

Degradacja PLA w warunkach symulowanych analiza mechaniczna i strukturalna

Anastazja Badan, Izabela Brzyska, Łucja Kowal, Zuzanna Zając, Sylwia Łagan

Studenckie Koło Naukowe Inżynierii Medycznej CANCRICAT

Katedra Mechaniki Stosowanej i Biomechaniki, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska

Tworzywa sztuczne a gospodarka o obiegu zamkniętym

- **Kluczowa rola** w nowoczesnej gospodarce
- **Problem:** niski wskaźnik ponownego wykorzystania
→ **zanieczyszczenie środowiska**
- **Gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ):**
 - Redukcja
 - Recykling
 - Ponowne wykorzystanie
- **Druk 3D jako wsparcie GOZ:**
 - Ograniczenie odpadów
 - Możliwość stosowania biodegradowalnych tworzyw



*Cykl życia biodegradowalnych polimerów
w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym [1]*

Druk 3D w GOZ – biodegradowalne ortezy i protezy

- **Zastosowanie:** produkcja elementów ortopedycznych z biodegradowalnych materiałów
- **Popularność PLA (polilaktydu):**
 - Biopochodny polimer
 - Szybka biodegradacja
- **Proces rozkładu PLA:**
 - Kompostowanie lub działanie mikroorganizmów
 - Hydroliza wiązań estrowych → depolimeryzacja
 - Powstanie monomerów i oligomerów → dalsza degradacja do wody i CO₂



Orteza wykonana z PLA na nadgarstku manekina:
a) widok boczny, b) różne perspektywy [2]

Cel

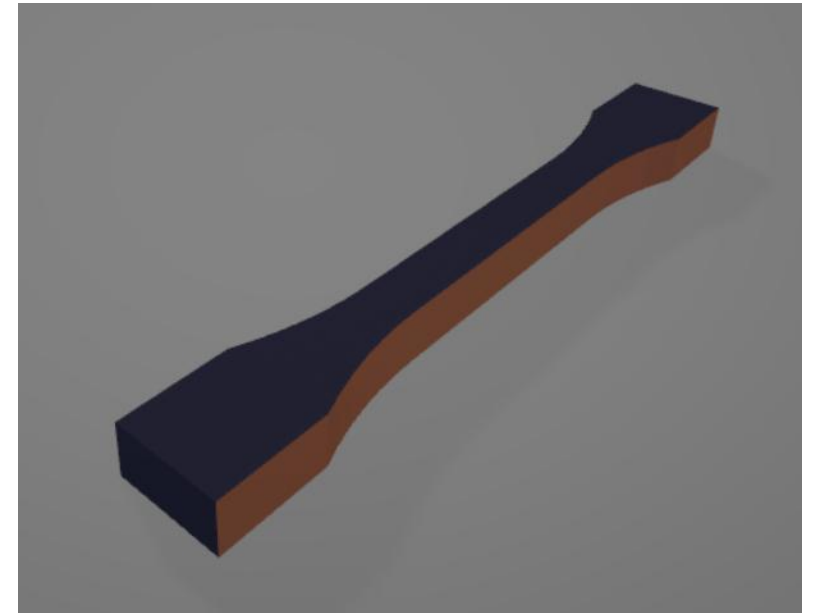
Ocena wpływu procesu przyspieszonego starzenia na właściwości mechaniczne polilaktydu (PLA).

Materiały i metody

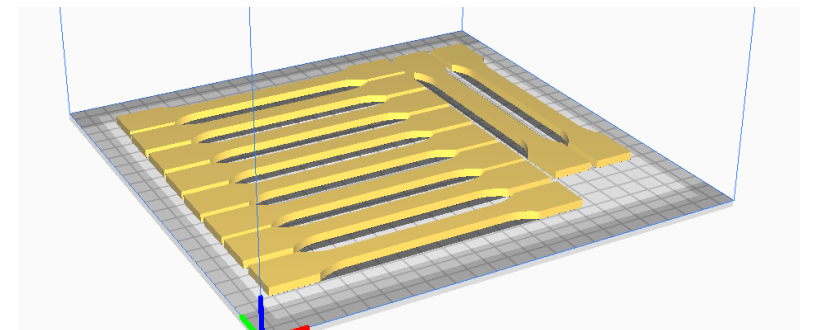
Za pomocą **druku 3D metodą Fused Filament Fabrication (FFF)** wydrukowano $n=36$ próbek w kształcie wiosłkowym o wymiarach 155 x 20 x 4 [mm]. Jako filament zastosowano **polilaktyd (PLA)**.

