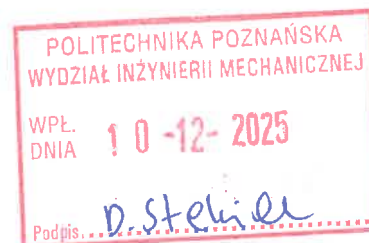


dr hab. inż. Adam Gąska, prof. PK
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej
Wydział Mechaniczny
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki
adam.gaska@pk.edu.pl
tel. +12 628 3230



Recenzja **rozprawy doktorskiej mgr inż. Justyny Rybarczyk**

pt. Ocena właściwości ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Filip Górski, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Wiesław Kuczko

Recenzja została opracowana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej z dnia 23 września 2025 r.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska pt. „Ocena właściwości ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych” zawiera 180 stron w formacie A4 obejmujących: stronę tytułową rozprawy w języku polskim, stronę z podziękowaniami, streszczenia w języku polskim oraz angielskim, spis treści, trzystronowe wprowadzenie zawierające uzasadnienie podjęcia badań w proponowanym temacie (rozdział 1), analizę literatury zaprezentowaną na 35 stronach (rozdział 2), zakończoną podsumowaniem najważniejszych trendów rozwoju w metodach wytwarzania ortez oraz wskazaniem zidentyfikowanych luk badawczych, w obszarze których Autorka podjęła badania w ramach ocenianej rozprawy doktorskiej, cel pracy, problemy i hipotezy badawcze (rozdział 3) przedstawione na 5 stronach, metodykę badań wraz z podaniem szczegółowej koncepcji i planu badań, opisu zrealizowanych badań wstępnych, a także materiałów i metod, które zostały wykorzystane w części badawczej rozprawy (rozdział 4 zawierający 52 strony), wyniki zrealizowanych badań (rozdział 5 o objętości 42 stron) nieniszczących obejmujących: badania wizualne, mikroskopowe, pomiary parametrów chropowatości powierzchni oraz dokładności odwzorowania drukowanych obiektów z zastosowaniem skanowania 3D, oraz niszczących, w ramach których Autorka wykonała badania wytrzymałościowe (próba rozciągania oraz zginania), opisane badania realizowane były zarówno dla próbek materiałowych jak i gotowych ortez (część z badań) wykonanych z polimerów bazowych wykorzystywanych w druku 3D z zastosowaniem technologii FDM (ang. Fused Deposition Modelling) oraz ich wersji kompozytowych, wzmacnianych włóknem węglowym (w sumie 8 materiałów), dyskusję i wnioski (rozdział 6), w którym dodatkowo Autorka na podstawie analizy statystycznej uzyskanych wyników badań, przyjęła lub odrzuciła

postawione w rozdziale 3cim hipotezy badawcze, trzystronicowe podsumowanie zawierające wnioski z wykonanych badań i analizy ich wyników, a także wskazujące dalsze kierunki badawcze w zakresie tematyki rozprawy doktorskiej, literaturę obejmującą 186 pozycji, spis ilustracji oraz spis tabel.

Streszczenia pracy w obu językach dobrze oddają zawartość pracy.

Bogaty zbiór zacytowanych źródeł literaturowych, zawierający jak napisano powyżej 186 pozycji, zasługuje na wysoką ocenę. Nie wątpię że Autorka zapoznała się z treścią wszystkich wymienionych źródeł, szkoda że nie wszystkie zostały zacytowane w tekście rozprawy. Wśród źródeł literaturowych znajduje się siedem publikacji Autorki rozprawy (z czego 3 to publikacje w czasopismach posiadających współczynnik Impact Factor), co interpretuję jako dość dużą aktywność Autorki w publikowaniu prac naukowych. W wykazie literatury zacytowano książki, artykuły w czasopismach naukowych, referaty konferencyjne, opisy udzielonych patentów, normy, wytyczne organizacji międzynarodowych i rządowych oraz materiały producentów opublikowane na stronach internetowych. W tej rozprawie po raz pierwszy spotkałem się również z cytowaniem postu z serwisu społecznościowego Facebook. Wykorzystano opublikowane w nim zdjęcie jednego z pacjentów, dla którego zespół badawczy, w którego pracach uczestniczyła Autorka, opracował specjalną ortezę. W tym kontekście uznaję takie cytowanie za uzasadnione, pod warunkiem, że pacjent wyraził zgodę na wykorzystanie jego wizerunku. W części recenzji zawierającej uwagi redakcyjne zawarłem trzy uwagi dotyczące wykazu literatury, jedna z nich dotyczy braku cytowania w tekście rozprawy części z wymienionych w wykazie pozycji. Takich pozycji jest 79, więc z punktu widzenia czytelnika rozprawy, zbiór źródeł literaturowych mógłby zostać skrócony do 107 pozycji, które zostały zacytowane w tekście.

Omówiony powyżej układ pracy jest typowy dla rozpraw doktorskich o charakterze badawczym, przedstawianych do obrony w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych.

Szczegółowa charakterystyka zawartości rozprawy oraz dotyczące jej uwagi, podzielone na uwagi redakcyjne i krytyczne, zostały przedstawione w dalszej części recenzji.

Istotność problematyki rozprawy

Tematyka badawcza rozprawy dotyczy zagadnień związanych z technikami szybkiego wytwarzania, drukiem 3D, w szczególności z zastosowaniem technologii FDM, metodami pomiarów geometrii 3D wytwarzanych obiektów, parametrów ich powierzchni, a także oceną mechanicznych właściwości materiałów wykorzystywanych w druku 3D. Wszystkie te zagadnienia rozpatrywane są w kontekście projektowania i wytwarzania zindywidualizowanych ortez stawu skokowego. Podjęte w rozprawie badania mają na celu poprawę metod projektowania tego rodzaju ortez, opracowanie kryteriów doboru materiałów do ich wytwarzania oraz opracowanie kryteriów oceny funkcjonalności wyprodukowanych ortez.

Zastosowanie ortez stawów, w tym stawu skokowego, w medycynie pozwala nie tylko na przyspieszenie procesu leczenia i rehabilitacji, ale również na poprawę jakości życia pacjentów poprzez między innymi: minimalizację bólu, poprawę stabilności chodu oraz umożliwienie powrotu do codziennych aktywności. Dotychczas stosowane rozwiązania w zakresie projektowania oraz wytwarzania ortez stawów bazują zazwyczaj na technikach manualnych, które umożliwiają personalizację, jednak nie zapewniają odpowiedniej dokładności

dopasowania ortezy do ciała pacjenta oraz są bardzo koszt- i czasochłonne, lub zastosowaniu gotowych modeli ortezy, w różnych konfiguracjach i rozmiarach, które nie umożliwiają spersonalizowania ortezy do konkretnego pacjenta. W związku z powyższym podjęte przez Doktorantkę badania z zakresu inżynierii mechanicznej, mające na celu rozwiązanie wybranych, istotnych problemów dotyczących produktów medycznych należy uznać za ważne i mające potencjał do poprawy jakości życia osób zmagających się z urazami stawów, niepełnosprawnych ruchowo czy rekonwalescentów. Także oprócz niewątpliwego wpływu na dyscyplinę jaką jest inżynieria mechaniczna, znaczenie prowadzonych badań jest ważne z punktu widzenia jakości życia typowego człowieka.

Dodatkowo, problemy których rozwiązania podjęła się w swojej rozprawie Autorka stanowią krok naprzód ku automatycznemu projektowaniu i wytwarzaniu produktów z zastosowaniem technik druku 3D, co zgodne jest z obserwowanymi kierunkami rozwoju w zakresie technik wytwarzania oraz metod pomiarowych i wpisuje się w założenia koncepcji Przemysłu 4.0, pod którą to nazwą kryją się dynamicznie przebiegające zmiany w zakresie nowoczesnych systemów produkcyjnych. Oprócz tego, jak wykazano w rozprawie doktorskiej, zastosowanie badanych przez Doktorantkę materiałów kompozytowych umożliwia skrócenie czasu wytwarzania ortezy stawu skokowego oraz obniżenie zużycia materiału.

