



WPŁYW SPOSOBU PRZECHOWYWANIA FILAMENTU ABS, PLA, PET-G NA WŁAŚCIWOŚCI WYROBÓW WYTWARZANYCH PRZYROSTOWO METODĄ FDM

Błażej Góralski, Joanna Siergiej

Poznan University of Technology, Poland

Corresponding author:

Błażej Góralski

Poznan University of Technology

Faculty of Mechanical Engineering

Piotrowo 3, 60-138 Poznań, Poland

phone: (+48) 786 101 114

e-mail: Blazej.Goralski@gmail.com

THE INFLUENCE OF FILAMENT STORAGE CONDITIONS ON THE PROPERTIES OF ADDITIVELY MANUFACTURED PRODUCTS USING THE FDM METHOD

ABSTRACT

The subject of the article is the influence of filament moisture on the quality of products manufactured using the additive method using the Fused Deposition Modelling (FDM) method. Three types of thermoplastic polymers were tested: ABS, PLA and PET-G. The polymers were stored in environments with different humidity.

The moisture content of the filament was determined as the water content in the material expressed as a percentage by weight. To obtain the expected humidity of the samples, they were conditioned for 7 days in tightly closed containers with constant humidity of 40%, 60% and 80%.

After the sample conditioning process was completed, they were removed from the container and subjected to further tests. The influence of filament humidity on selected properties of manufactured products is presented, such as: surface quality of the obtained samples, tensile strength and dimensional repeatability.

To sum up, the method of storing the filament affects the moisture content of the filament. The humidity of the filament, in turn, affects the quality of products manufactured using the FDM method, including: on: mechanical properties, dimensional stability, surface appearance. Therefore, it is important in what conditions the filament is stored before the production process begins.

KEYWORDS

FDM, additive manufacturing, humidity, filament, moisture, ABS, PLA, PET-G, conditions, quality, tensile strength.

1. Wprowadzenie

Technologie przyrostowe, to przyszłość wielu gałęzi przemysłu. Świadczy o tym nie tylko coroczny wzrost sprzedaży maszyn oferujących technologie druku, ale także innowacyjne podejście, które pozwala unikać błędów już w fazie prototypowania produktów oraz optymalizować procesy produkcyjne pod kątem oszczędności materiałów. Spośród istniejących technologii przyrostowych najczęściej stosowaną oraz najtańszą jest metoda FDM (*Fused Deposition Modelling*) [4].

W technologii FDM materiałem modelującym jest tworzywo termoplastyczne, zdolne do przechodzenia pod wpływem ciepła ze stanu stałego w stan lekko płynny oraz odwrotnie. Najczęściej jest ono stosowane w formie cienkiego włókna (średnica 1–3 mm) nazywanego filamentem [5]. Proces drukowania jest wynikiem topienia termoplastycznego materiału polimerowego doprowadzanego z ekstrudera do głowicy drukarskiej. W gło-

wicy jest on podgrzewany do temperatury 190–280°C, a następnie w półpłynnej formie rozprowadzany przez dyszę głowicy, warstwa po warstwie, tworząc drukowany obiekt 3D zgodnie z geometrią zawartą w pliku CAD który jest konwertowany na kod drukarki przy użyciu dedykowanego programu tzw. Slicera.

Do podstawowych i najczęściej wykorzystywanych w FDM materiałów należą: ABS (akrylonitryl-butadien-styren), PLA (poli-kwas mlekowy), poliamid (PA), poliwęglan (PC), politereftalan etylenu (PET), polieteramid (PEI), polipropylen (PP) [4]. Wykorzystywane są również materiały kompozytowe jak np. Laywood-3D, będący mieszanką materiału polimerowego oraz mączki drzewnej, czy mieszanka poliaktydu i proszku drzewnego (WPC) [7].

Ze względu na to, że stosowane w FDM polimery nie są obojętne na zmienne warunki środowiskowe, bardzo ważne jest poznanie ich wpływu na przebieg procesu wytwarzania [4].

2. Przedstawienie problemu

Parametr wilgotności w materiałach stosowanych w wytwarzaniu metodą FDM jest często pomijany ze względu na brak jasnych wskazań producentów odnośnie warunków przechowywania i użytkowania materiałów polimerowych. Nie jest znany zakres naturalnej wilgotności filamentu w zależności od zmieniających się warunków otoczenia. Nie wiadomo również, jak w tym zakresie zmieniają się właściwości filamentu i właściwości wydruku.

