

Gliwice 09.02.2025

Szanowna Pani
dr hab. inż. Alicja Piasecka-Belkhat
Przewodnicząca Rady Dyscypliny
Inżynieria Mechaniczna
Politechnika Śląska
ul. Stanisława Konarskiego 18A,
44-100 Gliwice

Recenzja Rozprawy Doktorskiej

autorstwa mgr inż. Ramesh Kumpati, zatytułowanej:

Optimization method for ultralight aerial composite structures

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. PŚ

1. Podstawa prawna i przedmiot wykonania recenzji

Recenzję wykonano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 23.10.2024 roku.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska o tytule „Optimization method for ultralight aerial composite structures”, której autorem jest mgr inż. Ramesh Kumpati. Dyscyplina naukowa pracy doktorskiej to Inżynieria Mechaniczna.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej

Rozprawa licząca 173 stron została napisana w języku angielskim, składa się z 8 rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim, wykazu bibliograficznego o 148 pozycjach, listy rysunków, tabel oraz listy użytych w rozprawie symboli i oznaczeń.

Rozdział 1

Rozdział wprowadza w problematykę optymalizacji materiałów kompozytowych stosowanych w przemyśle lotniczym, a w szczególności w pojazdach UAV (ang. Unmanned Aerial Vehicle). Doktorant przedstawił cele rozprawy, zakres badań oraz problem naukowy. Celem rozprawy jest optymalizacja materiałów kompozytowych w ujęciu zapewnienia właściwej geometrii, wytrzymałości oraz sztywności konstrukcji pojazdu UAV przy jednoczesnym zmniejszeniu masy pojazdu, co zapewni wyższą efektywność energetyczną oraz wydłuży czasu lotu. Doktorant definiuje problem naukowy jako potrzebę stworzenia metodologii umożliwiającej projektowanie zoptymalizowanych konstrukcji lotniczych z użyciem materiałów kompozytowych przy spełnieniu wymagań mechanicznych, środowiskowych oraz technologicznych. Rozdział zawiera także przegląd dorobku naukowego Doktoranta, obejmujący publikacje w zakresie testów materiałowych, metod optymalizacji oraz przypadków ich użycia w konstrukcjach pojazdów UAV.

Rozdział 2

Rozdział przedstawia analizę literatury dotyczącą metod optymalizacji, w tym optymalizacji parametrycznej, geometrycznej oraz topologicznej. Doktorant omówił również teorię klasycznych płyt laminowanych z uwzględnieniem zagadnień wyboczenia konstrukcji (modele liniowe i nieliniowe), która stanowi podstawę analiz w zakresie materiałów kompozytowych. Doktorant szczególną uwagę poświęca zastosowaniu włókien naturalnych, takich jak juta i ich właściwościom mechanicznym w porównaniu z materiałami syntetycznymi. Rozdział zawiera przegląd najnowszych osiągnięć w dziedzinie algorytmów genetycznych stosowanych w optymalizacji wielokryterialnej.

Rozdział 3

W rozdziale Doktorant formułuje metodologię badawczą uwzględniając proces selekcji materiałów, projektowania geometrii oraz strategię optymalizacji wielokryterialnej z zastosowaniem algorytmów genetycznych (ang. Genetic Algorithms) w odniesieniu do pojazdów UAV. Opracowana metodologia obejmuje:

- Dobór materiałów bio-kompozytowych, takich jak kompozyty z włóknami juty i szkła,
- Proces modelowania geometrycznego, a w szczególności tworzenie modeli 3D konstrukcji, takich jak skrzydła pojazdów UAV oraz złącza typu T,

- Strategie optymalizacji wielokryterialnej wykorzystujące algorytmy genetyczne dla parametrów konstrukcyjnych takich jak masa, geometria oraz wytrzymałość,
- Analizę obciążeń uwzględniającą definicję warunków brzegowych oraz obciążeń stosowanych w analizie strukturalnej,
- Projektowanie struktur warstwowych (ang. sandwich), a w szczególności opracowanie laminatów kompozytowych o różnych orientacjach włókien i grubościach.

