



UPORABA LESNO-PLASTIČNIH KOMPOZITOV V TEHNOLOGIJI 4D TISKA

USE OF WOOD-PLASTIC COMPOSITES IN 4D PRINTING TECHNOLOGY

Daša Krapež Tomec^{1*}, Aleš Straže¹, Matevž Kokot, Manja Kitek Kuzman¹, Mirko Kariž¹

UDK 630*862:004
Izvirni znanstveni članek / Original scientific article

Prispelo / Received: 29. 9. 2021
Sprejeto / Accepted: 22. 11. 2021

Izvleček / Abstract

Izvleček: Tridimenzionalni tisk (3D) z uporabo lesno-plastičnih filamentov je že dobro poznan, vse bolj pa se raziskuje tudi uporaba lesa v štiridimenzionalnem (4D) tisku. 4D tisk je razvijajoče se področje dodajalnih tehnologij, kjer s primerno zasnovano 3D tiskanja in uporabo ustreznih materialov naredimo izdelke, ki ob ustreznih zunanjih sprožilcih spreminjajo obliko in tvorijo dinamične strukture. Pri 4D tisku lahko higroskopskost lesa - običajno pojmovano kot njegovo pomanjkljivost - izkoristimo in zasnujemo izdelke, ki spremenijo obliko glede na spremembo klimatskih pogojev, predvsem vlažnost okolice.

V raziskavi smo s FDM tehnologijo (modeliranje s spajanjem slojev) 3D tiska iz PLA (polimlečna kislina) in lesno-plastičnih filamentov (les-PLA) izdelali preizkušance z različnimi razmerji materialov, pri katerih smo spremljali odziv v spreminjajočih klimatskih pogojih. Za spremljanje spremembe oblike, kot je ukrivljanje, smo izdelali sestavljene preizkušance po principu bimetal (aktuatorje), kjer smo za pasivno plast (ob spremembi vlažnosti okolice ne spreminja svojih dimenzij) uporabili PLA, za aktivno plast (spreminja dimenzije ob spremembi vlažnosti okolice) pa les-PLA v različnih razmerjih debelin ter jih izpostavili laboratorijskim ter zunanjim pogojem.

Rezultati so pokazali, da dodatek lesa pri lesno-plastičnih kompozitih v spreminjajoči se klimi povzroča dimenzijske spremembe in s tem spremembe oblike načrtovanih aktuatorjev. Sprememba oblike je odvisna od razmerja debelin slojev materialov v dvoslojnem aktuatorju, od sorpcije vodne pare ter od vsebnosti lesa v uporabljenem lesno-plastičnem kompozitu.

Ključne besede: 3D tisk, 4D tisk, lesno-plastični kompoziti, materiali z oblikovnim spominom

Abstract: Three-dimensional (3D) printing with wood-plastic composites is already well known, and the use of wood in four-dimensional (4D) printing is being increasingly explored. 4D printing is an evolving area of additive technologies where, with the appropriate design of 3D printing and use of appropriate materials, we can create products that change shape and form dynamic structures when triggered externally. In 4D printing, the hygroscopicity of wood – usually considered a disadvantage – can be used as a positive property to design products that change their shape according to climatic conditions, especially humidity.

In this research, we used the FDM (fused deposition modelling) technology of 3D printing PLA (polylactic acid) and wood-plastic composites (wood-PLA) to produce specimens with different material proportions, whose response to changing climatic conditions we monitored. To monitor the change in shape, or curvature, we fabricated composite test specimens using the bimetal principle (actuators), in which we used PLA for the passive layer and wood-PLA for the active layer in different thickness ratios and exposed them to laboratory and external conditions.

The results showed that the wood content of the wood-plastic composites leads to dimensional changes in a changing climate, resulting in changes in the shape of the designed actuators. The change in shape depends on the thickness ratio of the layers in the two-layer actuator, the sorption of water vapor, and the wood content in the wood-plastic composite used.

Keywords: 3D printing, 4D printing, wood-plastic composites, shape memory materials

1 UVOD

2 INTRODUCTION

4D tisk je razvijajoče se področje znotraj dodajalnih tehnologij (3D tiska), kjer z uporabo materialov, ki pod določenimi pogoji spremenijo svoje lastnosti, oblikujemo izdelke, ki lahko spreminjajo

¹ Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, SLO

* e-mail: dasa.krapez.tomec@bf.uni-lj.si

svojo obliko (Ryan et al., 2021). Četrto dimenzijo predstavlja čas, potreben za aktivacijo in doseganje zelene spremembe. To odpira nove možnosti izdelave dinamičnih struktur, ki se odzivajo na umetne sprožilce (magnetno, električno polje) ali samodejno na spremembe pogojev okolice npr. temperature ali vlažnosti.

4D tisk je mogoč z običajnimi materiali, ki jim med tiskanjem z vnaprej premišljeno zasnovo (uporabljenimi materiali na ustreznih mestih v ustrezni količini/razmerju) vgradimo notranje napetosti, ki se potem sprostijo (npr. deli, ki se ob ustreznem sprožilcu sestavijo/deformirajo v ustrezno obliko). Druga možnost izvedbe 4D tiska je s »pametnimi« materialami, ki se ob ustrezni spremembi v okolici spremenijo (npr. sprememba vlage, temperature, pH, UV sevanja, električnih in magnetnih polj ...) (Erb et al., 2013; Manen et al., 2017; Rayate & Jain, 2018; Ryan et al., 2021). 4D tiskanje oziroma tiskanje spreminjajočih se struktur je mogoče tudi s cenovno dostopnimi FDM 3D tiskalniki, saj se večino dejavnikov, ki vplivajo na odziv izdelka, določijo z izbiro materiala in zasnovo izdelka med določitvijo parametrov tiskanja (debelina slojev, razporeditev in delež materialov, usmerjenost ekstrudiranih linij) (Manen et al., 2017).

4D tisk je zanimiv za uporabo na različnih področjih, od mehke robotike, samosestavljive embalaže, biomedicinskih aplikacij, pametnih tekstilov, začasnih objektov, senzorskih in vesoljskih tehnologij (Ryan et al., 2021), v arhitekturi in oblikovanju (Correa et al., 2015; Reichert et al., 2015)

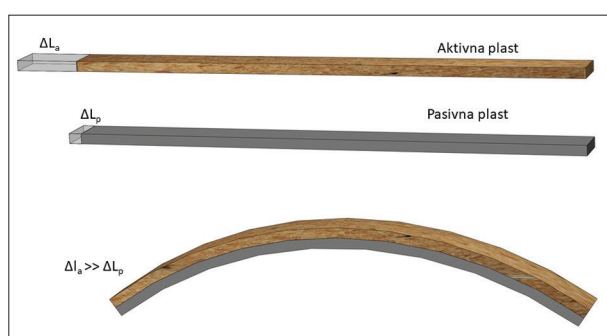
Na področju arhitekture bi posebej izpostavili dve zanimivi aplikaciji; – možnost odpiranja/zapiranja streh za objekte, kot so športni stadioni, in prilagodljive fasade, ki poskušajo doseči odzivnost z bolj lokaliziranim nadzorom prepustnosti, medtem ko večina raztegljivih/konvertibilnih streh/fasad/sten uporablja gibanje večjih gradbenih komponent. Za obe aplikaciji so značilne kompleksne procesne in mehanske zahteve, ki poleg tega zahtevajo vsaj en zunanji vir energije, številne pogone in senzorje ter logično krmilno enoto (Reichert et al., 2015). Izkoriščanje higroskopskega vedenja materiala je še posebej obetavno za uporabo v arhitekturni in gradbeni praksi, saj za svoje delovanje ne zahteva nobenega umetnega zunanjega, električnega ali kakršnega koli drugega aktiviranja.

V naravi najdemo številne organizme, ki delujejo na podoben način kot pametni materiali, zato raziskovalci pogosto posnemajo njihovo delovanje pri snovanju novih izdelkov (Cheng et al., 2021a; Correa et al., 2020; Le Duigou et al., 2016; Le Duigou et al., 2017; Manen et al., 2017). Npr. storži iglavcev se odpirajo in zapirajo v odvisnosti od zračne vlažnosti, to zmožnost ohranijo tudi, ko niso več del žive rastline. Načelo higroskopskega aktiviranja temelji na hierarhični, dvoslojni mikrostrukturi, ki jo sestavljajo sklerenhim in sklereide. Vsako od teh tkiv je organizirano kot snop posameznih vlaken, pri čemer je vsako vlakno koncentrični sestavljeni valj, sestavljen iz različnih celičnih sten. Sekundarno celično steno, ki je v glavnem odgovorna za higromehanske lastnosti posameznega vlakna, sestavljajo usmerjene toge celulozne mikrofibrile, vdlane v higroskopski hemicelulozni/pektinski matriks. Dvoplastna struktura povzroči diferencialno nabrekanje med dvema plastema, povezanima s prehodno medfazo (Le Duigou et al., 2020).

Številni naravni materiali lahko spremenijo obliko pod vplivom okoljskih stimulatorjev, kot sta toplota ali vlažnost (Cheng et al., 2021). Higromorfni materiali ali materiali, ki spreminjajo obliko z navzemanjem ali oddajanjem vlage, delujejo drugače, ker je zunanji dražljaj tisti, ki sproži preoblikovanje iz prvotne oblike; transformacija je obrnjena, ko dražljaj odstranimo – predmet se vrne v prvotno obliko. Tako material niha med dvema ravnotežnima stanjema brez potrebe po zunanji sili, kar omogoča več ciklov preoblikovanja. Smer in amplituda gibanja sta vnaprej določeni v strukturi materiala (Zhou & Sheiko, 2016).

Novi pametni materiali predstavljajo enega najbolj ključnih izzivov za razvoj in nadaljnjo širitev 4D tiskanja. Odzivi na dražljaje pri 4D tiskanju za različne vrste materialov, vključno z materiali z oblikovnim spominom in hidrogeli, so uspešno raziskovani, vendar počasen odziv in nizka učinkovitost zaenkrat ovirajo nadaljnji razvoj. Kljub temu so Chen in sodelavci zasnovali visoko zmogljiv integriran aktuator z zaznavanjem deformacij in samozaznavanjem temperature, katerega povprečni odzivni čas je približno 20 sekund (Chen et al., 2020). Večina obstoječih materialov reagira le na en dražljaj in ta ne deluje v primeru okvare opreme za ustvarjanje dražljajev. Zato imajo materiali, odzivni na različne dražljaje, strateško prednost.