Wydruki wykonano przy użyciu drukarki Creality-Ender-3 (Creality, Chiny).

Próbki przygotowano **z różnym stopniem wypełnienia** – 100% oraz 50% – uwzględniając **dwa kierunki druku** w celu analizy wpływu orientacji warstw na ich właściwości mechaniczne.



Widok próbki o kształcie wiosłkowym



*Widok próbek przygotowanych
do wydruku w programie
Ultimaker Cura 4.13.0*

Materiały i metody

Próbki poddano procesowi **przyspieszonej degradacji** w komorze klimatycznej WeissTechnik (LabEvent L C/34/40/5) oraz **ekspozycji na promieniowanie UV** w komorze starzeniowej QUV QLab.

Komora klimatyczna → 4 cykle – Każdy cykl obejmował 12 godzin ekspozycji na temperaturę -20°C , a następnie 12 godzin w temperaturze $+40^{\circ}\text{C}$

Komora starzeniowa → 100 godzin, podczas których materiał poddano działaniu promieniowania UV emitowanego przez lampy fluorescencyjne UV-A 340+ w temperaturze 60°C . Dodatkowo zastosowano cykliczne natryskiwanie wodą w temperaturze 30°C oraz kondensację pary wodnej w temperaturze 50°C . Poszczególne etapy cyklu trwały: promieniowanie UV – 8 godzin, natryskiwanie – 15 minut, kondensacja – 3 godziny 45 minut.



*Komora starzeniowa
QUV QLab*

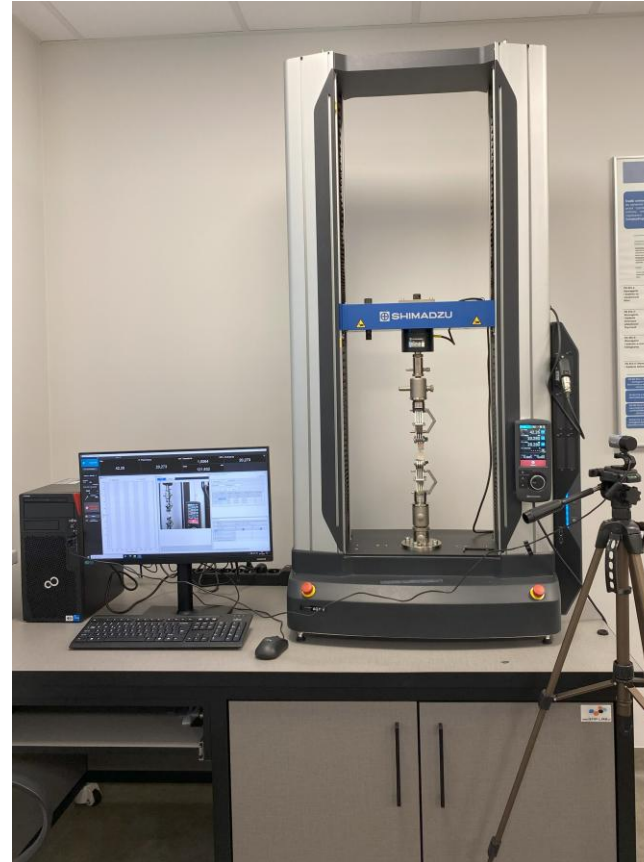


*Komora klimatyczna
WeissTechnik (LabEvent L C/34/40/5)*

Materiały i metody

Następnie przeprowadzono **statyczne próby rozciągania** na maszynie wytrzymałościowej Shimadzu AUTOGRAPH AGX-V (Shimadzu, Japonia), prędkość rozciągania wynosiła 10 mm/min. Pomiarów dokonano zarówno dla próbek referencyjnych, jak i tych poddanych procesowi przyspieszonego starzenia. Na podstawie otrzymanych wyników **oceniono wytrzymałość na rozciąganie oraz wyznaczono moduł Younga**.

