

Michał UCZNIAK¹

Opiekun naukowy: Aleksandra JARCO²

DOKŁADNOŚĆ WYMIAROWO-KSZTAŁTOWA ELEMENTÓW WYKONANYCH TECHNOLOGIĄ FFF

Streszczenie: Artykuł przedstawia wyniki badań dokładności wymiarowo-kształtowej elementów wykonanych technologią FFF z kopolimeru akrylonitrylo-butadieno-styrenowego (ABS), które wydrukowano na trzech różnych urządzeniach. Dwa z nich pracują w układzie kartezjańskim kontrolującym ruchy stołu roboczego oraz ekstrudera, jedno w układzie typu Delta. Ocenę dokładności wymiarowo-kształtowej przeprowadzono porównując model CAD z modelem 3D wydrukowanych elementów otrzymanym w procesie skanowania 3D.

Słowa kluczowe: druk 3D, technologia FFF, ABS, skanowanie 3D, dokładność wymiarowo-kształtowa

DIMENSIONAL AND SHAPE ACCURACY OF ELEMENTS MADE WITH FFF TECHNOLOGY

Summary: The article presents results of testing the dimensional and shape accuracy of elements made using the FFF technology from acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS), which were printed on three different devices. Two of them use Cartesian kinematics to control the movement of the build platform and extruder, one uses Delta kinematics. The assessment of dimensional and shape accuracy was carried out by comparing the CAD model with the 3D model of printed elements obtained in the 3D scanning process.

Keywords: 3D printing, FFF technology, ABS, 3D scanning, dimensional and shape accuracy

1. Wprowadzenie

Istota druku 3D polega na warstwowej budowie elementu na podstawie modelu 3D zaprojektowanego w oprogramowaniu typu CAD, otrzymanego w procesie skanowania 3D lub tomografii komputerowej. Sposób łączenia poszczególnych warstw wynika z zastosowanego materiału (tworzywa termoplastycznego, żywicy światłoutwardzalnej czy materiałów proszkowych). Zgodnie z normą PN-EN ISO/ASTM 52900 wyróżnia się następujące technologie wytwarzania przyrostowego [1,2]:

¹ inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, uczniak.michal@outlook.com

² dr inż., Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ajarco@ubb.edu.pl

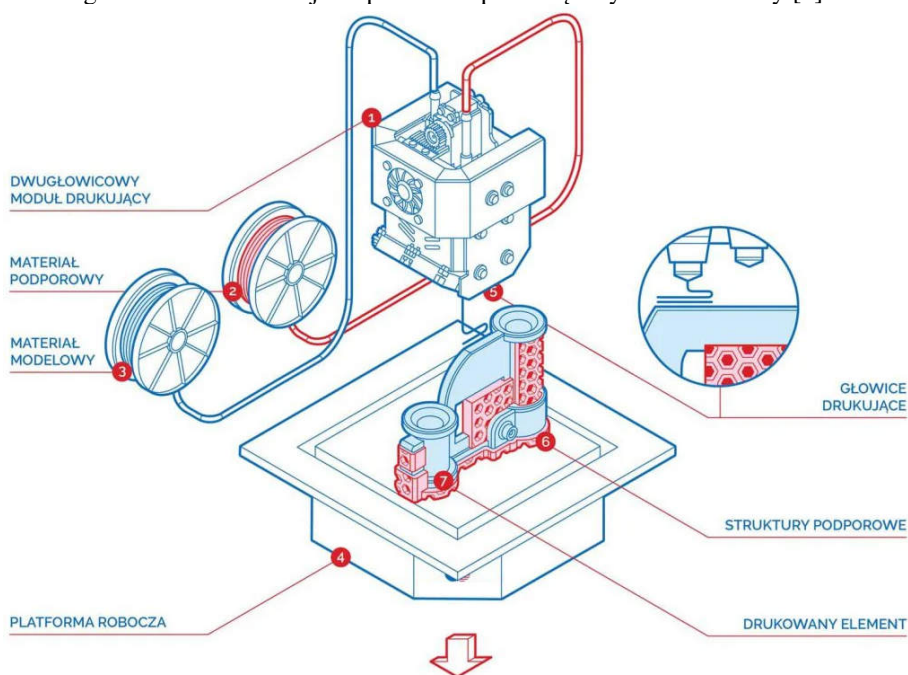
- fotopolimeryzacja objętościowa (VPP – VAT Photopolymerization), warstwowa fotopolimeryzacja realizowana w określonej objętości z zastosowaniem skoncentrowanej wiązki światła ultrafioletowego, stosowana np. w metodach SLA (z ang. *Stereolithography*) i DPL (z ang. *Digital Light Processing*),
- wytłaczanie warstwowe materiału (MEX – Material Extrusion), wytłaczanie (ekstruzja) materiału termoplastycznego do postaci włókna (nitki) układanego warstwowo zgodnie z zadaną numerycznie ścieżką, stosowane np. w metodach FDM (z ang. *Fused Deposition Modeling*)/FFF (z ang. *Fused Filament Fabrication*) i MEM (z ang. *Melted Extruded Modeling*),
- selektywne spajanie sproszkowanego materiału (PBF – Powder Bed Fusion), energia cieplna selektywnie stapia warstwę w obrębie objętości złoża proszkowego, stosowana np. w metodach SLS (z ang. *Selective Laser Sintering*), SLM (z ang. *Selective Laser Melting*) i DMLS (z ang. *Direct Metal Laser Sintering*),
- ukierunkowane stapianie dostarczanego materiału (DED – Directed Energy Deposition), skupiona energia stapia warstwowo materiał w trakcie jego osadzania (skoncentrowana energia cieplna emitowana jako wiązka lasera, wiązka elektronów lub łuk plazmowy), stosowana np. w metodach LAM-DED (z ang. *Laser Additive Manufacturing-Directed Energy Deposition*), WAAM (z ang. *Wire and Arc Additive Manufacturing*) i WLAM (z ang. *Wire Laser Additive Manufacturing*) [3],
- warstwowy nadruk płynnego materiału (MJT – Material Jetting Additive), płynny materiał jest nadrukowywany na podstawie kolejnych przekrojów modelu, zmiana stanu skupienia z płynnego na stały następuje najczęściej w wyniku zastygnięcia lub fotopolimeryzacji, stosowane np. w metodzie PolyJet [4],
- spajanie sproszkowanego materiału płynnym spoiwem (BJT – Binder Jetting), spajanie sproszkowanego materiału poprzez nadruk płynnego spoiwa (kleju) z głowicy drukującej na podstawie przekroju warstwowego modelu,
- laminacja warstwowa przekrojów (SHL – Sheet Lamination), wycinanie kolejnych przekrojów modelu z przyklejonych do siebie kolejno arkuszy materiału, stosowane np. w metodach LOM (z ang. *Laminated Object Manufacturing*), SDM (z ang. *Shape Deposition Manufacturing*) i UC (z ang. *Ultrasonic Consolidation*) [5].

