

**UNIVERZA V LJUBLJANI**

Fakulteta za strojništvo

**Metoda za sočasno brezkontaktno merjenje  
modula elastičnosti in temperaturnega  
razteznostnega koeficiente 3D natisnjениh  
struktur**

Magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje  
Strojništvo

**Gašper Krivic**

Ljubljana, avgust 2022







**UNIVERZA V LJUBLJANI**

Fakulteta za strojništvo

**Metoda za sočasno brezkontaktno merjenje  
modula elastičnosti in temperaturnega  
razteznostnega koeficiente 3D natisnjeneih  
struktur**

Magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje  
Strojništvo

**Gašper Krivic**

Mentor: prof. dr. Janko Slavič

Ljubljana, avgust 2022





## PRIJAVA TEME ZAKLJUČNEGA DELA

**Študent:** Gašper Krivic

**Študijski program:** Magistrski študijski program druge stopnje Strojništvo - Razvojno raziskovalni program

**Številka teme zaključnega dela:** MAG II/1138

**Naslov teme zaključnega dela v slovenskem jeziku:** Metoda za sočasno brezkontaktno merjenje modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficijenta 3D natisnjenih struktur

**Naslov teme zaključnega dela v angleškem jeziku:** An experimental method for simultaneous non-contact identification of elastic modulus and coefficient of thermal expansion in 3D printed materials

### Dispozicija zaključnega dela:

Z razvojem 3D tiska so se za izdelavo mehkih aktuatorjev uveljavili novi materiali, postopek izdelave pa je postal hitrejši, enostavnejši in cenejši. Tako izdelani elektrotermični mehki aktuatorji, ki se odzivajo na toploto generirano z uporovnim grelcem, so zaradi svoje fleksibilnosti in prilagodljivosti postali zanimivi na področju mehatronskih in robotskeh sistemov.

Večina aplikacij v mehki robotiki uporablja bimorfni tip termoaktuatorja. Ta temelji na upogibni deformaciji pri spremembah temperature zaradi razlik v temperaturnem razteznostnem koeficientu (TRK) med plastmi različnih materialov. Velikost deformacije in sile, ki karakterizirata doseg in nosilnost mehkega aktuatorja, sta povezani z modulom elastičnosti in TRK-om uporabljenih materialov. Poznavanje teh materialnih lastnosti je tako ključno za vrednotenje lastnosti tovrstnih aktuatorjev.

Večina uveljavljenih eksperimentalnih testov za določevanje modula elastičnosti in TRK-a 3D tiskanih struktur uporablja dragocenjo opremo, ki težko omogoča nadgradnjo eksperimenta še z drugo merjeno količino. Obstojče metode zato ne omogočajo hitre karakterizacije želenih materialnih lastnosti. V okviru te naloge je treba razviti brezkontaktno eksperimentalno metodo za sočasno določevanje modula elastičnosti preko identifikacije lastne frekvence in TRK-a z metodo korelacije digitalnih slik.

**Mentor:** prof. dr. Janko Slavič

**Datum odobrene teme:** 08.07.2022



**Opomba:** Zaključno delo je treba oddati v jezikovno in terminološko pravilnem slovenskem jeziku. Rok za oddajo zaključnega dela v informacijski sistem VIS je šest mesecev od odobrene teme.



## **Zahvala**

---

Najprej bi se rad zahvalil mentorju prof. dr. Janku Slaviču za vso znanje in pomoč brez katere ta naloga ne bi nastala. Zahvalil bi se tudi celotnemu kolektivu laboratorija LADISK za pomoč in ideje pri izvedbi eksperimenta.

Za vso pomoč, podporo in potrpljenje ob študiju in magistrski nalogi sem hvaležen svojim prijateljem, ožji in širši družini ter partnerki.



Spodaj podpisani/-a Gašper Krivic študent/-ka Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, z vpisno številko 23202098, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Metoda za sočasno brezkontaktno merjenje modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficenta 3D natisnjениh struktur,

IZJAVLJAM,

1. \* a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;  
b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. da soglašam z uporabo elektronske oblike pisnega zaključnega dela študija za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija;
8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V Ljubljani, 4. 8. 2022

Podpis avtorja/-ice: 

\* Obkrožite varianto a) ali b).



# Izvleček

---

UDK 539.3:539.52:004.9(043.2)

Tek. štev.: MAG II/1138

## Metoda za sočasno brezkontaktno merjenje modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficiente 3D natisnjениh struktur

Gašper Krivic

Ključne besede: elektrotermični mehki aktuatorji  
3D tisk  
ortotropne materialne lastnosti  
modul elastičnosti  
temperaturni razteznostni koeficient

V zadnjem času se za 3D tisk uveljavljajo alternativni kompozitni materiali, katerih lastnosti so še precej neraziskane. V nalogi je predstavljena brezkontaktna eksperimentalna metoda za sočasno določevanje modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficiente (TRK) 3D natisnjenih struktur. Modul elastičnosti določimo iz lastne frekvence strukture, medtem ko TRK določimo iz meritev temperature s termokamero in meritev deformacij z metodo korelacije digitalnih slik. Uporaba metode je prikazana za identifikacijo ortotropnih materialnih lastnosti PLA in kompozitnega materiala iz PLA z dodatkom lesnih delcev.



# **Abstract**

---

UDC 539.3:539.52:004.9(043.2)

No.: MAG II/1138

## **An experimental method for simultaneous noncontact identification of elastic modulus and coefficient of thermal expansion in 3D printed materials**

Gašper Krivic

Key words: soft electrothermal actuators  
3D printing  
orthotropic material properties  
elastic modulus  
coefficient of thermal expansion

Recently, alternative composite materials have been promoted for 3D printing, but their properties are still largely unexplored. This thesis presents a non-contact experimental method for the simultaneous determination of elastic modulus and coefficient of thermal expansion (CTE) in 3D printed materials. The elastic modulus is obtained from the natural frequency of the structure, while the CTE is obtained from temperature measurements with a thermal camera and strain measurements with the digital image correlation method. The application of the method is demonstrated for the identification of the orthotropic material properties of PLA and a composite material made of PLA with the addition of wood particles.



# Kazalo

---

Kazalo slik . . . . .	xv
Kazalo preglednic . . . . .	xvii
Seznam uporabljenih simbolov . . . . .	xix
Seznam uporabljenih okrajšav . . . . .	xxi
<b>1 Uvod . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Ozadje problema . . . . .	1
1.2 Cilji naloge . . . . .	1
<b>2 Teoretične osnove in pregled literature . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1 Mehki aktuatorji . . . . .	3
2.1.1 Elektrotermični mehki aktuatorji . . . . .	4
2.1.1.1 Bimorfni tip . . . . .	5
2.2 3D tisk . . . . .	6
2.2.1 Modeliranje s taljenim nanosom . . . . .	7
2.2.2 Materialne lastnosti 3D natisnjene struktur . . . . .	9
2.2.2.1 Ortotropni materialni model . . . . .	10
2.3 Modul elastičnosti . . . . .	12
2.3.1 Eksperimentalne metode merjenja modula elastičnosti . . . . .	13
2.3.1.1 Euler–Bernoullijeva teorija nosilcev . . . . .	14
2.3.1.2 Timoshenko–Ehrenfestova teorija nosilcev . . . . .	15
2.4 Temperaturni razteznostni koeficient . . . . .	17
2.4.1 Eksperimentalne metode merjenja temperaturnega razteznostnega koeficiente . . . . .	17
2.5 Korelacija digitalnih slik . . . . .	18
<b>3 Metodologija raziskave . . . . .</b>	<b>23</b>
3.1 Geometrija vzorca . . . . .	23
3.2 3D tisk vzorcev . . . . .	25
3.3 Merjenje gostote . . . . .	27
3.4 Merjenje modula elastičnosti . . . . .	27
3.5 Merjenje temperaturnega razteznostnega koeficiente . . . . .	29
3.6 Metoda za sočasno merjenje modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficiente . . . . .	33

<b>4 Rezultati in diskusija . . . . .</b>	<b>37</b>
4.1 Gostota vzorcev . . . . .	37
4.2 Modul elastičnosti . . . . .	39
4.3 Temperaturni razteznostni koeficient . . . . .	44
<b>5 Zaključki . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>Literatura . . . . .</b>	<b>53</b>

# Kazalo slik

---

Slika 2.1:	Princip delovanja bimorfnega elektrotermičnega mehkega aktuatorja: (a) začetno stanje in (b) ob aktuaciji. . . . .	5
Slika 2.2:	Koncept FDM tehnike. . . . .	8
Slika 2.3:	3D tiskalnik Prusa i3 MK3S+, ki omogoča tiskanje v FDM tehniki.	8
Slika 2.4:	Najbolj vplivni parametri rezanja in orientacije tiskanja. . . . .	10
Slika 2.5:	Prikaz ortogonalnosti 3D natisnjениh struktur. . . . .	11
Slika 2.6:	Primer upogiba nosilca z ortotropnimi materialnimi lastnostmi. . .	12
Slika 2.7:	Prikaz modula elastičnosti. . . . .	13
Slika 2.8:	Prikaz temperaturnega raztezanja (za lažjo predstavo je prikazano, kot da se vzorec razširi zgolj v eno smer, čeprav se v realnosti v vse tri). . . . .	17
Slika 2.9:	Prikaz pravilne izbire ROI-ja. . . . .	19
Slika 2.10:	Prikaz afine geometrijske transformacije. . . . .	20
Slika 3.1:	Prikaz geometrije vzorca. . . . .	24
Slika 3.2:	Prikaz vpliva zarez na dinamiko vzorca. . . . .	24
Slika 3.3:	Poimenovanje nosilcev na vzorcu. . . . .	25
Slika 3.4:	3D tisk vzorcev s preučevanimi parametri izdelave. . . . .	26
Slika 3.5:	Prikaz eksperimenta za merjenje modula elastičnosti. . . . .	28
Slika 3.6:	FRF vzorca PLA V0° pri sobni temperaturi. . . . .	29
Slika 3.7:	Prikaz eksperimenta za merjenja TRK-ja. . . . .	30
Slika 3.8:	Meritev deformacije in temperature vzorca PLA V90°. . . . .	31
Slika 3.9:	Prikaz izračuna TRK-ja za nosilec 2r vzorca PLA V90°. . . . .	32
Slika 3.10:	Prikaz eksperimenta za sočasno merjenja modula elastičnosti in TRK- ja. . . . .	33
Slika 3.11:	Diagram poteka sočasne meritve modula elastičnosti in TRK-ja. .	35
Slika 4.1:	Mase PLA vzorcev. . . . .	38
Slika 4.2:	Mase woodPLA vzorcev. . . . .	38
Slika 4.3:	Modul elastičnosti $E_1$ nosilcev vzorca PLA V0°. . . . .	40
Slika 4.4:	Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi PLA vzorcev. . . . .	41

Slika 4.5:	Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi woodPLA vzorcev.	41
Slika 4.6:	Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi ortotropnega materialnega modela za PLA.	42
Slika 4.7:	Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi ortotropnega materialnega modela za woodPLA.	42
Slika 4.8:	Primerjava spremembe $E_1$ s temperaturo nosilcev vzorca PLA V0°.	43
Slika 4.9:	Koeficient linearne spremembe modula elastičnosti s temperaturo PLA vzorcev.	44
Slika 4.10:	Koeficient linearne spremembe modula elastičnosti s temperaturo woodPLA vzorcev.	44
Slika 4.11:	TRK-ji vzdolž dolžine nosilca PLA vzorcev.	45
Slika 4.12:	TRK-ji pravokotno na dolžino nosilca PLA vzorcev.	45
Slika 4.13:	TRK-ji vzdolž dolžine nosilca woodPLA vzorcev.	46
Slika 4.14:	TRK-ji pravokotno na dolžino nosilca woodPLA vzorcev.	46
Slika 4.15:	TRK-ji v smereh KS 123 PLA vzorcev.	47
Slika 4.16:	TRK-ji v smereh KS 123 woodPLA vzorcev.	47
Slika 4.17:	TRK-ji ortotropnega materialnega modela za PLA.	49
Slika 4.18:	TRK-ji ortotropnega materialnega modela za woodPLA.	49

# Kazalo preglednic

---

Preglednica 3.1:	Uporabljene dimenzije vzorcev.	25
Preglednica 3.2:	Uporabljeni parametri 3D tiska.	26
Preglednica 3.3:	Materialno specifični parametri 3D tiska.	27
Preglednica 3.4:	Povezava med vzorci in moduli elastičnosti ortotropnega materialnega modela, ki jih z njimi pomerimo.	29
Preglednica 3.5:	Povezava med vzorci, smerjo deformacije in TRK-ji ortotropnega materialnega modela, ki ga na ta način pomerimo.	32
Preglednica 4.1:	Gostote vzorcev.	39
Preglednica 4.2:	Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi v smereh KS 123 različnih orientacij tiskanja.	42
Preglednica 4.3:	TRK-ji vzorcev v smereh KS 123 različnih orientacij tiska.	48



## Seznam uporabljenih simbolov

---

Oznaka	Enota	Pomen
$d$	piksel	vektor pomikov
$\mathbf{p}$	/	vektor parametrov funkcije geometrijske preslikave
$\mathbf{W}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$	/	funkcija splošne geometrijske preslikave
$\mathbf{x}$	piksel	koordinati elementa digitalne slike v vektorskem zapisu
$A$	$\text{m}^2$	površina
$b_h$	m	višina baze
$b_w$	m	širina baze
$E$	Pa	modul elastičnosti oz. Young-ov modul
$F$	N	sila
$f$	Hz	frekvenca
$f(x,y)$	/	začetna/referenčna digitalna slika
$g$	m	razmak med nosilci
$g(x,y)$	/	trenutna/obravnavana slika
$H$	$\text{m s}^{-1} \text{ g}^{-1}$	frekvenčna prenosna funkcija
$I$	$\text{m}^4$	vztrajnostni moment prereza
$k$	/	numerični oblikovni faktor prereza
$L$	m	dolžina
$L_0$	m	začetna dolžina
$m$	kg	masa
$N$	/	cikel
$N_{\text{cikl}}$	/	želeno število ciklov
$p_i$	/	$i$ -ti element vektorja parametrov funkcije geometrijske preslikave
$R$	m	polmer ukrivljenosti
$t$	m	debelina
$t$	s	čas
$w$	m	širina
$x$	piksel	položaj elementa na horizontalni osi digitalne slike
$y$	piksel	položaj elementa na vertikalni osi digitalne slike
$\alpha$	$\text{m m}^{-1} \text{ K}^{-1}$	temperaturni razteznostni koeficient (TRK)
$\beta_i l$	/	valovno število $i$ -te resonančne frekvence
$\gamma$	/	strižna deformacija
$\delta$	m	pomik
$\Delta E$	Pa	sprememba modula elastičnosti
$\Delta L$	m	sprememba dolžine
$\Delta T$	K	temperaturna razlika
$\Delta T_{\text{odz}}$	K	temperaturni korak za merjenje odziva nosilcev
$\varepsilon$	/	deformacija
$\nu$	/	Poisson-ov količnik

Oznaka	Enota	Pomen
$\rho$	$\text{kgm}^{-3}$	gostota
$\sigma$	Pa	napetost
$\omega$	$\text{rad s}^{-1}$	krožna frekvenca
$\omega_i$	$\text{rad s}^{-1}$	$i$ -ta lastna frekvenca

Indeksi		
1		komponenta v smeri osi 1 lokalnega koordinatnega sistema ali lastnost prve plasti
2		komponenta v smeri osi 2 lokalnega koordinatnega sistema ali lastnost druge plasti
3		komponenta v smeri osi 3 lokalnega koordinatnega sistema
11		komponenta v smeri osi 1 lokalnega koordinatnega sistema
12		komponenta v ravnini 12 lokalnega koordinatnega sistema
13		komponenta v ravnini 13 lokalnega koordinatnega sistema
22		komponenta v smeri osi 2 lokalnega koordinatnega sistema
23		komponenta v ravnini 23 lokalnega koordinatnega sistema
33		komponenta v smeri osi 3 lokalnega koordinatnega sistema
B		bočno
max		maksimalen
min		minimalen
opt		optimalen
P		pokončno
$u$		komponenta vektorja v smeri osi $u$
V		vodoravno
$v$		komponenta vektorja v smeri osi $v$
$x$		komponenta vektorja v smeri osi $x$
$y$		komponenta vektorja v smeri osi $y$

## Seznam uporabljenih okrajšav

---

Okrajšava	Pomen
ABS	akrilonitril butadien stiren (ang. <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> )
B	bočna orientacija 3D tiskanja
DIC	korelacija digitalnih slik (ang. <i>Digital Image Correlation</i> )
FBG	vlakenska Bragg-ova rešetka (ang. <i>Fiber Bragg Grating</i> )
FDM	modeliranje s taljenim nanosom (ang. <i>Fused Deposition Modeling</i> )
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
FRF	frekvenčna prenosna funkcija (ang. <i>Frequency Response Function</i> )
IR	infrardeče (ang. <i>Infrared</i> )
KS	koordinatni sistem
KS 123	koordinatni sistem ortotropnih materialnih lastnosti
l	nosilec na levi strani vzorca
P	pokončna orientacija 3D tiskanja
PA	alifatski poliamidi oz. najlon (ang. <i>Aliphatic Polyamide</i> )
PETG	polietilen tereftalat glikol (ang. <i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i> )
PLA	polimlečna kislina (ang. <i>Polylactic acid</i> )
r	nosilec na desni strani vzorca
ROI	območje zanimanja (ang. <i>Region of Interest</i> )
SEM	skenirna elektronska mikroskopija (ang. <i>Scanning Electron Microscopy</i> )
SLA	stereolitografija (ang. <i>Stereolithography</i> )
SLS	selektivno lasersko sintranje (ang. <i>Selective Laser Sintering</i> )
SSD	vsota kvadratov razlik (ang. <i>Sum of Squared Difference</i> )
TMA	termomehanska analiza (ang. <i>Thermomechanical Analysis</i> )
TRK	temperaturni razteznostni koeficient
V	vodoravna orientacija 3D tiskanja
woodPLA	PLA filament z dodatkom zmletih lesnih delcev
ZNSSD	vsota kvadratov razlik z nično srednjo vrednostjo (ang. <i>Zero-mean Normalized Sum od Squared Difference</i> )



# 1 Uvod

## 1.1 Ozadje problema

Tehnologija 3D tiska danes postaja vedno bolj uporabna tehnika izdelave ne zgolj prototipov ampak tudi končnih izdelkov [1]. Nekatere prednosti, ki jih ima pred konvencionalnimi tehnologijami izdelave sta možnost izdelave kompleksnih oblik in izdelkov po meri [2]. 3D tisk se uporablja za izdelavo senzorjev, ščitnikov, naprav za dostavo zdravil, hitro izdelavo orodij, za protetiko, v modi, arhitekturi, avtomobilski in vesoljski industriji [3]. V zadnjem času se veliko pozornosti namenja tudi 3D tisku mehkih aktuatorjev [4,5]. Različni meksi aktuatorji so bili doslej razviti za inženirske aplikacije kjer se zahteva lahke, poceni, tihe, manj onesnažujoče in visoko učinkovite umetne mišice ter robotske sisteme na mikro in makro skali [6]. Z uporabo tehnologije 3D tiska pa je postal njihov postopek izdelave hitrejši, enostavnnejši in cenejši [7]. Poleg omenjenih prednosti tehnologija 3D tiska odpira nove materialne možnosti mehkim aktuatorjem s pametnimi, keramični, prevodnimi, biomateriali in kompozitnimi materiali z dodatki aluminija, železa, lesa, karbonskih vlaken [8, 9]. S tem se je še povečala potreba po hitri identifikaciji mehanskih in termičnih lastnosti 3D natisnjениh struktur [10].

Elektrotermični meksi aktuatorji so zaradi svoje fleksibilnosti in prilagodljivosti zelo uporabni na področju mehatronskih in robotskih sistemov, saj omogočajo velike deformacije, so lahki in imajo nizko porabo energije [11]. Pomembni lastnosti teh mehkih aktuatorjev sta doseg oz. hod in nosilnost oz. prijemalna ali potisna sila. Ti sta poleg geometrije mehkega aktuatorja odvisni še od modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficiente uporabljenih materialov [12]. Obstojeci uveljavljeni eksperimentalni testi za določevanje modula elastičnosti [13] in temperaturnega razteznostnega koeficiente [14–16] 3D natisnjениh struktur ne omogočajo hitre identifikacije teh lastnosti. Za pospešitev razvoja 3D natisnjениh elektrotermičnih mehkih aktuatorjev je zato treba razviti metodo, ki bo omogočala hitro identifikacijo želenih materialnih parametrov 3D natisnjениh struktur.

## 1.2 Cilji naloge

Cilj naloge je razviti brezkontaktno eksperimentalno metodo za sočasno določevanje modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficiente 3D natisnjenih struktur.

Naloga je strukturirana v 5 poglavij. V poglavju 2 so predstavljene teoretične osnove najprej mehkih aktuatorjev in tehnologije 3D tiska ter pregled obstoječih metod merjenja modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficienta. Za boljše razumevanje je predstavljena tudi metoda korelacije digitalnih slik. Poglavlje 3 opisuje predlagan eksperimentalni vzorec in njihovo izdelavo na 3D tiskalniku. Sledi opis postopka merjenja modula elastičnosti in nato še temperaturnega razteznostnega koeficienta. Na koncu je predstavljena še metoda, ki združuje merjenje obeh količin. Rezultati in diskusija predlagane metode so predstavljeni v poglavju 4. Na koncu so v poglavju 5 povzeti še zaključki dela.

## 2 Teoretične osnove in pregled literature

V tem poglavju bomo predstavili osnovna teoretična znanja potrebna za razumevanje naloge. V prvem delu je predstavljeno področje mehkih aktuatorjev. V njem želimo bralcu prikazati motivacijo za predstavljeno metodo. Sledi opis 3D tiska, ki predstavlja temeljno področje našega zanimanja. Nadaljujemo s pregledom literature obstoječih metod merjenja modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficienta. Na koncu so predstavljene še osnove metode korelacije digitalnih slik, ki jo v predstavljeni metodi uporabljamo.

### 2.1 Mehki aktuatorji

Mehki aktuatorji (ang. *Soft Actuators*) so narejeni iz sintetičnih ali naravnih materialov, ki lahko pretvorijo kemično ali fizikalno energijo v mehansko delo kot odziv na različne okoljske dražljaje, kot so pH, sol, topilo, topota, vlažnost, električno ali magnetno polje in svetloba. V nasprotju z običajnimi mehanskimi pretvorniki, kot so elektromotorji, motorji z notranjim zgorevanjem in hidravlične črpalke, pri katerih se gibanje ustvarja s spremembami relativnih položajev med komponentami, mehki aktuatorji izkazujejo prožno gibanje preko spremembe oblike ali prostornine. Kopiranje mikroskopskih sprememb na molekularni ravni v materialu se odraža kot makroskopska deformacija [17].

Različni mehki aktuatorji so bili doslej razviti za inženirske aplikacije kjer se zahteva lahke, poceni, tihe in manj onesnažujoče rešitve. Zaradi teh lastnosti so postali zelo privlačni za uporabo na različnih področjih, kot so elektronika, biomedicina, robotika [17]. Uporabljajo se kot [6]:

- mehki prijemalniki (ang. *Soft grippers*) za natančno premikanje in prijemanje občutljivih predmetov ter manipulacijo v različnih velikostnih lestvicah v različnih okoljskih pogojih (suho, mokro, vakuum);
- umetne mišice (ang. *Artificial muscles*), ki posnemajo naravne mišice in lahko spremenijo svojo togost, se krčijo, širijo ali vrtijo zaradi zunanjih dražljajev kot so napetost, tok, tlak ali temperatura;
- integrirani senzorji v mehkih robotih in oblačilih, za zaznavanje oblike, položaja in stanja ter zunanjih dražljajev (svetloba, topota, zvok in elektromagnetno polje);

- v haptičnih zaslonih (ang. *Haptic displays*) za zagotavljanje umetnega občutka dočinka ljudem s spremenjanjem lastnosti kot so tekstura, mehkoba, lepljivost in viskoelastičnost;
- biomedicinske naprave za dostavo zdravil v kompleksnih okoljih.

Poleg omenjenih bolj industrijskih in raziskovalnih aplikacij se mehki aktuatorji v nekaterih aplikacijah že uspešno uporabljajo v vsakdanjem življenju. Mehki aktuatorji, ki se odzivajo na svetlobo, se uporabljajo za avtomatsko zastiranje žaluzij. Električno stimulirani mehki aktuatorji lahko z vibracijami odstranjujejo sneg s sončnih celic, prav tako so sposobni deformirati del slušalke, ki se vstavi v ušesni kanal, da so te bolj udobne in zanesljiveje ostanejo v ušesu [17].

Ena od možnih delitev mehkih aktuatorjev je delitev glede na tip dražljajev na katere se odzovejo: električno-, magnetno-, termično-, svetlobno-, tlačno- odzivne mehke aktuatorje [18]. V nadaljevanju se bomo osredotočili na termično odzivne mehke aktuatorje, natančneje na elektrotermične mehke aktuatorje.