Les lahko v 3D tiskanju vključimo v filament, sestavljen iz lesa in plastike oz. polimera. V kompozitih les obdrži del svojih prvotnih lastnosti - higroskopskost in dimenzijsko nestabilnost (Ayrilmis et al., 2019; Kariž et al., 2018a; Kariž et al., 2018b), saj so naravna vlakna anizotropna in občutljiva na vlago, kar je ena izmed njihovih pomanjkljivosti, kadar se uporabljajo za konstrukcijske namene (Faruk et al., 2012). Anizotropno nabrekanje naravnih vlaken pa lahko uporabimo kot gonilo za aktivacijo pri razvoju higromorfnihih biokompozitov s 3D tiskanjem. Vsebnost vlaken, nadzor usmerjenosti vlaken in neprekinjenost vlaken so opisani v povezavi z (znanimi) izzivi učinkovitosti proženja/aktiviranja (Le Duigou et al., 2020). Razlike v prostorninskem raztezanju, upogibni togosti in modulu elastičnosti vsake plasti so osnova njihovega deformacijskega odziva (Correa et al., 2015). Les s svojo higroskopsnostjo ter ortotropnimi krčitvenimi in mehanskimi lastnostmi lahko uporabimo v dvoslojnih/dvomaterialnih kompozitih, kjer postane naraven aktuator, ki spreminja obliko s krivljenjem, ter bi se lahko uporabljal za samodejno senčenje, prezračevanje ali »ojačanje« strukture, glede na spremembo klime v okolici (Cheng et al., 2021; Reichert et al., 2015; Rüggeberg & Burgert, 2015). Zamisel o dvomaterialnih aktuatorjih, ki spreminjajo obliko, temelji na bimetalnih aktuatorjih (slika 1). Bimetalni aktuatorji uporabljajo dve kovini z različnim koeficientom toplotnega raztezanja. Sprememba oblike dvoslojnih pogonov je odvisna od lastnosti materiala in njegovega razmerja debeline v kompozitu (Timoshenko, 1953).



Slika 1. Načelo odziva higromorfnihih kompozitov na podlagi diferencialne higroekspanzije in kontrakcije (tj. krčenja in nabrekanja) aktivne ter pasivne plasti.
Figure 1. Principle of the response of hygromorphic composites based on differential hygroexpansion and contraction (i.e., shrinkage and swelling) of the active and passive layers.

Raziskave obnašanja lesno-plastičnih kompozitov v 4D tiskanju so v velikem porastu (El-Dabaa & Salem, 2021; Le Duigou et al., 2016; Krapež Tomec et al., 2021; Vazquez et al., 2019), vendar je večina raziskav usmerjena na preskušanje v laboratorijskih pogojih, malo pa ob izpostavitvi na prostem, kjer na odziv vpliva veliko različnih dejavnikov (Rüggeberg & Burgert, 2015) ter tudi število ciklov izpostavitve.

V raziskavi smo za izdelavo dinamičnih struktur (princip 4D tiska) preizkušali uporabo 3D tiskanja lesno-plastičnih kompozitov, ki se odzivajo na spremembo vlažnosti okolice s spremembo oblike. Cilj raziskave je bil ugotoviti, ali lahko običajno nezaželeno dimenzijske spremembe lesa v lesno-plastičnih filamentih ob spremembi vlažnosti uporabimo kot sprožilec spreminjanja oblike lesno-plastičnega kompozita ter uporabo lesno-plastičnega kompozita kot osnovo 4D tiska. Uporabili smo aktuatorje iz PLA in les-PLA kompozitov z različnim razmerjem debeline slojev posameznega materiala in preučili njihov odziv, zlasti spremembe oblike – amplitudo krivljenja, pri laboratorijskem izotermnem spreminjanju relativne zračne vlažnosti (RZV) in kombinaciji sprememb relativne zračne vlažnosti, temperature in sončnega obsevanja v okolju (zunanja izpostavitve).

2 MATERIALI IN METODE

2 MATERIALS AND METHODS

Raziskava je bila razdeljena na dva dela:

- spremljanje odziva 4D natisnjenih kompozitov v laboratorijskih pogojih in določitev osnovnih lastnosti uporabljenih materialov ter
- spremljanje odziva 4D natisnjenih kompozitov ob izpostavitvi zunanji klimi.

2.1 MATERIALI

2.1 MATERIALS

Za 3D tiskanje sta bila uporabljena dva materiala – komercialni PLA filament (Plastika Trček, Slovenija; označen kot PLA) ter lesno-plastični filament, izdelan iz PLA polimera s 25 % deležem lesnih delcev (velikosti 70 do 150 μm , Arbocel C100) (izdelan v Kompetenzzentrum Holz GmbH, Linz, Avstrija; označen kot WPL25).

Vsi preizkušanci so bili natisnjeni na Creality CR-10-V3 (Creality 3D Technology Co., Ltd, Shenzhen, China) 3D tiskalniku z direktnim ekstruderjem. Debelina sloja tiskanja je bila 0,3 mm, premer šobe

0,4 mm, temperatura tiskanja 200 °C, temperatura mize tiskalnika 50 °C. 3D model je bil pripravljen v SolidWorks programski opremi (SolidWorks Corp., Massachusetts, USA), shranjen v STL formatu ter pripravljen na tisk v Cura V4.10.0. programski opremi (Ultimaker, Utrecht, Netherlands). Preizkušanci so bili natisnjeni kot polni (solid), s 45-stopinjnim potekom linij tiskanja glede na dolžino preizkušanca (izmenično en sloj +45°, naslednji sloj -45° glede na dolžino preizkušanca).

2.2 UPOGIBNA TRDNOST IN MODUL ELASTIČNOSTI

2.2 BENDING STRENGTH AND MODULUS OF ELASTICITY

Pred testiranjem odzivanja materiala na zunanje dražljaje smo preizkušancem iz čistega PLA in iz lesno-plastičnega filameta WPL25 določili upogibno trdnost in modul elastičnosti. Preizkušanci dimenzij (120 x 15 x 4) mm so bili po 7 dni uravnovešani v stacionarni klimi (RZV 20 %, 40 %, 65 % oziroma 80 %, temperatura 20 °C). Preizkušance (7 vzporedno natisnjenih) smo po vsakem uravnovešanju testirali po postopku, prilagojenem glede na predhodne raziskave (čim daljši vzorci glede na obstoječo pripravo za testiranje), na 3-točkovnem upogibnem testu na univerzalnem preskusnem stroju Zwick Z005 (ZwickRoell GmbH, Ulm, Nemčija). Razpon med podporama je bil 80 mm, hitrost pomika pa 10 mm/min. Od vsake serije smo en preizkušane po prvem kondicioniranju obremenili do loma, da smo določili maksimalno silo obremenjevanja, nato pa ostale obremenili samo do 50 % maksimalne sile. Tako smo paralelnim preizkušancem (6 kosov) lahko določili modul elastičnosti po uravnovešanju v različnih klimah.

Iz meritev so bili izračunani moduli elastičnosti po enačbi (Enačba 1):

$$E_m = \frac{l_1^3 \times (F_2 - F_1)}{4bt^3 \times (a_2 - a_1)} \quad (1)$$

l ...razdalja med podporama [mm],

b ...širina preizkušanca [mm],

t ...debelina preizkušanca [mm],

F_2 ...sila pri 40 % maksimalne obremenitve [N],

F_1 ...sila pri 10 % maksimalne obremenitve [N],

a_2 ...poves pri 40 % maksimalne obremenitve [mm],

a_1 ...poves pri 10 % maksimalne obremenitve [mm].

2.3 DIMENZIJSKA STABILNOST

2.3 DIMENSIONAL STABILITY

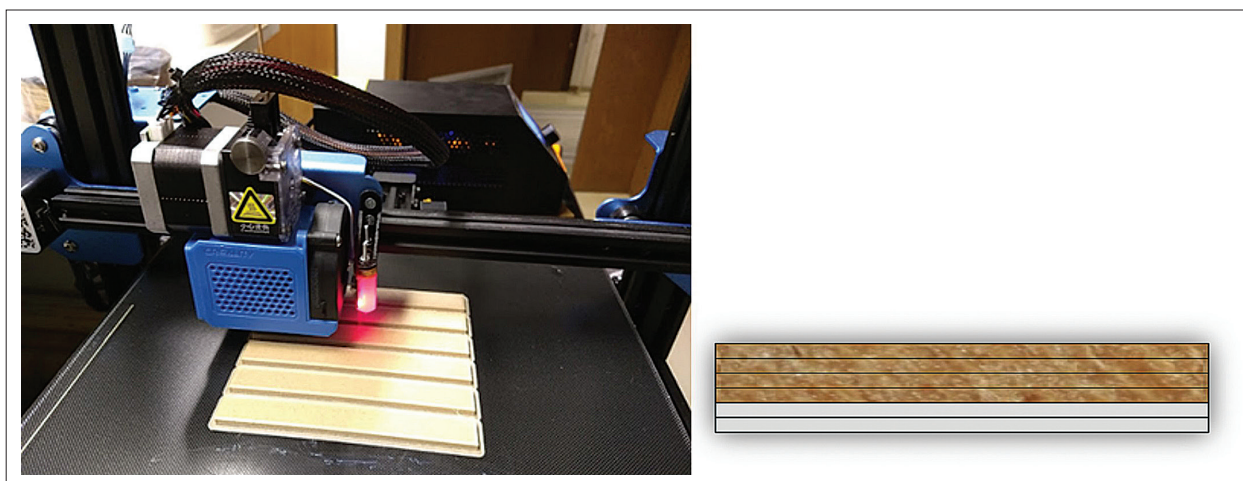
Preizkusi dimenzijske stabilnosti so bili izvedeni v laboratorijskem sušilnem kanalu TLS-01 (Kambič, Semič, Slovenija). V preskusni komori sušilnega tunela z dimenzijami 700 x 400 x 610 mm³ (dolžina x višina x širina) sta bili na sredino rešetaste podlage postavljeni dve seriji po 7 preizkušancev. Proces vlaženja in sušenja je nadzoroval centralni mikroprocesorski krmilnik DPC-420, ki je omogočal nastavitve temperature zraka (T), relativne zračne vlažnosti (RZV) in hitrosti zraka (v) ($\Delta T = \pm 1,0$ °C, $\Delta RZV = \pm 1,0$ %, $\Delta v = \pm 0,1$ m/s).