Zaprezentowane w rozprawie rozważania dotyczą również pośrednio dyscypliny inżynieria biomedyczna, jednakże zakres zrealizowanych badań, obejmujących badania wytrzymałościowe, analizy z wykorzystaniem metody elementów skończonych, badania parametrów chropowatości powierzchni, badania z zastosowaniem współrzędnościowej techniki pomiarowej (skanowanie badanych powierzchni z zastosowaniem skanerów światła strukturalnego) jednoznacznie pozycjonuje postawiony w rozprawie problem oraz zrealizowane badania w zakresie dyscypliny inżynieria mechaniczna.

W związku z powyższym, **podjęta przez Doktorantkę tematykę uznaję za bardzo istotną dla dyscypliny inżynieria mechaniczna, a w szczególności dla technologii szybkiego wytwarzania i druku 3D**, których dynamiczny rozwój umożliwia wzrost efektywności oraz obniżanie materiałochłonności wytwarzania w różnych branżach przemysłu, a w szczególności w przemyśle biomedycznym, który wymaga projektowania i wytwarzania dopasowanych do pacjentów produktów o odpowiednich parametrach powierzchni, wytrzymałości oraz elastyczności.

W mojej ocenie, zarówno zdefiniowane przez Doktorantkę problemy i cele pracy, jak i ogólnie podjęta tematyka, spełniają, w odniesieniu do badań realizowanych na potrzeby rozprawy doktorskiej, wymagania stawiane pracom naukowym.

Uwagi redakcyjne

Rozprawa jest napisana w poprawny sposób. Przekazywane w niej treści są opisane w zrozumiałym sposób, natomiast często występują powtórzenia tego samego tekstu lub tekstu o podobnym znaczeniu, co tekst który prezentowany był już we wcześniejszych częściach pracy. W recenzowanej rozprawie występują sporadycznie błędy interpunkcyjne, ortograficzne, stylistyczne oraz gramatyczne. Od strony redakcyjnej, mam również kilka uwag co do wykazu literatury.

Poniżej podaję wybrane przykłady ww. błędów ze wskazaniem numerów stron, na których występują:

1. Str. 3, „... które spełniają wymagania kliniczne i *normatywne*., ale jest problem ...” zamiast „... które spełniają wymagania kliniczne i *normatywne*, ale jest problem ...”.
2. Str. 10, „... gdzie dzięki możliwości personalizacji produktów technologia *ta znajduje* szerokie zastosowanie ...” zamiast „... gdzie dzięki możliwości personalizacji produktów technologia *ta znajduje* szerokie zastosowanie ...”.
3. Str. 17, „Rys. 2.5 przedstawia ortezę *wykonane* metodą hybrydową w 2021 roku przez firmę ...” zamiast „Rys. 2.5 przedstawia ortezę *wykonaną* metodą hybrydową w 2021 roku przez firmę ...”.
4. Str. 18, „... do indywidualnych *wymiarów potrzeb* pacjenta i wpływających na lepsze wyniki...” zamiast „... do indywidualnych *wymiarów oraz potrzeb* pacjenta i wpływających na lepsze wyniki...”.
5. Str. 25, „Zastosowanie CAD w projektowaniu ortez umożliwia precyzyjne odwzorowanie kształtu kończyny, optymalizację konstrukcji (rys. 2.12) oraz *szybkie iteracyjne* [168].”. Brakuje sprecyzowania co może być „*szybkie, iteracyjne*”.
6. Podrozdział 2.2.4, prawie cały tekst tego podrozdziału to powtórzenie informacji, które były już podawane w podrozdziale 2.1.2.
7. Str. 28, „Takie zmiany znacząco podnoszą jakość leczenia *iefektywność* rehabilitacji osób z zaburzeniami funkcji stawu skokowego [122].” zamiast „Takie zmiany znacząco podnoszą jakość leczenia *i efektywność* rehabilitacji osób z zaburzeniami funkcji stawu skokowego [122].”.
8. Str. 34, „Obiekty wytwarzane *przyrostowo są analizie* wpływu kierunku druku, rodzaju materiału oraz grubości warstw na właściwości mechaniczne.” zamiast „Obiekty wytwarzane *przyrostowo są poddawane analizie* wpływu kierunku druku, rodzaju materiału oraz grubości warstw na właściwości mechaniczne.”.
9. Str. 38, „Ocena jakości oraz funkcjonalności produktów ortopedycznych bazuje na międzynarodowych normach i standardach. Norma ISO 10328 [125, 150] definiuje wymagania dotyczące testów mechanicznych dla protez i ortez, natomiast normy serii ISO 10993 [142] koncentrują się na biokompatybilności używanych materiałów. Istotnym aspektem jest także ocena trwałości mechanicznej, która obejmuje odporność na ściskanie, zginanie oraz zmęczenie materiałów. Techniki obrazowe, takie jak skanowanie 3D czy tomografia komputerowa, umożliwiają dokładną ocenę struktury i jakości materiałów użytych w produkcji [101].” Informacje podane w tym fragmencie tekstu były już podawane we wcześniejszych rozdziałach ocenianej rozprawy doktorskiej. Podobna sytuacja ma miejsce z tekstem podrozdziału 2.4.1 i kilkoma innymi fragmentami pracy.
10. Str. 39, „... takie jak ograniczona trwałość niektórych *materiałów przyrostowych* ...”. Wyrażenie „materiały przyrostowe” jest skrótem myślowym czy ew. określeniem zaczerpniętym z mowy branżowej. Powinno się raczej napisać np. „materiały stosowane w wytwarzaniu przyrostowym”.
11. Str. 40, „... takie jak *modelowanie osadzania topionego* (FDM), ...”. Wydaje mi się, że to nie jest oficjalne tłumaczenie nazwy tej metody z języka angielskiego na język polski. A jeśli jest, to chyba nie podjąłbym się wymyślenia gorszego tłumaczenia.
12. Dalej na stronie 40, „... zgodnie z modelem cyfrowym wygenerowanym przy pomocy *slicera* [180].” Ponownie słowo zaczerpnięte z nazewnictwa branżowego. Można by spróbować zastąpić go opisem w języku polskim, np. „... przy pomocy oprogramowania służącego do podziału modelu na warstwy.”.