Ponadto, w celu **analizy mikrostrukturalnych zmian materiału po testach mechanicznych**, wykonano obserwacje powierzchni przetomów za pomocą mikroskopu cyfrowego Zeiss SteREO Discovery.V8 (Zeiss, Niemcy) oraz skorelowanego z urządzeniem oprogramowania AxioVision. Badanie umożliwiło identyfikację mechanizmów pękania próbek.

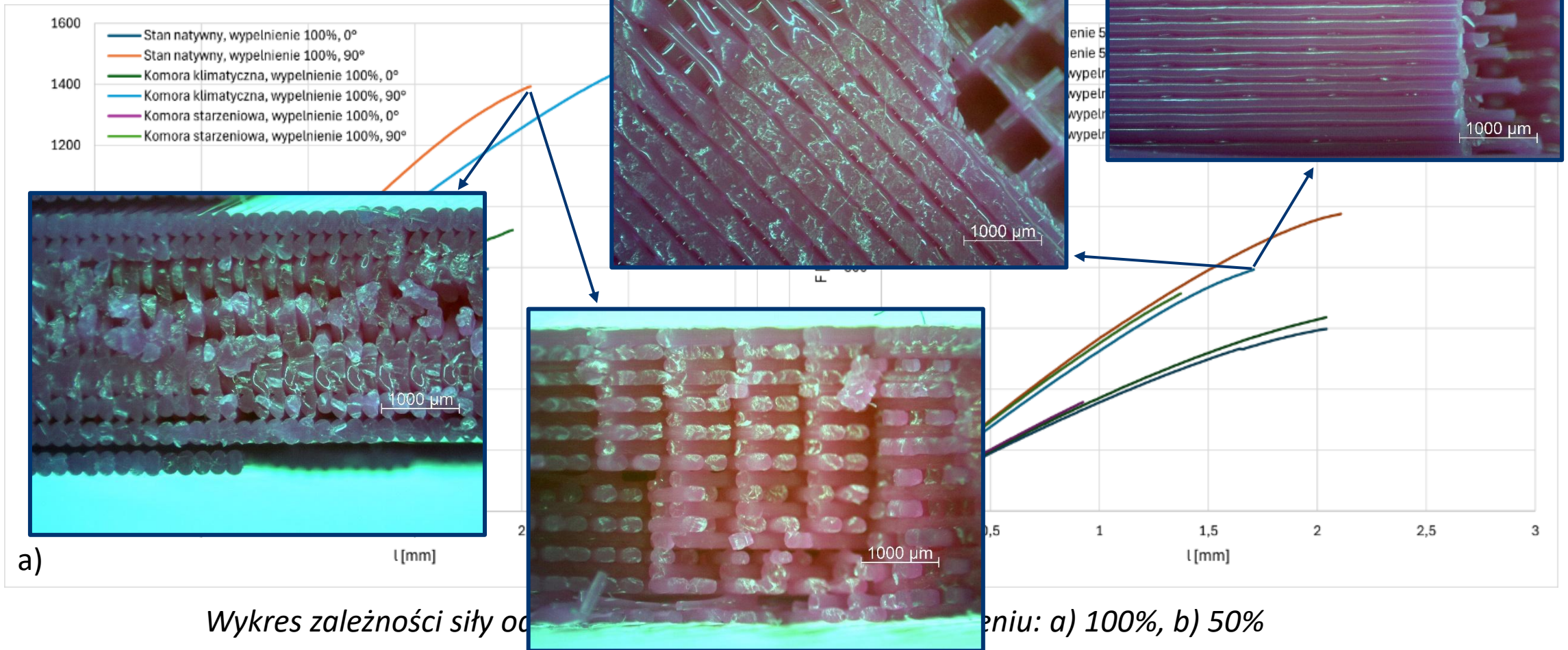


*Maszyna wytrzymałościowa
Shimadzu AUTOGRAPH AGX-V*



*Mikroskop cyfrowy
Zeiss SteREO Discovery.V8*

Wyniki



Wyniki

Właściwości mechaniczne wydruków 3D z PLA

Rodzaj próbki	Stopień wypełnienia	Orientacja druku	σ [MPa]	ϵ [%]	E [MPa]
Natywna	50%	0°	7,35±0,62	1,99±0,33	3,72±0,35
		90°	12,31±0,55	2,18±0,10	5,65±0,37
	100%	0°	10,73±0,71	2,04±0,17	5,26±0,13
		90°	17,27±0,49	2,15±0,11	8,22±0,20
Po komorze klimatycznej	50%	0°	8,16±0,58	2,19±0,14	3,73±0,12
		90°	10,17±0,31	1,81±0,09	5,61±0,16
	100%	0°	12,20±0,99	2,45±0,45	5,08±0,87
		90°	18,80±0,62	2,79±0,09	6,75±,30
Po komorze starzeniowej	50%	0°	5,92±1,29	1,32±0,38	4,53±0,34
		90°	9,08±0,63	1,41±0,05	6,08±0,37
	100%	0°	9,13±1,09	1,43±0,26	6,43±0,36
		90°	7,49±0,65	0,75±0,11	10,10±0,93

Masa wydruków 3D z PLA

Rodzaj próbki	Stopień wypełnienia	Orientacja druku	m [g]
Natywna	50%	0°	5,03±0,01
		90°	6,63±0,04
	100%	0°	7,38±0,02
		90°	8,47±0,02
Po komorze klimatycznej	50%	0°	5,06±0,01
		90°	6,70±0,03
	100%	0°	7,65±0,09
		90°	8,34±0,03
Po komorze starzeniowej	50%	0°	5,02±0,01
		90°	6,73±0,02
	100%	0°	7,64±0,07
		90°	8,33±0,02

Wnioski

Zmiany właściwości mechanicznych

- **Spadek wartości naprężeń** → obniżona wytrzymałość