Przenikanie cząsteczek wody z otoczenia do tworzywa sztucznego jest spowodowane występowaniem dwóch procesów: absorpcji substancji z otoczenia oraz jej dyfuzji w materiale [1, 2, 10].

Absorpcja wilgotności jest uzależniona od właściwości i struktury materiałów [3]. Poszczególne polimery charakteryzują się odmiennymi skłonnościami do pochłaniania i zatrzymywania wody z otoczenia. Jest to zjawisko zwane higroskopią. W materiałach niehigroskopijnych (np. PP, PS) wilgoć osadza się jedynie na ich zewnętrznej powierzchni. Natomiast w tworzywach higroskopijnych (np. ABS, PLA, PA) cząsteczki wody absorbowane są w głąb materiału [9]. Właściwości absorpcyjne materiału uzależnione są między innymi od dostępnej wolnej objętości pomiędzy łańcuchami polimerowymi. Absorpcja jest procesem odwracalnym poprzez jego przeciwieństwo, czyli desorpcję [2].

Celem badań prezentowanych w artykule jest określenie wpływu wilgotności filamentu na jakość wyrobów wytwarzanych przyrostowo metodą FDM. Badano trzy rodzaje polimerów termoplastycznych: ABS, PLA oraz PET-G przechowując je w otoczeniu o różnej wilgotności.

3. Metodologia badań

3.1. Przygotowanie i kondycjonowanie próbek

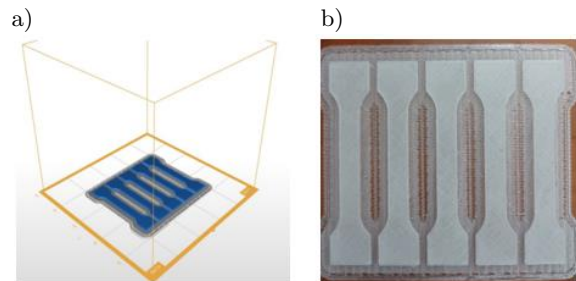
Do wytworzenia próbek przygotowano odpowiednią ilość filamentu z trzech rodzajów polimerów ABS, PLA oraz PET-G:

- do badań wilgotności filament pocięto na odcinki o długości 10 mm i łącznej masie jednej próbki 11 gram,
- do wytworzenia próbek metodą FDM przygotowano filament o długości 12 m dla wytworzenia jednocześnie 5 sztuk próbek.

Wilgotność filamentu określano jako zawartość wody w materiale wyrażoną w procentach wagowych. Aby uzyskać oczekiwaną wilgotność próbek, kondycjonowano je 7 dni w szczelnie zamkniętych pojemnikach o stałej wilgotności 40%, 60% oraz 80%. Dla każdego zakresu określono wilgotność filamentu jako średnią z 10 próbek. Po zakończeniu procesu kondycjonowania filamentu dla każdej wilgotności wytworzono próbki na drukarce 3D. Po wytworzeniu poddano je dalszym badaniom. Dla każdego zakresu badawczego otrzymano średnią liczoną z 5 próbek dla tej samej grupy.

3.2. Wytwarzanie próbek metodą FDM

Przed rozpoczęciem wytwarzania próbek na drukarce 3D, aby uniknąć problemów z uzyskaniem prawidłowej pierwszej warstwy wydruku i prawidłowej przyczepności wydruku do stołu drukarki zastosowano raft, który był dodatkową warstwą bezpośrednio przylegającą do stołu drukarki. Zamodelowane próbki wraz z dodatkową warstwą – raftem, przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Próbkę do badań, a) zaprojektowane próbki do wydruku w programie graficznym, b) wytworzone próbki z tworzywa ABS na drukarce Zortrax M200.

Próbki wytworzono na drukarce Zortrax M200 Plus z zamkniętą komorą. Dla każdego materiału polimerowego wytworzono jednocześnie 5 próbek, stosując następujące parametry druku:

- grubość warstwy: 0,19 mm,
- stopień wypełnienia: 100%,
- wzór wypełnienia: kratka naprzemienne warstwy pod kątem 45°,
- orientacja próbek na stole: pozioma,
- dysza: 0,4 mm,

Właściwości badanych materiałów przedstawia tabela 1.

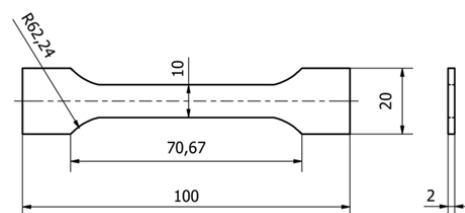
Tabela 1

Parametry temperaturowe podczas wytwarzania próbek.

