

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ



INŻYNIERSKA PRACA DYPLOMOWA

Emilia Bąk

**Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy
jamnik**

Computational modeling of a prosthetic limb for a dachshund dog

Promotor:

dr hab. Tomasz Stręć, prof.uczelni

Poznań 2025

Streszczenie	4
Abstract	4
1. Wstęp	5
1.1. Wprowadzenie.....	5
1.2. Cel i zakres pracy.....	6
2. Anatomia	8
2.1. Podstawy anatomiczne aparatu ruchu psa.....	8
2.2. Anatomia kończyny górnej psa.....	11
2.2.1. Układ kostny.....	11
2.2.2. Układ mięśniowy.....	15
2.3. Jamnik – budowa i charakterystyka rasy.....	17
3. Biomechanika chodu	19
4. Projektowanie protezy kończyny górnej	22
4.1. Wymagania protez.....	22
4.2. Wybór materiałów dostępnych w wytwarzaniu protez.....	22
5. Przegląd dostępnych rozwiązań	25
5.1. Wózek inwalidzki.....	25
5.2. Protezy (egzoprotezy).....	26
5.3. Endoprotezy.....	28
6. Model matematyczny	29
6.1. Mechanika ciała stałego.....	29
6.2. Prawo Hooke’a.....	31
6.3. Związki konstytutywne.....	31
6.4. Równanie Naviera.....	32
6.5. Metoda elementów skończonych.....	33
6.6. Optymalizacja topologiczna.....	35
7. Proces modelowania protezy	38
7.1. Rozpatrywany przypadek.....	38
7.2. Zastosowane oprogramowanie.....	39
7.3. Modelowanie wstępne.....	42
8. Analiza wyników	46
8.1. Analiza statyczna.....	46
8.2. Uzyskane wyniki.....	50
8.2.1. Chód (przypadek I).....	50
8.2.1.1. Wariant 1.....	50
8.2.1.2. Wariant 2.....	53
8.2.2. Kłus (przypadek II).....	56
8.2.2.1. Wariant 1.....	56
8.2.2.2. Wariant 2.....	58
9. Optymalizacja topologiczna	60
9.1. Analizowany przypadek.....	60

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

9.2. Uzyskane wyniki.....	61
10. Wnioski.....	65
Bibliografia.....	67
Spis rysunków.....	71
Spis tabel.....	73

Streszczenie

Celem pracy było zaprojektowanie i zamodelowanie protezy kończyny przedniej dla psa rasy jamnik, uwzględniając specyficzne cechy anatomiczne oraz biomechaniczne rasy. Protezę zamodelowano w programie Autodesk Inventor Professional 2024. Wykorzystano materiał PEEK, wyróżniający się wysoką wytrzymałością mechaniczną i niską masą, co zwiększa komfort użytkowania. Symulacje chodu i kłusu wraz z optymalizacją topologiczną wykonaną w programie Ansys pozwoliły na ocenę wydajności protezy oraz redukcję jej masy bez utraty funkcjonalności. Opracowanie dostarcza danych do dalszych badań nad projektowaniem protez dla zwierząt, wskazując na konieczność eksperymentalnych testów w celu pełnego uwzględnienia specyfiki ruchu i interakcji z podłożem oraz tkankami.

Abstract

The aim of the study was to design and model an anterior limb prosthesis for a dachshund dog, taking into account the specific anatomical and biomechanical features of the breed. The prosthesis was modeled in Autodesk Inventor Professional 2024. PEEK material was used, distinguished by high mechanical strength and low weight, which increases the comfort of use. Simulations of gait and trot along with topological optimization performed in the Ansys program allowed to assess the performance of the prosthesis and reduce its weight without losing functionality. The study provides data for further research into the design of prostheses for animals, pointing to the need for experimental testing to fully account for the specificities of movement and interaction with the substrate and tissues.

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Wraz z rosnącą popularnością psów jako towarzyszy w ludzkim życiu, które wraz z swoim właścicielem biegają, wybierają się na wędrówki i spędzają aktywnie czas wolny, zauważono rozwój usług skierowanych do pupili. Jedną z tych usług jest weterynaria, która w ostatnich latach rozwija się w sposób dynamiczny. Zyskując nowe narzędzia diagnostyczne i terapeutyczne, które jeszcze kilka dekad temu były dostępne wyłącznie dla ludzi. Dziś weterynarze dysponują zaawansowanymi technikami obrazowania, takimi jak tomografia komputerowa (CT) i rezonans magnetyczny (MRI), które pozwalają na precyzyjne diagnozowanie urazów i schorzeń. Coraz bardziej powszechne stają się również specjalistyczne zabiegi chirurgiczne, takie jak operacje ortopedyczne czy neurochirurgiczne, które mogą przywrócić sprawność ruchową zwierzętom po ciężkich urazach. Współczesna weterynaria integruje także nowe technologie, takie jak biomateriały i druk 3D, co otwiera zupełnie nowe możliwości w zakresie tworzenia indywidualnie dopasowanych protez i implantów.

Tak jak w przypadku ludzi, by proteza była bardziej komfortowa w użytkowaniu można ją poddać indywidualizacji anatomicznej i funkcjonalnej, czyli dopasowaniu wyrobu do budowy anatomicznej i potrzeb, wymagań pacjenta. Podczas całego procesu projektowania i wytwarzania indywidualnej protezy wymagany jest kontakt z pacjentem. To on podczas przymiarek protezy lub konsultacji projektu poinformuje o niedogodnościach w użytkowaniu protezy lub jej niewłaściwym rozmiarze. W przypadku zwierząt komunikacja ta jest praktycznie niemożliwa – jako projektanci możemy obserwować jedynie reakcje zwierzęcia na wyrób i dzięki nim oraz naszej wiedzy korygować budowę protezy. Projektowanie protez dla psów stanowi duże wyzwanie, ponieważ różnorodność ras wiąże się z odmiennymi cechami anatomicznymi, takimi jak kształt i wielkość kończyn, rozkład masy ciała, czy sposób poruszania się.

Kolejnym aspektem, który należy uwzględnić w procesie modelowania protezy, jest wpływ materiałów i technologii produkcji na jej funkcjonalność. Współczesne technologie, takie jak druk 3D, umożliwiają precyzyjne dostosowanie protezy do indywidualnych potrzeb psa, co pozwala na osiągnięcie wysokiego poziomu komfortu

i efektywności. Jednocześnie, wybór odpowiednich materiałów ma kluczowe znaczenie dla trwałości protezy, jej wagi oraz zdolności do amortyzacji i adaptacji do różnorodnych warunków terenowych, w jakich porusza się zwierzę.

Jamniki, ze względu na swoją specyficzną budowę ciała - długie, smukłe tułowie, krótkie kończyny, unikalny sposób poruszania się, charakterystyczną aktywność oraz predyspozycje do niektórych chorób ortopedycznych, stanowią szczególną grupę pacjentów, dla których odpowiednie modelowanie protezy może mieć kluczowe znaczenie dla powrotu do normalnego funkcjonowania. Proteza dla jamnika musi więc być zaprojektowana w sposób, który zapewni stabilność i wsparcie przy minimalnym obciążeniu kręgosłupa, jednocześnie będąc lekka, wytrzymała i komfortowa, aby dostosować się do unikalnej anatomii i dynamicznego ruchu tego niewielkiego, ale aktywnego psa.

W dobie rosnącej świadomości społecznej na temat dobrostanu zwierząt oraz rozwoju technologii, projektowanie i wdrażanie nowoczesnych rozwiązań, takich jak zindywidualizowane protezy dla psów konkretnej rasy, staje się nie tylko możliwością, ale i koniecznością. Modelowanie protezy dla jamnika wymaga interdyscyplinarnego podejścia, łączącego wiedzę z zakresu weterynarii, inżynierii materiałowej, biomechaniki oraz behawiorystyki. To podejście może zapewnić, że stworzone rozwiązania będą skutecznie wspierać zdrowie i komfort życia zwierząt, które, podobnie jak ludzie, zasługują na możliwość pełnego funkcjonowania mimo napotkanych ograniczeń zdrowotnych.

1.2. Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy jest opracowanie modelu protezy kończyny przedniej dla psa rasy jamnik, który uwzględnia specyficzne cechy anatomiczne i biomechaniczne tej rasy. Jamniki, ze względu na swoją unikalną budowę ciała – długi tułów, krótkie kończyny i zwiększoną podatność na schorzenia kręgosłupa – wymagają protez, które nie tylko odtwarzają funkcjonalność amputowanej kończyny, ale również minimalizują obciążenia na układ kostno-stawowy.

Anatomia odgrywa kluczową rolę w zrozumieniu procesów fizjologicznych i biomechanicznych, które są istotne podczas wykonywania symulacji w inżynierii biomedycznej. Szczególną uwagę poświęcono kończynie górnej psa oraz mięśniom

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

biorącym udział w jej poruszaniu. W oparciu o wzorzec FCI i dostępne źródła stworzono opis rasy jamnik. Wskazano różnice między większością ras psów oraz specyfikę budowy anatomicznej jamników – wraz z ich charakterystycznymi proporcjami.

Współpraca układu kostnego i mięśni pozwala na przemieszczanie się zwierzęcia. W pracy wskazano podział sposobów lokomocji psów wraz z ich opisem, mającym na celu przybliżenie charakterystyk danego typu ruchu. Poddano analizie także masę ciała przypadającą na kończyny przednie i miednicze podczas chodu.

Zakres pracy obejmuje także analizę literatury dotyczącej istniejących rozwiązań protez dla psów oraz identyfikację wyzwań związanych z projektowaniem protez dla jamników. Opisowi poddano materiały (PA, TPU oraz PEEK) i technologie, które mogą być zastosowane w produkcji protez, takie jak druk 3D.

Dodatkowo, przedstawiona zostanie symulacja, oparta na opisie układu ruchu i zagadnieniach teoretycznych, takich jak analiza metodą elementów skończonych (MES) oraz optymalizacja topologiczna. Analiza ma na celu ocenę wydajności zaprojektowanej protezy w różnych warunkach ruchowych – chodzie oraz klusie.

2. Anatomia

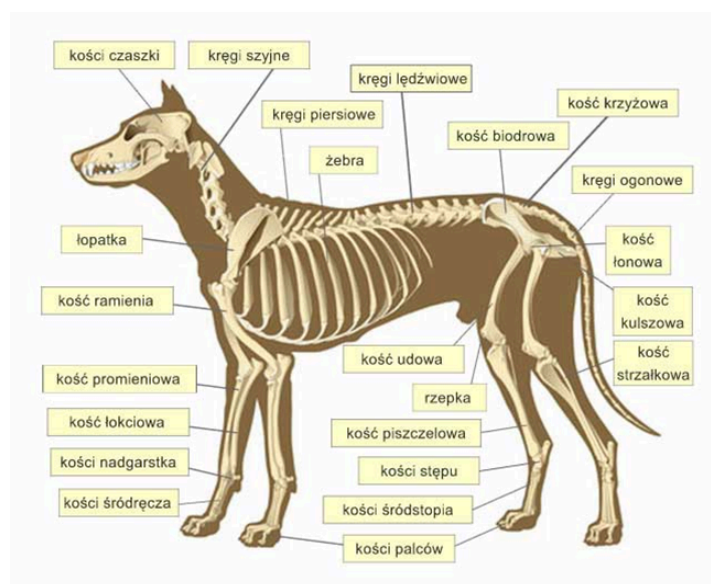
Rozdział oparty na informacjach z Źródła [1].

2.1. Podstawy anatomiczne aparatu ruchu psa

W skład aparatu ruchu psa wchodzi układ kostny (rys. 2.1.) wraz z otaczającymi go mięśniami oraz połączenia między poszczególnymi kośćmi – więzadła, stawy. Dzięki prawidłowej budowie i współpracy powyższych składowych możliwy jest ruch zwierzęcia m.in. przemieszczanie się.

Liczba kości w ciele psa to około 319, występują pewne różnice ze względu na rasy czworonogów jednakże nie są one rażące. W ramach szkieletu psa wyróżnia się czaszkę, kręgosłup z klatką piersiową, kości kończyn piersiowych oraz kończyn miednicznych. Kości te można podzielić ze względu na kształt na następujące grupy:

- kości krótkie, np. kości nadgarstka, stępu i trzeszczkowe
- kości płaskie, gdzie wymiar grubości jest mały w porównaniu do szerokości i długości np. kości czaszki i łopatki
- kości długie, np. kość ramienna i udowa
- kości różnokształtne, np. kręgi
- kości pneumatyczne, np. zatoki przynosowe

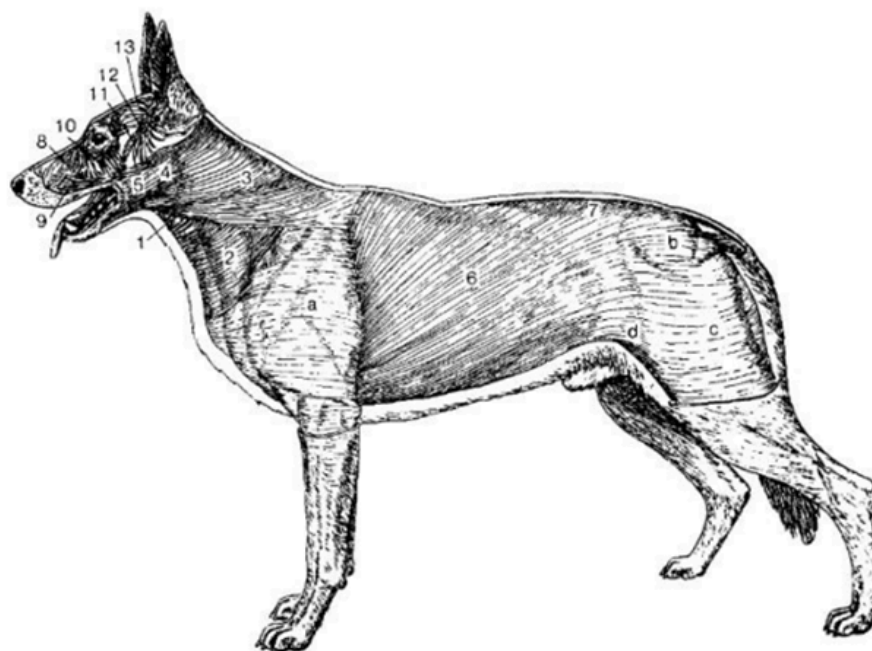


Rys. 2.1. Szkielet psa [2].

Tak, jak w ciele człowieka poszczególne kości połączone są za pomocą połączeń dopasowanych do zakresu ruchu danego obszaru w ciele zwierzęcia, dając im pełen zakres ruchu – stawy, częściowy (nieznaczny) – chrząstkozrosty lub sprawiając, że kości w tym połączeniu nie mogą przemieszczać się względem siebie – kościorosty.