Po 3D tisku so bili preizkušanci sprva uravnovešani v klimatski komori na 20 % RZV. Za merjenje kinetike adsorpcije in desorpcije so bili preizkušanci ($n = 7$) najprej 168 ur (7 dni) izpostavljeni 80 % RZV in nato naslednjih 168 ur 20 % RZV. Temperatura je bila konstantna 20 °C, hitrost zraka pa 1 m/s. Postopek sorpcije 3D natisnjenih preizkušancev smo spremljali z intervalnim tehtanjem vsakega preizkušanca na laboratorijski tehtnici Exacta 300 EB (Tehtnica Železniki, Slovenija) z natančnostjo 0,01 g in z ročnim merjenjem treh dimenzij preizkušancev z digitalnim kljunastim merilom z natančnostjo 0,01 mm.

2.4 MERITVE ODKLONA ELEMENTOV, NATISNJNIH IZ DVEH RAZLIČNIH MATERIALOV

2.4 MEASUREMENTS OF DEFLECTION OF ELEMENTS, PRINTED FROM TWO DIFFERENT MATERIALS

Preizkušanci 200 x 12 x 1,8 mm³ za meritve odklona elementov ob spreminjanju klimatskih pogojev so bili natisnjeni iz dveh materialov - spodnji («pasivni») sloji iz PLA, zgornji («aktivni») pa iz lesno-plastičnega kompozita WPL25 (slika 2). Debelina posameznega sloja je bila 0,3 mm, skupna debelina preizkušancev je bila vedno 1,8 mm, s spreminjanjem števila slojev posameznega materiala pa smo spreminjali delež pasivnega PLA in delež aktivnega WPL25 v sestavljenem preizkušancu (preglednica 1). Natisnjena sta bila tudi dva preizkušanca iz samo enega materiala - čisti PLA in čisti WPL25.



Slika 2. 3D tiskanje preizkušancev (levo; foto: M. Kokot) in sestava preizkušanca (0,6 PLA WPL25) - PLA sloji spodaj – 2x0,3 mm in lesno-plastični sloji nad njim 4x0,3 mm (desno).

Figure 2. 3D printing of specimens (left; photo: M. Kokot) and composition of the specimen (0,6 PLA WPL25) - PLA layers below – 2x0.3 mm and wood-plastic layers above it 4x0.3 mm (right).

Preglednica 1. Oznake posameznih preizkušancev in uporabljene kombinacije slojev v preizkušancu z razmerjem debeline pasivnega in aktivnega sloja v aktuatorju (m).

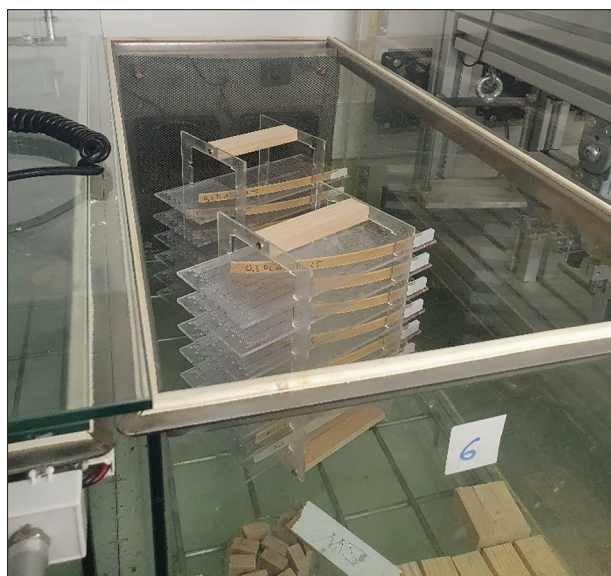
Table 1. Labels of individual samples and the used combination of layers in the sample with the thickness ratio of the passive and active layers in the actuator (m).

Oznaka preizkušanca	Število slojev/ skupna debelina slojev PLA [mm]	Število slojev/ skupna debelina slojev WPL25 [mm]	Skupna debelina preizkušanca [mm]	Razmerje debelin pasivnega in aktivnega sloja – m
Kontrola PLA	6/1,8	-	1,8	-
Kontrola WPL25	-	6/1,8	1,8	-
0,3 PLA WPL25	1/0,3	5/1,5	1,8	0,2
0,6 PLA WPL25	2/0,6	4/1,2	1,8	0,5
0,9 PLA WPL25	3/0,9	3/0,9	1,8	1,0
1,2 PLA WPL25	4/1,2	2/0,6	1,8	2,0

Preizkušanci, vpeti v merilno podlogo, so bili najprej izpostavljeni vlažni klimi (80 % RZV, 20 °C, slika 3). Po vnaprej določenih časovnih intervalih (1, 2.5, 4, 6, 23, 27, 50, 54, 72, 168 ur) so bili merjeni odmiki preizkušancev. Ob vsaki meritvi smo merilno podlogo s preizkušancem stehali, fotografirali (primer slika 5) ter odčitali odklik od začetne lege. Enak postopek meritev je bil nato ponovljen v suhi klimi (20 % RZV, 20 °C) in v nadaljevanju ponovljen (3x navlaževanje, 3x sušenje).

V drugem delu raziskave (izpostavitve na prostem) so bili preizkušanci vpeti na večjo merilno podlogo ter izpostavljeni zunanjim vplivom (slika 4). Vsako uro je bil narejen posnetek vzorcev ter

iz analize slike določen trenutni odklik od začetne lege preizkušanca. Temperatura zraka in relativna zračna vlažnost sta bili izmerjeni na lokaciji v vremenski postaji Davis (Davis Instruments, CA, USA). Na površini podloge je bil pritrjen termočlen, s katerim smo spremljali temperaturo na površini tik ob preizkušancih. Podatke termočlena smo zajemali s Thermofox data-logger (Scantronic Mugrauer GmbH, Germany). Meritve so potekale na Oddelku za lesarstvo, Cesta VIII/34, Ljubljana v mesecu juliju. V času meritev ni bilo padavin, povprečno so bili izpostavljeni direktnemu soncu od 10. do 14. ure (4 ure), ostali del dneva so bili na lokaciji meritev v senci.



Slika 3. Preizkušanci med izpostavitvijo sorpciji/desorpciji v solni klima komori (foto: M. Kokot).

Figure 3. Samples during exposure to sorption / desorption in a climatic chamber (photo: M. Kokot).

2.5 VREDNOTENJE IZMERJENIH PODATKOV PRI STACIONARNIH PODATKIH NAVLAŽEVANJA

2.5 EVALUATION OF MEASURED DATA FOR STATIONARY HUMIDIFICATION DATA

Z metodo vrednotenja izmerjenih podatkov smo želeli ugotoviti difuzivnost vlage 4D natisnjenih elementov in s spreminjanjem razmerja pasivne in aktivne plasti ugotoviti, kako razmerje posameznih plasti vpliva na hitrost doseženega končnega odmika in na difuzivnost vlage.

Sprememba stanja preizkušancev pri navlaževanju v klima komori z RZV 80 % in $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ je bila proučena z odzivom sistema na hipno, konstantno zunanjo motnjo. Pri tem je karakterističen prehod sistema v novo stacionarno stanje, ki ga lahko opišemo kot sistem 1. reda z diferencialno enačbo (Bučar, 2007; Straže, 2010):



Slika 4. Postavitev preizkušancev na podlogo za merjenje odmika ob izpostavitvi zunanjim vplivom z merilno opremo (levo) in preizkušanci (desno), (foto: D. Krapež Tomec).

Figure 4. Placement of samples on the measuring template and measuring the deflection when exposed to external conditions with the measuring equipment (left) and samples (right), (photo: D. Krapež Tomec).

$$G\Phi(t) = \tau \frac{dm}{dt} + m \quad (2)$$

G = stacionaren odziv sistema [g],
 $\Phi(t)$ = prehodni odziv sistema [],
 τ = časovna konstanta Tau [s],
 m = masa [g], v našem primeru odmik x [mm],
 t = čas [s].

Zgornji izraz (enačba 2) je bil preoblikovan ob predpostavki, da je raztezek ali pa kontrakcija (krčenje) materiala v linearni zvezi s spremembo mase in s tem vlažnosti materiala - namesto mase m smo pisali odmik x . Predpostavljeno je, da je diferencialno nabrekanje oz. diferencialno krčenje, tj. sprememba dimenzije glede na spremembo vlažnosti materiala konstantna na njegovem celotnem higroskopskem območju. Tako je bilo v enačbo vpeljana začetno stanje preizkušanca (x_z), stanje preizkušanca v določenem času (x_t) ter končno oz. ravnovesno stanje (x_r), ekvivalentno stacionarnemu odzivu (G), ki je doseženo po dovolj dolgem času uravnovešenja. Zgornjo enačbo lahko nato za primer hipne obremenitve v času $t = 0$, z začetnim pogojem $x = x_z$ zapišemo v obliki:

$$x_{(t)} = x_{r(končna)} + (x_{z(začetna)} - x_{r(končna)}) * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

S preoblikovanjem izraza (enačba 3) dobimo odvisnost povprečne brezdimenzijske spremembe odmika (E) od časa izpostavitve v klimi z določeno vlažnostjo:

$$\frac{x_{t(izbrana)} - x_{r(končna)}}{x_{z(začetna)} - x_{r(končna)}} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4)$$

$$E = \frac{(x_{t(izbrani)} - x_{r(končni)})}{(x_{z(začetni)} - x_{r(končni)})} \quad (5)$$

Spremenljivka (x_t) bo dosegla 63,2 % hipne obremenitve G , ko bo dosežen pogoj $t = \tau$. Končni odziv sistema je praviloma dosežen po 5-kratniku časovne konstante τ .