Materiał	ABS	PET-G	PLA
Temperatura dyszy [°C]	275	240	210
Temperatura stołu [°C]	80	30	30
Czas drukowania [min]	135	126	124

3.3. Badanie wytrzymałości na rozciąganie

Wytworzone na drukarce próbki zostały poddane badaniom wytrzymałościowym przy użyciu maszyny SUNPOC WDW-5D-HS. Drukowane próbki miały kształt wiosełek o długości całkowitej 100 mm, szerokości 10 mm oraz grubości 2 mm w części pomiarowej. Wymiary i kształt badanych próbek przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Geometria próbki do badań [8].

Wymiary próbki wprowadzono do oprogramowania komputera połączonego z maszyną wytrzymałościową. Próbkę umieszczono w szczękach maszyny z momentem 6 Nm, następnie poddano statycznej próbie rozciągania zgodnie z normą PN-EN ISO 527-1. Maszyna wytrzymałościowa rozciągała je ze stałą prędkością 20 mm/min do momentu, w którym próbka uległa zniszczeniu lub przechodziła w stan plastyczności rejestrując maksymalną siłę rozciągającą.

3.4. Określenie dokładności wymiarowej próbek oraz badanie mikroskopowe

Do określenia dokładności wymiarowej pola przekroju poprzecznego wykonano pomiary części roboczej próbek przy użyciu suwmiarki Mitutoyo Absolute Digimatic 150mm. Uzyskane wyniki porównano. Pod mikroskopem INSIZE ISM-PM200SA wykonano analizę jakościową wyglądu powierzchni wytworzonych próbek.

3.5. Badanie wilgotności filamentu

Ilość wody zaabsorbowanej przez badane materiały polimerowe wyznaczono stosując metodę wagową pomiaru wilgotności. Pomiary polegały na pomiarze wagi zawilgoconych próbek, suszeniu i ponownym ważeniu w stanie suchym. Poziom wilgotności wyrażony był procentowo jako stosunek masy pochłoniętej przez materiał wilgoci do masy tego materiału po wysuszeniu wg wzoru (1):

$$W_w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

gdzie W_w – wilgotność [% wag.], m_1 – masa próbki zawilgoconej [g], m_2 – masa próbki po procesie suszenia [g] [6].

Materiał suszono w wago-suszarce RADWAG MA50/1.R. w cyklu schodkowym: 2,5 minuty suszenie w temperaturze 60°C, następnie suszenie w temperaturze 80°C do momentu całkowitego wysuszenia (braku zmiany masy próbki w czasie).

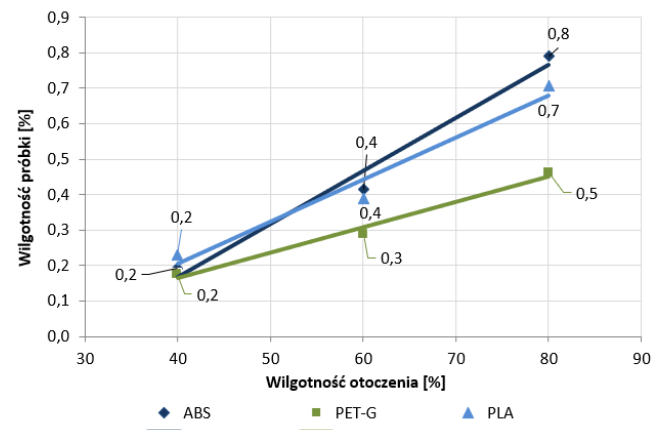
4. Wyniki badań i wybrane właściwości wytworzonych wyrobów

4.1. Zmiana wilgotności przechowywanych filamentów

Badane filamety, z materiałów ABS, PLA i PET-G, po wyjściu z opakowania producenta posiadały wilgotność 0,2%. Następnie umieszczono je w trzech pojemnikach o różnych wilgotnościach otoczenia: 40%, 60%, 80% i przechowywano przez okres 7 dni. Po tym okresie badano ich wilgotność. Najwyższe wartości wilgotności odnotowano dla: ABS – 0,79%, PLA – 0,70%, PET-G – 0,46%, wyniki przedstawiono na rys. 3.

Różnice w wilgotności wynikają z odmiennych właściwości higroskopijnych tworzyw. Materiał ABS jest najbardziej wrażliwy na zmiany warunków otoczenia, na co ma wpływ m.in.: amorficzna budowa polimeru, dzięki której procesy dyfuzji przebiegają intensywniej [9].

Odznaczył się on największą zmianą zawartości wilgoci podczas kondycjonowania próbek w badanym zakresie wilgotności otoczenia i wyniosła 0,6%.

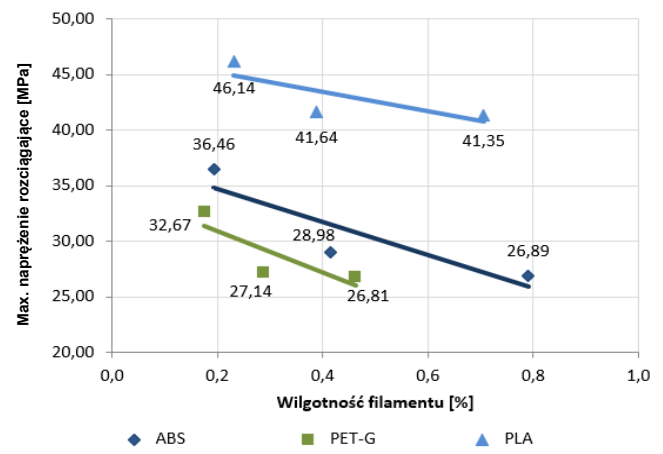


Rys. 3. Średnia wilgotność filamentów przechowywanych w różnej wilgotności otoczenia, po okresie 7 dni.

Dla polimeru PLA zmiana zawartości wody w filamencie dla badanego zakresu wilgotności otoczenia wynosiła 0,48%, a dla PET-G 0,29%.

4.2. Właściwości wytrzymałościowe wytworzonych wyrobów z filamentu o różnej wilgotności

Po wytworzeniu próbek przeprowadzono badania wytrzymałościowe na rozciąganie na maszynie SUN-POC WDW-5D-HS. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wykres zmienności wytrzymałości na rozciąganie badanych próbek w zależności od wilgotności filamentu.

Dla tworzywa ABS przy wzroście wilgotności filamentu odnotowano spadek wytrzymałości na rozciąganie. Przy wilgotności 0,2%, wytrzymałość na rozciąganie próbki wynosiła 36,46 MPa. Podwyższenie zawartości wilgotności do 0,4% spowodowało dalsze obniżenie wytrzymałości do 28,98 MPa. Przy wilgotności 0,8% wytrzymałość na rozciąganie uzyskała najmniejszą wartość 26,89 MPa.

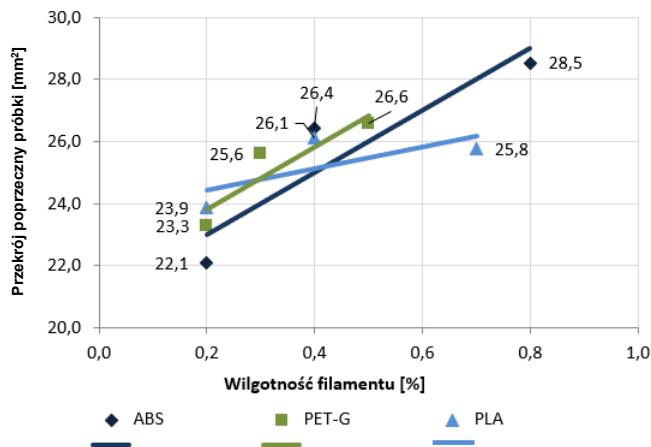
Dla próbek z PET-G przy zmianie wilgotności filamentu z 0,2% do 0,3% zaobserwowano spadek wytrzymałości z 32,66 MPa do 27,14 MPa. Przy wilgotności 0,5% wytrzymałość obniżyła się nieznacznie do 26,81 MPa.

Materiał PLA spośród badanych uzyskał największą wytrzymałość w badanym zakresie wilgotności. Dla wilgotności od 0,2% do 0,4% wytrzymałość wynosiła odpowiednio 46,14 MPa oraz 41,64 MPa. Przy wilgotności filamentu 0,7% wytrzymałość spadła nieznacznie do 41,35 MPa.

4.3. Wpływ wilgotności na pole przekroju poprzecznego wytworzonych próbek

Próbki wytworzono na podstawie wcześniej zaprojektowanego modelu zgodnie z rysunkiem 2. Nominalna powierzchnia przekroju poprzecznego wytworzonych próbek wynosiła 20 mm².

Wpływ wilgotności na pole przekroju poprzecznego wytworzonych próbek przedstawia rysunek 5 oraz tabela 2.



