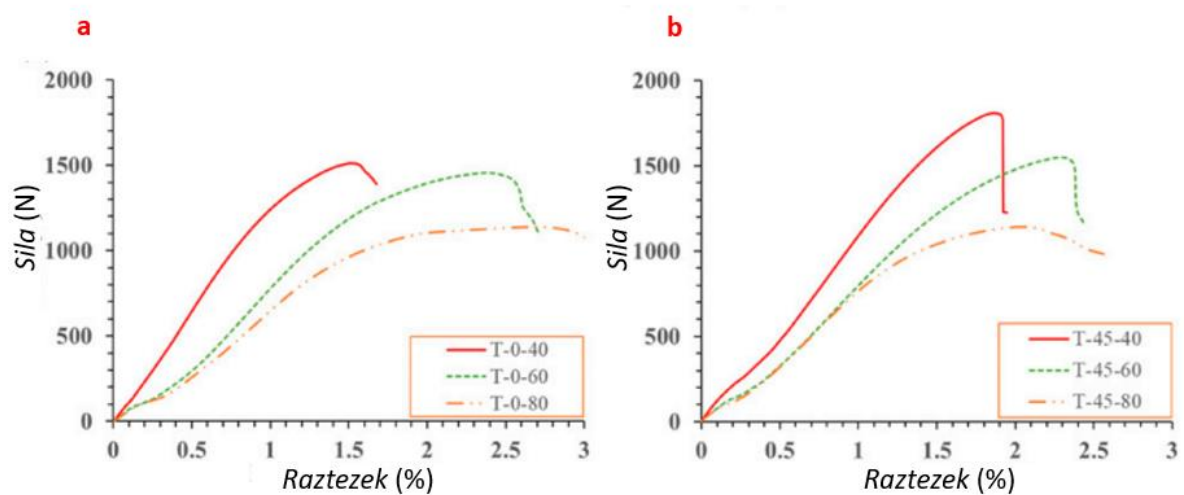
Tabela 6: Vpliv povišane temperature in temperaturnega utrujanja na natezni modul [2]

Izpostavitve ter pogoji izvajanja nateznega testa	E -modul (MPa)	Poslabšanje modula (%)
pri 24 °C	7,17*	Ref
pri 40 °C	6,40 ± 0,22	10,8
pri 60 °C	4,91 ± 0,04	31,5
pri 80 °C	4,4 ± 0,18	38,6
45 ciklov + pri 40 °C	6,16 ± 0,14	14,1
45 ciklov + pri 60 °C	4,81 ± 0,03	32,9
45 ciklov + pri 80 °C	4,26 ± 0,17	40,6

*izračunana vrednost, zato ni podatka o standardni deviaciji

Ob primerjanju rezultatov tlačnega in nateznega testiranja ugotavljamo, da je vrednost E -modula pri nateznem testu približno dvakrat večja kot pri tlačnem. Pri sobni temperaturi znaša E -modul pri nateznem testiranju EPS-a 7,17 MPa, E -modul pri tlačnem testiranju pa 3,32 MPa. To je mogoče pripisati lokalnim deformacijam sten kroglic in hitremu izhajanju zraka iz praznin pri tlačnih obremenitvah, do katerih ne pride pri nateznih obremenitvah [2].

Na sliki 10a lahko še grafično vidimo padec elastičnega modula - krivulje namreč postajajo položnejše z višanjem temperature. Poleg padca modula pa lahko iz grafičnega prikaza razberemo tudi znižanje maksimalne sile, ki jo premore material. Maksimalna sila pri testu, in sicer pri 40 °C, je približno 1500 N, pri 60 °C pade na 1450 N, pri 80 °C pa na 1100 N. Ta se zmanjša za 41 % glede na referenčno vrednost maksimalne sile, izmerjene pri 24 °C. Povišanje temperature vpliva tudi na raztezek pri pretrgu, ki se povečuje. Na testu, to je pri 80 °C, se poveča za dvakrat v primerjavi z referenčno vrednostjo pri 24 °C, in sicer z 1,6 % na 3 % [2].



Slika 10: Sila v odvisnosti od razteзка pri nateznem testu EPS, in sicer pri povišanih temperaturah: a-pred utrujanjem in b-po 45 temperaturnih ciklih [2]

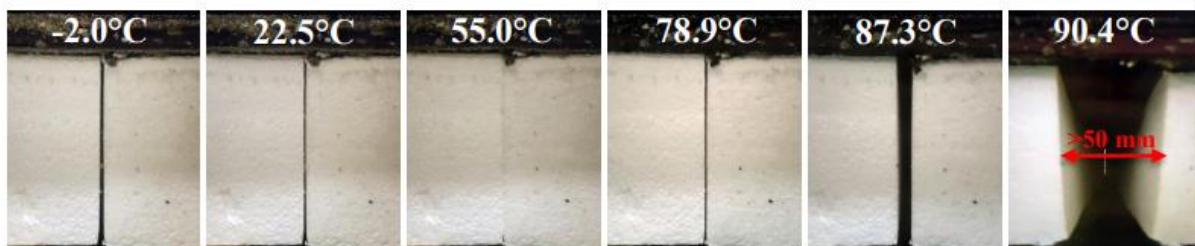
Razmeroma majhno zmanjšanje E -modula pene po temperaturnem utrujanju pripisujeta razpokanju in ponovnemu spajanju EPS-kroglic. Razpokanje prispeva k zmanjšanju modula, spajanje pa deluje obratno, zato njuno delovanje rezultira v skoraj nespremenjeni vrednosti modula [2].

Po drugi strani povzroči visoka temperatura testiranja znatno zmanjšanje E -modula pene (slika 10), kar pripisujeta pretiranemu mehčanju kroglic [2].

2.2.4 Vpliv povišane temperature na dimenzijsko stabilnost

Kadar govorimo o vplivu povišane temperature na EPS, moramo vsekakor pomisliti tudi na njen vpliv na dimenzijsko stabilnost. Pri testu izpostavimo material tri dni pri 70 °C ter mu po končanem izpostavljanju izmerimo dimenzije. V primeru prevelikih dimenzijskih sprememb, predpisanih glede na uporabo toplotno izolacijskega materiala, se ta ne sme uporabljati za tovrstne namene, saj bi lahko v nasprotnem primeru toplotno raztezanje in krčenje materiala privedlo do vrzeli med izolacijskimi ploščami. To bi pomenilo povečanje toplotne prevodnosti in s tem izolacijsko neučinkovitost [5,7,9].

Kot smo že izpostavili v poglavju 2.2.2, se z višanjem temperature, to je od 70 °C, do temperature steklastega prehoda EPS-a, zmanjšuje volumen materiala, kroglice se krčijo. To lahko jasno vidimo tudi na sliki 11 [9]. Raziskovalci so preiskovali vpliv utrujanja in povišane temperature na vrzel med izolacijskimi ploščami. S slike lahko razberemo, da se je vrzel med dvema EPS-ploščama, in sicer s povečevanjem temperature (notranjost plošče), zmanjševala do približno 80 °C, ko se je vrzel znatno povečala. Ta sprememba dimenzije pri visoki temperaturi je bila trajna, saj se po ohlaiditvi vrzel ni vrnila na prvotno velikost [5,7,9].

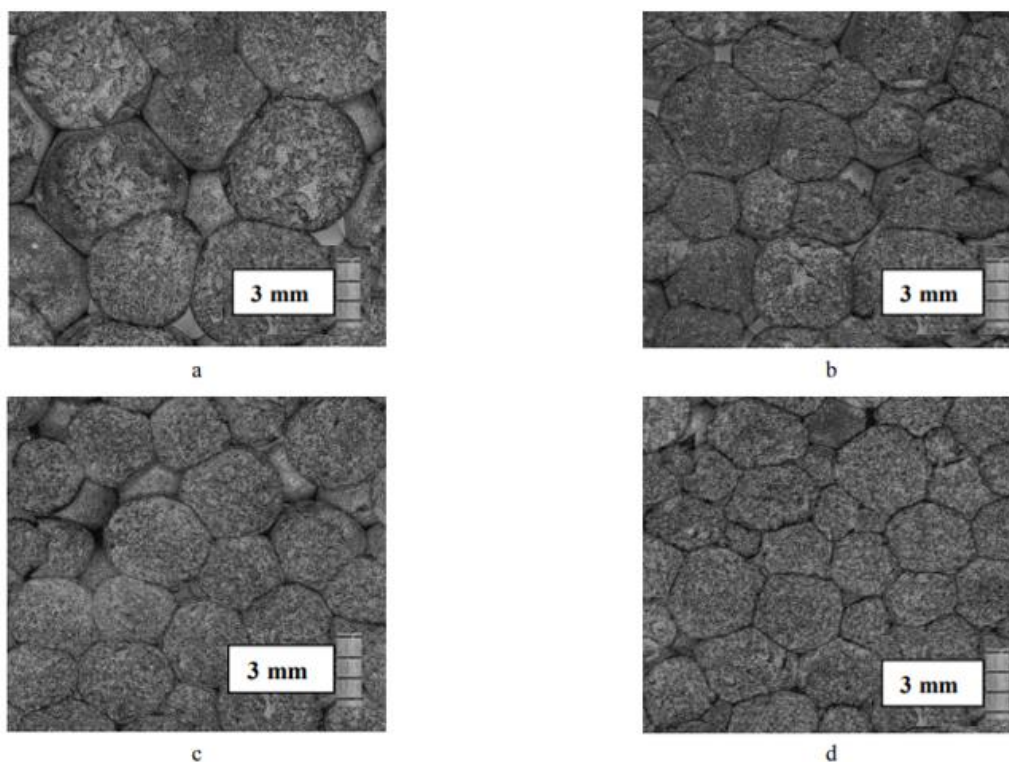


Slika 11: Velikost vrzeli med dvema mehansko pritrjenima izolacijskima ploščama EPS v odvisnosti od temperature [9]

2.3 Struktura EPS, različnih gostot

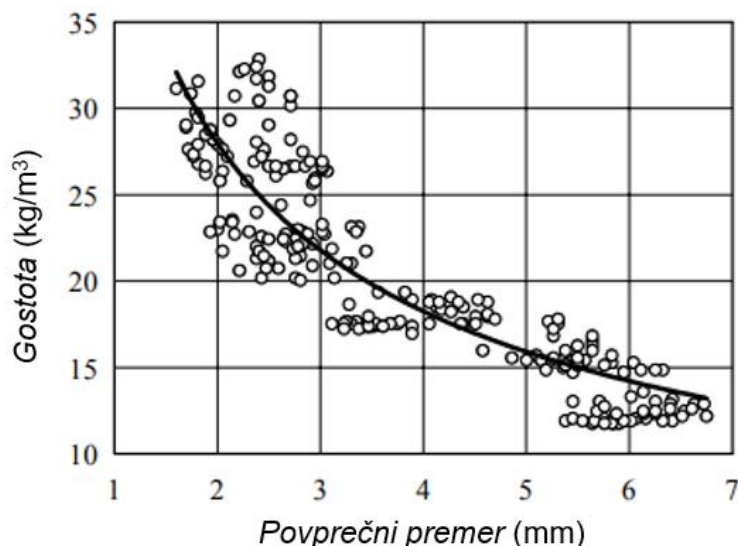
Gostota EPS-a lahko znaša od 10 kg/m^3 do 30 kg/m^3 . Višja kot je gostota, manj vmesnega prostora je med kroglicami. Posledice so: boljša odpornost na mehanske obremenitve, nižja vrednost toplotne prevodnosti in tako naprej [17].

Slika 12 prikazuje strukturo EPS-a, različnih gostot. Slika predstavlja strukturo EPS-ov, vse od 12 kg/m^3 (a) do 30 kg/m^3 (d). S slike lahko razberemo, da so kroglice pri višji gostoti tesno skupaj, stična površina med kroglicami je velika. Na slikah, ki prikazujejo EPS z nižjo gostoto, pa lahko vidimo, da je stičnih mest med kroglicami manj. Posledica je več vmesnega prostora, ki je na sliki označen s sivo barvo [17].



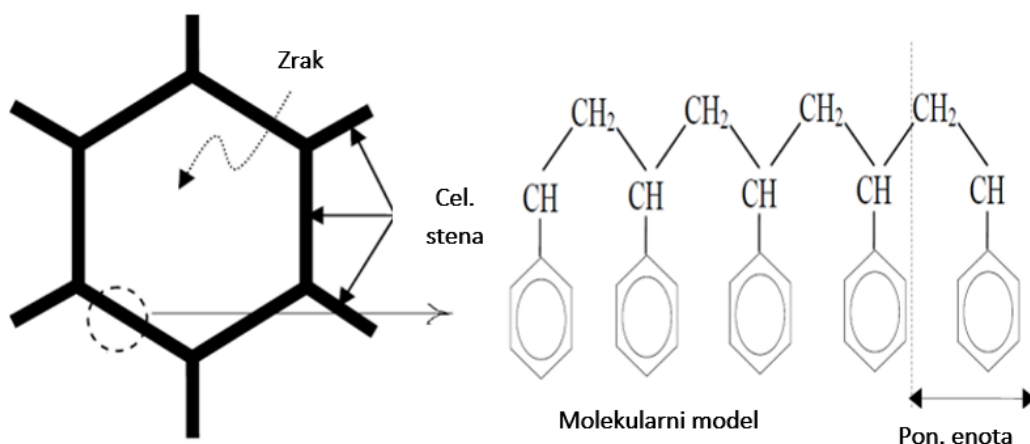
Slika 12: Struktura EPS-ov, različnih gostot: a - 12 kg/m^3 ; b - 17 kg/m^3 ; c - 23 kg/m^3 ; d - 30 kg/m^3 [17]

Poleg stičnih mest in vmesnega prostora med kroglicami ima gostota vpliv tudi na premer kroglice. Kot lahko vidimo na sliki 13, se povprečni premer kroglic eksponentno povečuje z nižanjem gostote. Pri EPS-u z gostoto 30 kg/m^3 je povprečni premer kroglice okrog 2 mm, pri EPS-u z gostoto 15 kg/m^3 pa je med 4,5 mm in 6,5 mm [17].



Slika 13: Vpliv gostote EPS-a na povprečni premer kroglice [17]

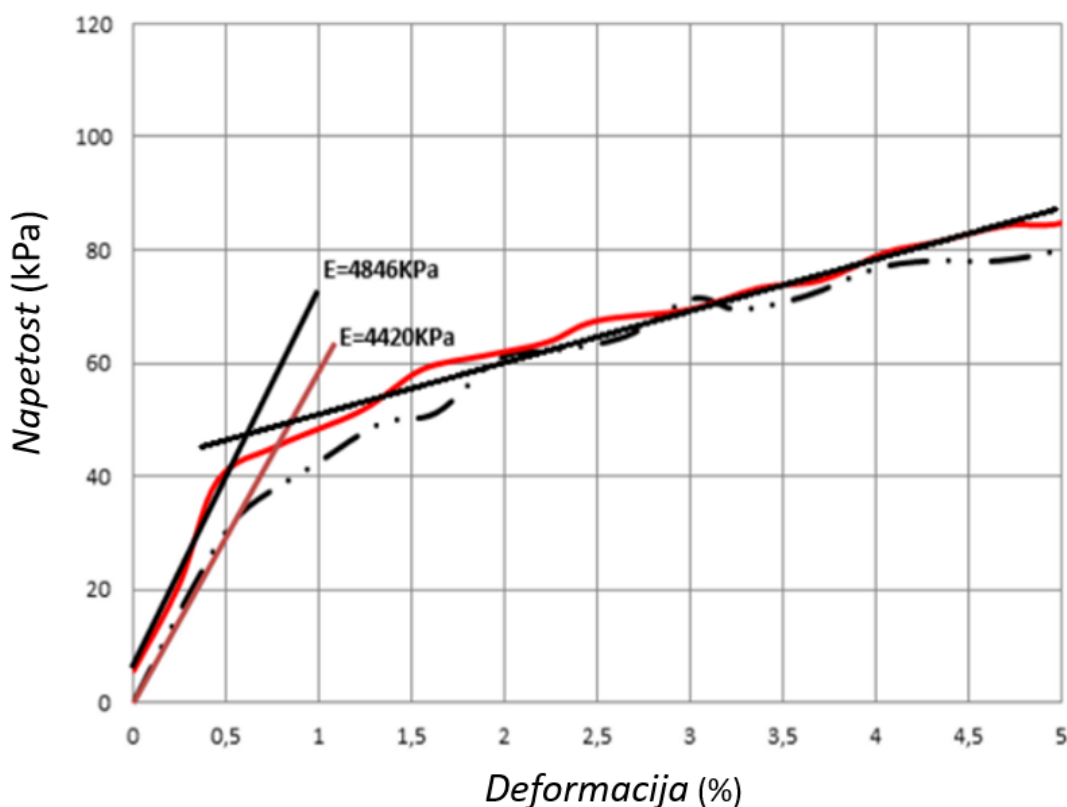
Na gostoto in s tem na poroznost EPS-a ter posledično na trdnost materiala lahko vplivamo s proizvodnim procesom in z dodatki. Ko pride do obremenitve, igra v materialu glavno vlogo njegova celična struktura, ki predstavlja obliko šesterokotne celice. Ta nastane med proizvodnim procesom EPS-blokov zaradi procesa vpihovanja, segrevanja in ohlajanja polistirenskih kroglic. Vsaka sprememba makrostrukture EPS-a, bodisi pri proizvodnji bodisi zaradi zunanjih sil, lahko spremeni njegove lastnosti. V ta namen bomo v poglavju 2.3.1 opisali vpliv kratkotrajnega tlačnega obremenjevanja na strukturo EPS-a. Kemijska struktura EPS-a je predstavljena na sliki 14 [18].