S spremljanjem odmika preizkušancev v posameznih časovnih intervalih so bile z logaritmiranjem izraza (enačba 5) časovne konstante izračunane po enačbi:

$$\tau = -\frac{t}{\ln\left(\frac{x_t - x_r}{x_z - x_r}\right)} \quad (6)$$

3 REZULTATI

3 RESULTS

3.1 MODUL ELASTIČNOSTI IN DIMENZIJSKA STABILNOST

3.1 MODULUS OF ELASTICITY AND DIMENSIONAL STABILITY

Sprememba oblike aktuatorjev, kot smo jih uporabili v nadaljevanju raziskave, je odvisna od uporabljenih materialov, njihovih lastnosti (modula elastičnosti, dimenzijskih sprememb ob izpostavitvi vlažni klimi) ter razmerju debelin materialov v sestavljenem aktuatorju (Le Duigou & Castro, 2017; Timoshenko, 1953), zato smo najprej določili lastnosti uporabljenih materialov.

Za vse preizkušance, testirane pri štirih vlažnostnih stanjih (20 %, 40 %, 65 % in 80 % RVZ), so bili izračunani moduli elastičnosti. Čisti PLA material je pri vseh testiranih vlažnostih izkazoval večje module elastičnosti kot lesno-plastični kompozit s 25 % deležem lesnih delcev (WPL25). Rezultat je pričakovan, saj je bil les v WPL25 dodan v obliki lesnega prahu/moke z majhnimi delci, in predvidevamo, da s tem ni imel ojačitvene vloge, temveč bolj vlogo polnila. Če bi bili dodani lesni delci v obliki vlaken, oziroma z večjim razmerjem med dolžino in debelino delcev, bi lahko izraziteje ojačali kompozit. Dodajanje delcev večjih dimenzij ter oblika vlaken pa povzroči težje 3D tiskanje, predvsem prihaja do mašenja šobe tiskalnika, potrebne so višje sile za ekstrudiranje, kar pa lahko povzroči večjo možnost napak v tisku (zastoji pri ekstrudiranju materiala, prazni prostori v tisku, neenakomeren tok materiala), pojavljanje šibkih točk ter s tem koncentracij napetosti v končnem izdelku ob hkratni nižji togosti.

Oba materiala sta dosegla najnižji modul elastičnosti po izpostavitvi v vlažni klimi RZV 80 % ter največje vrednosti v klimi z RZV 40 %, (PLA 3298 MPa, WPL25 2493 MPa). Z nižanjem RZV na 20 % so vrednosti padle, kar bi lahko kazalo na podobnost z masivnim lesom (Martikka et al., 2018). Rezultati zaradi majhnega števila preizkušancev in velikih odklonov niso statistično značilni. Ravno tako je togost padla z višanjem RZV in s tem vlažnosti kompozita. Adsorpcija vode v kompozit povzroči nabrekanje lesa, zmanjšanje njegove trdnosti ter lahko tudi zmanjšanje trdnosti vezi med (hidrofilnim) lesom in (nepolarnim) polimerom (Balatincez & Park, 1997; Kariž et al., 2018a).

Preglednica 2. Modul elastičnosti (MOE) za PLA in PLA polimer s 25 % deležem lesnih delcev (WPL25) pri štirih različnih relativnih zračnih vlažnostih (RZV).

Table 2. Modulus of elasticity (MOE) for PLA and PLA polymer with 25% of wood particle content (WPL25) at four different relative humidities (RH).

	20% RZV			40% RZV			65% RZV			80% RZV		
	MOE [MPa]	St. odklon	Vlačnost [%]	MOE [MPa]	St. odklon	Vlačnost [%]	MOE [MPa]	St. odklon	Vlačnost [%]	MOE [MPa]	St. odklon	Vlačnost [%]
PLA	2907	168	0,10	3298	149	0,31	3107	222	0,4	2834	162	0,62
WPL25	2320	206	0,59	2493	252	1,86	2238	237	2,27	2001	218	3,41

Za določene biopolimere, kot je npr. PLA, je značilna adsorpcija vlage ter s tem higroekspanzija. Za PLA filamente za 3D tiskanje tako proizvajalci priporočajo shranjevanje v zaprti embalaži z dodatnim silica gel (SiO_2) sušilnega sredstva ali občasno sušenje filameta v pečici. Dodajanje lesa oziroma drugih naravnih higroskopnih vlaken pa adsorpcijo še poveča. Meritve so pokazale, da je PLA adsorbiral vlago ob uravnovešanju v vlažnih klimah, vendar precej manj kot WPL25. Vzdolžni raztezek preizkušancev iz materiala PLA pa je bil približno 5x manjši od raztezka lesno-plastičnega kompozita s 25 % deležem lesnih vlaken (preglednica 3, 7 vzporednih preizkušancev).

Preglednica 3. Vzdolžni nabrek (RZV 80 %, T = 20 °C) ter diferencialni raztezek testiranih materialov
Table 3. Longitudinal swelling (80% RH, T = 20 °C) and differential swelling of the tested materials

Material	Vzdolžni raztezek [%]	Diferencialni raztezek v % na % spremembe RZV
PLA	0,09	0,233
WPL25	0,47	0,222

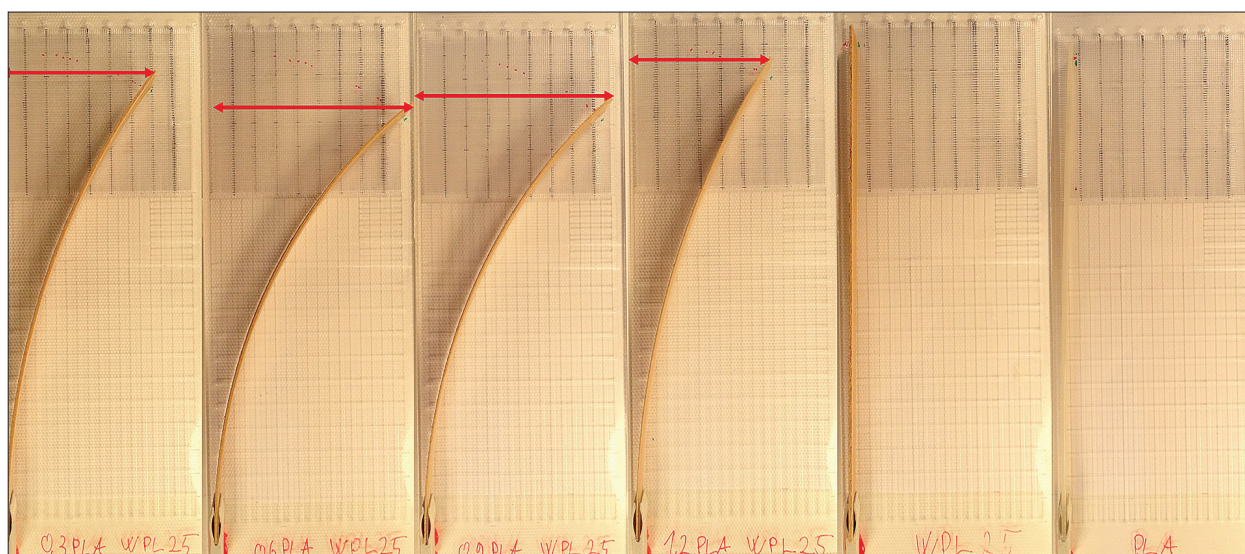
3.2 MERITVE ODKLONA ELEMENTOV, NATISNJNIH IZ DVEH RAZLIČNIH MATERIALOV

3.2 MEASUREMENTS OF DEFLECTION OF ELEMENTS, PRINTED FROM TWO DIFFERENT MATERIALS

Pri izpostavitvi elementov (sistema dveh materialov) v solni klima komori z natrijevim nitratom (NaNO_3) - RZV 80 % in T = 20 °C ter zunanji izpostavitvi preizkušancev (nihajoča RZV ter temperatura) so bili spremljani odkloni v določenih časovnih intervalih. Preizkus je pokazal, da se preizkušanci, natisnjeni iz enega materiala, t.j. čisti PLA ali čisti WPL25, na navlaževanje ne odzivajo z odklanjanjem, temveč ostajajo v začetni legi (slika 5 skrajno desna preizkušanca). Najverjetneje gre rezultat pripisati stanju, kjer se preizkušanci po celotnem prerezu enakomerno vzdolžno dimenzijsko povečujejo, s čimer pa ne pride do nastanka upogibnega momenta.

Odmik dvoslojnih preizkušancev ob koncu navlaževanja (po 168 urah v laboratorijskih pogojih v vlažni klima komori na 80 % RZV in 20 °C) je pokazal največji upogib pri aktuatorjih z debelino PLA 0,6 mm (WPL25 1,2 mm, m=0,5) in 0,9 mm (WPL25 0,9 mm, m=1) (slika 5). Rezultati so skladni s Timošenkovo teorijo (The Collected Papers of Stephen P. Timoshenko. (Book, 1953) [WorldCat.Org], n.d.).

Največji odklon je v linearni zvezi z naraščanjem mase preizkušanca med postopkom navlaževanja. Adsorpcija vlage je bila najvišja pri kompozitih z najnižjo vsebnostjo pasivne (PLA) plasti. Rezultati nakazujejo, da je zmanjšanje debeline pasivne (PLA) plasti v povezavi z opisa-



Slika 5. Maksimalni odmik preizkušancev - po 168 urah v laboratorijskih pogojih v vlažni klimi (80 % RZV, 20 °C). Preizkušanci od leve proti desni: 0,3 PLA WPL25; 0,6 PLA WPL25; 0,9 PLA WPL25; 1,2 PLA WPL25; WPL25; PLA (foto: M. Kokot).