### 2.1.1 Elektrotermični mehki aktuatorji

Elektrotermični mehki aktuatorji so podvrsta termičnih mehkih aktuatorjev, ki za generacijo toplotne uporablja uporovni grelec. Elektrotermična aktuacija temelji na ravnovesju med toplotno energijo, ki jo ustvarja električni tok, in toploto, ki se odvaja skozi okolje ali podlago.

V delu Potekhina in sodelavcev [12] izpostavljajo naslednje prednosti elektrotermičnih mehkih aktuatorjev. Te uporabljajo razmeroma nizko gonilno napetost, vendar lahko ustvari velike sile in premike vzporedno ali pravokotno na podlago. Za delovanje ne potrebujejo elektrostatičnih ali magnetnih polj, zato so primerni za manipulacijo bioloških vzorcev in elektronskih čipov. Za razliko od piezoresistivnih mehkih aktuatorjev in mehkih aktuatorjev iz materialov s spominskim efektom, pri katerih prihaja do znatne histerezze, je elektrotermične mehke aktuatorje enostavno nadzorovati. Elektrotermične mehke aktuatorje je mogoče zlahka skalirati po velikosti in imajo običajno bolj kompaktno strukturo kot elektrostatični ali elektromagnetni mehki aktuatorji in mehki aktuatorji iz materialov s spominskim efektom (težko izvedljivi v majhnih dimenzijsah). Prav tako so elektrotermični mehki aktuatorji primerni za delovanje v zraku, vakuumu, prašnem okolju, tekočem mediju ali pod elektronskim snopom v skenirni elektronski mikroskopiji (ang. *Scanning Electron Microscopy*) (SEM). Elektrotermično aktuacijo je mogoče enostavno integrirati skupaj s piezoresistivnim ali piezoelektričnim senzorjem za povratno informacijo o sili.

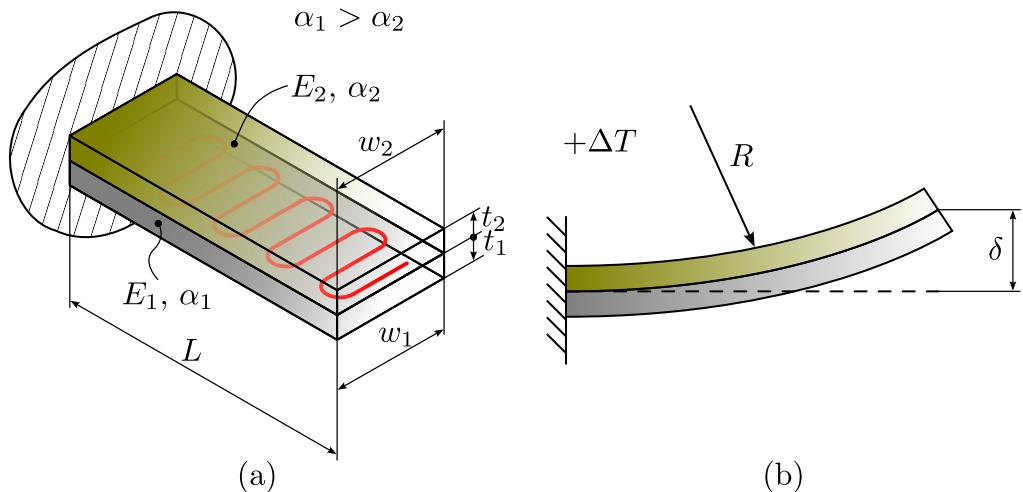
Glavna pomanjkljivost termičnih mehkih aktuatorjev pa je razmeroma nizka preklopna hitrost [12]. Ta je omejena s hitrostjo prenosa toplotne in toplotno kapacitivnim učinkom. Kljub temu pa je raziskovalcem uspelo razviti tudi možnost visokofrekvenčnega termičnega aktiviranja [19].

Poznamo tri konvencionalne vrste elektrotermičnih mehkih aktuatorjev: vroča-in-hladnoročka (ang. *Hot-and-cold-arm*), *chevron* in bimorfni tip (ang. *Bimorph*). Mehki aktuator z vročo-in-hladnoročko temelji na asimetričnem temperaturnem raztezanju svojih delov. Mehki aktuatorji tipa *chevron* uporabljajo skupno temperaturno raztezanje

strukture, ki je omejeno v eni smeri. Po drugi strani pa bimorfni mehki aktuator izkorišča razliko v temperaturnih raztezkih materialov. Bimorfni tip elektrotermičnega mehkega aktuatorja je najbolj uporabljen, najstarejši in dobro preizkušen tip elektrotermičnih mehkih aktuatorjev, zato se bomo v nadaljevanju posvetili temu tipu elektrotermičnih mehkih aktuatorjev.

### 2.1.1.1 Bimorfni tip

Shema preprostega bimorfnega elektrotermičnega mehkega aktuatorja je prikazana na sliki 2.1. Tipičen bimorfni mehki aktuator je sestavljen iz dveh plasti: ena plast materiala z visokim temperaturnim razteznostnim koeficientom (TRK) in druga z nizkim. Med obema plastema je uporovni grelec, ki segreje mehki aktuator. Ko na uporovnem grelcu ustvarimo razliko v električnem potencialu Joulova toplota povzroči večje raztezanje plasti z visokim TRK-jem in inducirana deformacija upogne celotno strukturo izven ravnine proti plasti z nizkim TRK-jem, kot prikazuje slika 2.1b.



Slika 2.1: Princip delovanja bimorfnega elektrotermičnega mehkega aktuatorja: (a) začetno stanje in (b) ob aktuaciji.

Princip delovanja bimorfnih aktuatorjev omogoča širok nabor konstrukcijskih možnosti z uporabo različnih geometrijskih konfiguracij, več plasti in njihovih razmerij debelin ter različnih materialov in njihovih kombinacij. To jih dela zelo uporabne na področjih mikromanipulacije, optičnih naprav, mikroskopije s skenirno sondijo in nanolitografije [12]. Glavna pomanjkljivost tega tipa mehkega aktuatorja je heterogena struktura, pri kateri pride do strižnih napetosti na stiku med plastmi, kar lahko skrajša življenjsko dobo aktuatorja.

Z razvojem 3D tiska je postal postopek izdelave bimorfnih elektrotermičnih mehkih aktuatorjev hitrejši, enostavnejši in cenejši [20, 21]. Tehnologija 3D tiska je namreč omogočila vključitev več komponent aktuatorja v eno samo tiskano strukturo, kar odpravlja potrebo po uporabi zunanjih spojev, lepil in pritrtilnih elementov. Dodatno tehnologija 3D tiska odpira nove materialne možnosti mehkim aktuatorjem s pametnimi, keramičnimi, prevodnimi, biomateriali in kompozitnimi materiali z dodatki aluminija, železa, lesa, karbonskih vlaken [8, 9].

Matematični model delovanja preprostega bimorfnega mehkega aktuatorja prikazanega na sliki 2.1 so leta 1993 predstavili Chu in sodelavci [22]. Ob predpostavki Euler—Bernoullijeve teorije nosilcev, linearne porazdelitve deformacije vzdolž prereza in popolne povezave obeh plasti so podali enačbo za:

- polmer ukrivljenosti  $R$  mehkega aktuatorja:

$$\frac{1}{R} = \frac{6w_1 w_2 E_1 E_2 t_1 t_2 (t_1 + t_2) (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T}{(w_1 E_1 t_1^2)^2 + (w_2 E_2 t_2^2)^2 + 2w_1 w_2 E_1 E_2 t_1 t_2 (2t_1^2 + 2t_2^2 + 3t_1 t_2)}, \quad (2.1)$$

- navpični pomik (poves)  $\delta$  pri pogoju  $L \ll R$ :

$$\delta = \frac{L^2}{2R}, \quad (2.2)$$

- silo  $F$  na prostem koncu:

$$F = \frac{3EI}{L^3} \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \left(1 + \frac{t_1}{t_2}\right) L^2}{t_2 \left\{ \left(\frac{w_1 E_1}{w_2 E_2}\right) \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^3 + \left(\frac{w_2 E_2}{w_1 E_1}\right) \left(\frac{t_2}{t_1}\right) + 2 \left[ 2 \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 + 3 \left(\frac{t_1}{t_2}\right) + 2 \right] \right\}}, \quad (2.3)$$

kjer  $EI$  predstavlja ekvivalentno togost bimorfa:

$$EI = \frac{w_2^3 t_1 E_1 E_2}{12(E_1 t_1 + E_2 t_2)} \left[ 4 + 6 \frac{t_1}{t_2} + 4 \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 + \frac{E_1}{E_2} \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^3 + \frac{E_2 t_2}{E_1 t_1} \right]. \quad (2.4)$$

Pri tem z  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  označimo TRK, širino, debelino in modul elastičnosti oz. Youngov modul materiala posamezne plasti bimorfa.  $\Delta T$  predstavlja temperaturno razliko med začetnim stanjem in stanjem ob aktivaciji.

Pomik in sila sta ključna parametra za oblikovanje mehkega aktuatorja, saj glede na aplikacijo karakterizirata njegov doseg oz. hod in nosilnost oz. potisno ali prijemanlo silo. Vplivne faktorje lahko glede na enačbi (2.1) in (2.3) razdelimo na geometrijske ( $w$  in  $t$ ) in materialne ( $E$  in  $\alpha$ ) parametre. Z geometrijo mehkega aktuatorja smo ponavadi precej omejeni, zato je izbira prave kombinacije materiala še toliko bolj pomembna. Poznavanje modula elastičnosti in TRK-ja materialov je zato ključnega pomena za napoved delovanja in razvoj tovrstnih mehkih aktuatorjev.

Več o mehkih aktuatorjih na splošno si lahko bralec prebere v [17,23], o elektrotermičnih mehkih aktuatorjih pa v [11,12].

## 2.2 3D tisk

3D tisk ali aditivna proizvodnja (ang. *Additive Manufacturing*) je postopek izdelave fizičnih predmetov iz digitalnega modela z nanašanjem materiala v slojih z uporabo tiskalne glave, šobe ali druge tehnologije 3D tiskalnika [24]. Ustvarimo lahko različne

kompleksne oblike in strukture, ki jih je s konvencionalnimi tehnologijami izdelave težko ali pa celo nemogoče izdelati. Tehnologija 3D tiska je sposobna izdelati popolnoma funkcionalne dele iz širokega spektra materialov, vključno s keramiko, kovinami, polimeri in njihovimi kombinacijami v obliki hibridov, kompozitov ali funkcionalno razvrščenih materialov [25]. Sprva se je tehnologija 3D tiska uporabljala za hitro prototipiranje izdelkov, danes pa je doživela velik razmah. Poleg izdelave prototipov se uporablja za izdelavo izdelkov na področju kmetijstva, zdravstva, avtomobilske in letalske industrije kot so umetna srčna črpalka, raketni motor in most [26].

Od leta 1984, ko je Charles W. Hull kot prvi zasnoval in uporabil 3D tiskalnik so se nekatere tehnologije 3D tiska razvile do te mere, da so postale komercialno dostopne. Te med drugim vključujejo [27]:

- stereolitografijo (ang. *Stereolithography*) (SLA),
- modeliranje s taljenim nanosom (ang. *Fused Deposition Modeling*) (FDM) in
- selektivno lasersko sintranje (ang. *Selective Laser Sintering*) (SLS).

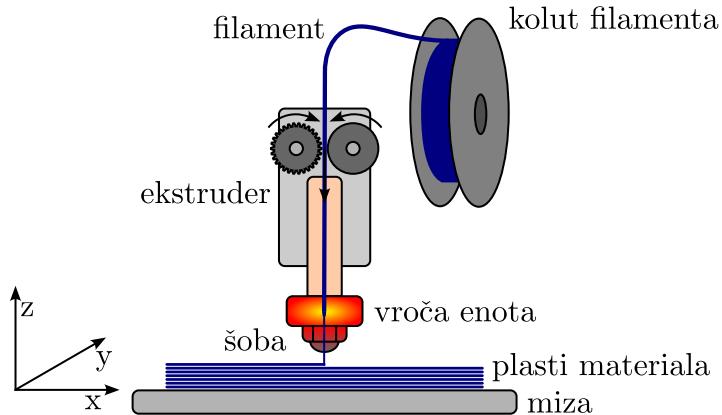
Od naštetih tehnologij je FDM najbolj popularna, zato ji bomo v nadaljevanju posvetili tudi največ pozornosti. Ostale tehnike, ki se razlikujejo v uporabljenem materialu in načinu njegovega nanosa, so podrobnejše predstavljene v delu Shahrubudina in sodelavcev [26].

### 2.2.1 Modeliranje s taljenim nanosom

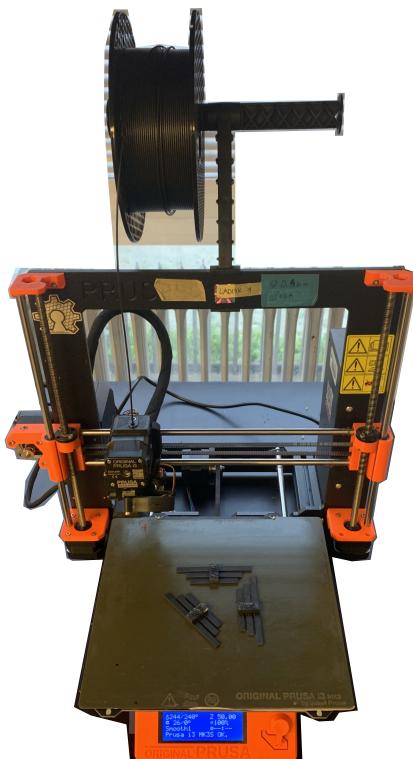
Osnovni koncept proizvodnega postopka modeliranja s taljenim nanosom (FDM), znan tudi kot *Fused Filament Fabrication* (FFF), je taljenje surovega, največkrat polimernega, materiala in njegovo selektivno ekstrudiranje skozi šobo za izdelavo oblik v plastičnih.

Uporabljen material je filament in se razlikuje od praška in tekoče smole, ki se uporablja pri drugih tehnologijah 3D tiskanja, saj je ta izdelan v neprekinjeno plastično nit običajno premera 1,75 ali 2,85 mm, dolgo več sto metrov, ki je običajno navita na kolut za shranjevanje in dovajanje 3D tiskalniku. Filament vleče in odvija s koluta pogonsko kolo v mehanizmu imenovanem ekstruder (ang. *Extruder*) ter ga potiska v vročo enoto (ang. *Hotend*). Tam se filament v toplotnem bloku (ang. *Heat Block*) stali v poltekoče stanje in nadaljuje proti šobi. Šoba, ki je običajno premera 0,2, 0,4, 0,6 ali 0,8 mm, natančno iztiska in vodi material v tanki plasti (ang. *Layer*). Material iztisne na mizo (ang. *Print Bed*) ali predhodno natisnjeno plast. Termoplastičnost polimernih filamentov omogoča, da se plasti med tiskanjem združijo in pri sobni temperaturi strdijo. Koračni motorji (ang. *Stepper motor*) omogočajo premikanje šobe relativno na mizo v vseh treh smereh kartezičnega koordinatnega sistema. Te krmilimo z G-kodo, ki jo ustvarimo v programu za rezanje (ang. *Slicer*) na podlagi digitalnega modela. Postopek pretvorbe digitalnega modela v G-kodo se imenuje rezanje, saj digitalni model razdelimo na posamezne plasti. Šoba sledi definiranim konturam in odlaga material plast za plastjo in tako zgradi končno strukturo. Opisana ideja FDM tehnike 3D tiska je prikazana na sliki 2.2.

Naprava, ki omogoča 3D tiskanje v FDM tehniki se imenuje FDM 3D tiskalnik ali kraješ 3D tiskalnik. Na sliki 2.3 je prikazan enden izmed modelov takih 3D tiskalnikov.



Slika 2.2: Koncept FDM tehnike.



Slika 2.3: 3D tiskalnik Prusa i3 MK3S+, ki omogoča tiskanje v FDM tehniki.

Kot že omenjeno je filament primarni material FDM tehnike 3D tiska. Ta je v splošnem narejen iz termoplastičnega polimernega materiala z nizkim tališčem. Najbolj razširjeni materiali so:

- polimlečna kislina (ang. *Polylactic acid*) (PLA),
- polietilen tereftalat glikol (ang. *Polyethylene Terephthalate Glycol*) (PETG),
- termoplastični poliuretan (ang. *Thermoplastic Polyurethane*) (TPU),
- akrilonitril butadien stiren (ang. *Acrylonitrile Butadiene Styrene*) (ABS) in
- alifatski poliamidi oz. najlon (ang. *Aliphatic Polyamide*) (PA).

V zadnjih letih se je zaradi vse večjega povpraševanja po kompleksnejših in večnamenskih izdelkih pojavilo veliko novih materialov za 3D tisk v FDM tehniki, kot so pametni materiali in kompozitni materiali [8]. Pametni materiali so opredeljeni kot materiali,

ki imajo sposobnost preoblikovanja svoje geometrije pod vplivom zunanjih dražljajev. Ti materiali odpirajo vrata novemu področju imenovanemu 4D tisk. Primer takega materiala je filament s spominskim efektom [28]. Kompozitni filamenti so se v zadnjih letih razvili do te mere, da so postali komercialno dostopni. Te filamenti vsebujejo dodatke kot so:

- kovinski in keramični prah,
- fosorescentni in lesni delci,
- karbonska in steklena vlakna.

Z dodatkom fosorescentnih delcev se filament sveti v temi, dodatki v obliki vlaken izboljšajo mehanske lastnosti izdelka, z dodatkom kovinskega prahu pa lahko dosežemo celo prevodnost filamenta. Ključni izziv pri razvoju novih materialov za 3D tisk je izdelati material, ki je primeren za tiskanje, ne da bi pri tem poslabšali prvotne lastnosti materiala.

Podrobneje je FDM tehniku 3D tiska predstavljena v delu Kristiawana in sodelavcev [29].

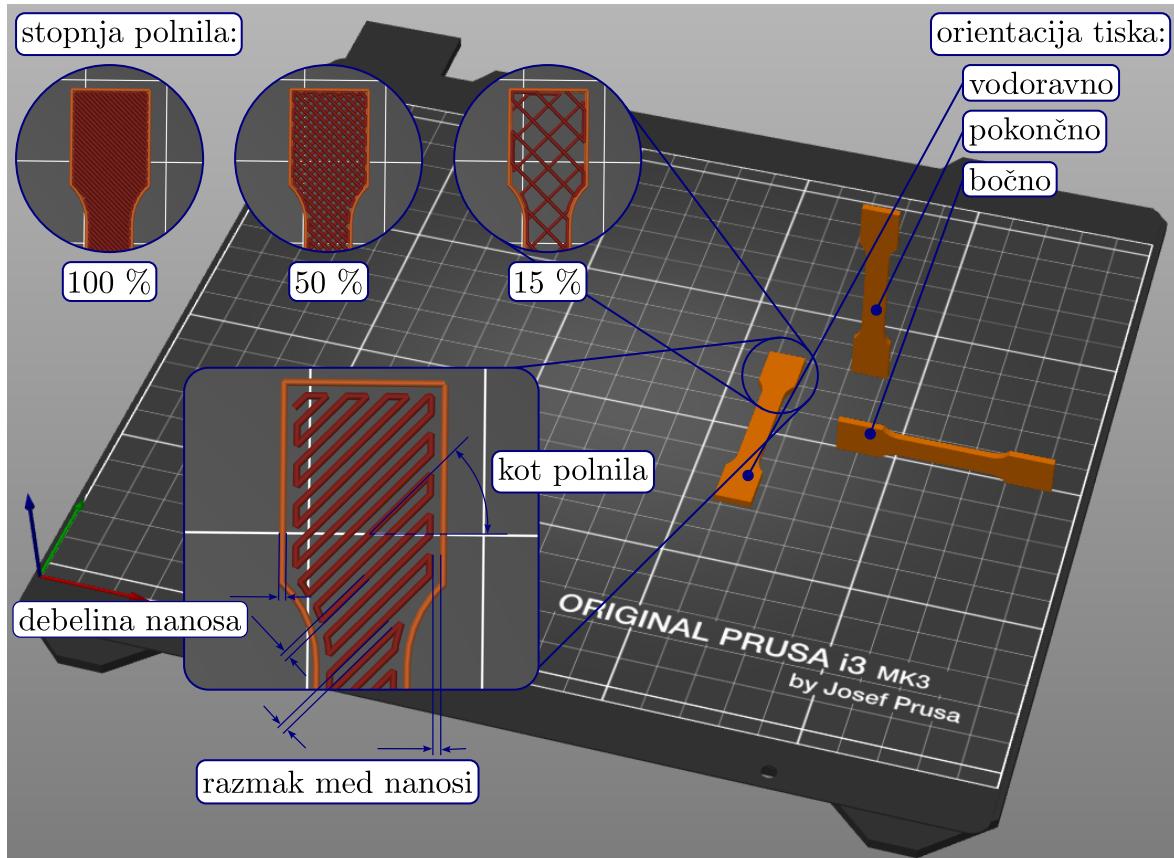
### 2.2.2 Materialne lastnosti 3D natisnjene struktur

Mehanske in termične lastnosti končnih 3D natisnjeneh izdelkov niso odvisne zgolj od uporabljenega filamenta temveč tudi od parametrov rezanja, orientacije tiskanja in temperaturnih razmer. Pod parametre rezanja štejemo:

- višino slojev linij nanosa materiala (ang. *Layer height*),
- širino linij nanosa materiala (ang. *Extrusion width*),
- premer šobe,
- stopnjo pretoka (ang. *Flow Rate*),
- hitrost nanašanja materiala,
- stopnjo polnila,
- kot polnila (ang. *Raster Angle*),
- vzorec polnila,
- razmak med sosednjimi linijami nanosa materiala (ang. *Raster-to-raster air gap*),
- število obodnih linij nanosa materiala (ang. *Perimeters*) in
- debelino spodnje ter zgornje plasti.

Vse te parametre nastavimo v programu za rezanje. Izdelek lahko na mizi 3D tiskalnika orientiramo vodoravno, pokončno, bočno ali pa pod drugimi koti, kar štejemo pod paramter orientacije tiskanja. Na temperaturne razmere vpliva zunanjaja temperature in temperatura šobe ter mize. Vsi ti parametri vplivajo na združevanje plasti in posledično na mehanske lastnosti, vendar ne v enaki meri. Leta 2018 so Popescu in sodelavci [30] ugotovili, da razmak med sosednjimi linijami nanosa materiala, kot polnila, širina linij nanosa materiala, stopnja polnila in orientacija tiskanja najbolj vplivajo na končne mehanske lastnosti. Ti parametri so predstavljeni na sliki 2.4.

Zaradi načina izdelave FDM tehniku 3D tiska vnaša anizotropijo v materialne lastnosti struktur, tudi če je prvotni material izotopen. Popisa mehanskih lastnosti 3D natisnjeneh struktur se lahko lotimo teoretično po klasični teoriji laminatov ali mikromehan-



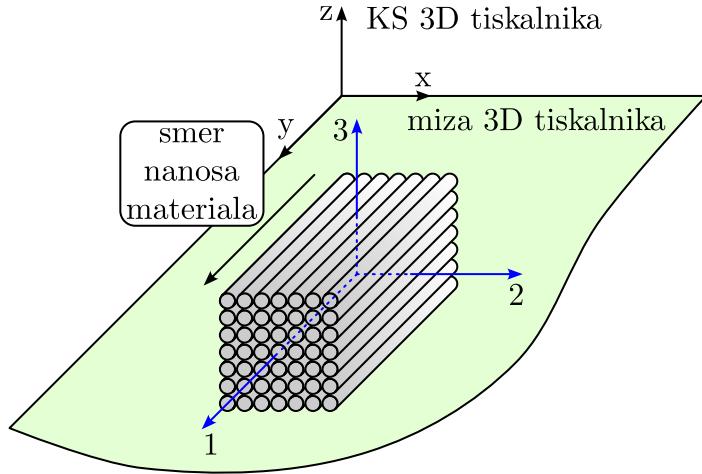
Slika 2.4: Najbolj vplivni parametri rezanja in orientacije tiskanja.

skem pristopu, numerično po metodi končnih elementov ali pa eksperimentalno [13]. V nadaljevanju bomo predstavili pristop po klasični teoriji laminatov.

### 2.2.2.1 Ortotropni materialni model

Strukture izdelane z nanašanjem materiala v eni smeri, kot je prikazano na sliki 2.5, kažejo simetrične materialne lastnosti v treh pravokotnih ravninah (vzdolž nanesenega materiala, prečno na vodoravno in prečno na navpično ravnino) [31,32]. Materialne lastnosti takih struktur se razlikujejo v treh smereh definiranih z lokalnim koordinatnim sistemom (KS) 123 na sliki 2.5. Lokalni KS definiramo tako, da je os 1 orientirana v smeri nanosa linij materiala, os 2 pa pravokotno. Os 3 je usmerjena ortogonalno na plasti linij nanosa materiala (ravnina 1-2), kot je orientirana tudi os z 3D tiskalnika. Materialne lastnosti struktur z opisanimi lastnostmi popišemo z ortotropnim materialnim modelom.

Konstitutivni model linearno elastičnega ortotropnega materiala v matričnem zapisu zapišemo kot [33]:



Slika 2.5: Prikaz ortogonalnosti 3D natisnjeni struktur.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}. \quad (2.5)$$

Pri tem z  $\varepsilon_{ii}$  in  $\sigma_{ii}$  označimo deformacijo oz. napetost vzdolž osi  $i$ , z  $\gamma_{ij}$  in  $\tau_{ij}$  zapišemo strižno deformacijo oz. strižno napetost v ravnini  $ij$ . Konstitutivna matrika za ortotropni material vsebuje devet neodvisnih elastičnih konstant: modul elastičnosti vzdolž osi 1, 2 in 3;  $E_1$ ,  $E_2$  in  $E_3$ , strižni modul  $G_{12}$ ,  $G_{13}$  in  $G_{23}$  ter Poissonov količnik  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{13}$  in  $\nu_{23}$ . Za popolno karakterizacijo 3D natisnjene strukture moramo tako poznati devet elastičnih konstant, v tej nalogi pa se bomo omejili le na module elastičnosti:  $E_1$ ,  $E_2$  in  $E_3$ .

Ortogonalnost velja tudi na nivoju termomehanskih lastnosti. Tako ločimo med TRK-jem posamezne smeri:  $\alpha_1$  v smeri vzdolž linij nanosa materiala,  $\alpha_2$  v smeri pravokotno na linije nanosa materiala in  $\alpha_3$  v smeri ortogonalno na plasti linij nanosa materiala. 3D natisnjene strukture se namreč različno termično raztezajo v treh smereh.

V okviru te naloge se bomo osredotočili na eksperimentalni pristop določevanja modula elastičnosti in TRK-ja 3D natisnjene strukture v skladu z ortotropnim materialnim modelom.

## Upogib

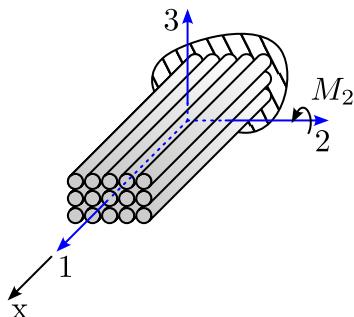
V poglavju 2.1 smo pokazali, da bimorfni elektrotermični mehki aktuator temelji na upogibni deformaciji, ki je posledica razlik v TRK-jih slojev. Predstavili smo tudi

enačbe, s katerimi lahko popišemo njegove lastnosti, vendar le-te veljajo za izotropni material. Tako jih ne moremo direktno uporabiti za napoved lastnosti 3D natisnjениh bimorfnih aktuatorjev.

V delu Cowina [33] je izpeljana enačba za upogib Euler–Bernoullijevega nosilca z ortotropnimi materialnimi lastnostmi. Izkaže se, da je ta enaka enačbi za izotropni material, potrebno je le upoštevati ortotropne materialne lastnosti v pravi smeri. Upoštevati moramo namreč tisti modul elastičnosti in TRK, katerega indeks je enak osi KS 123, ki kaže vzdolž dolžine nosilca. V kolikor nobena od osi ne kaže v smeri dolžine nosilca, lahko skladno s teorijo laminatov izračunamo lastnosti v tej smeri [34].

Za lažje razumevanje si poglejmo primer nosilca na sliki 2.6. Nosilec je natisjen tako, da so linije nanosa materiala usmerjene vzdolž dolžine nosilca. KS 123 je zato orientiran tako, da os 1 kaže vzdolž dolžine nosilca. Upogibni moment deluje okoli osi 2, s čimer dobimo v ravini 1-3 ekvivalenten primer kot upogib elektrotermičnega aktuatorja na sliki 2.1b. Enačba upogibnice  $\delta(x)$  je definirana kot [33]:

$$\frac{d^2\delta(x)}{dx^2} = \frac{M_2}{E_1 I_{22}}. \quad (2.6)$$



Slika 2.6: Primer upogiba nosilca z ortotropnimi materialnimi lastnostmi.

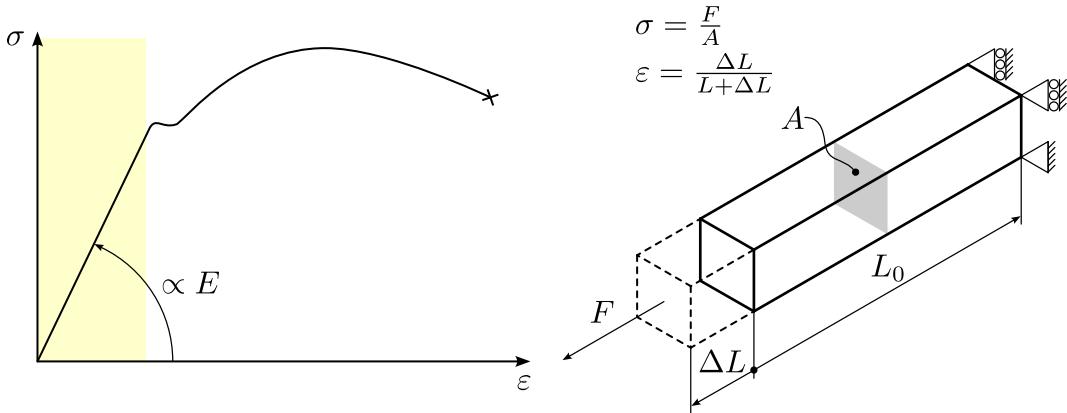
Ta je za ortotropni material kot že omenjeno enaka kot za izotropni material, upoštevati moramo le ortotropne materialne lastnosti v ustreznih smereh. Os 1 KS 123 kaže v smeri dolžine nosilca, zato upoštevamo modul elastičnosti  $E_1$ . Ker moment deluje okoli osi 2 ( $M_2$ ), moramo prav tako upoštevati tudi vztrajnostni moment prereza okoli osi 2  $I_{22}$ . Na ta način lahko uporabimo vse enačbe v poglavju 2.1.1.1 tudi za ortotropne materiale. Dodatno moramo upoštevati še TRK v smeri osi KS 123, ki kaže vzdolž dolžine nosilca. Razlika med temperaturnim raztezkom v tej smeri namreč posledično ustvarja upogibni moment. Za obravnavani primer, bi tako upoštevali  $\alpha_1$ .

## 2.3 Modul elastičnosti

Če je material podvržen majhnim deformacijam ( $\varepsilon$ ), je napetost ( $\sigma$ ) sorazmerna deformaciji (slika 2.7), kar predvideva Hookov zakon. Ta velja le v območju dovolj majhnih

deformacij, kjer se material ob razbremenitvi še vrne v začetno stanje (linearna elastičnost). Konstanta sorazmernosti napetosti in deformacije v tem območju, ki jo določimo po naslednji enačbi, se imenuje modul elastičnosti ali Youngov modul [35]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (2.7)$$



Slika 2.7: Prikaz modula elastičnosti.

Modul elastičnosti je merilo togosti materiala, ta namreč podaja odpor materiala do deformacije: večja vrednost modula elastičnosti večja sila je potrebna za dosego želene deformacije.

Izotropen material izkazuje enako togost v vseh smereh, zato za popis le-te zadostuje ena materialna konstanta. Na drugi strani pa ortotropni materiali izkazujejo različno togost glede na smer obremenitve oz. povedano drugače, če ortotropni material obremenimo z enako napetostjo bomo v različnih smereh dobili različno deformacijo. Za popis togosti takih materialov zato ne zadostuje samo ena materialna konstanta ampak tri (ena za vsako smer). Modul elastičnosti v vsaki smeri KS 123 je tako definiran kot razmerje med napetostjo in deformacijo v tej smeri [33]:

$$E_i = \frac{\sigma_{ii}}{\varepsilon_{ii}}. \quad (2.8)$$

### 2.3.1 Eksperimentalne metode merjenja modula elastičnosti

Za eksperimentalno določevanje modula elastičnosti 3D natisnjениh struktur prevladuje predvsem klasičen natezni preizkus [30]. Ta spada pod statične metode in temelji na meritvi napetostno ( $\sigma$ ) deformacijske ( $\varepsilon$ ) karakteristike materiala ob enoosni natezni deformaciji. Iz  $\sigma$ - $\varepsilon$  krivulje v linearno elastičnem območju določimo koeficient proporcionalnosti, ki je enak modulu elastičnosti. S konvencionalnega vidika je ta pristop za določitev modula elastičnosti najpravilnejši, vendar uporablja precej drago opremo, postopek testiranja pa je relativno počasen. Želja po hitrejših testih je pripeljala do razvoja nedestruktivnih metod merjenja modula elastičnosti. Pszczółkowski in sodelavci [36] predlagajo metodo impulznega vzbujanja (ang. *Impulse Excitation Technique*) in ultrazvočno metodo z nizko močjo (ang. *Low Power Ultrasound*).

Metoda impulznega vzbujanja lahko določi elastične lastnosti in notranje trenje materiala. Z meritvijo lastne frekvence izračunamo modul elastičnosti, strižni modul, Poissonov količnik in dušenje. Vzorec impulzno vzbudimo z modalnim kladivom in pomerimo vibracijski odziv s pospeškomerom, mikrofonom ali laserskim merilnikom. Izmerjeno časovno vrsto transformiramo v frekvenčno domeno s Fourierjevo transformacijo, kjer identificiramo želene materialne parametre.

Ultrazvočna metoda se uporablja za določevanje napak in nekonsistentnosti v materialu, lahko pa določi tudi modul elastičnosti. Iz meritve hitrosti longitudinalnih in transverzalnih ultrazvočnih valov izračunamo modul elastičnosti. Pomanjkljivost te metode je, da zaradi praznin v materialu 3D natisnjene strukturi ne daje najboljših rezultatov.

Pintelon in sodelavci [37] so predlagali še eno nedestruktivno metodo za merjenje frekvenčne odvisnosti modula elastičnosti polimernih materialov preko identifikacije lastnih frekvenc nosilca. Ideja te metode je enaka kot metoda impulznega vzbujanja, razlika je le v tem, da je nosilec periodično vzbujan. V nalogi bomo izhajali iz te metode, zato jo bomo v nadaljevanju podrobnejše predstavili.

Predlagana metoda sestoji iz naslednjih korakov:

1. meritev frekvenčne prenosne funkcije (ang. *Frequency Response Function*) (FRF),
2. identifikacija lastne frekvence,
3. izračun modula elastičnosti iz teoretične enačbe.

Za določitev FRF-ja merimo vhodno/vzbujevalno količino (pospešek ali sila stresalnika) in izhodno/odzivno količino (pomik, hitrost ali pospešek nosilca). FRF določimo s celnilko  $H_2$  po metodi Welch [38]. Kot lastno frekvenco izberemo tisto frekvenco pri kateri absolutna vrednost FRF-ja doseže največjo vrednost. Z znano lastno frekvenco izračunamo modul elastičnosti iz teoretične enačbe za upogibno nihanje konzolno vpetega nosilca. Pri tem lahko izhajamo iz Euler–Bernoullijeve ali Timoshenko–Ehrenfestove teorije nosilcev.

### 2.3.1.1 Euler–Bernoullijeva teorija nosilcev

Euler–Bernoullijeva teorija nosilcev zanemarja učinek strižnih deformacij in predpostavlja majhen poves nosilca. Kljub temu je v inženirske prakse vsesplošno uporabljena.

Rešitev vibracijske enačbe linearno elastičnega, izotropnega, homogenega, tankega konzolno vpetega nosilca konstantnega prereza je v skladu z Euler–Bernoullijovo teorijo izpeljana v [39]. Če enačbo preoblikujemo, dobimo izraz za izračun modula elastičnosti:

$$E = \frac{1}{(\beta_i l)^4} \frac{\omega_i^2 \rho A L^4}{I}, \quad (2.9)$$

kjer z  $\omega_i$  označimo  $i$ -to lastno frekvenco, z  $I$  vztrajnostni moment prereza, z  $A$  površino prereza, z  $\rho$  gostoto materiala in z  $L$  dolžino nosilca.  $\beta_i l$  predstavlja valovno število  $i$ -te

resonančne frekvence, ki je za splošne robne pogoje dokumentirana v literaturi (npr. slika 8.15 v [39]). Za prvo lastno frekvenco konzolno vpetega nosilca ta znaša:

$$\beta_1 l = 1,875104. \quad (2.10)$$

Iz enačbe (2.9) lahko tako s pomerjeno lastno frekvenco in znano geometrijo in gostoto materiala nosilca izračunamo modul elastičnosti. V primeru ortotropnega materiala bi, kot smo spoznali v poglavju 2.2.2.1, na ta način določili modul elastičnosti v smeri vzdolž dolžine nosilca. Z različno usmeritvijo materiala lahko tako določimo vse tri module elastičnosti ortotropnega materialnega modela.

### 2.3.1.2 Timoshenko–Ehrenfestova teorija nosilcev

S Timoshenko–Ehrenfestovo oz. krajše samo Timoshenkovo teorijo nosilcev dodatno upoštevamo še strižne deformacije in rotirajočo vztrajnost in je zato primerna tudi za relativno debele nosilce. Po ugotovitvah Labuschagneja in sodelavcev [40] je uporaba Timoshenkove teorije za izračun prve lastne frekvence konzolno vpetega nosilca smiselna, če je njegovo razmerje:

$$\frac{A L^2}{I} > 1200. \quad (2.11)$$

Pri tem z  $A$  označimo prerez, z  $L$  dolžino in z  $I$  vztrajnostni prerez prereza nosilca. Za nosilce pravokotnega prereza, ki jih v nalogi obravnavamo, je Timoshenkova teorija smiselna v kolikor je dolžina nosilca manj kot desetkrat večja od njegove debeline. Takrat namreč začnemo govoriti o relativno debelih nosilcih.

Rešitev vibracijske enačbe linearne elastičnega, izotropnega, homogenega, konzolno vpetega nosilca konstantnega prereza je v skladu s Timoshenkovo teorijo izpeljana v delu Huanga [41]:

$$2 + (b^2(r^2 - s^2)^2 + 2) \cosh(b\alpha) \cos(b\beta) - \frac{b(r^2 + s^2)}{\sqrt{(1 - b^2 r^2 s^2)}} \sinh(b\alpha) \sin(b\beta) = 0, \quad (2.12)$$

kjer so naslednji simboli definirani kot:

$$b^2 = \frac{1}{EI\rho A L^4} \omega_i^2, \quad (2.13)$$

$$r^2 = \frac{I}{AL^2}, \quad (2.14)$$

$$s^2 = \frac{EI}{kAGL^2}, \quad (2.15)$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{-(r^2 + s^2) + \sqrt{(r^2 - s^2)^2 + \frac{4}{b^2}}} & ; \sqrt{(r^2 - s^2)^2 + \frac{4}{b^2}} > r^2 + s^2 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{r^2 + s^2 - \sqrt{(r^2 - s^2)^2 + \frac{4}{b^2}}} & ; \sqrt{(r^2 - s^2)^2 + \frac{4}{b^2}} < r^2 + s^2, \end{cases}, \quad (2.16)$$

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{r^2 + s^2 + \sqrt{(r^2 - s^2)^2 + \frac{4}{b^2}}}. \quad (2.17)$$

Pri tem z  $E$  označimo modul elastičnosti, z  $G$  strižni modul, z  $I$  vztrajnostni moment prereza, z  $A$  površino prereza, z  $\rho$  gostoto materiala, s  $k$  numerični oblikovni faktor prereza, z  $\omega_i$   $i$ -to lastno krožno frekvenco nihanja in z  $L$  dolžino nosilca.

Numerični oblikovni faktor prereza  $k$ , s katerim upoštevamo neenakomerno porazdelitev strižne napetosti po prerezu, glede na pripomočilo Kaneka [42] za pravokotni prerez izračunamo z znanim Poissonovim količnikom  $\nu$  kot:

$$k = \frac{5 + 5\nu}{6 + 6\nu}. \quad (2.18)$$

Za izotropni material lahko strižni modul z znanim Poissonovim količnikom izračunamo po naslednji enačbi:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (2.19)$$

Če to upoštevamo v enačbi (2.12), lahko iz nje ob znani geometriji nosilca, gostoti in Poissonovim količnikom materiala s pomerjeno lastno frekvenco izračunamo modul elastičnosti. Analitična rešitev za modul elastičnosti ne obstaja, zato si pomagamo z iterativno Newton–Raphsonovo metodo. Za prvi približek uporabimo modul elastičnosti izračunan po Euler–Bernoullijevi teoriji.

Do problema pridemo, če želimo upoštevati ortotropne materialne lastnosti. Modul elastičnosti, strižni modul in Poissonov količnik so za ortotropni material namreč med seboj neodvisni, zato ne moremo enega enostavno izraziti z drugima dvema elastičnima konstantama kot smo to storili za izotropni material. Strižni modul in Poissonov količnik v ustreznih smereh je potrebno eksperimentalno določiti, saj na njih redko naletimo v literaturi.

Glede na ugotovitve v delu Domingo-Espina in sodelavcev [31] 3D natisnjene strukture s 100 % stopnjo polnila kažejo manjšo stopnjo ortotropnih lastnosti in jih lahko s sorazmerno majhno napako ( $\sim 7\%$ ) obravnavamo kot izotropni material. S to predpostavko lahko iz teoretične vrednosti Poissonovega količnika osnovnega materiala iz npr. dela Rosatoa in sodelavcev [43] izračunamo numerični oblikovni faktor prereza in strižni modul, kot smo pokazali za izotropni material.

Na ta način lahko iz pomerjene lastne frekvence nosilca, znanih dimenzij in gostote ter teoretične vrednosti Poissonovega količnika z rešitvijo enačbe (2.12) pridemo do ustreznega modula elastičnosti v smeri vzdolž dolžine nosilca ortotropnega materialnega modela. Z različno usmerjenimi linijami nanosa materiala pa lahko določimo še ostala dva modula elastičnosti.

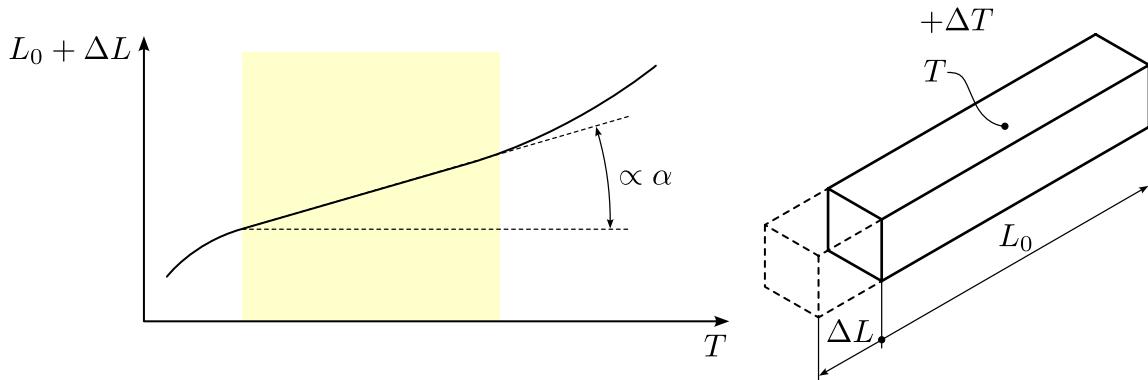
Za potrebe te naloge se Timoshenkova postopek ni izkazal za potrebnega, saj je bila razlika med modulom elastičnosti po klasični Euler–Bernoullijevi teoriji v rangu 1 %. Glede na napako, ki jo vnesemo s predpostavko izotropnega materiala za izračun manjkajočih materialnih parametrov po Timoshekoviem pristopu se je zdel pristop po Euler–Bernoullijevi teoriji primernejši.

## 2.4 Temperaturni razteznostni koeficient

Večina trdnih materialov se pri segrevanju razširi in ob ohlajanju skrči (slika 2.8). Temperaturni razteznostni koeficient (TRK) nam pove v kolikšni meri se material razširi pri segrevanju oz. skrči pri ohlajanju. V splošnem je TRK odvisen od temperature in za večino trdnih materialov narašča s temperaturo. V primeru faznih sprememb pride tudi do večjih nezveznih skokov v njegovi vrednosti. V kolikor gledamo spremembo dolžine na dovolj majhnem temperaturnem območju ta linearno narašča (slika 2.8). Takrat govorimo o linearinem TRK-ju, ki je definiran kot [44]:

$$\alpha = \frac{1}{L_0} \frac{\Delta L}{\Delta T} = \frac{\varepsilon}{\Delta T}. \quad (2.20)$$

Z  $L_0$  označimo začetno dolžino in z  $\Delta L$  njen spremembo zaradi spremembe temperature  $\Delta T$ . Spremembo dolžine proti začetni dolžini lahko zapišemo tudi kot deformacijo  $\varepsilon$ . Linearni TRK tako podaja spremembo dolžine na enoto dolžine ob spremembi temperature za eno enoto. Pomembno je poudariti, da se izraz linearni velikokrat izpušča, vendar vseeno govorimo o linearinem TRK-ju. Tudi v tej nalogi, ko govorimo o TRK-ju mislimo na linearni TRK.



Slika 2.8: Prikaz temperaturnega raztezanja (za lažjo predstavo je prikazano, kot da se vzorec razširi zgolj v eno smer, čeprav se v realnosti v vse tri).

Ortotropni materiali se za razliko od izotropnih v različnih smereh različno temperaturno raztezajo. Zatorej ločimo med TRK-ji v treh smereh KS 123:  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  in  $\alpha_3$ . TRK v  $i$ -ti smeri je definiran kot:

$$\alpha_i = \frac{\varepsilon_{ii}}{\Delta T}. \quad (2.21)$$

### 2.4.1 Eksperimentalne metode merjenja temperaturnega razteznostnega koeficiente

Če se eksperimentalnim metodam za določevanje modula elastičnosti v literaturi nameja veliko pozornosti, so na drugi strani metode za določevanje TRK-ja 3D natisnjениh struktur bolj zoperstavljeni. Za identifikacijo TRK-ja 3D natisnjениh struktur se znanstveniki poslužujejo meritev s:

- termomehansko analizo (ang. *Thermomechanical Analysis*) (TMA) [14, 45],
- dilatometrom [15] in
- vlakensko Braggovo rešetko (ang. *Fiber Bragg Grating*) (FBG) [16].

TMA metoda predstavlja klasično metodo merjenja termomehanskih lastnosti polimernih materialov. Ta spremi spremembo višine vzorca ob segrevanju in ohlajanju iz česar poleg še ostalih materialnih lastnosti določi tudi TRK. S TMA metodo lahko merimo tudi modul elastičnosti, vendar ne omogoča sočasnega merjenja obeh količin. Meritve z dilatometrom dajejo natančne rezultate temperaturnih sprememb volumna, iz česar določimo TRK. Pomanjkljivost te metode je, da je ni mogoče nadgraditi ali uporabiti skupaj še z drugo metodo za merjenje modula elastičnosti. FBG senzorji delujejo na selektivnem odboju svetlobe ob prehodu skozi Braggovo rešetko v vlaknu. Ob spremembah dolžine vlakna, v katerem je Braggova rešetka, se valovna dolžina odbite svetlobe spremeni. Če ob segrevanju vzorca spremjam spremembo valovne dolžine odbite svetlobe, lahko določimo deformacije, ki so posledica temperaturne spremembe in izračunamo TRK. Slabost te metode je, da je potrebno FBG senzor vgraditi v vzorec že med samim procesom 3D tiska, kar omejuje njegovo uporabnost.

Z željo po hitrejših testiranjih materialnih parametrov, napredkom tehnologije in večjo računalniško močjo so se razvile nove brezkontaktne merilne tehnike. Prednost teh metod je, da ne vplivajo neposredno na merjenca tako kot kontaktne metode, kamor spadajo prej omenjene metode. V skupino brezkontaktnih metod merjenja med drugim spada tudi metoda korelacije digitalnih slik (ang. *Digital Image Correlation*) (DIC) in merjenje s termokamero. Metoda DIC omogoča identifikacijo deformacij iz zaporednih slik vzorca, termokamera pa meritev temperature iz IR sevanja. Številni znanstveniki so že uspešno uporabili omenjeni metodi za merjenje TRK-ja polimernih materialov [46–49]. TRK določijo kot razmerje med deformacijo in spremembijo temperature na območju nosilca.

V tej nalogi bomo metodo DIC in termokamero skupaj uporabili za merjenje TRK-ja 3D natisnjениh struktur. S strukturami različnih smeri linij nanosa materiala bomo določimo ortotropne TRK-je.

## 2.5 Korelacija digitalnih slik

Metoda korelacije digitalnih slik (ang. *Digital Image Correlation*) (DIC) se v mehaniki široko uporablja za identifikacijo odziva deformabilnih teles. Gre za fleksibilno brezkontaktno optično metodo za merjenje pomikov in deformacij. Metoda je razvita do te mere, da omogoča identifikacijo v 3D prostoru. Aplikacija DIC-a v tej nalogi je omejena na ravninske deformacije, zato se bomo v nadaljevanju omejili le na DIC v 2D prostoru.

Cilj DIC-a je poravnava referenčne slike  $f(x, y)$  z obravnavano sliko  $g(x, y)$ . Pri čemer z zapisom  $f(x, y)$  mislimo na matrični zapis sivinske slike, kjer  $f(x_i, y_j)$  predstavlja sivinsko vrednost elementa (piksla)  $i$ -tega stoplca in  $j$ -te vrstice. Koordinatno izhodišče digitalnih slik je namreč v zgornjem levem robu, vseeno pa za označevanje uporabljamo klasično matematično notacijo. Matematično to nalogu formuliramo kot optimizacijski problem. Za funkcijo izgube, katere minimum iščemo, definiramo vsoto kvadratov

razlik med sivinskimi vrednostmi istoležečih elementov slik (ang. *Sum of Squared Difference*) (SSD):

$$\text{SSD} = \sum_{\mathbf{x}} [g(\mathbf{x} + \mathbf{d}) - f(\mathbf{x})]^2. \quad (2.22)$$

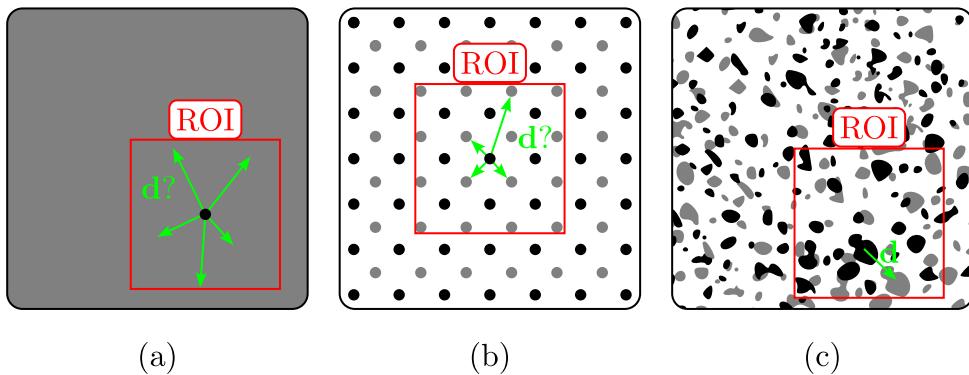
Pri tem z  $\mathbf{x}$  označimo vektor prostorskih koordinat digitalne slike  $\mathbf{x} = \{x, y\}^T$ , z  $\mathbf{d}$  pa vektor pomikov  $\mathbf{d} = \{d_x, d_y\}^T$ , katerega optimalno  $\mathbf{d}_{\text{opt}}$  vrednost želimo poiskati. Slednjo poiščemo po Newton–Raphsonovi metodi nelinearne optimizacije. Iteracijsko zanko izvajamo dokler ne dosežemo želene natančnosti vektorja pomikov.

Po navadi nas ne zanima premik celotne slike ampak zgolj določenih objektov na sliki. Namesto celotne slike lahko zato kot  $f(x, y)$  izberemo zgolj omejeno območje slikovnih elementov, v katerem želimo opazovati pomik objekta. To območje imenujemo območje zanimanja (ang. *Region of Interest*) (ROI). Tako  $g(\mathbf{x} + \mathbf{d}_{\text{opt}})$  predstavlja podobmočje trenutno obravnavane slike, ki se po izbranem optimizacijskem kriteriju najbolje prilagaja referenčni sliki. Na ta način lahko iz niza slik identificiramo pomike opazovanega objekta.

Da je optimalen pomik sploh moč poiskati, mora zajeto območje izpolnjevati naslednja kriterija:

1. ROI mora zajemati elemente različnih sivinskih vrednosti (slika 2.9a) in
2. vzorec znotraj ROI-ja mora biti unikaten za enolično določitev pomikov (slika 2.9b).

Oba kriterija izpolnimo z nanosom naključnega lisastega vzorca (ang. *Speckle Pattern*) na površino objektov, katerih pomiki nas zanimajo, in z izbiro dovolj velikega ROI, da je zajeti vzorec unikaten (slika 2.9c).



Slika 2.9: Prikaz pravilne izbire ROI-ja.

Predstavljena metoda je omejena zgolj na identifikacijo povprečnih translatoričnih pomikov ROI-ja. Z razširitvijo opisanega algoritma na splošno geometrijsko preslikavo lahko identificiramo tudi ostalo kinematiko. Splošno funkcijo geometrijske preslikave koordinat opazovane slike  $g(\mathbf{x})$  v referenčno sliko  $f(\mathbf{x})$  označimo z  $\mathbf{W}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$ . Pri tem s  $\mathbf{p}$  označimo vektor parametrov geometrijske preslikave, katerih optimalne vrednosti iščemo. Velikost vektorja  $\mathbf{p}$  je odvisna od tipa preslikave, ki jo funkcija  $\mathbf{W}(\mathbf{x}, \mathbf{p})$

predstavlja. Funkcija preslikave togih premikov, ki smo jih obravnavali do sedaj, je definirana kot:

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} p_0 \\ p_1 \end{Bmatrix}. \quad (2.23)$$

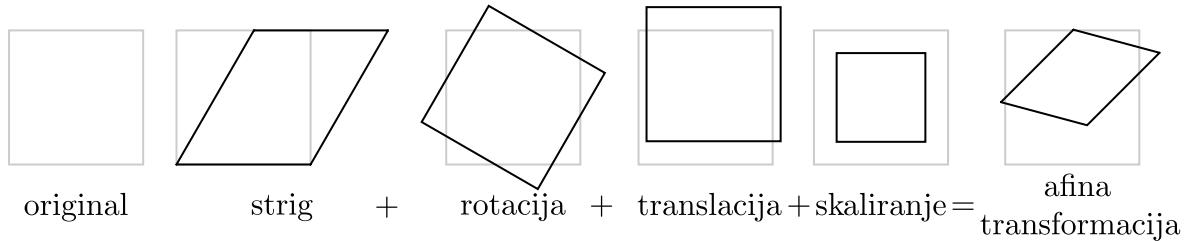
Vektor parametrov  $\mathbf{p}$  te preslikave vsebuje dva parametra ( $p_0$  in  $p_1$ ), ki sta enakovredna komponentam vektorja pomikov  $\mathbf{d}$  ( $d_x$  in  $d_y$ ). Splošno geometrijsko preslikavo v funkcijo izgube SSD vključimo na sledeč način:

$$SSD = \sum_{\mathbf{x}} [g(\mathbf{W}(\mathbf{x}, \mathbf{p})) - f(\mathbf{x})]^2. \quad (2.24)$$

Po Newton–Raphsonovi večparameterski optimizacijski metodi določimo optimalne parametre geomterijske deformacije  $\mathbf{p}$  z želeno natančnostjo po izbranem optimizacijskem kriteriju.

Afina geometrijska transformacija (ang. *Affine Transformation*) je splošna linearna geometrijska preslikava. Ta vključuje transformacijo striga, rotacije, translacije in skaliranja (slika 2.10) in se jo zato običajno poslužujemo za popis kinematike deformabilnih tel. Njeno funkcijo zapišemo kot:

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}, \mathbf{p}) = \begin{Bmatrix} W_x \\ W_y \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + p_0 & p_1 & p_2 \\ p_3 & 1 + p_4 & p_5 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{Bmatrix}. \quad (2.25)$$



Slika 2.10: Prikaz afine geometrijske transformacije.

Tokrat vektor parametrov  $\mathbf{p}$  vsebuje šest elementov, ki poleg pomikov ( $d_x$  in  $d_y$ ) predstavljajo tudi njihove odvode ( $\partial d_x / \partial x$ ,  $\partial d_x / \partial y$ ,  $\partial d_y / \partial x$  in  $\partial d_y / \partial y$ ). Iz odvodov pomikov lahko določimo povprečne deformacije ROI-ja v  $x$  ( $\varepsilon_{xx}$ ) in  $y$  ( $\varepsilon_{yy}$ ) smeri ter strižno deformacijo ( $\gamma_{xy}$ ) po naslednjih enačbah:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial d_x}{\partial x}, \quad (2.26)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial d_y}{\partial y}, \quad (2.27)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial d_y}{\partial x} + \frac{\partial d_x}{\partial y}. \quad (2.28)$$

Z uporabo affine transformacije za funkcijo geometrijske preslikave lahko tako po metodi DIC pridemo ne le do povprečnih pomikov temveč tudi do povprečnih deformacij ROI-ja in posledično objektov na digitalnih slikah.

Opisani postopek DIC-a zadostuje za razumevanje metode za potrebe te naloge, v praksi pa bi bil ta precej počasen in manj natančen. Znanstveniki so opisani postopek nadgradili še z naslednjimi izboljšavami, ki jih bomo mi samo omenili, so pa te pomembno prispevale k temu, da je DIC danes tako razširjena metoda:

- Doseganje podpikselne natančnosti (ang. *Subpixel Accuracy*); z interpolacijo slik z zlepki višjega reda (ang. *Bivariate Spline Interpolation*) rezultati več niso omejeni z ločljivostjo prostorskega vzorčenja zajema slike.
- Boljši optimizacijski kriterij; omenjeni SSD kriterij se izkaže za pomanjkljivega, saj ta ni zmožen upoštevati sprememb osvetljenosti objekta med slikami, čemur se v praksi težko izognemo. Razlike v sivinskih vrednostih, ki niso posledica kinematike telesa, negativno vplivajo na konvergenco parametrov in dajejo napačne rešitve. Optimizacijski kriterij vsote kvadratov razlik z nično srednjo vrednostjo (ang. *Zero-mean Normalized Sum od Squared Difference*) (ZNSSD) ni občutljiv na spremembe osvetljenosti in znatno ne poveča računske zahtevnosti algoritma, zato je danes najbolj uporabljen optimizacijski kriterij DIC-a.
- Inverzna metoda optimizacije; v Newton–Raphsonovem optimizacijskem algoritmu je potrebno v vsakem koraku optimizacije izračunati parametre konvergencije, kar močno poveča zahtevnost algoritma. Pri inverzni metodi optimizacije pa se problema lotimo v obratni smeri: namesto iskanja parametrov afine transformacije, ki trenutno sliko čim bolj približa referenčni po tej metodi iščemo parametre, ki referenčno sliko čim bolj približajo trenutni. Ta transformacija je ravno inverzna tisti, ki nas zanima, kar moramo ustrezno korigirati pri podajanju rezultatov. Glavna prednost takega pristopa pa je, da moramo sedaj parametre konvergencije izračunati zgolj enkrat, saj ciljna slika ves čas ostaja enaka.

Program za analizo korelacije digitalnih slik z afino deformacijo z omenjenimi izboljšavami algoritma je bil narejen v delu Gorjupa [50] in je dostopen na spletnem repozitoriju [51].

Več o DIC-u je napisano v delu Gorjupa [50] in Schreierja ter sodelavcev [52].



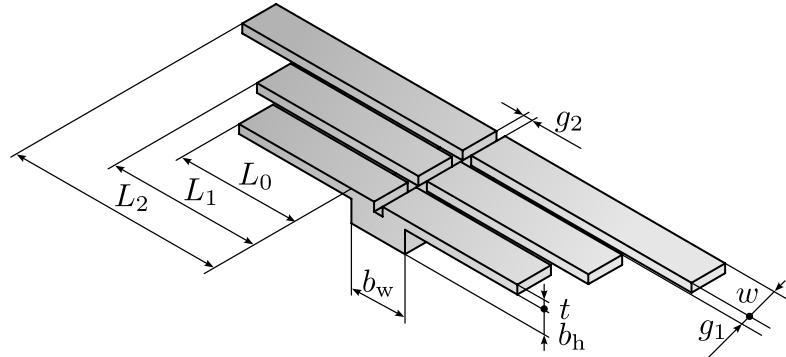
# 3 Metodologija raziskave

Prihajajoče poglavje predstavlja bistvo našega dela v tej nalogi. Za lažje razumevanje je razdeljeno na šest podpoglavljev. V prvem je podrobneje predstavljen vzorec, ki smo ga v metodi uporabili. Nadaljujemo s predstavljivjo načina izdelave vzorcev, kjer definiramo tudi preučevane parametre raziskave. Sledi opis vseh treh meritev, ki se stavlja predlagano metodo: meritev gostote, modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficiente. Zadnje podpoglavlje predstavi celoten potek predlagane metode.

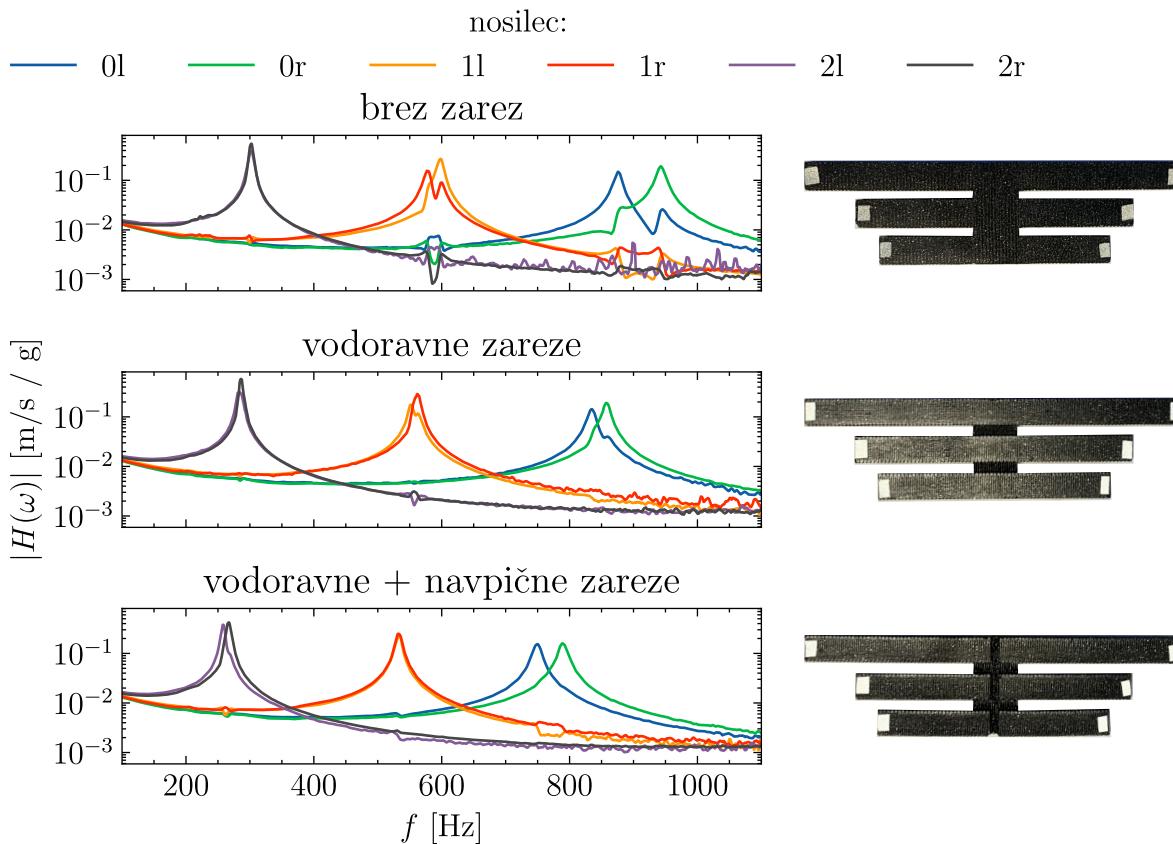
## 3.1 Geometrija vzorca

Za eksperimentalno določevanje modula elastičnosti in TRK-ja 3D natisnjene strukture smo uporabili vzorec, ki je prikazan na sliki 3.1. Vzorec je enkrat simetričen s šestimi konzolno vpetimi nosilci paroma enakih dolžin ( $L_0$ ,  $L_1$  in  $L_2$ ). Ta oblika nam omogoča šest hkratnih meritev modula elastičnosti in TRK-ja, s čimer kontroliramo ponovljivost in zanesljivost. Število nosilcev in njihova dolžina se lahko ustrezeno prilagodi potrebam testiranja z obzirom, da še lahko zagotavljamo homogeno segrevanje. Z dolžino nosilcev vplivamo na njihovo lastno frekvenco, zato je smiselno izbrati dolžine, s katerimi pokrijemo široko frekvenčno območje. To nam omogoča tudi sklepanje o frekvenčni odvisnosti modula elastičnosti. Dolžine nosilcev ne smejo biti premajhne, saj bomo v tem primeru imeli težave z določanjem deformacij. Skupaj z debelino  $t$  in širino  $w$  vplivamo na vitkost nosilcev, kar je pomembno za izbiro prave enačbe modula elastičnosti (Euler–Bernoullijeva ali Timoshenkova teorija). Debelina in širina nosilcev morata biti ustrezeno veliki, da te vsebujejo zadostno število linij nanosa materiala za reprezentativen vzorec 3D tiskane strukture. Dimenziiji baze  $b_w$  in  $b_h$  sta bili izbrani tako, da se čim bolj približamo teoretično konzolnemu vpetju nosilcev, hkrati pa omogočata pritrditev na stresalnik. Baza ne sme biti prevelika, saj ta deluje kot akumulator toplotne in zato kvari homogeno temperaturno polje nosilcev. Med posameznimi nosilci na isti strani je razmak  $g_1$ . Ta naj bo čim manjši, da ohranjamo majhnost vzorca in za lažje homogeno segrevanje, vendar ne premajhen, da ne prihaja do medsebojnih interakcij med nosilci. Dodatno je po sredini vzorca dodana še zareza globine debeline nosilcev ( $t$ ) in širine  $g_2$ . Ta služi zmanjševanju vplivov nosilcev na drugi strani med nihanjem. Med nihanjem se zato vsak nosilec bolj obnaša kot samostojno prožno telo, ne pa kot celotna struktura. Posledično lažje identificiramo lastno frekvenco nosilca

namesto lastne frekvence celotne strukture (slika 3.2). Vse dimenzijs so bile izbrane iterativno in so iste za vse testirane materiale. Njihove vrednosti so zbrane v tabeli 3.1.



Slika 3.1: Prikaz geometrije vzorca.

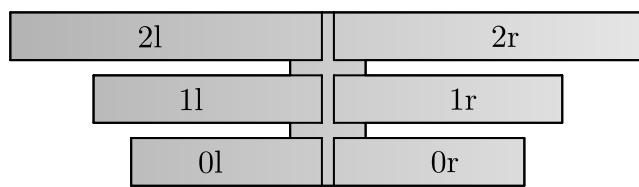


Slika 3.2: Prikaz vpliva zarez na dinamiko vzorca.

V nalogi bomo nosilce na vzorcu poimenovali kot je prikazano na sliki 3.3. Prvi znak označuje zaporedno številko nosilca: 0 za najkrajšega in 2 za najdaljšega. Naslednji znak označuje smer postavitve nosilca na vzorcu: l za levo (ang. *left*) in r za desno (ang. *right*) stran.

Preglednica 3.1: Uporabljene dimenzijske vrednosti vzorcev.

dimenzija	vrednost [mm]
$b_w$	10
$b_h$	4
$t$	1,6
$w$	6,3
$g_1$	2
$g_2$	1,6



Slika 3.3: Poimenovanje nosilcev na vzorcu.

## 3.2 3D tisk vzorcev

Glavna prednost izbranega vzorca je, da lahko v programu za rezanje vsakemu nosilcu predpišemo poljubne parametre izdelave. To omogoča preučevanje več različnih vplivov prametrov izdelave na enem samem vzorcu. Če celoten vzorec izdelamo z enakimi nastavitevami, pa dobimo več enakih meritev naenkrat.

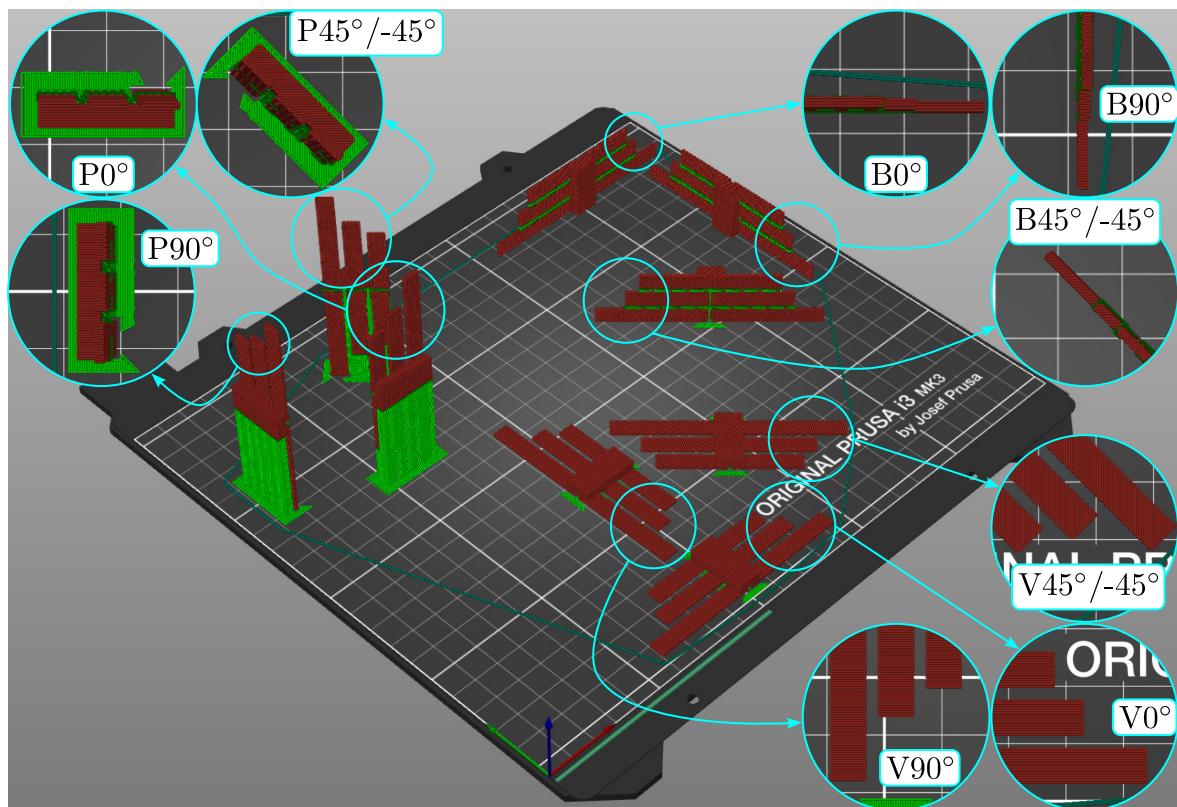
V tej nalogi smo vse nosilce na vzorcu natisnili z enakimi parametri izdelave, v FDM tehniki s 3D tiskalnikom Original Prusa i3 MK3S+ (slika 2.3), s parametri izdelave zbranimi v tabeli 3.2. G-kodo smo generirali v programu za rezanje PrusaSlicer 2.4.2.

Osredotočili smo se na vpliv kota polnila in orientacije tiskanja na modul elastičnosti in TRK. Omejili smo se na tri kote polnila:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  in  $45^\circ/-45^\circ$ . V primeru kota polnila  $0^\circ$  in  $90^\circ$  je ta ostal nespremenjen po celotni višini nosilca (z os 3D tiskalnika). Za kot polnila  $45^\circ/-45^\circ$  pa se je usmeritev polnila z vsako plastjo linij nanosa materiala zamaknila za  $90^\circ$ . Vzorce smo na mizi 3D tiskalnika tiskali v vodoravni (V), bočni (B) in pokončni (P) smeri. Skupaj tako devet kombinacij parametrov, s katerimi smo natisnili vzorce, kot prikazuje slika 3.4.

V okviru te naloge smo uporabo metode pokazali na dveh materialih: PLA proizvajalca Prusa Polymers imenovanim *Prusament PLA Prusa Galaxy Black* in PLA z dodatkom zmletih lesnih delcev brez proizvajalca Formfutura filament imenovanim *EasyWood*, ki ga bomo označevali kot woodPLA. Materialno specifični parametri izdelave so podani v preglednici 3.3

Preglednica 3.2: Uporabljeni parametri 3D tiska.

parameter	vrednost
višina slojev linij nanosa materiala	0,2 mm
<b>širina linij nanosa materiala</b>	0,45 mm
premer šobe	0,4 mm
stopnja pretoka	100 %
hitrost nanašanja materiala	$45 \text{ mm s}^{-1}$
<b>stopnja polnila</b>	100 %
<b>kot polnila</b>	spreminjali
vzorec polnila	pravokotno (ang. <i>Rectilinear</i> )
<b>razmak med sosednjimi linijami nanosa materiala</b>	-0,4 mm
število obodnih linij nanosa materiala	0
debelina zgornje in spodnje plasti	0
<b>orientacija tiska</b>	spreminjali
zunanja temperatura	23 °C
temperatura šobe	glede na filament
temperatura mize	glede na filament



Slika 3.4: 3D tisk vzorcev s preučevanimi parametri izdelave.

Preglednica 3.3: Materialno specifični parametri 3D tiska.

material	temperatura šobe [°C]	temperatura mize [°C]
PLA	215	60
woodPLA	225	60

### 3.3 Merjenje gostote

Gostoto natisnjениh vzorcev pomerimo preden vzorec pripravimo za ostale meritve. Določimo jo iz mase in volumna vzorca. Maso vzorca pomerimo s tehnico EMB 200-3 proizvajalca KERN, volumen pa privzamemo iz digitalnega modela.

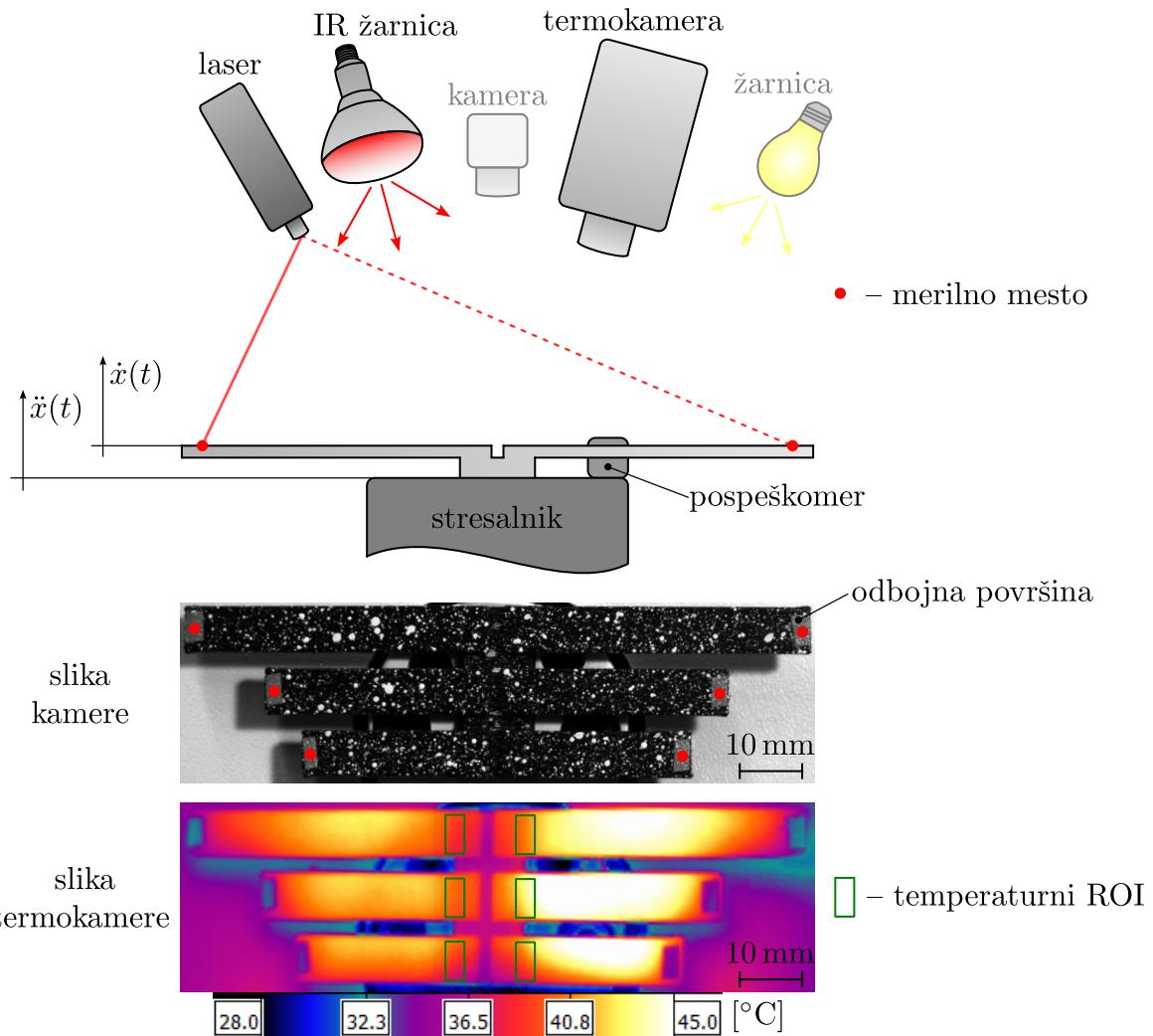
### 3.4 Merjenje modula elastičnosti

Slika 3.5 prikazuje shemo eksperimenta za merjenje modula elastičnosti po metodi opisani v poglavju 2.3.1.

Vzorec nalepimo s sekundnim lepilom na stresalnik in vzbujamo. Vzbujanje spremljamo s pospeškomerom nameščenim na glavi stresalnika. Z laserskim vibrometrom merimo hitrostni odziv nosilcev. Na laserju je nameščena glava z zrcali, ki omogoča usmerjanje laserskega žarka na merilno mesto na vsakem nosilcu (slika kamere na sliki 3.5). Za boljši signal laserja je na koncu vsakega nosilca nameščen trak z odbojno površino, na katerem se nahaja merilno mesto. Na vsakem merilnem mestu signal pospeškomera in laserja zajemamo 3 s in ocenimo FRF. Vzorec nato segrejemo z IR grelno žarnico do želene temperature, ki jo spremljamo s termokamerom, in meritev ponovimo. Pri tem si za vsako merilno mesto shranimo začetno, nekaj vmesnih in končno sliko termokamere tekom zajemanja signala na podlagi katerih identificiramo temperaturo nosilca. Analogno storimo tudi tekom procesa ohlajanja vzorca v okolico. S tem lahko preučujemo tudi temperaturni vpliv na modul elastičnosti.

Za vzbujanje uporabljamo stresalnik LDS V406 (Brüel & Kjaer), kateremu signal generiramo z generatorjem signala DG822 (Rigol) in ojačamo z ojačevalnikom EP4000 (Behringer). Odziv merimo z laserskim vibrometrom PVD 100 (Polytec) vzbujanje pa s pospeškomerom A/127/V (DJB Instruments), primernim za temperaturno območje  $-50\text{--}+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Signal laserja in pospeškomera zajemamo z merilno kartico NI 9234 (National Instruments Corporation). Za spremjanje temperature uporabljamo termokameru FAST M3k (Telops).

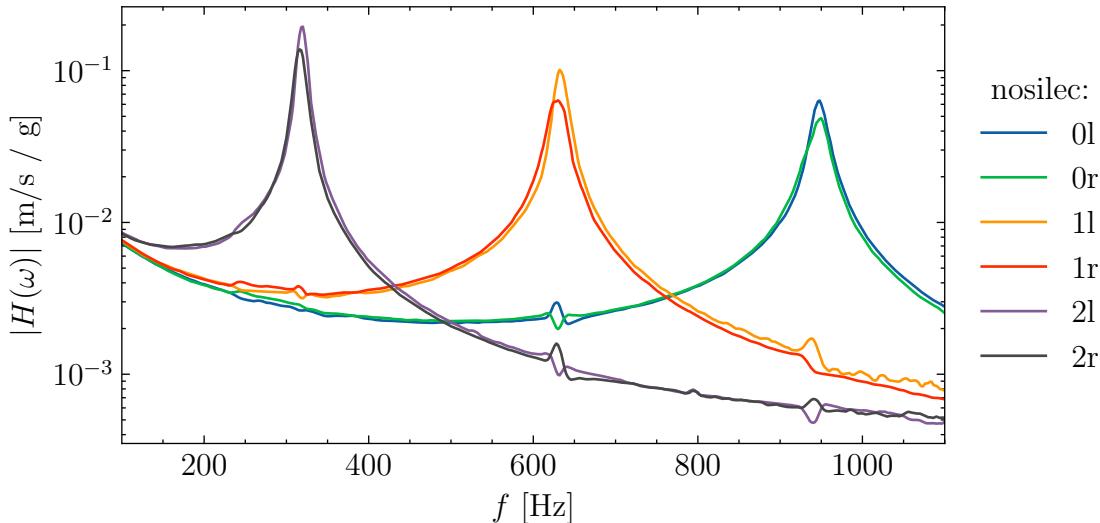
Temperaturo nosilca, pri kateri določimo modul elastičnosti, opredelimo kot povprečno temperaturo znotraj ROI-ja vseh slik, ki smo jih zajeli tekom meritve enega odziva tega nosilca. ROI izberemo na območju konzolnega vpetja, tam namreč pričakujemo, da v prvi nihajni obliki nosilca pride do največjih koncentracij napetosti. Posledično je na tem območju nosilec najbolj občutljiv na temperaturne spremembe materialnih lastnosti. Natančneje ROI na vsakem nosilcu izberemo tako, da je ta od zgornjega in spodnjega roba nosilca oddaljen 2 piksla v izogib robnim pojavom in za debelino nosilca



Slika 3.5: Prikaz eksperimenta za merjenje modula elastičnosti.

(1,6 mm) levo in desno od točke vpetja. Uporabljen temperaturni ROI je prikazan na sliki termokamere na sliki 3.5.

Iz zajetega signala tvorimo FRF, ki je za primer vzorca PLA V0° prikazan na sliki 3.6. Iz FRF-ja identificiramo lastno frekvenco kot frekvenco, pri kateri ta doseže največjo absolutno vrednost. Iz lastne frekvence po Euler–Bernoullijevi teoriji izračunamo ustrezni modul elastičnosti glede na usmeritev polnila, kot je opisano v poglavju 2.3.1. Preglednica 3.4 podaja povezavo med načinom 3D tiska vzorca in modulom elastičnosti ortotropnega materialnega modela, ki ga z njim določimo. Pri tem za izračun geometrijskih količin uporabimo nazivne mere iz digitalnega modela.



Slika 3.6: FRF vzorca PLA V0° pri sobni temperaturi.

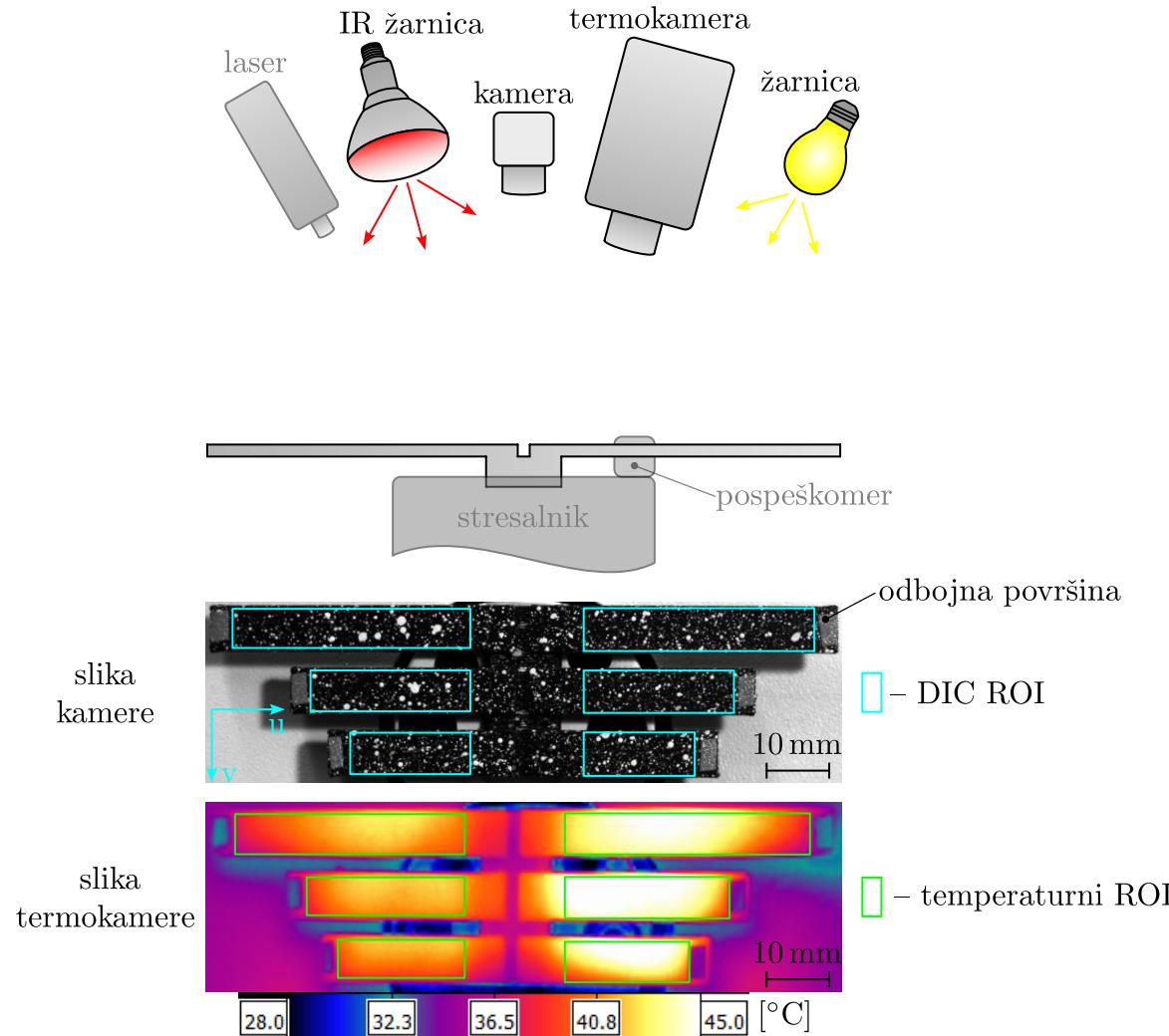
Preglednica 3.4: Povezava med vzorci in moduli elastičnosti ortotropnega materialnega modela, ki jih z njimi pomerimo.

		kot polnila		
		0°	90°	45° / -45°
orientacija	V	$E_1$	$E_2$	/
	B	$E_1$	$E_2$	/
	P	$E_3$	$E_3$	$E_3$

### 3.5 Merjenje temperaturnega razteznostnega koeficiente

Slika 3.7 prikazuje shemo eksperimenta za merjenje TRK-ja po metodi opisani v poglavju 2.4.1.

Zgornjo površino vzorca najprej pobarvamo z naključnim lisastim vzorcem, nato pa vzorec vpnemo v stresalnik. Za boljšo sliko kamere vzorec osvetljujemo. S kamero in termokamero zajamemo referenčno sliko vzorca in nato začnemo s segrevanjem. Za čim bolj homogeno segrevanje vzorec segrevamo z IR grelno žarnico, ki jo ciklično prižigamo z relejnim vezjem. Čas osvetljevanja z IR žarnico prilagajamo, da držimo konstantno hitrost segrevanja vzorca  $\sim 6\text{ °C/min}$ . Ko je IR žarnica ugasnjena, sinhrono zajamemo sliko obeh kamer, IR svetloba namreč moti sliko predvsem termokamere. Za sinhrono delovanje kamer jima istočasno pošljemo signal za zunanje sproženje zajema slike (ang. *External Trigger*). S segrevanjem in zajemanjem slik nadaljujemo, dokler ne dosežemo želene temperature vzorca. Nato ugasnemo IR žarnico in pustimo, da se vzorec hladi z odvodom toplote v okolico. Med tem zajemamo sliko z obema kamerama s prilagodljivim časovnim intervalom, da imamo sliko približno na  $0,5\text{ °C}$ . S fazo ohlajanja nadaljujemo dokler ne dosežemo najmanjše želene temperature vzorca. Takrat se odločimo, če z eksperimentom končamo ali nadaljujemo v naslednji cikel segrevanja in ohlajanja. Iz slik kamere in termokamere nato določimo TRK vsakega nosilca.



Slika 3.7: Prikaz eksperimenta za merjenja TRK-ja.

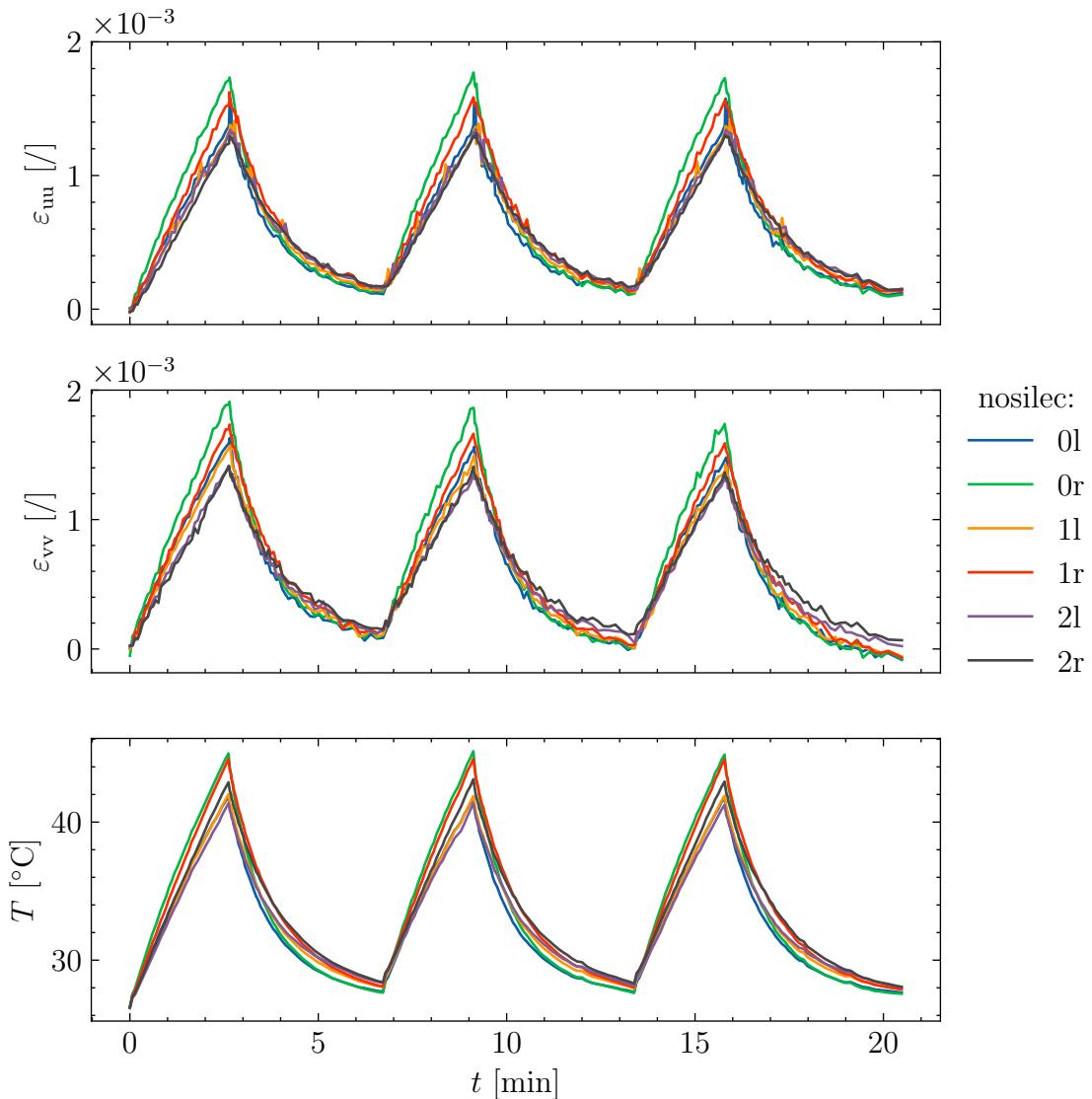
Slike zajemamo s kamero acA4112-20um (Basler ace) in termokamero FAST M3k (Telops). Slike kamere shranjujemo v nekomprimiranem slikovnem formatu TIFF (ang. *Tagged Image File Format*), saj ta omogoča shranjevanje slik visoke kvalitete brez izgube podatkov zaradi komprimiranja, slike termokamere pa v proizvajalčevem formatu. Signal za sinhrono delovanje kamer pošiljamo z merilno kartico NI 9263 (National Instruments Corporation). Relejno vezje za krmiljenje IR žarnice upravljamo z merilno kartico NI 9482 (National Instruments Corporation).

Povprečno deformacijo nosilca vzdolž (smer  $u$ ) in pravokotno (smer  $v$ ) na njegovo dolžino ocenimo po metodi DIC z afino transformacijo ROI-ja prikazanega na sliki kamere na sliki 3.7. Z ROI-jem želimo zajeti čim večjo površino nosilca, da dobimo čim boljšo oceno deformacije. ROI izberemo tako, da je ta od zgornjega in spodnjega roba nosilca oddaljen 8 pikslov. S tem se izognemo robnim pojavom in zagotovimo, da se ROI na vseh nadaljnjih slikah nahaja na nosilcu. Dodatno je ROI 3,2 mm oddaljen od začetka in konca nosilca, da se izognemo robnim pojavom vpetja na začetku in odbojni površini na koncu.

Temperaturo nosilca določimo kot povprečno temperaturo znotraj ROI-ja na sliki ter-

mokamere (slika 3.7). ROI izberemo kot območje, ki je 2 piksla oddaljeno od zgornjega in spodnjega roba nosilca, da se izognemo robnim pojavom, in 3,2 mm od začetka in konca, s čimer se izognemo robnim pojavom vpetja na začetku in odbojni površini na koncu nosilca.

Slika 3.8 prikazuje izmerjeno deformacijo in temperaturo nosilcev za primer vzorca PLA V90°. Iz meritev lahko določimo TRK v  $u$  (vzdolž dolžine nosilca) in  $v$  (pravokotno na dolžino nosilca) smeri. Skupaj z znanim načinom tiskanja vzorca (orientacija in kot polnila) lahko, kot podaja preglednica 3.5, določimo TRK v ustreznih smerih ortotropnega materialnega modela.



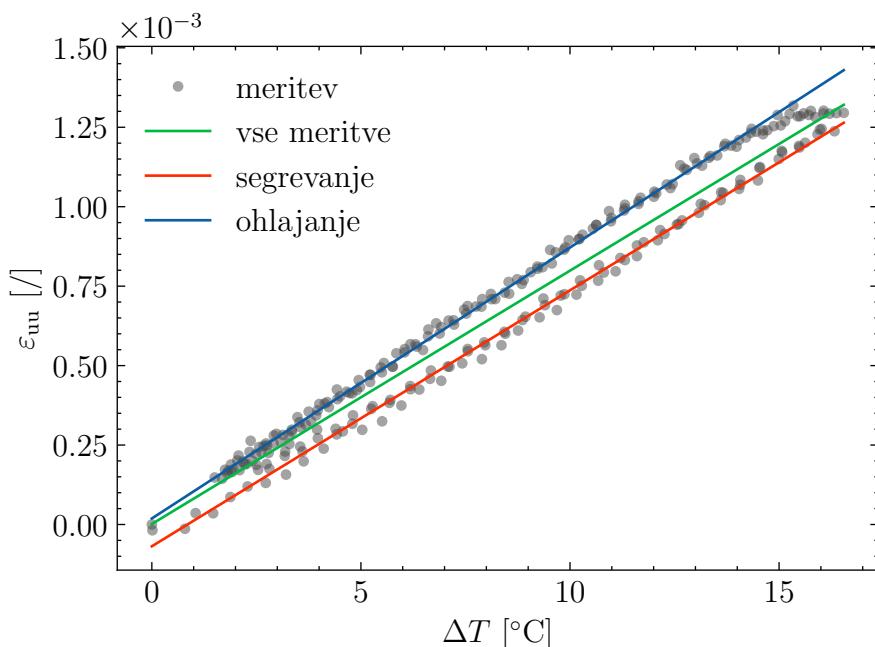
Slika 3.8: Meritev deformacije in temperature vzorca PLA V90°.