Rozdział 4-5

Rozdziały zawiera wyniki numeryczne i eksperymentalne związane z kluczowymi komponentami pojazdu UAV:

- Optymalizację struktury nośnej skrzydła wykonane zostało z materiału kompozytowego i wzmacnianego połączeniami typu T. W rezultacie optymalizacji uzyskano pakiet alternatywnych rekomendacji poprawiający właściwości wytrzymałości mechanicznej, sztywności skrzydła oraz redukcję masy.
- Optymalizacja rdzeni strukturalnych przekładek warstwowych skrzydła, gdzie zmienną prowadzonego eksperymentu numerycznego jest konfiguracja geometryczna
- Projektowanie i optymalizację poszycia skrzydła pojazdu UAV (modelu TS-17) ze zintegrowanymi ogniwami fotowoltaicznymi. Doktorant zastosował metodę homogenizacji, która umożliwiła analizę właściwości mechanicznych materiału skrzydła w zależności od objętości włókien. Przeanalizowano różne konfiguracje poszycia, w tym struktury warstwowe.

Rozdział 6

Rozdział przedstawia proces wytwarzania bio-kompozytów oraz walidację próbek materiału z wykorzystaniem testów mechanicznych. Uzyskane dane eksperymentalne, takie jak wyniki testów ściskania, rozciągania i zginania trójpunktowego, wykazują zgodność z wynikami symulacji. Doktorant przedstawił również dyskusję na temat wad oraz mechanizmów uszkodzeń kompozytów, takich jak rozwarstwianie włókien.

Rozdział 7

Rozdział zawiera podsumowanie analizy danych eksperymentalnych i symulacyjnych, w tym:

- Optymalizację połączeń typu T oraz ich właściwości wytrzymałościowe.
- Wyniki eksperymentalne dla płyt kompozytowych z warstwami przekładanymi.

- Analizę wytrzymałości mechanicznej i wyboczenia kompozytów.
- Optymalne sekwencje układania warstw laminatu oraz orientacje włókien.

Doktorant wykazał poprawę wytrzymałości użytych materiałów kompozytowych w tym juta oraz e-glass (ang. electric glass), przy jednoczesnym zmniejszeniu ich masy w rezultacie zastosowania optymalizacji wielokryterialnej z użyciem algorytmów genetycznych.

Rozdział 8

Wyniki uzyskane w efekcie badań numerycznych i eksperymentalnych jakie przeprowadził Doktorant w rozprawie potwierdzają postawioną hipotezę badawczą. Optymalizowane ultralekkie struktury nośne wykonane z kompozytów biodegradowalnych wykazały swoją przydatność do budowy pojazdów UAV. Przeprowadzone badania obejmowały analizy optymalizacyjne, symulacje w programie ANSYS, procesy wytwarzania próbek testowych oraz procedury testów laboratoryjnych. Rozdział podsumowuje trzy przeanalizowane w rozprawie przypadki koncentrujące się na różnych materiałach kompozytowych: epoksyd-juta, epoksyd-szkło oraz strukturze warstwowej.

- Kompozyt epoksydowo-jutowy wykazywał odkształcenia w zakresie 0.022-2.038 mm. Naprężenia von Misesa mieściły się w zakresie 45.6–5.8 MPa, wskazując na zmienną dystrybucję naprężeń w materiale i najbardziej korzystne właściwości mechaniczne w kontekście wysokiej podatności, odporności na wyboczenia oraz minimalnego ryzyka uszkodzeń przy obciążeniach roboczych.
- Kompozyt epoksydowo-szklany charakteryzował się mniejszymi odkształceniami (0.022–2.302 mm) oraz wartościami naprężeń w zakresie 42–5.5 MPa. Współczynnik bezpieczeństwa RF (ang. Reserve Factor) użyty w analizie wytrzymałościowej konstrukcji (stosunek dopuszczalnego naprężenia lub obciążenia do rzeczywistego naprężenia występującego w strukturze) pozostał na niskim poziomie, co oznaczało minimalne ryzyko przekroczenia dopuszczalnych obciążeń.
- Struktura warstwowa (ang. sandwich structure) miała najwyższe wartości odkształceń (1.984–2.302 mm), naprężenia w zakresie 57.7–5.8 MPa, ale wykazywała niższą odporność na wyboczenie w porównaniu do laminatów kompozytowych.