Slika 14: Struktura EPS [18]

2.3.1 Struktura EPS-a pri kratkotrajnem tlačnem obremenjevanju

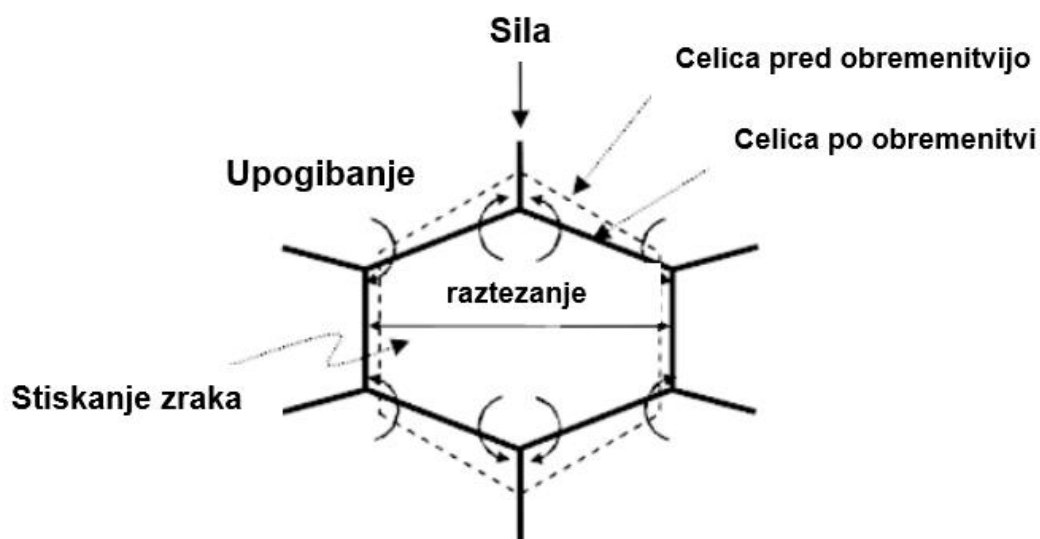
Pri kratkotrajnem tlačnem obremenjevanju lahko pri EPS-u opazimo tako linearni kot nelinearni odziv (elastično in plastično območje). Na splošno velja, da je linearni odziv EPS-a v območju deformacije materiala od 0 do 1 %, nelinearni pa od 1 % naprej [18]. Linearnost, in sicer do približno 0,6 % deformacije materiala, lahko razberemo z grafičnega prikaza na sliki 15.



Slika 15: Tlačni test EPS [18]

Zato se EPS lahko uporablja kot toplotno izolacijski material. Pri tej uporabi lahko pride tudi do večjih deformacij materiala. Prav tako pa ga uporabljamo kot lahek polnilni material v cestnih konstrukcijah, kjer ne pričakujemo prevelikih deformacij. Pri takšni uporabi so parametri modula elastičnosti, Poissonovo razmerje, in parametri tlačne trdnosti zelo pomembni, zlasti v linearnem območju deformacij, torej med 0 in 1 % [18–20].

Ob obremenitvi se EPS-u spremeni struktura. V elastičnem območju obremenitev vpliva na robove celic tako, da jih ukrivi in raztegne navpično steno, ki obdaja zrak. V plastičnem območju se celične stene začnejo sesedati in so trajno deformirane. Omenjena pojava in odziv celičnih sten na zunanjo obremenitev prikazuje slika 16 [18].



Slika 16: Vpliv stiskanja na strukturo celične stene EPS-a [18]

2.3.2 Vpliv gostote na mehanske lastnosti EPS-a

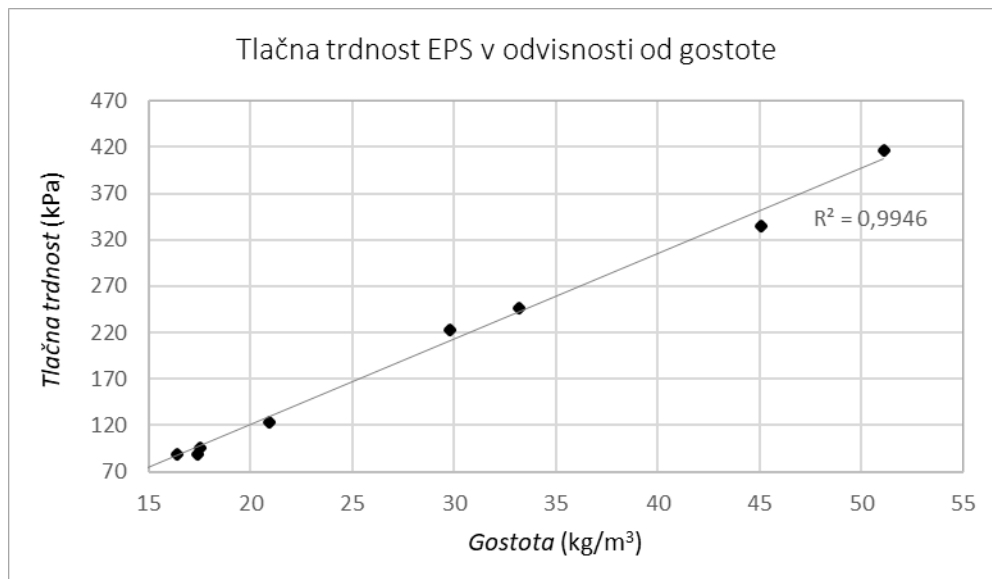
Kot smo že uvodoma izpostavili, ima gostota EPS-a vpliv na mehanske lastnosti, z višanjem gostote se te izboljšujejo. Ena izmed ključnih lastnosti, tlačna trdnost, se linearno povečuje z večanjem gostote [7,18–20].

V tabeli 7 so zbrane vrednosti tlačne trdnosti v odvisnosti od gostote. Iz tabele lahko razberemo, da se s povečevanjem gostote povečuje tudi vrednost tlačne trdnosti [7,18–20].

Tabela 7: Tlačna trdnost EPS v odvisnosti od gostote [7]

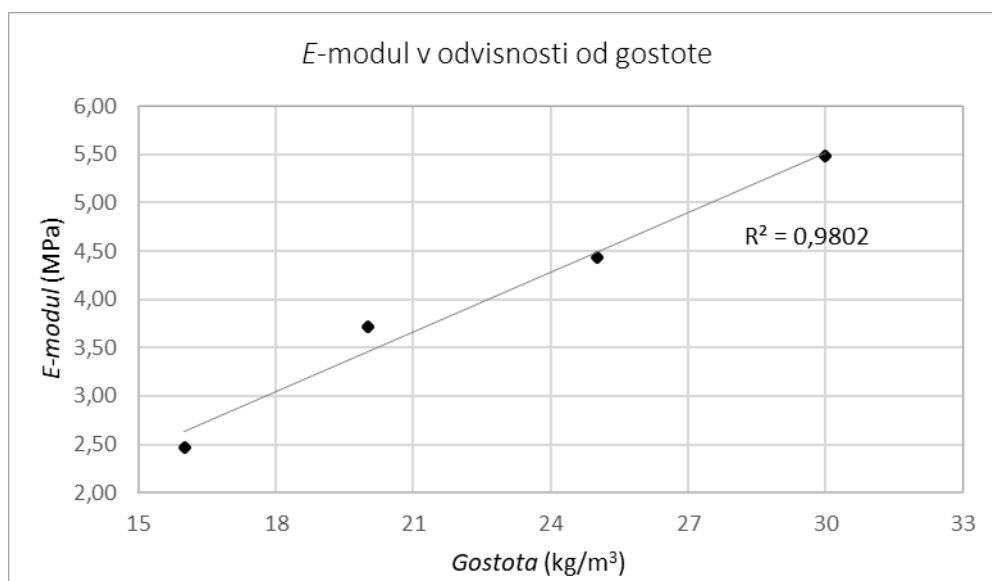
Gostota EPS	σ_{10} (kPa)
14,5	75,2 ± 2,23
16,4	88,9 ± 2,37
17,4	88,2 ± 3,06
17,5	96,2 ± 1,04
20,9	124 ± 5,57
29,8	223 ± 16,2
33,2	246 ± 4,69
45,1	335 ± 3,38
51,1	417 ± 2,98

Grafično je vpliv povišanja gostote na tlačno trdnost razviden na sliki 17. Z grafičnega prikaza lahko vidimo linearno odvisnost [7].



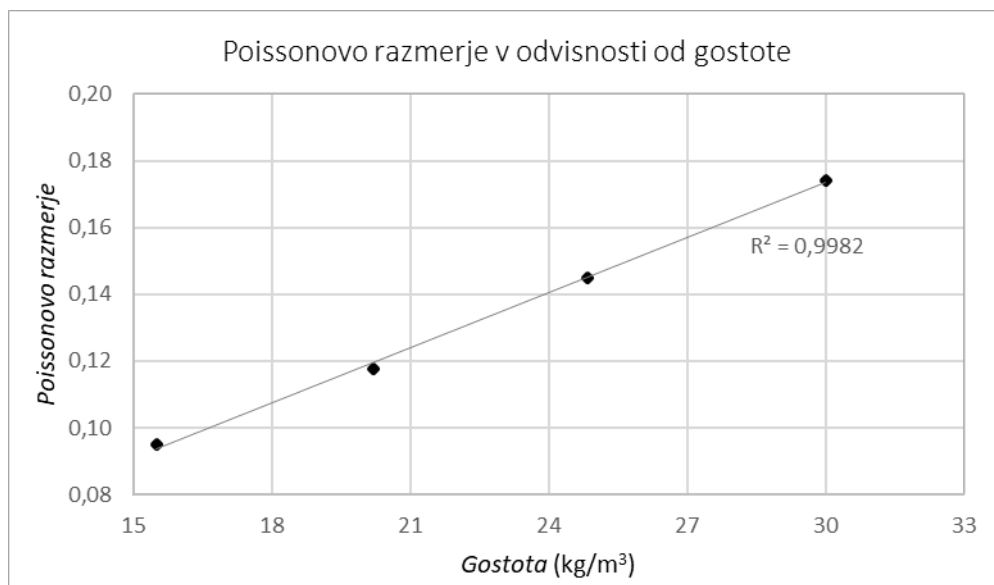
Slika 17: Tlačna trdnost EPS-a v odvisnosti od gostote [7]

S povečevanjem gostote EPS-a narašča tudi E -modul. S slike 18 lahko razberemo, da gre tudi tu za linearno odvisnost vpliva gostote.



Slika 18: E -modul EPS-a v odvisnosti od gostote [19,20]

Podoben trend kot pri vplivu gostote na tlačno trdnost in E -modul lahko opazimo tudi pri vplivu gostote na vrednost Poissonovega razmerja EPS-a. Na sliki 19 je grafično prikazan vpliv gostote na vrednost Poissonovega razmerja. S slike lahko razberemo, da z večanjem gostote linearno narašča tudi vrednost Poissonovega razmerja.



Slika 19: Poissonovo razmerje EPS-a v odvisnosti od gostote [19,20]

3 EKSPERIMENTALNI DEL

3.1 Uporabljeni materiali

V magistrskem delu smo preučevali toplotno izolacijske plošče iz EPS-a, slovenskega proizvajalca, treh različnih tipov. To so:

- EPS 70,
- EPS 100 in
- EPS 200.

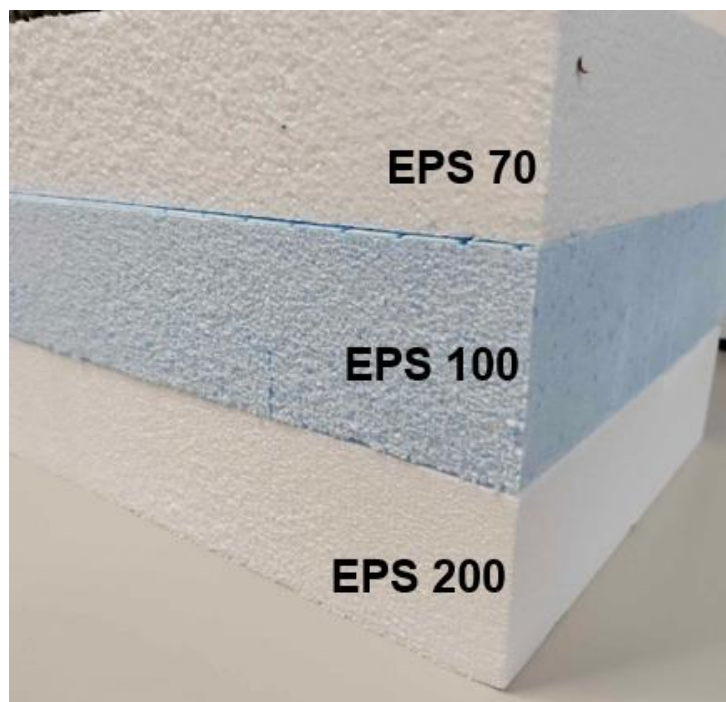
Dimenzije vseh toplotno izolacijskih plošč so: 1000 mm x 500 mm x 80 mm.

V tabeli 8 so zbrane ključne lastnosti materialov, uporabljenih v magistrskem delu.

Tabela 8: Deklarirane lastnosti uporabljenih materialov

Tip EPS-a	EPS 70	EPS 100	EPS 200
Toplotna prevodnost	0,039 W/mK	0,036 W/mK	0,036 W/mK
Difuzijska upornost prehoda vodne pare	NPD	NPD	NPD
Vpijanje vode s potopitvijo	pod 1 kg/m ²	pod 1 kg/m ²	pod 1 kg/m ²
Tlačna trdnost	nad 70 kPa	nad 100 kPa	nad 200 kPa
Natezna trdnost	nad 100 kPa	nad 150 kPa	nad 250 kPa
Upogibna trdnost	nad 115 kPa	nad 150 kPa	NPD
Reakcija na požar (evropski razred)	Evroražred E	Evroražred E	Evroražred E

Iz tabele 8 lahko spoznamo, da se izbrani materiali najbolj razlikujejo v mehanskih in toplotnih lastnostih. Druge lastnosti so si med seboj podobne. Slika 20 predstavlja fotografski posnetek materialov, uporabljenih v magistrskem delu. Že po izgledu površin EPS-a razberemo, da je najbolj gost material EPS 200, kjer so kroglice med seboj najbolj tesno skupaj, najmanj pa EPS 70.