Na przestrzeni ostatniej dekady ma miejsce bardzo dynamiczny rozwój technologii przyrostowych wynikający m.in. z faktu wygaśnięcia ochrony patentowej i przejścia chronionych rozwiązań technologicznych do domeny publicznej. Spowodowało to powstanie wielu inicjatyw typu *open-source* oraz wzrost dostępności drukarek 3D (nie tylko w zastosowaniach komercyjnych) i spadek ich cen [1]. Zmiana ta dotyczy przede wszystkim technologii FFF, która jest obecnie najpopularniejszą technologią druku 3D (na podstawie danych z 2021 roku 71% respondentów korzystało z tej metody we własnym zakresie [6]).

1.1. Technologia FFF

W tej metodzie druku 3D, termoplastyczny materiał jest wytłaczany przez podgrzewaną dyszę i osadzany warstwa po warstwie w stanie uplastycznionym na

stole roboczym (rys. 1). Trójwymiarowa geometria budowanego elementu, jak w przypadku, każdej metody druku 3D, przed przystąpieniem do procesu druku jest eksportowana do pliku STL i importowana do programu typu *Slicer*, gdzie ustawiane są parametry druku. Następnie model jest „cięty” na dwuwymiarowe warstwy o wybranej wysokości i generowany jest plik G-code, w którym jest zapisana ścieżka ruchu ekstrudera i stołu roboczego oraz parametry procesu. Po wykonaniu jednej warstwy ekstruder (lub stół roboczy) przesuwa się o zadaną grubość warstwy i nanosi się kolejną aż do zakończenia procesu druku. Gotowy element ściąga się ze stołu roboczego i usuwa konstrukcje wsporcze w sposób ręczny lub chemiczny [7]

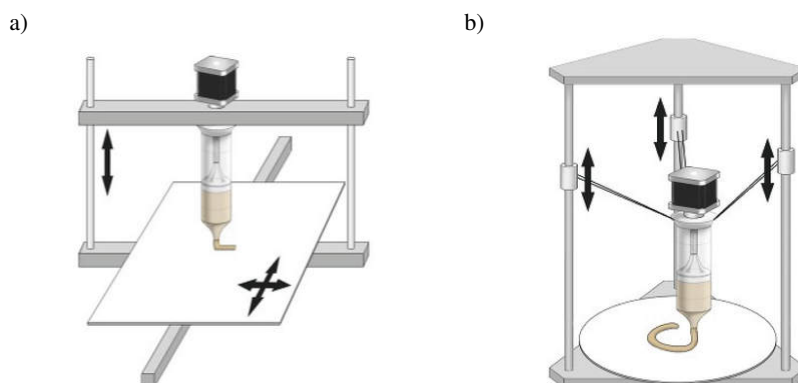


Rysunek 1. Schemat technologii FFF [8]

Drukarki 3D pracujące w technologii FFF mogą różnić się kinematyką kontrolującą ruchy stołu roboczego i ekstrudera w zależności od liczby stopni swobody. Do pierwszej, zarazem najpopularniejszej, grupy należą urządzenia z tradycyjną kinematyką kartezjańską (rys. 2a), gdzie prostokątny stół roboczy porusza się w osi Y (lub Z), natomiast ekstruder w osiach X i Z (lub X i Y). Druga grupa wykorzystuje schemat kinematyczny robotów z kolejnymi osiami obrotowymi (np. kinematyka SCARA). Ostatnia grupa oparta jest na kinematyce Delta (rys. 2b) w której okrągły stół roboczy jest nieruchomy, a głowicą poruszają trzy silniki w koordynatach wzdłużnych, poprzecznych i pionowych. Układ ten pozwala na drukowanie z dużymi prędkościami, co może wpływać na obniżenie dokładności wymiarowej. W drukarkach tego typu, ze względu na lekką konstrukcję hotendu (bloku grzejnego), stosowany jest ekstruder typu Bowden, który zamontowany jest na ramie drukarki [9,10].

Materiałami wykorzystywanymi do procesu druku 3D technologią FFF są polimery, które można podzielić na dwie kategorie – włókna czystego polimeru (np. PLA, ABS,

PP, PEEK) i włókna kompozytowe w których dodatki np. włókna węglowego, szklanego, grafenu czy Kevlaru miesza się z tworzywami termoplastycznymi [7,11].



