

Perspektywa zastosowania maszyn małoseryjnych do produkcji filamentu inżynierii produkcji i zarządzania odpadami

Data wpłynięcia do Redakcji: 04/2024
Data akceptacji przez Redakcję do publikacji: 05/2024

2024, volume 13, issue 2, pp. 174-182

Jędrzej Blaut
Akademia Górniczo-Hutnicza, Poland

Wiktor Leszczyk
Poland

Rafał Rumin
Akademia Górniczo-Hutnicza, Poland



Streszczenie: W ostatnich latach recykling tworzyw sztucznych stał się wyzwaniem związanym z ochroną środowiska. Materiały polimerowe są powszechnie wykorzystywane, co generuje problem trwałych odpadów po ich wycofaniu z użytku. Możliwość ponownego wykorzystania tych materiałów umożliwia skuteczną utylizację odpadów. Rynek druku 3D dynamicznie rośnie, a filamenty do druku mogą być wytwarzane z recyklingu. Niniejszy artykuł przegląda literaturę dotyczącą produkcji filamentów z polimerów pochodzących z recyklingu jako alternatywy dla obecnego podejścia do centralnej selektywnej zbiórki tworzyw sztucznych. Przedstawiono eksperymentalne stanowisko do recyklingu materiału termoplastycznego PET i jego właściwości mechaniczne. Dodatkowo przeanalizowano dostępne na rynku urządzenia do produkcji filamentów z odpadów tworzyw sztucznych.

Słowa kluczowe: Recykling tworzyw sztucznych, ochrona środowiska, gospodarka odpadami, materiały polimerowe, filamenty do druku 3D, recykling PET, właściwości mechaniczne, produkcja filamentów, alternatywne podejście, selektywna zbiórka, termoplastyka, utylizacja odpadów, druk 3D, upcykling, zarządzanie odpadami

WSTĘP

Obecny model gospodarki odpadami jest niewystarczający. Zaleca się podejście oparte na redukcji, ponownym wykorzystaniu i upcyklingu odpadów. Victor Papanek [1] promował przetwarzanie odpadów w wartościowe zasoby poprzez projektowanie produktów i systemów pod kątem łatwiejszego recyklingu i naprawy. Nasza praca pokazuje potencjał przekształcenia odpadów w użyteczne surowce za pomocą druku 3D oraz analizuje wpływ parametrów technologicznych na właściwości materiałów konstrukcyjnych.

Koncepcja gospodarki obiegu zamkniętego (Circular Economy – CE) to krok w kierunku zrównoważonej gospodarki, oparty na zasadach 3R: Reduce, Reuse i Recycle, oraz dodatkowych trzech podejściach: Recover, Redesign i Remanufacture [2].

Cele gospodarki o obiegu zamkniętym dla Europy zostały określone w pakiecie dotyczącym gospodarki o obiegu zamkniętym z 2015 r. Plan ten obejmuje priorytetowe obszary takie jak recykling odpadów komunalnych i

opakowaniowych oraz ograniczenie składowania odpadów do 10% do 2030 r. Gospodarka o obiegu zamkniętym ma na celu redukcję zużycia zasobów naturalnych, minimalizację odpadów i zanieczyszczeń, oraz odzysk materiałów i energii [3].

ZARZĄDZANIE I RECYKLING BUTELEK Z TWORZYWA PET

W zarządzaniu i recyklingu butelek z tworzywa PET istnieje wiele aspektów. Tworzywo PET jest szeroko stosowane, dlatego ważne jest skuteczne zarządzanie nim na każdym etapie cyklu życia.

Jednym z ważnych aspektów jest efektywne zbieranie butelek PET, zarówno z systemów depozytowych, jak i programów zbierania odpadów. Po zebraniu butelek PET są one sortowane w zakładach do odzysku surowców.

Preferowaną metodą recyklingu butelek PET jest recykling mechaniczny, gdzie tworzywo jest przetwarzane na nowe wyroby PET. W przypadku zanieczyszczeń stosuje się recykling chemiczny, polegający na depolimeryzacji butelek PET [4].

