

Studium porównawcze ekofilamentu z butelek PET z powszechnie stosowanymi filamentami w druku 3D

Comparative study of eco-filament from PET bottles with commonly used filaments in 3D printing

Maciej Kielbasa¹ A,G, Wojciech Żyłka² A,E,G 

¹ Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Mechatroniki i Automatyki, ul. Tadeusza Rejtana 16C, 35-959 Rzeszów, Polska – absolwent

² Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych, Instytut Inżynierii Materiałowej, ul. Tadeusza Rejtana 16C, 35-959 Rzeszów, Polska

Artykuł oryginalny

Abstrakt

Artykuł przedstawia urządzenie do produkcji ekofilamentu z butelek PET do druku 3D. Przeprowadzono badania porównawcze wydruków 3D wykonanych z wytworzonego ekofilamentu oraz standardowych, powszechnie stosowanych filamentów. Badania koncentrują się na analizie porównawczej ekofilamentu z komercyjnie dostępnym materiałem bazowym PET. Przedstawiono testy wytrzymałościowe oraz analizę porównawczą uzyskanych wyników, w szczególności parametrów z prób rozciągania i zginania.

Abstract

The article presents a device for producing eco-filament from PET bottles for 3D printing. Comparative studies were conducted on 3D prints made from the produced eco-filament and standard, commonly used filaments. The research focuses on a comparative analysis of the eco-filament with commercially available PET-based material. Strength tests and a comparative analysis of the obtained results are presented, particularly focusing on the parameters from tensile and bending tests.

Słowa kluczowe

- druk 3D
- recykling
- ekofilament

Udziały autorów

- A – przygotowanie badań
- B – gromadzenie danych
- C – analiza statystyczna uzyskanych wyników
- D – interpretacja uzyskanych wyników
- E – przygotowanie pierwotnej wersji tekstu
- F – przegląd literatury
- G – korekta i rewizja tekstu

Korespondencja

Wojciech Żyłka

e-mail: wzyłka@ur.edu.pl
Uniwersytet Rzeszowski
Wydział Nauk Ścisłych i Technicznych
Instytut Inżynierii Materiałowej
ul. Tadeusza Rejtana 16C
35-959 Rzeszów, Poland

Informacje o artykule

Historia artykułu (Article history)

- Otrzymano (Received): 2025-04-04
- Zaakceptowano (Accepted): 2025-06-13
- Opublikowano (Published): 2025-06-23

Wydawca (Publisher)

Akademia Tarnowska
University of Applied Sciences in Tarnow
ul. Mickiewicza 8, 33-100 Tarnow, Poland

Licencja (User license)

© by Authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License CC-BY-SA.

Finansowanie (Financing)

Badania nie zostały sfinansowane z grantów pochodzących ze środków publicznych, organizacji komercyjnych lub non-profit.

Konflikt interesów (Conflict of interest)

Nie zadeklarowano konfliktu interesów.

Wprowadzenie

Dynamiczny rozwój technologii wytwarzania obejmuje postęp w technikach przyrostowych. Innowacyjne rozwiązania znajdują zastosowanie w aparaturze produkcyjnej, oprogramowaniu oraz materiałach modelowych. W zależności od wybranej techniki dostępna jest coraz szersza gama materiałów, szczególnie tworzyw sztucznych, które stanowią podstawowy budulec większości technologii druku 3D, w tym metod opartych na modelowaniu tworzywem termoplastycznym.

Reintrodukcja materiałowa

Proekologiczne trendy w przemyśle koncentrują się przede wszystkim na redukcji materiałochłonności oraz wykorzystywaniu surowców nadających się do recyklingu po zakończeniu tzw. cyklu życia produktu. Rosnąca świadomość ekologiczna oraz zagrożenia dla atmosfery i środowiska naturalnego wynikające z działalności przemysłowej prowadzą do opracowywania nowych regulacji prawnych, których celem jest skuteczne motywowanie przedsiębiorstw z różnych sektorów do ograniczania zużycia materiałów i stosowania surowców poddających się recyklingowi [1,2,3,4]. Indywidualne kryteria i specyfika danego podmiotu przemysłowego determinują możliwości wykorzystania materiałów poddawanych recyklingowi w określonym zakresie. Szczególny nacisk kładzie się zawsze na zastosowanie jak największej ilości surowców nadających się do ponownego przetworzenia, np. do konstrukcji poszczególnych komponentów i części służących do produkcji nowych maszyn i urządzeń dokonuje się odpowiedniego doboru materiałów, w szczególności określonych stopów metali [1].

Przedmiotowy recykling tworzyw sztucznych jest procesem wieloetapowym zainicjowanym segregacją poszczególnych odpadów i w zasadniczej fazie opartym na przetwarzaniu odpadów metodą materiałową, surowcową albo energetyczną. Przyjęta przez Polskę tzw. dyrektywa odpadowa ma na celu osiągnięcie poziomu 65% przygotowania do ponownego użycia i recyklingu segregowanych odpadów komunalnych [2,3].

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS), Polacy wytwarzają coraz więcej śmieci. W 2020 roku odnotowano wzrost o niemal 3% w stosunku do roku poprzedniego. Powstało wówczas ponad 13 mln ton odpadów komunalnych, z czego niespełna 27% zostało poddane recyklingowi [2].

Szczegółowe zasady recyklingu tworzyw sztucznych były wcześniej określone w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 29 grudnia 2016 roku w sprawie selektywnego zbierania wybranych frakcji odpadów

(Dz.U. z 2017 r., poz. 19). Obecnie obowiązuje nowszy akt prawny – Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 10 maja 2021 r. w sprawie sposobu selektywnego zbierania wybranych frakcji odpadów (Dz.U. z 2021 r., poz. 906). Wprowadziło ono Jednolity System Segregacji Odpadów, obowiązujący na terenie całej Polski od 1 lipca 2017 roku. W ramach tego systemu odpady komunalne muszą być segregowane na poszczególne frakcje, w tym metale i tworzywa sztuczne [2,4]. Tworzywa sztuczne uzyskane w procesie segregacji odpadów poddawane są dalszemu przetwarzaniu w ramach recyklingu. W Polsce stosuje się kilka metod recyklingu tworzyw sztucznych, które pomagają ograniczyć ilość odpadów trafiających na składowiska. Powtórne wykorzystanie metali i tworzyw sztucznych to rozwiązanie korzystne dla środowiska naturalnego – im więcej odpadów zostanie przetworzonych, tym mniej zanieczyszczeń trafi do zbiorników wodnych i gleby [3]. Podstawową metodą recyklingu jest recykling materiałowy, polegający na odzyskiwaniu samego tworzywa sztucznego. Umożliwia to wytworzenie nowych, użytkowych produktów. Przykładem takiego procesu jest przetwarzanie zużytych opon na maty wejściowe oraz wycieraczki gumowe do butów pod drzwi [4]. Recykling materiałowy tworzyw sztucznych należy do stosunkowo nieskomplikowanych technologii, co przyczynia się do jego dużej popularności. Metoda ta jest szczególnie zalecana do przetwarzania odpadów z tworzyw sztucznych, które nie zostały w pełni wyeksploatowane pod względem strukturalnym. Kluczowym warunkiem jest, aby materiał nie był zanieczyszczony ani skorodowany oksydacyjnie w wyniku starzenia chemicznego.