Rys. 5. Wykres zmienności przekroju poprzecznego próbek w zależności od wilgotności filamentu.

Spośród badanych materiałów ABS wykazał największe zmiany przekroju poprzecznego. Dla wilgotności filamentu 0,2% wymiar pola przekroju wynosił: 22,08 mm², dla 0,4% = 26,69 mm², natomiast dla 0,8% = 28,54 mm².

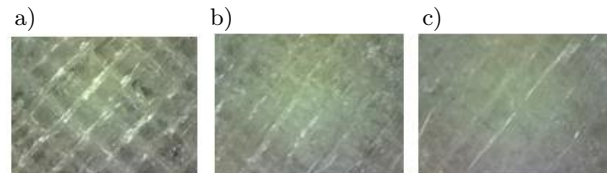
Dla PET-G i wilgotności filamentu 0,2% pole przekroju wynosiło 23,3 mm², dla wilgotności 0,3% = 25,6 mm², dla wilgotności 0,5% = 26,6 mm²

Zmiana pola przekroju próbki z PLA w zakresie zmian wilgotności filamentu jest niemonotoniczna. W zakresie od 0,2% do 0,4% pole przekroju poprzecznego zwiększyło się z 23,9 mm² do 26,1 mm². Natomiast

w zakresie wilgotności od 0,4% do 0,7% zmniejszyło się do wartości 25,8 mm².

4.4. Badania mikroskopowe powierzchni wytworzonych próbek

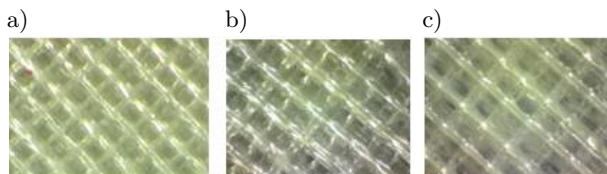
Na rysunkach 6, 7 i 8 przedstawiono powierzchnie badanych próbek. Dla próbek z ABS zaobserwowano, że wraz ze wzrostem wilgotności filamentu obniża się jakość wytwarzanych próbek, przedstawiono to na rys. 6.



Rys. 6. Zmiany struktury wytwarzanych podczas wytwarzania próbek ABS w zależności od wilgotności filamentu (powiększenie 240×), próbka o zawartości wilgoci: a) 0,2%, b) 0,4%, c) 0,8%.

Przy wilgotności filamentu 0,2%, wyraźnie jest widoczna struktura i kształt wypełnienia próbki (warstwy nanoszonego materiału w kształcie kratki pod kątem 45°). Dla wilgotności 0,4% zaobserwowano brak wyraźnego wzoru nakładanych warstw i ścieżek. Przy wilgotności 0,8% wystąpił całkowity brak wzoru wypełnienia. Powierzchnia była jednolita i płaska, ścieżki nanoszonego materiału nie były widoczne. Wraz ze wzrostem zawilgocenia filamentu struktura nakładanych ścieżek i warstw była niezorganizowana, trudno było rozpoznać kierunek układania ścieżek. Ta nieregularna powierzchnia powstała prawdopodobnie w wyniku zbyt wysokiego stężenia substancji lotnych (par wody) próbujących wydostać się z mokrego filamentu podczas wytwarzania [4].

Przy wytwarzaniu próbek z PLA, zmiany w strukturze nie były tak zauważalne jak dla ABS. Jakość i kształt powierzchni wytworzonych próbek dla badanych wilgotności filamentu przedstawiono na rys. 7. Brak jest istotnych różnic pomiędzy próbkami. Widoczna jest powtarzalność nanoszonych warstw materiału w zakresie badanej wilgotności.

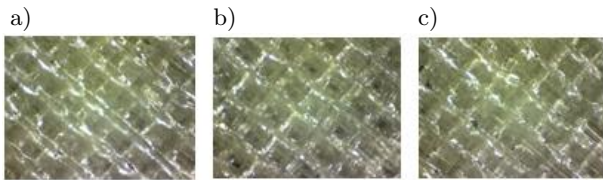


Rys. 7. Zmiany struktury wytwarzanych podczas wytwarzania próbek PLA w zależności od wilgotności filamentu (powiększenie 240×), próbka o zawartości wilgoci: a) 0,2%, b) 0,4%, c) 0,8%.

Tabela 2
Wpływ wilgotności filamentu na stabilność wymiarową wytwarzanych próbek.