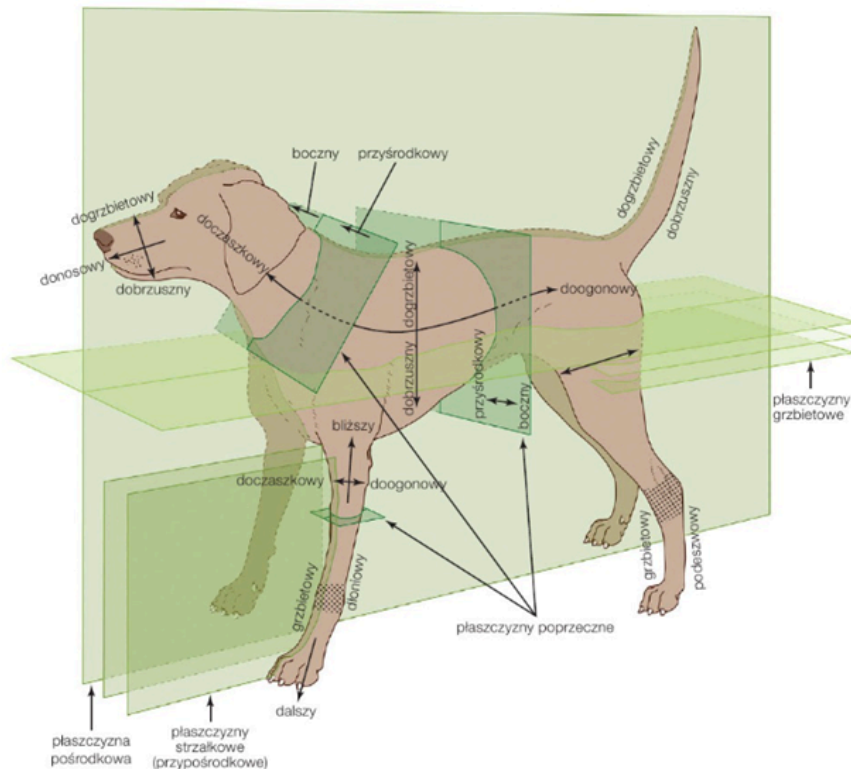
Układ kostny otaczany jest przez mięśnie, umożliwiające m.in. ruch zwierzęcia oraz przemieszczanie części ciała względem siebie (rys. 2.2.). Można wyróżnić mięśnie skórne – mięsień szeroki szyi, odpowiadające za ruchy skóry, jest najlepiej wykształcony właśnie u psów, pozwalając im na, np. otrząsanie skóry w celu odstraszania owada. W skład mięśni głowy wchodzi mięśnie twarzy, zuciowe, gardła, krtani i podpotyliczne. Każda z tych grup pełni określone funkcje związane z mimiką, zuciem, oddychaniem, a także przyjmowaniem pokarmu. Za podnoszenie głowy i ruchy szyi odpowiadają m.in. mięsień płatowy szyi oraz długi szyi. Kończynę przednią (piersiową) psa z jego tułowiem łączą mięśnie grzbietu. Odpowiadające także za poruszanie kręgosłupem zwierzęcia.

W obrębie tułowia można wyróżnić mięśnie klatki piersiowej – taki jak mięsień piersiowy głęboki, przywodzący i prostujący staw ramienny oraz mięśnie brzucha, których jedną z funkcji jest podtrzymywanie organów wewnętrznych oraz udział w oddychaniu. W układzie mięśniowym psa znajdują się także mięśnie kończyn piersiowej (przedniej) oraz miedniczej (tylnej) odpowiadające za ich ruchy. Dodatkowo za poruszanie ogonem naszych pupili odpowiedzialne są mięśnie ogona.



Rys. 2.2. Mięśnie skórne psa z odsłoniętymi mięśniami powierzchniowymi głowy [1].

Wyróżnia się następujące płaszczyzny podczas opisywania anatomii oraz ruchu zwierzęcia: płaszczyznę pośrodkową, poprzeczną i grzbietową. Płaszczyzna pośrodkowa dzieli sympatrycznie ciało na prawą i lewą połowę, innej płaszczyzny, zawsze równoległe do wyżej wymienionej to płaszczyzny przyśrodkowe lub strzałkowe. Grzbietowa jest równoległa do grzbietu zwierzęcia. Natomiast płaszczyzna poprzeczna przecina części ciała prostopadle do ich osi długiej. Na poniższym rysunku (rys. 2.3.) przedstawiono płaszczyzny w ciele psa [3].

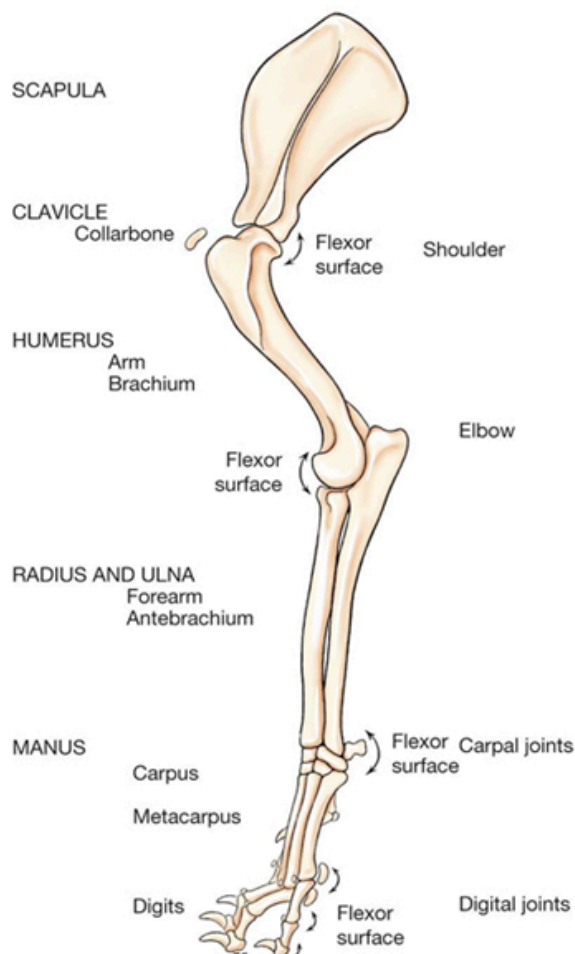


Rys. 2.3. Płaszczyzny ciała zwierzęcia [3].

2.2. Anatomia kończyny górnej psa

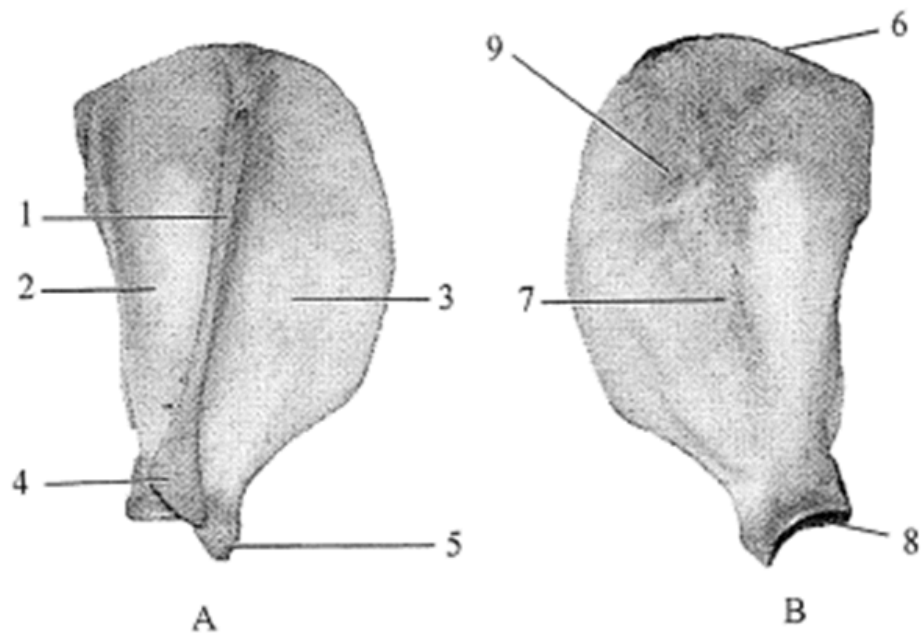
2.2.1. Układ kostny

Kończyna przednia (rys. 2.4.) (piersiowa, górna) psa składa się z łopatki, kości ramiennej, kości przedramienia, kości nadgarstka oraz kości śródręcza. W zależności od rasy wielkość poszczególnych części kończyny, ich kształt oraz liczba palców mogą się nieznacznie różnić.



Rys. 2.4. Kości kończyny przedniej wraz z ruchomością stawów [4].

Łopátka psa (rys. 2.5.) to szeroka, płaska kość znajdujaca się na górnej części klatki piersiowej psa. Jest ona tak właściwie połączeniem łopatki psa, jak i jego ramienia. Łączy się z klatką piersiową i kręgamí szyjnymi poprzez mięśnie i więzadła [5]. W przypadku psów można zaobserwować również obojczyk, zredukowany do postaci płytki kostnej lub łącznotkankowej wstawki w mięśniu ramiennie-głowowym. Szczyt łopatki określa kłób, czyli najwyższy punkt tułowia używany do pomiaru wzrostu zwierzęcia. Łopátka łączy się z kością ramienną stawem barkowym.

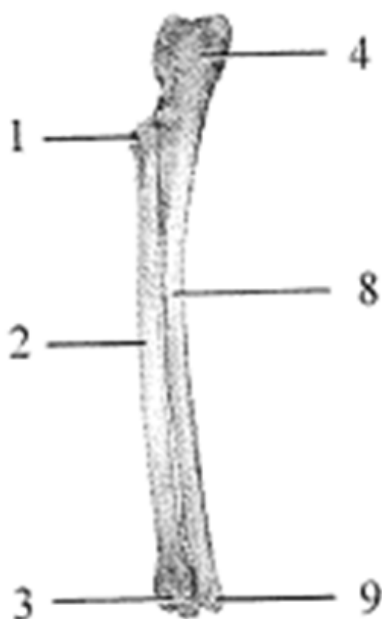


Rys. 2.5. Łopatka psa (widok od strony bocznej – A oraz przyśrodkowej – B): 1 - grzebień łopatki, 2 - dół podgrzebieniowy, 3 - dół nadgrzebieniowy, 4 - wyrostek barkowy, 5 - guzek nadpanewkowy, 6 - brzeg dogrzbietowy, 7 - dół podłopatkowy, 8 - wydrążenie stawowe, 9 - powierzchnia zębata [1].

Odcinkiem nasadowym kończyny piersiowej zwierzęcia jest kość ramienna – kość długa, biegnąca od stawu barkowego do łokciowego. Na której bliższym końcu znajduje się głowa kości ramiennej. Następnie wyróżniamy szyjkę kości, guzek większy – po stronie prawej, guzek mniejszy – na części przednio przyśrodkowej oraz usytuowany na grzebieniu kości ramiennej - guzowatość naramienną, gdzie ma swój przyczep ścięgno końcowe mięśnia naramiennego. U zwierząt mięsożernych na końcu dalszym kości ramiennej znajduje się kłykiec, na którym wyróżniamy główkę kości wraz z bloczkiem kości ramiennej, który służy do połączenia z kością łokciową. Budowa kości ramiennej psa charakteryzuje się m.in. otworem nadbloczkowym łączącym dół wyrostka łokciowego i promieniowego.

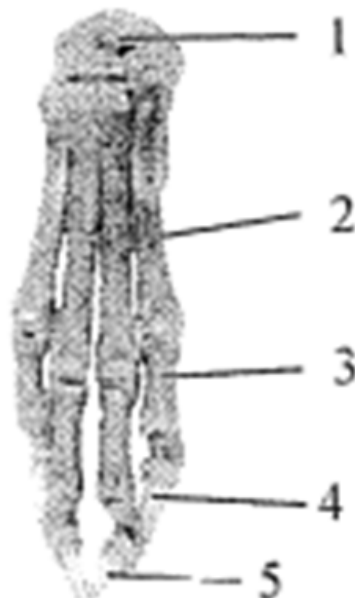
Kości przedramienia (rys. 2.6.) tworzą odcinek przejściowy kończyny przedniej. Są to kość promieniowa i kość łokciowa. Kości te współpracują ze sobą, by zapewnić stabilność i elastyczność ruchów w stawie łokciowym. Kość promieniowa składa się z głowy, trzonu – posiadającego dwie powierzchnie: doczaszkową (wypukłą) i doogonową (wklęsłą) oraz bloczku kości promieniowej, na której znajduje się powierzchnia stawowa nadgarstkowa wraz z wcięciem łokciowym do połączenia

z kością łokciową. Na bliższym końcu kości położony jest wyrostek łokciowy, biorący udział w tworzeniu stawu łokciowego. Następnie w budowie kości łokciowej można wyróżnić: trzon – najlepiej wykształcony u mięsożerców i świni, głowę kości łokciowej – na której znajduje się powierzchnia stawowa nadgarstkowa oraz wyrostek rylcowaty.



Rys. 2.6. Kości przedramienia psa: 1 – głowa kości promieniowej, 2 – trzon kości promieniowej, 3 - bloczek kości promieniowej, 4- wyrostek łokciowy, 8 – trzon kości łokciowej, 9 – głowa kości łokciowej [1].

Odcinek obwodowy kończyny stanowią kości nadgarstka wraz z kośćmi śródreżca i palców ręki, który przedstawiono na rysunku 2.7.. Nadgarstek składa się z kości krótkich, ułożonych w dwóch rzędach: w rzędzie pierwszym można wyróżnić kość nadgarstka , pośrodkowo-promieniową, łokciową i dodatkową, następnie w rzędzie dalszym znajdują się kolejno kości nadgarstkowe I, II, III oraz IV. Psy posiadają 5 kości śródreżca, a więc 5 palców, które składają się z członów palcowych bliższych (oprócz pierwszego palca), środkowych i dalszych.



Rys. 2.7. Kośćciec ręki psa - widok z przodu: 1- kości nadgarstka, 2- kości śródreżca, 3 - człon palcowy bliższy, 4 - człon palcowy środkowy, 5 - człon palcowy dalszy, 6 - kość rysikowa [1].

2.2.2. Układ mięśniowy

Układ kostny otaczany jest przez mięśnie, których zadaniem jest umożliwienie poruszania się zwierzęciu, zmiana położenia segmentów ciała względem siebie, np. ruch kończyn przednich.

W przypadku kończyny piersiowej psa wykonując ruchy współpracują niektóre mięśnie szyi, grzbietu, klatki piersiowej i samej kończyny. Mięśnie obojczykowo-ramienny i obojczykowo-główny wchodzi w skład długiego mięśnia ramiennie-głównego, który, w całości, prostuje staw ramienny oraz uczestniczy w wysuwaniu kończyny w przód. Do połączenia z tułowiem służą mięśnie grzbietu. Wśród nich można wyróżnić mięsień czworoboczny – ustalający łopatkę, ukryty pod nim równoległoboczny – przyczyniający się do unoszenia kończyny i mocujący łopatkę oraz najszerzy grzbietu – odpowiedzialny za ruch zginania w stawie ramiennym. Funkcję przywodzicieli kończyny są mięsień piersiowy zstępujący i poprzeczny oraz piersiowy głęboki i podobojczykowy, które pełnią dodatkowo rolę prostownika stawu ramiennego.

Mięśnie kończyny można podzielić na następujące segmenty: mięśnie stawu ramiennego, łokciowego, nadgarstka oraz palców ręki, wśród których wyróżnia się

grupy odpowiedzialne za dany ruch – prostowniki, zginacze, przywodziciele, odwracacze i nawracacze.