Figure 5. Maximum curvature of the sample - after 168 hours in laboratory conditions in a humid climate (80% RH, 20 °C). Samples from left to right: 0,3 PLA WPL25; 0,6 PLA WPL25; 0,9 PLA WPL25; 1,2 PLA WPL25; WPL25; PLA (photo: M. Kokot).

	Maksimalni odmik 1 [mm]	Relativni odmik 1 [mm]	Odmik 1 v [%]	Maksimalni odmik 2 [mm]	Relativni odmik 2 [mm]	Odmik 2 v [%]
0,3 PLA WPL25	70	52	289	40	15	60
0,6 PLA WPL25	90	60	200	60	19	46
0,9 PLA WPL25	83	56	207	63	27	75
1,2 PLA WPL25	63	41	186	54	19	54
WPL25	6	6	-	2	-1	-33
PLA	8	2	33	0	0	-

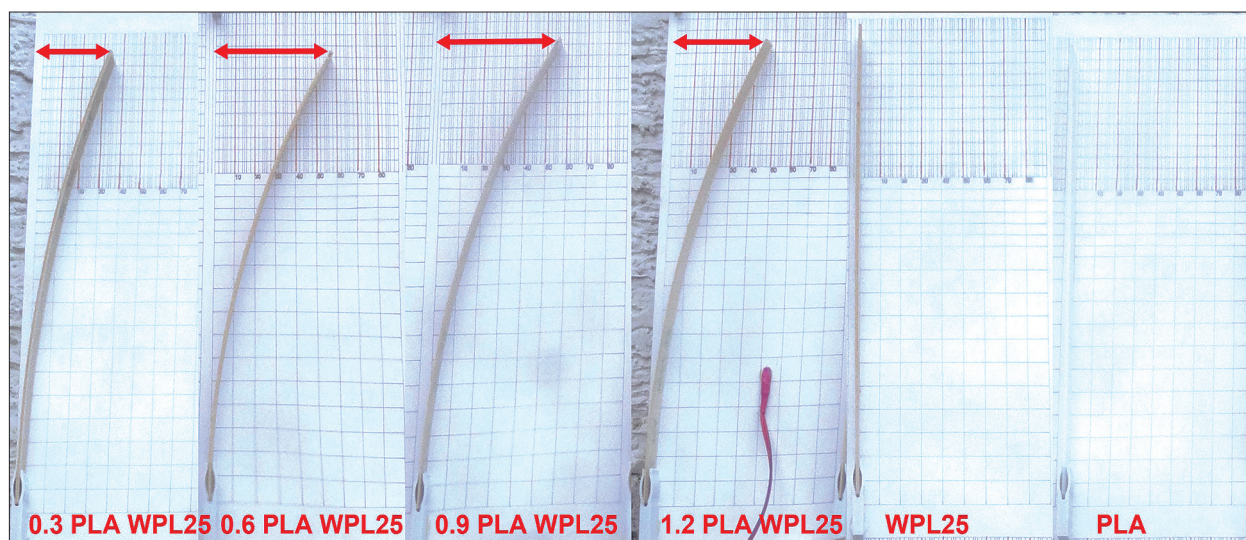
Preglednica 4. Primerjava maksimalnih in relativnih odklovov ter odklovov v % pri navlaževanju dvoslojnih aktuatorjev v **1**) klimatski komori (RZV 80 %, T = 20 °C) ter **2**) pri navlaževanju pri zunanji izpostavitvi (RZV 95 %, T = 16,2 °C, v senci, ob 7. uri zjutraj).

Table 4. Comparison of maximum and relative deflections and deflections in % when humidifying two-layer actuators in **1**) climatic chamber (80% RH, T = 20 °C) and **2**) when humidifying at external exposure (95% RH, T = 16.2 °C, in the shade, at 7 am).

nim povečanjem poroznosti (Kariž et al., 2018b) higroskopne plasti (WPL25), učinkovita strategija za zmanjšanje negativnih učinkov visoke upogibne togosti pri aktiviranju, hkrati pa poveča izmenjavo vlage in s tem odzivnost (preglednica 4).

Maksimalen odmik dvoslojnih preizkušancev pri zunanji izpostavitvi je bil zabeležen ob 6. uri zjutraj (90 % RZV, 16,3 °C, brez direktne insolaci-

je). Skladno z laboratorijskim navlaževanjem so imeli tudi pri zunanji izpostavitvi največji odklon aktuatorji z debelino PLA 0,6 mm (WPL25 1,2 mm, m=0,5) in 0,9 mm (WPL25 0,9 mm, m=1) (slika 5 in slika 6).



Slika 6. Maksimalni odklik preizkušancev – pri zunanji izpostavitvi ob 6. uri zjutraj (90 % RZV, 16,3 °C) (foto: D. Krapež Tomec).

Figure 6. Maximum curvature of samples at external exposure at 6 o'clock in the morning (90% RH, 16.3 °C) (photo: D. Krapež Tomec).

3.3 ANALIZA HITROSTI ODZIVA 4D NATISNJNIH ELEMENTOV

3.3 RESPONSE ANALYSIS OF 4D-PRINTED ELEMENTS

Dobljene meritve odklona in spremembe mase 4D natisnjenih elementov so bile dodatno analizirane z vidika dinamike sistema. Iz dobljenih meritev je bila izračunana hitrost odziva sistema na spremembo klime v okolici. To je bilo izračunano za upogibni odklon (dx), ki je bil proučevan

brezdimenzijsko (E) z določanjem časovne konstante sistema (τ) (enačba 6).

Rezultati nakazujejo, da se elementi hitreje upogibno odklonijo, kadar imajo večji delež pasivnega sloja (PLA) (preglednica 5). Petkratnik časovnega odziva (τ , Tau (h)) predstavlja čas do končnega odziva sistema. Podrobnejša analiza dinamike sorpcije je opisana v raziskavi Krapež Tomec in sod. (Krapež Tomec et al., 2021).

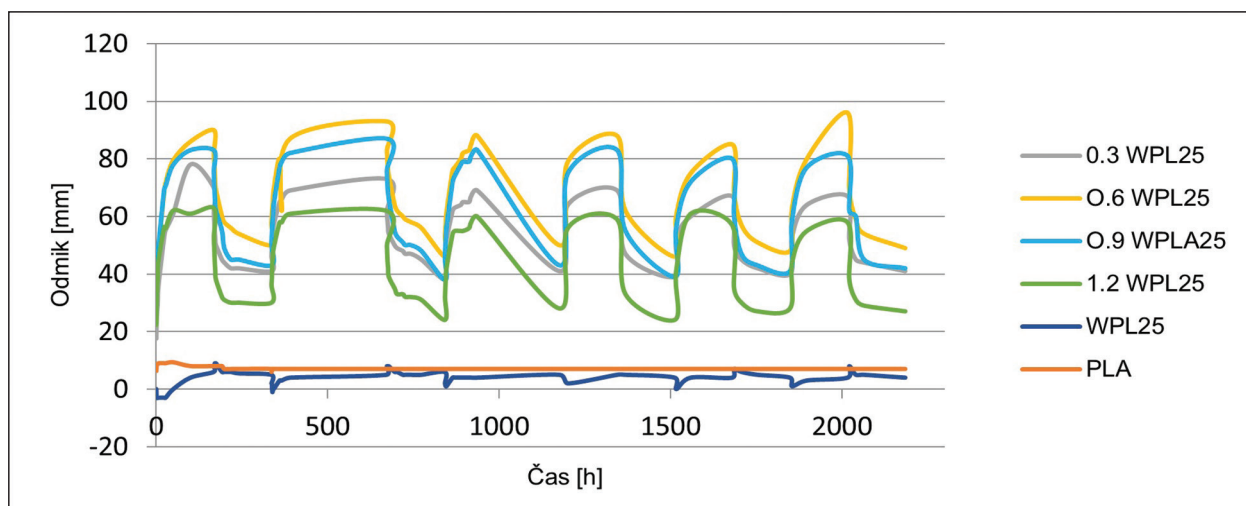
Preglednica 5. Delež in razmerje med pasivno in aktivno plastjo, časovni odziv (τ , Tau (h)) pri navlaževanju ter pri sušenju posameznih dvoslojnih aktuatorjev v laboratorijskih pogojih

Table 5. Proportion and ratio between passive and active layers, time constant (τ , Tau (h)) during humidification and drying of individual two-layer actuators under laboratory conditions.

	PLA t_p [mm]	WPL25 t_a [mm]	Razmerje m	Navlaževanje Tau [h]	Sušenje Tau [h]
0,3 PLA WPL25	0,3	1,5	0,2	20,1	10,1
0,6 PLA WPL25	0,6	1,2	0,5	20,9	9,5
0,9 PLA WPL25	0,9	0,9	1,0	15,9	9,3
1,2 PLA WPL25	1,2	0,6	2,0	7,0	4,5
WPL 25	0,0	1,0	0,0	2,5	1,6
PLA	1,0	0,0	0,0	-	-