Slika 20: Fotografija uporabljenih EPS-plošč (EPS 70, EPS 100, EPS 200)

3.1.1 Priprava vzorcev

Toplotno izolacijske plošče EPS-ov smo pred testiranjem tri dni kondicionirali v prostoru, ki zagotavlja standardne laboratorijske pogoje: temperatura je bila 23 ± 2 °C in relativna vlaga 50 ± 5 %.

Po kondicioniranju smo vzorce razrezali z namizno žago na želene dimenzije, ki jih zahtevajo posamezni standardi izvajanja testov. Preskušance smo za tlačni test in test dimenzijske stabilnosti pripravili na dimenzije: dolžine 200 ± 1 mm x širine 200 ± 1 mm x originalne debeline toplotno izolacijske plošče (80 mm). Za natezni test smo preskušance pripravili na dimenzije: dolžine 100 ± 1 mm x širine 100 ± 1 mm x originalne debeline toplotno izolacijske plošče (80 mm).

Preskušance smo po razrezu prestavili v kondicioniran prostor, standardnih laboratorijskih pogojev, kjer so se kondicionirali najmanj dva dni pred začetkom testa.

Tabela 9 prikazuje pregled vseh testiranj mehanskih lastnosti, gostote in dimenzijske stabilnosti ter količine paralelek za posamezni test.

Tabela 9: Pregled mehanskih testiranj in dimenzijske stabilnosti ter količina vzorcev za posamezni test

EPS/test	Natezni test pri sobni in pri povišanih temperaturah	Gostota	Tlačni test pri sobni in pri povišanih temperaturah	Dimenzijska stabilnost po celotnem temperaturnem utrujanju
EPS 70	/	5 paralelk	6 x 3 paralelke	5 paralelk
EPS 100	/	5 paralelk	6 x 3 paralelk	5 paralelk
EPS 200	6 x 3 paralelke	5 paralelk	6 x 3 paralelke	5 paralelk

Z vrstično elektronsko mikroskopijo smo analizirali vzorce po izvedenem tlačnem testu preskušancev, izpostavljenim celotnemu temperaturnemu utrujanju (30 ciklov med 20 °C in 80 °C, 168-urna temperaturna izpostava pri 80 °C, 168-urna pri 85 °C in 168-urna pri 90 °C). S SEM smo posneli tri paralelke EPS 70 pred celotnim temperaturnim utrujanjem in po njem.

3.2 Gostota

Najprej smo vsem trem tipom EPS-a določili gostote. To smo naredili gravimetrično in z meritvijo dimenzij vsakega preskušanca. Natančno smo določili mase, to je na 0,1 g. Dimenzije smo vsakemu preskušancu izmerili s kljunastim merilom, in sicer na treh mestih, ter jih podali kot srednjo vrednost, natančno, to je na 0,1 mm. S podatki mase in volumna smo po enačbi 1 izračunali gostoto.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1),$$

pri čemer je:

- ρ - gostota (kg/m³),
- m - masa (kg),
- V - volumen (m³).

3.3 Mehanski testi

Mehanske teste smo izvedli s trgalnim strojem ZWICK Z100, opremljenim z nadzorno enoto; test Control III. Na napravo lahko povežemo do šest merilnih naprav, s katerimi zagotovimo natančno merjenje sil, pomikov in podobnega. Za izvajanje in nadzor testa je univerzalni stroj opremljen s programsko opremo, ki omogoča izvajanje mehanskih testov po predpisanih standardih. ZWICK Z100 omogoča testiranje obremenitev do

100 kN. Slika 21 prikazuje ZWICK Z100, opremljen s komoro, prek katere smo lahko dosegli povišane temperature izvajanja testov.



Slika 21: ZWICK Z100 s temperaturno komoro

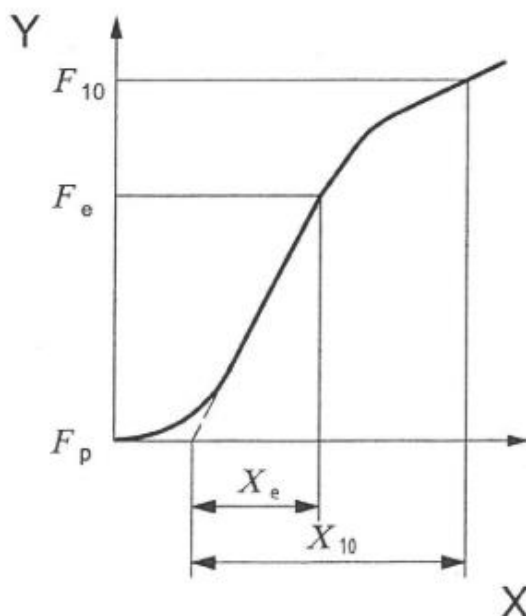
3.3.1 Tlačni test

Obnašanje EPS pri tlačni obremenitvi smo določili s testom tlačne obremenitve po EN ISO 29469:2022, ki nadomešča EN 826:2013 [21]. S testom pridobimo podatke o odzivu materiala, ko je ta obremenjen s silo stiskanja [21].

Testiranje tlačnih obremenitev smo izvajali z dvema ploščama, togima, poliranima, kvadratnima, ravnima in vzporednima. Plošči sta bili večji od preskušanca, kot to zahteva standard. Spodnja plošča je bila pritrjena oziroma nepremična, medtem ko je bila zgornja premična in se je s konstantno hitrostjo premikala proti pritrjeni plošči. Pred začetkom testa sta bili plošči na razmiku debeline preskušanca. S pomikanjem zgornje plošče se je sila na površino preskušanca povečevala, ustvarjati se je začela napetost v preskušancu.

Test smo izvajali pri standardnih laboratorijskih pogojih, to je s predobremenitvijo 250 Pa na vzorec in konstantno hitrostjo pomika premične plošče 10 mm/min. Teste smo pri različnih temperaturah izvedli v temperaturni komori. Vsak preskušanec je bil pred testom izpostavljen 30-minutni temperaturni obremenitvi na testirani temperaturi. Pred testom smo vsakemu preskušancu s kljunastim merilom natančno izmerili dimenzije, to je na 0,1 mm.

Po končanem testu smo iz diagrama tlačne napetosti (σ) v odvisnosti od raztezka (ϵ) izračunali tlačno napetost pri 10 % deformaciji vzorca. V začetnem delu, to je do 1 % deformacije vzorca, smo določili tudi modul elastičnosti oziroma modul stisljivosti. Grafično je potek tlačnega testa in način odčitavanja sile pri 10 % deformaciji, po EN ISO 29469:2022, predstavljen na sliki 22. Za izračun E -modula in točne deformacije se določi začetno točko na x osi (definiramo kot x_0), tako da se ekstrapolira linearni del krivulje, sila vs deformacija na x os. Ta točka je osnova za nadaljnje izračunavanje deformacije.



Slika 22: Tlačni test, po EN ISO 29469:2022 [21]

Tlačno napetost pri 10 % deformaciji vzorca smo izračunali po enačbi 2 [21].

$$\sigma_{10} = 10^3 \frac{F_{10}}{A_0} \quad (2),$$

pri čemer je:

- σ_{10} - tlačna napetost pri 10 % deformaciji vzorca (N/mm²),
- F_{10} - tlačna sila pri 10 % deformaciji vzorca (N),
- A_0 - površina vzorca (mm²).

Modul elastičnosti oziroma stisljivosti izračunamo po enačbi 3 [22].

$$E = \frac{\sigma_{X_{0-1}}}{\epsilon_{X_{0-1}}} \quad (3),$$

pri čemer je:

- E - modul elastičnosti (N/mm²),
- $\sigma_{X_{0-1}}$ - napetost od začetne točke do 1 % deformacije materiala (N/mm²),
- $\epsilon_{X_{0-1}}$ - raztezek od začetne točke do 1 % deformacije materiala.

Slika 23 prikazuje tlačni test EPS-a.



Slika 23: Tlačni test EPS-a

3.3.2 Natezni test

Natezne lastnosti EPS-a smo določili z nateznim testom, in sicer po SIST EN 1607:2013 [22].

Standard definira obnašanje materiala, obremenjenega s silo, ki deluje z raztezanjem pravokotno na površino vzorca [22].

Testiranje nateznih obremenitev toplotno-izolacijskih materialov je potekalo z dvema togima ploščama, ki smo ju najprej prilepili z epoksidno smolo na vzorec in nato celotni sestav s čeljustmi vpeli v trgalni stroj. S smolo nismo poškodovali vzorca in ga nismo ojačili. Ena izmed plošč je na stroju nepremična, druga je premična in se premika s konstantno hitrostjo stran od pritrjene nepremične plošče. S pomikom plošče se povečuje sila, ki deluje na vzorec. Z njo se povečuje tudi vnesena napetost v vzorec. Plošči sta bili na začetku testa v razmiku njune debeline [7].

Test se je izvajal po standardih laboratorijskih pogojev, to je s predobremenitvijo 15 Pa na vzorec in konstanto hitrostjo pomika plošče 10 mm/min. Po končanem testu smo iz diagrama natezne napetosti (σ), v odvisnosti od raztezka (ϵ), izračunali maksimalno natezno napetost, ki predstavlja v naših grafih zlomno natezno trdnost. Pred testi smo vsakemu preskušancu natančno izmerili dimenzije s kljunastim merilom, to je na 0,1 mm.

Enačba 4 [22] prikazuje izračun natezne trdnosti.

$$\sigma_{mt} = \frac{F_{mt}}{A_0} = \frac{F_{mt}}{l*b} \quad (4),$$

pri čemer je:

- σ_{mt} - maksimalna natezna trdnost (kN/m²),
- F_{mt} - maksimalna natezna sila (kN),
- A_0 - površina vzorca (m²),
- l - dolžina vzorca (m),
- b - širina vzorca (m).

Zlomno oziroma maksimalno natezno trdnost podamo v kombinaciji z raztezkom pri pretrgu, izračunanem po enačbi 5 [22].

$$\varepsilon_b = \frac{X_b}{d_0} * 100 \quad (5),$$

pri čemer je:

- ε_b - raztezek pri pretrgu (%),
- X_b - odmik premikajoče plošče od začetne lege ob pretrgu (mm),
- d_0 - začetna debelina vzorca (mm).

Z nateznim testom smo določili tudi modul elastičnosti, povezan s togostjo materiala. Modul elastičnosti predstavlja razmerje med napetostjo in raztezkom materiala v začetnem linearnem oziroma elastičnem delu izvajanja testa. Bolj kot je strma premica na diagramu σ , to je v odvisnosti od ε , večji je modul elastičnosti in bolj je tog material. Materiali s položnejšimi premicami so bolj elastični [23].

Modul elastičnosti izračunamo po enačbi 6 [22].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6),$$

pri čemer je:

- E - modul elastičnosti (N/mm²),
- σ - napetost v linearnem delu poteka nateznega testa,
- ε - raztezek v linearnem delu poteka nateznega testa.

Natezni test je prikazan na sliki 24 [7].



Slika 24: Natezni test EPS-a [7]

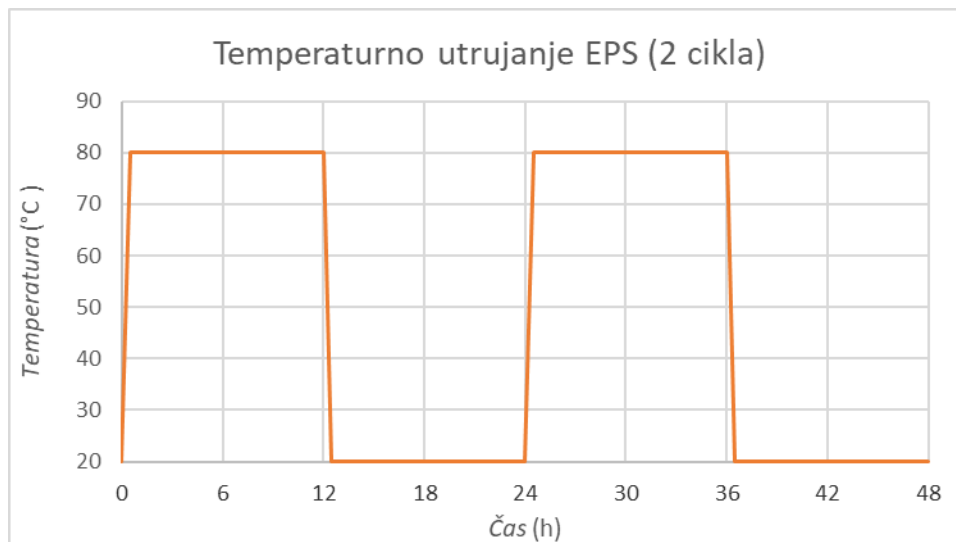
3.4 Temperaturno utrujanje

Vzorci EPS-a 70, EPS-a 100 in EPS-a 200 so izpostavili tudi temperaturnemu utrujanju, ki simulira poleti visoko temperaturno izpostavljenost materiala. V ta namen smo izvedli: 30 temperaturnih ciklov, kjer smo spreminjali temperaturo med 20 °C in 80 °C ter dodatno izpostavitve 168 ur pri 80 °C, 168 ur pri 85 °C in 168 ur pri 90 °C. Dolžina enega temperaturnega cikla je bila 24 ur, in sicer s spreminjanjem temperature med 20 °C in 80 °C pri relativni vlažnosti 50 %. Te pogoje smo zagotovili s temperaturno-vlažnostno komoro Kambič KK-340.

En cikel je bil sestavljen iz štirih korakov, in sicer:

- 30 min segrevanje do 80 °C,
- 11,5 ure pri 80 °C,
- 30 min ohlajanje do 20 °C in
- 11,5 ure pri 20 °C.

Profil začetnega temperaturnega utrujanja (2 cikla) je prikazan na sliki 25.