Priorytetowym etapem procesu recyklingu butelek PET jest oczyszczanie surowca, usuwając wszelkie zanieczyszczenia. Analiza cyklu życia butelek PET pozwala ocenić ich wpływ na środowisko i porównać różne metody recyklingu.

Monitorowanie globalnych statystyk dotyczących recyklingu butelek PET, takich jak ilość zebranych butelek czy udział recyklingu w poszczególnych krajach, jest istotne. rPET to recyklingowany polietylen tereftalanu, który jest przetwarzany na nowe wyroby [5].

DOSTĘPNE FILAMENTY DO DRUKU 3D

Przy wyborze odpowiedniego filamentu do druku 3D uwzględnia się wiele czynników, m.in. właściwości mechaniczne, chemiczne, łatwość druku oraz dostępność różnych kolorów. Właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość, elastyczność czy twardość, są istotne dla funkcjonalności i trwałości wydruku, dostosowanej do wymagań projektu. Właściwości chemiczne, jak odporność na substancje czy wodoodporność, mogą być nieważne dla specjalistycznych zastosowań. Łatwość druku jest istotna, zwłaszcza dla początkujących użytkowników, dlatego często wybiera się filamenty kompatybilne z danym modelem drukarki. Dostępność różnych kolorów pozwala na dopasowanie wydruku do preferencji i potrzeb projektu. Najpopularniejsze filamenty i ich wyróżniające cechy przy wyborze to:

- PLA – niski koszt, łatwość druku, biodegradowalność [6].
- PETG – doskonałe właściwości mechaniczne, odporność na chemikalia, łatwość druku [7].
- ABS – dobre właściwości mechaniczne, odporność na wysokie temperatury i chemikalia, wymaga podgrzewanej platformy [8].
- TPU – elastyczność, odporność na oleje i rozpuszczalniki, trudności w druku [9].

Rzadziej wybierane materiały to: PCL, PC, PS, PEI, PEEK oraz różne rodzaje PE, takie jak LDPE i HDPE. Mają one różnorodne właściwości, co pozwala na drukowanie zaawansowanych i funkcjonalnych elementów, używanych w różnych dziedzinach życia [10].

FILAMENTY Z RECYKLINGU DO DRUKU 3D

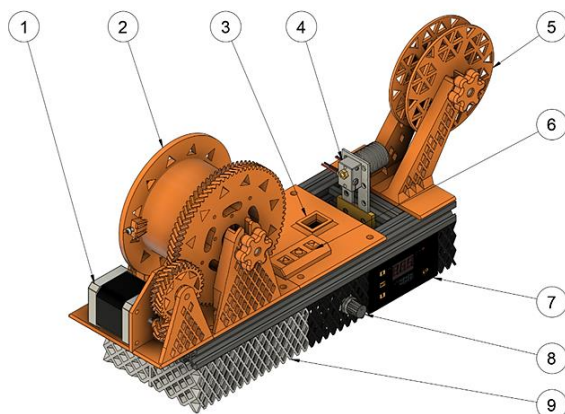
Co roku około 4% światowej produkcji ropy naftowej, co stanowi 1,3 mld baryłek, jest używane do produkcji pierwotnych tworzyw sztucznych [11]. Większość tych polimerów nie ulega degradacji i pozostaje w środowisku przez setki lat, co stanowi poważny problem zanieczyszczenia środowiska. Pomimo że aż 90% tworzyw sztucznych może być ponownie wykorzystane, obecnie tylko kilka procent jest poddawanych recyklingowi, przy czym aż 80% trafia na wysypiska. Największym wyzwaniem są odpady z HDPE, LDPE, PP i PVC, które są głównie składowane na wysypiskach i przyczyniają się do emisji gazów cieplarnianych [12].

Technologia druku 3D, początkowo wykorzystywana głównie do prototypowania i eksperymentów hobbystycznych, stopniowo ewoluowała, oferując coraz większe możliwości producentom zarówno mało-, jak i wielkoseryjnym. Odpady z druku 3D nie stanowią problemu ekologicznego, a sama technologia może być wykorzystywana do zarządzania rosnącą ilością odpadów poprodukcyjnych [13]. Przeszkodą w recyklingu materiałów polimerowych wykorzystywanych w druku 3D są aspekty logistyczne, takie jak zbieranie, transport i przetwarzanie odpadów, które mogą być skomplikowane i kosztowne. Analiza ekonomiczna nie zawsze wykazuje korzyści z recyklingu materiałów, ponieważ koszt produktu z recyklingu zależy od ceny pierwotnie wyprodukowanego filamentu na rynku [14].