Wyniki optymalizacji wskazują, że ostateczny typ materiału kompozytowego zależy od wymagań aplikacyjnych:

- jeżeli priorytetem jest wytrzymałość na wyboczenie i minimalizacja masy, struktura warstwowa jest najlepszym rozwiązaniem.
- Jeżeli celem jest równowaga między kosztami a wydajnością mechaniczną, laminat epoksyd-szkło wydaje się bardziej odpowiedni.

Uzyskane wyniki sugerują dalsze badania nad zmianami geometrii, orientacji włókien oraz sekwencji układania warstw, co może poprawić wytrzymałość konstrukcji pojazdów UAV.

3. Główne osiągnięcia rozprawy

Rozprawa doktorska stanowi kompleksowe opracowanie dotyczące optymalizacji materiałów kompozytowych oraz geometrii konstrukcji nośnych pojazdów UAV. Rozprawa jest ambitnym interdyscyplinarnym przedsięwzięciem, które łączy inżynierię materiałową z zaawansowanymi metodami optymalizacji z uwzględnieniem aspektów ekologii.

Do najważniejszych osiągnięć rozprawy zaliczam:

- a) Opracowanie innowacyjnej metody optymalizacji wielokryterialnej właściwości konstrukcji nośnej pojazdu UAV z wykorzystaniem algorytmów genetycznych. W rezultacie zastosowania optymalizacji wielokryterialnej możliwe jest zwiększenie właściwości wytrzymałościowych konstrukcji skrzydła pojazdu UAV przy jednoczesnej redukcji jego masy. Zastosowanie algorytmów genetycznych w połączeniu z klasyczną teorią materiałów kompozytowych w kontekście konstrukcji pojazdów UAV stanowi istotny wkład naukowy.
- b) Walidacja eksperymentalna materiałów bio-kompozytowych w skład której weszły testy mechaniczne (ściskanie, rozciąganie, zginanie trójpunktowe) przeprowadzona zgodnie z normą ASTM D 3410-03 oraz analiza fraktograficzną oceny włókien próbek które uległy zniszczeniu. Testy wykazały zgodność z symulacjami oraz wysoką wytrzymałość bio-kompozytów w porównaniu z materiałami hybrydowymi i syntetycznymi. Wyniki testów stanowią wartościowe podsumowanie oraz inspirację dla innych badaczy.

- Grupa bio-kompozytów (ang. Natural Fiber Composites)

Juta/epoksyd (ang. Jute/Epoxy) biodegradowalny kompozyt z naturalnych włókien, cechujący się ekologicznym charakterem i umiarkowaną wytrzymałością mechaniczną, a także bio-żywica (bio-resin) zastosowana jako matryca w połączeniu z włóknami naturalnymi.

- Grupa kompozytów hybrydowych (ang. Hybrid Composites)

Juta-szkło/epoksyd (ang. Jute-Glass/Epoxy) w różnych konfiguracjach włókien szklanych i jutowych, np. 75% juta + 25% szkło oraz 25% juta + 75% szkło, wykazujące poprawioną wytrzymałość w porównaniu do czystych bio-kompozytów, lecz w dalszym ciągu zachowujących korzyści ekologiczne

- Grupa kompozytów syntetycznych (ang. Synthetic Composites)