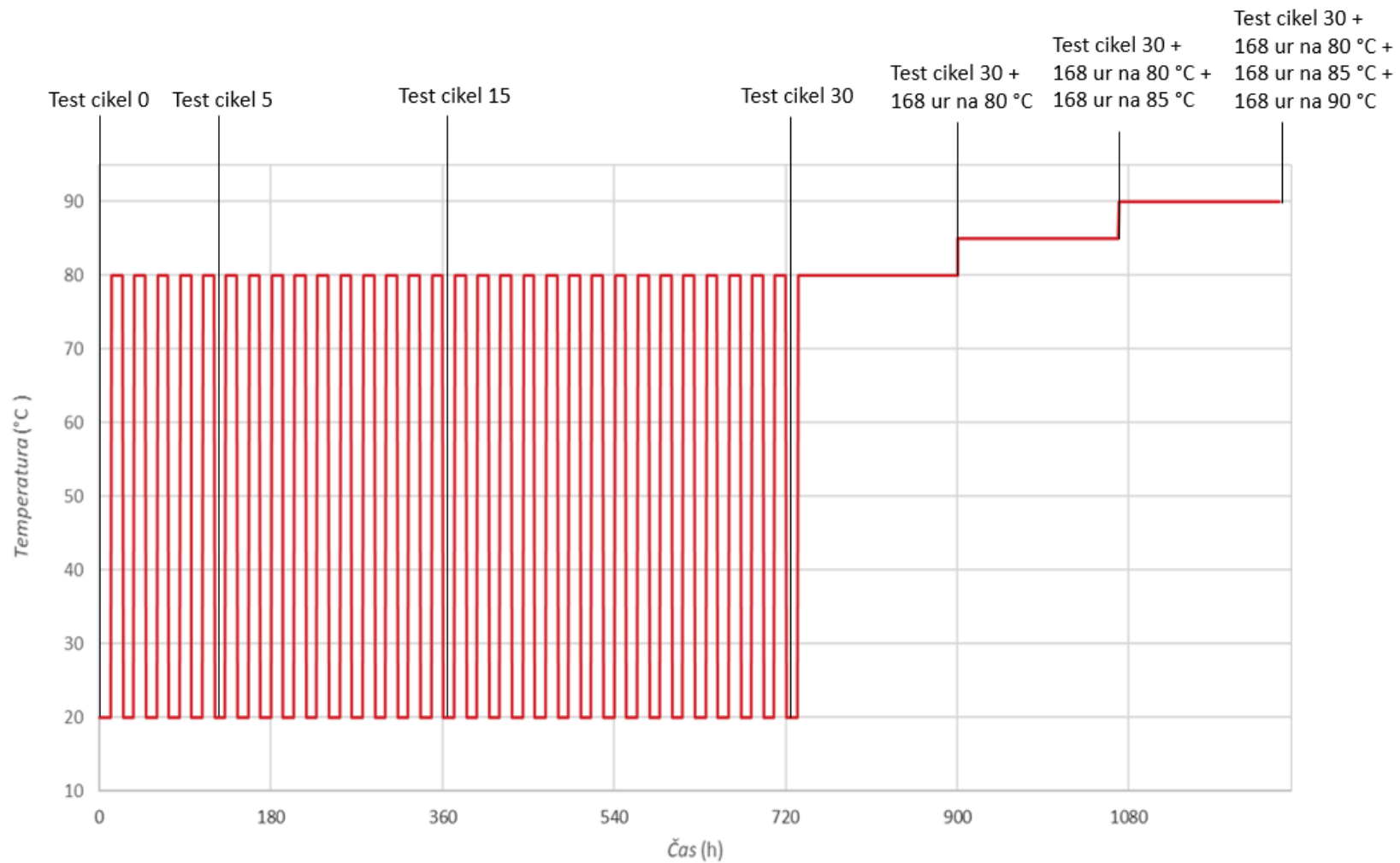


Slika 25: Temperaturni profil začetnega temperaturnega utrujanja EPS-a

S temperaturnim utrujanjem, to je v kombinaciji s tlačnim testom, smo želeli ugotoviti vpliv temperaturnega utrujanja na mehanske lastnosti, in sicer elastičnega modula in tlačne trdnosti. V ta namen smo šestkrat testirali EPS, vseh gostot: po temperaturnem ciklu 5, 15, 30, po naknadnem utrujanju 168 ur pri 80 °C, 168 ur pri 85 °C in 168 ur pri 90 °C. Pred tlačnim testom smo preskušance štiri ure kondicionirali pri sobni temperaturi.

Tlačne teste smo po končanem temperaturnemu utrujanju, to je po 30 ciklih, 168 urah pri 80 °C, 168 urah pri 85 °C in 168 urah pri 90 °C, izvedli še pri povišanih temperaturah (50 °C, 60 °C, 70 °C in 80 °C).

Celotni profil temperaturnega utrujanja in termini jemanja preskušancev za tlačno testiranje so razvidni s slike 26.



Slika 26: Celotni profil temperaturnega utrujanja

3.5 Dimenzijska stabilnost

Dimenzijsko stabilnost toplotno-izolacijskih materialov običajno določimo v skladu s SIST EN 1604, ki definira dimenzijsko stabilnost materiala pri ustrezno predpisani temperaturi in relativni vlagi. Dimenzijsko stabilnost toplotno-izolacijskih materialov običajno določimo v skladu s SIST EN 1604, ki definira dimenzijsko stabilnost materiala pri ustrezno predpisani temperaturi in relativni vlagi. Pri predpisanih pogojih nato material izpostavimo točno določeno časovno obdobje, predpisano v skladu s standardom. Dimenzijsko stabilnost za EPS določimo po 48 urah izpostavljanja pri 70 °C.

V našem primeru smo dimenzijsko stabilnost vseh treh EPS-ih določili po temperaturnem utrujanju po: 30 ciklih, 168 urah pri 80 °C, 168 urah pri 85 °C in 168 urah pri 90 °C. Relativna vlaga v času izpostavljanja je bila 50 %, to je skozi celotno obdobje temperaturnega utrujanja.

Dimenzijsko stabilnost posameznega EPS-vzorca smo določili petim paralelkam naslednjih dimenzij: dolžine (200 ± 1) mm, širine (200 ± 1) mm in originalne debeline (80 mm). Pred temperaturnim izpostavljanjem v komori smo vzorce dva tedna kondicionirali pri standardnih laboratorijskih pogojih. Po kondicioniranju smo pri standardnih laboratorijskih pogojih izmerili dimenzije vzorcev. Vsakemu smo določili začetno dolžino (l_0) na treh različnih mestih ter jih označili: l_{01} , l_{02} , l_{03} . Po enakem postopku smo izmerili tudi začetno širino (b_0) na treh različnih mestih: b_{01} , b_{02} , b_{03} . Debelino vzorca (d_0) smo določili na petih mestih: d_{01} , d_{02} , d_{03} , d_{04} , d_{05} [7,24].

Merjenju začetnih dimenzij je sledila izpostavljenost vzorcev v temperaturno-vlažnostni komori. Po določenem času izpostavljenosti smo jih štiri ure kondicionirali pri standardnih laboratorijskih pogojih. Po končanem postopku smo izmerili dimenzije na istih mestih kot pred izpostavo: končne dolžine l_{11} , l_{12} , l_{13} , širine b_{11} , b_{12} , b_{13} , in debeline d_{11} , d_{12} , d_{13} , d_{14} , d_{15} . Z enačbami: 7, 8, 9 smo izračunali dimenzijske spremembe vzorcev [24]. V enačbah začetne in končne dimenzije je predstavljeno povprečje petih preskušancev. Dimenzijske spremembe so podane v odstotkih.

$$\Delta \varepsilon_l = 100 * \frac{l_1 - l_0}{l_0} \quad (7),$$

$$\Delta \varepsilon_b = 100 * \frac{b_1 - b_0}{b_0} \quad (8),$$

$$\Delta \varepsilon_d = 100 * \frac{d_1 - d_0}{d_0} \quad (9),$$

pri čemer so:

- $\Delta \varepsilon_l$, $\Delta \varepsilon_b$, $\Delta \varepsilon_d$ - sprememba dolžine, širine in debeline vzorca (%),
- l_1 , b_1 , d_1 - končna dolžina, širina in debelina povprečja petih preskušancev po izpostavi (mm),

- l_0 , b_0 , d_0 - začetna dolžina, širina in debelina povprečja petih preskušanev pred izpostavo v komori (mm).

3.6 Vrstična elektronska mikroskopija (SEM)

Mikrostrukturo EPS-a smo preučevali z vrstičnim elektronskim mikroskopom JEOL JSM-IT500 (slika 27). Snemali smo v grobem vakumu od 22 Pa do 40 Pa, delovna razdalja je bila 11 mm, pospeševalna napetost pa 10 kV. Za detekcijo smo uporabili sekundarne elektrone. Prek emitiranih elektronov smo z detektorjem odbitih elektronov pridobili stereo mikroskopsko sliko (kratica BED-S), v povečavi od 50-krat do 1000-krat.



Slika 27: Vrstični elektronski mikroskop JEOL JSM-IT500 [25]

Vzorci smo pred meritvijo napršili s tanko plastjo (30 mg) zlata z naprševalnim sistemom Quorum, Q150T Plus, prikazanim na sliki 28. S tem smo preprečili nabijanje površine vzorcev in pridobili boljše ločljivost posnetkov, kar je omogočilo lažjo interpretacijo rezultatov.



Slika 28: Naprševalni sistem Quorum, Q150T Plus [26]

4 REZULTATI IN DISKUSIJA

Vse meritve gostote, mehanskih lastnosti in dimenzijske stabilnosti smo naredili na treh ali petih paralelkah ter izračunali srednje vrednosti in standardne deviacije. Vrednosti, podane v tabelah in predstavljene na slikah, so srednje vrednosti treh oziroma petih preskušancev (koliko paralelk smo izmerili pri posameznem testu je označeno v tabelah s črko n).

4.1 Gostota

V tabeli 10 so podane srednje vrednosti izračunanih gostot. Kot lahko vidimo iz tabele, je vrednost gostote za EPS 70 enaka $13,4 \text{ kg/m}^3$. EPS 100 ima gostoto 19 kg/m^3 , EPS 200 pa $26,9 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 10: Gostote EPS

mat.	n	m (g)	V (dm ³)	ρ (kg/m ³)
EPS 70	5	$52,7 \pm 0,5$	$3,97 \pm 0,03$	$13,4 \pm 0,1$
EPS 100	5	$61,1 \pm 1,2$	$3,98 \pm 0,02$	$19,0 \pm 0,4$
EPS 200	5	$84,9 \pm 0,9$	$3,97 \pm 0,02$	$26,9 \pm 0,3$

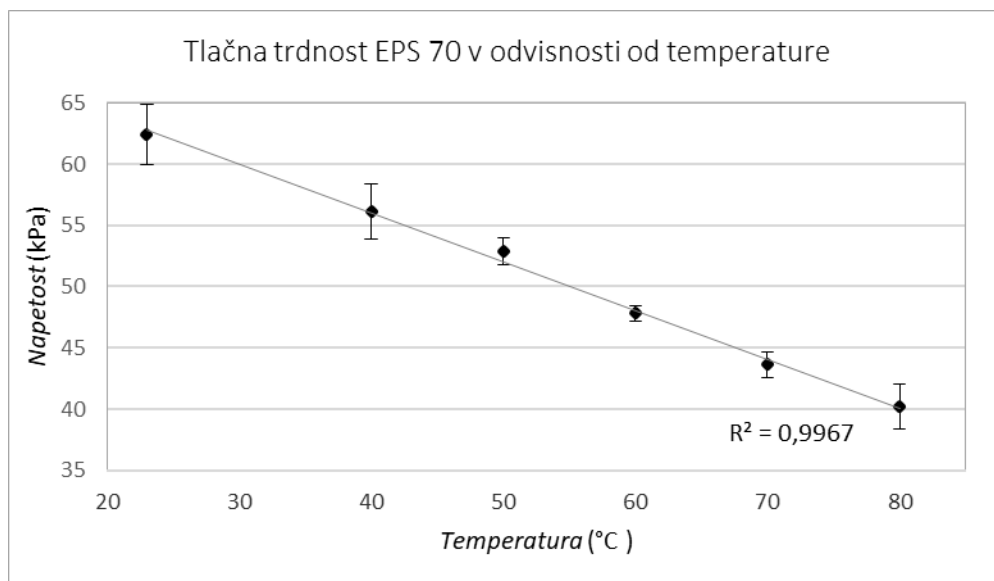
4.2 Tlačni test pri povišani temperaturi

Tabela 11 prikazuje srednje vrednosti tlačne napetosti pri 10 % raztežku oziroma tlačne trdnosti EPS 70. Pri 23 °C znaša tlačna trdnost $64,4 \text{ kPa}$. Pri 40 °C pade vrednost za 9,7 %, to je na $58,1 \text{ kPa}$, pri 50 °C je trdnost $52,9 \text{ kPa}$, pri 60 °C $47,8 \text{ kPa}$, pri 70 °C $43,6 \text{ kPa}$ in pri 80 °C $40,2 \text{ kPa}$. Padec tlačne trdnosti pri 80 °C znaša 37,6 % glede na referenčno vrednost trdnosti, izmerjene pri 23 °C.

Tabela 11: Tlačna trdnost EPS-a 70 v odvisnosti od temperature

Temperatura (°C)	n	σ_{10} (kPa)	Sprememba σ_{10} (%)
23	3	$64,4 \pm 0,5$	Ref
40	3	$58,1 \pm 0,7$	9,7
50	3	$52,9 \pm 1,1$	17,9
60	3	$47,8 \pm 0,6$	25,7
70	3	$43,6 \pm 1,1$	32,3
80	3	$40,2 \pm 1,9$	37,6

Grafično je padanje tlačne trdnosti EPS 70 predstavljeno na sliki 29. S slike lahko razberemo linearno odvisnost padca tlačne trdnosti v odvisnosti od temperature. Odstopanje od premice je zanemarljivo majhno.



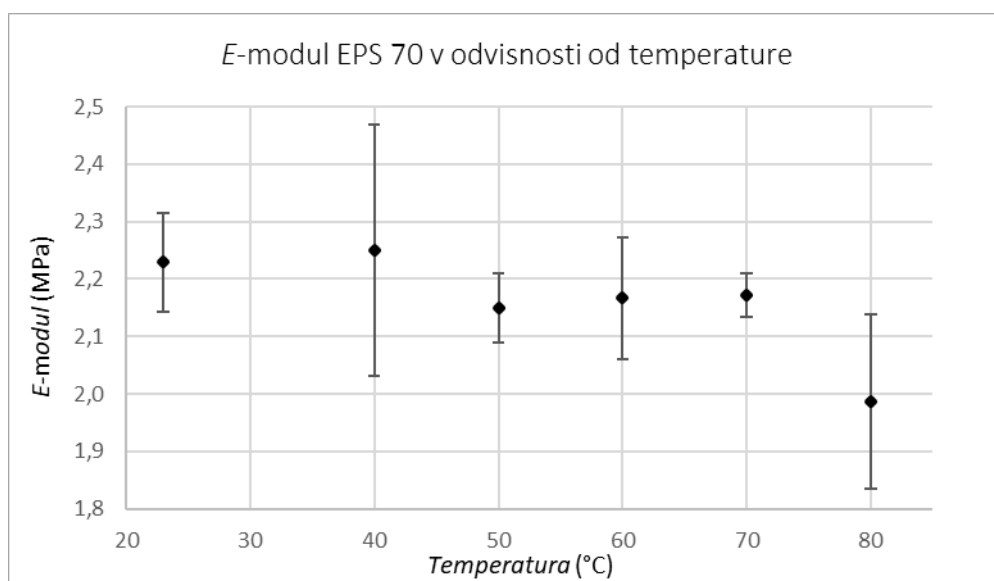
Slika 29: Tlačna trdnost EPS-a 70 v odvisnosti od temperature

V nasprotju s tlačno trdnostjo EPS-a 70 se E -modul pri različnih temperaturah ni dosti spreminjal. Iz tabele 12 lahko razberemo, da je vrednost E -modula pri 23 °C enaka 2,23 MPa. S povišanjem temperature do 70 °C pade vrednost le za približno 3 %. Pri 80 °C lahko opazimo večji padec, izmerjena vrednost modula je 1,99 MPa. Upoštevati pa moramo tudi veliko standardno deviacijo.

Tabela 12: E -modul EPS 70 v odvisnosti od temperature

Temperatura (°C)	n	E -modul (MPa)	Sprememba E -modula (%)
23	3	2,23 ± 0,09	Ref
40	3	2,25 ± 0,22	-0,9
50	3	2,15 ± 0,06	3,6
60	3	2,17 ± 0,11	2,8
70	3	2,17 ± 0,04	2,6
80	3	1,99 ± 0,15	10,9

Grafično je padanje E -modula predstavljeno na sliki 30. Iz nje lahko razberemo, da ima povišana temperatura zanemarljiv vpliv nanj. Večji padec je viden zgolj pri 80 °C.