W stawie ramiennym wykonywane są ruchy wielopłaszczyznowe, dlatego też w jego skład wchodzi zarówno prostowniki, zginacze, przywodziciele i odwodziciele. Do prostowników zaliczamy mięsień nadgrzbietowy, który dodatkowo stabilizuje staw, zginacze to m.in. mięsień naramienny, który jest mięśniem powierzchownym, obły mniejszy oraz obły większy. Mięśnie zginacze stawu ramiennego wspierane są przez mięsień trójgłowy ramienia i napinacz powięzi przedramienia. Do grupy przywodzicieli i odwodzicieli należą kolejno mięsień podłopatkowy i kruczo-ramienny oraz mięsień podgrzbietowy .

Wcześniej wymieniony mięsień trójgłowy ramienia jest najsilniejszym prostownikiem stawu łokciowego. Wyróżnia się także mięsień łokciowy, który jest jedną z części mięśnia trójgłowego oraz napinacz powięzi przedramienia, będący jednocześnie prostownikiem stawu łokciowego i zginaczem stawu ramiennego. W skład zginaczy stawu łokciowego wchodzi mięsień dwugłowy ramienia oraz ramienny. Funkcję nawracacza i odwracacza stawów promieniowo-łokciowych pełnią: w przypadku nawracania – mięsień nawrotny obły i nawrotny czworoboczny, natomiast odwracaczami stawu są odwracacz i ramiennie-promieniowy.

Dla stawu nadgarstkowego mięśnie można podzielić na prostowniki oraz zginacze. Do prostowników należą: mięsień prostownik promieniowy nadgarstka, który dodatkowo stabilizuje staw, mięsień prostownik łokciowy nadgarstka, w zależności od pozycji nadgarstka – zgięty lub wyprostowany wspomaga zgięcie stawu lub prostowanie oraz mięsień odwodziciel długi palca I (zwany też prostownikiem skośnym nadgarstka). Za zginanie odpowiedzialne są mięśnie: zginacz promieniowy nadgarstka, który prostuje także staw łokciowy, zginacz łokciowy nadgarstka oraz niektóre mięśnie zginacze palców ręki.

Wśród zginaczy palców można wyróżnić zginacz powierzchowny palców, głęboki palców oraz krótkie mięśnie międzyzginaczowe, międzykostne, glistowate oraz zginacz krótki palców. W grupie prostowników znajdują się takie mięśnie jak prostownik wspólny palców, boczny palców oraz prostownik palca I.

2.3. Jamnik – budowa i charakterystyka rasy

Jak wspomniano powyżej budowa anatomiczna może różnić się nieznacznie w przypadku różnych ras psów. Jamniki to rasa psów myśliwskich, znajdująca swoje początki w średniowiecznych Niemczech. Wyróżnia się podstawowe odmiany jamników: krótkowłose (zwane też gładkowłosymi), szorstkowłose i długowłose. Następnie możliwa jest klasyfikacja ze względu na umaszczenie, np. czarne podpalane, kasztanowe, czekoladowe, kremowe [7]. Poniżej przedstawiono różne odmiany sierści jamnika.



Rys. 2.8 Różne odmiany jamników (od lewej): szorstkowłosy, długowłosy i krótkowłosy (gładkowłosy) [7].

Jamniki posiadają długi, muskularny tułów, kontrastujący z ich krótkimi kończynami (rys. 2.9.). Pomimo swojej budowy jamniki są psami żywiołowymi, potrafiącymi poruszać się bardzo szybko. Według *Wzorca FCI nr 148* budowa kończyn przednich przedstawia się w następujący sposób: są one dobrze umięśnione, bez widocznej luźnej skóry; łopatka jest mocno przylegająca i ukośnie ustawiona (90 stopni w stosunku do ramienia); ramię jest równe, co do długości, łopatce, ustawione pod kątem prostym w jej stosunku, łokcie jamnika nie powinny stykać się z jego klatką piersiową; przedramię jamnika powinno być takiej długości by prześwit psa (wysokość od podłoża do powierzchni dolnej klatki piersiowej psa) wynosił 1/3 wysokości kłębu; nadgarstki

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

powinny być ustawione bliżej siebie niż stawy barkowe; śródreżce nie strome, bez widocznego wysunięcia do przodu; palce powinny być zwarte.



Rys. 2.9. Przykładowa budowa jamnika [8].

3. Biomechanika chodu

Opis sposobów chodu został sporządzony na bazie informacji z źródeł [11-13].

Biomechanika przedniej kończyny psa opiera się na płynnej współpracy poszczególnych stawów - barkowego, łokciowego i nadgarstkowego, które wspólnie zapewniają odpowiednią elastyczność oraz stabilność podczas ruchu zwierzęcia. Współpraca tych trzech głównych stawów zapewnia psu zdolność do dynamicznego i zrównoważonego poruszania się, umożliwiając zarówno płynny chód, jak i szybkie, gwałtowne manewry.

Staw barkowy, to staw o charakterze kulistym, posiadający największy zakres ruchu spośród stawów kończyny piersiowej. Umożliwia zgięcie i wyprost w zakresie około 170° i 40° co jest kluczowe podczas wykonywania dużych kroków, szczególnie w szybkim biegu. Ponadto staw ten pozwala na ruch obrotowy 50° , co wspomaga precyzyjne manewry i zmiany kierunku. W podobnym zakresie jak rotacja odbywa się przywodzenie i odwodzenia kończyny do klatki piersiowej.

Łopatka, poruszająca się w płaszczyźnie grzbietowo-brzuszej, umożliwia przesuwanie kończyny do przodu i do tyłu, co znacząco wydłuża krok i zwiększa efektywność ruchu.

Działający jak zawias, staw łokciowy pozwala na zginanie i prostowanie przedramienia. Zakres ruchu w tym stawie wynosi 40° w pełnym zgięciu do około 170° w pełnym wyproście, co pozwala psu na skuteczne przenoszenie ciężaru ciała oraz precyzyjne odbicie się od podłoża.

Staw nadgarstkowy ma bardziej złożoną strukturę, co daje mu większą elastyczność i zdolność do absorpcji sił podczas ruchu. Zakres ruchu nadgarstka w zgięciu to około $20-30^{\circ}$, natomiast w przeproście może osiągać nawet 15° , co pozwala na dostosowanie kształtu stopy do podłoża i absorpcję wstrząsów. Podczas ruchu może występować odchylenie środkowe (promieniowe) lub boczne (łokciowe) osiągając maksymalną wartość 20° .

Podczas biegu lub skoków staw łokciowy stabilizuje się, zapewniając płynność ruchu oraz wraz z nadgarstkiem amortyzację przy lądowaniu, podczas szybkiego biegu lub skoków, minimalizując obciążenie na resztę kończyny. Zakresy ruchów

w poszczególnych stawach pozwalają na adaptację do zmiennego terenu, amortyzację wstrząsów oraz efektywne wykorzystanie siły mięśniowej podczas biegu i skoków [9].

Kończyny zwierzęcia odpowiedzialne są za poruszanie się oraz za przenoszenie ciężaru ciała. Jedna łapa przednia przenosi 30% całego ciężaru psa, a tylna 20% [10].

Wśród sposobów lokomocji psów można wyróżnić aż 6 typów chodu: stęp, inochód, amble, klus, galop i cwał. Ilość kończyn, które podczas danego ruchu mają kontakt z podłożem w tym samym czasie stanowiąc podporę dla ciała, definiują czy chód nazywany jest czterotaktowym – wszystkie kończyny, trzytaktowy – trzy kończyny lub dwutaktowy. Typy poruszania się można podzielić następująco, na:

- stęp, czterotaktowy, powolny, najbardziej męczący sposób chodu. Kończyny w tym chodzie poruszają się parami po przekątnej – za przednią w ruch wprawiana jest tylna.
- inochód, spotyka się także określenie zmęczony chód, w odróżnieniu od stępu, w ruch wprawiane są kończyny po tej samej stronie ciała. Inochód jest niepożądanym chodem. Najczęściej psy wpadają w inochód przy wolnym stępie, ale i podczas szybszego poruszania się – skrócony klus.
- amble, również czterotaktowy chód, bardzo podobny w sposobie poruszania łap do inochodu, jednakże kończyna miednicza porusza się przed piersiową. Ruch ten powoduje widoczne większe kołysanie i przesunięcie psa.
- klus, to dwutaktowy chód, gdzie podłoża dotyka równocześnie para łap po przekątnej. Podczas wykonywania tego ruchu następuje synchronizacja ruchów łap. Gdy tylna łapa przesuwa się do przodu, odpowiadająca jej łapa przednia podnosi się chwilę przed opuszczeniem jej na podłoże. Jest to najbardziej optymalny sposób poruszania się, pozwalający przebyć zwierzęciu duże odległości przy małym zmęczeniu.
- galop, jest niesymetrycznym chodem trzytaktowym, czyli dwie kończyny – piersiowa i miednicza znajdują się na ziemi równocześnie, a pozostała para pojedynczo.

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

- cwał, podobnie, jak galop jest niesymetryczny, jednakże czterotaktowym sposobem lokomocji. W cwale dochodzi do takiego momentu, gdzie widoczne jest zawieszenie ciała zwierzęcia nad podłożem, wszystkie łapy są jednocześnie oderwane od ziemi.

W zależności od źródeł podawany jest różny podział nie uwzględniający, np. galopu i kłusu lub też amble i inochodu, jako niepożądane sposoby poruszania się. Powyżej opisano wszystkie typy poruszania się w celu dokładnego przybliżenia lokomocji psa.

4. Projektowanie protezy kończyny górnej

Rozdział na podstawie pozycji [14].

4.1. Wymagania protez

Nowoczesne protezy muszą być projektowane z myślą o specyficznych potrzebach zwierząt, które różnią się znacząco od ludzkich pod względem biomechaniki ruchu i fizjologii. Podstawowym celem każdej protezy jest umożliwienie wykonywania codziennych czynności, takich jak chodzenie, bieganie, wspinanie się po schodach, skakanie czy zabawa. Proteza powinna umożliwiać poruszanie się, a zwierzę powinno powrócić do aktywności sprzed amputacji. Jednocześnie zapobiegając dodatkowym urazom czy deformacjom stawów, które mogą wynikać z niewłaściwego obciążenia kończyn.

Kolejnym istotnym wymogiem jest absorpcja wstrząsów oraz efektywny rozkład sił, co jest szczególnie ważne w przypadku większych zwierząt. Proteza powinna być wyposażona w systemy tłumiące drgania, takie jak amortyzatory, które minimalizują siły uderzeniowe podczas poruszania się.

W przypadku protez dla aktywnych zwierząt, które często biegają i skaczą, zastosowanie takich systemów jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i komfortu użytkowania. Nowoczesne technologie, takie jak skanowanie 3D, pozwalają na precyzyjne odwzorowanie kształtu resztkowej kończyny, co sprawia, że proteza może być idealnie dopasowana do zwierzęcia. Wpływa to na wygodę i komfort użytkowania protezy - ryzyko otarć, ran oraz innych problemów zdrowotnych wynikających z niewłaściwego dopasowania protezy z ciałem.

Protezy powinny umożliwiać pełny zakres ruchu, bez ograniczeń w wykonywaniu w przypadku zwierząt złożonych manewrów, takich jak nagłe zmiany kierunku, skoki czy pokonywanie przeszkód. Wymaga to zastosowania odpowiednich konstrukcji, które imitują naturalny ruch kończyny, zapewniając płynność i komfort poruszania się.

4.2. Wybór materiałów dostępnych w wytwarzaniu protez

Konstrukcje protezy powinny spełniać zapewniające jej trwałe, funkcjonalne i bezpieczne użytkowanie. W zależności od wybranego rozwiązania – wózek

inwalidzki, egzoproteza lub endoproteza, materiały użyte do wytwarzania będą inne. Przede wszystkim materiały użyte do produkcji muszą być wytrzymałe i odporne na uszkodzenia mechaniczne, aby wytrzymać codzienne użytkowanie i duże obciążenia. Dodatkowo, przy kontakcie z tkankami wewnętrznymi, ważna jest biogodność materii, czyli brak negatywnego wpływu na organizm.

Do produkcji protez najczęściej stosuje się takie materiały jak tytan, aluminium czy stopy stali nierdzewnej, które oferują wysoką trwałość przy jednoczesnym zachowaniu niskiej wagi. Masa protezy ma szczególne znaczenie dla mniejszych zwierząt, ponieważ powinna ona być na tyle lekka, aby nie przeciążać dodatkowo pozostałych kończyn. Mogłoby to prowadzić do powstania problemów zdrowotnych u użytkownika, zwierzęcia. Dlatego też przy ich małych rasach można wykorzystać mniej wytrzymały (w porównaniu z innymi materiałami), ale wystarczający w porównaniu do masy zwierzęcia materiał.

Dodatkowo w ciągu ostatnich lat zaobserwowano znaczący rozwój druku 3D w wielu dziedzinach od przemysłu i przedmiotów codziennego użytku do medycyny i wytwarzania zaopatrzenia oraz wyrobów medycznych. Technologia ta została także zaadaptowana do weterynarii i produkcji protez oraz ortez dla zwierząt, znacznie skracając proces wytwarzania wyrobów – oferując oszczędność nie tylko czasu, ale i zmniejszenie kosztów. Poliamid (PA 11) i termoplastyczny poliuretan (TPU) to jedne z materiałów wykorzystywanych w druku 3D [15, 16]. Dodatkowo w ostatnim czasie na popularności zyskuje materiał PEEK, czyli polieteroeteroketon, który dzięki swojej wysokiej odporności na ścieranie, promieniowanie UV oraz energetyczne (gamma i X), sterylizację oraz możliwość przenoszenia dużych obciążeń może być wykorzystywany w medycynie w szerokim zakresie - do druku implantów kręgosłupa, dentystycznych oraz kości. Zaletą polieteroeteroketonu jest także to, iż w porównaniu do tytanu, czy innych metali wykorzystywanych na implanty, nie zakłócają obrazowania radiologicznego (RTG, TK), co jest istotne przy późniejszej kontroli wszczepionego implantu. Właściwości PEEK klasyfikują go jako doskonały materiał do produkcji protez lub ich elementów narażonych na ścieranie lub kontakt z szkodliwym środowiskiem, przy budowie modułowej [26-28].

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

Właściwe spełnienie wymagań funkcjonalnych i strukturalnych umożliwia skuteczne zastąpienie utraconej kończyny oraz przywrócenie zwierzęciu pełnej sprawności fizycznej.

5. Przegląd dostępnych rozwiązań

Rozdział na podstawie pozycji [14].

Współczesna weterynaria oferuje różnorodne rozwiązania protetyczne dla psów, które utraciły lub mają poważne problemy z poruszaniem się ze względu na niedowład kończyn. Wśród najczęściej stosowanych rozwiązań znajdują się wózki inwalidzkie, egzoprotezy (protezy zewnętrzne) oraz endoprotezy. Wszystkie powyższe technologie mają swoje specyficzne zastosowania, które pomagają psom powrócić do sprawności ruchowej, poprawiając ich komfort życia.