Szkło/epoksyd (ang. E-glass/Epoxy) jako przykład klasycznego kompozytu syntetyczny o wysokiej wytrzymałości mechanicznej i odporności na obciążenia dynamiczne, a także struktury warstwowe (ang. sandwich) składające się z rdzenia wykonanego z pianki PVC w połączeniu z włóknami szklanymi i jutowymi, wykazujący najlepszy stosunek wytrzymałości do masy

- c) Wykazanie, że bio-kompozyty, takie jak laminaty z włókien juty i szkła, mogą być skuteczną alternatywą dla tradycyjnych materiałów syntetycznych (np. włókno węglowe) spełniając wymagania mechaniczne przy jednoczesnym ograniczeniu masy i zwiększeniu zrównoważenia środowiskowego.
- d) Zastosowanie modelu wielkoskalowego (ang. multiscale model) (cf. Fig. 28) który integruje skalę makro (konstrukcja) ze skalą mikro (właściwości materiału). W trakcie oceny materiałów kompozytowych w skali mikro rozpatrywano kryteria zniszczenia włókien (ang. Fiber Failure, FF) oraz osnowy (ang. Matrix Failure, MF).
- e) Przeprowadzenie optymalizacji wytrzymałości i podatności konstrukcji skrzydła pojazdu UAV pod kątem zabudowania ogniw fotowoltaicznych.
- f) Kompleksowe interdyscyplinarne podejście uwzględniające dyscyplinę inżynierii materiałowej, metody optymalizacji strukturalnej oraz walidację eksperymentalną, co czyni takie podejście wartościowym wkładem zarówno w naukę, jak i praktykę inżynierską.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

Interesującym badawczo i użytkowo aspektem rozprawy jest zdefiniowanie zadania optymalizacji wielokryterialnej, łączącego model FEM (ang. Finite Element Method) z eksperymentem numerycznym oraz ograniczeniami, wynikającymi z technologii wytwarzania biodegradowalnych materiałów kompozytowych.

W zadaniu optymalizacji wielokryterialnej struktur kompozytowych zastosowano model MOGA (ang. Multi-Objective Genetic Algorithm) oparty na algorytmie genetycznym, który iteracyjnie poszukuje najlepszych rozwiązań poprzez symulowanie procesów ewolucji biologicznej (selekcja, krzyżowanie, mutacje). Model uwzględnia szereg ograniczeń, które zapewniają zgodność z rzeczywistymi wymaganiami konstrukcyjnymi oraz wytrzymałościowymi. Proces optymalizacji wielokryterialnej poprzedziło zdefiniowanie funkcji celu oraz ograniczeń:

i) Ograniczenia projektowe:

- Zmienna projektowa: kąty orientacji warstw laminatu.
- Stałe parametry: Ustalony materiał kompozytowy, geometria próbki, warunki brzegowe oraz dyskretyzacja kąta warstw materiału $\{0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ\}$

ii) Funkcje celu:

- Minimalizacja całkowitej liczby warstw laminatu (ang. total number of plies).
- Minimalizacja całkowitej masy laminatu (ang. total weight of the laminate)
- Minimalizacja odwrotnego współczynnika bezpieczeństwa (ang. Inverse Reserve Factor, IRF).
- Minimalizacja wskaźnika deformacji przy zadanym obciążeniu (ang. Deformation Load Multiplier, DLM).
- Minimalizacja współczynnika wyboczenia BLF (ang. Buckling Load Factor)

Wprowadzając ograniczenia, że dopuszczalne obciążenie konstrukcji nie może być przekroczone, a równocześnie konstrukcja powinna być stabilna pod zadanym obciążeniem. Parametry niezmiennie w procesie optymalizacji to właściwości materiału kompozytowego, geometria próbki, warunki brzegowe, dyskretyzacja kątów warstw laminatu względem siebie. Rezultatem zadania optymalizacji były zestawy rozwiązań Pareto-optymalnych, które reprezentowały kompromis między różnymi kryteriami. Wyniki optymalizacji zostały potwierdzone eksperymentalnie poprzez testy mechaniczne (np. testy rozciągania, ściskania, zginania) oraz analizy numeryczne (metoda elementów skończonych). Doktorant analizował trzy główne przypadki optymalizacji obciążeń konstrukcji pojazdu UAV:

- Optymalizacja i analiza połączeń typu T poprzez opracowanie czterech geometrycznych wariantów połączeń typu T, różniących się materiałem (juta, e-glass, pianka PVC) oraz kształtem (z otworem i bez). Przeprowadzono symulacje metodą elementów skończonych w ANSYS oraz testy mechaniczne

(ściskanie, rozciąganie, zginanie). Optymalizacja geometrii połączeń pozwoliła zredukować naprężenia w kluczowych obszarach, takich jak styk podłużnicy (stringera) z bazą. Ponadto, konstrukcja połączenia z pianką PVC jako rdzeniem osiągnęły najlepsze rezultaty pod względem wytrzymałości i masy.

- Optymalizacja struktur warstwowych z rdzeniem falistym (z-core) zapewniającej wysoką sztywność przy minimalnej masie. Doktorant przeanalizował siedem konfiguracji rdzenia (zmienne: wysokość, kąt, grubość), ponadto przeprowadził symulacje statyczne i quasi-statyczne w oprogramowaniu ANSYS (np. testy trójpunktowego zginania). Struktury z e-glass osiągnęły wyższe wartości krytycznego obciążenia wyboczeniowego, ale jutta oferowała korzystny kompromis między wytrzymałością a ekologią. Optymalizacja rdzenia zmniejszyła masę struktur przy zachowaniu ich właściwości mechanicznych.
- Optymalizacja skrzydła pojazdu UAV z wbudowanymi ogniwami fotowoltaicznymi w trzech wariantach: (i) ogniwo fotowoltaiczne między warstwami włókien szklanych, (ii), ogniwo pod warstwą poliuretanu i włókien szklanych oraz (iii) ogniwo na powierzchni laminatu bez ochrony. Przeprowadzono symulacje mechaniczne i testy wytrzymałościowe. Laminaty z warstwą poliuretanu zapewniły najlepszą ochronę ogniw przed uszkodzeniami mechanicznymi. Integracja ogniw zwiększyła funkcjonalność pojazdu UAV przy minimalnym wzroście masy.

Rozprawa mgr. inż. Ramesha Kumpatiego stanowi istotny wkład w dziedzinę optymalizacji właściwości geometrycznych i wytrzymałościowych struktur kompozytowych przeznaczonych do wytwarzania ustrojów nośnych pojazdów UAV. Doktorant zaprezentował interdyscyplinarne podejście, łącząc inżynierię materiałową, zaawansowane metody optymalizacji i dbałość o aspekty ekologiczne, a także wybrane zagadnienia projektowania, symulacji oraz badań eksperymentalnych. Opracowane metody i wyniki badań mają potencjalne zastosowanie również w innych sektorach gospodarki, takich jak motoryzacja czy energetyka.

5. Uwagi krytyczne

- 5.1. Rozprawa rozważa tylko statyczne przypadki obciążeń UAV nie uwzględniając przeciążeń związanych z dynamiką (start/ładowanie/skręty) i cyklicznością obciążenia, a także pamięcią i kumulacją zmęczenia materiałowego w czasie eksploatacji pojazdu UAV. W przypadku pojazdów UAV analiza zmęczeniowa jest kluczowa, ponieważ skrzydła oraz kadłub podlega łodowym obciążeniom aerodynamicznym. Walidacja z użyciem symulacji lub eksperymentu

pozwołiłaby na ocenę trwałości zmęczeniowej struktur w warunkach historia obciążeń dynamicznych w tym wyznaczenie liczby cykli do uszkodzenia materiału. W kontekście wytrzymałości zmęczeniowej warto rozważyć podejście energetyczne, które uwzględni specyfikę materiałów kompozytowych, w tym ich anizotropowe właściwości, rozwarstwianie (delaminację), separację włókien od matrycy oraz inne mechanizmy uszkodzeń.