13. Str. 49, „... obejmujący ocenę opłacalności *wytworzenia przyrostowej ortez z kompozytów polimerowych ...*” zamiast „... obejmujący ocenę opłacalności *wytworzenia ortez z kompozytów polimerowych ...*”.
14. Str. 58, „... ortez stawu skokowego *zwykorzystaniem* tworzyw kompozytowych.” zamiast „... ortez stawu skokowego *z wykorzystaniem* tworzyw kompozytowych.”.
15. Dalej na str. 58, „W celu przeprowadzenia badań w niniejszej rozprawie doktorskiej, wykorzystano szereg danych wejściowych oraz wiedzy specjalistycznej opracowanego wcześniej przez zespół AutoMedPrint.”. Zabrakło w tym zdaniu kilku słów, przez co jest ono niezrozumiałe.
16. Str. 64, „Podobnie jak w przypadku *pacjentki pierwszej*, wykonano skanowanie 3D kończyny dolnej pacjenta, a uzyskane dane posłużyły do stworzenia cyfrowego modelu ortezy.”. W zacytowanym fragmencie Autorka odnosi się do opisu trzech pacjentów, pierwszym z nich był chłopiec z rozszczepieniem kręgosłupa, drugim 26-letnia pacjentka z umiarkowaną niestabilnością w obrębie stawu skokowego, a trzecim opisywany w tym fragmencie pacjent. Jego przypadek jest podobny do przypadku drugiej pacjentki dlatego w zacytowanym fragmencie Autorce chodziło zapewne o „*pacjentkę drugą*”.
17. Str. 72, Tabela 2, zgodnie z obowiązującymi w tym zakresie wytycznymi zapisywania jednostek (zawartymi w publikacji BIPM pt. „The International System of Units 9th edition (2019)”), zapis jednostek który został przez Doktorantkę wykorzystany w tej tabeli i wielu innych tabelach oraz rysunkach, czyli zapis jednostek w nawiasach kwadratowych, nie jest poprawny. Jednostki w tabelach oraz wykresach powinny być podawane bez nawiasów kwadratowych, jeżeli określana jest sama jednostka lub po znaku ‘/’ albo po przecinku, gdy przed jednostką podawana jest nazwa zmiennej lub wielkości (czyli np. $Ra / \mu m$, a nie $Ra [\mu m]$).
18. Str. 74, „PET-G wykazuje dobrą odporność chemiczną *i promieniowanie UV, ...*” zamiast „PET-G wykazuje dobrą odporność chemiczną *i na promieniowanie UV, ...*”.
19. Str. 81, opisy na rysunku 4.16:
 - opis w prostokącie w lewym-górnym rogu: jest „Opracowanie parametrów *eometrycznych ...*”, powinno być: „Opracowanie parametrów *geometrycznych ...*”,
 - opis w prostokącie w prawym-górnym rogu: jest „Badania *nieniszczące ...*”, powinno być: „Badania *nieniszczące ...*”,
 - opis w prostokącie w lewym-dolnym rogu: „Wydruk próbek z wybranych materiałów z wykorzystaniem termowizji”. Brzmi to tak jakby wydruki były wykonywane z zastosowaniem termowizji, a przecież kamera termowizyjna była wykorzystywana do monitorowania rozkładu temperatury na powierzchni wydruku i w przestrzeni roboczej drukarki. Można by to zapisać np. w taki sposób: „Wydruk próbek z wybranych materiałów z termowizyjnym badaniem rozkładu temperatur”. Ta sama uwaga odnosi się do opisu rysunku 4.20 na stronie 85.
20. Str. 88, „... – rozumianą jako możliwość wytworzenia 3 kompletnych ortez, brak delaminacji, *deformacji geometrycznych braków materiału* oraz błędów przerywających druk.” zamiast „... – rozumianą jako możliwość wytworzenia 3 kompletnych ortez, brak delaminacji, *deformacji geometrycznych, braków materiału* oraz błędów przerywających druk.”.
21. Str. 91, „Wyceny dokonano w dwóch wariantach:

- komercyjnym – zakładającym realizację zlecenia dla podmiotu zewnętrznego, np. firmy prywatnej. Koszt obliczano według uproszczonego przelicznika: 2 zł za każdy gram zużytego materiału.
 - niekomercyjnym – symulującym wytworzenie elementu w placówce medycznej, wyposażonej w odpowiedni sprzęt oraz przeszkolony personel. Koszty produkcji obliczano na podstawie następujących wzorów:”. Te informacje zostały już zaprezentowane na wcześniejszej stronie.
22. Str. 95, rysunek 4.26, na jednym z opisów wykorzystanych piktogramów jest: „Przypisanie właściwości materiałowych oparte na testach wytrzymałościowych próbek *wydrukowanech*”, powinno być: „Przypisanie właściwości materiałowych oparte na testach wytrzymałościowych próbek *wydrukowanych*”.
 23. Str. 109, podpis pod rysunkiem 5.6, jest: „Porównanie wyników rozciągania [100]”, powinno być: „Porównanie wyników próby rozciągania [100]”.
 24. Str. 116, „Wyniki analizy termograficznej oraz mechanicznej próbek wykonanych z kompozytu PLA wzmocnionego włóknem węglowym (PLA-CF), które drukowano w trzech różnych temperaturach: 220°C, 230°C i 260°C.” To zdanie jest wyrwane z kontekstu. Bardziej nadawałoby się na tytuł podrozdziału lub podpis rysunku.
 25. Str. 120, „W szczególności PLA-CF okazał się gorszy charakteryzować mniejszą wytrzymałością ...” niewłaściwy styl.
 26. Dalej na str. 120, „Na rysunku 5.16 przedstawiono zdjęcie ortezy stawu skokowego dla 26-letniej pacjentki wykonanej z materiału PETG.” Czy to pacjentka była wykonana z PETG czy może raczej orteza? Nie byłoby wątpliwości gdyby to zdanie brzmiało w następujący sposób: „Na rysunku 5.16 przedstawiono zdjęcie ortezy stawu skokowego wykonanej z materiału PETG dla 26-letniej pacjentki.”
 27. Str. 121, „Na potrzeby weryfikacji hipotezy badawczej nr 1 dla tego materiału założono z racji braku możliwości wytworzenia kompletnej ortezy *wytrzymałość jest zerowa*, ...” zamiast „Na potrzeby weryfikacji hipotezy badawczej nr 1 dla tego materiału założono z racji braku możliwości wytworzenia kompletnej ortezy, *że wytrzymałość jest zerowa*, ...”
 28. Str. 126, „... a wszystkie zestawienia przygotowano wyłącznie w oparciu o dane z samodzielnie *przeprowadzonych z badań laboratoryjnych*.” zamiast „... a wszystkie zestawienia przygotowano wyłącznie w oparciu o dane z samodzielnie *przeprowadzonych badań laboratoryjnych*.”.
 29. Dalej na str. 126, „W tabeli 12 porównawczej zestawiono średnie siły niszczące uzyskane z badań oraz wartości maksymalnych sił z symulacji MES (rys. 5.19).” zamiast np. „W tabeli porównawczej nr 12 zestawiono średnie siły niszczące uzyskane z badań oraz wartości maksymalnych sił z symulacji MES (rys. 5.19).”.
 30. Str. 129, „Celem badań mikroskopowych było przeprowadzenie analizy morfologii *przełamów* czterech wybranych materiałów ...” zamiast „Celem badań mikroskopowych było przeprowadzenie analizy morfologii *przełomów* czterech wybranych materiałów ...”. Ta uwaga odnosi się jeszcze do kilku innych miejsc w pracy, gdzie zamiast słowa „przełom” zastosowano słowo „przełam”.
 31. Str. 130, podpis pod rysunkiem 5.21, „Struktura *PLA*, *PLA*, PETG i PETG CF pod mikroskopem” zamiast „Struktura *PLA*, *PLA-CF*, PETG i PETG CF pod mikroskopem”.
 32. Str. 133, tytuł podrozdziału 5.3.5, „Wyniki badań dokładności”. Dokładności czego?

33. Str. 151, dwukrotnie powtórzony ten sam akapit zaczynający się od słów „Dodatkowo, podczas komercyjnego wdrożenia należałoby uwzględnić koszty certyfikacji wyrobu medycznego, ...”.
34. Str. 152, „W ramach przeprowadzonych badań porównawczych i analiz funkcjonalnych szczególną uwagę poświęcono ocenie *użytkowości* materiałów kompozytowych ...” zamiast „W ramach przeprowadzonych badań porównawczych i analiz funkcjonalnych szczególną uwagę poświęcono ocenie *użyteczności* materiałów kompozytowych ...”.
35. Str. 158, „– uzyskano wynik bardzo bliski statystycznej istotności wyraźny trend chropowatości przy dodatku włókien węglowych.” Ciężko zrozumieć sens tej części zdania.
36. Str. 161, „Należy jednak pamiętać, że *przy ocenie właściwości materiałów przy ocenie właściwości materiałów do wytwarzania przyrostowo* nie można opierać się jedynie na ...” zamiast „Należy jednak pamiętać, że *przy ocenie właściwości materiałów do wytwarzania przyrostowego* nie można opierać się jedynie na ...”.
37. Wykaz źródeł literaturowych przedstawiony w rozdziale ‘LITERATURA’ nie jest uporządkowany ani w kolejności alfabetycznej, ani według kolejności cytowania poszczególnych pozycji. Jakże było kryterium według którego te pozycje zostały zestawione w wykazie literatury?
38. Część z pozycji wykazu literatury jest w nim wymieniona dwukrotnie. Przykłady stanowią np. pozycje: [12] oraz [44] lub [23] i [24].
39. Znaczna część pozycji wykazu literatury nie została ani razu zacytowana w treści rozprawy doktorskiej. W sumie jest to 79 pozycji, o numerach: [2], [5-10], [19-20], [22-24], [26-30], [32-34], [37-41], [45], [47-48], [50-56], [58], [60-62], [64-65], [72], [76-77], [79-85], [87-89], [97-99], [165], [179].