Rysunek 2. Kinematyka a) kartezyjska oraz b) Delta drukarek 3D pracujących w technologii FFF [10]

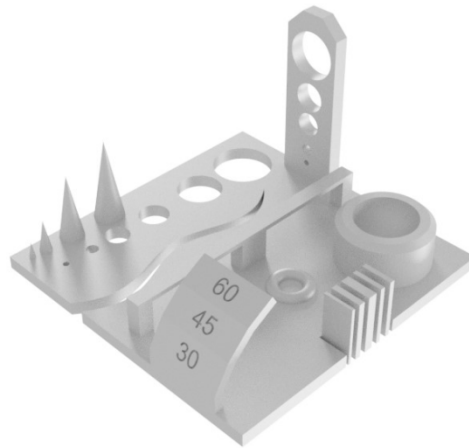
W przypadku większości profesjonalnych drukarek 3D ich producent narzuca użytkownikowi wykorzystywanie autoryzowanych filamentów. Z kolei w przypadku tańszych desktopowych rozwiązań można używać dowolnych dostępnych materiałów mając na uwadze m.in. dobór właściwego filamentu do materiału i średnicy dyszy czy wybór odpowiedniej temperatury ekstruzji, która nie spowoduje uszkodzenia podzespołów ekstrudera [12]. Dzięki szerokiej gamie materiałów i dostępności urządzeń pracujących w technologii FFF znajduje ona zastosowanie zarówno w przemyśle produkcyjnym, inżynierii biomedycznej, medycynie, edukacji jak również u prywatnych użytkowników zarówno do wykonywania prototypów oraz gotowych funkcjonalnych wyrobów [1,13].

Użytkownicy drukarek 3D pracujących w technologii FFF muszą również liczyć się z wadami tej metody do których można zaliczyć m.in. konieczność stosowania podpór dla skomplikowanych detali (co jest problematyczne zwłaszcza w przypadku stosowania drukarki z jedną dyszą), niską chropowatość powierzchni wynikającą z warstwowej budowy elementu, gorsze właściwości mechaniczne wydruków w porównaniu z innymi metodami druku 3D czy ograniczoną rozdzielczość wydruku wpływającą na zachowanie dokładności wymiarowej [14].

Celem badań zaprezentowanych w artykule była ocena dokładności wymiarowo-kształtowej elementów wydrukowanych technologią FFF na trzech różnych urządzeniach z materiału ABS, który charakteryzuje się dobrą wytrzymałością (42 MPa), twardością (70D w skali Shore'a) i udurowieniem (30 kJ/m²) [15]. Wydruki z tego materiału są odporne na podwyższone temperatury (do 60°C) i zarysowania. Wadą tego materiału jest jego skurcz, którego wartość może wynosić około 2% w zależności od wymiarów elementu i jakości filamentu [16].

2. Metodyka badań

Trójwymiarowy model badanego elementu (rys. 3) zaprojektowano w oprogramowaniu typu CAD (Autodesk Inventor 2022).



Rysunek 3. Model 3D badanego elementu

Następnie wyeksportowano go do formatu STL, który posłużył jako plik wejściowy w programach *3DGenceSlicer* i *PrusaSlicer* dedykowanych dla wybranych drukarek 3D do zadania parametrów druku (tab. 1).

Tabela 1. Parametry druku

Parametr druku	Drukarka 3D		
	Prusa i3 MK3S	TRILAB AzteQ Industrial	3DGence Industry F421
wypełnienie	15%	15%	20%
wzór wypełnienia	kratka	kratka	kratka
wysokość warstwy	0,30 mm	0,20 mm	0,30 mm
podpory	auto	auto	auto
grzana komora	nie	tak (80°C)	tak (80°C)
materiał	ABS		

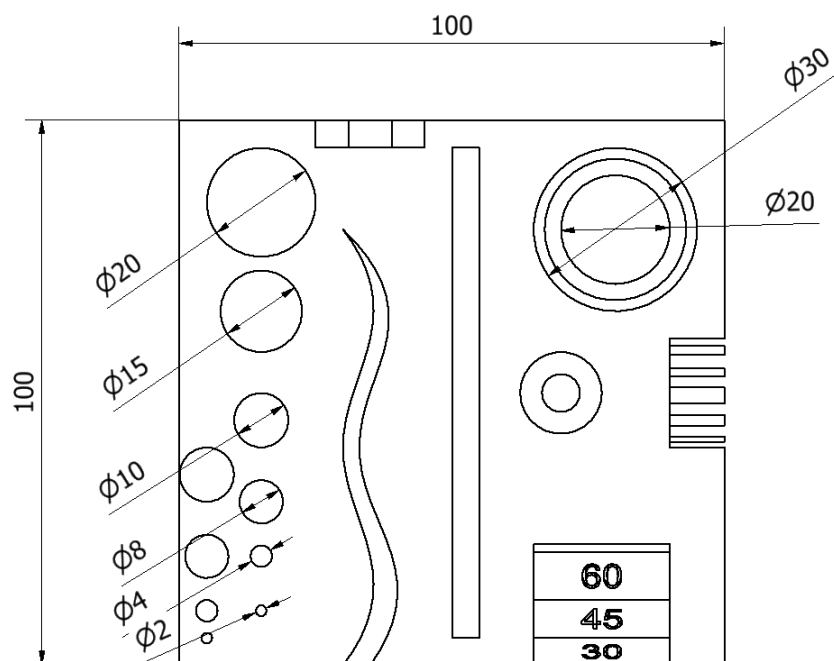
W badaniach wykorzystano trzy drukarki 3D pracujące w technologii FFF, pierwsza z nich to popularne desktopowe urządzenie Prusa i3 MK3S (kinematyka kartezjańska), kolejne dwie drukarki to stosowane w przemyśle TRILAB AzteQ Industrial (kinematyka Delta) oraz 3DGence Industry F421 (kinematyka

kartezjańska). Dla wszystkich urządzeń stosowano preparat Dimafix poprawiający adhezję pierwszej warstwy wydruku do stołu roboczego.

W celu uzyskania dokładnej reprezentacji fizycznego obiektu w postaci cyfrowej chmury punktów wydrukowane elementy skanowano urządzeniem Creaform HandyScan 307 Elite o rozdzielczości 0,025 mm. Następnie, przy użyciu oprogramowania do analizy danych (VXelements) porównano skany 3D z modelem CAD. Ze względu na skurcz materiału i zastosowaną wysokość warstwy przyjęto tolerancje wymiarów badanych elementów wynoszącą $\pm 0,5$ mm oraz kąta $\pm 2^\circ$.

3. Opis uzyskanych wyników

W pierwszej kolejności porównano wymiary nominalne z wartościami otrzymanymi w procesie skanowania 3D dla pierwszej grupy pomiarowej (rys. 4).



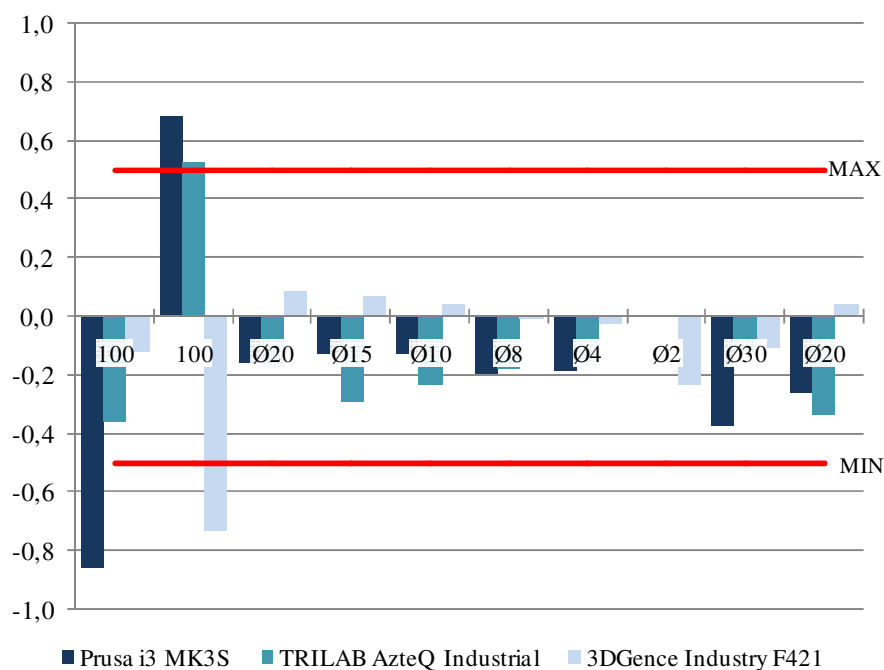
Rysunek 4. Wymiary nominalne badanego elementu dla pierwszej grupy pomiarowej

Zmierzono kolejno szerokość i długość podstawy modelu, sześć otworów drukowanych w płaszczyźnie poziomej o średnicy 2 – 20 mm, średnice walca i sfery (tab. 2). Kolorem czerwonym zaznaczono wymiary, które wykraczają poza przyjęty przedział tolerancji ($\pm 0,5$ mm). Wymiary, których nie zmierzono z powodu niedokładnie odwzorowanego kształtu oznaczono „-”.

Tabela 2. Porównanie wyników dla pierwszej grupy pomiarowej

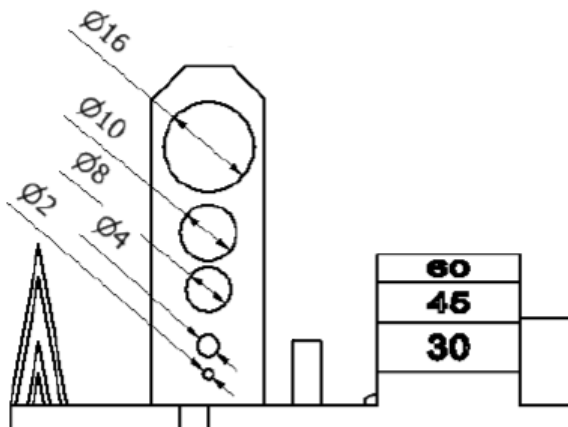
Drukarka 3D	Wymiar nominalny, mm									
	100	100	Ø20	Ø15	Ø10	Ø8	Ø4	Ø2	Ø30	Ø20
Prusa i3 MK3S	99,142	100,681	19,841	14,869	9,871	7,803	3,816	-	29,628	19,743
TRILAB AzteQ Industrial	99,642	100,525	19,826	14,706	9,767	7,820	3,845	-	29,869	19,663
3DGence Industry F421	99,880	99,266	20,083	15,068	10,039	7,990	3,973	1,765	29,894	20,041

Otrzymane różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych dla pierwszej grupy pomiarowej zestawiono na rysunku 5 z uwzględnieniem drukarek 3D na których wykonano poszczególne elementy i przyjętego przedziału tolerancji wymiarów ($\pm 0,5$ mm).



Rysunek 5. Różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych (wyrażone w milimetrach) dla pierwszej grupy pomiarowej

Druga grupa pomiarowa obejmowała porównanie wymiarów pięciu otworów drukowanych w pionie o średnicy 16 – 2 mm (rys. 6).



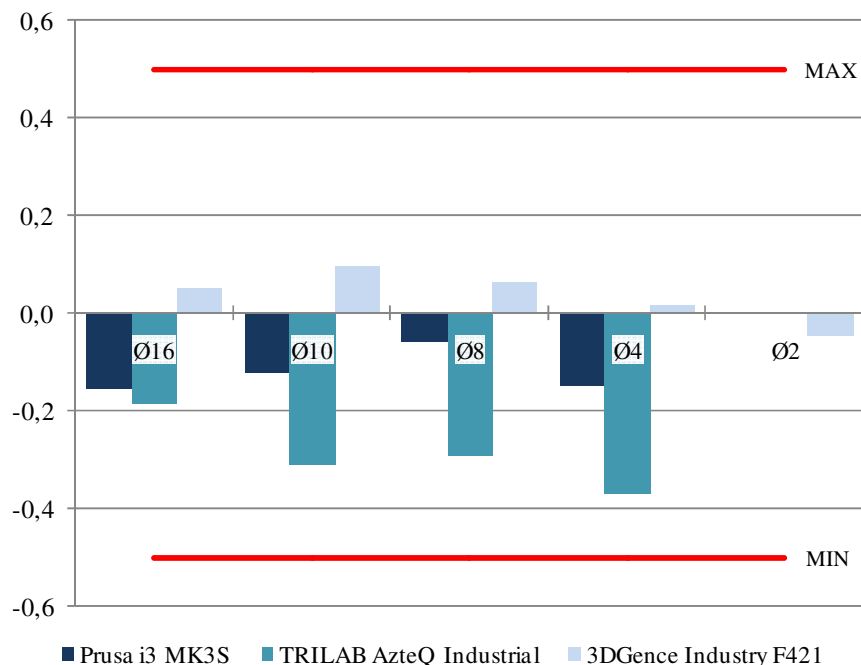
Rysunek 6. Wymiary nominalne badanego elementu dla drugiej grupy pomiarowej

W tabeli 3 zestawiono porównanie wyników dla drugiej grupy pomiarowej. Wszystkie wymiary mieszczą się w założonym przedziale tolerancji wymiarów ($\pm 0,5$ mm). Wymiary, których nie udało się zmierzyć z powodu niedokładnie odwzorowanego kształtu oznaczono „-”.

Tabela 3. Porównanie wyników dla drugiej grupy pomiarowej

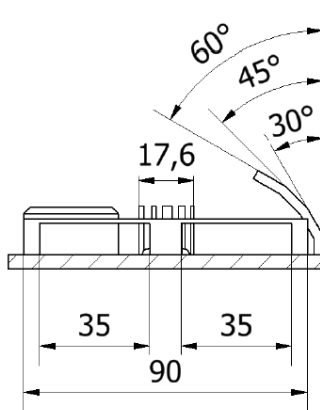
Drukarka 3D	Wymiar nominalny, mm				
	Ø16	Ø10	Ø8	Ø4	Ø2
Prusa i3 MK3S	15,843	9,879	7,941	3,851	-
TRILAB AzteQ Industrial	15,814	9,690	7,708	3,628	-
3DGence Industry F421	16,052	10,098	8,064	4,016	1,952

Otrzymane różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych dla drugiej grupy pomiarowej zestawiono na rysunku 7 z uwzględnieniem drukarek 3D na których wykonano poszczególne elementy i przyjętego przedziału tolerancji wymiarów ($\pm 0,5$ mm).



Rysunek 7. Różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych (wyrażone w milimetrach) dla drugiej grupy pomiarowej

W trzeciej grupie pomiarowej zmierzono długość belki, oraz odległości między jej punktami podparcia, kąty pochylenia ściany oraz odległość między pionowymi ścianami (rys. 8).



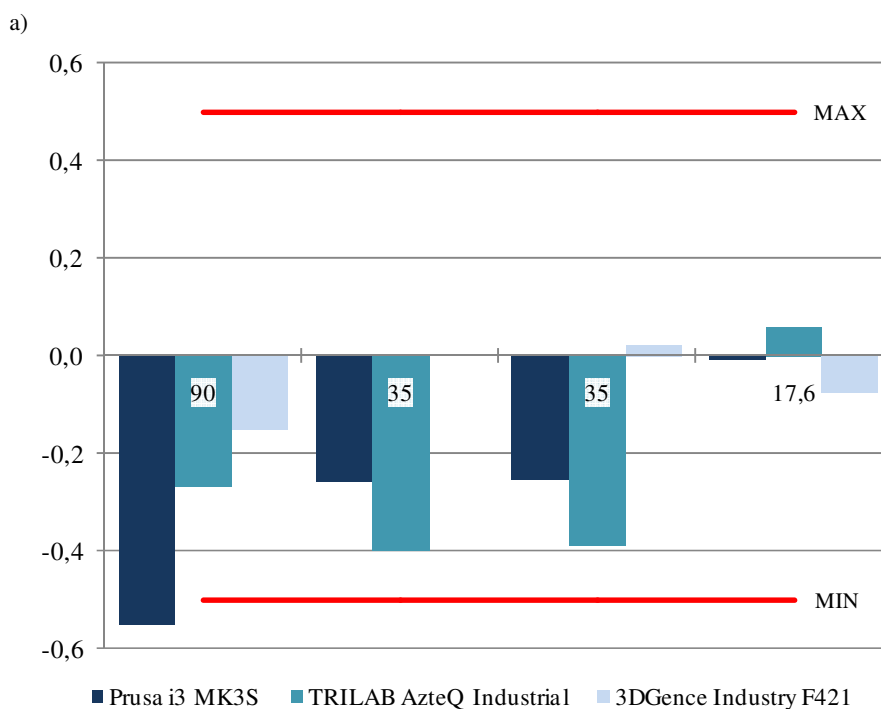
Rysunek 8. Wymiary nominalne badanego elementu dla trzeciej grupy pomiarowej

W tabeli 4 zestawiono porównanie wyników dla trzeciej grupy pomiarowej. Kolorem czerwonym zaznaczono wymiary, które wykraczają poza przyjęty przedział tolerancji wymiarów ($\pm 0,5$ mm) i kąta ($\pm 2^\circ$).

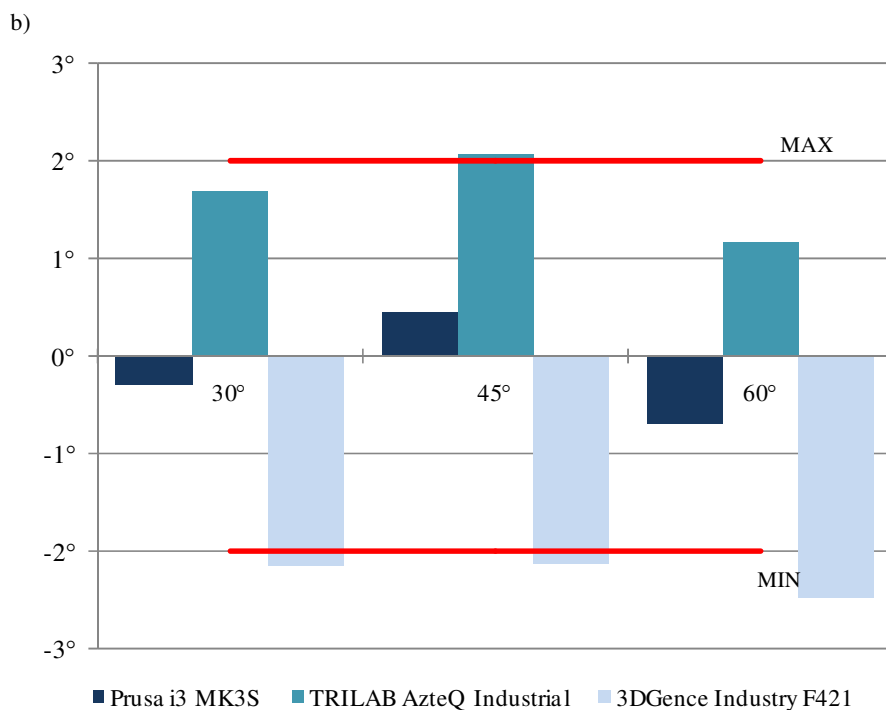
Tabela 4. Porównanie wyników dla trzeciej grupy pomiarowej

Drukarka 3D	Wymiar nominalny						
	90 mm	35 mm	35 mm	17,6 mm	30°	45°	60°
Prusa i3 MK3S	89,446	34,741	34,745	17,591	29°43'8"	45°27'14"	59°18'58"
TRILAB AzteQ Industrial	89,730	34,600	34,611	17,659	31°41'20"	47°4'16"	61°9'47"
3DGence Industry F421	89,847	35,004	35,022	17,524	27°51'22"	42°52'26"	57°30'54"

Otrzymane różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych dla trzeciej grupy pomiarowej zestawiono na poniższym rysunku z uwzględnieniem drukarek 3D na których wykonano poszczególne elementy i przyjętego przedziału tolerancji wymiarów (rys. 9a) i kąta (rys. 9b).

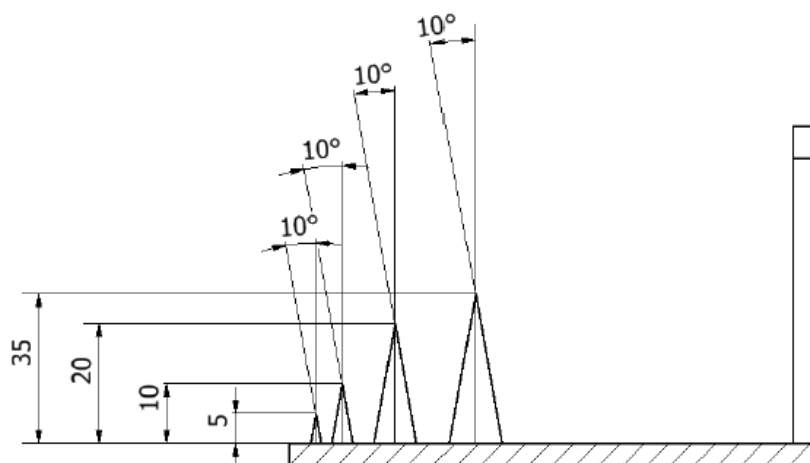


Rysunek 9a. Różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych (wyrażone w milimetrach) dla trzeciej grupy pomiarowej



Rysunek 9b. Różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych dla trzeciej grupy pomiarowej

Pomiary kątów i wysokości stożków (rys. 10) wykonano dla ostatniej grupy pomiarowej w kolejności od najniższego do najwyższego.



Rysunek 10. Wymiary nominalne badanego elementu dla czwartej grupy pomiarowej

W tabeli 5 zestawiono porównanie wyników dla czwartej grupy pomiarowej.

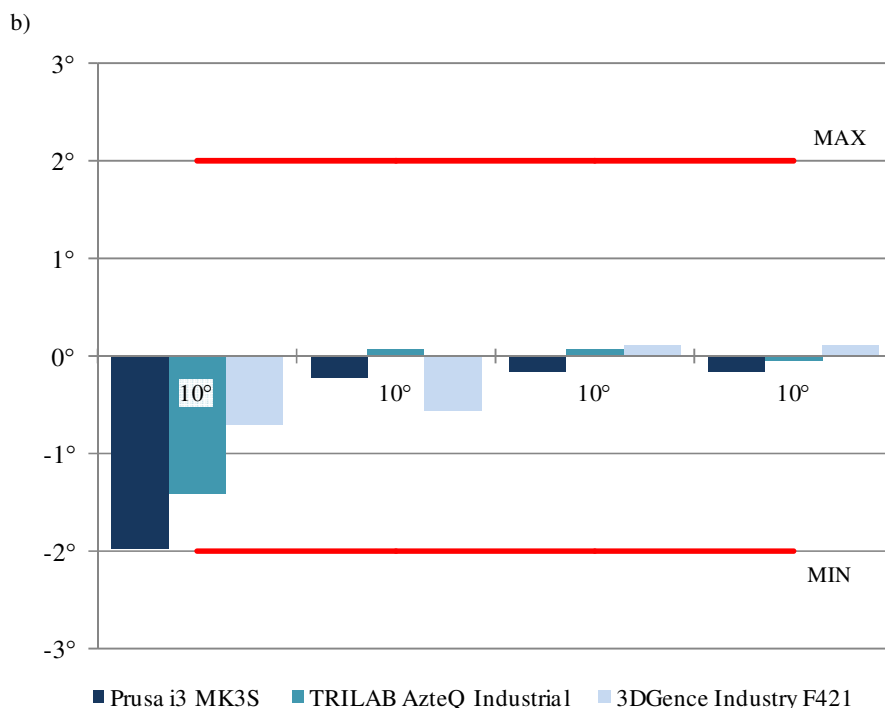
Tabela 5. Porównanie wyników dla czwartej grupy pomiarowej

Drukarka 3D	Wymiar nominalny							
	10°	5 mm	10°	10 mm	10°	20 mm	10°	35 mm
Prusa i3 MK3S	8°2'6"	5,153	9°47'20"	10,075	9°51'7"	20,023	9°50'2"	34,970
TRILAB AzteQ Industrial	8°35'20"	5,250	10°4'34"	10,174	10°3'40"	20,169	9°57'7"	35,132
3DGence Industry F421	9°17'38"	4,995	9°26'24"	9,987	10°6'	19,957	10°5'56"	34,955

Otrzymane różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych dla czwartej grupy pomiarowej zestawiono na poniższym rysunku z uwzględnieniem drukarek 3D na których wykonano poszczególne elementy i przyjętego przedziału tolerancji wymiarów (rys. 10a) i kąta (rys. 10b).

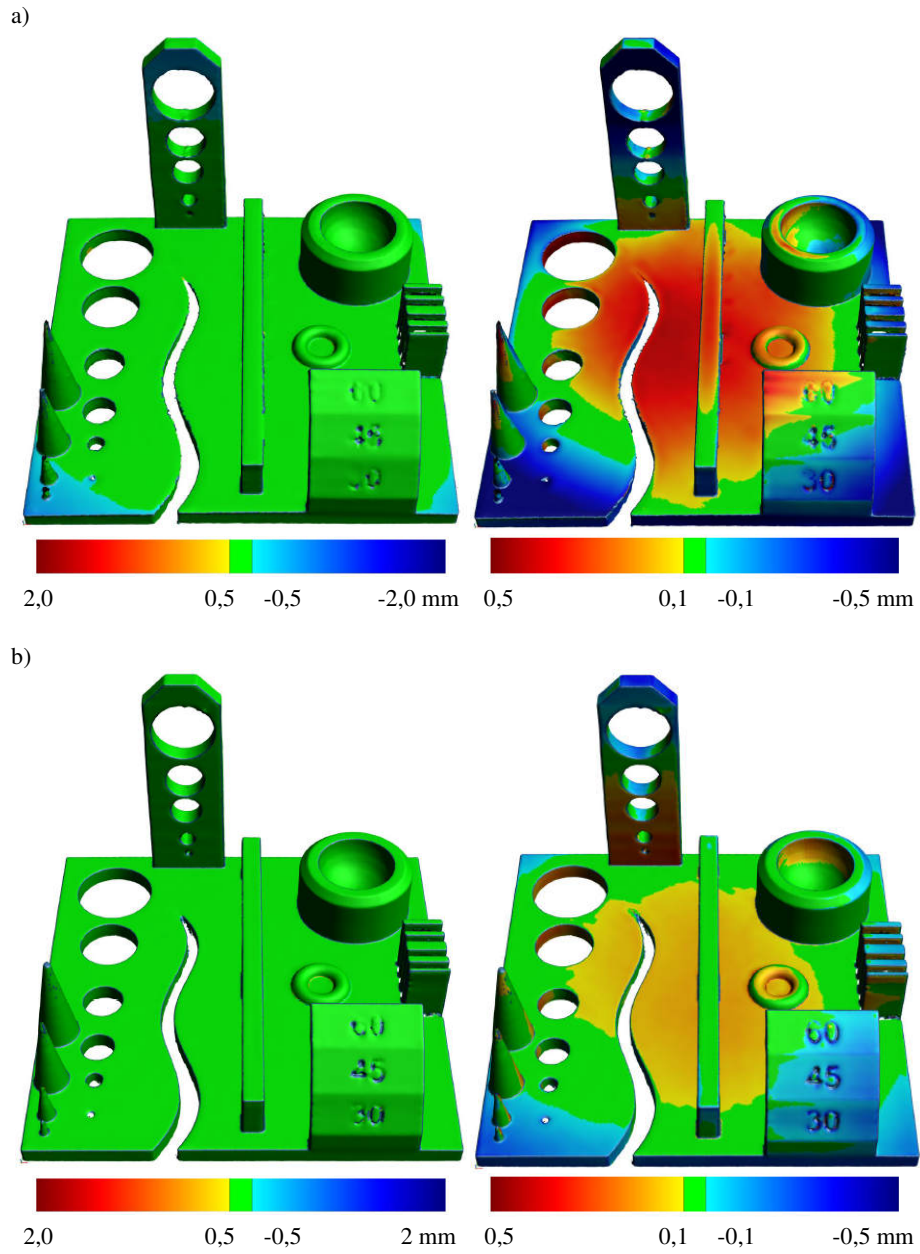


Rysunek 10a. Różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych (wyrażone w milimetrach) dla czwartej grupy pomiarowej

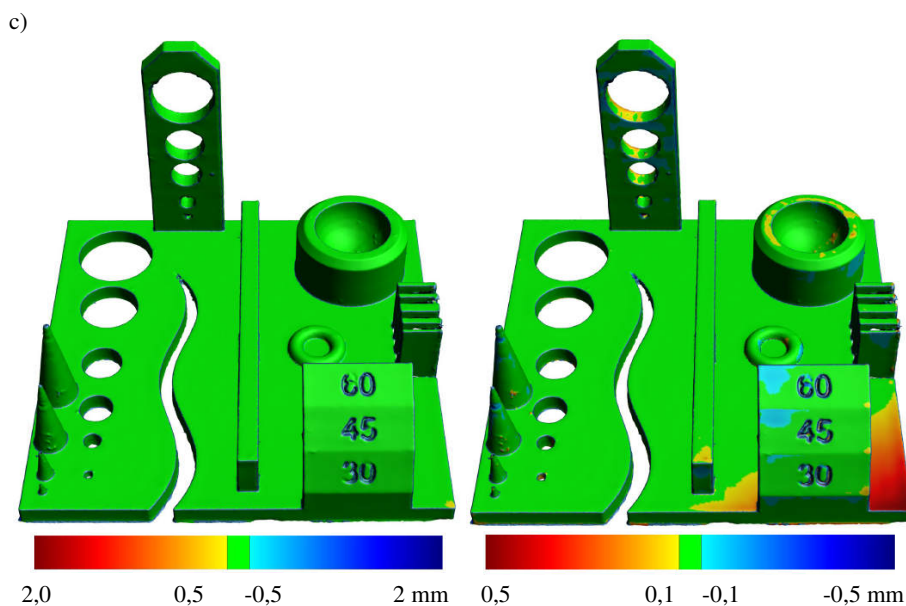


Rysunek 10b. Różnice zmierzonych wymiarów i wartości nominalnych dla czwartej grupy pomiarowej