Kolejną metodą jest recykling surowcowy, polegający na przetworzeniu odpadów tworzyw sztucznych do pierwotnej postaci surowca, z którego zostały wytworzone. Dzięki temu można ponownie wykorzystać go do produkcji wyrobów z tworzyw sztucznych. Przykładem recyklingu surowcowego jest przetwarzanie plastikowych butelek w celu ponownego wytworzenia z nich opakowań z tworzywa sztucznego [4].

Recykling surowcowy odbywa się w instalacjach, w których panuje bardzo wysoka temperatura. Surowiec ulega wówczas rozkładowi do prostych związków chemicznych. Wszelkie odpady są wykorzystywane jako dodatek do paliw i smarów. Recykling surowcowy nie jest jednak powszechnie stosowany, ze względu na dużą złożoność zarówno obsługi samej instalacji, jak i kontroli przebiegu całego procesu. Stosuje się go głównie wtedy, gdy recykling materiałowy jest ekonomicznie nieuzasadniony. Ma to miejsce m.in. w przypadku butelek PET z wtopionymi lub nadrukowanymi etykietami oraz produktów z wielu różnych materiałów wejściowych [3,4].

Ostatnią metodą recyklingu jest recykling energetyczny tworzyw sztucznych, tzw. termiczny. Przetwarzanie tworzyw sztucznych metodą termiczną polega na spalaniu, półspalaniu lub termolizie odpadów, co umożliwia odzyskanie zgromadzonej w nich energii. Metoda ta obejmuje około 16% odpadów na całym świecie. Wykorzystywane są w niej specjalistyczne piece, instalacje upłynniające lub zgazowujące. Ta metoda jest stosowana w przypadku, gdy odpady zostały zanieczyszczone lub stanowią mieszaninę różnych materiałów. W takich sytuacjach przeprowadzenie recyklingu materiałowego lub surowcowego byłoby ekonomicznie nieuzasadnione [3,4].

W artykule przedstawiono recykling tworzywa PET, pozyskanego z powszechnie stosowanych butelek po napojach, i wykorzystanie go do wytwarzania ekofilamentu do druku 3D w urządzeniu własnej konstrukcji jako specyficzny rodzaj recyklingu surowcowego. Produktem wyjściowym recyklingu jest ten sam rodzaj tworzywa sztucznego w innej jednak postaci – materiału wejściowego do procesu wytwarzania przyrostowego, czyli tzw. filament [2].

Istota druku 3D

Techniki druku 3D są szeroko stosowane w wielu gałęziach przemysłu, takich jak przemysł lotniczy, motoryzacyjny, elektromaszynowy, AGD i RTV, a także w innych dziedzinach, np. medycynie, architekturze, edukacji czy rozrywce. Umożliwiają one wytworzenie prototypu na podstawie komputerowego modelu CAD (ang. computer aided design). Dzięki wysokiej dokładności odwzorowania modelu CAD, techniki druku 3D

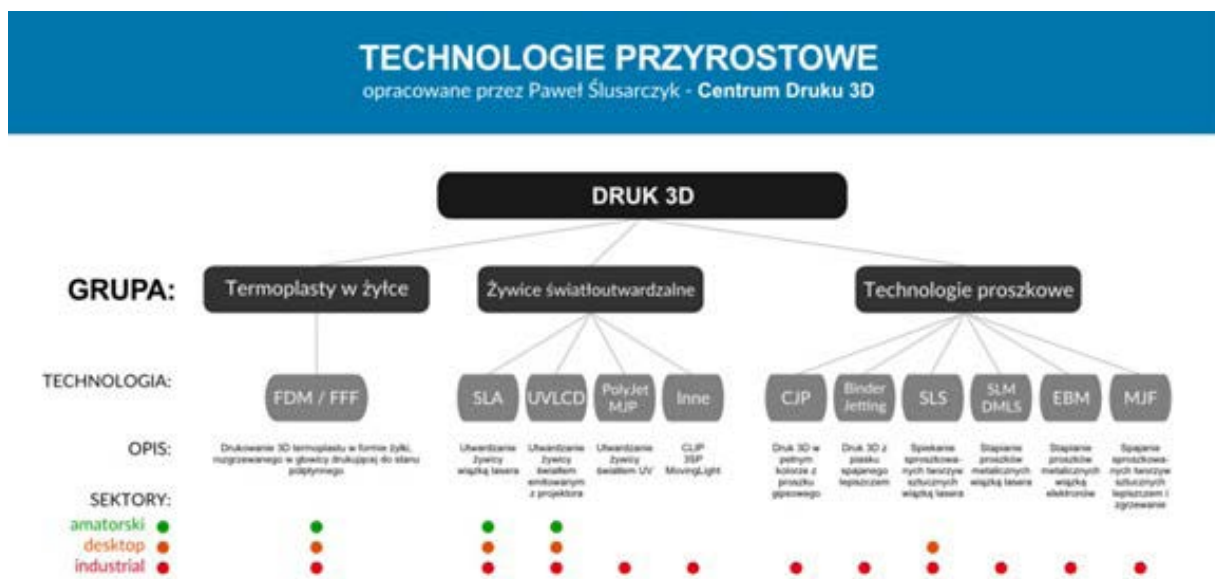
są wykorzystywane w procesie wdrażania nowych elementów do produkcji. Dobór odpowiedniej techniki zależy od wielu czynników, takich jak: gabaryty, dokładność geometryczna kształtu, jakość powierzchni czy rodzaj planowanych badań stanowiskowych [5-7]. Wzrost znaczenia druku 3D wynika przede wszystkim z dynamicznego rozwoju technologii w tym obszarze oraz postępu w rozwoju sprzętu komputerowego i dostępności oprogramowania do przestrzennego modelowania. Na podstawie modelu 3D realizowany jest kompleksowy proces przygotowania danych numerycznych niezbędnych do druku 3D [5].