Uwagi krytyczne i pytania

W tym rozdziale przedstawiam moje uwagi dotyczące merytorycznej strony recenzowanej rozprawy oraz pytania, na które w recenzowanym opracowaniu nie znalazłem odpowiedzi. Proszę Doktorantkę o odniesienie się do nich w formie pisemnej:

1. Str. 19, ostatnie zdanie na tej stronie: „Urządzenie charakteryzuje się wysoką dokładnością skanowania, wynoszącą nawet 0,1 mm, co zapewnia bardzo wierne odwzorowanie szczegółów anatomicznych – zarówno konturów, jak i krzywizn kończyny [44, 75, 168].” Gdyby to zdanie brzmiało: „Urządzenie charakteryzuje się wysoką dokładnością skanowania” mógłbym jedynie zapytać, na podstawie wartości jakiego parametru dokładnościowego został wyciągnięty ten wniosek? W obecnej wersji tego zdania, podana została wartość dokładności, a dokładność jest pojęciem jakościowym, czyli może być właśnie niska, wysoka, średnia, itp. Chcąc ją określić ilościowo, należałoby posłużyć się jakimś parametrem dokładnościowym. Z mojego doświadczenia wynika, że w takiej sytuacji najczęściej wykorzystywany jest parametr MPE, określający maksymalne błędy dopuszczalne pomiaru. Czyli poprawnie byłoby np. napisać: „Urządzenie charakteryzuje się wysoką dokładnością skanowania, wartość maksymalnych błędów dopuszczalnych pomiaru długości wynosi 0,1 mm, ...”. Inną sprawą jest czy błędy dopuszczalne na poziomie 0,1 mm to w odniesieniu do możliwości skanerów stosowanych w dzisiejszych czasach (nie mam na myśli tylko bardzo drogich skanerów, uważanych za najdokładniejsze rozwiązania tego typu, ale również skanery w wersjach budżetowych) taka wartość może zostać uznana za wysoką?

2. Str. 35, „W dostępnej literaturze naukowej przedstawiono różnorodne metody wykorzystywane w tym celu, takie jak:

- metrologia współrzędnościowa (CMM): ...”

CMM to skrót od ‘Coordinate Measuring Machine’ czyli ‘Współrzędnościowej Maszyny Pomiarowej’, a nie od ‘metrologii współrzędnościowej’, tutaj bardziej pasowałby skrót CMT czyli ‘Coordinate Measuring Technique’ lub polski odpowiednik WTP czyli ‘Współrzędnościowa Technika Pomiarowa’.

I dalej:

„- skanowanie 3D: ...”

Skanowanie 3D to również jedna z metod wykorzystywanych w ramach metrologii współrzędnościowej, dlatego nie jest do końca jasne dlaczego zostało wymienione obok metrologii współrzędnościowej jako inna metoda analizy dokładności wymiarowo-kształtowej.

I jeszcze dalej:

„- analiza zgodności z modelem CAD: Obejmuje zestawienie rzeczywistego obiektu z jego wirtualnym modelem w celu wykrycia odchyłeń wymiarowych i kształtowych [139].”

To prawda, jednakże analiza zgodności z modelem CAD również bazuje na zastosowaniu metrologii współrzędnościowej. Gdyby nie pomiary z zastosowaniem metrologii współrzędnościowej nie byłoby możliwe pozyskanie chmury punktów, która jest cyfrową reprezentacją kształtu rzeczywistego obiektu, a która następnie porównywana jest z teoretycznym modelem CAD.

3. Dalej na stronie 35: „W literaturze naukowej można znaleźć wiele badań dotyczących wykorzystania tych metod w ocenie dokładności wymiarowo-kształtowej ortez stawu skokowego. W publikacjach [4, 133-134] autorzy badają użycie metrologii współrzędnościowej do weryfikacji precyzji wymiarowej ortez produkowanych metodami addytywnymi.” Jestem współautorem publikacji [134] i nie przypominam sobie aby ta praca dotyczyła weryfikacji precyzji wymiarowej ortez.
4. Str. 38, „Badania dotyczące wymiarów i kształtów powinny być realizowane zgodnie z normami, takimi jak ISO 10360 [147], która dotyczy maszyn współrzędnościowych, oraz ISO 1101 [148] i ISO 5459 [149], które odnoszą się do tolerancji wymiarowych i geometrycznych powierzchni.” O ile bezsporne jest, że badania geometrii dowolnych produktów i ich części powinny być realizowane zgodnie z normami ISO 1101 oraz ISO 5459, o tyle nie jest zrozumiałe dlaczego również z wytycznymi normy ISO 10360, która dotyczy sprawdzania dokładności współrzędnościowych maszyn pomiarowych? Co Autorka miała na myśli przywołując normę ISO 10360 w kontekście oceny wymiarowo-kształtowej wyrobów ortopedycznych?
5. Str. 51, Hipoteza 1, „Ortezy stawu skokowego wytwarzane metodą przyrostową z wykorzystaniem kompozytów termoplastycznych osiągają wyższe parametry wytrzymałościowe i sztywność w porównaniu do tradycyjnych materiałów, ...” Zamiast określenia „tradycyjnych materiałów”, użyłbym np. „materiałów bazowych”, lub tak jak zostało to napisane w Hipotezie 2 „materiałów polimerowych bez włókien węglowych”. Określenie „tradycyjnych materiałów” nasuwa skojarzenie z materiałami wykorzystywanymi w tradycyjnych metodach wytwarzania spersonalizowanych ortez, czyli metodach manualnych, a przecież nie o to chodzi w tej hipotezie.
6. Str. 66, „3. Ze względu na stosunkowo szybkie i częste zmiany geometrii kończyny dolnej u pacjentów pediatrycznych, czas projektowania i wytwarzania ortozy oraz jej dostarczenia

musi być jak najkrótszy – z doświadczeń zespołu AutoMedPrint wynika potrzeba tworzenia ortez w ciągu 2-3 dni od zgłoszenia się pacjenta, co jest możliwe wyłącznie w wypadku stosowania automatycznego projektowania oraz szybkiego wytwarzania metodą ekstruzji (FDM) ze względu na jej dostępność i łatwość w implementacji w placówkach ochrony zdrowia (np. w szpitalach).” Na jakiej podstawie zdefiniowany został okres 2-3 dni na wytworzenie ortez od momentu zgłoszenia się pacjenta? Czy Autorka jest w stanie poprzeć to stwierdzenie wynikami poprzednich badań lub danymi na temat szybkości zmian geometrii kończyny?