Następnie w oprogramowaniu *VXelements* wykorzystano narzędzia do badania odchyłań wymiarów modelu CAD względem skanu 3D. Na rysunku 11 przedstawiono graficzne zilustrowanie dokładności wymiarowo-kształtowej, czyli kolorowe mapy odchyłek (uwzględniające przyjęty przedział tolerancji wymiarów wynoszący $\pm 0,5$ mm), które opracowano dla badanych elementów wykonanych z ABS na drukarkach 3D pracujących w technologii FFF (Prusa i3 MK3S, TRILAB AzteQ Industrial, 3DGence Industry F421). Ponadto pokazano jak zmienia się rozkład odchyłek wymiarów modelu CAD w odniesieniu do skanu 3D w zakresie $\pm 0,5$ mm.



Rysunek 11. Mapa odchyłek opracowana dla elementu wydrukowanego na urządzeniu a) Prusa i3 MK3S, b) TRILAB AzteQ Industrial



Rysunek 11. Mapa odchyłek opracowana dla elementu wydrukowanego na urządzeniu c) 3DGence Industry F421

4. Wnioski

Wykorzystane urządzenia pracujące w technologii FFF (Prusa i3 MK3S, TRILAB AzteQ Industrial, 3DGence Industry F421) wykazują różnice w zakresie zachowania dokładności wymiarowo-kształtowej drukowanych elementów z filamentu ABS. Najlepszą precyzją odwzorowania kształtu wyróżnia się pracująca w kinematyce kartezyjskiej przemysłowa drukarka 3DGence Industry F421, która jest wyposażona w komorę utrzymującą stałą temperaturę w trakcie pracy. Tylko na tej drukarce poprawnie odwzorowano najmniejszy otwór o średnicy 2 mm drukowany zarówno w płaszczyźnie pionowej jak i poziomej.

Drukarka TRILAB AzteQ Industrial, która jako jedyna wykorzystuje kinematykę Delta do kontroli ruchów głowicy, z mniejszą dokładnością odwzorowała wymiary i kształty w przypadku wydruku otworów w płaszczyźnie pionowej oraz wysokości stożków w porównaniu do pozostałych urządzeń, co wynika z większej prędkości osiągniętej przez głowicę w czasie procesu druku, która przekłada się na niższą jakość wydruku.

Drukarka Prusa i3 MK3S, wykorzystująca kinematykę kartezyjską, jako jedyna nie posiada grzanej komory oraz nie jest przeznaczona do zastosowań przemysłowych, mimo tego cechuje się dobrą dokładnością wymiarowo-kształtową drukowanych elementów zwłaszcza w porównaniu do drukarki TRILAB AzteQ Industrial.

Opracowane mapy odchyłek pozwalają zlokalizować miejsca na wydruku, które nie zostały wykonane w założonej tolerancji. Dla przemysłowych drukarek TRILAB AzteQ Industrial oraz 3DGence Industry F421 wymiary badanych elementów mieszczą się w założonej tolerancji $\pm 0,5$ mm, w przypadku urządzenia Prusa i3 MK3S szerokość i długość podstawy wykraczają poza przyjęty przedział.

LITERATURA

1. BUDZIK G., WOŹNIAK J. PRZESZŁOWSKI Ł.: Druk 3D jako element przemysłu przyszłości. Analiza rynku i tendencje rozwoju. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2022.
2. PN-EN ISO/ASTM 52900: Wytwarzanie przyrostowe - Zasady ogólne - Podstawy i słownictwo.
3. AHN DG.: Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology, **8**(2021), 703–742.
4. GÜLCAN O., GÜNAYDIN K., TAMER A.: The State of the Art of Material Jetting – A Critical Review. Polymers, **13**(2021), 2829.
5. GIBSON I., ROSEN D.W., STUCKER B.: Sheet Lamination Processes. In: Additive Manufacturing Technologies. Springer, Boston, MA 2010.
6. Serwis internetowy Statista – Most used 3D printing technologies worldwide 2021: <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>, 30.10.2023
7. PENUMAKALA P.K., SANTO J. THOMAS A.: A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. Composites Part B: Engineering, **201**(2020), 108336.
8. Serwis internetowy Drukarki 3D – Technologia FDM/FFF: <https://drukarki3d.pl/technologie/technologie-fdm-fff/>, 30.10.2023
9. ZAKHAROV O.V., PUGIN K.G., IVANOVA T.N.: Modeling and Analysis of Delta Kinematics FDM Printer. Journal of Physics: Conference Series, **2182**(2022).
10. Serwis internetowy blog blackfrog.pl – Rodzaje kinematyk drukarek 3D: <https://blackfrog.pl/blog/budowa-drukarki/rodzaje-kinematyki-drukarek-3d/>, 30.10.2023
11. KRISTIAWAN R.B., IMADUDDIN F., ARIAWAN D., ARIFIN U., ARIFIN Z.: A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. Open Engineering, **11**(2021)1, 639-649.
12. ĆWIKŁA G., GRABOWIK C., KALINOWSKI K., PAPROCKA I., OCIEPKA P.: The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. In IOP conference series: Materials Science and Engineering, **227**(2017).
13. POWROŹNIK M.: Zastosowanie oraz perspektywy rozwoju druku 3D. Archiwum Wiedzy Inżynierskiej, **6**(2021)2, 28-30.
14. NTOUSIA M., FUDOS I.: 3D Printing Technologies & Applications: An Overview. In Proceedings of the CAD 2020 Conference, Singapore, **243**(2019), 243-248.
15. Serwis internetowy Fiberlogy – ABS: https://fiberlogy.com/wp-content/uploads/2021/12/FIBERLOGY_ABS_TDS.pdf, 30.10.2023.
16. XU Y.: Experimental Study of ABS Material Shrinkage and Deformation Based on Fused Deposition Modeling. In MATEC Web of Conferences, **67**(2016).