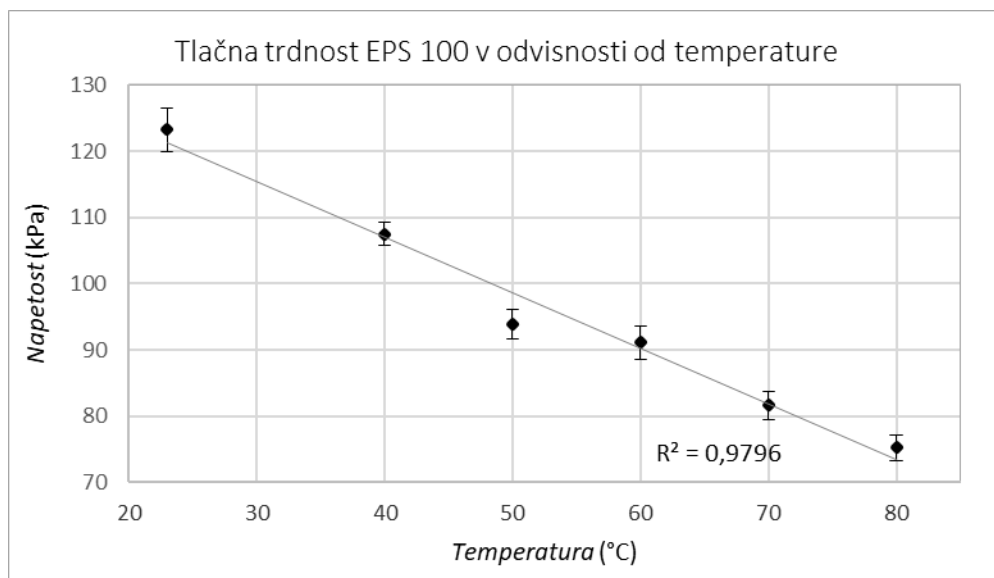
Slika 30: E-modul EPS 70 v odvisnosti od temperature

V tabeli 13 so predstavljene povprečne vrednosti tlačne trdnosti EPS 100 v odvisnosti od temperature. Iz tabele lahko razberemo, da s povišanjem temperature, prav tako kot pri EPS 70, dobimo manjšo tlačno trdnost materiala. Tlačna trdnost pri 23 °C znaša 123,3 kPa. Že pri 40 °C pade na 107,5 kPa, kar predstavlja 12,8 % padec glede na izmerjeno vrednost tlačne trdnosti pri 23 °C. Vrednost tlačne napetosti pri 10 % raztezu in pri 50 °C pade na 93,8 kPa, pri 60 °C na 91,1 kPa, pri 70 °C na 81,6 kPa in pri 80 °C na 75,3 kPa, kar je 38,9 % manj kot pri sobni temperaturi.

Tabela 13: Tlačne lastnosti EPS 100 v odvisnosti od temperature

Temperatura (°C)	<i>n</i>	σ_{10} (kPa)	Sprememba σ_{10} (%)
23	3	123,3 ± 3,3	Ref
40	3	107,5 ± 1,8	12,8
50	3	93,8 ± 2,2	23,9
60	3	91,1 ± 2,5	26,1
70	3	81,6 ± 2,1	33,8
80	3	75,3 ± 1,9	38,9

Grafično je padanje tlačne trdnosti s povišanjem temperature razvidno s slike 31. Enako kot pri EPS 70 gre za linearno odvisnost.



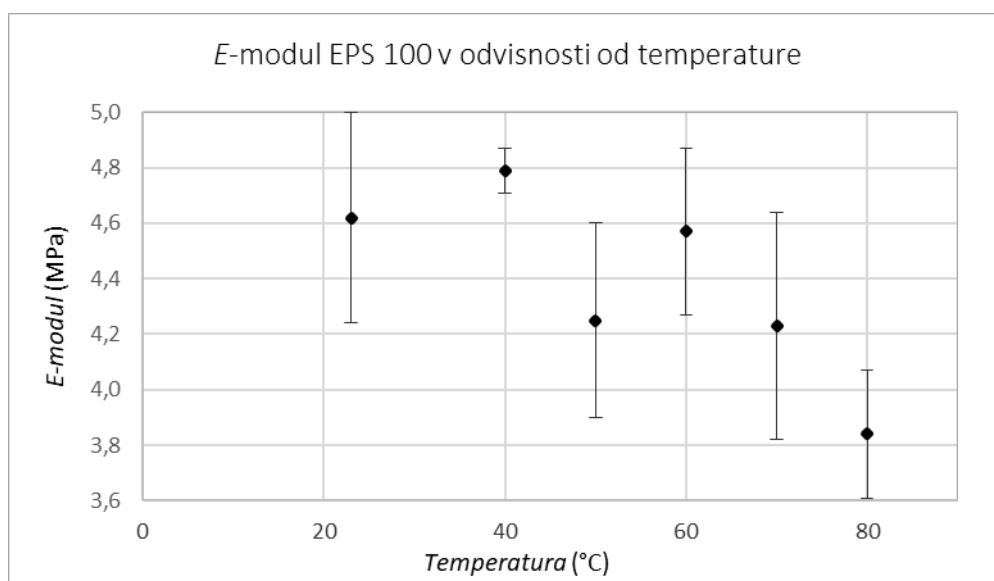
Slika 31: Tlačna trdnost EPS 100 v odvisnosti od temperature

Manjši padec vrednosti E -modula za material EPS 100 s povišano temperaturo lahko vidimo v tabeli 14. V nasprotju s padcem tlačne trdnosti je padec modula pri 80 °C zgolj za 16,9 %.

Tabela 14: E -modul EPS 100

Temperatura (°C)	n	E -modul (MPa)	Sprememba E -modula (%)
23	3	4,62 ± 0,38	Ref
40	3	4,79 ± 0,08	-3,7
50	3	4,26 ± 0,35	8,0
60	3	4,59 ± 0,34	1,1
70	3	4,22 ± 0,41	8,4
80	3	3,83 ± 0,23	16,9

Padanje E -modula za ta material je grafično razvidno s slike 32. S slike lahko razberemo, da se modul do temperature 70 °C ni dosti spreminjal, padec modula pri 70 °C je 8,4 %. Pri temperaturi 80 °C je padec večji.



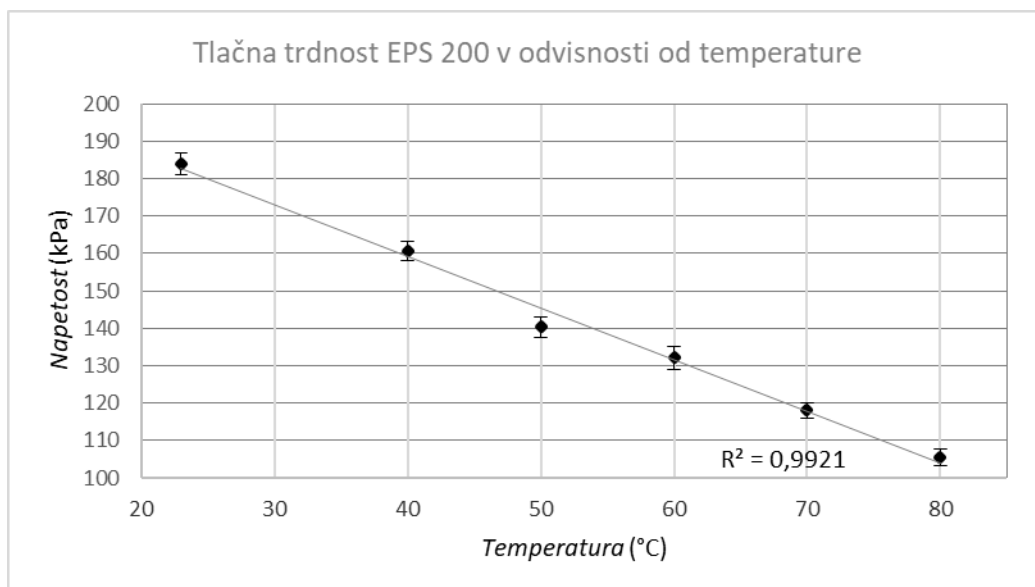
Slika 32: E-modul EPS 100 v odvisnosti od temperature

V tabeli 15 pa so predstavljene povprečne vrednosti tlačne trdnosti v odvisnosti od temperature, in sicer za material EPS 200. Tlačna trdnost EPS 200 pri 23 °C znaša 184 kPa. Z višanjem temperature, prav tako kot pri materialu EPS 100 in EPS 70, pada tlačna trdnost. Pri 40 °C pade za 13 %, to je na 160,7 kPa, pri 50 °C in 60 °C padeta vrednosti za 24 %, to je na 140,3 kPa oziroma za 28,5 %, in sicer na 132 kPa. Največji padec pa se zgodi pri 80 °C, kjer pade vrednost za 42,8 %, to je na 105,6 kPa.

Tabela 15: Tlačne lastnosti EPS 200 v odvisnosti od temperature

Temperatura (°C)	<i>n</i>	σ_{10} (kPa)	Sprememba σ_{10} (%)
23	3	184,0 ± 2,9	Ref
40	3	160,7 ± 2,5	13,0
50	3	140,3 ± 2,7	24,0
60	3	132,0 ± 3,1	28,5
70	3	118,0 ± 2,0	36,1
80	3	105,6 ± 2,2	42,8

Grafično je padanje tlačne trdnosti EPS 200 z višanjem temperature razvidno s slike 33. Tudi tu gre za linearno odvisnost.



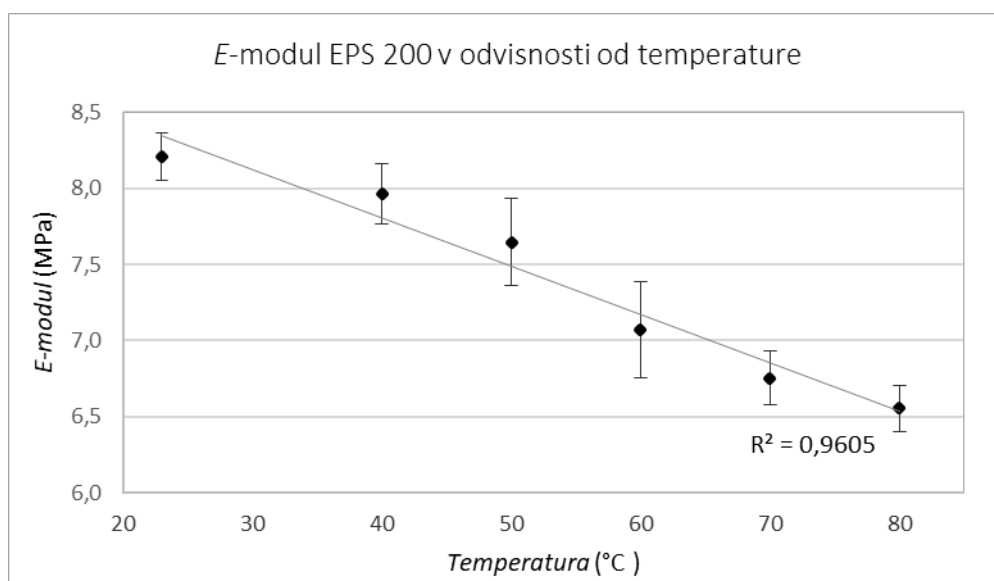
Slika 33: Tlačna trdnost EPS 200 v odvisnosti od temperature

Tabela 16 prikazuje padanje *E*-modula EPS 200 v odvisnosti od temperature. Podobno kot pri padcu tlačne trdnosti modul pada linearno z višanjem temperature. Pri temperaturi 23 °C znaša modul 8,24 MPa. Pri temperaturi 40 °C smo izmerili vrednost modula 7,94 MPa, pri 50 °C 7,63 MPa, pri 60 °C 7,15 MPa, pri 70 °C pa 6,76 MPa. Največji padec smo izmerili pri 80 °C, in sicer 6,64 MPa.

Tabela 16: *E*-modul EPS 200 v odvisnosti od temperature

Temperatura (°C)	<i>n</i>	<i>E</i> -modul (MPa)	Sprememba <i>E</i> -modula (%)
23	3	8,24 ± 0,16	Ref
40	3	7,94 ± 0,20	3,0
50	3	7,63 ± 0,18	6,8
60	3	7,15 ± 0,16	13,9
70	3	6,76 ± 0,55	17,1
80	3	6,64 ± 0,16	20,1

Grafično lahko razberemo padanje *E*-modula materiala EPS 200 z višanjem temperature s slike 34. Iz grafičnega prikaza lahko opazimo linearno odvisnost padca *E*-modula s povišanjem temperature. Za razliko od EPS 70 in EPS 100 je linearna odvisnost jasno vidna.



Slika 34: E-modul v odvisnosti od temperature

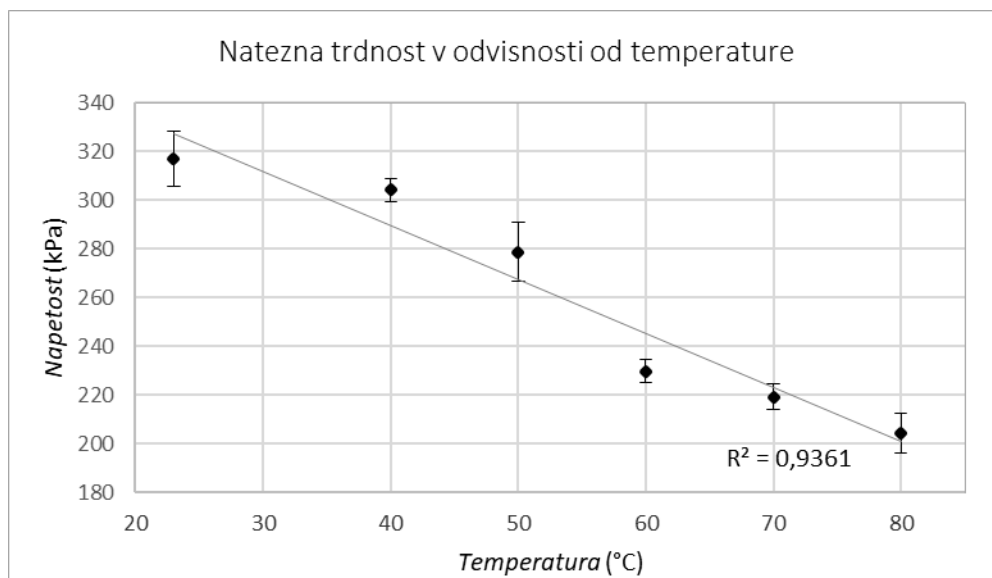
4.3 Natezni test pri povišani temperaturi

Rezultati nateznega testa za EPS 200 so predstavljeni v tabeli 17. Iz nje lahko razberemo, da natezna trdnost, ki pri 23 °C znaša 316 kPa, s povišanjem temperature pada. Pri 40 °C pade trdnost za 4 %, to je na 304 kPa, pri 50 °C pa je padec trdnosti za 12 %. Večji padec trdnosti: 27,5 %, 30,8 % in 35,6 % rezultira pri testih pri temperaturah: 60 °C, 70 °C, 80 °C.

Tabela 17: Natezna trdnost EPS 200 v odvisnosti od temperature

Temperatura (°C)	<i>n</i>	σ_{mt} (kPa)	Sprememba σ_{mt} (%)
23	3	316,9 ± 11,3	/
40	3	304,3 ± 4,8	3,98
50	3	278,8 ± 1,2	12,0
60	3	229,8 ± 4,6	27,5
70	3	219,3 ± 5,3	30,8
80	3	204,2 ± 8,1	35,6

Slika 35 prikazuje padanje natezne trdnosti EPS 200 v odvisnosti od temperature. Iz grafičnega prikaza lahko razberemo, da je nekoliko večje odstopanje od linearnosti pri tem testu.



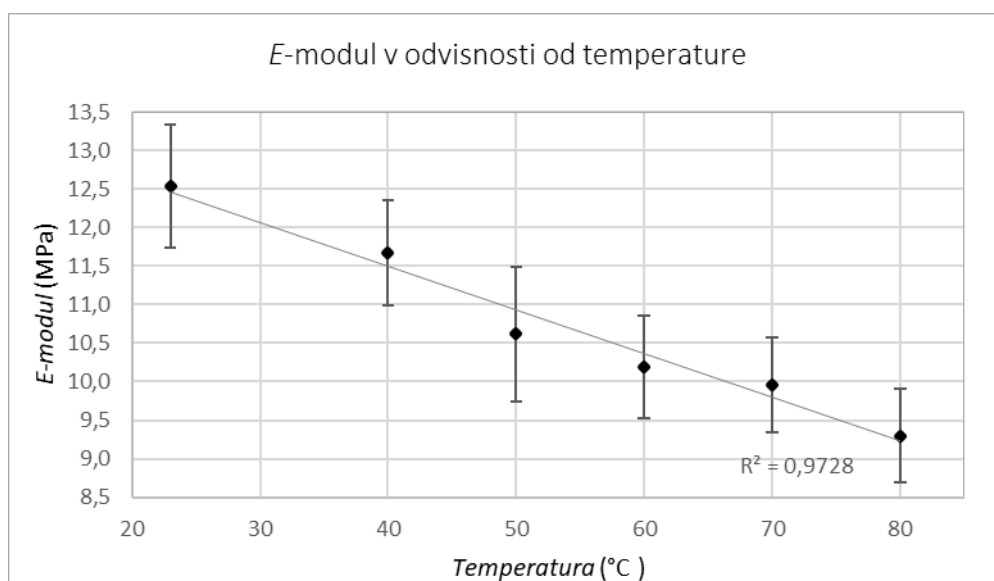
Slika 35: Natezna trdnost EPS 200 v odvisnosti od temperature

V tabeli 18 je predstavljeno padanje *E*-modula EPS 200 v odvisnosti od temperature. *E*-modul pri 23 °C znaša 12,51 MPa, nato pada do vrednosti 9,32 MPa, ki jo material doseže pri 80 °C.

Tabela 18: *E*-modul EPS 200 v odvisnosti od temperature

Temperatura (°C)	<i>n</i>	<i>E</i> -modul (MPa)	Sprememba <i>E</i> -modula (%)
23	3	12,51 ± 1,21	Ref
40	3	11,65 ± 0,72	6,8
50	3	10,58 ± 0,94	15,3
60	3	10,23 ± 0,72	18,7
70	3	9,98 ± 0,57	20,6
80	3	9,32 ± 0,65	25,8

Grafično je padanje *E*-modula EPS 200 razvidno s slike 36, v kateri lahko razberemo linearno odvisnost padca modula v odvisnosti od temperature. Standardne deviacije so pri teh vrednostih dokaj velike.



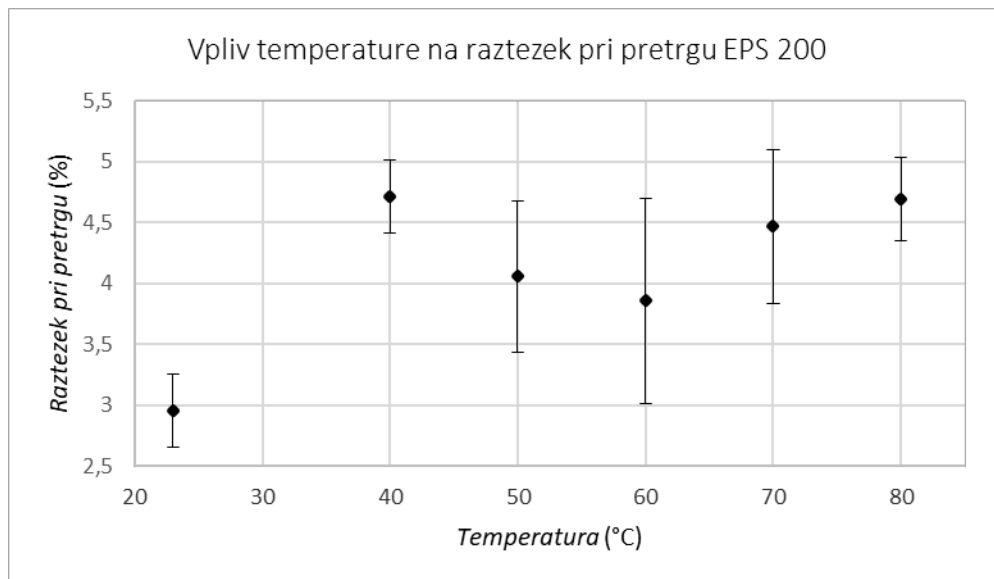
Slika 36: E-modul EPS 200 v odvisnosti od temperature

Tabela 19 predstavlja spremembe raztezka pri pretrgu v odvisnosti od temperature. Raztezek pri pretrgu, in sicer pri 23 °C, znaša 2,96 %. Pri višjih temperaturah je raztezek pri pretrgu večji, vendar nismo našli nobene odvisnosti povečanja raztezka s temperaturo. Pri vseh izmerjenih povišanih temperaturah je višji in se giblje med 3,86 % in 4,71 %.

Tabela 19: Raztezek pri pretrgu EPS 200 v odvisnosti od temperature

Temperatura (°C)	<i>n</i>	ϵ_b (%)	Sprememba ϵ_b (%)
23	3	2,96 ± 0,30	Ref
40	3	4,71 ± 0,31	59,1
50	3	4,06 ± 0,62	37,2
60	3	3,86 ± 0,84	30,4
70	3	4,47 ± 0,63	51,0
80	3	4,69 ± 0,34	58,4

Grafično je raztezek pri pretrgu za EPS 200 pri posameznih temperaturah razviden tudi s slike 37. Iz nje lahko vidimo, da so vrednosti raztezka, izmerjene pri višjih temperaturah, višje od vrednosti, izmerjene pri 23 °C. Prav tako lahko iz grafičnega prikaza razberemo razmeroma veliko standardno deviacijo.

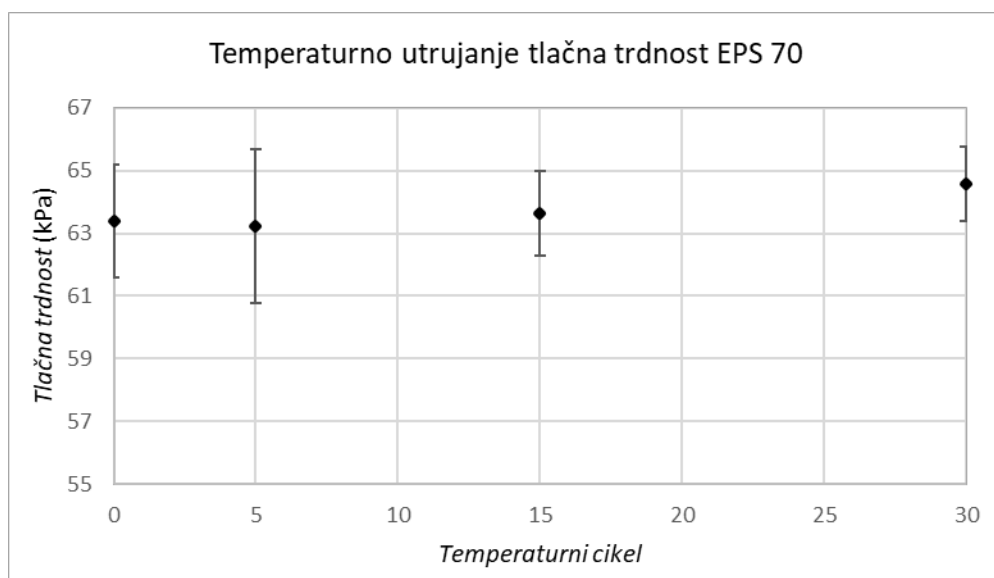


Slika 37: Vpliv temperature na raztezek pri pretrgu EPS 200

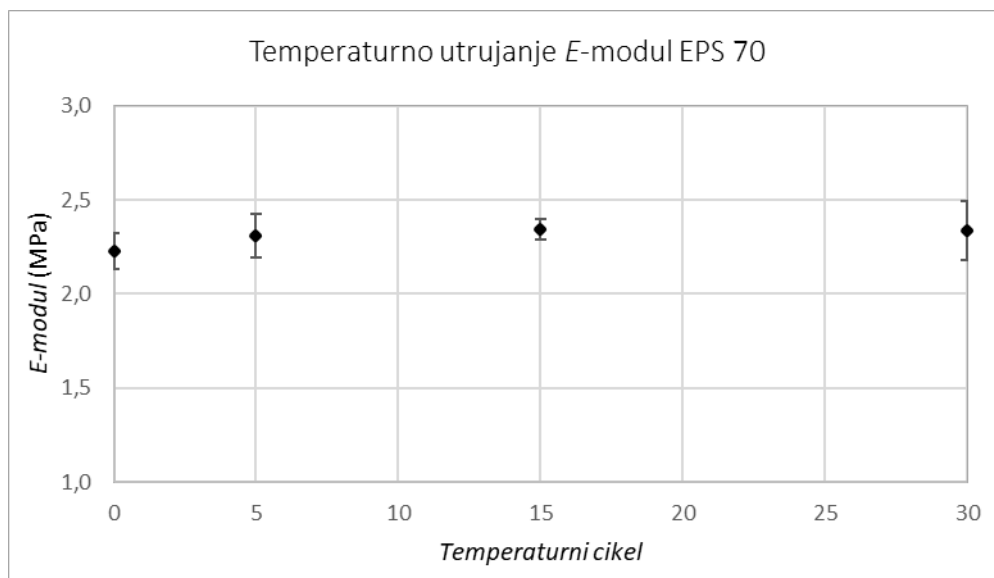
4.4 Tlačni test po temperaturnem utrujanju

Grafično so rezultati tlačnega testiranja po temperaturnem utrujanju EPS 70 predstavljeni na sliki 38 in na sliki 39.

Slika 38 prikazuje spreminjanje srednje vrednosti tlačne trdnosti, slika 39 pa E -modula, in sicer v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov, ki jim je bil EPS podvržen. S slik lahko razberemo, da tlačna trdnost, kot tudi E -modul, ostaneta nespremenjena s povečevanjem števila temperaturnih ciklov.

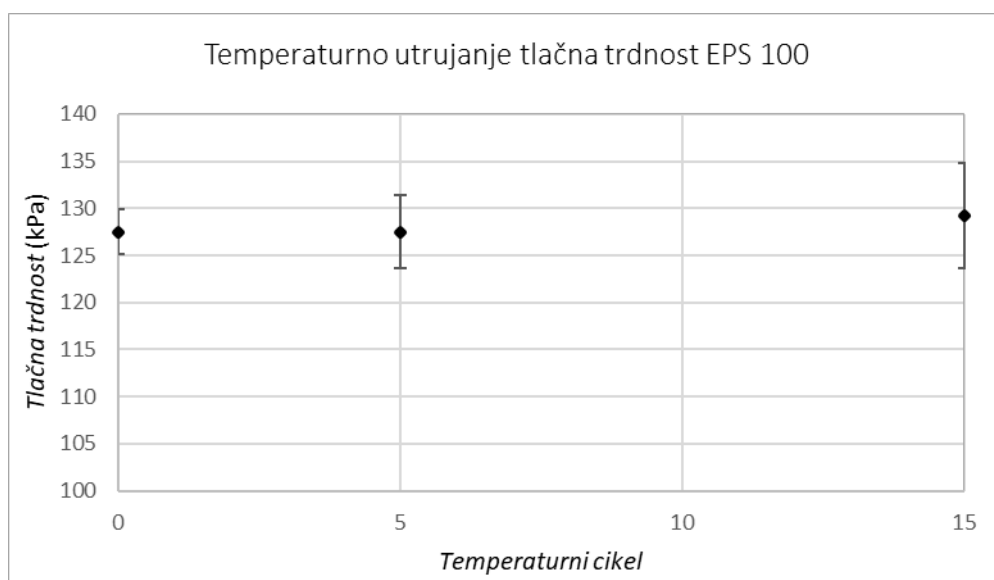


Slika 38: Tlačna trdnost EPS 70 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov

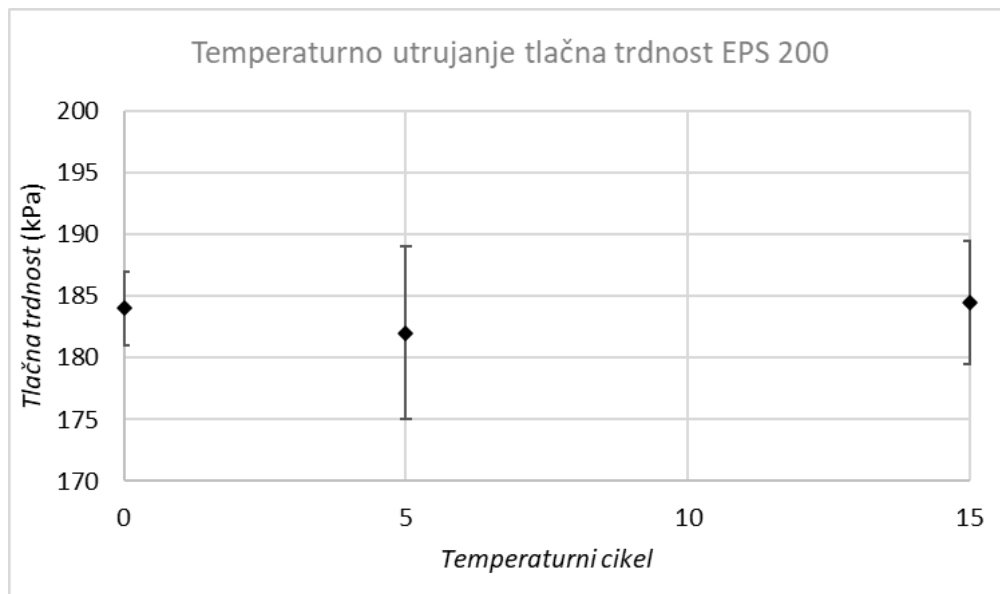


Slika 39: E-modul EPS 70 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov

Podoben trend vpliva temperaturnega utrujanja materiala na mehanske lastnosti lahko opazimo tudi pri drugih dveh testiranih materialih, EPS 100 in EPS 200. Grafično je vpliv temperaturnega utrujanja na tlačno trdnost za material EPS 100 predstavljen na sliki 40, za EPS 200 pa na sliki 41. Tlačna trdnost je po 15-ih temperaturnih ciklih ostala nespremenjena. Srednja vrednost tlačne trdnosti pred temperaturnim utrujanjem EPS 100 znaša 127,5 kPa, po 15-ih temperaturnih ciklih pa 129,25 kPa, medtem ko sta tlačni trdnosti EPS 200 pred utrujanjem in po njem 184 kPa in 183,3 kPa.

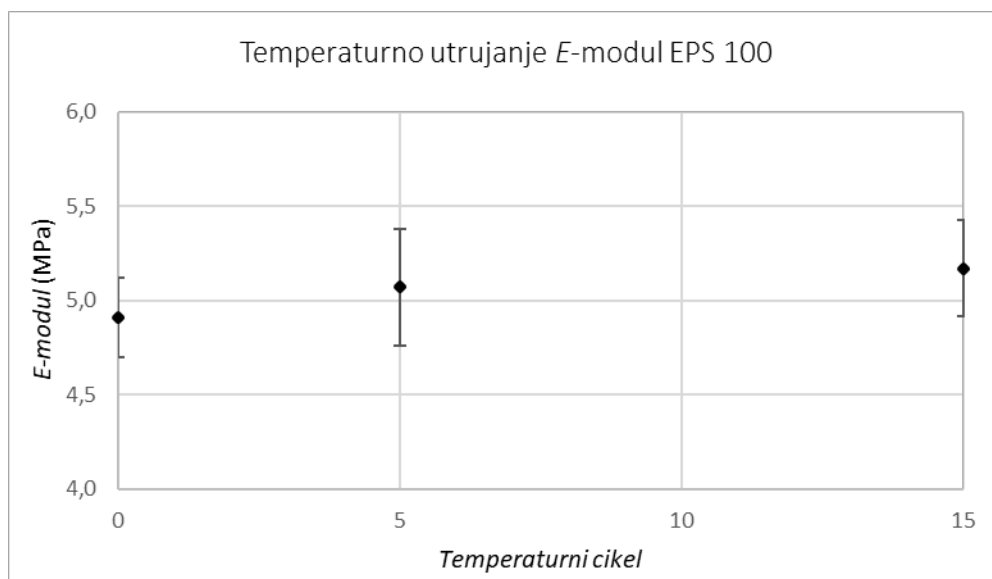


Slika 40: Tlačna trdnost EPS 100 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov

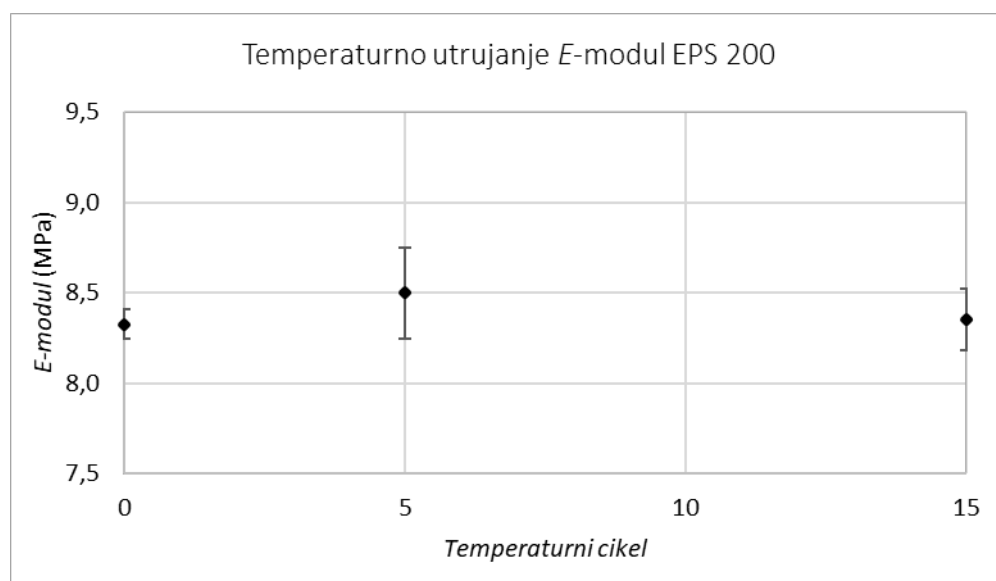


Slika 41: Tlačna trdnost EPS 200 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov

Zanemarljiv vpliv temperaturnega utrujanja na E -modul smo ugotovili tudi pri materialih: EPS 100 in EPS 200. Grafično je E -modul, v odvisnosti od temperaturnih ciklov za EPS 100, predstavljen na sliki 42, za EPS 200 pa na sliki 43.



Slika 42: E-modul EPS 100 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov



Slika 43: E-modul EPS 200 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov

Za določitev vpliva dodatnega utrujanja pri povišani temperaturi 80 °C smo po 30 temperaturnih ciklih najprej izvedli temperaturno utrujanje 168 ur pri 80 °C. Rezultati so zbrani v tabeli 20, kjer lahko vidimo izračunane srednje vrednosti tlačne trdnosti ter E -modula. Iz tabele lahko razberemo, da so vrednosti tlačne trdnosti in tudi elastičnega modula povsem primerljive tistim, izmerjenim pri 23 °C (σ_{10ref} in E_{ref}). Odstopa zgolj vrednost tlačne trdnosti materiala EPS 100. Ta se je v tem primeru celo povečala, in sicer na 133,4 kPa, vrednost E -modula pa na 5,06 MPa.

Tabela 20: Tlačni test EPS po različnih fazah dodatnega temperaturnega utrujanja

Material	n	Izpostavljenost pred testom - dodatno utrujanje (po 30 ciklih med 20 °C in 80 °C)	σ_{10} (kPa)	E -modul (MPa)	σ_{10ref} (kPa)	E_{ref} (MPa)
EPS 70	3	168 ur pri 80 °C	63,6 ± 2,0	2,38 ± 0,15	64,4 ± 0,5	2,23 ± 0,09
		168 ur pri 80 °C + 168 ur pri 85 °C	63,8 ± 0,9	2,22 ± 0,32		
		168 ur pri 80 °C + 168 ur pri 85 °C + 168 ur pri 90 °C	64,7 ± 0,7	2,13 ± 0,31		
EPS 100	3	168 ur pri 80 °C	133,4 ± 3,0	5,06 ± 0,44	123,3 ± 3,3	4,62 ± 0,38
		168 ur pri 80 °C + 168 ur pri 85 °C	131,3 ± 4,2	4,92 ± 0,73		
		168 ur pri 80 °C + 168 ur pri 85 °C + 168 ur pri 90 °C	132,0 ± 1,9	5,04 ± 0,55		
EPS 200	3	168 ur pri 80 °C	184,2 ± 3,7	7,80 ± 0,80	184,0 ± 2,9	8,24 ± 0,16
		168 ur pri 80 °C + 168 ur pri 85 °C	185,7 ± 3,5	8,02 ± 0,37		
		168 ur pri 80 °C + 168 ur pri 85 °C + 168 ur pri 90 °C	186,9 ± 2,8	8,23 ± 0,52		

Po 30 temperaturnih ciklih in temperaturnem izpostavljanju 168 ur pri 80 °C smo vzorce še dodatno izpostavljali 168 ur pri 85 °C in naknadno še 168 ur pri 90 °C. Iz tabele 20 lahko razberemo, da so spremembe tlačnih lastnosti zanemarljive in ne govorimo o poslabšanju lastnosti. Pri vseh materialih so vrednosti tlačne trdnosti in tlačnega modula primerljive vrednostim pred izpostavo. Lahko zaključimo, da tudi temperaturno izpostavljanje do 90 °C nima negativnega vpliva na tlačne lastnosti EPS.

4.5 Dimenzijska stabilnost

V nasprotju z zanemarljivim vplivom temperaturnega utrujanja materiala na tlačne mehanske lastnosti smo po temperaturni izpostavljenosti že na videz opazili spremembo dimenzij vzorcev. Meritve dimenzij pred temperaturno izpostavljenostjo in po njej, to je s 30 temperaturnim ciklom, 168 uram pri 80 °C, 168 uram pri 85 °C in 168 uram pri 90 °C, so zgolj potrdile našo predpostavko. Dimenzije so se namreč spremenile do 9 mm glede na širino in dolžino preskušancev, ki je bila pri tem testu 200 mm. Vsi preskušanci so se z utrujanjem skrčili. Rezultati dimenzijskih sprememb so predstavljeni v tabeli 21. Iz nje razberemo, da so se dimenzije največ spremenile pri EPS 70, in sicer 5,3 % po dolžini vzorca, 4,7 % po širini in 4,2 % po debelini vzorca. Podobno so se vzorci skrčili tudi pri materialu EPS 100, kjer smo zabeležili 4,7 %, 4,5 % in 4,9 % spremembo dimenzij po dolžini, širini in debelini. Pri EPS 200 smo izmerili najmanjšo spremembo dimenzij, in sicer 2,3 %, 2,4 % in 2,3 % po dolžini, širini in debelini vzorca.

Tabela 21: Rezultati testa dimenzijske stabilnosti po temperaturnem utrujanju po 30 ciklih, 168 urah pri 80 °C, 168 urah pri 85 °C in 168 urah pri 90 °C

mat.	n	Δl (%)	Δb (%)	Δd (%)
EPS 70	5	5,3 ± 0,23	4,7 ± 0,32	4,2 ± 0,48
EPS 100	5	4,7 ± 0,26	4,5 ± 0,17	4,9 ± 0,18
EPS 200	5	2,4 ± 0,12	2,3 ± 0,16	2,3 ± 0,10

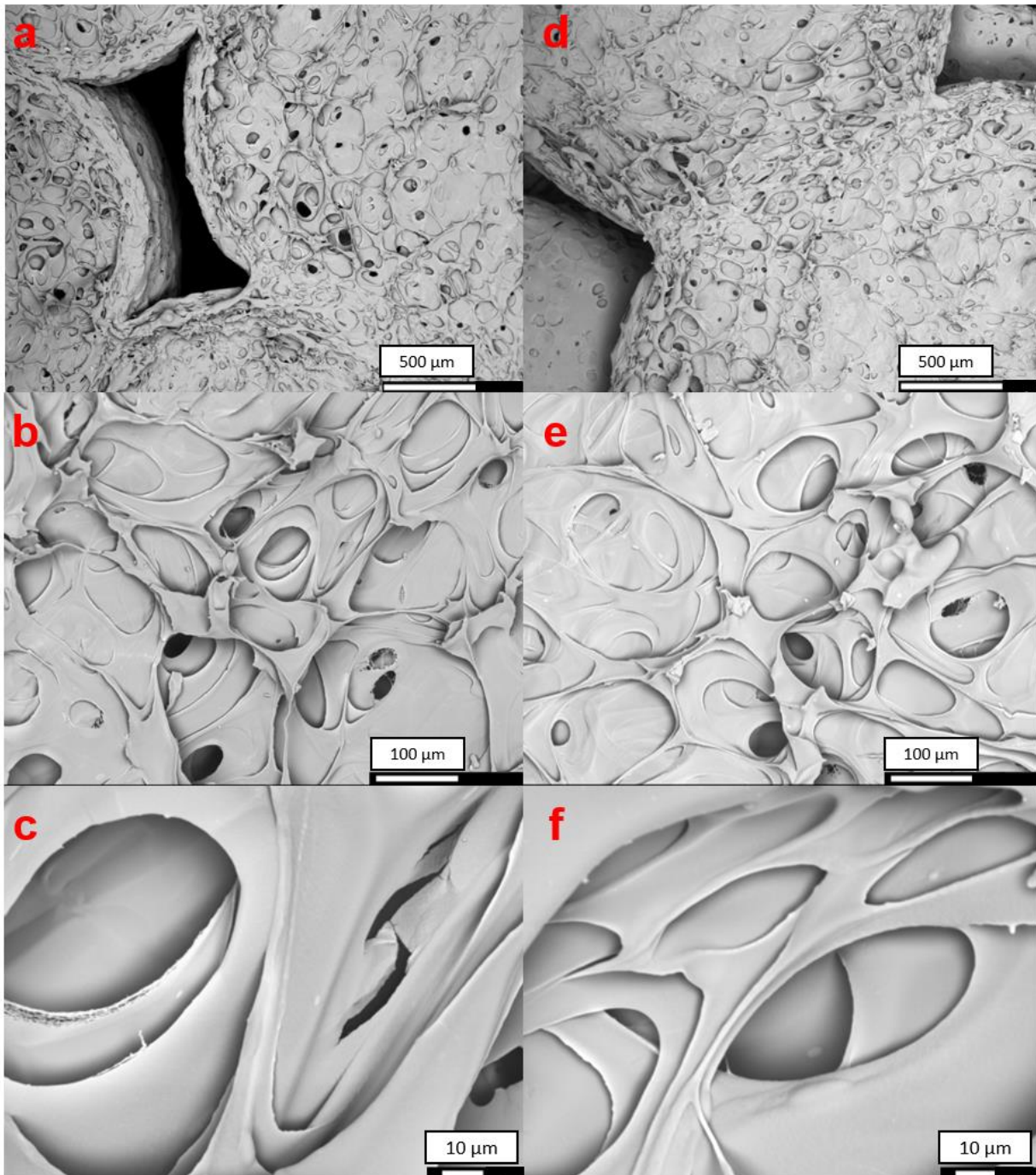
Slika 44 prikazuje fotografijo dveh preskušancev EPS 70, spodnji je neizpostavljen, zgornji pa po temperaturnem utrujanju po 30 ciklih, 168 urah pri 80 °C, 168 urah pri 85 °C in 168 urah pri 90 °C. S slike lahko vidimo, da ima zgornji vzorec (izpostavljen) veliko manjše dimenzije kot spodnji (neizpostavljen). Posledica temperaturnega utrujanja se je odrazila na spremembi dolžine, širine in tudi debeline vzorca.



Slika 44: Dimenzijske spremembe EPS 70 po temperaturnem utrujanju, to je po 30 ciklih, 168 urah pri 80 °C, 168 urah pri 85 °C in 168 urah pri 90 °C

4.6 Vrstična elektronska mikroskopija (SEM)

Slika 45 prikazuje SEM-posnetke EPS 70. Na posnetkih 45a-c je predstavljen nestaran EPS 70, na posnetkih 45d-f pa po temperaturnem utrujanju, to je po 30 ciklih, 168 urah pri 80 °C, 168 urah pri 85 °C in 168 urah pri 90 °C. Med posnetki ne vidimo bistvenih sprememb med obema vzorcema. Na posnetkih 45a in 45d, ki sta bila posneta z najmanjšo povečavo razlike, vidimo predvsem v zlivanju kroglic. Iz posnetka 45d lahko vidimo, da se kroglici med seboj boljše zlivata, kar lahko pojasnimo z njihovim delnim taljenjem. S posnetkov 45e,f (EPS po utrujanju) vidimo, da so pore/praznine nekoliko manj izrazite, saj so nekoliko bolj zalite kot na posnetkih 45b,c (EPS pred utrujanjem).



Slika 45: SEM-posnetki neutrujanega EPS 70: a-c in temperaturno utrujanega EPS 70: d-f, to je pri različnih povečavah

5 SKLEP

V magistrskem delu smo preučevali vpliv povišane temperature in temperaturnega utrujanja na dimenzijsko stabilnost, mikrostrukturo in izbrane mehanske lastnosti EPS-a, različnih gostot, in sicer na tlačno trdnost, natezno trdnost, *E*-modul in raztezek pri pretrgu. Predpostavili smo šest hipotez, od katerih smo štiri potrdili, dve pa zavrgli, kot sledi:

1. Z višanjem temperature se je tlačna trdnost pri vseh vzorcih linearno zmanjševala. Največ se je zmanjšala pri: EPS 200, s 184 kPa pri sobni *T* na 105,6 kPa pri 80 °C, kar predstavlja 42,8 % zmanjšanje; pri EPS 100 se je vrednost tlačne trdnosti zmanjšala za 38,9 % in pri EPS 70 za 37,6 %, ko smo ju segreli do 80 °C. Podobno kot tlačna trdnost se je z višanjem temperature zmanjševal tudi *E*-modul. Pri EPS 200 je padec *E*-modula sorazmeren s padcem temperature in pada linearno. Pri 80 °C se je zmanjšal za 20,1 % glede na vrednost pri sobni temperaturi. Pri EPS 70 in EPS 100 se je vrednost modula zmanjševala nelinearno. Znatno padec modula smo pri teh dveh tipih EPS zaznali šele pri 80 °C, in sicer 10,9 % pri EPS 70 in 16,9 % pri EPS 100. **S to ugotovitvijo potrjujemo našo prvo zastavljeno hipotezo, da se bosta z višanjem temperature zmanjševala tlačna trdnost in *E*-modul.**
2. Pri nateznem testu se je natezna trdnost EPS 200 zmanjševala linearno s temperaturo. Največ se je vrednost zmanjšala pri 80 °C, in sicer s 316,9 kPa pri sobni temperaturi na 204,2 kPa. Izmerjena vrednost predstavlja 35,6 % zmanjšanje, ki je povsem primerljivo zmanjšanju tlačne trdnosti pri tej temperaturi. Podobno, kot je padala natezna trdnost, je linearno s temperaturo padal tudi *E*-modul. Največ je padel pri 80 °C, in sicer za 25,8 % glede na vrednost pri sobni temperaturi. **S to ugotovitvijo potrjujemo tudi hipotezo o padcu natezne trdnosti in *E*-modula z višanjem temperature.**
3. Pri temperaturnem utrujanju EPS-a smo ugotovili, da ta nima vpliva na mehanske lastnosti. Vrednosti tlačne trdnosti in tlačnega modula sta se po 5, 15 in 30 temperaturnem ciklu in 168-urni izpostavi pri temperaturi 80 °C, 168-urni izpostavi pri 85 °C in 168-urni izpostavi pri 90 °C zanemarljivo spreminjali. **Hipotezo o vplivu temperaturnega utrujanja na mehanske lastnosti, natančneje, da bo po dolgotrajnem temperaturnem utrujanju EPS prišlo do padca tlačne trdnosti in padca *E*-modula, moramo na tem mestu zavreči.**
4. Našo četrto zastavljeno hipotezo, da se bodo dimenzije vzorcev EPS-a po temperaturnem utrujanju zmanjšale, potrjujemo, saj so se v nasprotju z mehanskimi lastnostmi dimenzije EPS po temperaturnem utrujanju znatno spremenile. Po 30 temperaturnih ciklih in temperaturni izpostavi pri 80 °C so se dimenzije spremenile nekje za 3 % glede na začetne izmerjene dimenzije, pri nadaljnjih temperaturnih izpostavah pri 90 °C pa celo do 5 % glede na začetne izmerjene dimenzije. Največ so se dimenzije spremenile pri materialu EPS 70 in

EPS 100, to je v rangu od 4 % do 5 %. Pri materialu EPS 200 so se dimenzije spremenile za največ 2,4 % [5,7,9].