- **Wzrost modułu sprężystości** → materiał staje się bardziej sztywny

Wpływ UV i temperatury → degradacja struktury polimeru

Konsekwencje dla GOZ

- **Utrata właściwości użytkowych** → wpływ na trwałość produktów
- **Uwalnianie mikro- i makrocząstek do środowiska**
 - Stopniowe rozpadanie się materiału
 - Potencjalne zagrożenie dla ekosystemów
- **Wolna degradacja PLA w środowisku**
 - Możliwość lokalnych kumulacji
 - Konieczność odpowiedniego zarządzania odpadami PLA

Literatura

- [1] Dziuba A., Kucharska M., Madej-Kietbik L., Sulak K., Wiśniewska-Wrona M.: Biopolymers and Biomaterials for Special Applications within the Context of the Circular Economy, Materials, 2021.
- [2] D'Amado M. P., Bourbon de Albuquerque II J., Bezold W., Crist B. D., Cook J. L.: Biomechanical comparison of traditional plaster cast and 3D-printed orthosis for external coaptation of distal radius fractures, Annals of 3D Printed Medicine, 2024.
- [3] Zhu, Caihan, Tianya Li, Mohamedazeem M. Mohideen, Ping Hu, Ramesh Gupta, Seeram Ramakrishna, and Yong Liu.:Realization of Circular Economy of 3D Printed Plastics: A Review, 2021
- [4] Li Z., Lim J. Y., Wang C. G.: Circularity of Plastics: Sustainability, Emerging Materials, and Valorization of Waste Plastic, 2023

Autorki składają podziękowania **dr inż. Dominikowi Wyszyńskiemu** za pomoc w przygotowaniu wydruków 3D oraz **mgr inż. Kindze Setlak** za udostępnienie maszyny starzeniowej, co umożliwiło realizację badań.

Wydruk próbek był możliwy dzięki wsparciu **eCOLAB 4.0**