7. Dalej na stronie 66: „W ramach realizowanej pracy doktorskiej wytworzono ortezę dla czteroletniej pacjentki o wzroście około 1 metra i masie ciała wynoszącej około 13 kg, u której zdiagnozowano zaburzenia funkcjonalne w obrębie kończyn dolnych wymagające zastosowania indywidualnie dopasowanej ortezy. Przypadek testowy dobrano tak, aby możliwe było przeprowadzenie szczegółowych eksperymentów na gotowych ortezach – w przypadku pacjenta o większych gabarytach ciała (np. dorosłego) wytwarzanie większej liczby sztuk ortez oraz ich badanie byłoby znacząco utrudnione.” Z jednej strony takie podejście można uznać za rozsądne, ponieważ umożliwia zmniejszenie zużycia materiałów wykorzystywanych do druku 3D, z drugiej jednak strony, wybrany przypadek jest mniej wymagający, niż przypadek ortezy dla osoby dorosłej i wymagania odnośnie wytrzymałości ortezy są w wybranym przypadku znacznie mniejsze. W ramach dalszych badań w tym zakresie sugeruję aby Autorka zajęła się również przypadkiem ortez drukowanych dla dorosłych osób.
8. Str. 74, „PETG-CF to kompozyt PET-G z zawartością włókna węglowego w ilości około 10%. Dodatek ten wpływa na zwiększenie sztywności i stabilności wymiarowej materiału. Filament ten, podobnie jak inne kompozyty CF, *charakteryzuje się wyższą temperaturą przetworstwa* oraz abrazyjnością.” To stwierdzenie nie pokrywa się z danymi podanymi w Tabeli 2 na stronie 72, w której zarówno dla PET-G jak i dla PETG-CF podano, że temperatura ekstruzji wynosi 220-260 stopni Celsjusza, czyli jest taka sama.
9. Str. 76, „Proces wytwarzania ortez odbywał się przy użyciu drukarek FDM o niskim koszcie eksploatacji, z zastosowaniem ustawień: *grubość warstwy 0,3 mm, ...*” Ten zapis nie pokrywa się z danymi podanymi w Tabeli 3 na stronie 75, gdzie grubość warstwy została określona jako 0,19 mm oraz z danymi podanymi w Tabeli 4 na stronie 78, gdzie grubość warstwy została określona jako 0,20 mm
10. Ogólna uwaga do treści podrozdziału 4.3.1, w opisach parametrów drukowania pomieszane są ze sobą opisy dotyczące drukowania próbek materiałowych oraz gotowych ortez. Nie jest też jasne czy próbki i gotowe ortezy były drukowane z wykorzystaniem takich samych parametrów (ta informacja podana zostaje dopiero w podrozdziale 4.6.3).
11. Str. 83, „Pomiar chropowatości wykonano przy użyciu certyfikowanego testera chropowatości.” W jaki sposób był certyfikowany „tester chropowatości” (czyli po prostu profilometr i takie określenie również byłoby bardziej trafne)? Według jakiej normy? Jakże zostały wystawione dla niego certyfikaty?
12. Dalej na str. 83, „Urządzenie to jest zgodne z odpowiednimi normami EN ISO 4287 oraz EN ISO 4288.” Co to znaczy, że urządzenie jest zgodne z tymi normami? Przytoczone normy dotyczą definicji podstawowych parametrów chropowatości i sposobu ich pomiaru z zastosowaniem profilometrów stykowych. Może lepiej byłoby napisać, że „urządzenie umożliwia wykonanie pomiarów parametrów chropowatości powierzchni zgodnie z wytycznymi norm EN ISO 4287 oraz EN ISO 4288.

13. Jeszcze dalej na str. 83, „Badania chropowatości przeprowadzono zarówno na próbkach do rozciągania, jak i do zginania, ale dopiero po zakończeniu testów niszczących. Pomiary wykonywano na stałym odcinku 2,5 mm z prędkością 1 mm/s, w miejscach pokazanych na rysunku 4.19a i 4.19b.” Ten zapis nie jest zgodny z zawartością rysunku 4.19 gdzie w części d tego rysunku zaprezentowano: „d) pomiar chropowatości na próbce przed testem na rozciąganie (opracowanie własne)”.
14. Str. 90 oraz 91, na stronie 90 Autorka napisała, że „Koszty produkcji w wariantcie komercyjnym wyliczano *według uproszczonego przelicznika: 1 zł za każdy gram zużytego materiału*. W wersji niekomercyjnej wykorzystano wzory:”, następnie na stronie 91: „Wyceny dokonano w dwóch wariantach:
- komercyjnym – zakładającym realizację zlecenia dla podmiotu zewnętrznego, np. firmy prywatnej. Koszt obliczano *według uproszczonego przelicznika: 2 zł za każdy gram zużytego materiału. ...*”, a jeszcze dalej na tej samej stronie: „W wersji komercyjnej wykorzystano wzór:
 - 1 zł za każdy gram materiału”. To jaka wartość w ostateczności została zastosowana do wyznaczenia kosztów produkcji w wariantcie komercyjnym?
15. Str. 93, fragment dot. zaprojektowanego przez Doktorantkę stanowiska do badań wytrzymałościowych gotowych ortez: „Dwie podkładki personalizowane pod ortezę zostały wytworzone przyrostowo na drukarce Zortrax M200 plus, a całe stanowisko zostało złożone w laboratorium Szybkiego Wytwarzania na Politechnice Poznańskiej.” Z jakich materiałów zostały wytworzone te podkładki? Czy z materiałów o podobnych właściwościach co materiały wykorzystane do produkcji ortez? Jeśli tak to czy nie ma to negatywnego wpływu na przebieg badań wytrzymałościowych?
16. Str. 94, rysunek 4.25, w zaprezentowanym na tym rysunku stanowisku do badań wytrzymałościowych gotowych ortez górny uchwyt urządzenia do badań niszczących wygląda w inny sposób niż zostało to zaprezentowane na rysunku 4.24 przedstawiającym projekt stanowiska. Czym to jest spowodowane?
17. Str. 96, opis zrealizowanych symulacji MES: „Zastosowano elementy typu C3D10 – dziesięciowęzłowe elementy tetraedryczne drugiego rzędu (*liczba elementów 39567 oraz węzłów 72038*), które odwzorowują złożone geometrie przy akceptowalnym czasie obliczeń.” Ta informacja nie pokrywa się z zapisem w ostatniej linijce na tej stronie, głoszącym że: „liczba elementów w modelu: ok. 120 000–160 000”. Proszę o wyjaśnienie tej rozbieżności.
18. Str. 101, „Badania przeprowadzono przy użyciu profilometru kontaktowego (tego samego, którego użyto do badania próbek typu wioselka i belecзки), który umożliwia pomiar zgodny z normami ISO 4287 i ISO 4288. Pomiar odbywał się na długości próbki 2,5 mm przy prędkości głowicy 1 mm/s. *Dla każdej próbki wykonano po trzy pomiary w różnych miejscach: tylna część pięty, boczna część goleni oraz strefa podparcia śródstopia – czyli te miejsca, które w praktyce są najbardziej narażone na kontakt i nacisk, sumarycznie uzyskując 6 pomiarów dla każdego z zastosowanych w produkcji ortez materiałów*” Nie jest do końca jasne dlaczego uzyskano 6 pomiarów, skoro ortezы były mierzone w trzech miejscach, a wcześniej podano informację, że z każdego z wykorzystanych materiałów wydrukowano po 3 ortezы?
19. Str. 102, rysunek 4.31, na rysunku zaprezentowano tylko 2 z 3ch wymienionych wcześniej miejsc pomiaru parametrów chropowatości powierzchni. Jaki jest tego powód?