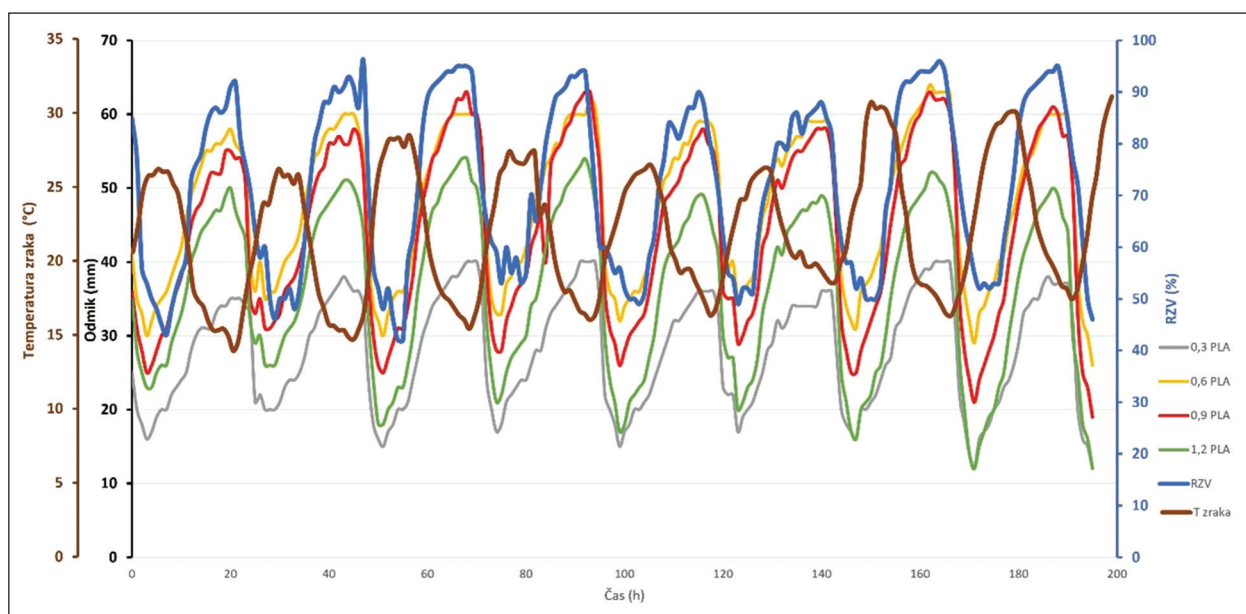
Sliki 7 in 8 prikazujeta reverzibilnost gibanja v več zaporednih ciklih sorpcije/desorpcije. Pri izpostavitvi v solni klima komori (slika 7), je opazno zmanjšanje amplitude ukrivljenosti, ki je kot poročata Le Duigou in Castro (2015), verjetno posledica pojava poškodb, kot je razslojitev (debonding – ang.) na vmesnikih med vlakni in matrico in delitev snopov vlaken (fiber bundle division – ang.).

Za oceno učinkovitosti dvomaterialnih aktuatorjev so bili preizkušanci 7 dni podvrženi zunanji izpostavitvi. Ob razširitvi vplivnih vremenskih dejavnikov (temperatura, UV svetloba in relativna zračna vlažnost) in dnevno-nočnega ritma so preizkušanci prav tako dosegali sorpcijske in desorpcijske cikle (slika 8, slika 9, slika 10).



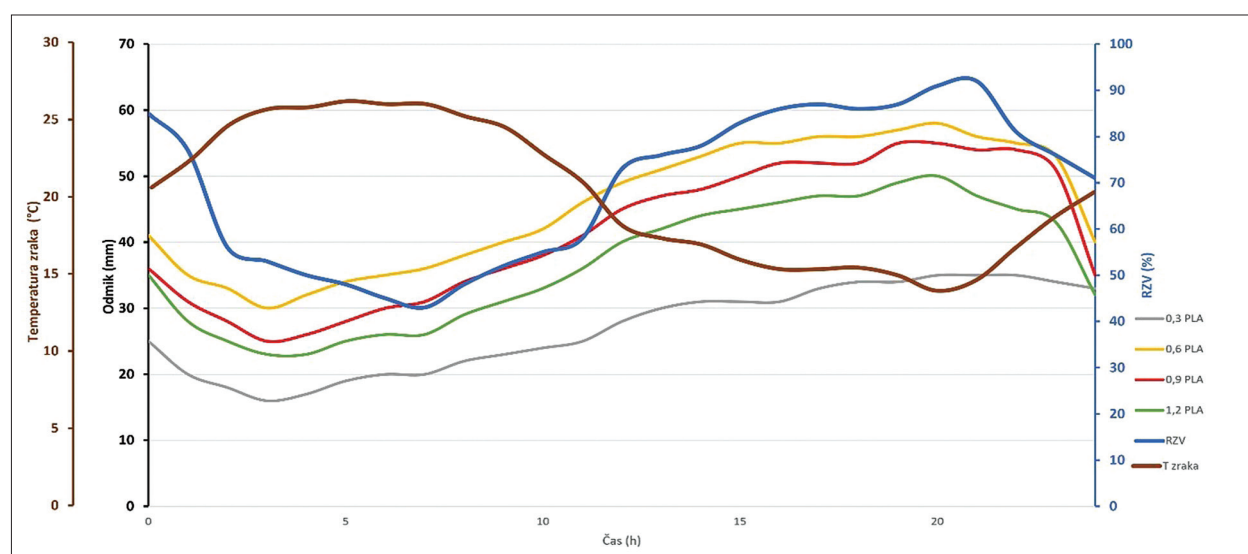
Slika 7. Odmiki posameznih dvoslojnih aktuatorjev med cikli navlaževanja in sušenja (6 ciklov) v laboratorijskih solnih klima komorah.

Figure 7. Deflection of the individual two-layer actuators during humidification and drying cycles (6 cycles) in a laboratory salt climate chambers.



Slika 8. Odmik preizkušancev s temperaturo in RZV (zunanja izpostavitve).

Figure 8. Deflection of samples with temperature and RH (external exposure).



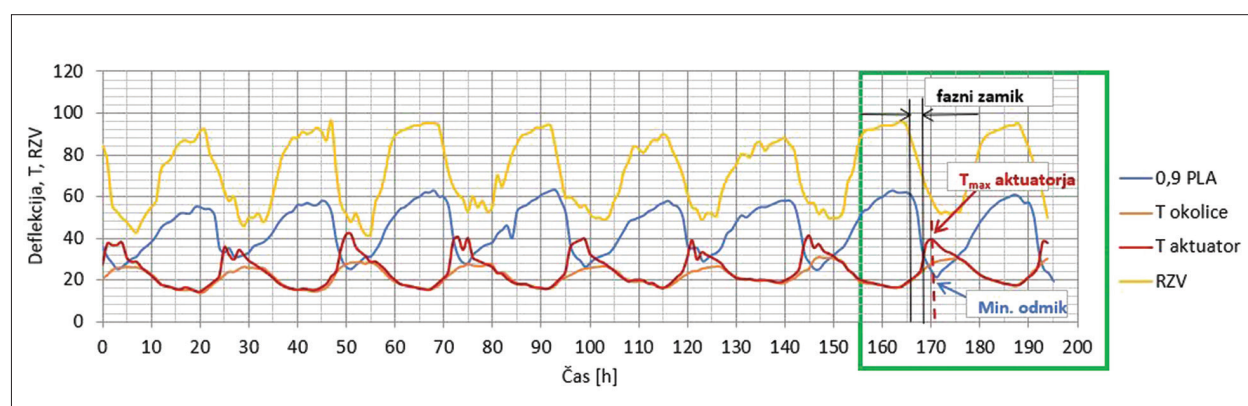
Slika 9. Odmik preizkušancev s temperaturo in RZV (zunanja izpostavitve) v 24 urah.

Figure 9. Deflection of samples with temperature and RH (external exposure) within 24 hours.

Dinamika navlaževanja in sušenja preizkušancev pri zunanji izpostavitvi izkazuje podobne značilnosti kot dinamika preizkušancev v klimatski komori (preglednica 5) – navlaževanje je približno dvakrat počasnejše od sušenja. Pri izpostavitvi preizkušancev na prostem je bil običajno čas od najmanjšega do največjega odmika 15-17 h, od največjega do najmanjšega odmika pa 6-9 h (slika 9).

Poleg amplitude in odzivnega časa sta trajnost aktuatorjev in stabilnost aktiviranja v daljšem časovnem obdobju ključna dejavnika za njihovo praktično uporabo. V pretekli raziskavi (Rüggeberg

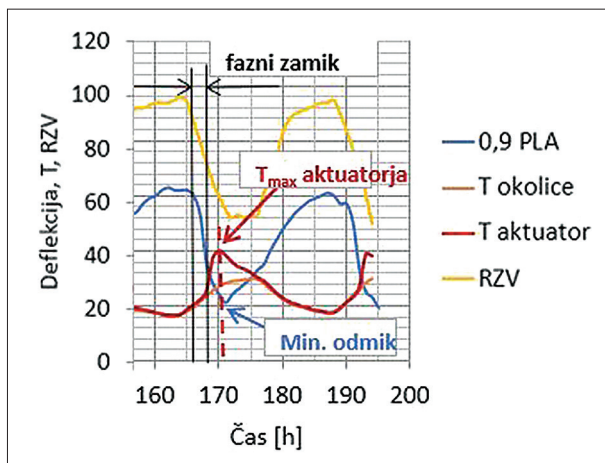
& Burgert, 2015) poročajo, da prihaja poleg velikih dnevnih nihanj amplitude tudi do sezonskih nihanj. V poznopoletnih in jesenskih mesecih so opazili postopno povečanje povprečne relativne vlažnosti in postopno nižanje povprečne temperature. Te sezonske spremembe klime v zmernih geografskih pasovih povzročajo višjo vsebnost vlage v lesu in tako vplivajo na ukrivljenost dvoslojnih materialov, ki se postopoma bolj upogibajo. Kljub zaznamnim površinskim poškodbam (razpoke) aktuatorjev se je amplituda aktiviranja sčasoma le nekoliko zmanjšala.



Slika 10. Odmik preizkušanca 0,9 PLA WPL25, zunanja temperatura in temperatura aktuatorja ter RZV v odvisnosti od časa zunanje izpostavitve. Zeleni pravokotnik označuje del grafa, ki je na Sliki 11 povečan.

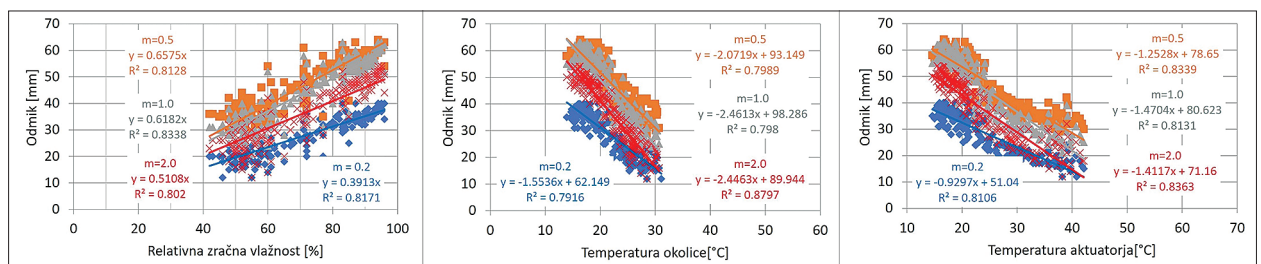
Figure 10. Deflection of sample 0.9 PLA WPL25, external temperature, temperature of the actuator and RH as a function of the duration of external exposure. The green rectangle indicates the part of the graph that is magnified in Figure 11.