Materiał	ABS		PET-G		PLA	
Zakres wilgotności filamentu [%]	0,2–0,4	0,4–0,8	0,2–0,3	0,3–0,5	0,2–0,4	0,4–0,7
Zmiana pola przekroju [mm ²]	+4,3	+2,1	+2,3	+1,0	+2,2	–0,3
Przyrost pola przekroju [%]	+19	+7	+9	+4	+9	–1

Dla materiału PET-G nie zaobserwowano widocznych zmian na powierzchni próbki (rys. 8). Widoczny był brak wpływu wilgoci na wizualną jakość badanego materiału, warstwy nanoszonego materiału były dobrze widoczne, zauważalna była przestrzenna trójwymiarowość kolejno nanoszonych warstw wypełnienia.



Rys. 8. Zmiany struktury wytwarzanych podczas wytwarzania próbek PET-G w zależności od wilgotności filamentu (powiększenie 240 \times), próbka o zawartości wilgoci: a) 0,2%, b) 0,4%, c) 0,8%.

5. Wnioski

Sposób przechowywania filamentu ma wpływ na ilość zawartej w nim wilgoci oraz na właściwości wytwarzanych niego wyrobów metodą FDM. W zakresie zmiany wilgotności otoczenia od 40% do 80% odnotowano zmianę wilgotności filamentów od 0,2% do:

- ABS, 0,8%,
- PET-G, 0,5%
- PLA, 0,7%,

Wraz ze wzrostem wilgotności filamentu, w zakresie jak powyżej, badane próbki wykazywały pogorszenie wytrzymałości na rozciąganie, odpowiednio o:

- ABS, 35%,
- PET-G, 21%.
- PLA, 12%,

Oznacza to, że najbardziej wrażliwy spośród badanych materiałów na zmiany wilgotności otoczenia był materiał ABS.

Wzrost wilgotności filamentu wpłynął również na zmianę przekroju poprzecznego badanych materiałów polimerowych, największą, o 28% wykazano dla ABS, najmniejszą dla PLA, 9%. Badania mikroskopowe wykazały, że wilgoć zawarta w materiale wprowadza zmiany w wyglądzie powierzchni wytworzonych próbek. Dla materiału ABS wraz ze wzrostem wilgotności znacząco pogorszyła się jakość powierzchni, dla pozostałych badanych materiałów PLA i PET-G, wpływ ten nie był tak zauważalny.

Podsumowując, sposób przechowywania filamentu ma wpływ na wilgotność filamentu. Wilgotność filamentu ma z kolei wpływ na jakość wyrobów wytwarzanych metodą FDM, m.in. na: właściwości mechaniczne, stabilność wymiarową, wygląd powierzchni. Dlatego ważne jest w jakich warunkach przechowywany jest filament przed rozpoczęciem procesu wytwarzania.

Literatura

- [1] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J., *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [2] Duncan B.C., Urquhart J., Roberts S., *NPL REPORT DEPC MPR 012, Review of Measurement and Modelling of Permeation and Diffusion in Polymers*, Crown, 2005.
- [3] Duncan B.C., Broughton W.R., *Measurement Good Practice Guide No. 102, Absorption and Diffusion of Moisture In polymeric Materials*, Crown, 2007
- [4] Góralski B., *Stabilność właściwości materiałów polimerowych stosowanych w metodzie Fused Deposition Modelling*, Inżynieria Zarządzania, Cyfryzacja produkcji, Aktualności Badawcze 3, 309–316, PWE Warszawa 2021.
- [5] Grimm T.A., *Fused deposition modelling: A technology evaluation*, Time Compression Technologies, 2, 1–6, 2003.
- [6] Instrukcja do wykonania ćwiczenia: „Oznaczanie chłonności w tworzywach sztucznych”, Instytut Inżynierii Materiałowej, Zakład Tworzyw Polimerowych, Zachodniopomorski Uniwersytetu Technologiczny w Szczecinie.
- [7] Kariz M., Sernek M., Kuzman M.K., *Effect of humidity on 3d-printed specimens from wood-pla filaments*, Wood Res., 63, 917–922, 2018.
- [8] PN-EN ISO 527:1998, *Plastics—Determination of Mechanical Properties under Static Tension – General Principles*, Polish Committee for Standardization: Warsaw, Poland, 1998.
- [9] Siemiński P., Budzik G., *Techniki przyrostowe: druk, drukarki 3D*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2015.
- [10] Skaza B., *Co to jest wilgotność?*, Chłodnictwo: Organ Naczelnej Organizacji Technicznej, 39, 1–2, 48–51, 2004.