Proces produkcji filamentu z recyklingowanego tworzywa rozpoczyna się od segregacji i mycia surowca, a następnie jego mielenia. W przypadku modyfikacji materiału wymagany jest dodatkowy etap. Istnieją innowacyjne podejścia do wykorzystania filamentu z recyklingu, takie jak Polyformer, który wykorzystuje butelki PET do produkcji filamentu 3D, co może być rozwiązaniem problemu odpadów polimerowych [15].

STANOWISKO PROTOTYPOWE

Projekt urządzenia do produkcji filamentu może być w większości wykonany metodą druku 3D – rys. 1. Silnik wyciągarki (1) odpowiada za ciągnięcie taśmy przez dyszę, zapewniając płynne i kontrolowane przemieszczanie filamentu. Szpula wyciągarki (2) wraz z przekładnią stabilnie mocuje filament i zapewnia odpowiednie przełożenie. Nadmuch (3) szybko chłodzi ukształtowany filament, co jest to ważne dla zachowania jego właściwości fizycznych. Ekstruder (4) kontroluje temperaturę i kształtuje surowiec, zapewniając stabilność procesu produkcyjnego. Szpula podajnika (5) równomiernie podaje surowiec. Konsola sterowania (6) umożliwia kontrolę nad prędkością wyciągarki.



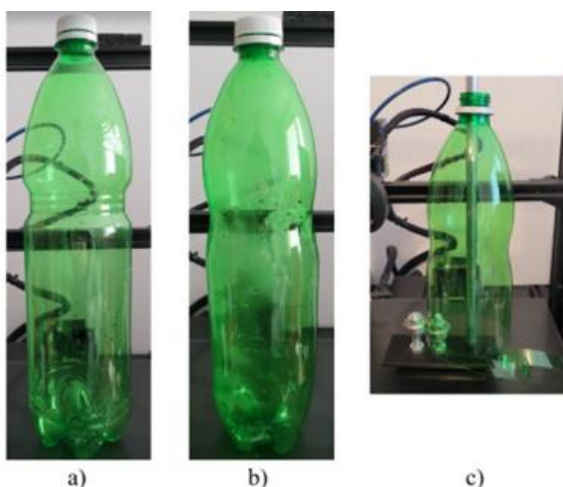
Rys. 1 Schemat zaprojektowanego prototypowego urządzenia do produkcji filamentu z butelek PET

Kontroler temperatury (7) monitoruje i reguluje temperaturę ekstrudera. Pokrętko sterowania prędkością wyciągarki (8) dostosowuje prędkość procesu do wymagań produkcyjnych. Obudowa (9) zapewnia ochronę dla podzespołów elektronicznych i bezpieczeństwo użytkownika.

EKSPERYMENTALNA PRODUKCJA FILAMENTU

Pierwszym etapem produkcji filamentu (rys. 2), jest przygotowanie wstęgi zgodnie z następującą procedurą:

- a) Usunięcie etykiety i resztek kleju z butelki.
- b) Obróbka termiczna za pomocą gorącego powietrza (np. opalarki) w celu wygładzenia powierzchni butelki i ujednocnienia jej struktury. Pod wpływem ciepła, podgrzewana butelka ulega zwiększonemu ciśnieniu atmosferycznemu, co sprawia, że jej kształt staje się bardziej obły i jednolity.
- c) Ostatnim krokiem jest odcięcie dna butelki i osuszenie jej wnętrza. Następnie należy dobrać odpowiednią szerokość cięcia wstęgi na podstawie grubości ścianek butelki.