Proces wytwarzania modelu do druku 3D składa się z czterech zasadniczych etapów:

1. Opracowanie modelu 3D CAD, wygenerowanie na jego podstawie siatki trójkątów.
2. Podzielenie zaprojektowanego wcześniej modelu na warstwy oraz zaprogramowanie torów ruchu głowicy nakładającej materiał, lepiszce lub wiązki lasera.
3. Tworzenie rzeczywistego obiektu techniką przyrostową.
4. Tzw. postprocessing, czyli usunięcie modelu z maszyny i ewentualne poddanie go obróbce wykończeniowej [2,5,8].

Podział metod druku 3D

Podczas wytwarzania modelu drukiem 3D, budowany model powstaje poprzez dodawanie materiału, spiekanie proszku lub utwardzanie cieczy (np. żywicy). Każda z nanoszonych przez maszynę warstw łączy się



Rysunek 1. Podział metod druku 3D [9]

z poprzednią [5–8]. W wyniku wielokrotnego powtarzania tej operacji powstaje gotowy model. Na rysunku 1 przedstawiono podział metod druku 3D.

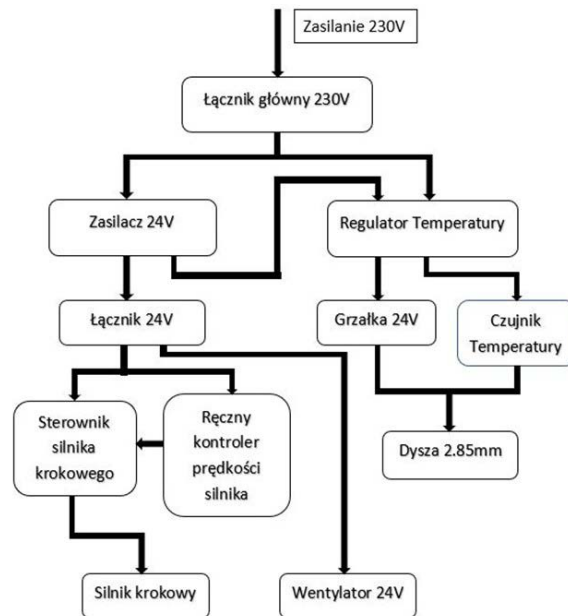
Przykładowo metoda FDM/FFF polega na warstwowym budowaniu modelu z roztopionego filamentu termoplastycznego, który jest wytłaczany przez dyszę drukarki [5,8]. Technologia ta umożliwia wytwarzanie prototypów oraz modeli koncepcyjnych, a jej zaletą jest szeroki wybór materiałów modelowych, w tym PET [10,11]. Modele wymagają stosowania podpór, które w zależności od technologii mogą być rozpuszczane lub usuwane mechanicznie [5]. Metoda PolyJet (JS) wykorzystuje ciekłe fotopolimery utwardzane światłem UV, co pozwala na bardzo dokładne odwzorowanie geometrii i drukowanie cienkościennych elementów [8]. Wykorzystywane materiały, takie jak RGD 720 czy Tango, pozwalają na uzyskanie różnych właściwości mechanicznych i elastyczności modeli [8]. Metoda SLS bazuje na selektywnym spiekaniu cząstek proszku polimerowego wiązką lasera, co pozwala na uzyskanie wytrzymałych i skomplikowanych modeli [5,8]. Modele wymagają obróbki końcowej, a niewykorzystany proszek może być użyty w kolejnym procesie [8]. Stereolitografia SLA wykorzystuje fotopolimeryzację ciekłej żywicy laserem, co zapewnia wysoką precyzję oraz gładkość powierzchni [8]. Metoda ta znajduje zastosowanie m.in. w lotnictwie, motoryzacji i medycynie, szczególnie przy tworzeniu implantów stomatologicznych i modeli ubytków kostnych [2,5].

Urządzenie do wytwarzania ekofilamentu PET

Wzrost ilości odpadów, szczególnie zużytych opakowań, w tym butelek PET po napojach, stwarza poważny problem, a wręcz zagrożenie ekologiczne. W odpowiedzi na ten problem opracowano autorską koncepcję konstrukcji urządzenia do wytwarzania ekofilamentu PET z odpadów – butelek po napojach. Schemat blokowy tego urządzenia przedstawiono na rysunku 2.

Pierwszym krokiem po segregacji odpadów jest przygotowanie butelek po napojach wytworzonych z tworzywa PET – weryfikacja materiałowa, oczyszczenie, wycięcie pasków o szerokości 16–20 mm, w zależności od grubości butelki za pomocą specjalnych,

wykonanych samodzielnie wykrojników, które przedstawiono na rysunku 3. Natomiast na rysunku 4 przedstawiono materiał wejściowy, tj. przedmiotowe paski materiału PET z odpadów.



Rysunek 2. Schemat blokowy urządzenia do wytwarzania ekofilamentu [2]



Rysunek 3. Wykrojniki do butelek PET [2]



Rysunek 4. Materiał wejściowy do wytwarzania ekofilamentu PET – wycięte fragmenty/paski ze zużytych butelek po napojach [2]

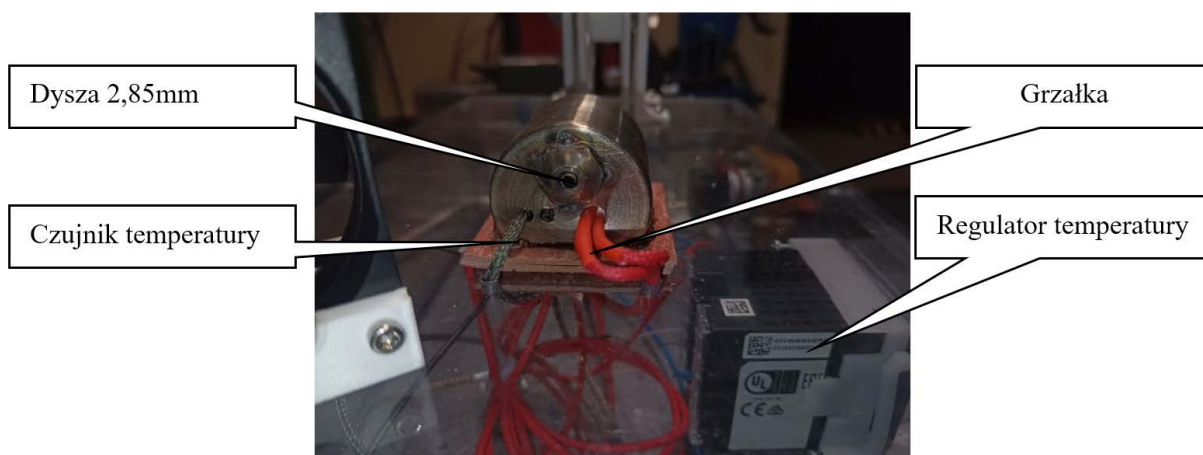
Kolejny etap obejmuje nawinięcie wyciętych pasków na szpulę oraz wprowadzenie paska do dyszy wyposażonej w system grzewczy, który zawiera odpowiednią grzałkę oraz czujnik temperatury. Czujnik ten, za pomocą regulatora utrzymuje właściwą temperaturę. Układ głowicy jest podgrzewany do około 224°C. Średnica końcowa dyszy wynosi \varnothing 2,85 mm, co pokazano na rysunku 5.

Urządzenie jest dodatkowo wyposażone w regulator temperatury, który odpowiada za utrzymanie właściwych parametrów podgrzewania dyszy. Na wejściu głowicy znajduje się tuleja stożkowa, która zapewnia prawidłowe wprowadzenie wyciętego paska PET do

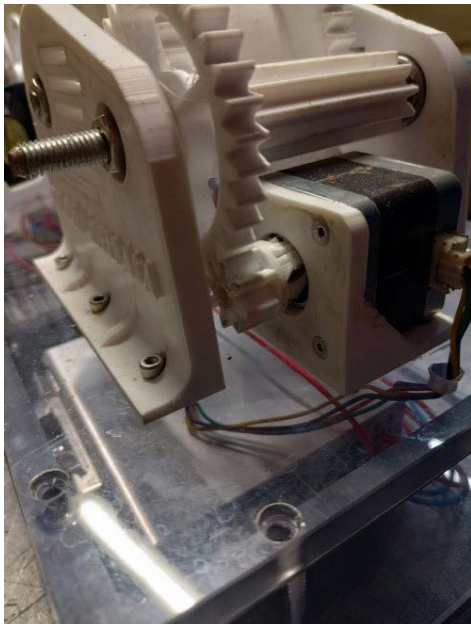
głowicy formującej. Na wyjściu dyszy uzyskiwany jest produkt finalny, który następnie za pomocą wentylatora jest schładzany, aby filament zachował stałą średnicę. Kolejny krok procesu wytwarzania ekofilamentu PET obejmuje uruchomienie silnika krokowego maszyny, który napędza bęben. Prędkość obrotowa winna być dobrana precyzyjnie, w sposób zabezpieczający wytwarzany materiał modelowy przed przegrzaniem. Mechanizm oraz silnik przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rysunek 6. Silnik krokowy napędu bębna [2]



Rysunek 5. Mocowanie grzałki, czujnika temperatury oraz dyszy 2,85 mm do głowicy [2]

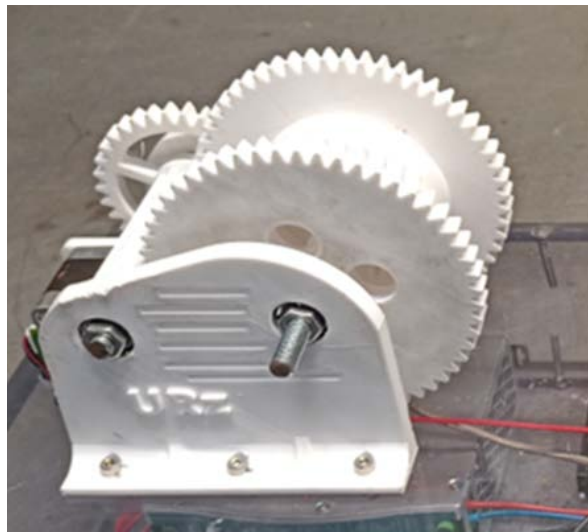


Rysunek 7. Konstrukcja mechanizmu napędu bębna – przekładni zębatej [2]

Wyprodukowany i schłodzony produkt jest nawijany na bęben napędzany dedykowanym mechanizmem, składającym się z walcowej przekładni zębatej o zębach prostych oraz silnika krokowego. Bęben ten przedstawiono na rysunku 8.

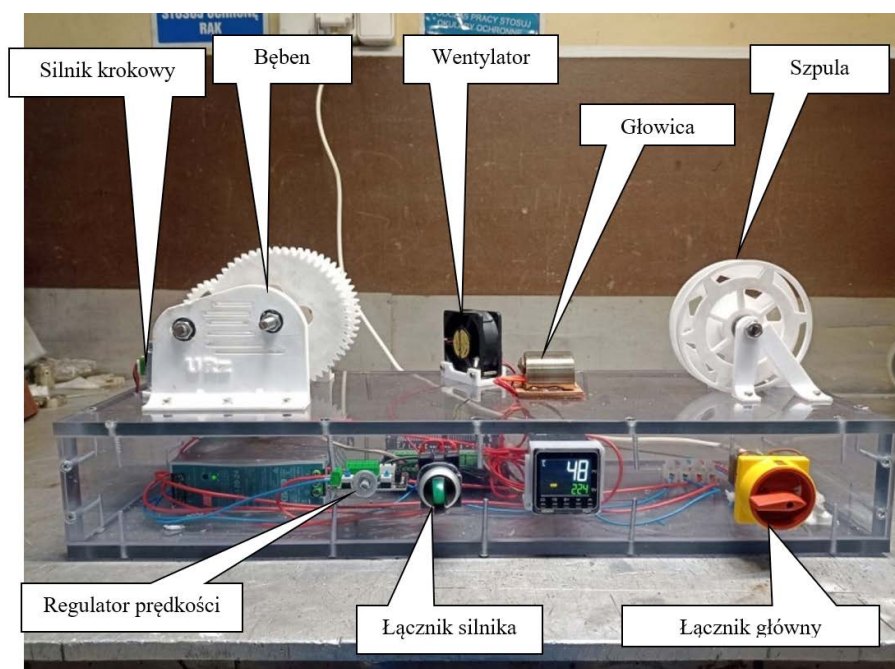
Siła wyciągania ekofilamentu PET z dyszy urządzenia wynosi około 8 kg. Z uwagi na to, że podstawa urządzenia jest wykonana z poliwęglanu, aby uniknąć

stopienia materiału przez rozgrzaną głowicę, zastosowano specjalne tworzywo termoizolujące.



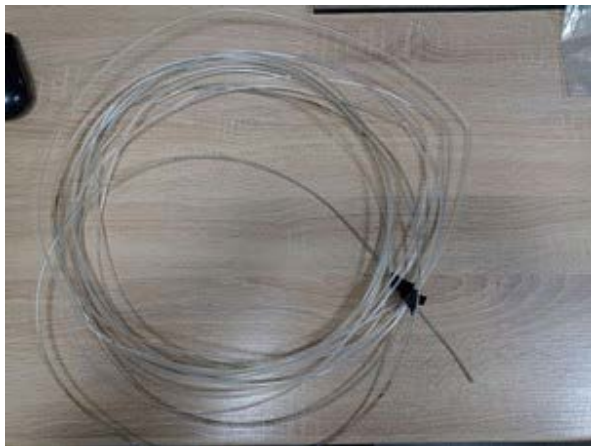
Rysunek 8. Bęben na który nawijany zostaje produkt gotowy [2]

Gotowy materiał – termoplastyczne tworzywo w postaci ekofilamentu PET wymaga standardowej procedury kształtowania drogą druku 3D, tj. zastosowania dyszy ekstrudera o średnicy $\varnothing 0,4$ mm. Stół roboczy drukarki – tzw. platforma podmodelowa – powinien być podgrzany do temperatury około 115°C , zaś dysza drukująca do około 255°C . Prototyp konstrukcji urządzenia do wytwarzania ekofilamentu z odpadów – zużytych butelek po napojach PET – przedstawiono na rysunku 9.



Rysunek 9. Konstrukcja urządzenia do wytwarzania ekofilamentu [2]

Gotowy materiał modelowy pochodzący z recyklingu – wtórnego przetwarzania odpadów w postaci zużytych butelek po napojach – przedstawiono na rysunku 10.



Rysunek 10. Próbką ekofilamentu PET wytworzonego według autorskiej koncepcji [2]

Wykorzystując przedmiotowe tworzywo termoplastyczne – ekofilament PET – przeprowadzono próbną wydruk przestrzenny w technologii FFF. Wydrukowany model przedstawiono na rysunku 11.



Rysunek 11. Model testowy wytworzony z ekofilamentu PET [2]

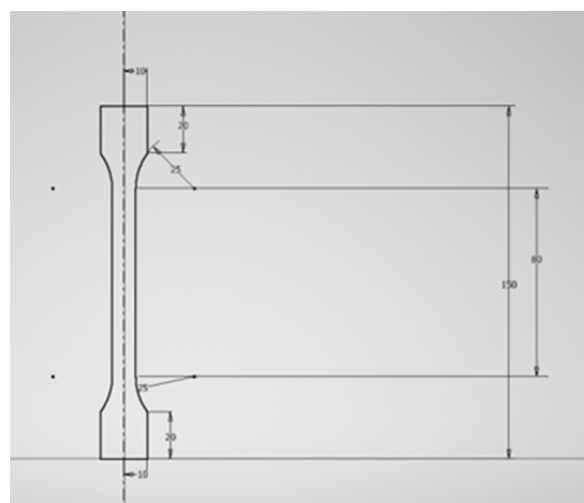
Analiza wytrzymałościowa ekofilamentu PET

Celem przeprowadzonej analizy była ocena podstawowych parametrów wytrzymałościowych ekofilamentu PET, co umożliwi określenie potencjalnych obszarów zastosowań elementów wytwarzanych za pomocą druku 3D. W tym celu opracowano modele testowe, zgodnie

z odpowiednimi normami, a następnie przeprowadzono statyczną próbę rozciągania oraz próbę trójpunktowego zginania. Dodatkowo, w celu porównania wyników, przygotowano próbki z materiału bazowego, czyli powszechnie dostępnego na rynku filamentu PET, przy zachowaniu identycznych parametrów procesu wytwarzania. Modele testowe wydrukowano w trzech wariantach wypełnienia (30%, 60% i 100%), wytwarzając po cztery próbki dla każdego wariantu, co pozwoliło uzyskać powtarzalność wyników.

Opracowanie i wytworzenie modeli testowych

W pierwszym etapie opracowano modele CAD do prób wytrzymałościowych, zgodne z normą PN-EN ISO 527 [14] w środowisku Autodesk Inventor. Modele testowe dotyczyły wioseł, zaprojektowanych do przeprowadzenia prób rozciągania i zginania. Następnie, zgodnie z wymaganiami norm, próbki zostały wykonane z grubością 4 mm. Kolejnym krokiem było wygenerowanie siatek trójkątów w formacie STL, które zostały zweryfikowane pod kątem poprawności wymiarowej i kształtowej. Ostatni etap polegał na przygotowaniu procedury wytwarzania próbek przy użyciu dedykowanego oprogramowania narzędziowego, z uwzględnieniem optymalizacji modeli i parametrów druku, takich jak grubość warstwy oraz różne warianty wypełnienia (30%, 60%, 100%). Modele wioseł zostały wydrukowane zarówno z ekofilamentu PET (rysunek 12), jak i z bazowego filamentu PET (rysunek 13), przy zachowaniu tych samych parametrów druku.



Rysunek 12. Próbki do badań wytrzymałościowych – ekofilament PET [2]



Rysunek 13. Próbkki do badań wytrzymałościowych – filament bazowy PET [2]

Badania wytrzymałościowe ekofilamentu PET

Celem odniesienia do materiału bazowego dostępnego na rynku filamentu PET, tj. opracowania analizy porównawczej materiału z recyklingu oraz materiału wstępnego, badaniom poddano serie bazowe wytworzone przy tożsamych parametrach wydruku 3D na wcześniejszym etapie.

Aby zwiększyć czytelność uzyskanych w badaniach wyników, przyjęto uproszczony sposób nazywania próbek: „PET Recykling” – dla materiału autorskiego wytworzonego z odpadów – zużytych butelek po napojach oraz „PET Bazowy” dla określenia materiału dostępnego na rynku. Statyczna próba rozciągania została opisana szczegółowo w normie PN-EN ISO 527 [14]. Otrzymano wykresy przedstawiające zależności pomiędzy zmienną naprężenia i odkształcenia bądź wydłużenia i obciążenia [2,12].

Statyczna próba rozciągania

Wytrzymałość na rozciąganie wyznaczono z wykorzystaniem urządzenia Mecmesin Multitest-Dv (rysunek 14). Maszynę wytrzymałościową opracowano, podobnie jak wszystkie oferowane przez przedmiotowego producenta urządzenia pomiarowe, w kierunku precyzyjnego wyznaczania parametrów mechanicznych tworzyw polimerowych.

Urządzenie wyposażono w zaawansowane układy elektroniki i automatyki sterującej, zachowując przy tym – co charakterystyczne dla przedmiotowego pro-

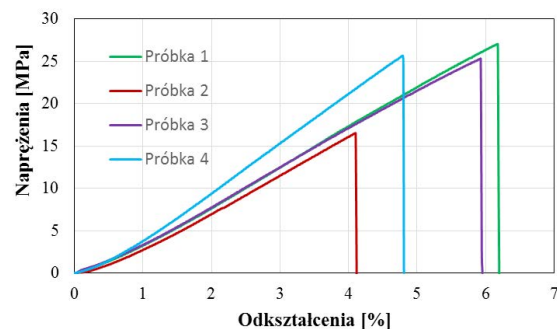
ducenta – niezwykle intuicyjną i nieskomplikowaną procedurę obsługi.



Rysunek 14. Maszyna wytrzymałościowa do tworzyw polimerowych Mecmesin Multitest-Dv [13]

Wyniki analizy wytrzymałościowej modeli testowych – próbek badawczych materiału PET – opracowano w formie zestawień tabelarycznych, wykresów poszczególnych zależności oraz słupkowych wykresów porównawczych, przedstawionych na rysunkach 15–22 i w tabelach 1–6.

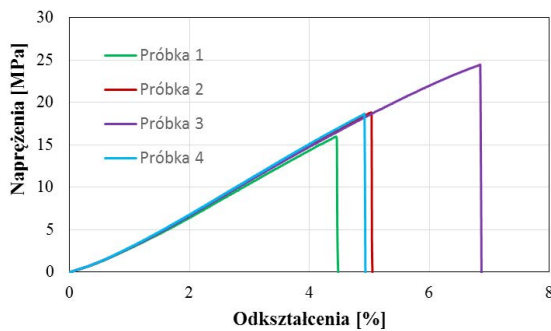
PET Recykling



Rysunek 15. Wykres zależności odkształcenia w funkcji naprężenia w statycznej próbie rozciągania materiału PET Recykling – stopień wypełnienia 100% [2]

Tabela 1. Zestawienie wyników statycznej próby rozciągania materiału PET Recykling – stopień wypełnienia 100% [2]

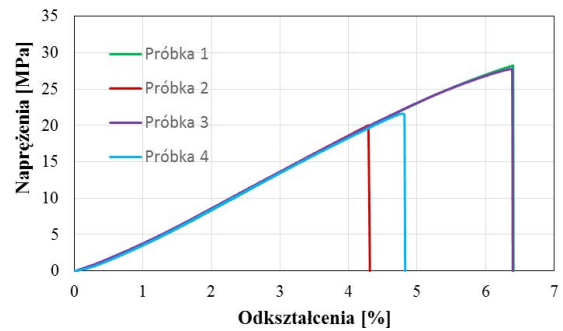
| | Napężenie [MPa] | Odształcenie [%] |
|---------------------------|-----------------|------------------|
| PET Recykling 100% | | |
| Próbka 1 | 27,0 | 6,2 |
| Próbka 2 | 16,5 | 4,1 |
| Próbka 3 | 25,3 | 5,9 |
| Próbka 4 | 25,7 | 4,8 |
| Średnia | 23,6 | 5,3 |
| Odchylenie standardowe | 4,2 | 0,8 |
| Współczynnik zmienności | 17,6 | 16,1 |



Rysunek 16. Wykres zależności odkształcenia w funkcji naprężenia w statycznej próbie rozciągania materiału PET Recykling – stopień wypełnienia 60% [2]

Tabela 2. Zestawienie wyników statycznej próby rozciągania materiału PET Recykling – stopień wypełnienia 60% [2]

| | Napężenie [MPa] | Odształcenie [%] |
|--------------------------|-----------------|------------------|
| PET Recykling 60% | | |
| Próbka 1 | 16,0 | 4,5 |
| Próbka 2 | 18,8 | 5,0 |
| Próbka 3 | 24,5 | 6,9 |
| Próbka 4 | 18,7 | 4,9 |
| Średnia | 19,5 | 5,3 |
| Odchylenie standardowe | 3,1 | 0,9 |
| Współczynnik zmienności | 15,8 | 17,1 |



Rysunek 17. Wykres zależności odkształcenia w funkcji naprężenia w statycznej próbie rozciągania materiału PET Recykling – stopień wypełnienia 30% [2]

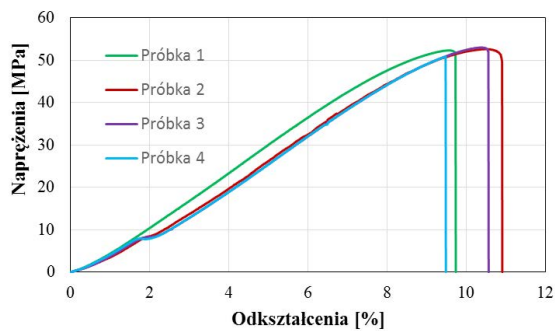
Tabela 3. Zestawienie wyników statycznej próby rozciągania materiału PET Recykling – stopień wypełnienia 30% [2]

| | Napężenie [MPa] | Odształcenie [%] |
|--------------------------|-----------------|------------------|
| PET Recykling 30% | | |
| Próbka 1 | 28,2 | 6,4 |
| Próbka 2 | 20,0 | 4,3 |
| Próbka 3 | 27,8 | 6,4 |
| Próbka 4 | 21,6 | 4,8 |
| Średnia | 24,4 | 5,5 |
| Odchylenie standardowe | 3,6 | 0,9 |
| Współczynnik zmienności | 14,9 | 17,1 |

Podając wstępnej analizie wyniki ze statycznej próby rozciągania ekofilamentu PET, stwierdzono:

- niski poziom powtarzalności w danej serii badawczej;
- odstępstwo od reguły wzrostu wytrzymałości wraz ze wzrostem procentowej wartości wypełnienia modelu;
- charakter poszczególnych krzywych zbieżny ze standardowym przebiegiem wykresów wybranych zależności parametrów wytrzymałościowych materiałów termoplastycznych – filamentów przeznaczonych do druku 3D [2].

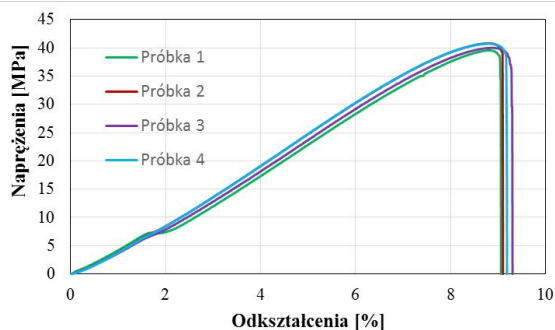
PET Bazowy



Rysunek 18. Wykres zależności odkształcenia w funkcji naprężenia w statycznej próbie rozciągania materiału PET Bazowy – stopień wypełnienia 100% [2]

Tabela 4. Zestawienie wyników statycznej próby rozciągania materiału PET Bazowy – stopień wypełnienia 100% [2]

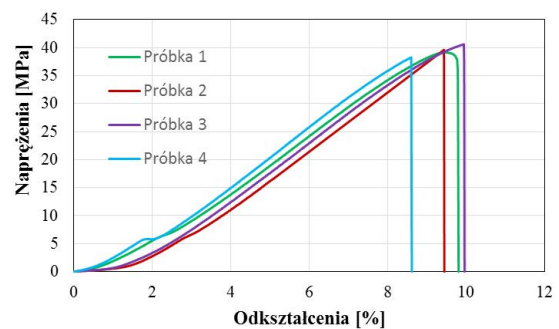
| | Naprężenie [MPa] | Odkształcenie [%] |
|-------------------------|------------------|-------------------|
| PET Bazowy 100% | | |
| Próbka 1 | 52,3 | 9,7 |
| Próbka 2 | 52,6 | 10,9 |
| Próbka 3 | 53,0 | 10,6 |
| Próbka 4 | 50,9 | 9,5 |
| Średnia | 52,2 | 10,2 |
| Odchylenie standardowe | 0,8 | 0,6 |
| Współczynnik zmienności | 1,6 | 5,7 |



Rysunek 19. Wykres zależności odkształcenia w funkcji naprężenia w statycznej próbie rozciągania materiału PET Bazowy – stopień wypełnienia 60% [2]

Tabela 5. Zestawienie wyników statycznej próby rozciągania materiału PET Bazowy – stopień wypełnienia 60% [2]

| | Naprężenie [MPa] | Odkształcenie [%] |
|-------------------------|------------------|-------------------|
| PET Bazowy 60% | | |
| Próbka 1 | 39,6 | 9,1 |
| Próbka 2 | 40,8 | 9,1 |
| Próbka 3 | 40,0 | 9,3 |
| Próbka 4 | 40,7 | 9,2 |
| Średnia | 40,3 | 9,2 |
| Odchylenie standardowe | 0,5 | 0,1 |
| Współczynnik zmienności | 1,3 | 1,0 |



Rysunek 20. Wykres zależności odkształcenia w funkcji naprężenia w statycznej próbie rozciągania materiału PET Bazowy – stopień wypełnienia 30% [2]

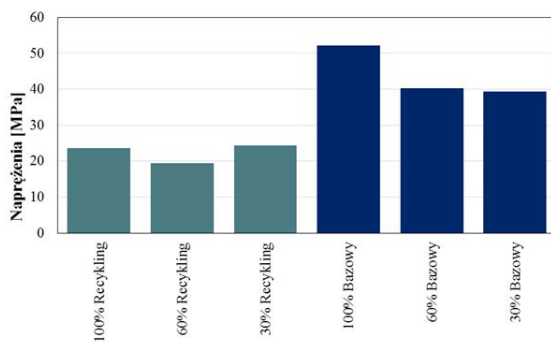
Tabela 6. Zestawienie wyników statycznej próby rozciągania materiału PET Bazowy – stopień wypełnienia 30% [2]

| | Naprężenie [MPa] | Odkształcenie [%] |
|-------------------------|------------------|-------------------|
| PET Bazowy 30% | | |
| Próbka 1 | 39,1 | 9,8 |
| Próbka 2 | 39,6 | 9,4 |
| Próbka 3 | 40,6 | 9,9 |
| Próbka 4 | 38,3 | 8,6 |
| Średnia | 39,4 | 9,4 |
| Odchylenie standardowe | 0,8 | 0,5 |
| Współczynnik zmienności | 2,1 | 5,5 |

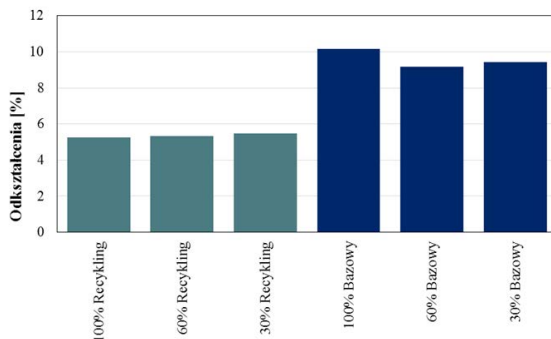
Poddając wstępnej analizie wyniki ze statycznej próby rozciągania bazowego (producenta) filamentu PET, stwierdzono:

- wysoki poziom powtarzalności w danej serii badawczej;
- potwierdzenie reguły wzrostu wytrzymałości wraz ze wzrostem procentowej wartości wypełnienia modelu;
- charakter poszczególnych krzywych zbliżony ze standardowym przebiegiem wykresów wybranych zależności parametrów wytrzymałościowych materiałów termoplastycznych – filamentów przeznaczonych do druku 3D.

Analiza porównawcza wyników ze statycznej próby rozciągania filamentów PET – pochodzącego z recyklingu i bazowego (producenta), przedstawiona na opracowanych wykresach słupkowych (rysunki 21 i 22) wykazała wyraźny wzrost poszczególnych parametrów wytrzymałościowych materiału bazowego względem ekofilamentu o około 50% [2].



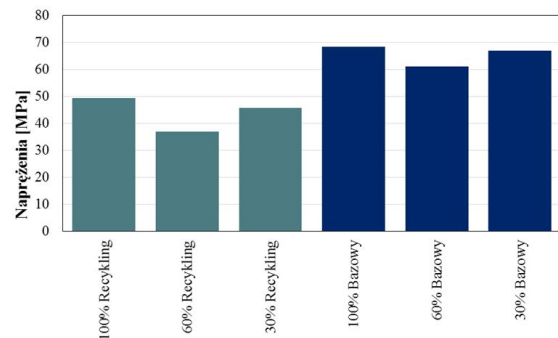
Rysunek 21. Średnie wartości naprężeń rozciągających wyznaczone w statycznej próbie rozciągania dla poszczególnych wariantów wypełnienia modeli [2]



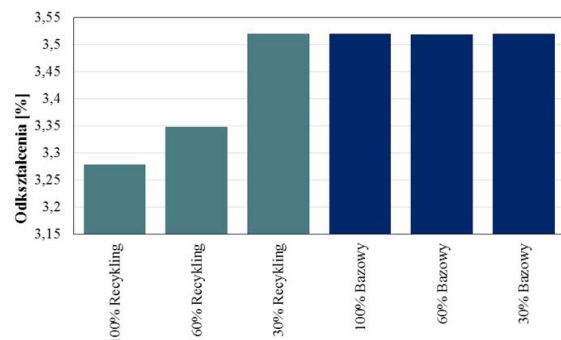
Rysunek 22. Średnie wartości odkształcenia przy zerwaniu wyznaczone w statycznej próbie rozciągania dla poszczególnych wariantów wypełnienia modeli [2]

Próba trójpunktowego zginania

Wytrzymałość na zginanie wyznaczono z wykorzystaniem urządzenia Mecmesin Multitest-Dv (rysunek 14) [13]. Wyniki analizy wytrzymałościowej modeli testowych próbek badawczych z materiału PET przedstawiono na słupkowych wykresach porównawczych przedstawionych na rysunkach 23 i 24.



Rysunek 23. Średnie wartości naprężeń zginających wyznaczone w próbie zginania dla poszczególnych wariantów wypełnienia modeli [2]



Rysunek 24. Średnie wartości odkształcenia przy maksymalnym naprężeniu zginającym wyznaczone w próbie zginania dla poszczególnych wariantów wypełnienia modeli [2]

Analizując otrzymane wyniki statycznej próby zginania bazowego (producenta) filamentu PET, stwierdzono:

- wysoki poziom powtarzalności w danej serii badawczej;
- odstępstwo od reguły wzrostu wytrzymałości wraz ze wzrostem procentowej wartości wypełnienia modelu;
- charakter poszczególnych krzywych zbliżony ze standardowym przebiegiem wykresów wybranych zależności parametrów wytrzymałościowych materiałów termoplastycznych – filamentów przeznaczonych do druku 3D.

Analizę porównawczą wyników naprężenia zginającego wyznaczonego w próbie trójpunktowego zginania filamentów PET wykazała wyraźny wzrost poszczególnych parametrów wytrzymałościowych materiału bazowego względem ekofilamentu o około 30%.

Jednocześnie stwierdzono, że odkształcenie przy maksymalnym poziomie w danej serii dla ekofilamentu jest zbliżone z materiałem bazowym, co przedstawiono na wykresie słupkowym (rysunek 24).

Wnioski

Przeprowadzono analizę wytrzymałościową termoplastycznego materiału do druku 3D – ekofilamentu PET wytwarzanego z odpadów w postaci zużytych butelek po napojach z wykorzystaniem urządzenia autorskiej konstrukcji.

Poddając analizie poszczególne wyniki statycznej próby rozciągania stwierdzono, iż maksymalne naprężenie wynosi 28,2 MPa, zaś poziom najniższy to 16 Pa. Są to zatem wartości świadczące o stosunkowo dobrej wytrzymałości na rozciąganie w odniesieniu do innych popularnie stosowanych materiałów do modelowania tworzywem termoplastycznym. Jedyną różnicę w porównaniu do innych tworzyw, zaobserwowano dla zastosowanych przyjętych typowych procentowych progów wariantu wypełnienia – ekofilament wykazał najwyższą wytrzymałość na rozciąganie przy wypełnieniu 30%, podczas gdy zdecydowana większość tworzyw, filamentów dla techniki FFF, cechuje się wyraźnym wzrostem wytrzymałości dla 100% wypełnienia. Z kolei stwierdzono tym samym niewielką – znikomą wręcz w porównaniu do innych materiałów – różnicę pomiędzy przedmiotowymi wariantami, tj. 30%, 60% i 100%. Podobną zależność stwierdzono dla średniej wartości parametru odkształcenia przy rozciąganiu – najwyższą wartość 5,5% wyznaczono dla wariantu 30%, przy czym wariant 100% i 60% wykazał jednakowy poziom 5,3%.

Problematiczną jest natomiast, w aspekcie wyznaczonych parametrów wytrzymałości na rozciąganie ekofilamentu PET, niewielka powtarzalność w elementarnej serii badawczej. Stwierdzono znaczne rozbieżności w wynikach dla poszczególnych próbek.

Poddając analizie kolejne zrealizowane badanie wytrzymałościowe – próbę trójpunktowego zginania – stwierdzono najwyższe naprężenie na poziomie 54,3 MPa dla wypełnienia 100% i 28,8 MPa – przy wariacie 60%, przy czym w wymiarze średnim różnice nie są tak duże, co z kolei potwierdza zidentyfikowaną wcześniej niewielką powtarzalność. W przypadku odkształcenia stwierdzono wartość najwyższą 3,5% dla wariantu wypełnienia 30%.

Kluczowym elementem z punktu widzenia przedmiotowego opracowania wyników badań wytrzymałościowych jest analiza porównawcza ekofilamentu PET, względem tworzywa tzw. bazowego – dostępnego na rynku nowego materiału.

Badania potwierdziły zależność, o której wspomniano w rozważaniach teoretycznych pracy, a mianowicie niższą jakość wyrobu wytwarzanego z materiału pochodzącego z procesów recyklingu. W toku zrealizowanych badań wytrzymałościowych wyznaczono spadek wytrzymałości na rozciąganie ekofilamentu względem materiału bazowego na poziomie niespełna 50%, a wytrzymałości na zginanie – około 30%.

Jednocześnie stwierdzono zbliżony dla poszczególnych materiałów przebieg krzywych zależności, wyznaczonych na wyżej opracowanych wykresach.

Dodatkowo, ekofilament PET nie wykazał wyraźnego, możliwego do sparametryzowania, wpływu procentowej wartości wypełnienia modelu na wyznaczoną w badaniach wytrzymałość na rozciąganie i zginanie.

Bibliografia

- [1] Ashraf F, Lodh A, Pagone E, Castelluccio GM. Revitalising metallic materials: A path towards a sustainable circular economy. *Sustainability*. 2023;15:11675. <https://doi.org/10.3390/su151511675>.
- [2] Kietbasa M. Design and implementation of a device for producing eco-filament from PET bottles for 3D printing. [praca inżynierska]. Rzeszów: Uniwersytet Rzeszowski; 2024.
- [3] Molok. (cop. 2023). Molok Polska – Blog. Ylöjärvi: Molok Ltd. [Internet; cytowane 12 marca 2025]. Dostępne na: <https://www.molok.com/pl/blog>.
- [4] Opakowanie.pl. (2025). [Internet; cytowane 8 stycznia 2025]. Dostępne na: <https://opakowanie.pl/>.
- [5] Budzik G, Siemiński P. Techniki przyrostowe: druk drukarki 3D. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2015.
- [6] Budzik G. Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej; 2013.
- [7] Dodziuk H. Druk 3D/AM: zastosowania oraz skutki społeczne i gospodarcze. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN; 2019.
- [8] Wohlers Report 2018: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report. Wohlers Associates; 2018.
- [9] CD3D Centrum Druku 3D. (cop. 2025). [Internet; cytowane 21 stycznia 2025]. Dostępne na: <https://centrumdruku3d.pl/>
- [10] Tartakowski Z, Mydlowska K. Właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM z poliamidu. *Przetwórstwo Tworzyw*. 2015;21(6):467–472.

- [11] Madej K, Kozioł P, Arabik R, Żyłka W, Hołota B. Druk 3D w aspekcie zastosowań przemysłowych. *Obróbka Metalu*. 2023;2:14–20.
- [12] Broniewski T. *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 2000.
- [13] TA. Zaawansowane systemy pomiarowe i narzędziowe. Poznań: ITA. [Internet; cytowane 10 lutego 2025]. Dostępne na: <https://www.ita-polska.com.pl/>.
- [14] PN-EN ISO 527-2:2012. *Tworzywa sztuczne: oznaczanie właściwości przy rozciąganiu. Cz. 2: Warunki badania dla tworzyw formowanych i wytłaczanych*. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny; 2012.