5. Prav tako moramo **hipotezo, da bo gostota EPS vplivala na velikost padca tlačne trdnosti, zavreči**, saj smo iz rezultatov tlačnih testov pri različnih povišanih temperaturah ugotovili, da gostota EPS nima vpliv na padec tlačne trdnosti, kot tudi ne na padec *E*-modula. Pri vseh materialih je podobno padala tlačna trdnost pri posameznih temperaturah. Pri 80 °C je za vse EPS-e, različnih gostot, padec tlačne trdnosti v rangu od 35 % do 39 %.
6. Na podlagi posnetkov SEM, kjer smo pri izpostavljenem EPS-u opazili zlivanje kroglic in manj izrazite praznine/pore, lahko **potrdimo našo zadnjo zastavljeno hipotezo, da ima temperaturno utrujanje vpliv na mikrostrukturo EPS.**

SEZNAM LITERATURE IN VIROV

- [1] Ž. Nose, Pomen izbire odtenka pri obnovitvenem barvanju fasade, *Gradbenik*. 5 (2020).
- [2] M.N. Tahir, E. Hamed, Effects of temperature and thermal cycles on the mechanical properties of expanded polystyrene foam, *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 24 (2022) 1535–1555. <https://doi.org/10.1177/10996362211063152>.
- [3] S.S. Yeo, Y.G. Hsuan, Effects of temperature and stress on the short and long-term compressive behavior of expanded polystyrene, *Geosynth Int.* 16 (2009) 374–383. <https://doi.org/10.1680/gein.2009.16.5.374>.
- [4] P. Krause, A. Nowoświat, Experimental Studies Involving the Impact of Solar Radiation on the Properties of Expanded Graphite Polystyrene, *Energies (Basel)*. 13 (2019) 75–77. <https://doi.org/10.3390/en13010075>.
- [5] M. Pfundstein, R. Gellert, M. Spitzner, A. Rudolphi, *Insulating Materials: Principles, Materials, Applications*, Birkhäuser, Basel, 2012. <http://nukweb.nuk.uni-lj.si/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=e000xww&AN=642009&lang=sl&site=ehost-live>.
- [6] E. Barreira, V.P. de Freitas, *External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)*, 2016. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-20382-9>.
- [7] J. Vaupot, Fakulteta za tehnologijo polimerov Pregled in primerjava lastnosti široko uporabljenih materialov za toplotno izolacijo stavb, 2021.
- [8] R. Bertalaníč, M. Dolinar, A. Draksler, L. Honzak, M. Kobold, N. Lokošek, G. Vertačnik, Ž. Vlahović, A. Žust, *Ocena podnebnih sprememb v Sloveniji do konca 21. stoletja : sintezno poročilo*, (2018).
- [9] J. Tatara, L. Ricketts, P. Eng, Impact of heating and cooling of expanded polystyrene and stone wool insulations on conventional roof performance, *Proceedings of the 15th Canadian Conference on Building Science and Technology*. 113 (2017) 1–16.
- [10] M. Zhang, M. Li, Y. Wang, J. Sun, Experimental study of thermal shrinkage and melt dripping properties of expanded polystyrene under various heat fluxes, *Journal of Building Engineering*. 60 (2022) 105179. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105179>.
- [11] Á. Lakatos, A. Csík, Multiscale Thermal Investigations of Graphite Doped Polystyrene Thermal Insulation, *Polymers (Basel)*. 14 (2022) 1606. <https://doi.org/10.3390/polym14081606>.
- [12] Á. Lakatos, F. Kalmár, Examination of the change of the overall heat transfer coefficients of building structures in function of water content, *Building Services*

- Engineering Research and Technology. 35 (2014) 507–515. <https://doi.org/10.1177/0143624413516649>.
- [13] A. Nowoświat, P. Krause, A. Miros, Properties of expanded graphite polystyrene damaged by the impact of solar radiation, *Journal of Building Engineering*. 34 (2021) 101920. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101920>.
- [14] A. Simpson, I.G. Rattigan, E. Kalavsky, G. Parr, Thermal conductivity and conditioning of grey expanded polystyrene foams, *Cellular Polymers*. 39 (2020) 238–262. <https://doi.org/10.1177/0262489320934263>.
- [15] Á. Lakatos, I. Deák, U. Berardi, Thermal characterization of different graphite polystyrene, *International Review of Applied Sciences and Engineering*. 9 (2018) 163–168. <https://doi.org/10.1556/1848.2018.9.2.12>.
- [16] M. Khoukhi, Simultaneous changes of temperature and moisture of thermal conductivity of eps insulation material and its impact on building energy performance, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. 8 (2019) 217–225. <https://doi.org/10.12720/sgce.8.2.217-225>.
- [17] S. Vaitkus, Experimental Analysis of Structure and Deformation Mechanisms of Expanded Polystyrene (EPS) Slabs, *Medziagotyra*. 12 (2006) 323–327.
- [18] T.A. Awol, J. Vaslestad, S. Vegvesen, M. Sani, *A Parametric Study of Creep on EPS Geofoam Embankments*, 2012.
- [19] J.M. Park, G.Y. Lee, D.H. Kim, H.M. Jung, Creep Simulation and Validation for a Finite Element Analysis of Expanded Polystyrene-Based Cushioning Systems, *Applied Sciences (Switzerland)*. 12 (2022) 12663. <https://doi.org/10.3390/app122412663>.
- [20] S.A. Moga, N. Goga, A. Hadar, Developing a novel algorithm for the computation of Poisson's ratio using molecular dynamics for polymers, *Bull., Series B*. 78 (2016) 129–136.
- [21] SIST EN 826: 2013 Ugotavljanje obnašanja pri tlačni obremenitvi.pdf, (n.d.).
- [22] SIST EN 1607: 2013 Ugotavljanje natezne trdnosti v smeri debeline.pdf, (n.d.).
- [23] J. Case, A.H. Chilver, Tension and Compression; Direct Stresses, *Strength of Materials*. (1959) 1–29. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4831-9669-5.50006-3>.
- [24] SIST EN 1604: 2013 Preskus dimenzijske stabilnosti pri predpisani temperaturi in relativni vlažnosti zraka.pdf, (n.d.).
- [25] Vrstični elektronski mikroskop JEOL JSM-IT500 z energijsko disperzijskim spekrometrom EDS Oxford Instruments, (n.d.). <https://www.zag.si/raziskave-in-razvoj/seznam-opreme/seznam-opreme-podrobno/?id=84> (accessed October 13, 2023).

- [26] Naprševalni sistem Quorum, Q150T Plus , (n.d.). <https://www.zag.si/raziskave-in-razvoj/seznam-opreme/seznam-opreme-podrobno/?id=115> (accessed October 13, 2023).

SEZNAM SLIK

Slika 1: Shematski prikaz popularnosti fasadnih odtenkov v letih 2012 in 2019 [1] (Površina lika predstavlja delež barvanih površin, brez upoštevanja bele barve.)	4
Slika 2: Primer dvodnevnega segrevanja/hlajenja fasadnih površin, različnih svetlosti [1]	5
Slika 3: Temperatura fasadne ploskve v odvisnosti od svetlosti odtenka, in sicer pri temperaturi 25 °C [1]	5
Slika 4: Vpliv temperature na toplotno prevodnost EPS-a [11]	8
Slika 5: Fotografije vzorcev: a-neizpostavljen, b-izpostavljen pri 70 °C, c-izpostavljen pri 100 °C, d-izpostavljen pri 110 °C [11]	9
Slika 6: Posnetki s svetlobnim mikroskopom: a-neizpostavljen, b-izpostavljen pri 70 °C, c-izpostavljen pri 100 °C, d-izpostavljen pri 110 °C [11]	9
Slika 7: Tlačna napetost pri 10 % raztežku v odvisnosti od temperature [3]	11
Slika 8: Vpliv temperature (40 °C, 60 °C in 80 °C) na uporabljeno silo v odvisnosti od relativnega raztežka vzorca EPS-a [2]	11
Slika 9: Vpliv temperaturnega utrujanja na odziv EPS na natezno obremenjevanje [2]	13
Slika 10: Sila v odvisnosti od raztežka pri nateznem testu EPS, in sicer pri povišanih temperaturah: a-pred utrujanjem in b-po 45 temperaturnih ciklih [2]	15
Slika 11: Velikost vrzeli med dvema mehansko pritrjenima izolacijskima ploščama EPS v odvisnosti od temperature [9]	16
Slika 12: Struktura EPS-ov, različnih gostot: a -12 kg/m ³ ; b - 17 kg/m ³ ; c - 23 kg/m ³ ; d - 30 kg/m ³ [17]	16
Slika 13: Vpliv gostote EPS-a na povprečni premer kroglice [17]	17
Slika 14: Struktura EPS [18]	17
Slika 15: Tlačni test EPS [18]	18
Slika 16: Vpliv stiskanja na strukturo celične stene EPS-a [18]	19
Slika 17: Tlačna trdnost EPS-a v odvisnosti od gostote [7]	20
Slika 18: E-modul EPS-a v odvisnosti od gostote [19,20]	20
Slika 19: Poissonovo razmerje EPS-a v odvisnosti od gostote [19,20]	21
Slika 20: Fotografija uporabljenih EPS-plošč (EPS 70, EPS 100, EPS 200)	23
Slika 21: ZWICK Z100 s temperaturno komoro	25
Slika 22: Tlačni test, po EN ISO 29469:2022 [21]	26
Slika 23: Tlačni test EPS-a	27
Slika 24: Natezni test EPS-a [7]	29
Slika 25: Temperaturni profil začetnega temperaturnega utrujanja EPS-a	30
Slika 26: Celotni profil temperaturnega utrujanja	31
Slika 27: Vrstični elektronski mikroskop JEOL JSM-IT500 [25]	33
Slika 28: Naprševalni sistem Quorum, Q150T Plus [26]	34
Slika 29: Tlačna trdnost EPS-a 70 v odvisnosti od temperature	36
Slika 30: E-modul EPS 70 v odvisnosti od temperature	37
Slika 31: Tlačna trdnost EPS 100 v odvisnosti od temperature	38
Slika 32: E-modul EPS 100 v odvisnosti od temperature	39

Slika 33: Tlačna trdnost EPS 200 v odvisnosti od temperature	40
Slika 34: E-modul v odvisnosti od temperature	41
Slika 35: Natezna trdnost EPS 200 v odvisnosti od temperature	42
Slika 36: E-modul EPS 200 v odvisnosti od temperature	43
Slika 37: Vpliv temperature na raztezek pri pretrgu EPS 200	44
Slika 38: Tlačna trdnost EPS 70 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov	44
Slika 39: E-modul EPS 70 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov	45
Slika 40: Tlačna trdnost EPS 100 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov	45
Slika 41: Tlačna trdnost EPS 200 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov	46
Slika 42: E-modul EPS 100 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov	46
Slika 43: E-modul EPS 200 v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov	47
Slika 44: Dimenzijske spremembe EPS 70 po temperaturnem utrujanju, to je po 30 ciklih, 168 urah pri 80 °C, 168 urah pri 85 °C in 168 urah pri 90 °C	49
Slika 45: SEM-posnetki neutrujanega EPS 70: a-c in temperaturno utrujanega EPS 70: d-f, to je pri različnih povečavah	50

SEZNAM TABEL

Tabela 1: Lastnosti EPS [5]	7
Tabela 2: Izmerjene gostote vzorcev [11]	10
Tabela 3: Vpliv povišane temperature na E-modul [2]	12
Tabela 4: E-modul v odvisnosti od števila temperaturnih ciklov [2]	12
Tabela 5: E-modul po 45 temperaturnih ciklih in izvajanjih tlačnega testa pri povišanih temperaturah [2]	13
Tabela 6: Vpliv povišane temperature in temperaturnega utrujanja na natezni modul [2]	14
Tabela 7: Tlačna trdnost EPS v odvisnosti od gostote [7]	19
Tabela 8: Deklarirane lastnosti uporabljenih materialov	22
Tabela 9: Pregled mehanskih testiranj in dimenzijske stabilnosti ter količina vzorcev za posamezni test	24
Tabela 10: Gostote EPS	35
Tabela 11: Tlačna trdnost EPS-a 70 v odvisnosti od temperature	35
Tabela 12: E-modul EPS 70 v odvisnosti od temperature	36
Tabela 13: Tlačne lastnosti EPS 100 v odvisnosti od temperature	37
Tabela 14: E-modul EPS 100	38
Tabela 15: Tlačne lastnosti EPS 200 v odvisnosti od temperature	39
Tabela 16: E-modul EPS 200 v odvisnosti od temperature	40
Tabela 17: Natezna trdnost EPS 200 v odvisnosti od temperature	41
Tabela 18: E-modul EPS 200 v odvisnosti od temperature	42
Tabela 19: Raztezek pri pretrgu EPS 200 v odvisnosti od temperature	43
Tabela 20: Tlačni test EPS po različnih fazah dodatnega temperaturnega utrujanja	47
Tabela 21: Rezultati testa dimenzijske stabilnosti po temperaturnem utrujanju po ciklih, 168 urah pri 80 °C, 168 urah pri 85 °C in 168 urah pri 90 °C	30 48

SEZNAM UPORABLJENIH SIMBOLOV

T_g - temperatura steklastega prehoda

ρ - gostota

m - masa

V - volumen

σ - napetost

ε - raztezek

x_0 - začetna točka

σ_{10} - tlačna napetost pri 10 % deformaciji vzorca

F_{10} - sila pri 10 % deformaciji vzorca

A_0 - površina vzorca

E - modul elastičnosti

σ_{x0-1} - napetost od začetne točke do 1 % deformacije materiala

ε_{x0-1} - raztezek od začetne točke do 1 % deformacije materiala

σ_{mt} - maksimalna natezna trdnost

F_{mt} - maksimalna natezna sila

A_0 - površina vzorca

l - dolžina vzorca

b - širina vzorca

ε_b - raztezek pri pretrgu

X_b - odmik premikajoče plošče od začetne lege ob pretrgu

d_0 - začetna debelina vzorca

l_0 - začetna dolžina pred izpostavo v komori

b_0 - začetna širina vzorca pred izpostavo v komori

d_0 - začetna debelina vzorca pred izpostavo v komori

l_1 - končna dolžina vzorca po izpostavi

b_1 - končna širina vzorca po izpostavi

d_1 - končna debelina vzorca po izpostavi

$\Delta\varepsilon_l$ - sprememba dolžine vzorca

$\Delta\varepsilon_b$ - sprememba širine vzorca

$\Delta\varepsilon_d$ - sprememba debeline vzorca

n - število paralelk

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

ETICS - zunanji toplotnoizolacijski kompozitni sistem z ometom; ang: External Thermal Insulation Composite System with renderings

EPS - ekspandiran polistiren

SEM - vrstična elektronska mikroskopija; ang: scanning electron microscopy

IR - infrardeča svetloba

DSC - diferenčna dinamična kalorimetrija; ang: differential scanning calorimetry

EN - evropski standard

ASTM - ameriška organizacija za testiranje materialov; ang: American Society for Testing Materials

SIST EN - slovenski standard, nastal s prevzemom evropskega standarda

ISO - mednarodna organizacija za standardizacijo; ang: International Standard Organisation

BED-S - stereo mikroskopska slika odbitih elektronov; ang: Backscattered Electron Detector-Stereo