- 5.2. Rozdział 6 rozprawy (Manufacturing of bio-composite and validation) wskazuje na walidację statyczną wytrzymałości mechanicznej próbek materiału zgodnie z normą ASTM D3410-03. Rozprawa nie przedstawia natomiast oceny wytrzymałości zmęczeniowej, gdzie próbki poddane byłyby wielokrotnym cyklicznym oraz losowym obciążeniom, w sposób zbliżony do warunków eksploatacji pojazdu UAV. Czy Doktorant rozważa kontynuację testów zmęczeniowych wybranych materiałów kompozytowych np. zgodnie z ASTM D3479?
- 5.3. Doktorant powiela fragmenty opisu roli optymalizacji wielokryterialnej oraz zastosowania ANSYS Workbench (Strona 138 vs. Strona 49). Pierwszy fragment używa określenia „plies” (warstwy), natomiast drugi fragment zamiennie stosuje „laminas”. Oba fragmenty powtarzają te same kluczowe informacje o optymalizacji, to jest, że wynikiem optymalizacji jest front Pareto, reprezentujący kompromisy między kryteriami oraz że oprogramowanie ANSYS Workbench integruje się z algorytmem optymalizacji wielokryterialnej w procesie optymalizacji.
- 5.4. Doktorant podsumowuje (Strona 49): „MOGAs (Multi-Objective Genetic Algorithms) provide a Pareto front, which provides engineers with a thorough understanding of design trade-offs, allowing them to make more informed decisions.”, jednak ostatecznie w rozprawie nie przedstawia wspomnianej krzywej (krzywych) Pareto, podsumowując wyniki badań optymalizacyjnych w Tabelach 26-29.
- 5.5. Doktorant nie porusza w rozprawie aspektów eksploatacyjnych proponowanych materiałów, takich jak palność oraz odporność na czynniki chemiczne (zastosowania np. rolnicze) oraz nie rozważa efektów starzenia materiałów w trakcie eksploatacji pojazdu UAV (np. przyspieszone testy starzenia kompozytów).
- 5.6. W rozprawie brakuje szerszego tła i omówienia podobnych projektów naukowych i komercyjnych pojazdów UAV z zasilaniem solarnym, np. AeroVironment Helios, Facebook Aquila, SolarXOne.

- 5.7. Wykresy konturowe raportujące wyniki obliczeń symulacyjnych posiadają nieczytelne oznaczenia spowodowane zbyt małą czcionką.

6. Wniosek końcowy

W opiniowanej rozprawie doktorskiej pt.: „Optimization method for ultralight aerial composite structures”, mgr inż. Ramesh Kumpati samodzielnie rozwiązał postawione zadanie badawcze i wykazał się wiedzą oraz kompetencjami wymaganymi dla uzyskania stopnia doktora nauk technicznych. Wyniki rozprawy mogą zostać zastosowane w praktyce przemysłowej.

Rozprawa mgr inż. Ramesh Kumpati stanowi nowatorskie podejście do wielokryterialnej optymalizacji geometrii oraz właściwości materiału kompozytowego, uwzględniając zarówno redukcję masy, jak i poprawę wytrzymałości mechanicznej. Wyniki analiz eksperymentalnych i numerycznych potwierdzają skuteczność opracowanej metodologii projektowania. Dodatkowo, rozprawa ocenia potencjał bio-kompozytów jako ekologicznej alternatywy dla tradycyjnych materiałów inżynierskich. Opracowane strategie optymalizacyjne mogą zostać wykorzystane do dalszego rozwoju innych konstrukcji pojazdów UAV.

Stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Ramesh Kumpati spełnia wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim określone w art.187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022r. poz. 574 z późn. zm.). W wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Sformułowane przeze mnie uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę rozprawy.

Prof. P. Czop

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)

Katedra Robotyki i Mechatroniki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo Hutnicza im. St. Staszica
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków