

Elementų, pagamintų 3D spausdintuvu, atsparumo tempimui tyrimas

Donatas Medišauskas

LK KOP Ginkluotės ir technikos remonto depas / Armament and equipment repair depot of the Air Force of the Lithuanian Armed Forces

Sergėjus Rimovskis

*Šiaulių valstybinė kolegija, Transporto inžinerijos katedros docentas, technologijos mokslų daktaras
Šiaulių valstybinė kolegija / Higher Education Institution, Lithuania; Associate Professor at the
Department of Transport Engineering, Doctor of Technological Sciences
s.rimovskis@svako.lt*

Artūras Sabaliauskas

*Šiaulių valstybinė kolegija, Transporto inžinerijos katedros vedėjas, docentas, technologijos mokslų
daktaras
Šiaulių valstybinė kolegija / Higher Education Institution, Lithuania; Head of the Department of
Transport Engineering, Associate Professor, Doctor of Technological Sciences
a.sabaliauskas@svako.lt*

Anotacija

Straipsnyje pateikiami tempimu apkrautų 3D spausdintuvu pagamintų PLA plastiko bandinių mechaninių savybių tyrimai. Lyginama maksimalios apkrovos priklausomybė nuo pasirinktų spausdinimo parametrų (užpildo struktūros ir užpildo tankio). Naudojamas „Octet“, „Zig Zag“, „Triangles“ ir „Grid“ užpildo struktūra ir 50% bei 90 % užpildo tankis.

Reikšminiai žodžiai: 3D spausdinimas, užpildas, tempimas.

Analysis of the tensile strength of 3D printed elements

Summary

The paper presents investigations of the mechanical properties of PLA plastic samples produced by a 3D printer under tension. The dependence of the maximum load on the selected 3D printing parameters (infill patterns and infill percentage) is compared. Octet, Zig Zag, Triangles and Grid infill pattern and infill percentage 50% and 90% are used.

Keywords: 3D printing, infill, tension.

Įvadas

Tyrimo aktualumas. 3D spausdinimas, kitaip dar vadinamas „sluoksniuota gamyba“ (*angl.* Layerwise manufacturing), yra šiuo metu plačiausiai paplitusi įvairių objektų gamybos technologija, pagrįsta įkaitintos termoplastinės siūlės ekstrūzija ir sluoksnių formavimu ant 3D spausdintuvo pagrindo plokštės. Tokia technologija leidžia gaminti lengvus, įvairios formos gaminius, kurie naudojami pačiose įvairiausiose srityse (kosmoso pramonėje, aviacijoje, įvairių objektų prototipų gamyboje). Naudojant skirtingas užpildo struktūras ir tankius, gaunami vienodos formos ir tūrio, bet skirtingų savybių komponentai. Šios savybės – tai svoris, stiprumas ir kt. Spausdinimo kokybė, tikslumas gali priklausyti ir nuo kitų pasirinktų parametrų, pvz., temperatūros, spausdinimo greičio, sluoksnio storio.

Gaminio 3D modelis paprastai sukuriamas CAD programine įranga (Solidworks, Inventor, kt.). Pagrindinius gaminio 3D spausdinimo parametrus nustato vartotojas, pasirinkdamas sluoksnio storį, skerspjuvio geometriją, užpildymo koeficientą, kt. Specializuota programa sugeneruojamas spausdinimo kelią atitinkantis skaitmeninis valdymo kodas, kuriuo ir valdomas 3D spausdintuvo antgalio judėjimas.

Vienas iš labiausiai išnaudojamų 3D spausdinimo privalumų yra tai, kad optimizuojant topologiją arba projektuojant vidines porėtas struktūras su pasirinktu užpildo tankiu, gaunami lengvi gaminiai, kuriems suformuoti reikalingas minimalus medžiagos kiekis [1-3]. Užpildo tankis paprastai apibrėžiamas procentu nuo 0 iki 100. Pasirenkant 0%, gaunamas tuščiaviduris gaminys, pasirenkant 100% – visiškai vientisas gaminys. Paprastai nedidelėmis apkrovomis veikiamiems elementams taikomas 15–50% užpildas, tuo tarpu jei elementas veikiamas apkrovomis, naudojamas didesnis nei 50% (ypatingais atvejais net 100%) užpildas [4]. Tačiau svarbu ne vien tik užpildo tankis, bet ir struktūra. Įvairios užpildymo struktūros ir strategijos gali turėti įtakos 3D spausdinto komponento mechaninėms savybėms [5-7].

Tyrimo problema. Vartotojui svarbu iš anksto žinoti spausdinimo parametrų parinkimo įtaką detalės stiprumui. Netinkamas parametrų pasirinkimas gali sukelti pernelyg dideles deformacijas ar net detalės lūžius realaus eksploataavimo sąlygomis.

Tyrimo tikslas: nustatyti bandinių, atspausdintų 3D spausdintuvu, mechanines charakteristikas tempiant, priklausomai nuo užpildo tankio ir struktūros.

Tyrimo uždaviniai:

- 1) Suprojektuoti ir atspausdinti bandinius, naudojant skirtingus užpildymo parametrus.
- 2) Atlikti atspausdintų bandinių bandymus tempiant.
- 3) Įvertinti gautus rezultatus ir pateikti išvadas.

Bandymo metodika ir įranga

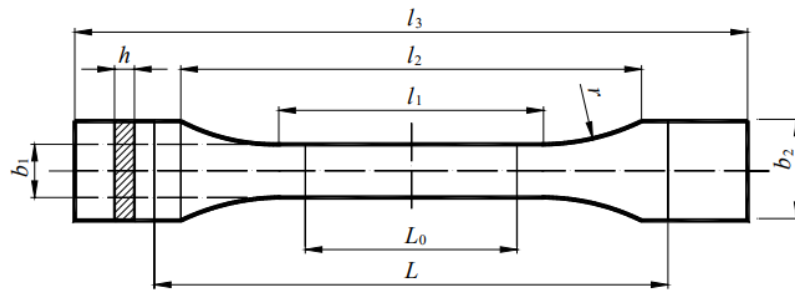
Plastikų deformacinės savybės labai skiriasi nuo kitų tradicinių konstrukcinių medžiagų, pvz., plieno, aliuminio deformacinių savybių. Deformuojant detales arba bandinius beveik iš visų rūšių konstrukcinių plastikų, jau nuo pat deformavimo pradžios kartu su tampriosiomis deformacijomis vystosi ir plastinės (valkšnumo) deformacijos. Tai rodo, kad, deformuojant šio tipo medžiagas, tarp įtempių ir deformacijų nėra tiesinio ryšio ir todėl jiems negalima besąlygiškai taikyti Huko dėsnio. Svarbu ir tai, kad plastikų stiprumas ir deformacinės savybės labai priklauso nuo medžiagos amžiaus, aplinkos temperatūros, drėgmės, deformavimo greičio ir daugelio kitų veiksnių. Visa tai rodo, kad plastikų mechaniniai bandymai turi būti atliekami griežtai vienodomis sąlygomis, kurios išdėstytos atitinkamuose standartuose [10].

Tempimo bandymas atliekamas pagal standartą ISO 527-1:2019 (E) *Plastikai. Tempiamųjų savybių nustatymas. 1 dalis (Bendrieji principai)* [8]. Bandymo metu tiriamasis bandinys tempiamas reglamentuojamu greičiu, fiksuojant apkrovą bei bandomosios dalies pailgėjimą bet kuriuo momentu, gaunant tempimo diagramą. Standartas reglamentuoja reikalavimus bandiniui ir jo geometrijai, kuri pateikta 1 pav.

Bandymai atlikti tempimo mašina LFM-L 20 (žr. 2 pav.), kuria atliekami įvairių medžiagų (plastikų, gumos, folijos plėvelių, vielų, kt.) ruošinių tempimo bandymai mažomis apkrovomis. Bandymų duomenų fiksavimas ir apdorojimas atliktas programa Software DION.

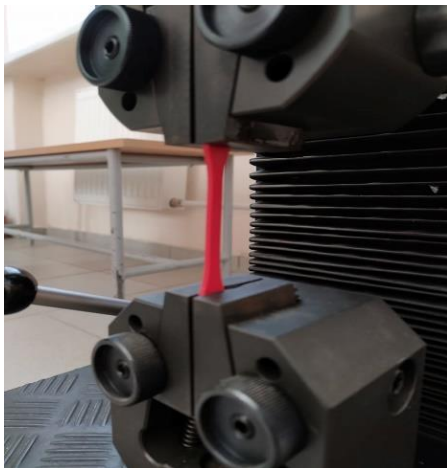
Bandinių spausdinimas

Bandiniai (žr. 1 pav.) pagaminti savadarbiu 3D spausdintuvu (žr. 3 pav.), kurio pagrindiniai techniniai parametrai ir duomenys apie valdančiąją plokštę pateikti 1 ir 2 lentelėse.

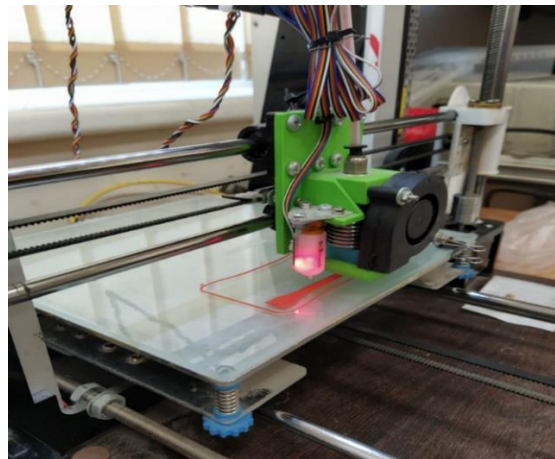


		Dimensijos, mm	
		1BA	1BB
l_3	bandinio tipas	≥ 75	≥ 30
l_1	bendras ilgis	$30 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$
r	siaurosios dalies ilgis	≥ 30	≥ 12
l_2	spindulys	58 ± 2	23 ± 2
b_2	atstumas tarp šoninių briaunų	$10 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$
b_1	galų plotis	$5 \pm 0,5$	$2 \pm 0,2$
h	bandomosios dalies plotis	≥ 2	≥ 2
L_0	storis	$25 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
L	bandomasis ilgis	l_{20}^{+2}	l_{20}^{+1}
	atstumas tarp griebtų		

1 pav. Bandinys



2 pav. Tempimo bandymų mašina LFM-L 20



3 pav. Tyrime naudotas savadarbis 3D spausdintuvas

1 lentelė

Pagrindiniai 3D spausdintuvo techniniai duomenys

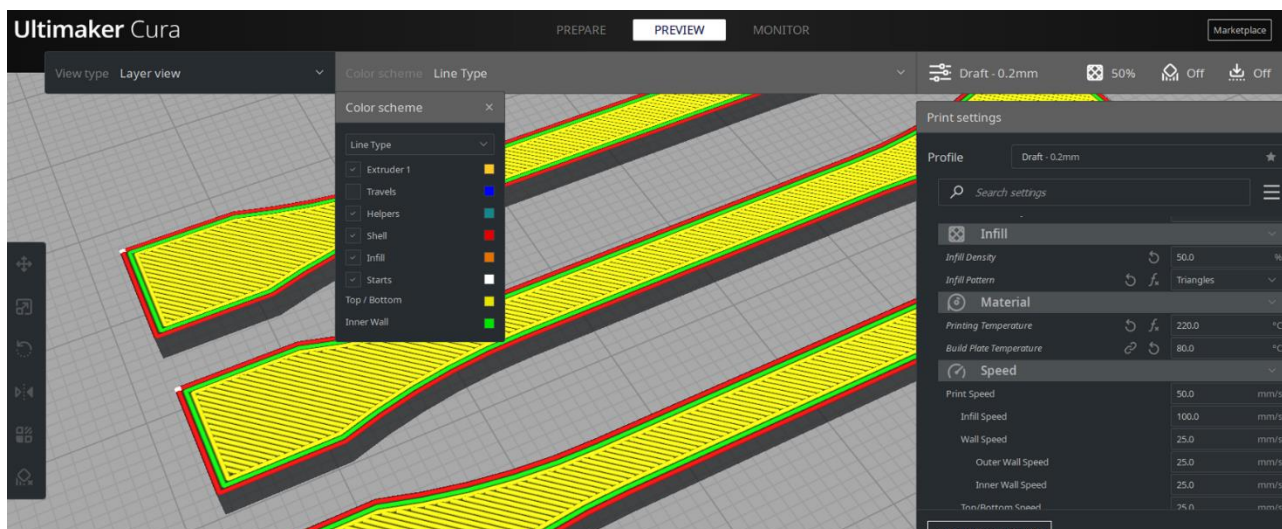
Spausdinimo medžiaga:	PLA, ABS, PET-G, TPU
Spausdinamos medžiagos vielos skersmuo:	1,75 mm
Spausdinimo galvutės skersmuo:	0,1 – 0,8 mm
Naudojamų variklių kiekis:	4 vnt.
Naudojamų variklių modeliai:	NEMA 17
Valdymo blokas su mikroprocesoriumi:	Creality V4.2.2
Detalės rezoliucija:	0,1 mm X-Y, 0,06 Z
Rėmas	V-slot 20x20, 20x40
Spausdinamos detalės max gabaritiniai matmenys:	220x220x300

Plokštės V4.2.2 duomenys

Pagrindinis lūstas	72MHz ARM Cortex-M3 STM32F103
Maitinimo įtampą	24V DC
Žingsnių variklių valdikliai	TMC2208, silent (tylūs)
Papildomos funkcijos	Automatinis stalo niveliavimas BL-Touch sensoriaus suderinamumas
Variklių sąsaja	– X Y Z E
Terminių elementų sąsajos	Šildomas stalas Šildomas ekstruderis
Vaizdinės išvesties sąsaja	Creality Ender 3 V2 Modular HD Display
Galinės padėties jutikliai	X, Y, Z, Filament
Papildomos sąsajos	– Micro USB Port: Computer to Board Interface – TF Card Slot: Printing from Micro SD Card

Naudojant programą „Ultimaker Cura“, pagal bandinio modelio failą sugeneruotas skaitmeninio valdymo g-kodas. Programos langas pateiktas 4 pav.

Naudoti bandinių 3D spausdinimo parametrai pateikti 3 lentelėje. Atspausdinta po 8 kiekvienos grupės bandinių. Visiems bandiniams naudota PLA viela iš tos pačios ritės. Visiems bandiniams spausdinti taikytas vienodas sluoksnio storis – 0,2 mm, taip pat vienodos galvutės ir pagrindo temperatūros – atitinkamai 220°C ir 80°C. Plačiau apie įvairias 3D spausdinimo užpildo struktūras aprašyta interneto svetainėse ir įvairių autorių darbuose [9-12].



4 pav. „Ultimaker Cura“ programos langas

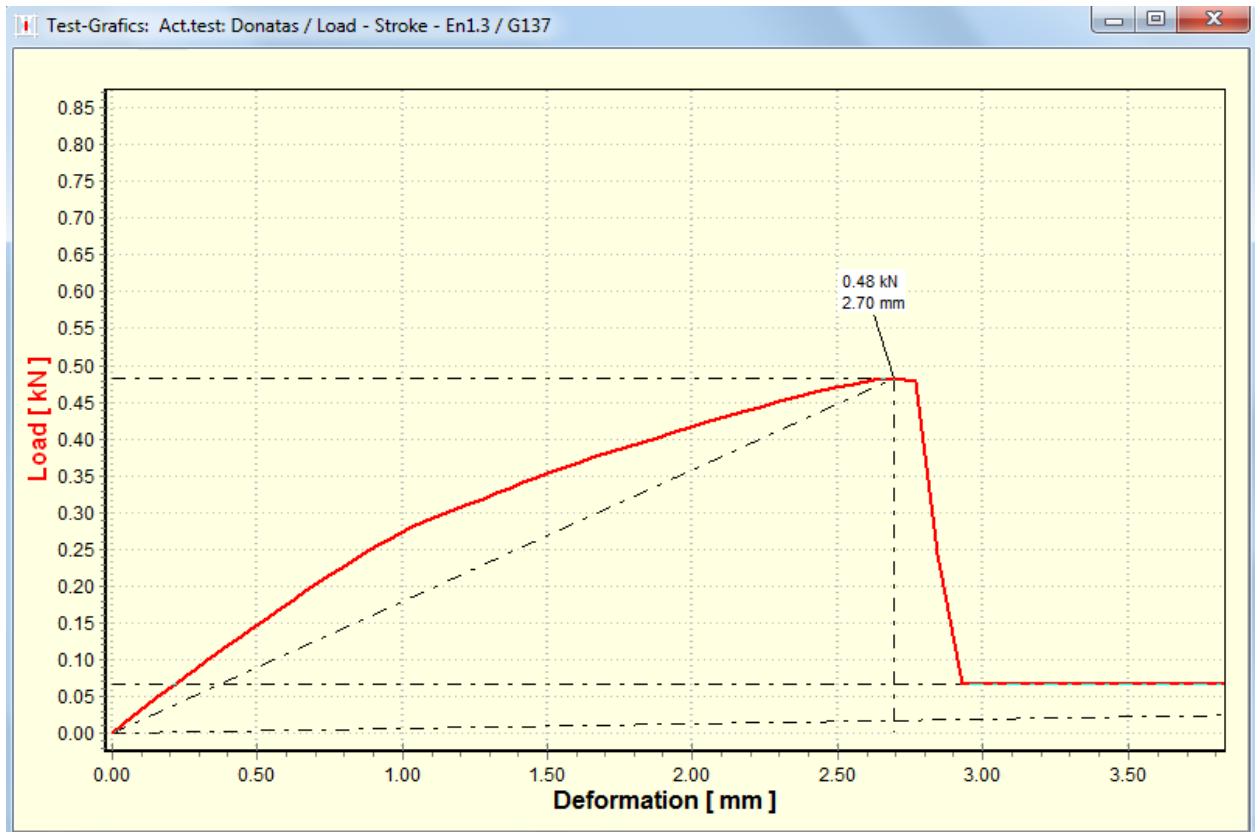
Bandinių grupių 3D spausdinimo parametrai

Bandinių grupės Nr.	Užpildo struktūra	Užpildo tankis, %	Bandinių skaičius
1	Octet	50	8
2	Zig Zag	50	8
3	Triangles	50	8
4	Grid	90	8

Bandymų rezultatai

Tempimo mašina LFM-L 20 atlikus ruošinių bandymus, gautos kiekvieno bandinio apkrovos-deformacijos diagramos, kurios leido nustatyti pagrindinius parametrus – maksimalią apkrovos jėgą ir maksimalią deformaciją. Tipinė bandymo kreivė pateikta 5 pav. Kiti išmatuotų ir apskaičiuotų (pagal [7] formules) bandymo parametrų vidurkių reikšmės pateiktos 4 lentelėje, o vidutinių maksimalių apkrovos jėgų bandinių grupėse diagrama pateikta 6 pav.

Bandymų rezultatai rodo, kad didžiausia maksimali apkrova pasiekta 4 grupės bandinių su didžiausiu užpildo tankiu 90%. Lyginant 1-3 gupių bandinių (su 50% užpildo tankiu) tempimo rezultatus, galima konstatuoti, kad Octet tipo bandinių maksimali apkrova buvo 37% didesnė, nei Zig Zag ir Triangles.

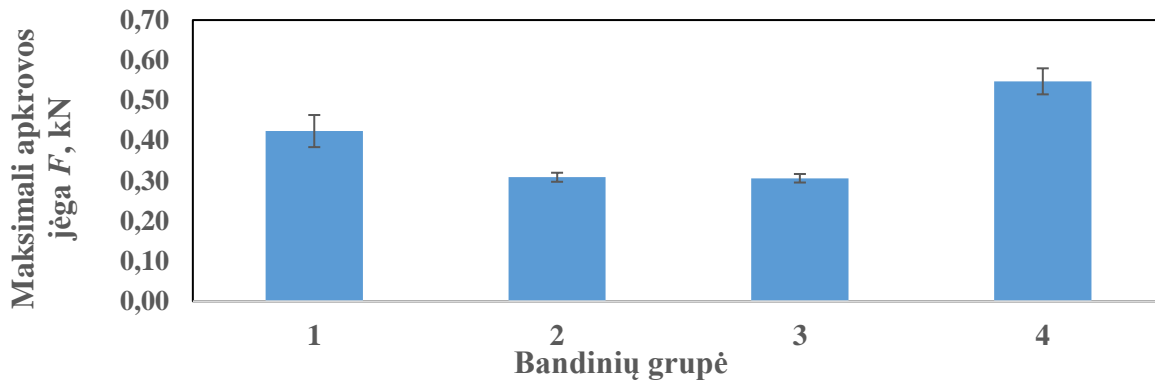


5 pav. Apkrovos-deformacijos diagrama (1 grupės 1 bandinio tempimas)