Relativna zračna vlažnost zraka je bila pričakovano najvišja pri dnevnem temperaturnem minimumu, kjer so aktuatorji dosegali tudi najvišje odklone od izhodiščne lege (slika 10, slika 11). V taki legi so aktuatorji vztrajali še krajši čas, ko je sicer relativna zračna vlažnost v okolici že pričela padati zaradi dviganja temperature zraka v okolici. Desorpcija vlage, sprva le s površine aktuatorjev, ob prisotnem vlažnostnem gradientu v bikompozitu ne povzroča takojšnjega značilnega zmanjševanja upogibnega momenta. Upadanje odklona aktuatorja se posledično zgodi z zakasnitvijo, t.j. s faznim zamikom. Slednji je povprečno znašal 2 uri, večji pa je bil pri aktuatorjih z večjim deležem aktivne komponente.



Slika 11. Fazni zamik (najvišja RZV, ki ji z zamikom sledi največji odmik aktuatorja) ter maksimalna temperatura aktuatorja, ki ji z zamikom sledi minimalni odmik aktuatorja.

Figure 11. Phase lap (maximum RH followed by the maximum actuator curvature with a delay) and the maximum actuator temperature followed by the minimum actuator deflection.



Slika 12. Koefficienti premic za odmik aktuatorja v odvisnosti od RZV / temperature okolice / temperature aktuatorja.

Figure 12. Coefficients for actuator deflection depending on RH / ambient temperature / actuator temperature.

Preglednica 6. Fazni zamik za posamezen aktuator. Oznaka »m« označuje razmerje debelin aktivnega in pasivnega sloja.

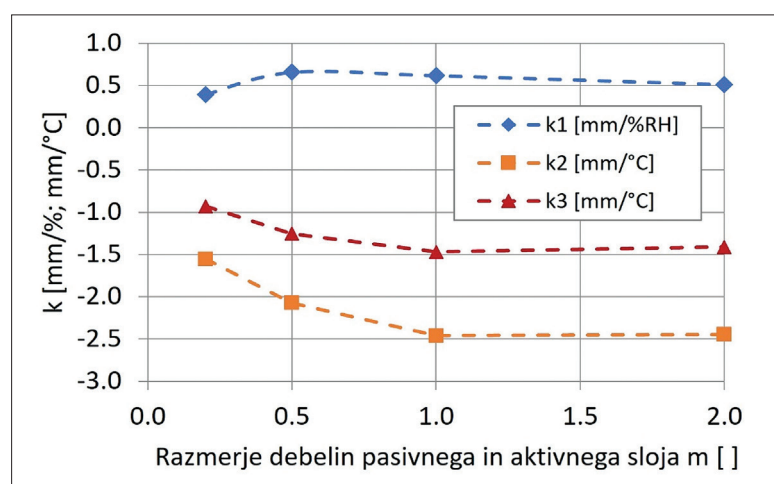
Table 6. Phase lap for an individual actuator. Label "m" indicates the thickness ratio of the active and passive layers.

Povprečni fazni zamik [h]			
0,3 PLA WPL25	0,6 PLA WPL25	0,9 PLA WPL25	1,2 PLA WPL25
m = 0,2	m = 0,5	m = 1,0	m = 2,0
2,5	2,3	1,4	1,7

Rezultati kažejo, da se intenziven prehod v sušenje dvoslojnega kompozita ter s tem manjšanje odklona zgodi ob naraščanju temperature aktuatorja nad temperaturo okolice, kot posledica direktne insolacije (UV sevanje) (slika 11). Iz aktuatorjev v okolico se v tem primeru vzpostavlja dodatni toplotni tok in inducira termodifuzijo vlage. Postopek sušenja je posledično bistveno krajši kot postopek navlaževanja aktuatorjev. Rezultati kažejo, da se sušenje aktuatorjev zaključi kmalu po doseženi največji temperaturni razliki med aktuatorjem in okolico. UV radiacija je tako zaznana kot dodatno gonilo aktuatorja.

Do podobnih ugotovitev sta prišla (Rüggeberg & Burgert, 2015), namreč, da za ukrivljenost obstaja fazni zamik, vendar je zanimivo, da je ta fazni zamik manjši od zamika vsebnosti vlage v lesu (zmanjšanje z 1,6 ure na 0,6 ure), kar pomeni, da je sprememba ukrivljenosti opazna pred kakršno koli merljivo spremembo vlažnosti lesa.

Če odklone aktuatorjev primerjamo in koreliramo z relativno zračno vlažnostjo v okolici (slika 8), lahko tudi pri izpostavitvi v zunanjih pogojih preverimo njihovo dinamiko odziva. Enako primerjavo lahko izvedemo tudi glede na temperaturo aktua-



Slika 13. Diferencialni odmik aktuatorja glede na spremembo relativne zračne vlažnosti, temperaturo okolice in temperaturo aktuatorja v odvisnosti od razmerja debelin pasivnega in aktivnega sloja v dvomaterialnem kompozitu (m).

Figure 13. Differential deflection of the actuator depending on the change in relative air humidity, ambient temperature and actuator temperature as a function of the thickness ratio of the passive and active layers in the bi-material composite (m).

torjev in okolice. Z izračunanimi smernimi koeficienti premic doseženega odmika aktuatorjev lahko izračunamo diferencialno spremembo odmika, t.j. glede na odstotek spremembe okoljske zračne vlažnosti ali pa glede na dvig temperature (slika 12).

Na odstotek spremembe RZV se najmočnejše odzivata 0,6PLA WPL25 (m=0,5) in 0,9PLA WPL25 (m=1,0). Na stopinjo spremembe temperature v okolici ter na stopinjo spremembe temperature na aktuatorju pa se najmočnejše odzoveta 0,9PLA WPL25 (m=1,0) in 1,2PLA WPL25 (m=2,0) (slika 13).

Na podlagi Timošenkove teorije, ki je že bila uveljavljena za higroskopske dvoslojne materiale (bilayers – ang.), mora biti debelina aktivne plasti večja od debeline pasivne plasti (Le Duigou et al., 2017). Zmanjšanje debeline pasivne plasti v povezavi s povečanjem poroznosti higroskopske (aktivne) plasti je učinkovita strategija za zmanjšanje negativnih učinkov visoke upogibne togosti na aktiviranje, hkrati pa poveča izmenjavo vlage in s tem odzivnost.

4 RAZPRAVA IN SKLEPI

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Dodatek lesa v PLA ustvari higroskopsko aktiven kompozit, ki zagotavlja deformacijo med adsorpcijo in desorpcijo v spremenljivih klimatskih pogojih. Ko je vzorec dovolj tanek, se material odzove z razbremenitvijo napetosti z elastično deformacijo, to je s krčenjem in raztezanjem materiala. Obratno lahko počasnejšo dinamiko dvoslojnih kompozitov dosegamo z večanjem dimenzij in nižanjem higroskopsnosti.

Kot je bilo zapisano v raziskavah Le Duigouja in soavtorjev (2017) na higroskopske lastnosti (koeficienti sorpcije in nabrekanja) biokompozitov vpliva narava vlaken, to je njihova mikrostruktura (mikrofibrilarni kot celuloze in velikost lumna) ter biokemična sestava (pektini, hemiceluloze in lignin).

Oba parametra, največja ukrivljenost in prirast mase preizkušanca sta nedvomno povezana s higroskopsnostjo lesa, ki sta opredeljena kot sposobnost izmenjave vlage z okoljem s postopki adsorpcije in desorpcije (Hoadley, 2000). Dimenzijske spremembe, ki jih povzročata prisotnost proste vode, so običajno zanemarljive, zaradi česar je količina vezane vode glavni dejavnik, ki vpliva na nabrekanje (higroekspanzijo) (Skaar, 1988).

4D tiskanje izvira iz 3D tiskanja, vendar presega 3D tiskanje. Čeprav 4D tiskanje temelji predvsem na 3D tisku in postaja novo področje dodajalnih tehnologij, predmeti niso več statični in jih je mogoče spremeniti v zapletene strukture s spreminjanjem velikosti, oblike, lastnosti in funkcionalnosti pod zunanjimi dražljaji, kar naredi 3D tiskanje živo (Chu et al., 2020).

Dvoslojni sistemi z lesnimi delci so še posebej primerni za pogon zunanjih konvertibilnih elementov, saj dnevna sprememba relativne zračne vlažnosti, ki jo poganja sončna energija, ostaja vir energije in se aktiviranje kljub vremenskim vplivom (oz. naravnemu staranju materiala) nadaljuje. Zahtev za aktiviranje ni potrebno vgraditi v material s pomočjo zapletenega proizvodnega procesa, temveč so vanj že neločljivo vključene (Rüggeberg & Burgert, 2015).

Ker je dinamika higromorfizma hitrejša pri kompozitih z manjšim deležem aktivne plasti, je

potrebno pri uporabi dvomaterialnih aktuatorjev najti kompromis med hitrostjo in amplitudo odmika (Krapež Tomec et al., 2021).

Dvomaterialni aktuatorji iz PLA in les-PLA kompozita imajo potencial za izdelke s spreminjanjem oblike, ki jo povzroča higroskopnost. Študija potrjuje pomen analize različnih higromehanskih vrednosti dvomaterialnih kompozitov za razumevanje in predvidevanje njihovega higromorfizma v različnih izpostavitvah (zunanji in laboratorijski pogoji). Upoštevati moramo, da so ponovljivost, natančnost in optimizacija parametrov tiskanja in parametrov pri proizvodnji filamentov bistvenega pomena. Raziskava je pokazala, da se kombinacija PLA z les-PLA materiali lahko uporablja za 3D-natisnjene aktuatorje, ki spreminjajo obliko v izmeničnih klimatskih pogojih. Vsekakor pa so potrebne še nadaljnje raziskave za ovrednotenje dolgoročnega vedenja aktuatorjev v različnih aplikacijah.