TRK za vsak nosilec določimo kot naklon premice, ki se po kriteriju najmanjše vsote kvadratov razlik, najbolje prilega točkam na  $\varepsilon$ - $\Delta T$  grafu. Pri tem temperaturno razliko iz meritev temperature izračunamo kot razliko med temperaturo obravnavane slike in začetne/referenčne slike. Ta pristop je na sliki 3.9 prikazan z zeleno črto. Izkaže se, da zaradi nastale histereze med segrevanjem in ohlajanjem ta način ne daje najbolj zanesljivih rezultatov. Ob koncu obeh faz imamo namreč več meritev zaradi počasnejšega

Preglednica 3.5: Povezava med vzorci, smerjo deformacije in TRK-ji ortotropnega materialnega modela, ki ga na ta način pomerimo.

orientacija	kot polnila	deformacija	
		$\varepsilon_{uu}$	$\varepsilon_{vv}$
V	0°	$\alpha_1$	$\alpha_2$
	45°/-45°	/	/
	90°	$\alpha_2$	$\alpha_1$
B	0°	$\alpha_1$	$\alpha_3$
	45°/-45°	/	/
	90°	$\alpha_2$	$\alpha_3$
P	0°	$\alpha_3$	$\alpha_1$
	45°/-45°	$\alpha_3$	/
	90°	$\alpha_3$	$\alpha_2$

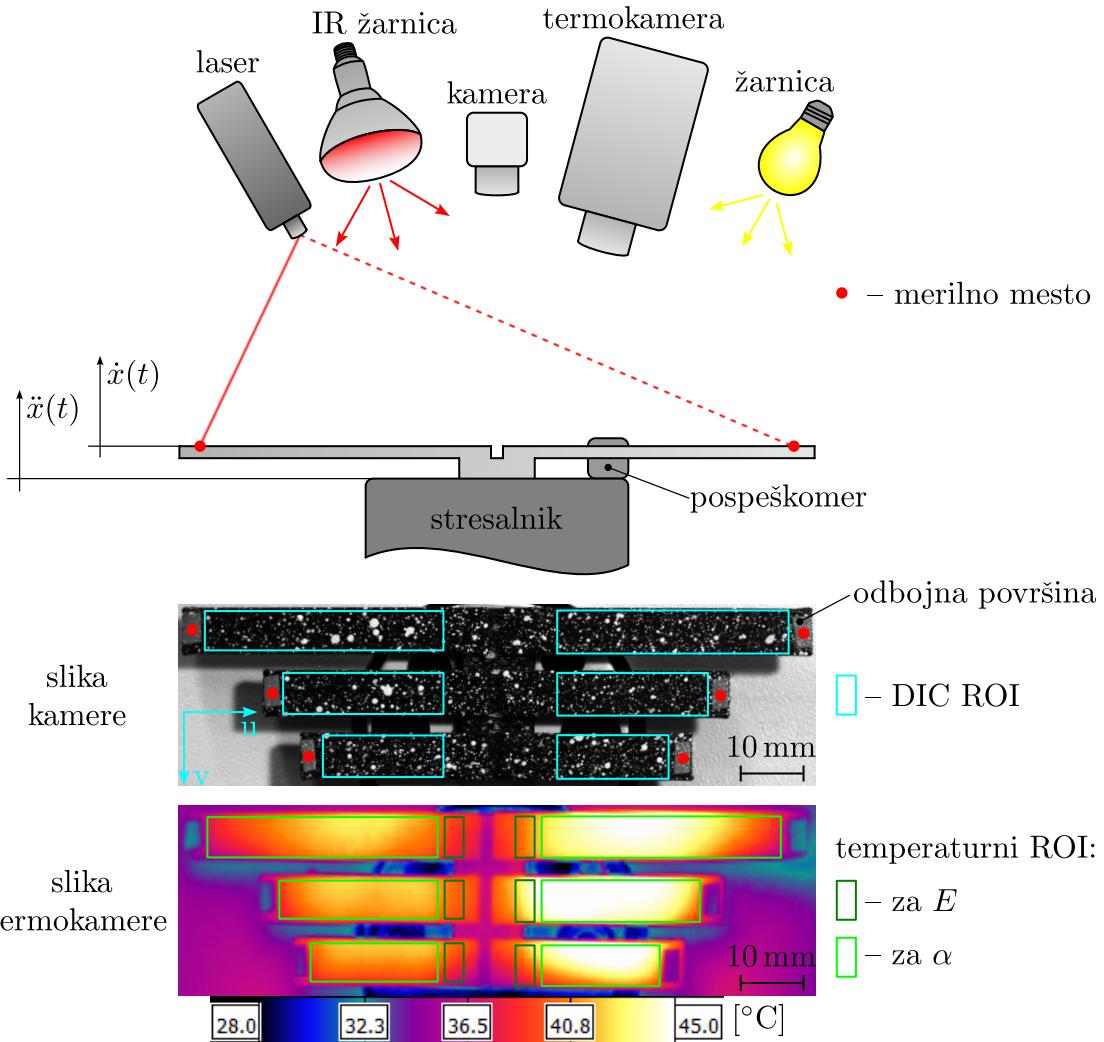
segrevanja oz. ohlajanja, ki prevesijo premico in umetno zmanjšujejo TRK. Histereza je posledica površinske meritve temperature. Ob segrevanju namreč pri isti deformaciji pomerimo večjo temperaturo pri ohlajanju pa manjšo kot je dejanska temperatura nosilca zaradi toplotne kapacitivnosti materiala. Ta vpliv bi zmanjšali s tanjšim nosilcem, vendar bi ob pretiravanju imeli težavo s premajhnim številom linij nanosa materiala za reprezentativen vzorec. V tej nalogi smo histerezo kompenzirali na način, da smo meritve tekom segrevanja in ohlajanja obravnavali ločeno. Ločeno smo poiskali premico, ki se po kriteriju najmanjše vsote kvadratov razlik najbolje prilega meritvam ob segrevanju (rdeča črta na sliki 3.9) in ohlajanju (modra črta na sliki 3.9). TRK nosilca nato določimo kot povprečje koeficientov obeh premic.



Slika 3.9: Prikaz izračuna TRK-ja za nosilec 2r vzorca PLA V90°.

### 3.6 Metoda za sočasno merjenje modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficienta

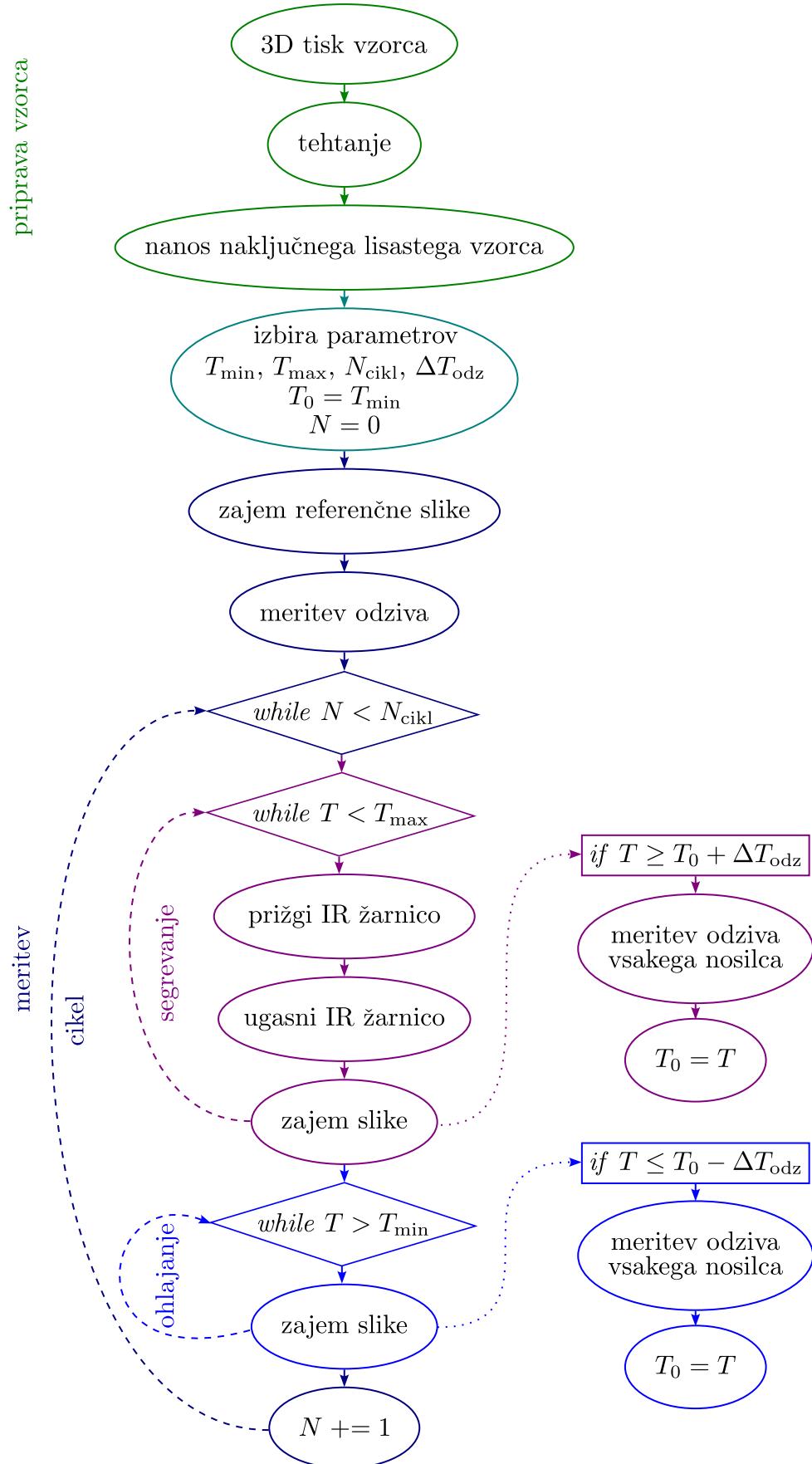
Prednost predstavljenih metod za merjenje modula elastičnosti in TRK-ja je, da jih lahko združimo in količini merimo sočasno. Shema skupnega eksperimenta je prikazana na sliki 3.10 in združuje uporabljeno opremo, ki smo jo predstavili v prejšnjih dveh poglavjih.



Slika 3.10: Prikaz eksperimenta za sočasno merjenja modula elastičnosti in TRK-ja.

Ko imamo 3D natisnjen vzorec z želenimi parametri, ga najprej stehtamo in iz mer digitalnega modela določimo njegovo gostoto. Na zgornojo površino vzorca nanesemo naključni lisasti vzorec in na konec vsakega nosilca nalepimo odbojni trak. Nato vzorec s sekundnim lepilom v stresalnik in začnemo z vzbujanjem z belim šumom. Vzorec je vzbujan ves čas eksperimenta, da se izognemo skokom zaradi spremembe položaja izven ravnine merjenja ob koncu vzbujanja. Sledi kalibracija pozicij laserja na merilno mesto vsakega nosilca. Nato določimo število ciklov  $N_{\text{cikl}}$  med želeno minimalno  $T_{\min}$  in maksimalno  $T_{\max}$  povprečno temperaturo vzorca, ki jo spremljamo s termokamerou. Izberemo tudi temperaturni korak za merjenje odziva nosilcev  $\Delta T_{\text{odz}}$ . Meritev začnemo

s sinhronim zajemom referenčne slike kamere in termokamere ter meritvijo odziva na vsakem nosilcu pri sobni temperaturni. Sledi ciklično prižiganje IR grelne žarnice za segrevanje vzorca. Ko je IR žarnica ugasnjena istočasno zajamemo sliko z obema kamerama. Čas osvetljevanja prilagajamo, da ohranjamo konstantno hitrost segrevanja vzorca. Iz slike termokamere razberemo povprečno temperaturo celotnega vzorca ( $T$ ), na podlagi katere se odločimo, če nadaljujemo z gretjem ( $T < T_{\max}$ ) ali gremo v fazo ohlajanja ( $T \geq T_{\max}$ ). V fazi ohlajanja je IR žarnica ves čas ugasnjena in vzorec se hlači z odvodom topote v okolico, še vedno pa istočasno zajemamo slike z obema kamerama. Časovni interval zajemanja slik prilagajamo, da ohranjamo konstantno temperaturno ločljivost. Ko povprečna temperatura vzorca pade pod minimalno ( $T \leq T_{\min}$ ), začnemo ponovno s fazo segrevanja ( $N += 1$ ) ali pa zaključimo z eksperimentom, če je bilo doseženo maksimalno število ciklov ( $N = N_{\text{cikl}}$ ). Meritev odziva nosilcev istočasno opravljamo v obeh fazah po zastavljenem temperaturnem koraku ( $\Delta T_{\text{odz}}$ ) glede na povprečno temperaturo vzorca ( $T$ ). Pri tem si shranjujemo indeks slike ob začetku in koncu merjenja odziva vsakega nosilca, da lahko določimo temperaturo meritve modula elastičnosti. Opisani postopek merjenja je prikazan v diagramu na sliki 3.11.



Slika 3.11: Diagram poteka sočasne meritve modula elastičnosti in TRK-ja.



# 4 Rezultati in diskusija

V nadaljevanju sledi prikaz rezultatov predlagane metode na primeru vzorcev iz PLA in woodPLA. Poglavlje je razdeljeno na tri dele. V vsakem bomo predstavili ključne ugotovitve merjenja gostote, modula elastičnosti in TRK-ja. Najprej bomo komentirali splošne ugotovitve testiranj nato pa bomo iz rezultatov določili ortotropne materialne konstante.

## 4.1 Gostota vzorcev

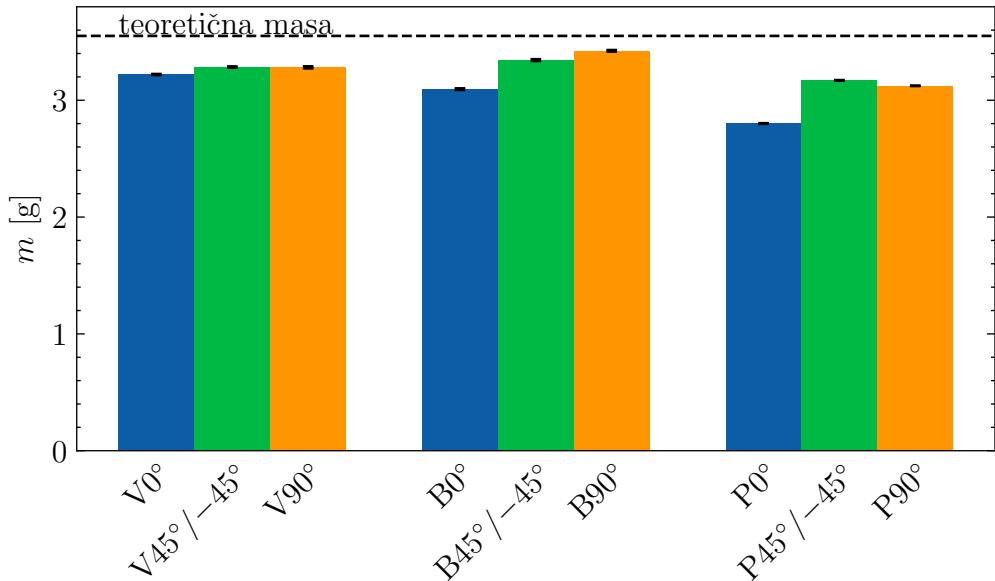
Ker smo vzorcem merili zgolj maso, dimenzijske pa smo privzeli iz digitalnega modela, si bomo pogledali in komentirali rezultate meritev mase. Ti rezultati so za PLA vzorce prikazani na sliki 4.1, za woodPLA vzorce pa na sliki 4.2. S črno črtkano črto je prikazana teoretična masa vzorca, katero izračunamo iz gostote materiala podane s strani proizvajalca in volumna vzorca iz digitalnega modela.

Zaradi narave 3D tiska imajo natisnjeni kosi, tudi če izberemo 100 % stopnjo polnila, še vedno mikroskopske praznine. Zato noben izmed vzorcev tudi ne dosega teoretične mase popolnoma homogenega materiala. Na količino praznin lahko vplivamo z višino slojev linij nanosa materiala in razmakom med sosednjimi linijami nanosa materiala. Ta dva parametra tiska neposredno nismo spremenjali, smo pa z orientacijo vzorca na mizi 3D tiskalnika posredno vplivali na praznine. Program za rezanje namreč digitalni model razdeli na diskretno število linij nanosa, kar vedno ne odraža enakih dimenzij. Najbolj očitno je to v primeru vzorcev B0° in P0°. V obeh primerih namreč skušamo s tremi linijami nanosa materiala natisniti debelino nosilca ( $3 < t/\text{širina nanosa} = 1,6 \text{ mm}/0,45 \text{ mm} = 3,56$ )<sup>1</sup>. Kot rezultat dobimo manjše dimenzijske nosilcev ( $3 \cdot \text{širina nanosa} = 3 \cdot 0,45 \text{ mm} = 1,35 \text{ mm} < 1,6 \text{ mm}$ )<sup>1</sup>, kar se odraža kot manjša masa teh vzorcev. Dodatno netočnost dimenzij vnašamo tudi s kratkimi gibi šobe in hitrimi menjavami smeri tiskanja pri vzorcih orientacije B in P zaradi manjših dimenzij v ravnini  $x-y$  tako orientiranega vzorca. Zato je pri vzorcih s temo orientacijama opaziti tudi večje odstopanje med masami vzorcev z različnim kotom polnila. Visoka masa vzorcev B90° tako najverjetneje ni posledica manjšega števila praznin ampak večje debeline nosilcev. V praksi ta problem zmanjšamo tako, da uporabljamo

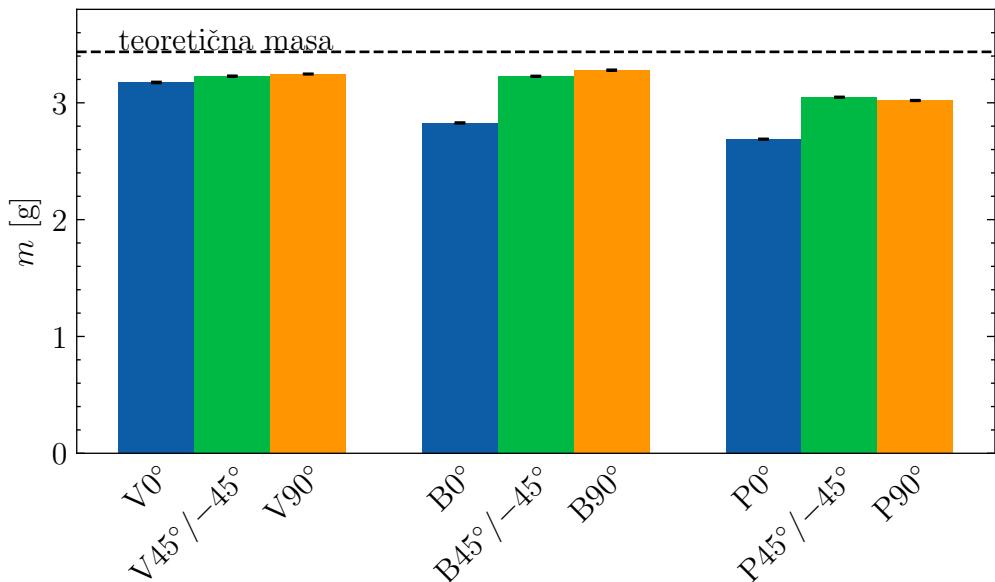
<sup>1</sup>Prikazan izračun je zelo poenostavljen in je namenjen zgolj prikazu opisane ideje. V praksi bi za pravilen izračun potrebovali upoštevati še dodatne parametre, kot so razmak med sosednjimi linijami nanosa materiala in stopnja pretoka

obodne linije nanosa in kot polnila  $45^\circ/-45^\circ$ . S slednjim tudi v našem primeru dosežemo približno enako maso vzorcev ne glede na orientacijo tiska.

Izračunane gostote vzorcev iz pomerjenih mas so zbrane v preglednici 4.1.



Slika 4.1: Mase PLA vzorcev.



Slika 4.2: Mase woodPLA vzorcev.

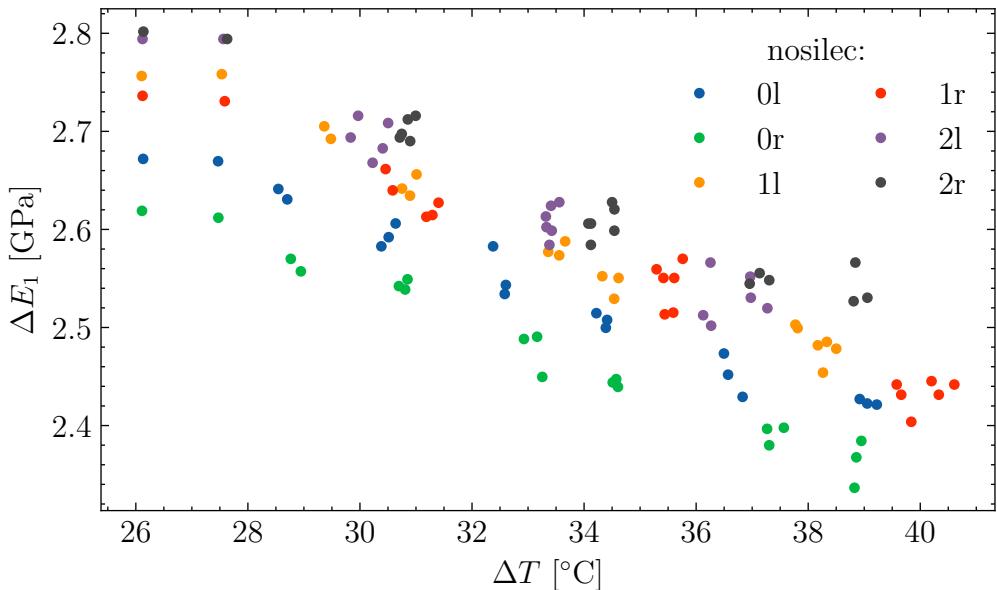
Preglednica 4.1: Gostote vzorcev.

način 3D tiska	material	
	PLA [kg/m <sup>3</sup> ]	woodPLA [kg/m <sup>3</sup> ]
V0°	1124,6 ± 1,5	1108,5 ± 1,5
V45°/-45°	1146,9 ± 1,8	1127,2 ± 1,2
V90°	1145,9 ± 3,0	1133,7 ± 0,5
B0°	1080,9 ± 2,3	987,5 ± 1,1
B45°/-45°	1167,7 ± 2,6	1127,0 ± 1,0
B90°	1195,5 ± 2,2	1145,1 ± 1,3
P0°	978,1 ± 0,9	939,1 ± 0,8
P45°/-45°	1107,1 ± 0,8	1064,6 ± 0,7
P90°	1090,7 ± 0,4	1054,6 ± 0,9
teoretična	1240	1200

## 4.2 Modul elastičnosti

Slika 4.3 prikazuje rezultat meritev modula elastičnosti nosilcev vzorca PLA V0°. Teoretično naj bi vsi nosilci imeli enak modul elastičnosti, vendar zaradi odstopanj dimenzij nosilca od nazivnih (predvsem je ključna dolžina) in narave 3D tiska dobimo manjši raztros meritev. Z naravo 3D tiskanja mislimo predvsem na slabše povezovanje linij nanosa materiala zaradi nečistoč v filamentu, variacij temperature in ostalih zunanjih dejavnikov. Posledično kljub temu, da je celoten vzorec izdelan v enem procesu lastnosti nosilcev niso popolnoma enake. Slabša povezava linij nanosa v točki vpetja pa bistveno vliva na togost takega nosilca. Vseeno je raztros med nosilci znotraj merjenega temperturnega območja dokaj majhen. Vsi nosilci kažejo tudi enak trend padanja modula elastičnosti s temperaturo, česar se bomo dotaknili malenkost kasneje.

Slike 4.4 in 4.5 prikazujeta modul elastičnosti vzorcev pri sobni temperaturi. Če se najprej osredotočimo na vzorce PLA, opazimo, da imajo vzorci natisnjeni v isti orientaciji podoben modul elastičnosti. Izstopajo zgolj moduli elastičnosti vzorcev B0°, B90° in P0°. Prva dva kažeta zelo velik raztros med nosilci. Razlog za to je najverjetneje v procesu izdelave. Oba imata namreč po prerezu nosilca malo linij nanosa materiala in sta zato toliko bolj dovetna na slabšo povezavo med njimi. Slabša povezava med njimi pa bistveno zmanjšuje togost nosilcev in posledično modul elastičnosti. Vzorec P0° ima izrazito manjši modul elastičnosti kot ostala dva z isto orientacijo. To pripisujemo netočnosti dimenzij nosilcev, kar smo predvidevali tudi iz meritev mase. Najverjetneje so dimenzije tako natisnjениh nosilcev manjše od dimenzij digitalnega modela, ki smo jih tudi uporabili v preračunu zaradi česar posledično izračunamo manjši modul elastičnosti. S tem lahko iz meritev sklepamo, da kot polnila bistveno ne vpliva na modul elastičnosti struktur iz PLA. Z različno orientacijo tiskanja se modul elastičnosti PLA vzorcev nekoliko zmanjšuje. Pri vzorcih z orientacijo V prevladuje prekrivanje med sosednjimi linijami nanosa materiala, zaradi negativnega razmaka med njimi, ki očitno tvori močnejšo vez kot povezava med plastmi linij nanosa materiala, ki prevladuje pri vzorcih z orientacijo P, saj imajo te manjši modul elastičnosti. Bočno orientirani nosilci

Slika 4.3: Modul elastičnosti  $E_1$  nosilcev vzorca PLA V0°.

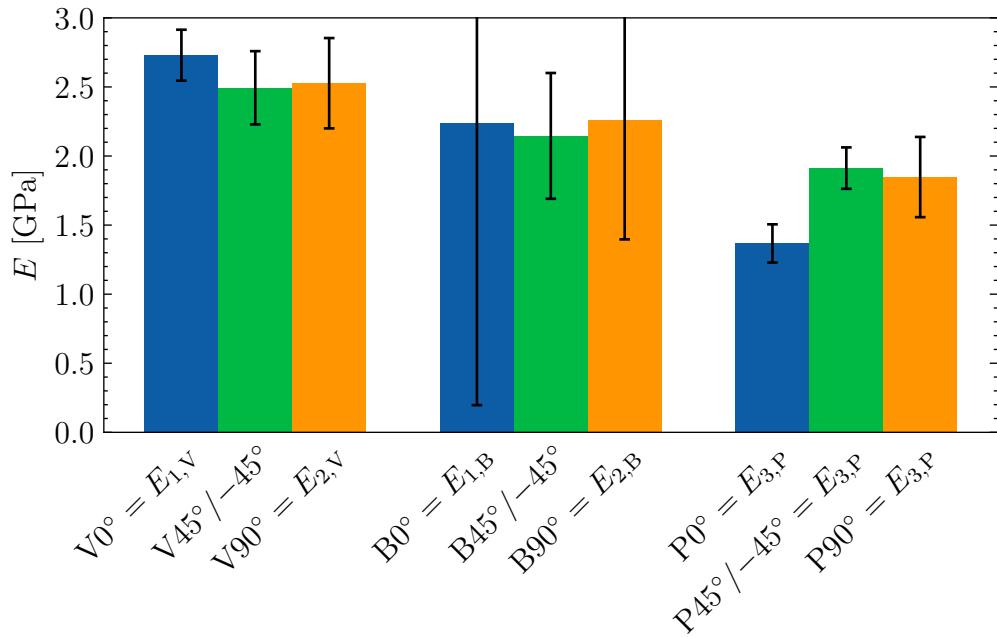
pa so nekje vmes.

Če se sedaj osredotočimo na woodPLA vzorce, opazimo, da te kažejo izrazito bolj anizotropne lastnosti. Poleg anizotropije, ki jo vnašamo s procesom 3D tiska, je v tem primeru prisotna še anizotropija v materialu. Ob ekstrudirjanju filamenta skozi šobo se namreč leseni delci orientirajo v smer toka materiala in kasneje tako tudi ostanejo. Posledično ima že sam material drugačne lastnosti glede na smer opazovanja. Iz meritev vzorcev orientacije V vidimo, da so strukture iz takega materiala najbolj toge v smeri vzdolž lesenih delcev, saj je modul elastičnosti vzorca V0° največji. Najmanjšo togost pa izkazujejo v smeri pravokotno na usmeritev delcev (vzorec V90°). Pričakovano je modul elastičnosti vzorca z usmeritvijo 45°/−45° med obema. Ponovno lahko opazimo iste probleme vzorcev B0°, B90° in P0°, kot pri vzorcih iz PLA. To opozarja na pomembnost pravilne orientacije izdelka na mizi 3D tiskalnika za doseganje želenih lastnosti. Enako kot pri PLA vzorcih tudi woodPLA vzorci kažejo bistveno manjšo togost pri orientaciji P. Iz tega sklepamo, da na modul elastičnosti woodPLA vplivata tako kot polnila kot orientacija tiska.

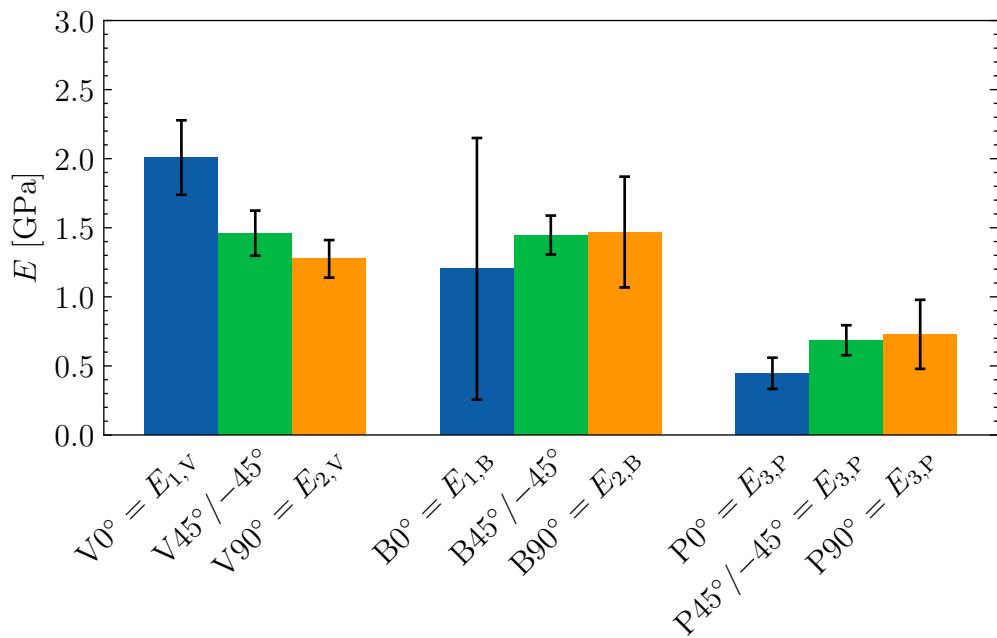
Primerjava materialov kaže, da z dodatkom lesnih delcev PLA matrici vnesemo anizotropijo in zmanjšamo togost materiala. Namreč vsi woodPLA vzorci imajo manjšo togost kot PLA vzorci. Dodatno lahko opazimo tudi, da ima orientacija 45°/−45° pri obeh materialih in vseh orientacijah majhen raztros. To potrjuje smiselnost uporabe takega načina polnila, saj ta očitno daje najbolj konsistentne rezultate.

V skladu z ortotropnim materialnim modelom predstavljenim v poglavju 2.2.2.1 lahko iz meritev določimo module elastičnosti v treh smereh KS 123 vzorcev. Rezultati za oba materiala so zbrani v tabeli 4.2.

Zaradi že omenjenih težav z meritvami vzorcev B0°, B90° in P0°, ne moremo z govorostjo trdi, da so moduli elastičnosti v smereh KS 123 odvisni od orientacije tiska. Iz vzorcev V0°, V90° in P90° lahko določimo vse tri module elastičnosti ortotropnega materialnega modela. Te so za PLA vzorce prikazani na sliki 4.6, za woodPLA vzorce



Slika 4.4: Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi PLA vzorcev.



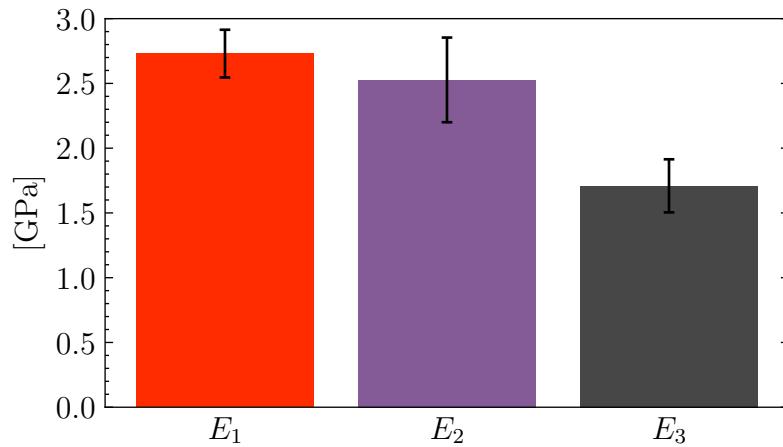
Slika 4.5: Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi woodPLA vzorcev.

pa na sliki 4.7.

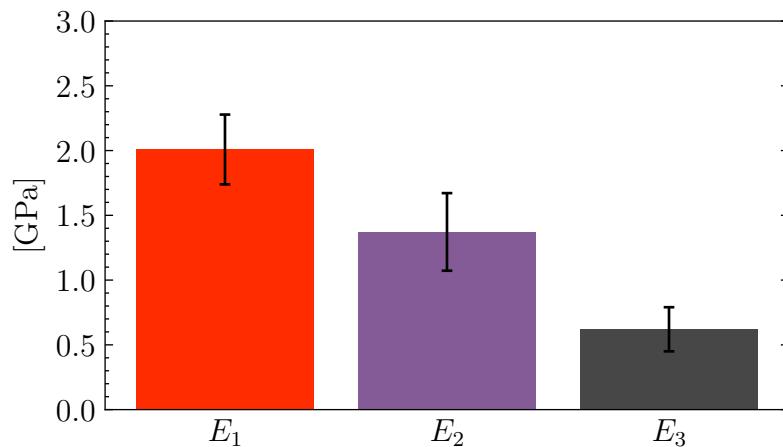
Rezultati PLA vzorcev kažejo, da sta modula elastičnosti vzdolž ( $E_1$ ) in pravokotno ( $E_2$ ) na linije nanosa materiala podobna. V tej ravnini 3D natisnjene strukture iz PLA ne kažejo izrazitih ortotropnih lastnosti, je pa modul ortogonalno na plasti linij nanosa materiala ( $E_3$ ) izrazito manjši. To je verjetno zaradi šibkejšega spoja med plastmi linij nanosa materiala, kar se odraža kot manjša togost v tej smeri. Za razliko od PLA vzorcev, woodPLA vzorci kažejo izrazite ortotropne materialne lastnosti. Pričakovano

Preglednica 4.2: Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi v smereh KS 123 različnih orientacij tiskanja.

material	orientacija	$E_1$ [GPa]	$E_2$ [GPa]	$E_3$ [GPa]
PLA	V	$2,7 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,3$	/
	B	$2,2 \pm 2,0$	$2,3 \pm 0,9$	/
	P	/	/	$1,7 \pm 0,2$
woodPLA	V	$2,0 \pm 0,3$	$1,3 \pm 0,1$	/
	B	$1,2 \pm 0,9$	$1,5 \pm 0,4$	/
	P	/	/	$0,6 \pm 0,2$



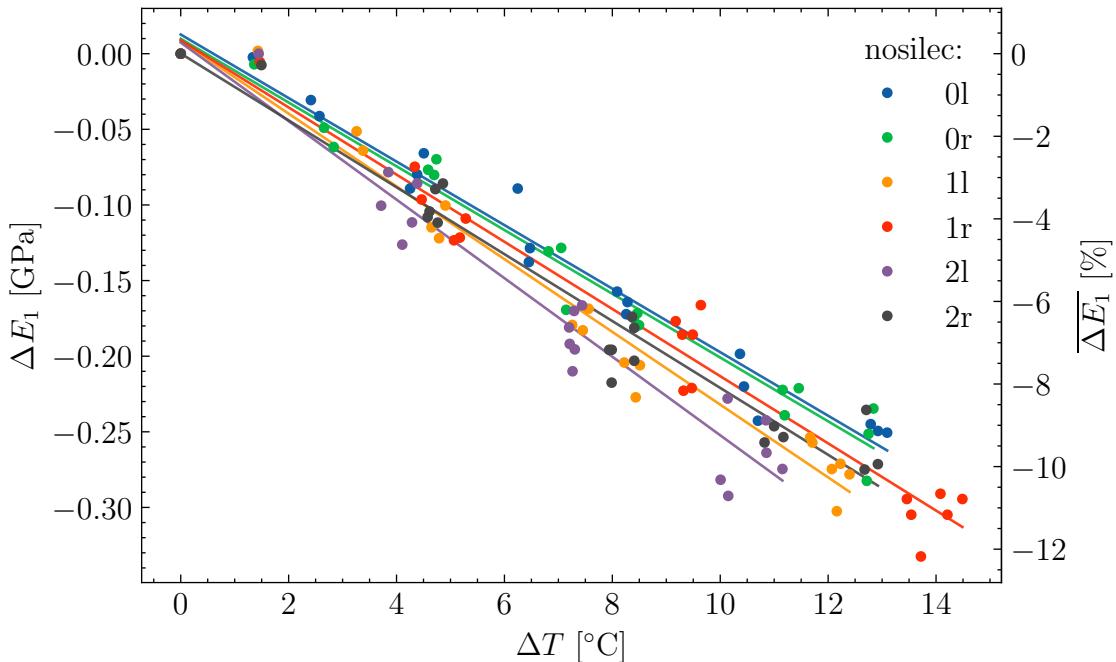
Slika 4.6: Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi ortotropnega materialnega modela za PLA.



Slika 4.7: Moduli elastičnosti pri sobni temperaturi ortotropnega materialnega modela za woodPLA.

je modul elastičnosti v smeri linij nanosa materiala ( $E_1$ ) največji, saj so v to smer orientirani tudi lesni vključki. Modul elastičnost pravokotno na linije nanosa materiala ( $E_2$ ) je nekoliko manjši, v ortogonalni smeri pa je tudi v tem primeru najmanjši ( $E_3$ ). Če se sedaj vrnemo k temperturni odvisnosti modula elastičnosti, opazimo, da kljub

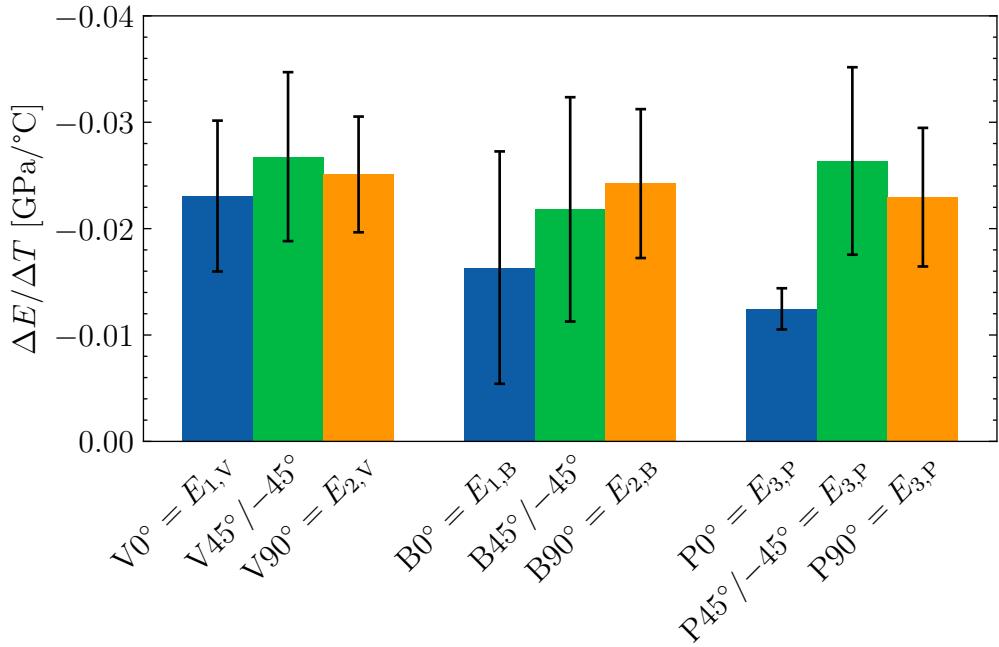
raztrosu meritev modulov elastičnosti med nosilci imajo te približno enak trend linearnega padanja s temperaturo. Slika 4.8 prikazuje spremembo modula elastičnosti s spremembo temperature glede na referenčno meritev pri sobni temperaturi za vzorec PLA V0°. Ta slika potrdi našo hipotezo o podobnem trendu padanja modulov elastičnosti, saj meritve ležijo približno na isti premici. Desna  $y$  os prikazuje spremembo modula elastičnosti v odstotkih glede na povprečni referenčni modul elastičnosti vseh meritev. Iz nje opazimo, da se v opazovanem temperaturnem območju modul elastičnosti zmanjša za približno 10 %. Ta sprememba ni zanemarljivo majhna, zato bomo v nadaljevanju predstavili pristop s katerim lahko to upoštevamo.



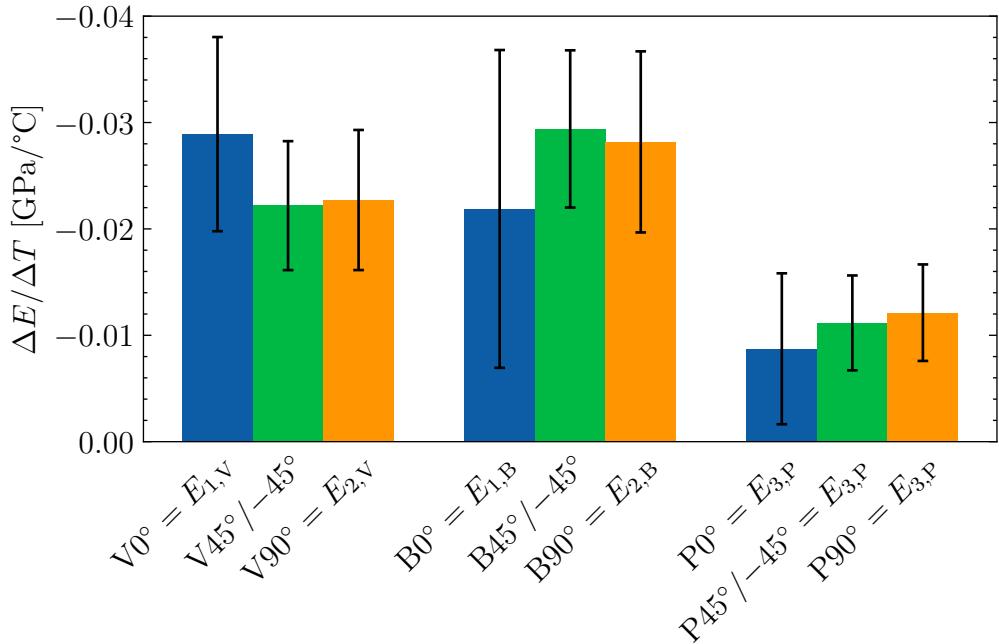
Slika 4.8: Primerjava spremembe  $E_1$  s temperaturo nosilcev vzorca PLA V0°.

Če na meritev posameznega nosilca prilagodimo linearno funkcijo po metodi najmanjšega kvadratnega odstopanja (kot prikazujejo črte na sliki 4.8), lahko iz naklona določimo koeficient spremenjanja modula elastičnosti s temperaturo  $\Delta E/\Delta T$ . Večji kot je ta po absolutni vrednosti, bolj je modul elastičnosti materiala odvisen od temperature. S poznavanjem tega koeficiente lahko v enačbah za karakterizacijo bimorfnih elektrotermičnih mehkih aktuatorjev upoštevamo tudi temperaturno spremenjanje togosti. Za vsak vzorec določimo  $\Delta E/\Delta T$  kot povprečni koeficient vseh nosilcev. Rezultati za PLA vzorce so prikazani na sliki 4.9, za woodPLA vzorce pa na sliki 4.10.

PLA vzorci nakazujejo na podobno vedenje ne glede na orientacijo in usmeritev. Z izjemo le vzorca PLA P0°, katerega odstopanje je verjetno razlog že prej omenjenih težav izdelave. Vzorci iz woodPLA prav tako nakazujejo na podobno temperaturno spremembo modula elastičnosti pri vzorcih z isto orientacijo. Vseeno zaradi večjega raztrosa brez dodatnih meritev težko trdimo da je koeficient  $\Delta E/\Delta T$  neodvisen od kota polnila. Opazimo pa lahko, da imajo vzorci woodPLA z orientacijo P izrazito manjšo temperaturno spremembo modula elastičnosti.



Slika 4.9: Koeficient linearne spremembe modula elastičnosti s temperaturo PLA vzorcev.

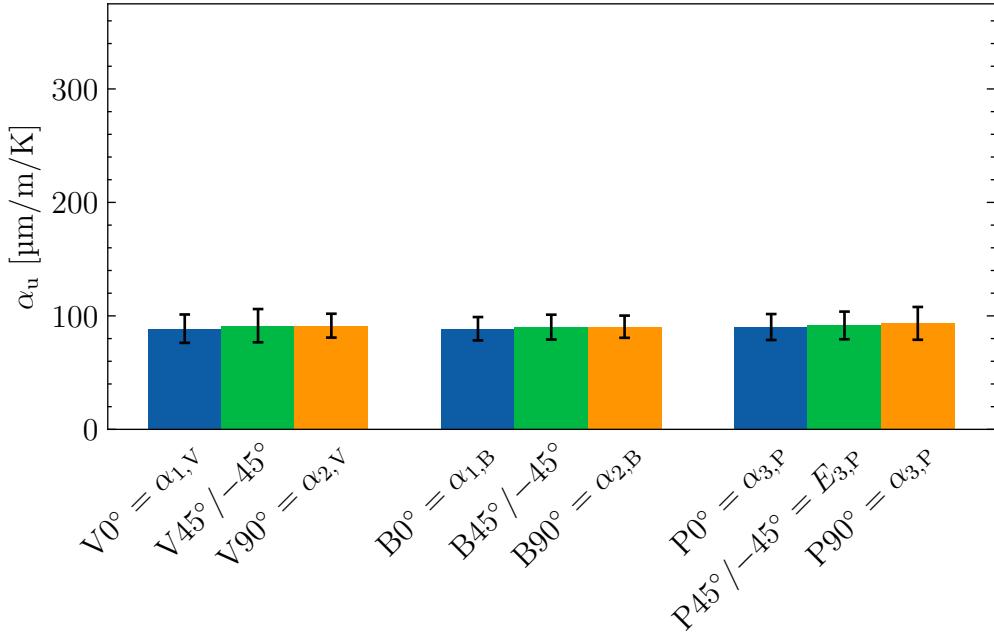


Slika 4.10: Koeficient linearne spremembe modula elastičnosti s temperaturo woodPLA vzorcev.

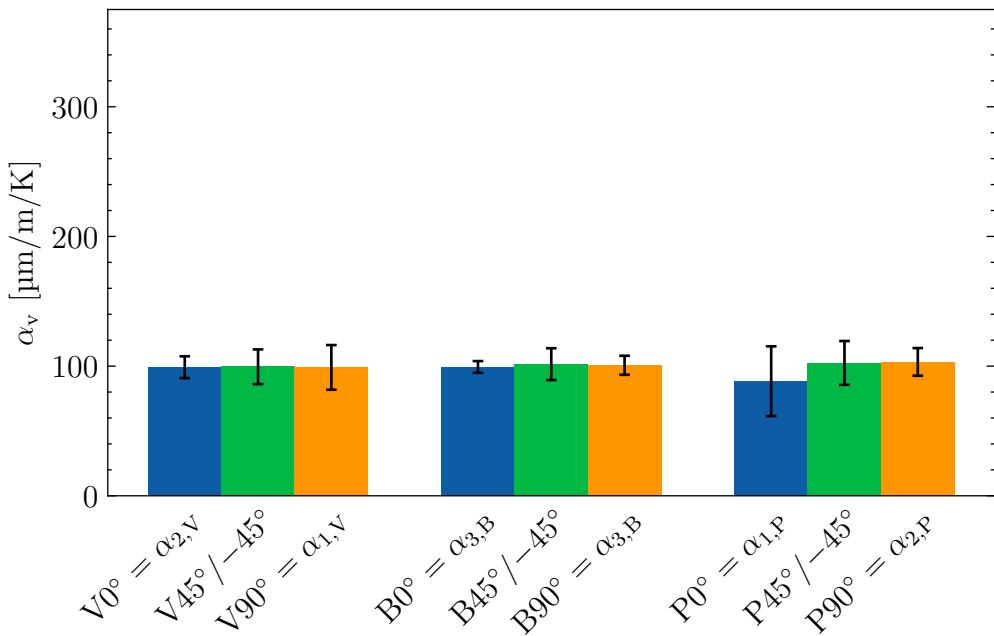
### 4.3 Temperaturni razteznostni koeficient

Sliki 4.11 in 4.12 prikazujeta rezultat meritev TRK-ja PLA vzorcev vzdolž in pravokotno na dolžino nosilcev, sliki 4.13 in 4.14 pa enako za woodPLA vzorce.

Rezultati za PLA vzorce kažejo neodvisnost TRK-ja od orientacije in kota polnila. Iz tega sklepamo, da 3D natisnjene strukture iz PLA izkazujejo izotropni temperaturni raztezek. Na drugi strani pa woodPLA vzorci kažejo izrazito anizotropne lastnosti.



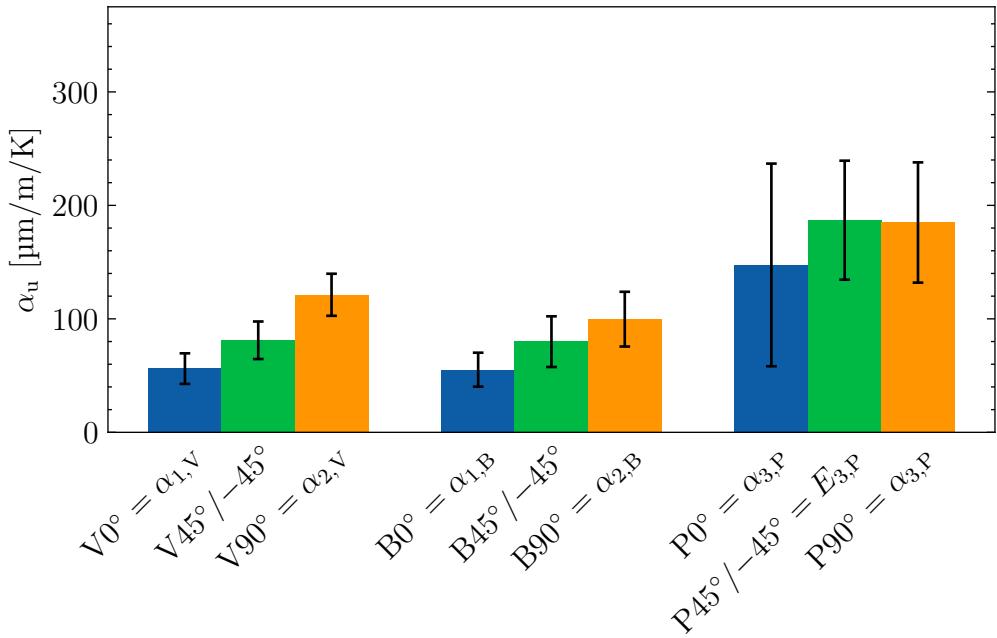
Slika 4.11: TRK-ji vzdolž dolžine nosilca PLA vzorcev.



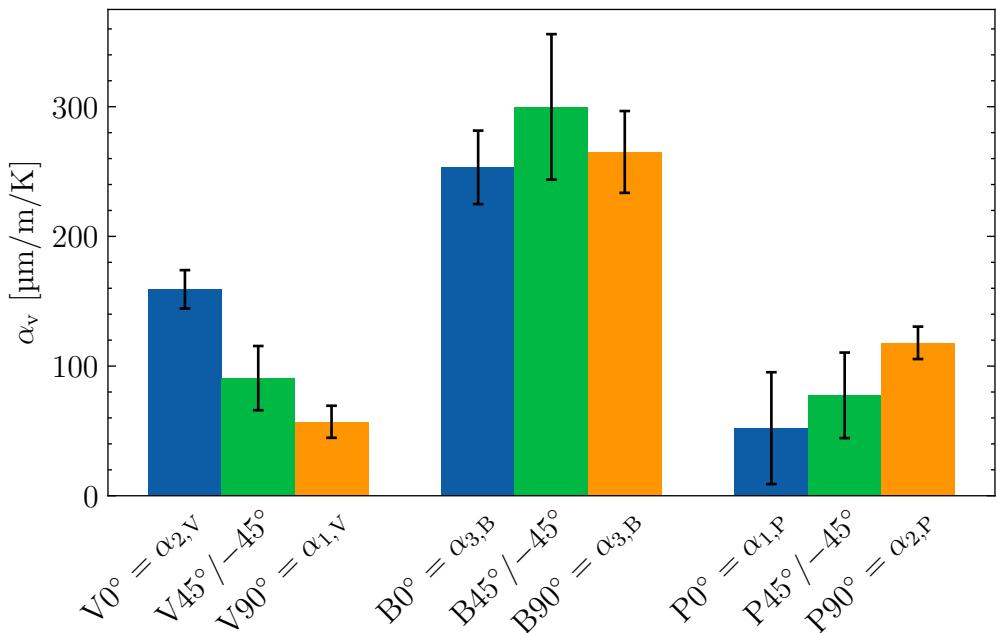
Slika 4.12: TRK-ji pravokotno na dolžino nosilca PLA vzorcev.

Za lažjo primerjavo materialnih lastnosti si poglejmo sliki 4.15 in 4.16. Ti dve prikazujeta TRK-je vzorcev v smereh KS 123 za PLA in woodPLA vzorce.

Rezultati za PLA kažejo podoben TRK med vzorci z različnimi orientacijami tiska in kotom polnila v isti smeri KS 123 in med različnimi smermi, kar potrjuje že ugotovljeno,



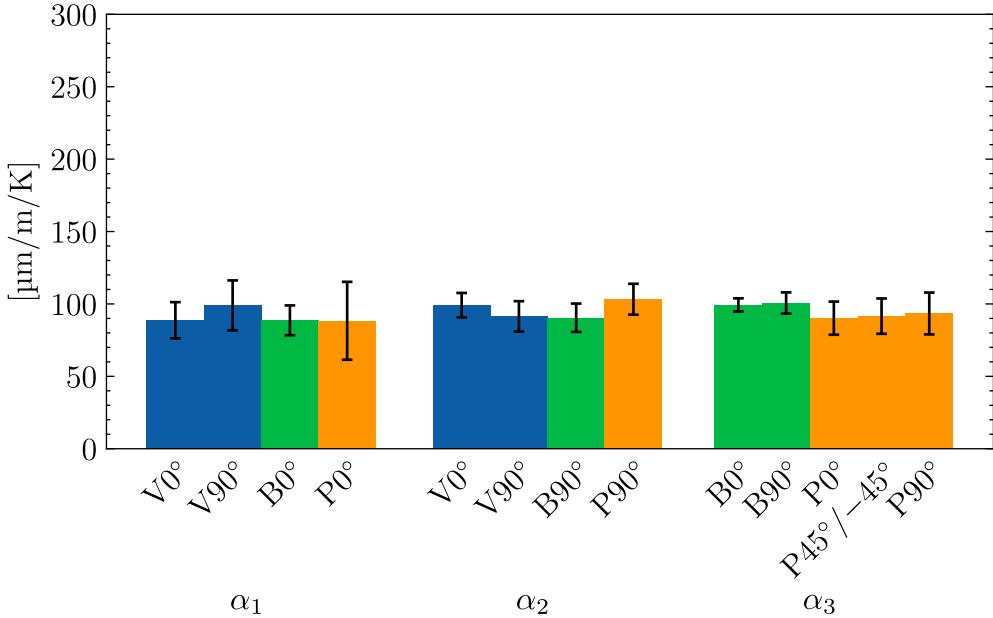
Slika 4.13: TRK-ji vzdolž dolžine nosilca woodPLA vzorcev.



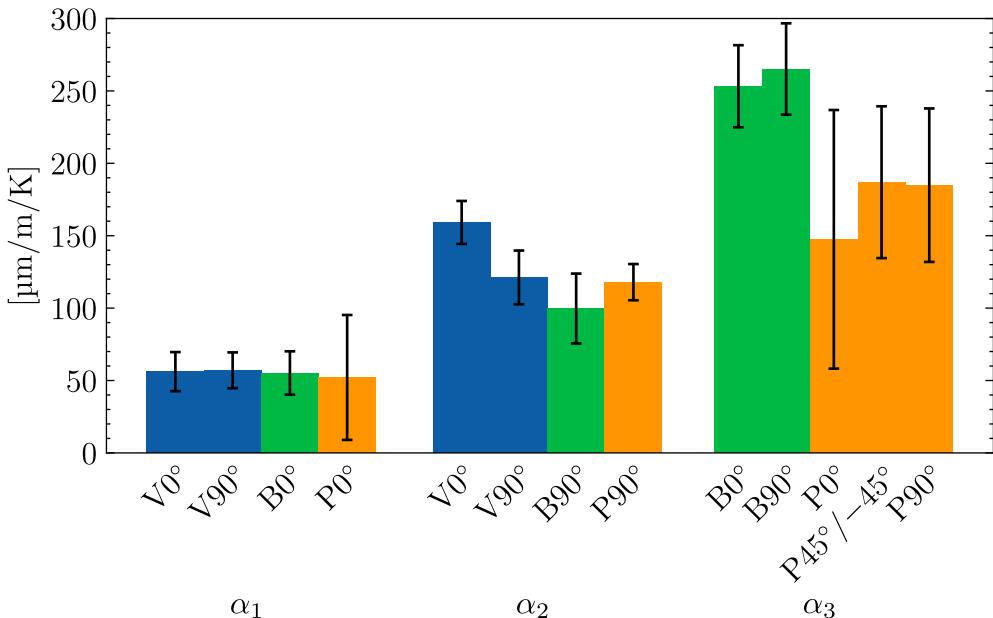
Slika 4.14: TRK-ji pravokotno na dolžino nosilca woodPLA vzorcev.

da PLA ne izkazuje ortotropnih temperaturnih raztezkov, ampak se razteza izotropno.

Vzorci iz woodPLA se najmanj raztezajo v smeri vzdolž linij nanosa materiala ( $\alpha_1$ ). V to smer so namreč orientirani tudi lesni delci, ki imajo manjši TRK kot matrica iz PLA in zato zmanjšujejo raztezanje. Pravokotno na linije nanosa materiala in orientacijo lesnih delcev njihovo manjše raztezanje ne pride do izraza. Takrat se lahko matrica bolj ali manj prosto razteza in posledično je TRK v tej smeri večji ( $\alpha_2$ ). Največji termični raztezek pa je v smeri ortogonalno na plasti linij nanosa materiala ( $\alpha_3$ ). Meritve  $\alpha_1$



Slika 4.15: TRK-ji v smereh KS 123 PLA vzorcev.



Slika 4.16: TRK-ji v smereh KS 123 woodPLA vzorcev.

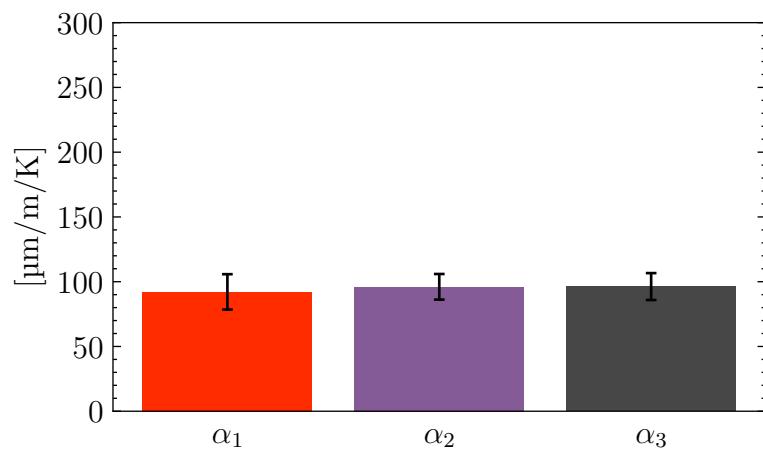
različnih orientacij tiska in kota polnila so si dokaj blizu, kar se sklada z ortotropnim materialnim modelom. Neodvisnost od orientacije tiskanja in kota polnila lahko, kljub nekoliko večjemu odstopanju, sklepamo tudi za  $\alpha_2$ . V primeru TRK-ja v smeri 3 KS 123 ( $\alpha_3$ ) pa te predpostavke zaradi velikega raztrosa vzorcev orientacije P težko potrdimo ali ovržemo. Velik raztros je verjetno posledica težje izdelave tako orientiranih vzorcev, dodatki lesnih delcev pa to še dodatno otežijo. Slabše povezovanje linij nanosa, praznine zaradi zatikanja lesnih delcev v šobi in kasnejši lokalno večji nanos materiala vplivajo na temperaturno raztezanje in vnašajo negotovost.

V preglednici 4.3 so zbrani TRK-ji v smereh KS 123 vseh pomerjenih vzorcev.

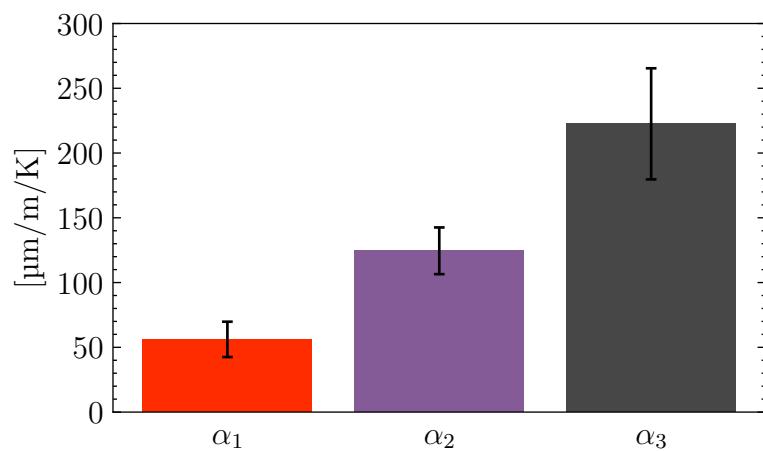
Preglednica 4.3: TRK-ji vzorcev v smereh KS 123 različnih orientacij tiska.

material	orientacija	$\alpha_1$ [ $\mu\text{m}/(\text{m K})$ ]	$\alpha_2$ [ $\mu\text{m}/(\text{m K})$ ]	$\alpha_3$ [ $\mu\text{m}/(\text{m K})$ ]
PLA	V	$94 \pm 15$	$95 \pm 10$	/
	B	$89 \pm 10$	$90 \pm 10$	$100 \pm 6$
	P	$88 \pm 27$	$103 \pm 11$	$92 \pm 13$
woodPLA	V	$57 \pm 13$	$140 \pm 17$	/
	B	$55 \pm 15$	$100 \pm 24$	$259 \pm 30$
	P	$52 \pm 43$	$118 \pm 13$	$173 \pm 67$

Kljub nekoliko večjim odstopanjem meritev  $\alpha_3$  woodPLA vzorcev, lahko iz meritev dočimo TRK-je ortotropnega materialnega modela. Te določimo kot povprečje meritev TRK-jev vzorcev z različnimi orientacijami in koti polnila v isti smeri KS 123. Pri tem zaradi velikega raztrosa ne upoštevamo vzorcev P0°. Slike 4.17 in 4.18 prikazujeta izračunane vrednosti za PLA in woodPLA. Iz rezultatov za PLA sklepamo, da za popis termičnega raztezka 3D natisnjene struktur iz PLA zadostuje izotropni model. Strukture iz woodPLA se obnašajo izrazito ortotropno. Največji termični raztezek imajo v smeri ortogonalno na plasti linij nanosa materiala, najmanjši pa v smeri vzdolž linij nanosa materiala.



Slika 4.17: TRK-ji ortotropnega materialnega modela za PLA.



Slika 4.18: TRK-ji ortotropnega materialnega modela za woodPLA.



## 5 Zaključki

V nalogi smo se osredotočili na razvoj eksperimentalne metode za sočasno brezkontaktno merjenje modula elastičnosti in temperaturnega razteznostnega koeficiente 3D natisnjениh struktur.

1. Razvili smo brezkontaktno eksperimentalno metodo za sočasno merjenje modula elastičnosti preko identifikacije lastne frekvence in temperaturnega razteznostnega koeficiente z metodo DIC in termokamero 3D natisnjeni struktur.
2. Pokazali smo uporabnost predstavljene metode za identifikacijo modula elastičnosti in TRK-ja skladno z ortotropnim materialnim modelom za materiala PLA in woodPLA.
3. Ugotovili smo, da PLA kaže bolj izotropne, na drugi strani pa woodPLA izkazuje ortotropne materialne lastnosti.
4. Dobljeni rezultati kažejo, da je za material woodPLA modul elastičnosti največji in TRK najmanjši v smeri vzdolž linij nanosa materiala, v smeri ortogonalno na plasti linij nanosa materiala pa ravno obratno.

Metoda predstavljena v tej nalogi omogoča hitro identifikacijo materialnih parametrov 3D natisnjeni struktur, ki so pomembni za napoved delovanja bimorfnih elektrotermičnih mehkih aktuatorjev.

### Predlogi za nadaljnje delo

V okviru te naloge smo metodo testirali zgolj na dveh materialih. Smiselno bi jo bilo uporabiti za karakterizacijo več materialov, s čimer bi dobili vpogled v širši spekter materialov za 3D tisk.

Smotrna bi bilo primerjati rezultate te metode z drugimi uveljavljenimi metodami.

Predstavljeni metodo se lahko nadgradi za doseganje natančnejših rezultatov. Predvsem se bi bilo smiselno osredotočiti na izboljšanje segreganja in ohlajanja vzorca. Kljub uporabi IR grelne žarnice, ki daje boljše rezultate kot gretje z vročim zrakom, imamo na nosilcu prisotne relativno visoke temperaturne razlike, kar povečuje negotovost meritve. Slednje bi lahko izboljšali s temperaturno komoro, s katero bi lahko kontrolirali tudi hlajenje vzorca, kar bi še dodatno zmanjšalo negotovost.



# Literatura

- [1] K. V. Wong in A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mechanical Engineering*, let. 2012, str. 1–10, Aug. 2012.
- [2] R. Hague, “Unlocking the Design Potential of Rapid Manufacturing,” v *Rapid Manufacturing*, N. Hopkinson, R. Hague in P. Dickens, ur. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, May 2006, str. 5–18.
- [3] S. T., S. P. in A. M.S., “A review on advancements in applications of fused deposition modelling process,” *Rapid Prototyping Journal*, let. 26, št. 4, str. 669–687, Jan. 2020.
- [4] Y. L. Yap, S. L. Sing in W. Y. Yeong, “A review of 3D printing processes and materials for soft robotics,” *Rapid Prototyping Journal*, let. 26, št. 8, str. 1345–1361, Jun. 2020.
- [5] T. J. Wallin, J. Pikul in R. F. Shepherd, “3D printing of soft robotic systems,” *Nature Reviews Materials*, let. 3, št. 6, str. 84–100, Jun. 2018.
- [6] M. Li, A. Pal, A. Aghakhani, A. Pena-Francesch in M. Sitti, “Soft actuators for real-world applications,” *Nature Reviews Materials*, let. 7, št. 3, str. 235–249, Mar. 2022.
- [7] A. Zolfagharian, A. Z. Kouzani, S. Y. Khoo, A. A. A. Moghadam, I. Gibson in A. Kaynak, “Evolution of 3D printed soft actuators,” *Sensors and Actuators A: Physical*, let. 250, str. 258–272, Oct. 2016.
- [8] J.-Y. Lee, J. An in C. K. Chua, “Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,” *Applied Materials Today*, let. 7, str. 120–133, Jun. 2017.
- [9] P. Dudek, “FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements,” *Archives of Metallurgy and Materials*, let. 58, št. 4, str. 1415–1418, Dec. 2013.
- [10] S. Khan, K. Joshi in S. Deshmukh, “A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts,” *Materials Today: Proceedings*, let. 50, str. 2119–2127, 2022.
- [11] Y. Tian, Y.-T. Li, H. Tian, Y. Yang in T.-L. Ren, “Recent Progress of Soft Electrothermal Actuators,” *Soft Robotics*, let. 8, št. 3, str. 241–250, Jun. 2021.

- [12] Potekhina in Wang, "Review of Electrothermal Actuators and Applications," *Actuators*, let. 8, št. 4, str. 69, Sep. 2019.
- [13] E. Cuan-Urquiza, E. Barocio, V. Tejada-Ortigoza, R. Pipes, C. Rodriguez in A. Roman-Flores, "Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches," *Materials*, let. 12, št. 6, str. 895, Mar. 2019.
- [14] J. C. Adams, "Thermomechanical Analysis (TMA) and its application to polymer systems," Tech. Rep. LA-UR-16-23707, 1254935, May 2016.
- [15] A. M. Baker, J. Mccoy, B. S. Majumdar, B. Rumley-Ouellette, J. Wahry, A. N. Marchi, J. D. Bernardin in D. Spernjak, "Measurement and Modelling of Thermal and Mechanical Anisotropy of Parts Additively Manufactured using Fused Deposition Modelling (FDM)," v *Structural Health Monitoring 2017*. DEStech Publications, Inc., Sep. 2017.
- [16] S. N. Economidou in D. Karalekas, "Optical sensor-based measurements of thermal expansion coefficient in additive manufacturing," *Polymer Testing*, let. 51, str. 117–121, May 2016.
- [17] K. Asaka in H. Okuzaki, ur., *Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives*. Singapore: Springer Singapore, 2019.
- [18] N. El-Atab, R. B. Mishra, F. Al-Modaf, L. Joharji, A. A. Alsharif, H. Alamoudi, M. Diaz, N. Qaiser in M. M. Hussain, "Soft Actuators for Soft Robotic Applications: A Review," *Advanced Intelligent Systems*, let. 2, št. 10, str. 2000128, Oct. 2020.
- [19] A. Rahafrooz, A. Hajjam in S. Pourkamali, "Thermal actuation of high frequency micromechanical resonators," v *2009 IEEE International SOI Conference*. Foster City, CA, USA: IEEE, Oct. 2009, str. 1–2.
- [20] Y. Cao in J. Dong, "High-performance low-voltage soft electrothermal actuator with directly printed micro-heater," *Sensors and Actuators A: Physical*, let. 297, str. 111546, Oct. 2019.
- [21] S. Shin in H. So, "Time-dependent motion of 3D-printed soft thermal actuators for switch application in electric circuits," *Additive Manufacturing*, let. 39, str. 101893, Mar. 2021.
- [22] W.-H. Chu, M. Mehregany in R. L. Mullen, "Analysis of tip deflection and force of a bimetallic cantilever microactuator," *J. Micromech. Microeng.*, let. 3, št. 1, str. 4–7, 1993.
- [23] V. Bučinskas, J. Subačiūtė-Žemaitienė, A. Dzedzickis in I. Morkvėnaitė-Vilkončienė, "Robotic micromanipulation: A) actuators and their application," *Robotic Systems and Applications*, let. 1, št. 1, str. 2–23, Jun. 2021.
- [24] F42 Committee, "Terminology for Additive Manufacturing - General Principles - Terminology," ASTM International, Tech. Rep.

- [25] S. A. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue in C. Charitidis, "Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Materials Today*, let. 21, št. 1, str. 22–37, Jan. 2018.
- [26] N. Shahrubudin, T. Lee in R. Ramlan, "An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications," *Procedia Manufacturing*, let. 35, str. 1286–1296, 2019.
- [27] N. Guo in M. C. Leu, "Additive manufacturing: Technology, applications and research needs," *Frontiers of Mechanical Engineering*, let. 8, št. 3, str. 215–243, Sep. 2013.
- [28] S. Valvez, P. N. B. Reis, L. Susmel in F. Berto, "Fused Filament Fabrication-4D-Printed Shape Memory Polymers: A Review," *Polymers*, let. 13, št. 5, str. 701, Feb. 2021.
- [29] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah in Z. Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," *Open Engineering*, let. 11, št. 1, str. 639–649, Apr. 2021.
- [30] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baciu in R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," *Polymer Testing*, let. 69, str. 157–166, Aug. 2018.
- [31] M. Domingo-Espin, J. M. Puigoriol-Forcada, A.-A. Garcia-Granada, J. Llumà, S. Borros in G. Reyes, "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts," *Materials & Design*, let. 83, str. 670–677, Oct. 2015.
- [32] Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee, K.-Y. Lee in V. Tagarielli, "Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA," *Materials & Design*, let. 123, str. 154–164, Jun. 2017.
- [33] S. C. Cowin, *Continuum Mechanics of Anisotropic Materials*. New York, NY: Springer New York, 2013.
- [34] C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco in C. Pappalettere, "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory," *Materials & Design*, let. 90, str. 453–458, Jan. 2016.
- [35] J. Pelleg, *Mechanical Properties of Materials*, ser. Solid Mechanics and Its Applications. Dordrecht New York: Springer, 2013, št. v. 190.
- [36] B. Pszczółkowski, K. W. Nowak, W. Rejmer, M. Bramowicz, Ł. Dzadz in R. Gałecki, "A Comparative Analysis of Selected Methods for Determining Young's Modulus in Polylactic Acid Samples Manufactured with the FDM Method," *Materials*, let. 15, št. 1, str. 149, Dec. 2021.
- [37] R. Pintelon, P. Guillaume, K. De Belder in Y. Rolain, "Measurement of young's modulus via modal analysis experiments: A system identification approach," *IFAC Proceedings Volumes*, let. 36, št. 16, str. 375–380, Sep. 2003.

- [38] N. M. M. Maia in J. M. Montalvão e Silva, ur., *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, ser. Mechanical Engineering Research Studies. Taunton, Somerset, England : New York: Research Studies Press ; Wiley, 1997, št. 9.
- [39] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, sixth edition izd. Hoboken: Pearson, 2017.
- [40] A. Labuschagne, N. van Rensburg in A. van der Merwe, “Comparison of linear beam theories,” *Mathematical and Computer Modelling*, let. 49, št. 1-2, str. 20–30, Jan. 2009.
- [41] T. C. Huang, “The Effect of Rotatory Inertia and of Shear Deformation on the Frequency and Normal Mode Equations of Uniform Beams With Simple End Conditions,” *Journal of Applied Mechanics*, let. 28, št. 4, str. 579–584, Dec. 1961.
- [42] T. Kaneko, “On Timoshenko’s correction for shear in vibrating beams,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, let. 8, št. 16, str. 1927–1936, Nov. 1975.
- [43] D. Rosato in D. Rosato, “DESIGN PARAMETER,” v *Plastics Engineered Product Design*. Elsevier, 2003, str. 161–197.
- [44] C. Y. Ho in R. E. Taylor, *Thermal Expansion of Solids*. Materials Park, Ohio: ASM International, 1998.
- [45] H. Yazdani Sarvestani, A. Akbarzadeh, D. Therriault in M. Lévesque, “Engineered bi-material lattices with thermo-mechanical programmability,” *Composite Structures*, let. 263, str. 113705, May 2021.
- [46] Y. Chen, L. Ye, A. J. Kinloch in Y. Zhang, “3D printed carbon-fibre reinforced composite lattice structures with good thermal-dimensional stability,” *Composites Science and Technology*, let. 227, str. 109599, Aug. 2022.
- [47] A. I. Botean, “Thermal expansion coefficient determination of polylactic acid using digital image correlation,” *E3S Web of Conferences*, let. 32, str. 01007, 2018.
- [48] T.-I. Lee, M. S. Kim in T.-S. Kim, “Contact-free thermal expansion measurement of very soft elastomers using digital image correlation,” *Polymer Testing*, let. 51, str. 181–189, May 2016.
- [49] D. Olmos, F. Martínez, G. González-Gaitano in J. González-Benito, “Effect of the presence of silica nanoparticles in the coefficient of thermal expansion of LDPE,” *European Polymer Journal*, let. 47, št. 8, str. 1495–1502, Aug. 2011.
- [50] D. Gorjup, *Identifikacija Kinematike Teles s Pomočjo Korelacije Digitalnih Slik: Magistrsko Delo Magistrskega Študijskega Programa II. Stopnje Strojništvo*, Ljubljana, 2016.
- [51] D. Gorjup, *pyDIC*. dostopno na: <https://github.com/ladisk/pyDIC.git>
- [52] H. Schreier, J.-J. Orteu in M. A. Sutton, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. Boston, MA: Springer US, 2009.