Rys. 2 Pierwszy etap produkcji filamentu

Po przygotowaniu wstęgi, należy ją nawinąć na podajnik. Skonstruowana z dwóch skręconych ze sobą połówek, szpula podajnika umożliwia łatwe i sprawne zamocowanie wstęgi. Dzięki tej konstrukcji można łatwo wysunąć wstęgę, co pozwala na bezproblemowe podanie jej do ekstrudera bez przerywania pracy urządzenia. Następnie przygotowaną wstęgę należy przyciąć tak, aby można było przeciągnąć ją przez dyszę. Po uruchomieniu urządzenia i nagraniu go, za pomocą kombinerek należy przeciągnąć materiał przez dyszę, umożliwiając jego zamocowanie na szpuli wyciągarki. Gdy osiągnięta zostanie zadana temperatura, można włączyć wyciągarkę. Przy użyciu przycisków na konsoli sterującej można wybrać kierunek obrotu, zatrzymać proces lub zwolnić hamulec silnika. W trakcie pracy urządzenia należy dostosować prędkość procesu za pomocą potencjometru, aby umożliwić odpowiednie uformowanie się filamentu.

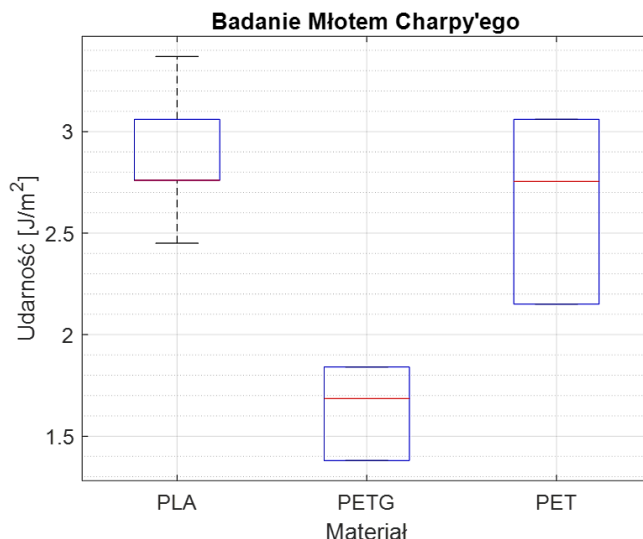
BADANIE WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH OTRZYMANEGO FILAMENTU

Metoda Charpy'ego to znormalizowany sposób pomiaru energii potrzebnej do spowodowania pęknięcia próbki materiału. Próby udarnościowe zostały przeprowadzone w oparciu o normę PN-EN ISO 179-2 2020-12, określającą procedury badania wytrzymałości udarowej metodą Charpy'ego (rys. 3, 4). Ta norma szczegółowo określa wymagania dotyczące próbek testowych, w tym ich rozmiary i opcjonalne nacięcia karbów. W przypadku druku 3D, gdzie materiał i jego struktura mogą być różnorodne, istotne jest zachowanie precyzji i dokładności przy przygotowywaniu próbek, dostosowując je do wymogów normy ISO 179. Wdrożenie tej normy dało pewność, że badania są prowadzone zgodnie z uznawanymi standardami, co umożliwia porównywanie wyników i zapewnia wiarygodność danych. Wykorzystanie karbu w testach udarności ma znaczenie, ponieważ umożliwiając tworzenie uszkodzeń sprzyjających powstawaniu kruchej pęknięcia w materiałach ciągliwych, gdzie "kruche pęknięcie" odnosi się do uszkodzenia występującego bez wyraźnych oznak odkształcenia plastycznego materiału.



Rys. 3 Przykładowe badane próbki:

a) Próbki PETG b) Próbki PLA oraz wypełnienie c) Próbki PET



Rys. 4 Udarność próbek wykonanych z PLA, PETG i badanego materiału PET

Na podstawie wyników badań stwierdzono, że PLA charakteryzuje się najwyższą udarnością spośród testowanych materiałów, podczas gdy PET z butelek wypada nieco gorzej, różnica wynosi niecałe 8%. Natomiast PETG wykazał najniższą udarność, o około 40% niższą od pozostałych materiałów (tabela 1).