4 lentelė

Bandymų rezultatai

Bandinių grupės eilės Nr.	1	2	3	4
Bandinio skerspjūvio plotas A_0 , mm ²	10	10	10	10
Bandomasis ilgis L iki bandymo, mm	25	25	25	25
Vidutinis bandomasis ilgis L po bandymo, mm	25,8	25,7	25,9	25,5
Vidutinis bandinio plotis b po bandymo, mm	4,8	4,83	4,80	4,86
Vidutinis bandinio storis h po bandymo, mm	1,86	1,84	1,83	1,93
Vidutinis bandinio skerspjūvio plotas A po bandymo, mm ²	8,99	8,89	8,76	9,42
Maksimali apkrovos jėga F , kN	0,42	0,31	0,31	0,55
Vidutinis bandinio pailgėjimas prie max apkrovos, mm	2,78	2,77	2,43	2,73
Vidutiniai įtempiai σ ($\times 10^3$), Mpa	0,042	0,031	0,031	0,058
Vidutinė deformacija pagal ϵ	0,030	0,027	0,035	0,020



6 pav. Vidutinės kiekvienos bandinių grupės maksimalios apkrovos

Išvados

1. Bandymų rezultatai parodė, kad tiek užpildo struktūra, tiek ir užpildo tankis turi įtakos 3D spausdintų detalių stiprumui, veikiant juos tempimu.

2. Lyginant 1-3 grupių bandymų rezultatus (kai naudotas 50% užpildo tankis), Zig Zag ir Triangles užpildo struktūros bandinių maksimali apkrovos jėga praktiškai nesiskyrė. Tuo tarpu Octet užpildo bandiniai pagal šį rodiklį buvo apie 37 % stipresni.

3. Geriausi rezultatai gauti, atliekant 4 grupės (užpildas Grid, užpildo tankis 90 %) bandymus. Vidutinė šios grupės bandinių maksimali apkrovos jėga buvo 30 % didesnė už 1 grupės (Octet) ir beveik 80 % didesnė už 2 ir 3 grupės (Zig Zag, Triangles) maksimalias apkrovos jėgas.

Literatūra

1. J. ZHU et al. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. Chin. J. Aeronaut. (CJA) (2021).
2. A. ALAFAGHANI et al. Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. Proc Manuf. (PM) (2017).
3. P. KAKANURU et al. Moisture ingress and degradation of additively manufactured PLA, ABS and PLA/SiC composite parts. Addit. Manuf. (AM) (2020).
4. L. FONTANA et al. An investigation of the influence of 3d printing parameters on the tensile strength of PLA material. Materials Today: Proceedings. (2022).
5. T. DOBRESCU et al. Tensile behavior of PLA and PLA composite materials under different printing parameters. Mater. Plast. (MP) (2019)
6. E. E. Cho et al. Investigation on Influence of Infill Pattern and Layer Thickness on Mechanical Strength of PLA Material in 3D Printing Technology. Journal of Engineering and Science Research. 3 (2). (2019).
7. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN ISO 527-1:2019. Plastikai. Tempiamųjų savybių nustatymas. 1 dalis. Bendrieji principai / Plastics. Determination of tensile properties. Part 1: General principles.
8. A. KRENEVIČIUS, M. K. LEONAVIČIUS. Eksperimentinė medžiagų mechanika. Vilnius: Technika. (2007).
9. Infill patterns. Prusa Research. 2024. https://help.prusa3d.com/article/infill-patterns_177130
10. B. O'NEILL. Cura Infill Patterns: What They Are and When to Use Them. 2024. <https://www.wevolver.com/article/cura-infill-patterns>
11. M. ERYILDIZ. The effects of infill patterns on the mechanical properties of 3D printed PLA parts fabricated by FDM. Ukrainian J. of Mech. Eng. and M. Sc. 7 (1). (2021).
12. M. R. DERISE et al. Effect of Infill Pattern and Density on Tensile Properties of 3D Printed Polylactic acid Parts via Fused Deposition Modelling (FDM). International J. of Mech. & Mechatr. Eng. 20 (3). (2020).