20. Str. 103, rysunek 4.32, bardzo małe liczby na skali odchyłek pokazanej po prawej stronie tego rysunku. O ile w wersji komputerowej rozprawy, przy powiększeniach większych niż 300% istnieje możliwość przeanalizowania wielkości uzyskanych odchyłek, o tyle w wersji papierowej jest to niemożliwe.
21. Str. 107, uwaga do wyników pomiarów chropowatości powierzchni zaprezentowanych na tej stronie, ale i do wszystkich zrealizowanych pomiarów chropowatości powierzchni. Wybrane parametry Ra i Rq mają bardzo podobny charakter i ich wartości są ze sobą mocno skorelowane. Przy założeniu, że ocenie podlega parametr Ra (jego wybór do oceny chropowatości powierzchni, jako podstawowego parametru wykorzystywanego w badaniach chropowatości, uważam za poprawny), zamiast oceny parametru Rq rozsądniej byłoby wybrać, np. parametr RSm, który pokazałby zmiany w profilu chropowatości dla różnych materiałów, w kierunku poziomym. Parametry Ra i Rz są parametrami ocenianymi w kierunku pionowym, więc dobierając do nich parametr RSm Autorka uzyskalaby informację o zmianach w profilu chropowatości w obu kierunkach.
22. Str. 113, rysunek 5.11, brak podania jednostki dla wielkości zaprezentowanych na osi y.
23. Dalej na str. 113, odnośnie badań z zastosowaniem kamery termowizyjnej. Dlaczego Autorka wybrała do badania akurat temperatury: 220, 230 i 260 °C, a nie np. temperatury równomiernie rozłożone w przedziale 220 - 260 °C, czyli 220, 240 i 260 °C?
24. Str. 114, rysunek 5.13, szkoda że części b) i c) tego rysunku nie zawierają takiej legendy oznaczeń jak po lewej stronie części a) tego rysunku. Dzięki wyraźnym opisom temperatur w punktach kontrolnych, rysunek przedstawiony w części a) jest zdecydowanie najłatwiejszy do analizy.
25. Podrozdział 5.1.3, dlaczego badania z zastosowaniem kamery termowizyjnej zostały wykonane tylko i wyłącznie dla materiałów PLA i PLA-CF. W próbach wytrzymałościowych tylko dla PLA zaobserwowano spadek wytrzymałości materiału po wzbogaceniu go włóknami węglowymi. Ciekawe byłoby wykonanie badań z zastosowaniem kamery termowizyjnej również dla przynajmniej jednego materiału, dla którego dodanie włókien węglowych powodowało wzrost wytrzymałości materiału.
26. Str. 122, Tabela 10 i analiza wykonanej oceny wskaźników techniczno-ekonomicznych na stronach 122-123, w tabeli 10 wyjaśnia się nieścisłość, o którą pytałem w uwadze krytycznej nr 14, koszty produkcji w wariantcie komercyjnym przyjęto jako 2 zł za każdy zużyty gram materiału. Niestety nie jest to koniec nieścisłości związanych z analizą wskaźników ekonomicznych. W dalszej części opisującej wnioski z tej analizy, wartości uzyskane dla wariantu niekomercyjnego są porównywane z wartościami uzyskanymi dla wariantu komercyjnego, ale przy założeniu że koszty produkcji to 1 zł za każdy gram materiału, a nie tak jak pokazano w Tabeli 10 dwa złote. Z tego względu w kilku miejscach pojawiają się nieścisłości typu: „Pod względem kosztu komercyjnego (czyli ceny rynkowej materiałów), najdroższym wariantem okazuje się PLA (260 zł), a najtańszymi – PA12 oraz PA12 - CF (po 188 zł). W ujęciu kosztów niekomercyjnych (uwzględniających warunki produkcji poza przemysłem np. w laboratoriach czy małych pracowniach), *wartości te są nieco większe i wahają się od 136,38 zł (PA12 - CF) do 147,13 zł (PLA).*” A to przecież nieprawda. Z tego samego względu, z zawartością Tabeli 10 nie zgadza się również zawartość rysunku 5.17.
27. Str. 123, „Różnice w kosztach są również widoczne po przeliczeniu na dolary amerykańskie. Najtańszym materiałem jest PETG (37,08 USD), a najdroższym PLA (37,89 USD).” To spostrzeżenie jest dosyć oczywiste. Jeżeli pewne koszty wyrażone w złotych podzielimy przez kurs wymiany waluty (wszystkie koszty przez tą samą

liczbę) to nie ma możliwości żeby okazało się, że w innej walucie zależności pomiędzy kosztami się zmieniły.

28. Str. 123-124, „W niniejszym rozdziale przedstawiono porównanie właściwości mechanicznych ortez stawu skokowego (AFO), wykonanych metodą przyrostową (FDM) z wykorzystaniem ośmiu różnych materiałów: czterech bazowych – PLA, PETG, ABS, PA12 – oraz ich odpowiedników wzmacnianych włóknem węglowym (PLA-CF, PETG-CF, ABS-CF, PA12-CF). W analizie uwzględniono krzywe obciążenie–przemieszczenie, uzyskane w próbach niszczących na maszynie wytrzymałościowej.” W rzeczywistości ortezy zostały wykonane z siedmiu materiałów, ponieważ dla ABS-CF nie udało się wykonać ani jednej kompletnej ortezy.
29. Str. 124, „Dla każdego materiału wykonano trzy próbki pełnowymiarowych ortez AFO, które następnie poddano badaniom statycznym.” Dla każdego materiału z wyjątkiem ABS-CF.
30. Str. 126, „Dla PLA średnia siła niszcząca wyniosła 342,9 N, a przewidywana siła graniczna z MES – 298,4 N. Dla PLA-CF odpowiednie wartości to 212,8 N oraz 215,01 N, co świadczy o wysokiej wiarygodności wyników uzyskanych za pomocą MES przy prawidłowo dobranych parametrach materiałowych.” we wcześniejszych fragmentach tego podrozdziału Autorka napisała, że pierwotnie zamierzała porównać wyniki analizy MES uzyskane na podstawie przyjęcia parametrów materiałowych podanych przez producentów materiałów z wynikami uzyskanymi na drodze zrealizowanych badań wytrzymałościowych dla próbek wydrukowanych przez Autorkę z różnych materiałów. Ze względu na duże rozbieżności pomiędzy tymi metodami Autorka zdecydowała się na porzucenie pierwszego z wymienionych wariantów i zaprezentowanie wyników jedynie dla wariantu drugiego. W tym kontekście, zacytowany fragment pracy nie jest w mojej ocenie do końca prawidłowy, ponieważ dla wszystkich materiałów parametry materiałowe zostały dobrane z zastosowaniem tej samej procedury. Wobec tego ogólny wniosek z analizy wyników przedstawionych w Tabeli 12 jest taki, że dla 4ch materiałów wyniki uzyskane dla analizy MES znacząco odbiegają od wyników uzyskanych z wykonanych prób wytrzymałościowych dla gotowych ortez, a tylko dla 2ch z nich można mówić o zbliżonych wynikach obu metod. Także w odniesieniu do analizowanych modeli ortez symulacja MES dostarcza wiarygodnych wyników jedynie dla ok. 33 % przypadków.
31. Str. 127, dalej o przeprowadzonych analizach MES: „Przyczyn tak dużej różnicy może być kilka: po pierwsze, rzeczywista wytrzymałość materiału może być znacznie wyższa niż podana w dokumentacji technicznej; ...”. Nawiązując do słów Autorki zawartych w podrozdziale 5.3.2 rozprawy i przytoczonych przeze mnie w poprzedniej uwadze, nie zgadzam się z zacytowanym powyżej zdaniem ponieważ informacje podane w dokumentacji technicznej nie były wg Autorki wykorzystywane w analizie MES.
32. Str. 127-128, „W analizie uzupełniono również dane dotyczące materiałów PA12 i PA12-CF. Dla czystego PA12 przewidywana siła graniczna uzyskana z MES wyniosła 295,5 N, podczas gdy siła niszcząca zmierzona w badaniu doświadczalnym osiągnęła 230 N. Różnica ta sugeruje tendencję do niewielkiego przeszacowania wytrzymałości przez model numeryczny, jednak wynik mieści się w akceptowalnym zakresie błędu, co potwierdza użyteczność metody MES przy odpowiednim doborze parametrów materiałowych.” W jaki sposób (na jakiej podstawie) został przyjęty wspomniany „akceptowalny zakres błędu” i ile on wynosi?
33. Str. 128, „Z kolei dla kompozytu PA12-CF rozbieżność była znacznie większa – MES wskazał siłę graniczną na poziomie 496,0 N, podczas gdy rzeczywista siła niszcząca wyniosła tylko 204,8 N. Tak duże przeszacowanie może być skutkiem nieuwzględnienia