5 POVZETEK

5 SUMMARY

Three-dimensional printing with wood-plastic composites is already well known, and the use of wood in four-dimensional (4D) printing is being increasingly explored. 4D printing is an evolving area of additive technologies where, with the right design of 3D printing and the use of appropriate materials, we can create products that change shape and form dynamic structures in response to appropriate external triggers. In 4D printing, the hygroscopicity of wood – usually understood as a disadvantage – can be used as a positive feature to design products that change shape according to changes in climatic conditions, especially humidity. The shape-memory effect can be used in artificial bioinspired actuators and has become a new field of research.

In this study, the basic mechanical properties and dimensional stability of 3D-printed samples made of two different materials were studied under changing climatic conditions. Pure PLA and wood-plastic composites, with a wood content of 25%, were used.

The samples were first conditioned in a climate with 20% RH and a temperature of 20 °C and then moistened in a climate with 80% RH and a temperature of 20 °C. It was found that the samples

increased in size (swelled) and the amount of adsorbed water varied depending on the material. The WPL25 filament was made in a laboratory with a specific amount of wood. No significant dimensional changes occurred with the PLA material.

The dimensional stability test also sought to determine if the sample could be reduced to the original dimensions by drying in a climate with 20% RH and a temperature of 20 °C (equilibrium conditions). The test confirmed that the samples gradually decrease in size during drying and the results were very similar to those obtained before humidification, although they were never fully achieved. Moreover, for wood the difference between humidifying (adsorption) and drying (desorption) is normally noted, in a form of hysteresis.

The modulus of elasticity was determined for the samples on the Zwick / Roell Z005 testing machine. The results showed that pure PLA material had the best mechanical properties (highest modulus of elasticity), followed by WPL25 material. An interesting finding was that the tested samples reached the highest values after being exposed to a climate with a RH of 40%. Thus, the samples of both materials reached the lowest values after being exposed to a humid climate with a RH of 80%.

After determining the properties of each material, bimaterial samples were printed from two different materials – the principle of 4D printing with a change in climate to trigger the shape change. The combination of passive (PLA) and active (WPL25) layers in one sample to produce products with a changing shape was used.

After 3D printing, the samples were conditioned/equilibrated and then exposed in a climate chamber with a RH of 80% and a temperature of 20 °C. The curvature/deflection of the samples was measured for 168 hours (7 days). The same procedure was used when the samples were exposed to a dry climatic chamber with a RH of 20% and a temperature of 20 °C for 168 hours. The alternation between humid and dry climates was continued for several weeks.

The samples were also exposed outdoors, where the amplitude of curvature was monitored due to changes in relative humidity, temperature and UV radiation in the outdoor environment. The deflection of the bilayers was tracked every hour, for 8 days (day and night).

For both types of exposure (climatic chamber and outdoor), the maximum deflection was obtained with the combination in the ratio of 2:4 to 3:3 (PLA:WPL25) (Figure 9 and Figure 10).

The incorporation of wood into a material for 3D printing not only affects the aesthetic appearance of the finished products, but the addition of wood to the material also affects its properties. Materials that are able to respond independently to changes in the environment in this way can be controlled in their response or change by combining them with other materials and altering the shapes.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Avtorji se zahvaljujemo za finančno podporo ARRS (financiranje raziskovalnega programa št. P4-0015, „Les in lignocelulozni kompoziti“ ter LesGoBio (CRP V4-2016 »Možnosti rabe lesa listavcev v slovenskem biogospodarstvu«).

LITERATURA IN VIRI

LITERATURE

- Ayrlimis, N., Kariz, M., Kwon, J. H., & Kitek Kuzman, M. (2019). Effect of printing layer thickness on water absorption and mechanical properties of 3D-printed wood/PLA composite materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5–8), 2195–2200. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03299-9>
- Balatinecz, J. J., & Park, B. D. (1997). The effects of temperature and moisture exposure on the properties of wood-fiber thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 10(5), 476–487. DOI: <https://doi.org/10.1177/089270579701000504>
- Chen, D., Liu, Q., Han, Z., Zhang, J., Song, H. L., Wang, K., ... & Shi, Y. (2020). 4D Printing Strain Self-Sensing and Temperature Self-Sensing Integrated Sensor-Actuator with Bioinspired Gradient Gaps. *Advanced Science*, 7(13), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.202000584>
- Cheng, T., Thielen, M., Poppinga, S., Tahouni, Y., Wood, D., Steinberg, T., Menges, A., & Speck, T. (2021). Bio-Inspired Motion Mechanisms: Computational Design and Material Programming of Self-Adjusting 4D-Printed Wearable Systems. *Advanced Science*.
- Cheng, T., Wood, D., Wang, X., Yuan, P. F., & Menges, A. (2021). Programming material intelligence: an additive fabrication strategy for self-shaping Biohybrid components. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12413 LNAI, 36–45. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-64313-3_5
- Chu, H., Yang, W., Sun, L., Cai, S., Yang, R., Liang, W., Yu, H., & Liu, L. (2020). 4D printing: A review on recent progresses. In *Micromachines* (Vol. 11, Issue 9). MDPI AG. DOI: <https://doi.org/10.3390/M11090796>
- Correa, D., Papadopoulou, A., Guberan, C., Jhaveri, N., Reichert, S., Menges, A., & Tibbits, S. (2015). 3D-Printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), 106–116. DOI: <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0022>
- Correa, D., Poppinga, S., Mylo, M. D., Westermeier, A. S., Bruchmann, B., Menges, A., & Speck, T. (2020). 4D pine scale: Biomimetic 4D printed autonomous scale and flap structures capable of multi-phase movement. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 378(2167). DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0445>
- El-Dabaa, R., & Salem, I. (2021). 4D printing of wooden actuators: encoding FDM wooden filaments for architectural responsive skins. *Open House International*, ahead-of-print(ahead-of-print). DOI: <https://doi.org/10.1108/OHI-02-2021-0028>
- Erb, R. M., Sander, J. S., Grisch, R., & Studart, A. R. (2013). Self-shaping composites with programmable bioinspired microstructures. *Nature Communications* 2013 4:1, 4(1), 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms2666>
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- Kariž, M., Šernek, M., & Kitek Kuzman, M. (2018a). Effect of humidity on 3d-printed specimens from wood-pla filaments.
- Kariž, M., Šernek, M., Obučina, M., & Kuzman, M. K. (2018b). Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. *Materials Today Communications*, 14, 135–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2017.12.016>
- Krapež Tomec, D., Straže, A., Haider, A., & Kariž, M. (2021). Hygro-morphic Response Dynamics of 3D-Printed Wood-PLA Composite Bilayer Actuators. *Polymers*, 13, 3209.
- Le Duigou, A., & Castro, M. (2015). Moisture-induced self-shaping flax-reinforced polypropylene biocomposite actuator. *Industrial Crops and Products*, 71, 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.077>
- Le Duigou, A., & Castro, M. (2017). Hygromorph BioComposites: Effect of fibre content and interfacial strength on the actuation performances. *Industrial Crops and Products*, 99, 142–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.004>
- Le Duigou, A., Castro, M., Bevan, R., & Martin, N. (2016). 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality. *Materials & Design*, 96, 106–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.02.018>
- Le Duigou, A., Requile, S., Beaugrand, J., Scarpa, F., & Castro, M. (2017). Natural fibres actuators for smart bio-inspired hydro-

- morph biocomposites. *Smart Materials and Structures*, 26(12), 125009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa9410>
- Le Duigou, A., Correa, D., Ueda, M., Matsuzaki, R., & Castro, M. (2020). A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites. In *Materials and Design* (Vol. 194). Elsevier Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108911>
- Le Duigou, A., Requile, S., Beaugrand, J., Scarpa, F., & Castro, M. (2017). Natural fibres actuators for smart bio-inspired hygromorph biocomposites. *Smart Materials and Structures*, 26(12), 125009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa9410>
- Manen, T. van, Janbaz, S., & Zadpoor, A. A. (2017). Programming 2D/3D shape-shifting with hobbyist 3D printers. *Materials Horizons*, 4(6), 1064–1069. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7MH00269F>
- Martikka, O., Kärki, T., & Wu, Q. L. (2018). Mechanical Properties of 3D-Printed Wood-Plastic Composites. *Key Engineering Materials*, 777, 499–507.
- Rayate, A., & Jain, P. K. (2018). A Review on 4D Printing Material Composites and Their Applications. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 20474–20484. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2018.06.424>
- Reichert, S., Menges, A., & Correa, D. (2015). Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness. *Computer-Aided Design*, 60, 50–69. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.010>
- Rüggeberg, M., & Burgert, I. (2015). Bio-Inspired Wooden Actuators for Large Scale Applications. *PLOS ONE*, 10(4), e0120718. DOI: <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0120718>
- Ryan, K. R., Down, M. P., & Banks, C. E. (2021). Future of additive manufacturing: Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications. *Chemical Engineering Journal*, 403, 126162. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.126162>
- Timoshenko, S. P. (1953). *The Collected Papers of Stephen P. Timoshenko*. (Book, 1953) [WorldCat.org]. (n.d.). Retrieved June 10, 2021, from <https://www.worldcat.org/title/collected-papers-of-stephen-p-timoshenko/oclc/472247871>
- Vazquez, E., Randall, C., & Duarte, J. P. (2019). Shape-changing Architectural Skins A Review on Materials, Design and Fabrication Strategies and Performance Analysis. *Journal of Facade Design and Engineering*, 7(2), 93–114. DOI: <https://doi.org/10.7480/jfde.2019.2.3877>
- Zhou, J., & Sheiko, S. S. (2016). Reversible shape-shifting in polymeric materials. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 54(14), 1365–1380. DOI: <https://doi.org/10.1002/polb.24014>