Tabela 1 Wyniki pomiaru udarności próbek wydrukowany z materiału PLA, PETG i badanego materiału PET

	Rodzaj materiału		
	PLA	PETG	PET
Nr próbki	Udarność [J/m ²]	Udarność [J/m ²]	Udarność [J/m ²]
1	3.06	1.84	2.15
2	2.76	1.38	3.06
3	2.76	1.84	3.06
4	2.45	1.38	3.06
5	2.76	1.84	2.15
6	3.37	1.53	2.45
Średnia wartość siły zrywającej	2.86	1.63	2.66
Odchylenie standardowe wartości siły zrywającej	0.32	0.23	0.46

Ponieważ próbki zostały wydrukowane z wypełnieniem na poziomie 30%, możliwe jest porównanie tylko dla tych próbek, które zostały opisane. Próbki nie spełniają wymogów normy, w aspekcie zakładającym jednolite pole przekroju, co utrudnia określenie dokładnego pola przekroju biorącego udział w badaniu udarności. Wyniki pozwalają sądzić, że filament z upcyklingowanego PET posiada o 40% wyższą udarność niż komercyjny filament PETG.

Planowane są dalsze badania na udarności dla próbek o pełnym wypełnieniu na młocie Charpy'ego z większą energią. Stanowisko, które zostało wykorzystane do

badania posiada zbyt małą energię uderzenia by rozrzut wyników był zadowalający.

PERSPEKTYWY NA PRZYSZŁOŚĆ I ZASTOSOWANIE

Badanie wytrzymałości filamentu wykazało, że jego parametry drukowania są zadowalające, zapewniając wysoką lub porównywalną z powszechnie stosowanymi materiałami odporność na uderzenia, co umożliwia szerokie zastosowanie w warunkach domowych. Ponadto, wysoka odporność chemiczna PET sprawia, że jest odpowiedni do różnych zastosowań.

Wykorzystanie butelek PET w produkcji filamentu wpisuje się w ideę upcyclingu, przyczyniając się do redukcji odpadów tworzyw sztucznych. Jednak proces ten jest czasochłonny i wymaga starannego przygotowania surowca.

Kolejnym krokiem jest optymalizacja procesu produkcji filamentu z butelek PET, aby uzyskać surowiec o powtarzalnych parametrach. Koncentracja na butelkach od jednego producenta mogłaby wyeliminować konieczność dostosowywania parametrów obróbki i druku. Normalizacja butelek ułatwiłaby ich przetwarzanie. Ważne jest także zbadanie stanowiska do małoseryjnej produkcji filamentu z butelek PET pod kątem zanieczyszczeń wynikających z obróbki termicznej.

PODSUMOWANIE

Tworzywa sztuczne stanowią problem zanieczyszczenia środowiska, ale dzięki innowacyjnym rozwiązaniom, takim jak druk 3D, mogą być wykorzystywane ponownie. Druk 3D umożliwia przekształcanie odpadów plastikowych w nowe przedmioty w warunkach domowych, co sprzyja oszczędności kosztów i energii oraz promuje gospodarkę o obiegu zamkniętym. To narzędzie również w walce ze współczesnymi wyzwaniami.

Badania wytrzymałości PET wykazują obiecujące możliwości rozwoju tej technologii, choć wartości parametrów mogą się różnić w zależności od źródła butelek. Dalsze badania powinny skupić się na optymalizacji procesu oraz przeprowadzeniu większej liczby testów, aby lepiej zrozumieć wpływ parametrów na końcowy produkt. Wykorzystanie PET w produkcji filamentu promuje ideę upcyclingu i zrównoważonego rozwoju, wspierając świadomość ekologiczną w technologii.

LITERATURA

- [1] Papanek V., Fuller R.F. Design for the real world, 1972.
- [2] Jawahir I.S., Bradley R.: Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing, Procedia CIRP, vol. 40, pp. 103-108, 2016, doi: 10.1016/j.procir. [2016.01.067].
- [3] Komunikat komisji do Parlamentu Europejskiego: Komunikat komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, europejskiego komitetu Ekonomiczno-Społecznego i komitetu regionów Zamknięcie obiegu – plan działania UE dotyczący gospodarki o obiegu zamkniętym.
- [4] Damayanti and Wu H.S. Strategic Possibility Routes of Recycled PET, Polymers (Basel), vol. 13, no. 9, p. 1475, May (2021), doi: 10.3390/polym13091475.

- [5] Cusano I., Campagnolo L., Aurilia M., Costanzo S., Grizzuti N. Rheology of Recycled PET, *Materials*, vol. 16, no. 9, p. 3358, Apr. (2023), doi: 10.3390/ma16093358.
- [6] Prajapati A.R., Dave H.K., Rajpurohit S.R. : Investigation on Quality of In-house Fabricated PLA Filament for 3D Printing Application, (2020), pp. 277-285. doi: 10.1007/978-981-32-9433-2_24.
- [7] Exconde M. K. J. E, Co J. A. A., Manapat J. Z., Magdaluyo E. R. Materials Selection of 3D Printing Filament and Utilization of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in a Redesigned Breadboard, *Procedia CIRP*, vol. 84, pp. 28-32, (2019), doi: 10.1016/j.procir.2019.04.337.
- [8] Samykano M., Selvamani S.K., Kadirgama K., Ngui W.K., Kanagaraj G., Sudhakar K. Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, no. 9-12, pp. 2779-2796, Jun. (2019), doi: 10.1007/s00170-019-03313-0.
- [9] De León A.S., Domínguez-Calvo A., Molina S.I. Materials with enhanced adhesive properties based on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)/thermoplastic polyurethane (TPU) blends for fused filament fabrication (FFF), *Mater Des*, vol. 182, p. 108044, Nov. (2019), doi: 10.1016/j.matdes.2019.108044.
- [10] Jiang Z., Diggle B., Tan M.L., Viktorova J., Bennett C.W., Connal L.A. Extrusion 3D Printing of Polymeric Materials with Advanced Properties, *Advanced Science*, vol. 7, no. 17, Sep. (2020), doi: 10.1002/advs.202001379.
- [11] Singh N., Hui D., Singh R., Ahuja I.P.S., Feo L., Fraternali F. Recycling of plastic solid waste: A state of art review and future applications, *Compos B Eng*, vol. 115, pp. 409-422, Apr. (2017), doi: 10.1016/j.compositesb.2016.09.013.
- [12] Aboulkas A., El harfi K., El Bouadili A. Thermal degradation behaviors of polyethylene and polypropylene. Part I: Pyrolysis kinetics and mechanisms, *Energy Convers Manag*, vol. 51, no. 7, pp. 1363-1369, Jul. (2010), doi: 10.1016/j.enconman.2009.12.017.
- [13] Cruz Sanchez F.A., Boudaoud H., Hoppe S., Camargo M. Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues, *Addit Manuf*, vol. 17, pp. 87-105, Oct. (2017), doi: 10.1016/j.addma.2017.05.013.
- [14] Hopewell J., Dvorak R., Kosior E. Plastics recycling: challenges and opportunities, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 364, no. 1526, pp. 2115-2126, Jul. (2009), doi: 10.1098/rstb.2008.0311.
- [15] <https://www.reiten.design/polyformer>, "Polyformer."

A perspective on the use of small batch machines for production engineering filament and waste management

Abstract: In recent years, the recycling of plastics has become a key environmental challenge. Polymeric materials are widely used, which generates the problem of persistent waste after their end-of-life. The possibility of reusing these materials enables efficient waste disposal. The 3D printing market is growing rapidly and printing filaments can be produced from recycled materials. This paper reviews the literature on the production of filaments from recycled polymers as an alternative to the current approach to central selective collection of plastics. An experimental rig for recycling thermoplastic PET material and its mechanical properties are presented. In addition, commercially available equipment for the production of filaments from waste plastics is analysed.

Keywords: Plastic recycling, environmental protection, waste management, polymer materials, 3D printing filaments, PET recycling, mechanical properties, filament production, alternative approach, selective collection, thermoplastics, waste disposal, 3D printing, upcycling, waste management

Jędrzej Blaut

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska
e-mail: blaut@agh.edu.pl

Wiktor Leszczyk

Polska
e-mail: leszczykw@gmail.com

Rafał Rumin

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
Wydział Zarządzania
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska
e-mail: rumin@agh.edu.pl