- potencjalnych defektów strukturalnych i kruchości materiału kompozytowego w modelu numerycznym. Włókna węglowe zwiększają sztywność, lecz jednocześnie mogą obniżać odporność na propagację pęknięć i wrażliwość na wady technologiczne, co powoduje spadek rzeczywistej nośności.” Wpływ wymienionych powyżej potencjalnych przyczyn na rozbieżności wyników między analizą MES a rzeczywistymi badaniami wytrzymałościowymi mógłby zostać zbadany poprzez wykonanie skanów opracowanych ortez z zastosowaniem przemysłowego tomografu komputerowego. W ten sposób Autorka uzyskałaby wiedzę na temat ew. defektów struktury wewnętrznej ortozy.
34. Uwaga ogólna do podrozdziałów 5.2.2 oraz 5.3.2. Mam wrażenie, że Autorka kilkakrotnie zmieniała koncepcje dotyczące realizacji badań i analiz zaprezentowanych w tych podrozdziałach oraz, że zapewne poszczególne koncepcje realizowane były w sporych odstępach czasu. Stąd brak spójności w części z prezentowanych w tych podrozdziałach wyników badań i ich opisów.
 35. Str. 132, Tabela 14 oraz rysunek 5.22, brak podania jednostek dla wielkości zaprezentowanych w Tabeli oraz na osi y rysunku.
 36. Str. 133, „Do porównania wykorzystano oprogramowanie CloudCompare v2.14, stosując narzędzie C2M (Cloud-to-Mesh) do wyznaczenia *odległości podpisanych* (ang. signed distances) pomiędzy siatką zeskanowaną a modelem odniesienia.” Te „odległości podpisane” to zapewne tłumaczenie wprost z języka angielskiego na polski (być może z zastosowaniem tłumacza on-line). Słowo „signed” odnosi się w tym przypadku do znaku, z którym podawana jest odchyłka, czyli znaku „+” oznaczającego punkty, dla których odchyłki znajdują się na zewnątrz referencyjnego modelu CAD, lub znaku „-”, który oznacza punkty, dla których odchyłki znajdują się wewnątrz referencyjnego modelu CAD.
 37. Dalej na str. 133, „Kolorystyka rozkładu wskazuje dominację barwy zielonej, co jednoznacznie potwierdza relatywnie wysoką zgodność wymiarową na znacznej części powierzchni, zwłaszcza w obrębie goleni oraz w środkowej części podeszwy.”. W programach służących do analizy chmur punktów, takich jak opisywany w pracy program CloudCompare, rozkład barw można tak dobrać, żeby np. barwa zielona obejmowała 90% zakresu zmienności odchyłek w poszczególnych punktach. W takiej sytuacji nawet odchyłki o wysokich wartościach mogą zostać zaznaczone zielonym kolorem. Także nie mogę zgodzić się z przytoczonym powyżej stwierdzeniem. W przypadku rysunku 5.23, którego dotyczy zacytowany fragment rozprawy zapewne opisana przeze mnie sytuacja nie miała miejsca, jednakże przez to, że skala odchyłek zaprezentowana po prawej stronie rysunku jest bardzo mała, nie ma możliwości dokładnej analizy wartości odchyłek.
 38. Str. 134, „Największe odchyłki, dochodzące lokalnie do około +7,77 mm, zaobserwowano w strefie palców oraz dolnej części przodostopia, co obrazuje obecność stref zaznaczonych kolorem czerwonym. Prawdopodobną przyczyną takich deformacji jest nagromadzenie warstw materiału w obszarach o zmiennej geometrii oraz możliwe lokalne przegrzanie wytłaczanego materiału w końcowej fazie druku. Z kolei punkty oznaczone kolorem niebieskim (odchyłki do -2,9 mm) występowały sporadycznie, głównie na cienkich krawędziach bocznych i mogą świadczyć o niedoborze materiału lub zbyt cienkiej pierwszej warstwie.” W cytowanym fragmencie Autorka upatruje przyczyny wysokich wartości odchyłek geometrycznych w przebiegu procesu drukowania 3D. Wysokie wartości odchyłek mogą również być spowodowane niedokładnym dopasowaniem otrzymanej w wyniku pomiarów chmury punktów do modelu CAD ortozy lub błędami w procesie skanowania 3D w miejscach o dużej zmienności kształtu, trudno dostępnych dla światła emitowanego przez skaner lub skanowanych pod zbyt dużym kątem (w odniesieniu

- do kierunku światła emitowanego przez skaner). Zresztą Autorka sama dochodzi do podobnych wniosków w dalszej części pracy (na stronie 137).
39. Rysunki 5.24, 5.26, 5.29, 5.31 oraz 5.33, brak podania jednostek dla wielkości zaprezentowanych na osiach x wymienionych rysunków.
 40. Str. 136, w przypadku mapy odchyłek zaprezentowanej na rysunku 5.25 maksymalne wartości odchyłek zostały uzyskane na krawędziach badanej ortezy, a w szczególności na jej krawędzi górnej. Może to wskazywać na problemy z obróbką surowej chmury punktów uzyskanej jako wynik skanowania 3D ortezy.
 41. Str. 138, na tej stronie zaprezentowano wyniki skanowania 3D ortezy wykonanej z materiału PET-G. Dlaczego tylko dla ortezy wykonanej z tego materiału nie zaprezentowano histogramu rozkładu odchyłek geometrycznych?
 42. Str. 139-140, „Histogram na rys. 5.29 przedstawiający rozkład odchyłek geometrycznych wykazuje układ zbliżony do rozkładu normalnego, choć obserwuje się lekkie spłaszczenie i niesymetryczność rozkładu, wskazujące na tendencję do dodatnich odchyłek.” To prawda, natomiast w tym przypadku Autorka nie wspomina o wyraźnie widocznej na tym histogramie bimodalności rozkładu, która nie jest charakterystyczna dla rozkładu normalnego.
 43. W odniesieniu do analiz zaprezentowanych w podrozdziale 5.3.5 zastanawiają mnie kryteria przyporządkowania precyzji odwzorowania geometrii do poszczególnych grup, takich jak bardzo dobra jakość/precyzja odwzorowania, dobra czy umiarkowana jakość/precyzja odwzorowania. Dla przykładu, dla ortezy wykonanej z PETG-CF jakość odwzorowania geometrycznego jest oceniona jako bardzo dobra, dla sytuacji w której większość odchyłek dla punktów na powierzchni ortezy mieściła się w zakresie od $-1,5$ mm do $+2,5$ mm względem modelu nominalnego. Dla ortezy wykonanej z PA12-CF, większość odchyłek dla punktów na powierzchni mieści się w zakresie od -2 mm do $+3$ mm względem modelu CAD, a precyzja odwzorowania oceniona została jako umiarkowana. Proszę o wyjaśnienie jakie są kryteria uznania odwzorowania badanych powierzchni za bardzo dobre, dobre, umiarkowane, itp.
 44. Str. 146, „Z kolei PETG-CF, analizując wyniki próbek, uzyskał najwyższe wartości wytrzymałościowe spośród wszystkich analizowanych materiałów. W próbach rozciągania osiągnięto $\sigma = 45,61$ MPa, a w próbach zginania $\sigma = 59,79$ MPa. Jednocześnie materiał ten cechował się najniższą chropowatością powierzchni ($R_a \approx 3,3 \mu\text{m}$), co pozytywnie wpływa na komfort użytkowania ortezy oraz pozwala ograniczyć czasochłonne operacje wykańczające. PETG-CF łączył wysoką odporność uderową, dobrą jednorodność warstw oraz estetyczny wygląd powierzchni. Podobnie jak w przypadku PA12, PETG-CF jest także materiałem uznawanym za biokompatybilny. Minusem pozostaje wydłużony czas druku oraz możliwość występowania lokalnych deformacji geometrycznych, które mogą być wynikiem naprężeń resztkowych lub nierównomiernego rozkładu włókien w strukturze.” Ten wniosek jest prawdziwy w kontekście badań materiałowych próbek, jednakże dla badań gotowych ortez wniosek dotyczący chropowatości powierzchni jest zupełnie inny. Wartość badanych parametrów chropowatości ortezy wykonanej z PETG-CF wykraczała poza skalę profilometru i była najgorsza ze wszystkich materiałów uwzględnionych w porównaniu. Ten rozdział nie jest podsumowaniem badań materiałowych tylko rozdziałem zawierającym dyskusję i wnioski z wszystkich zrealizowanych badań, więc wyniki badań gotowych ortez również powinny być wspomniane w cytowanym fragmencie.

45. Str. 152, „PETG okazał się bardzo stabilnym materiałem zarówno pod względem procesu druku, jak i właściwości użytkowych ortez. Charakteryzował się dobrą elastycznością i odpornością na pękanie. PETG-CF natomiast zapewnił najwyższą jakość powierzchni oraz największą regularność geometryczną wśród wszystkich badanych materiałów kompozytowych. Jego proces przetwórczy był stabilny, a strukturę cechowała odporność na delaminację. Mimo zwiększonej sztywności, materiał ten nadal utrzymywał dobrą jakość funkcjonalną, jednak kosztem nieco niższej odporności na pękanie.”. To w zasadzie prawda, tylko dlaczego nie wspomniano tutaj o najwyższych wartościach parametrów chropowatości ortezu wykonanej z PETG-CF spośród wszystkich analizowanych materiałów, wykorzystanych do produkcji ortez? Przecież w rozprawie niejednokrotnie Autorka podkreślała, że chropowatość powierzchni, szczególnie tych stykających się ze skórą pacjenta, jest bardzo istotnym parametrem dla spersonalizowanych ortez stawu skokowego. Czytając cytowany fragment znowu ma się wrażenie, że wnioski dotyczą tylko i wyłącznie wyników badań próbek materiałowych, szczególnie cytując fragment: „... PETG-CF natomiast zapewnił najwyższą jakość powierzchni ...”, a przecież wyniki badań gotowych ortez wykazały, że było zupełnie inaczej.
46. Strona 153, „Do analizy wykorzystano test t-Studenta dla prób niezależnych, którego celem było określenie, czy istnieją istotne różnice pomiędzy średnimi wartościami badanych parametrów w parach materiałów: z CF i bez CF. *Wersja dla prób niezależnych zakłada, że próbki pochodzą z populacji o rozkładzie normalnym*, a dane w grupach są niezależne.”. Czy domniemana normalność rozkładów została sprawdzona z zastosowaniem wybranego z testów statystycznych, które są do tego wykorzystywane (np. testy Shapiro-Wilka lub Kołmogorowa-Smirnowa)?
47. Str. 160, „Hipoteza zweryfikowana została pozytywnie jedynie dla próbek do rozciągania i zginania dla 2 z 4 badanych materiałów (PET-G z CF i PA12 z CF), natomiast w ujęciu globalnym – uwzględniając badania ortez oraz próbek – odrzucono ją dla 3 z 4 badanych materiałów kompozytowych (PLA-CF, PETG-CF oraz ABS-CF), w sposób warunkowy – dla PETG-CF oraz PA12-CF, *w opinii autorki, potrzebne byłyby dodatkowe badania na większej próbie gotowych ortez, z większym zróżnicowaniem parametrów i warunków procesu wytwarzania*.” Ciężko nie zgodzić się z Autorką, ale skoro formułuje ona taką opinię, to dlaczego nie zrealizowała takich badań w zakresie ocenianej rozprawy doktorskiej?
48. Str. 161, „Wytworzenie jednej spersonalizowanej ortezu stawu skokowego przy użyciu niskobudżetowego sprzętu FDM, wspieranego przez skanowanie 3D i cyfrowy model CAD, umożliwi produkcję w czasie krótszym niż 24 godziny i przy koszcie jednostkowym nieprzekraczającym 800 zł.”. Dlaczego Autorka przyjęła akurat takie kryteria porównania, tzn. „produkcja w czasie krótszym niż 24 godziny i koszt jednostkowy nieprzekraczający 800 zł.”? Przypuszczam, że przyjęte kryteria określają czas i koszt wymagany na wyprodukowanie ortezu z zastosowaniem dotychczas stosowanych metod, ale brak takiej informacji w treści rozprawy doktorskiej.
49. Ogólna uwaga do rozprawy doktorskiej: zaobserwowane zależności oraz wnioski wyciągnięte z analizy wyników zrealizowanych badań są bardzo istotne dla dalszego rozwoju w zakresie projektowania oraz wytwarzania ortez stawów, jednakże szkoda, że nie zostały one potwierdzone w praktyce poprzez zastosowanie ortez wykonanych z materiałów, które zostały zidentyfikowane jako mające największy potencjał w tym obszarze, u pacjentów wymagających zastosowania ortez stawu skokowego, jak chociażby u 4-letniej pacjentki, dla której projektowana była w ramach tej rozprawy doktorskiej ortez, która podlegała analizom zrealizowanym w ramach rozprawy.

Ogólna ocena rozprawy

Zawartość rozprawy doktorskiej jest zgodna z tematem zaakceptowanym przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej. Temat, który został podjęty przez Doktorantkę jest z całą pewnością istotny zarówno z poznawczego jak i praktycznego punktu widzenia. Cel pracy, zdefiniowany przez Autorkę jako kompleksowa ocena właściwości mechanicznych, użytkowych i ekonomicznych ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostową metodą FDM z wykorzystaniem kompozytowych materiałów termoplastycznych został w całości osiągnięty. Zweryfikowane zostały również postawione w pracy hipotezy badawcze. Pierwsza z nich, rozpatrywana osobno dla trzech par materiałów (każda składająca się z materiału bazowego i materiału kompozytowego wzbogaconego włóknami węglowymi), dotycząca osiągania przez materiały kompozytowe wyższych parametrów wytrzymałościowych i sztywności w porównaniu do materiałów bazowych została odrzucona dla 2ch z trzech par materiałów. Druga hipoteza, zakładająca, że chropowatość powierzchni ortez stawu skokowego wytwarzanych technologią FDM z tworzyw kompozytowych, bez zastosowania dodatkowej obróbki wykończeniowej będzie wyższa niż w przypadku materiałów polimerowych bez włókien węglowych, została potwierdzona dla wszystkich par materiałów.

Zaprezentowane we wcześniejszych rozdziałach tej recenzji uwagi zarówno do strony merytorycznej jak i edytorskiej pracy nie mają wpływu na moją wysoką ocenę rozprawy. Dodatkowo uważam, że wyniki pracy mają duży potencjał aplikacyjny. Zostały już wdrożone w praktyce przez zespół Zakładu Wytwarzania Przyrostowego i Rzeczywistości Wirtualnej działający na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ale mają również dużą szansę na aplikację w produkcji ortez stawu skokowego w przemyśle medycznym oraz na zaadaptowanie do innych grup produktów medycznych o podobnych wymaganiach biomechanicznych.

Do najważniejszych osiągnięć tej rozprawy należy zaliczyć:

- zbadanie i określenie wpływu zastosowania materiałów kompozytowych (dodatku włókien wzmacniających), na wytrzymałość mechaniczną wytworzonych metodą ekstruzji ortez stawu skokowego,
- zbadanie i określenie wpływu zastosowania materiałów kompozytowych na wartość parametrów chropowatości powierzchni wytworzonych metodą ekstruzji ortez,
- zaprojektowanie przez Doktorantkę stanowiska do badań wytrzymałościowych gotowych ortez,
- ocenę stabilności procesu wydruku ortez stawu skokowego z zastosowaniem różnych materiałów,
- przeprowadzenie analizy porównawczej kosztów i czasu produkcji ortez drukowanych przyrostowo, w celu określenia efektywności wdrożenia technologii druku 3D w praktyce klinicznej oraz wyboru materiału zapewniającego odpowiednie właściwości materiałowe przy korzystnych wskaźnikach ekonomicznych.

Podsumowując, rozprawa stanowi w mojej ocenie oryginalne rozwiązanie przez Doktorantkę zagadnienia naukowego, potwierdza jej ogólną wiedzę teoretyczną w uprawianej dyscyplinie naukowej oraz wykazuje umiejętność Doktorantki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wniosek końcowy

Oceniana rozprawa doktorska jest oryginalnym osiągnięciem mgr inż. Justyny Rybarczyk i stanowi wkład w rozwój badań nad metodami projektowania i wytwarzania oraz nad oceną

właściwości produktów wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych, zawiera również elementy nowej wiedzy uzyskanej w wyniku zaplanowanych i przeprowadzonych przez Doktorantkę eksperymentów naukowych, poprzedzonych analizą literatury.

Na podstawie dokonanej analizy i sformułowanych ocen stwierdzam, że **rozprawa Pani mgr inż. Justyny Rybarczyk** pt. „Ocena właściwości ortez stawu skokowego wytwarzanych przyrostowo z kompozytów polimerowych” **spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące w tym zakresie aktualne przepisy** określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, poz. 1571 z późniejszymi zmianami), w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w **dyscyplinie inżynieria mechaniczna**. W związku z tym **wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Justyny Rybarczyk i dopuszczenie jej do publicznej obrony**.

Mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny rozprawy, jej potencjał wdrożeniowy, szeroki zakres przeprowadzonych eksperymentów oraz potencjalny korzystny wpływ wyników rozprawy na poprawę jakości życia osób z problemami ortopedycznymi, pomimo wymienionych we wcześniejszych częściach recenzji uwag, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy**.