5.1. Wózek inwalidzki

Jednym z najstarszych urządzeń wspomagających mobilność psów są wózki inwalidzkie. Pierwszy wózek został zaprojektowany w latach sześćdziesiątych XIX wieku dla jamnika przez doktora Lincolna Parkes'a [17].

Stosuje się je głównie w przypadku paraliżu przednich lub tylnych kończyn, uszkodzeń kręgosłupa, a także w innych przypadkach, gdzie pies nie jest w stanie samodzielnie się poruszać. Ze względu na wsparcie dla konkretnej części ciała psa, wózki można podzielić na wspierające, zastępujące kończyny piersiowe lub miednicze. Takie rozwiązanie możliwe jest tylko wtedy, gdy zwierzę posiada wystarczająco sprawność w pozostałych kończynach, które są wykorzystywane do napędzania wózka. Kolejnym rodzajem jest wózek stosowany przy całkowitym niedowładzie, amputacji kończyn. Podczas użytkowania takiego rodzaju wózka niezbędna jest pomoc człowieka przy poruszaniu się.

Wózki te składają się z lekkiej ramy na kółkach, podpórek stabilizujących ciało psa oraz uprząży. Ich główną zaletą jest łatwość dostosowania do indywidualnych potrzeb zwierzęcia, co umożliwia psom powrót do aktywności fizycznej. Możliwe jest także dopasowanie wózka do wymiarów zwierzęcia, typu schorzenia – przy niedowładzie konieczne jest odpowiednie zabezpieczenie uszkodzonych kończyn, by te nie utrudniały ruchu oraz nie były narażone na urazy, a nawet rasy (rys. 5.1.) zwierzęcia – ze względu na specyficzną budowę niektórych ras psów [18].

Dzięki wózkom psy mogą swobodnie się poruszać, ponownie biegać, spacerować i uczestniczyć w codziennych aktywnościach. Wózki są również stosunkowo łatwe w utrzymaniu i odporne na warunki atmosferyczne. Warto jednak zauważyć, że niektóre czynności, takie jak wchodzenie po schodach, mogą być ograniczone. Mimo to, wózki inwalidzkie pozostają doskonałym rozwiązaniem dla psów, które mają uszkodzone kończyny przednie lub tylne przy zachowaniu sprawności w pozostałych.



Rys. 5.1. Wózek inwalidzki dla psów Corgie wyprodukowany przez firmę Walkinpets [18].

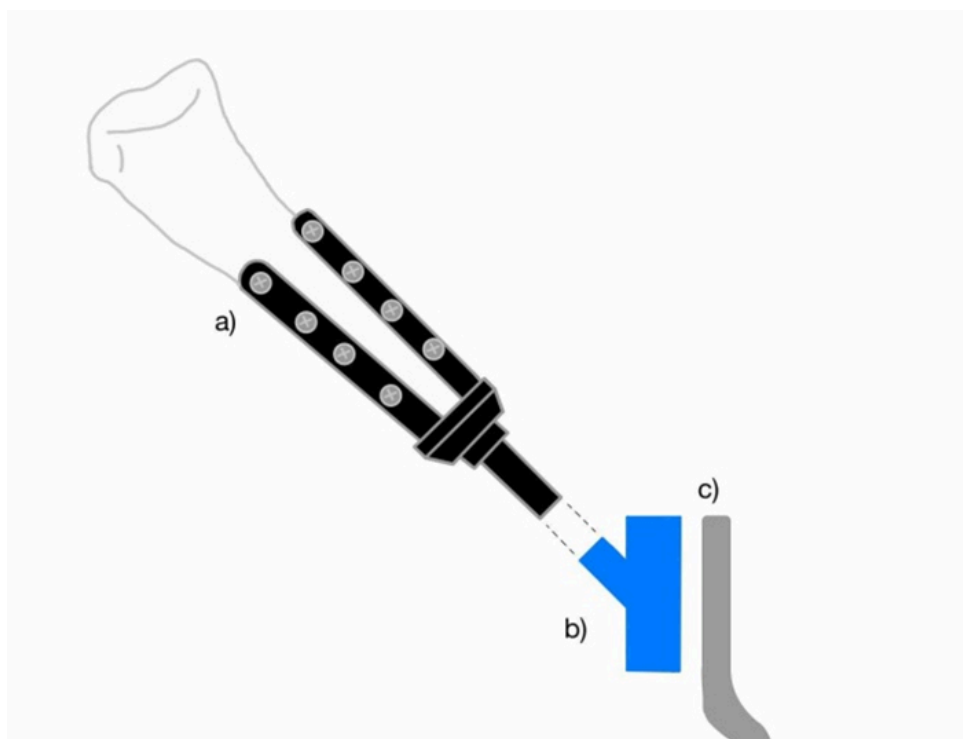
5.2. Protezy (egzoprotezy)

Egzoprotezy, czyli protezy, które zastępują utraconą kończynę zwierzęcia. Protezy te składają się podobnie jak te stosowane u ludzi z linera, leja, części właściwej, która zastępuje amputowaną kończynę oraz systemu mocującego.

Liner wykonany jest z miękkich materiałów, takich jak silikon, neopren czy elastomery, chroni przed podrażnieniami skóry oraz zapewnia lepsze dopasowanie do kończyny. Lej jest najważniejszą częścią protezy, która ma zapewnić stabilność oraz efektywne przenoszenie obciążeń, jednocześnie chroniąc przed nadmiernym naciskiem na pozostałość kończyny.

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

Obecnie dostępne są różne systemy mocujące protezę, takie jak te samoszczelne – wykorzystujące pozostałość kończyny, systemy ssące – składające się z specjalnej konstrukcji z wkładką żelową oraz uprząże, paski, kliny. Wcześniej wymienione typy mocowań są metodami nieinwazyjnymi, nie wymagającymi przeprowadzenia kolejnego zabiegu. Wyróżnia się kolejną możliwość połączenia protezy z kończyną – jest to tak zwana endo-egzoproteza. Polega ona na wprowadzeniu do kości pozostałej kończyny systemu umożliwiającego późniejsze przyłączenie protezy. Połączenie to zostało przedstawione poniżej na rysunku 5.2..



Rys. 5.2. Połączenie endo-egzoprotezy: a) implant wszczepiany w kość zwierzęcia, b) połączenie implant-proteza, c) pozostała część protezy.

W części właściwej protezy znajdują się systemy umożliwiające ruch protezy. Piony amortyzujące, montowane zazwyczaj w protezach kończyn tylnych, redukują wstrząsy podczas chodzenia i innych aktywności. Te komponenty, zbudowane z lekkich i wytrzymałych materiałów (np. aluminium, stal nierdzewna), zapewniają wytrzymałość protezy.

Przykładową protezę kończyny miednicznej psa przedstawiono poniżej na rysunku 5.3.



Rys. 5.3. Proteza dla psa [28].

5.3. Endoprotezy

Rozwiązaniem inwazyjnym, w przeciwieństwie do poprzednich technologii są endoprotezy, czyli protezy, implanty wszczepiane wewnątrz ciała. Endoprotezy najczęściej stosuje się u psów z uszkodzeniami stawów, takimi jak dysplazja stawów biodrowych czy łokciowych, a także w wyniku urazów lub chorób degeneracyjnych. Wszczepiane chirurgicznie implanty zastępują uszkodzone stawy, co pozwala psom na pełne przywrócenie funkcji ruchowych w operowanym obszarze. Główną zaletą endoprotez jest ich trwałość oraz możliwość odzyskania pełnej sprawności ruchowej. Psy po zabiegu mogą wrócić do normalnych aktywności, co wpływa na ich zdrowie fizyczne oraz redukcję bólu związanego z uszkodzeniami stawów.

Endoprotezy są jednak rozwiązaniem wymagającym skomplikowanej operacji, co wiąże się z ryzykiem powikłań i długim okresem rehabilitacji. Jest to także kosztowne rozwiązanie, które wymaga zarówno zabiegu chirurgicznego, jak i specjalistycznej opieki pooperacyjnej. Mimo to, endoprotezy są idealnym wyborem w przypadkach poważnych uszkodzeń stawów, gdzie inne metody mogą okazać się niewystarczające.

6. Model matematyczny

6.1. Mechanika ciała stałego

Mechanika ciała stałego koncentruje się na analizie zachowań oraz właściwości fizycznych materiałów w stanie stałym podlegającym różnym obciążeniom i deformacjom. W ramach tego działu mechaniki bada się zarówno aspekty statyki ciał stałych, jak i ich wytrzymałości. Szczególna uwaga poświęcona jest wpływowi obciążeń na integralność konstrukcji oraz trwałość elementów.

Mechanika ciała stałego obejmuje dwa zasadnicze obszary analizy konstrukcji:

- statyka ciała stałego – rozważa problematykę równowagi sił działających na ciała nieruchome, przy założeniu ich sztywności, co oznacza, iż odległości między punktami ciała nie ulegają zmianie pod wpływem obciążenia. Analiza statyczna uwzględnia układy sił i momenty obrotowe oraz warunki ich równowagi, co jest szczególnie istotne przy projektowaniu konstrukcji technicznych, które muszą pozostać stabilne i odporne na wpływ zewnętrznych czynników mechanicznych.
- wytrzymałość materiałów – ten dział mechaniki technicznej analizuje reakcje materiałów na różne rodzaje obciążeń, takie jak rozciąganie, ściskanie, skręcanie i zginanie, prowadząc do deformacji materiału. W ramach tej analizy uwzględnia się właściwości sprężystości i plastyczności, a także limity wytrzymałościowe, których przekroczenie może skutkować trwałym uszkodzeniem lub zniszczeniem materiału. Ważnym aspektem tej analizy jest również ocena wytrzymałości zmęczeniowej, badająca wpływ powtarzalnych cykli obciążeń na trwałość materiału oraz jego zdolność do zachowania integralności strukturalnej przez zakładany okres użytkowania [19].

Mechanika ciała stałego jest zatem fundamentem dla projektowania i oceny konstrukcji inżynierskich, pozwalając na przewidywanie reakcji materiałów na obciążenia oraz optymalizację projektów w celu zapewnienia ich długotrwałej funkcjonalności i bezpieczeństwa. Parametrami kluczowymi dla określenia, jak materiały użyte do budowy elementów konstrukcji oraz cała geometria zachowuje się pod wpływem

obciążeń są m.in. moduł Younga, współczynnik Poissona oraz wytrzymałość na ściskanie.

Moduł Younga (oznaczany jako E) jest jednym z podstawowych parametrów mechanicznych opisujących właściwości sprężyste materiałów (równanie 5.1). Wyraża on stosunek naprężenia do odkształcenia w zakresie sprężystości, co pozwala na określenie, jak bardzo dany materiał ulega deformacji pod wpływem obciążeń [24]:

$$E = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (6.1)$$

gdzie: E – moduł Younga [Pa], ε – odkształcenie liniowe względne, σ – naprężenie.

Kolejnym kluczowym parametrem jest współczynnik Poissona (ν), który określa zależność między odkształceniem poprzecznym a wzdłużnym w materiale pod wpływem obciążenia (równanie 5.2). Współczynnik ten obrazuje, w jaki sposób materiał rozciągany w jednym kierunku będzie się kurczył w kierunku prostopadłym. Dla materiałów izotropowych, właściwości są takie same we wszystkich kierunkach, współczynnik Poissona zwykle mieści się w przedziale od 0 do 0,5, co pozwala na precyzyjne modelowanie reakcji materiału na obciążenia różnego typu [20, 24]:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_w} \quad (6.2)$$

gdzie: ν – współczynnik Poissona [-], ε_p – odkształcenie poprzeczne, ε_w – odkształcenie wzdłużne.

Wytrzymałość na ściskanie (R_c) to maksymalne naprężenie, jakie materiał może wytrzymać przed osiągnięciem granicy plastyczności (R_e) (wartość naprężenia, dla którego w materiale następuje stałe odkształcenie i zmiana położenia elementów, przy zachowaniu spójnej struktury materiału) lub przed zniszczeniem. Jest to szczególnie ważne w przypadku konstrukcji narażonych na siły działające prostopadle do powierzchni nośnych [20].

6.2. Prawo Hooke'a

Prawo Hooke'a stanowi podstawę mechaniki sprężystości liniowej, określając zależność między naprężeniami a odkształceniami w zakresie liniowym dla materiałów sprężystych. W materiałach liniowo sprężystych, naprężenie σ jest proporcjonalne do odkształcenia ε , co opisuje w przypadku jednowymiarowym równanie [20]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6.3)$$

gdzie: σ – naprężenie, E – moduł Younga, ε – odkształcenie liniowe względne.

Dla trójwymiarowych układów naprężeń, w przypadku materiałów izotropowych, stosuje się również zależność między odkształceniami w różnych kierunkach, uwzględniając współczynnik Poissona ν . Poniżej przedstawiono równania dla osi x , y oraz z [20, 23]:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (6.4)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (6.6)$$

6.3. Związki konstytutywne

Związki konstytutywne określają zależności materiałowe między naprężeniami i odkształceniami, które są kluczowe dla symulacji zachowań ciał stałych w analizach MES. Dla materiałów liniowo sprężystych, takich jak metale lub ceramika stosowane w protezach, zależność konstytutywna wyraża się równaniem Hooke'a. Równania te można uogólnić na bardziej złożone materiały, takie jak materiały anizotropowe lub sprężysto-plastyczne, co jest istotne w przypadku analizy biomateriałów, z których często wykonuje się protezy.

Dla ciał spełniających prawo Hooke'a, zakłada się, że tensor naprężeń jest liniowo proporcjonalny do tensora odkształceń:

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} \quad (6.7)$$

gdzie: σ_{ij} , ε_{kl} - tensory naprężeń i odkształceń, D_{ijkl} – tensor sztywności.

W przypadku materiałów izotropowych można zapisać równania konstytutywne w postaci:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left\{ \varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right\} \quad (6.8)$$

gdzie: σ_{ij} , ε_{ij} - tensory naprężeń i odkształceń, δ_{ij} - delta Kroneckera [20, 23, 24].

6.4. Równanie Naviera

Równanie Naviera jest fundamentalnym równaniem różniczkowym stosowanym w mechanice ciała stałego, umożliwiającym analizę stanu naprężeń i odkształceń w materiałach. Dla materiałów izotropowych i liniowo sprężystych równanie to wyraża równowagę sił w ciele sprężystym w postaci zależności między przemieszczeniami, naprężeniami oraz własnościami materiałowymi, takimi jak moduł Younga i współczynnik Poissona. Rozwiązanie równań Naviera jest kluczowe w analizie metodą elementów skończonych (MES), gdyż umożliwia określenie rozkładu przemieszczeń i naprężeń w analizowanym materiale [14].

Dla izotropowego ośrodka sprężystego równanie Naviera przyjmuje postać:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma = F \quad (6.9)$$

gdzie: σ - tensor naprężeń, F - siły masowe, ρ - gęstość materiału, u – przemieszczenia, t – czas.

W dalszej części dla trójosiowego rozkładu naprężeń, równanie 5.7 można zapisać na następujące sposoby, kolejno dla osi x, y oraz z:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = X_\rho \quad (6.10)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} = Y_\rho \quad (6.11)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} = Z_\rho \quad (6.12)$$

gdzie: X_ρ, Y_ρ, Z_ρ - siły masowe, σ_i, τ_{ij} - składowe tensora naprężeń, u, v, w - składowe przemieszczeń w kierunkach x, y oraz z [20, 22].

6.5. Metoda elementów skończonych

Do rozwiązania problemu inżynierskiego prowadzi kilka metod. Można skorzystać z metody klasycznej, analitycznej, czyli systematycznego podejścia wykorzystującego szeroką wiedzę techniczną do identyfikacji, analizy oraz opracowania optymalnych i efektywnych rozwiązań problemów technicznych. Ograniczeniem metody analitycznej jest jednak to iż może się odnosić jedynie do prostych problemów. Przeciwnieństwem tej metody jest metoda eksperymentalna, gdzie dokonuje się rzeczywistego pomiaru na badanym obiekcie (analizowanym problemie). Jest to metoda, która wymaga dużego nakładu czasu oraz pracy, gdyż by uznać wyniki za wiarygodne, należy wykonać kilka, a nawet kilkanaście, prób. Łącząc podejście analityczne metod klasycznych z praktycznym podejściem metod eksperymentalnych, uzyskujemy metodę numeryczną, która poprzez przyjęte założenia umożliwia przeprowadzenie symulacji dla danego obiektu, dostarczając wyników pozwalających na analizę jego zachowania w warunkach eksploatacyjnych [44]. Jedną z najczęściej wykorzystywanych metod podczas przeprowadzania analizy numerycznej jest metoda elementów skończonych [45].

Metoda elementów skończonych (MES, ang. Finite Element Method - FEM) jest kluczowym narzędziem stosowanym w analizach inżynierskich do rozwiązywania złożonych zagadnień mechaniki ciała stałego.

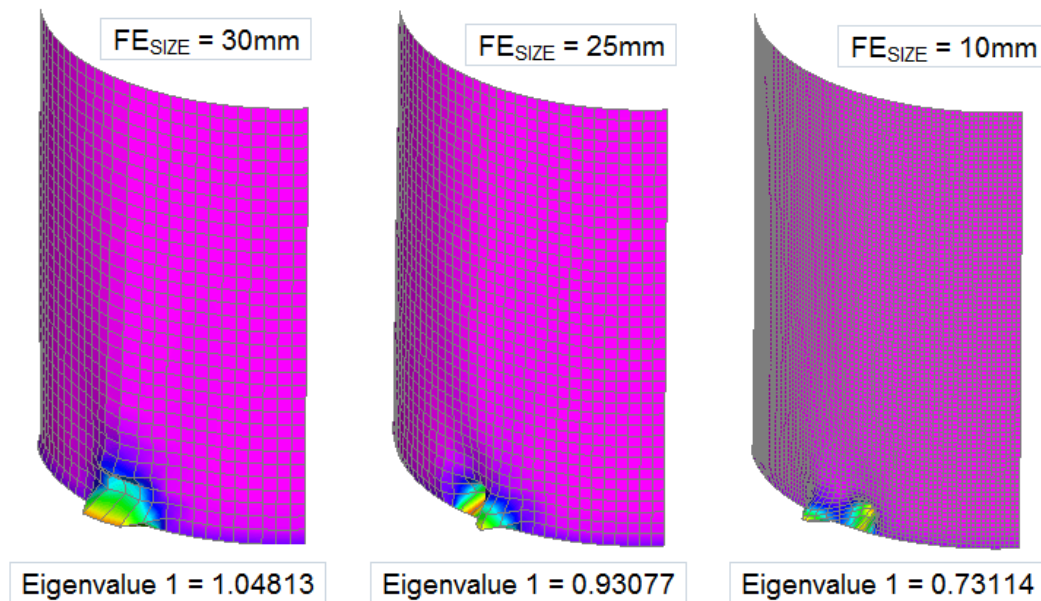
Polega na podzieleniu badanego obiektu na dyskretne, małe elementy, (elementy skończone), które reprezentują lokalne obszary konstrukcji. Podczas przeprowadzania

analizy MES w dostępnych środowiskach programowych można wyróżnić podział typów elementów skończonych ze względu na ich geometrię. Wyróżniamy elementy:

- 1D - linie, np. układy belkowe lub kratownice,
- 2D - powierzchnie, czyli elementy powłokowe, membranowe,
- 3D - bryły, które są najpopularniejszym typem elementu [45].

Podstawowe etapy analizy MES obejmują budowę modelu geometrycznego, podział na elementy skończone (tzw. meshing), przypisanie parametrów materiałowych i określenie warunków brzegowych, takich jak siły czy inne obciążenia. Dzięki temu można zdefiniować układ równań, które opisują reakcje elementów na działające siły. Po rozwiązaniu tego systemu oblicza się rozkład naprężeń, odkształceń i przemieszczeń w całej strukturze, co pozwala przewidywać, jak cała konstrukcja zachowa się w warunkach rzeczywistych [25]. Najczęściej przeprowadzanym typem analizy MES są analiza statyczna liniowa, w której obciążenie i reakcja materiału (odpowiedź) są statyczne oraz analiza statyczna nieliniowa, gdzie naprężenie i odkształcenie są od siebie zależne nieliniowo [45].

Wykonując analizę MES należy pamiętać o tym by siatka elementów skończonych była odpowiednio zagęszczona oraz dobrej jakości - ma to istotny wpływ na otrzymane przez nas wyniki. Na rysunku 6.1 widoczne jest iż wraz z rozmiarem siatki zmianie ulega kształt deformacji. Im gęstsze jest ułożenie siatki, tym dokładniejsze wyniki możemy uzyskać [46]. Przy zmniejszaniu rozmiaru siatki wydłuża się jednocześnie czas obliczeń oraz pojawia się konieczność wykorzystania przy przeprowadzaniu symulacji urządzenia o odpowiedniej mocy obliczeniowej. Kolejnym podstawowym błędem jest definiowanie zbyt dużej ilości utwierdzeń, odbieranie zbyt dużej liczby stopni swobody, w modelu, przez co konstrukcja jest zbyt sztywna, więc warunki podczas symulacji nie odpowiadają rzeczywistym warunkom eksploatacyjnym [45].



Rys. 6.1. Wyniki deformacji w zależności od gęstości siatki [46].

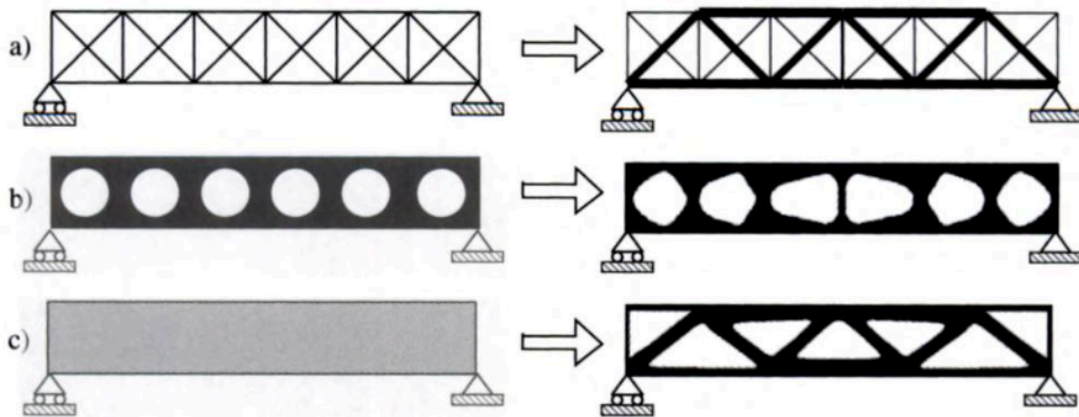
MES ma szerokie zastosowanie w inżynierii mechanicznej, budownictwie i biomedycynie, szczególnie przy analizach konstrukcji o skomplikowanych kształtach lub działających w zróżnicowanych warunkach obciążeniowych. Umożliwia ona ocenę parametrów wytrzymałościowych oraz optymalizację projektu pod kątem wydajności i bezpieczeństwa. Analizy te są kluczowe np. w projektowaniu implantów czy protez, gdzie konieczne jest uzyskanie wysokiej precyzji i bezpieczeństwa użytkownika.

MES jest również narzędziem elastycznym, umożliwiającym wielokrotne modyfikacje parametrów projektu. Dzięki temu inżynierowie mogą zoptymalizować konstrukcję pod kątem wytrzymałości, masy czy kosztów, co przekłada się na lepsze wyniki przy mniejszych zasobach i ograniczonym czasie [25].

6.6. Optymalizacja topologiczna

Podczas projektowania części, urządzeń ważne jest, aby ich wytrzymałość była jak największa przy jednoczesnej redukcji kosztów. W przypadku protez, ortez oraz implantów, ważne jest także by były one lekkie by dodatkowo nie obciążać, osłabionej urazem lub chorobą części ciała. Dlatego wraz z analizą MES często przeprowadza się optymalizację modelu.

Wśród optymalizacji strukturalnej możemy wyróżnić następujące rodzaje: optymalizację rozmiaru, kształtu i topologii [48]. Na rysunku 6.2 przedstawiono otrzymane wyniki dla każdego z rodzajów optymalizacji. Najbardziej ogólną z metod jest optymalizacja topologiczna [30].



Rys. 6.2. Porównanie metod optymalizacji strukturalnej: rozmiaru, kształtu i topologii [48].

Optymalizacja topologiczna to proces projektowania, który dąży do rozmieszczenia materiału w danej przestrzeni w sposób zapewniający maksymalną sztywność przy minimalnej masie [47]. Na podstawie metody elementów skończonych (MES) dostarcza ona informacji o kumulowaniu się naprężeń w objętości modelu, tworząc tym samym domeny wypełnione materiałem – przenoszące obciążenia oraz domeny puste – gdzie brak materiału. Pozwala to na wprowadzenie do projektowanego elementu modyfikacji jego kształtu, zmniejszenia jego objętości, a więc masy [30-32].

Proces optymalizacji topologicznej należy rozpocząć od zdefiniowania przestrzeni poddawanej procesowi. Możliwe jest przeprowadzenie optymalizacji w całej objętości materiału, jednak gdy ze względów konstrukcyjnych chcemy zachować jakiś element możliwe jest nałożenie ograniczenia - wyłączenie części modelu z procesu. Umożliwia to zachowanie elementów mocujących, zabezpieczających oraz istotnych dla użytkownika modelu. Następnie projektant wprowadza ile materiału może zostać wykorzystane podczas optymalizacji, jaką maksymalną część materiału można usunąć. Wcześniej zdefiniowane warunki brzegowe są analizowane i prezentowany jest wynik procesu optymalizacji topologicznej [49].

Optymalizacja topologiczna koncentruje się na znalezieniu optymalnego rozkładu materiału w obrębie zadanej przestrzeni projektowej. Dostarcza efektywnych rozwiązań, jednak wymaga zaangażowania w definiowanie parametrów i interpretację wyników. Generative design wykorzystując algorytmy sztucznej inteligencji pozwala na automatyczne generowanie wielu alternatywnych rozwiązań projektowych na podstawie zadanych ograniczeń i celów. Jeśli model zaproponowany przez program nie będzie satysfakcjonujący dla projektanta - zostanie odrzucony, program będzie ulepszał kolejne modele tak, aby osiągnięto cel z założeń [49]. Jednym z narzędzi oferujących generative design jest oprogramowanie Autodesk Fusion 360 [34, 49].

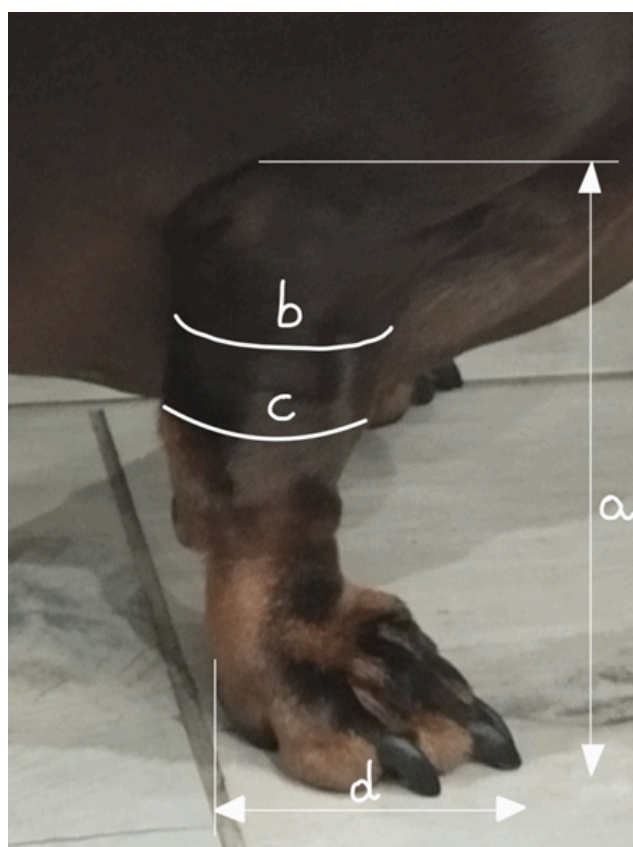
Obecnie optymalizacja topologiczna stosowana jest szeroko w sektorze motoryzacyjnym, gdzie mniejsza masa może poprawić osiągi oraz zredukować zużycie paliwa. W przemyśle lotniczym pozwala projektować lżejsze elementy, które muszą sprostać ogromnym obciążeniom i trudnym warunkom. Technika ta odgrywa także kluczową rolę w druku 3D, pozwalając tworzyć złożone, wytrzymałe geometrie przy zachowaniu stosunkowo małej masy [49,50].

7. Proces modelowania protezy

7.1. Rozpatrywany przypadek

Analizowany przypadek dotyczy psa rasy jamnik. Pies nie posiada stwierdzonych wad ortopedycznych oraz urazów w obrębie kończyn przednich. Waga pacjenta wynosi 11,6 kg. W wzorcu rasowym brak jest informacji na temat maksymalnej wagi dla tej rasy, ważny jest obwód w klatce piersiowej oraz proporcjonalność długości psa i prześwitu do jego wysokości w kłębie [5].

Wymiary kończyny przedniej przedstawiono w tabeli 1. oraz na rysunku 7.1. Wykonywane one były w swobodnej pozycji stojącej. Pomiary obwodu kończyny piersiowej wykonano w dwóch najszerszych miejscach poniżej łokcia zwierzęcia.



Rys. 7.1. Wymiary kończyny przedniej.

Tab. 7.1. Wartości wymiarów kończyny przedniej.

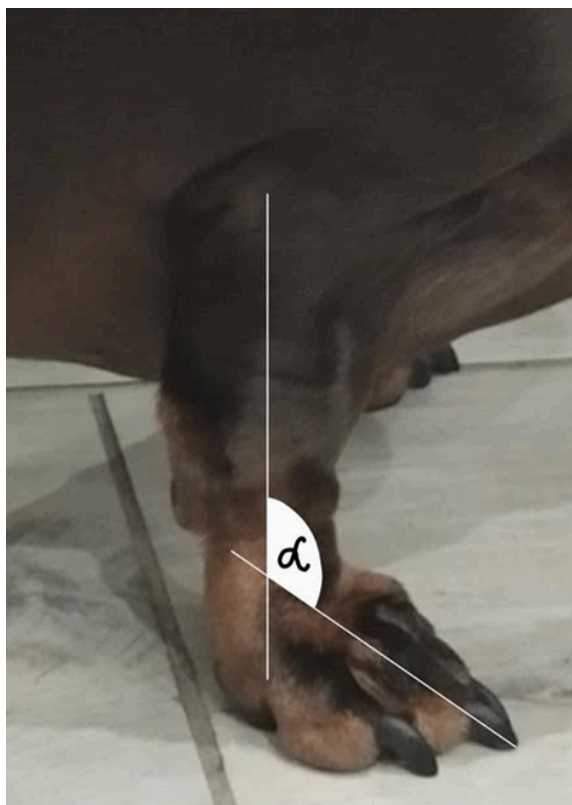
Oznaczenie wymiaru	Wymiar
a	144 mm
b	97 mm
c	89 mm
d	55 mm

7.2. Zastosowane oprogramowanie

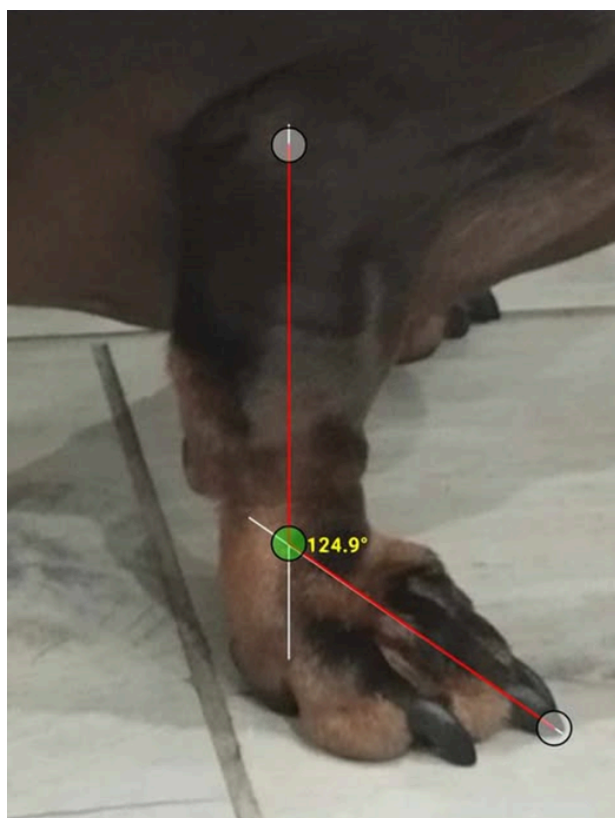
W pracy użyto następujące oprogramowanie komputerowe: Miernik Kąta (Angle Meter), Autodesk Inventor Professional 2024 oraz Ansys.

Przy wyznaczeniu jednego z wymiarów wziętych pod uwagę przy projektowaniu modelu protezy użyto dostępnej aplikacji na telefon Miernik Kąta (Angle Meter). Jest to aplikacja, która umożliwia pomiar kąta lub nachylenia. Wykorzystuje łuk sztucznej grawitacji między dwiema osiami. Pozwala na pomiar wartość zarówno w czasie rzeczywistym, jak i pomiar z obrazów [33].

Dzięki aplikacji wyznaczono zaznaczony na rysunku 7.2. kąt α . Przedstawia on nachylenie palców psa względem osi anatomicznej kończyny przedniej, wyznaczonej przez linię pionową biegnącą wzdłuż kości długich (kości promieniowej). Linia ukośna odpowiada osi palców, która jest przedłużeniem paliczków. Wynik dla pomiaru zaznaczono na rysunku 7.3.



Rys. 7.2. Kąt α między osią kończyny przedniej a paliczkami.

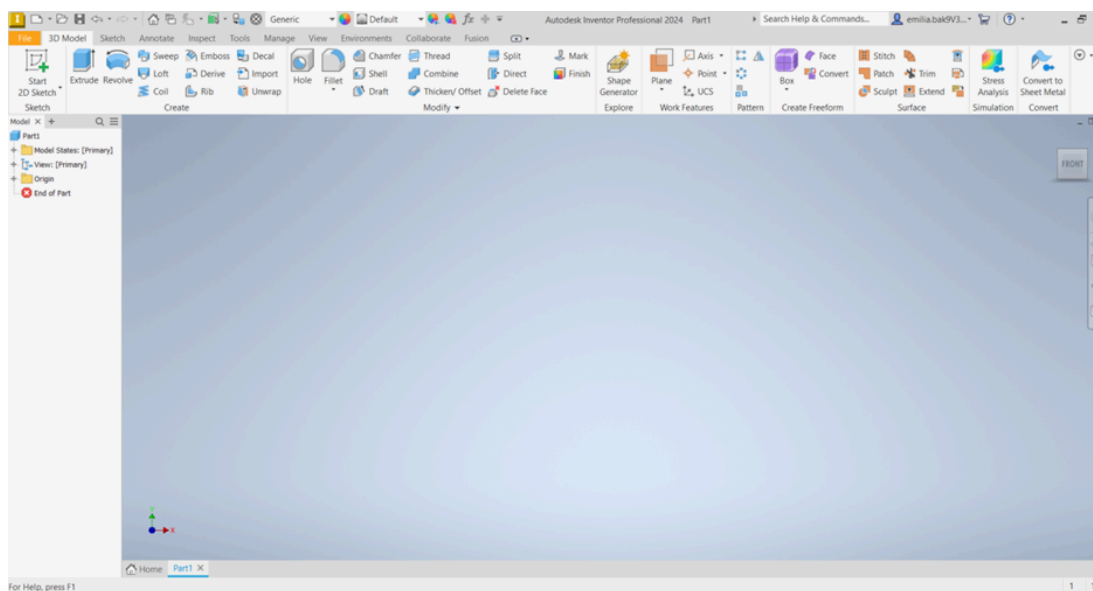


Rys. 7.3. Pomiar kąta α za pomocą aplikacji Angle Mater.

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

Firma Autodesk to światowy lider na rynku oprogramowania. Dostarcza on środowisko niezbędne do pracy konstruktorów, architektów, inżynierów oraz innych twórców. Produkty można zakupić w pakietach dla danej branży lub pojedynczo według potrzebny. Najpopularniejsze z dostępnych programów to na przykład Revit, Civil 3D, AutoCAD oraz Inventor.

Inventor to profesjonalny program inżynierski, pozwalający na tworzenie modeli 3D – ich projektowania, tworzenia niezbędnej dokumentacji, a nawet symulacji pracy zaprojektowanego elementu. Podczas modelowania protezy będącej tematem pracy użyto wersji Inventor 2024. Na rysunku 7.4. przedstawiono interfejs programu [34].



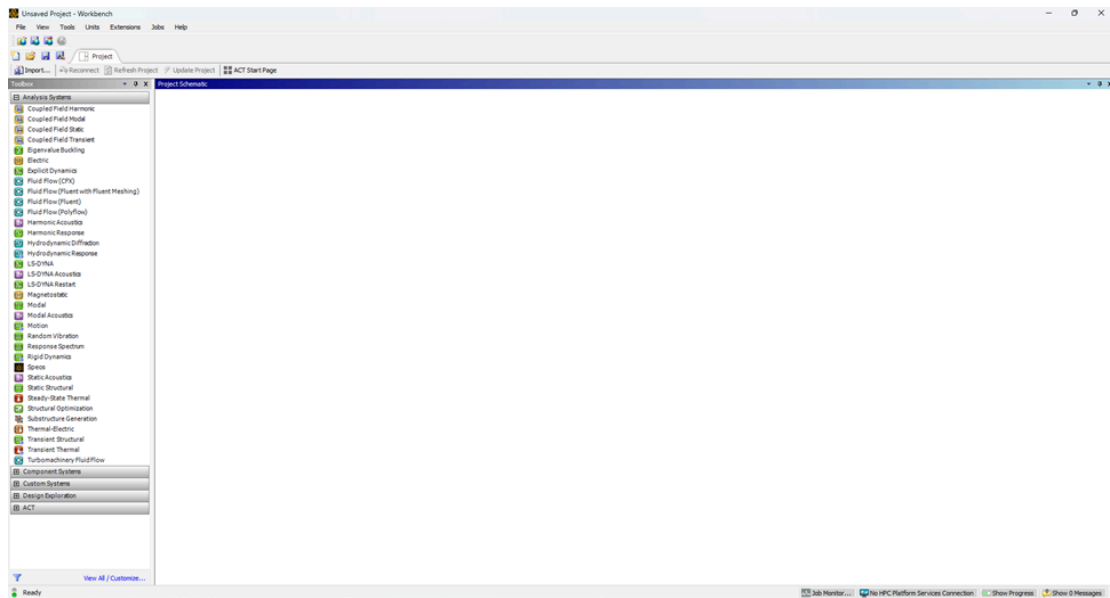
Rys. 7.4. Interfejs programu Autodesk Inventor Professional 2024.

Jedną z firm umożliwiających analizę MES jest ANSYS. System ten pozwala na rozwiązywanie zagadnień w szerokim zakresie – od mechaniki konstrukcji, analizy statycznej, poprzez drgania własne, stany wymuszone, analizę nieliniową, wymianę ciepła, pola magnetycznego oraz elektrycznego, aż do mechaniki płynów [35, 37].

ANSYS umożliwia stworzenie geometrii w środowisku programu, jak i import własnego modelu. Zdefiniowanie warunków brzegowych analizowanych przypadków jest intuicyjne i szybkie. Dodatkowo materiał konstrukcji może być dodany z szerokiej bazy dostępnych materiałów lub zdefiniowany na nowo przez użytkownika. Dla wybranego przypadku analizie można poddać między innymi naprężenia – von Misesa

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

oraz ścinające, przemieszczenia – całkowite lub kierunkowe. Następnie model można poddać optymalizacji struktury, dostępne jest zdefiniowanie powierzchni, dla których optymalizacja nie będzie przeprowadzana by zachować istotne elementy, np. łączenia, elementy mocowań [35 - 37].



Rys. 7.5. Interfejs programu Ansys.

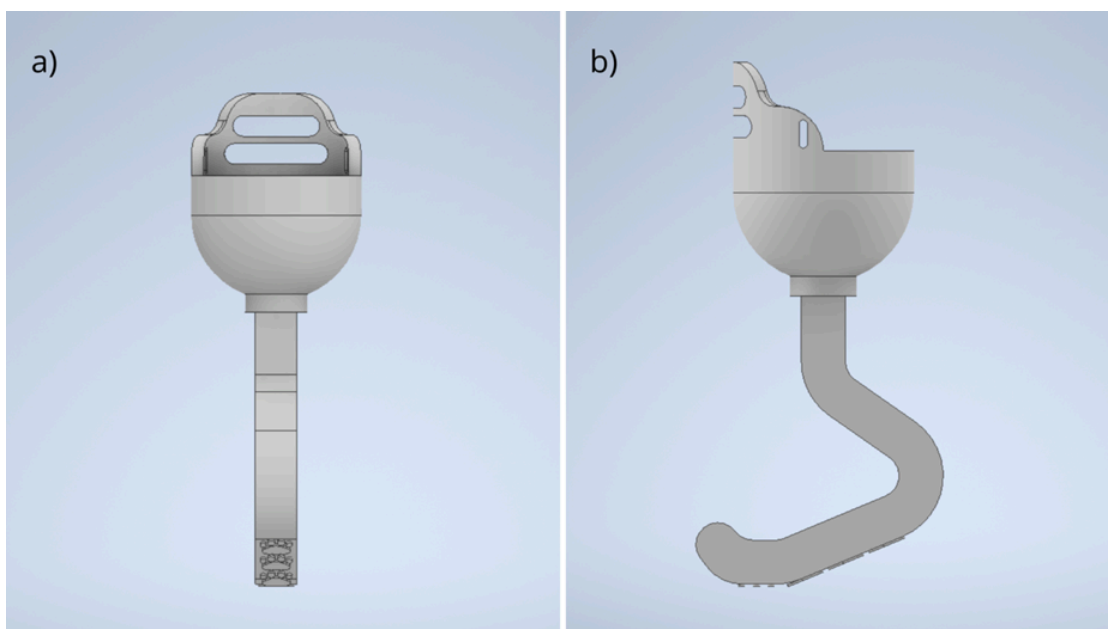
7.3. Modelowanie wstępne

Na podstawie pobranych miar oraz wyznaczonych kątów, wartość kąta α zaokrąglono do 125° , zaprojektowano protezę w programie Inventor Professional 2024. Założono dla modelowanego przypadku amputację na poziomie przedramienia zwierzęcia.

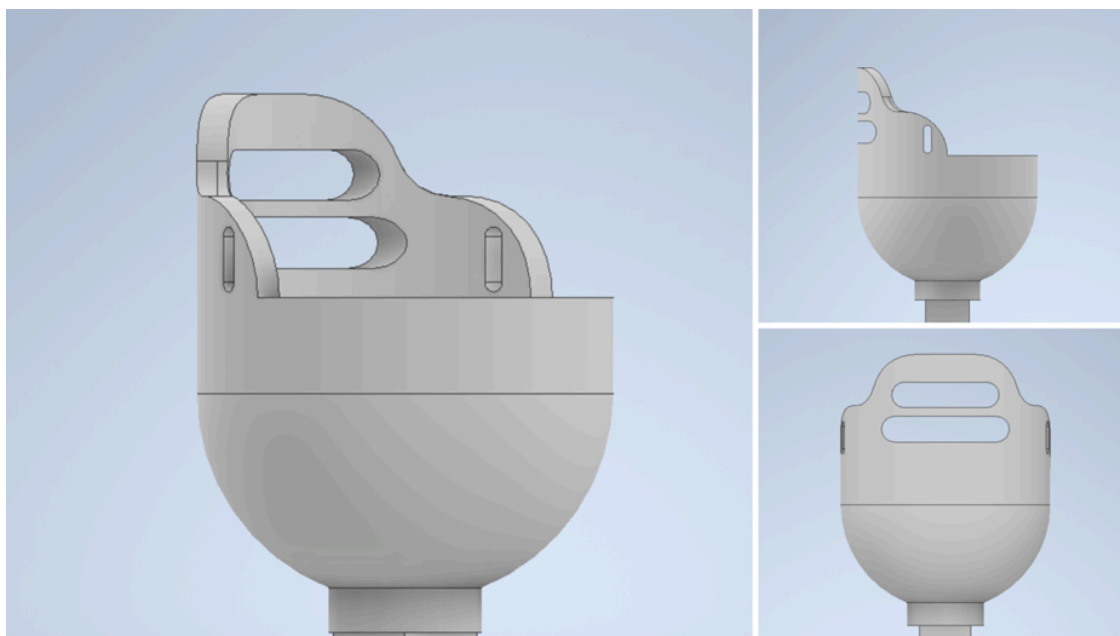
Lej protezowy został poszerzony uwzględniając wkładkę silikonową zabezpieczającą kikut podczas użytkowania protezy. Konstrukcja protezy podzielona jest na 3 części: lej protezowy, łącznik oraz nogę protezy. Całość została zaprojektowana w taki sposób by umożliwić jej późniejszą produkcję z wykorzystaniem technologii druku 3D z materiału PEEK (opisany w rozdziale 4.2.). Lej protezowy oprócz kształtu dopasowanego do kikut kończyny został wyposażony w otwory boczne, które pozwalają na użycie pasów zabezpieczających protezę. Dodatkowo w części tylnej widoczne są 2 otwory mające na celu jednoczesną redukcję masy leja, jak i poprawę kwestii wizualnych. Następnie poprzez łącznik do leja przymocowano nogę protezy, której konstrukcja została oparta na wartości kąta α i wymiarze zdrowej kończyny psa. Swoim kształtem konstrukcja ma

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

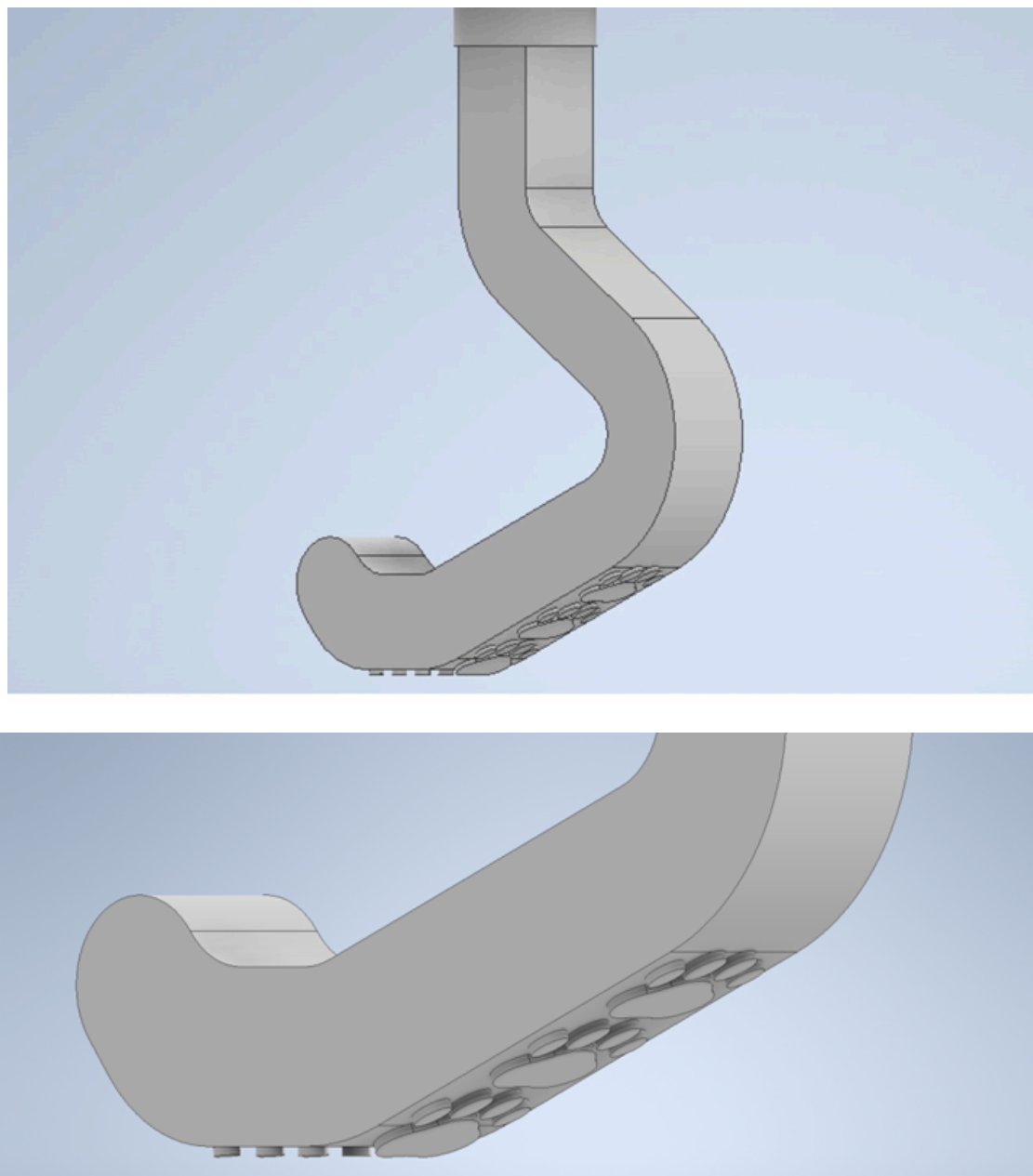
zapewniać komfort poruszania się oraz stabilność zwierzęcia. Na części podporowej osadzono łapki oraz wypustki – są one elementami bezpośrednio stykającymi się z nawierzchnią, mające na celu chronić, przedłużyć żywotność protezy. Poniżej przedstawiono wygląd zaprojektowanej protezy wraz z ważnymi wymiarami.



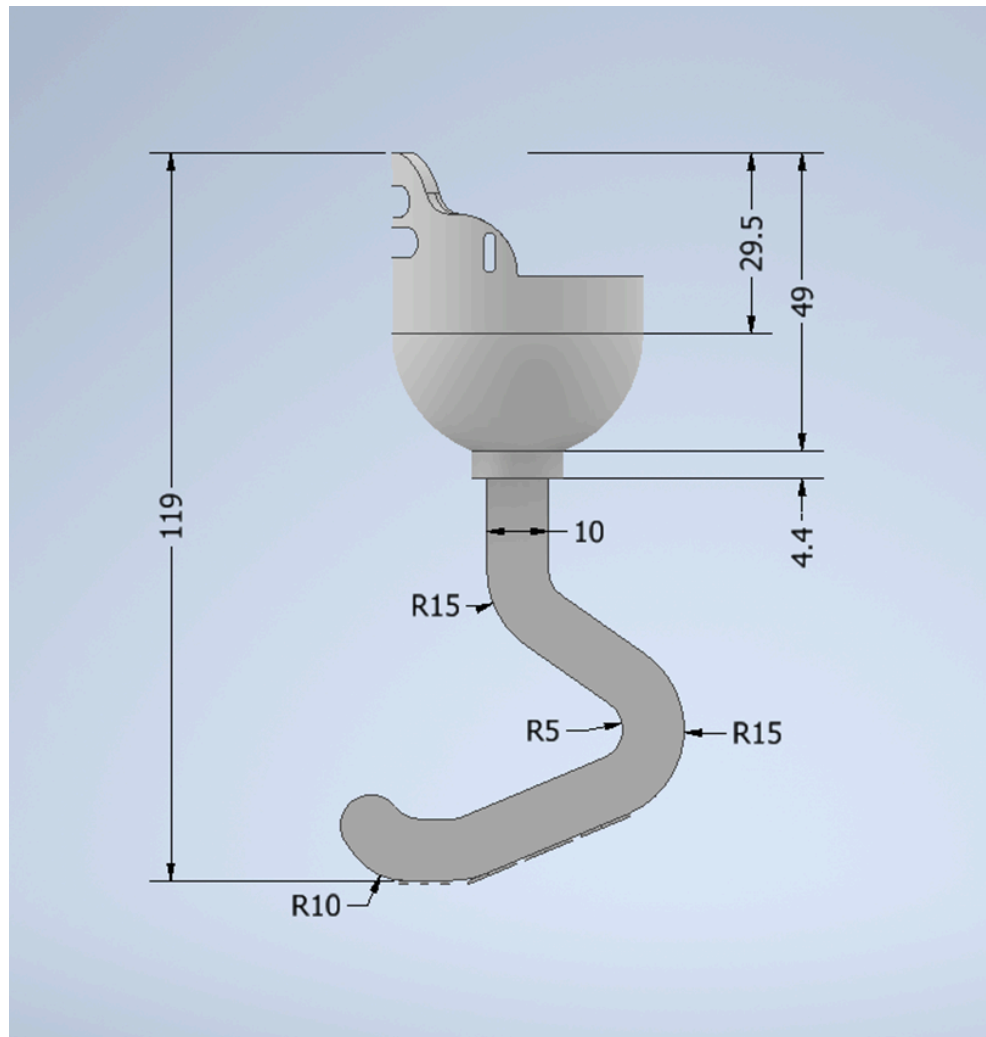
Rys. 7.6. Model protezy kończyny piersiowej jamnika, widok: a) z przodu, b) z boku.



Rys. 7.7. Model protezy kończyny piersiowej jamnika, widok szczegółowy na elementy leja protezowego.



Rys. 7.8. Model protezy kończyny piersiowej jamnika, widok na szczegóły części podporowej.



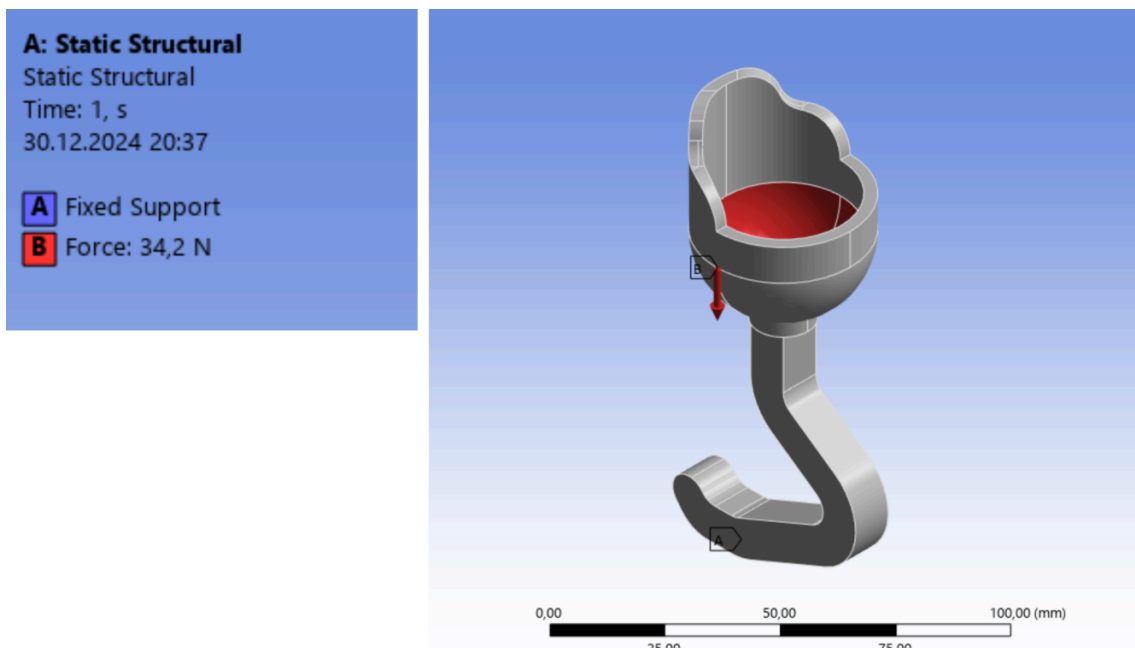
Rys. 7.9. Wymiary protezy widok od boku.

8. Analiza wyników

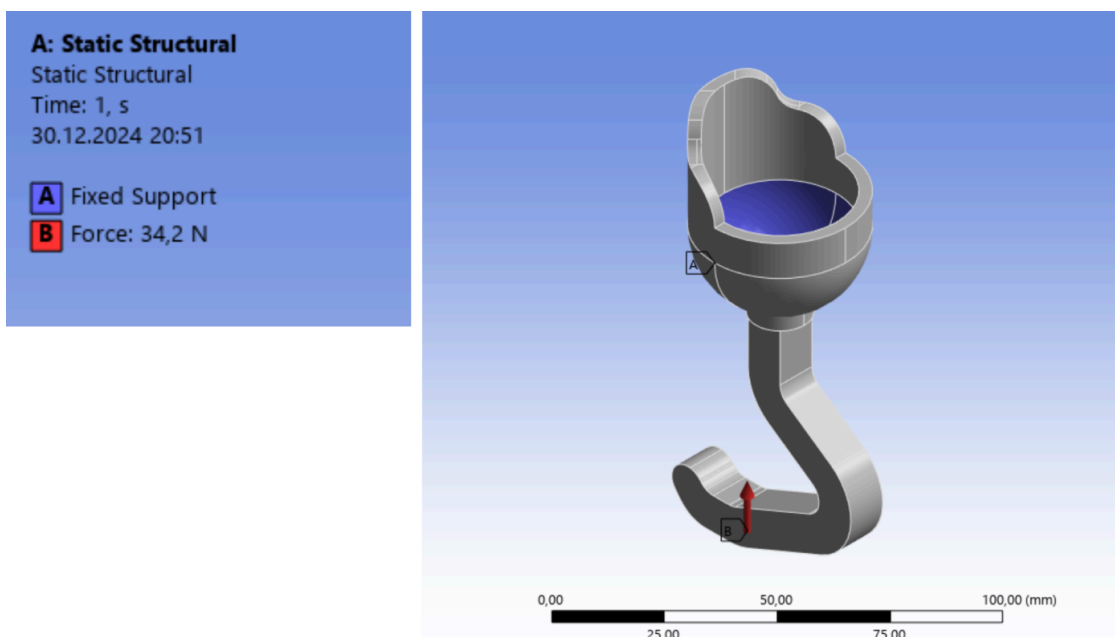
8.1. Analiza statyczna

Analiza wytrzymałościowa metodą elementów skończonych (MES, ang. FEA) wykorzystywana jest szeroko w projektowaniu. Mają one na celu sprawdzenie, czy dany model pozwoli na przenoszenie danego obciążenia, czy współczynnik bezpieczeństwa danego materiału nie został przekroczony. Gdy wartość współczynnika w danej części modelu jest mniejszy niż 1 oznacza to, iż materiał uległ zniszczeniu [38]. Dodatkowo wartościami analizowanymi są naprężenia, przemieszczenia i odkształcenia [37, 39].

Symulację przeprowadzono dla dwóch przypadków obciążenia, dla każdego wykonano analizę przy dwóch wariantach umiejscowienia podpory i miejsca przyłożenia działającej siły. W pierwszym wariantcie zastosowano założenie, że umocowanie konstrukcji odbywa się na powierzchni podporowej (podeszwie) protezy, natomiast siła została przyłożona wewnątrz leja protezowego (rys. 8.1.). W drugim przypadku przyjęto odwrotną konfigurację: umocowanie znajdowało się wewnątrz leja protezowego, a siła działała na powierzchnię podeszwy protezy (rys. 8.2.).



Rys. 8.1. Wariant 1. – siła przyłożona do wnętrza leja, utwierdzenie znajduje się w podeszwie protezy.



Rys. 8.2. Wariant 2. – siła przyłożona do podeszwy protezy, utwierdzenie znajduje się we wnętrzu leja.

Pierwszym obciążeniem jest ciężar przenoszony przez kończynę zwierzęcia. Na jedną kończynę przednią przypada 30% masy całkowitej. Wartość obciążenia obliczono zgodnie z poniższym wzorem:

$$F_1 = 0,3 * m * g \quad (8.1)$$

gdzie: F_1 – wartość siły obciążenia w przypadku I, m – masa ciała zwierzęcia, g – przyspieszenie ziemskie.

Następnym analizowanym przypadkiem, jest siła przypadająca na kończynę przednią podczas kłusu zwierzęcia. Kłus, to dwutaktowy chód, gdzie podłoże dotyka równocześnie para łap po przekątnej [12]. Obciążenie te można obliczyć korzystając z poniższego wzoru, który zawiera relację siły działającej na podłoże od masy zwierzęcia [40]:

$$F_2 = 9,71 * m + 52,75 \quad (8.2)$$

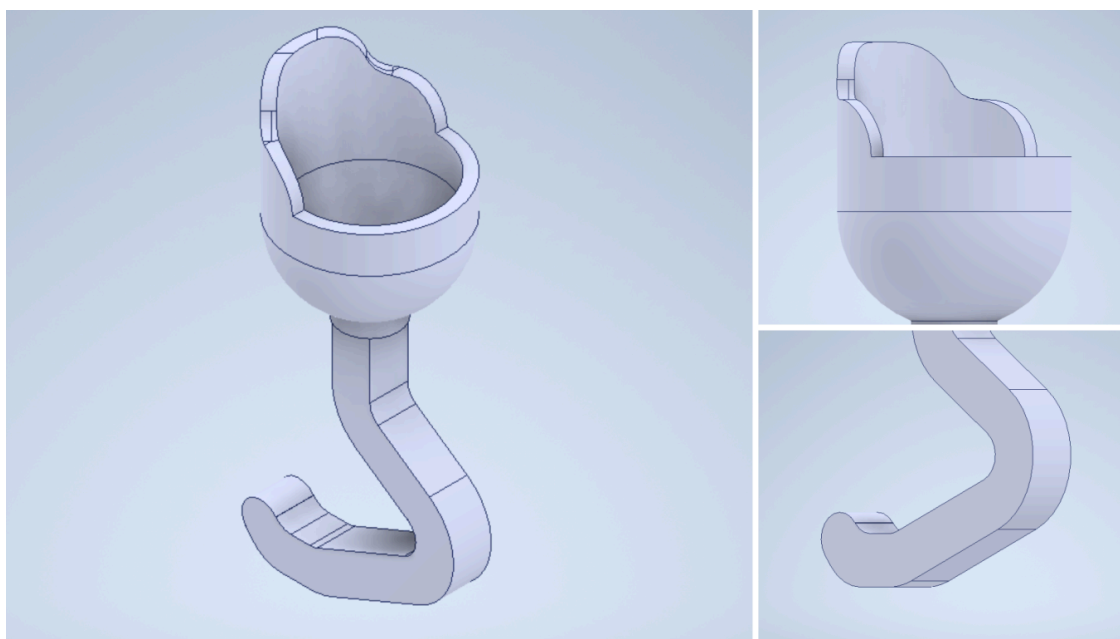
gdzie: F_2 – wartość siły obciążenia w przypadku II, m – masa ciała zwierzęcia.

Wyniki obliczeń obciążeń przedstawiono poniżej w tabeli 8.1.

Tab. 8.1. Wielkości obciążeń dla przypadku I i II.

	Przypadek	Obciążenia, [N]
I	chód	34,138
II	kłus	165,386

Ze względu na dużą ilość otworów i elementów, które wpływają negatywnie na tworzenie siatki elementów skończonych – elementy na podszwie protezy, model został uproszczony. Uproszczony model przedstawiono na rysunku 8.3..



Rys. 8.3. Uproszczony model protezy poddawany analizie.

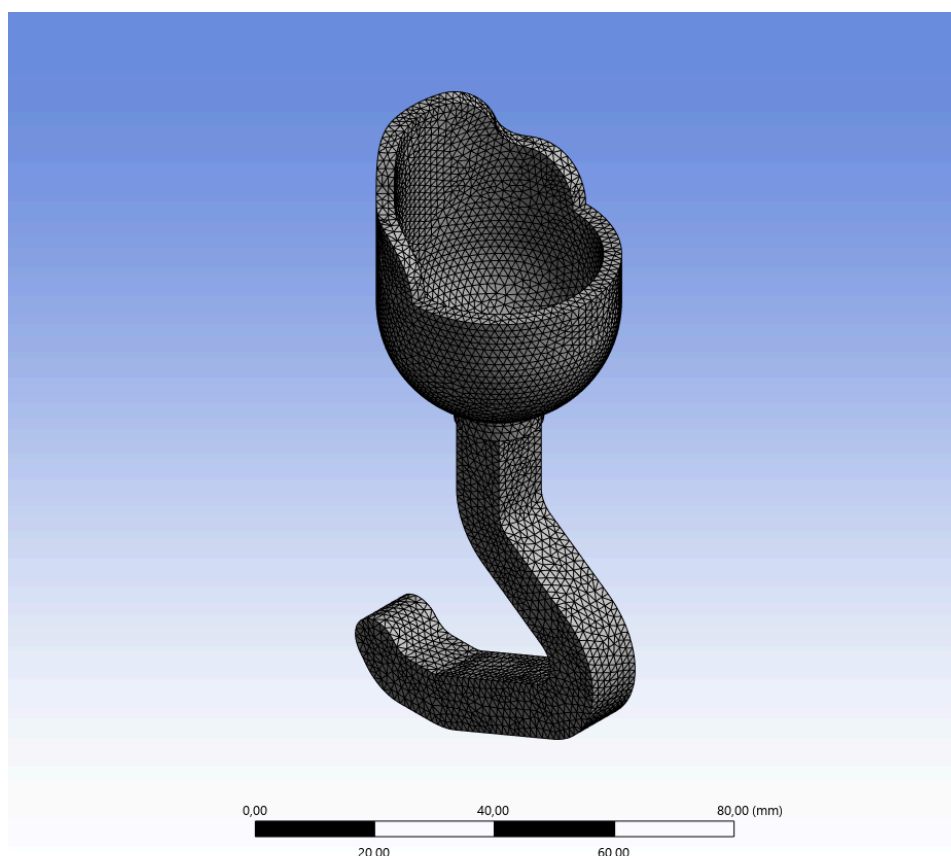
Dla analizy przyjęto materiał wykonania jako PEEK, czyli polieteroeteroketon. W tym celu zdefiniowano w programie Ansys nowy materiał oraz dodano właściwości materiału zawarte w tabeli 7.2 [41, 42].

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

Tab. 8.2. Właściwości mechaniczne polieteroeteroketonu (PEEK) wykorzystywane podczas symulacji.

Właściwość	Wartość
gęstość	$1,31 * 10^{-9} \frac{g}{cm^3}$
moduł Younga	4044 MPa
współczynnik Poissona	0,34

Dla modelu wygenerowano siatkę o wielkości 1,5 mm, składającą się z 64154 elementów oraz 99559 węzłów. Widok uzyskanej siatki elementów przedstawiono poniżej na rysunku 8.4.



Rys. 8.4. Siatka elementów.

Współczynnik bezpieczeństwa można zdefiniować jako stosunek naprężenia krytycznego danego materiału do maksymalnych naprężeń występujących w konstrukcji (równanie 8.3) [43]. Na podstawie tego wyznaczono współczynnik dla każdego

z poniżej przedstawionych wyników symulacji. Za wynik bezpieczny – brak zniszczenia materiału, uznawany jest wynik powyżej 1. Jednak w wielu pozycjach literaturowych zakłada się, że musi zawierać się on w zakresie od 1,5 do 3 [38]. Wartość tego współczynnika wyznaczamy ze wzoru:

$$n = \frac{\sigma_{kr}}{\sigma_{max}} \quad (8.3)$$

gdzie: n – współczynnik bezpieczeństwa, σ_{kr} – naprężenia krytyczne, w tym przypadku uznano za nie granicę plastyczności materiału wynoszącą 116 MPa [41], σ_{max} – naprężenia maksymalne w materiale.

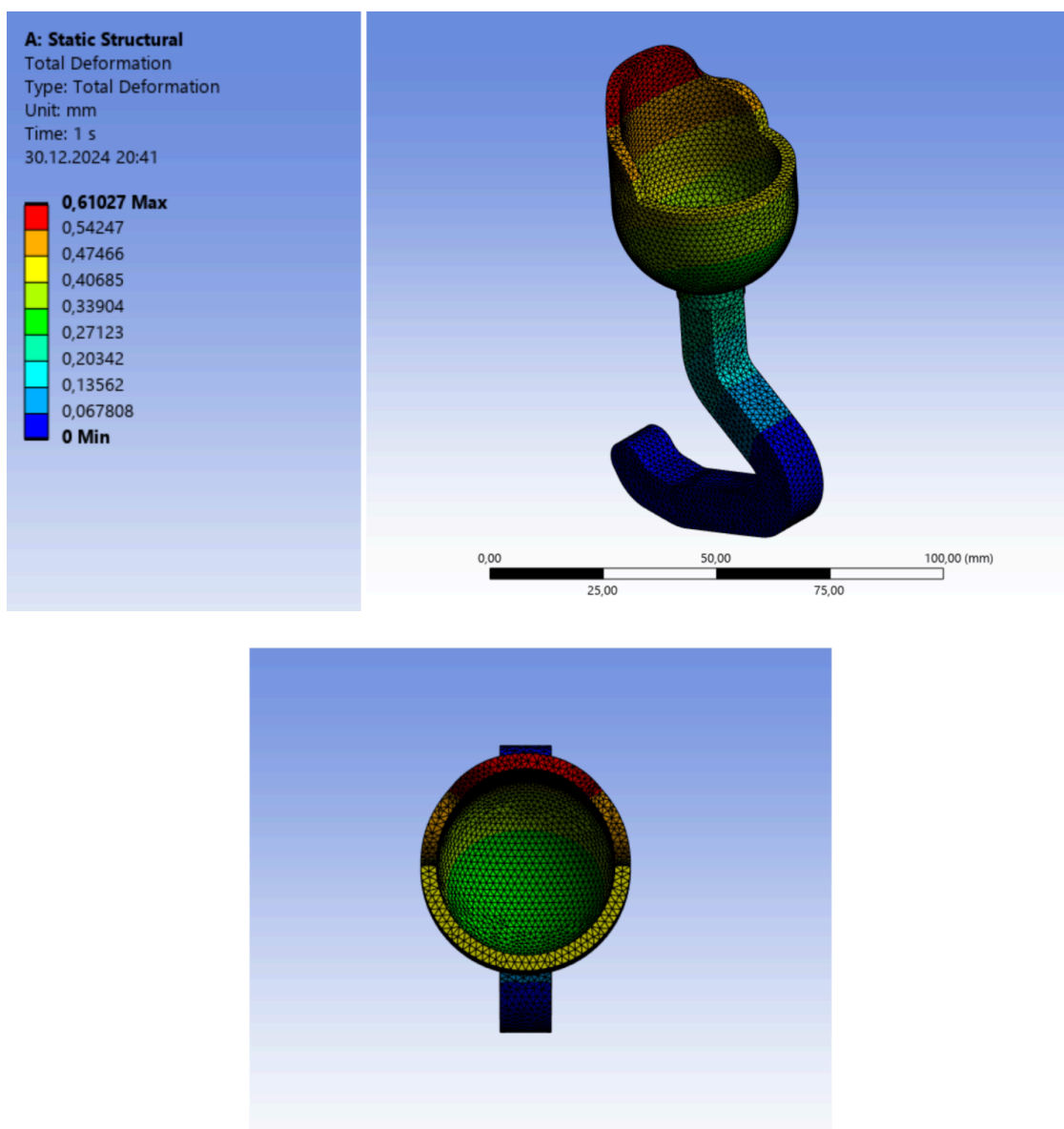
8.2. Uzyskane wyniki

8.2.1. Chód (przypadek I)

8.2.1.1. Wariant 1.

Wyniki analizy wskazują na zakres deformacji całkowitej protezy w przedziale od 0 mm do 0,61027 mm. Maksymalna deformacja występuje w górnej części protezy, jednak nie w miejscu, w którym została bezpośrednio przyłożona siła, lecz w miejscu wsparcia tylnej części kończyny zwierzęcia. Wartość maksymalnej deformacji wynosząca 0,61027 mm jest niewielka w stosunku do całkowitej wysokości protezy (119 mm). Obszary o najmniejszej deformacji, bliskie wartości 0 mm, znajdują się w dolnej części protezy, w okolicach podstawy, gdzie zdefiniowano utwierdzenie. Rozkład deformacji wzdłuż konstrukcji protezy jest zgodny z oczekiwaniami wynikającymi z charakteru obciążeń, gdzie przemieszczenia rosną wraz z oddalaniem się od sztywno podpartej podstawy.

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik



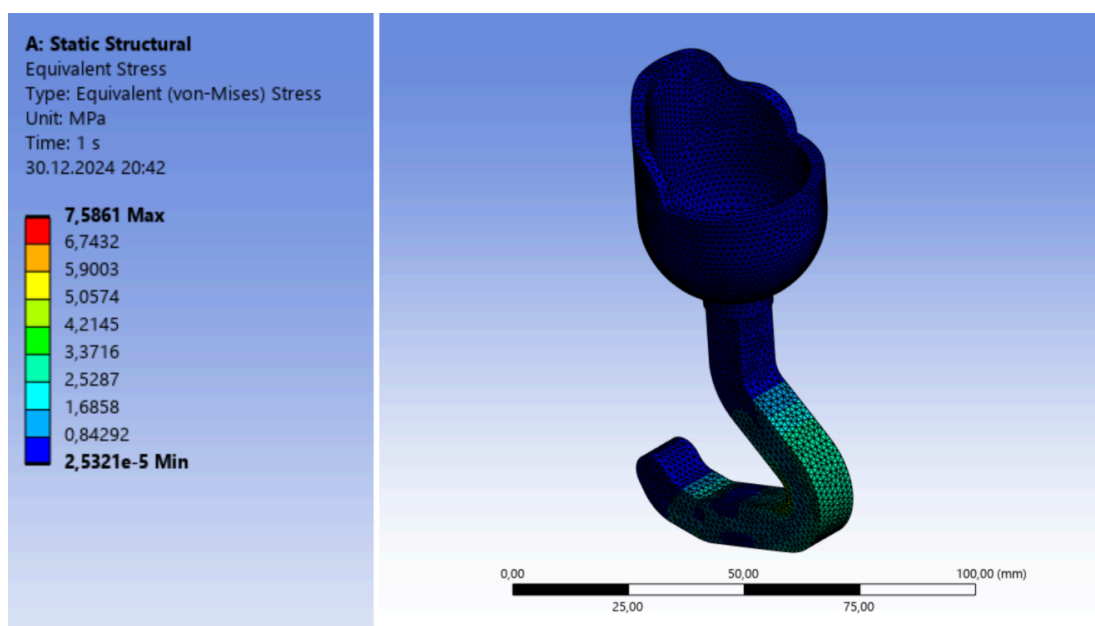
Rys. 8.5. Wynik całkowitego przemieszczenia dla wariantu 1.

Podczas wykonywania symulacji naprężenia wartości naprężeń von Misesa mieszczą się w przedziale od 0,000025 MPa do 7,5861 MPa (rys. 8.6.). Maksymalne naprężenia występują w dolnej części protezy, w obszarze przejścia między zakrzywioną częścią konstrukcji nogi protezowej a podstawą, co zostało oznaczone kolorem czerwonym (rys. 8.7.). Obszary o najmniejszych wartościach naprężeń zlokalizowane są w górnej części protezy, w okolicy powierzchni zewnętrznych, gdzie obciążenia są znikome.

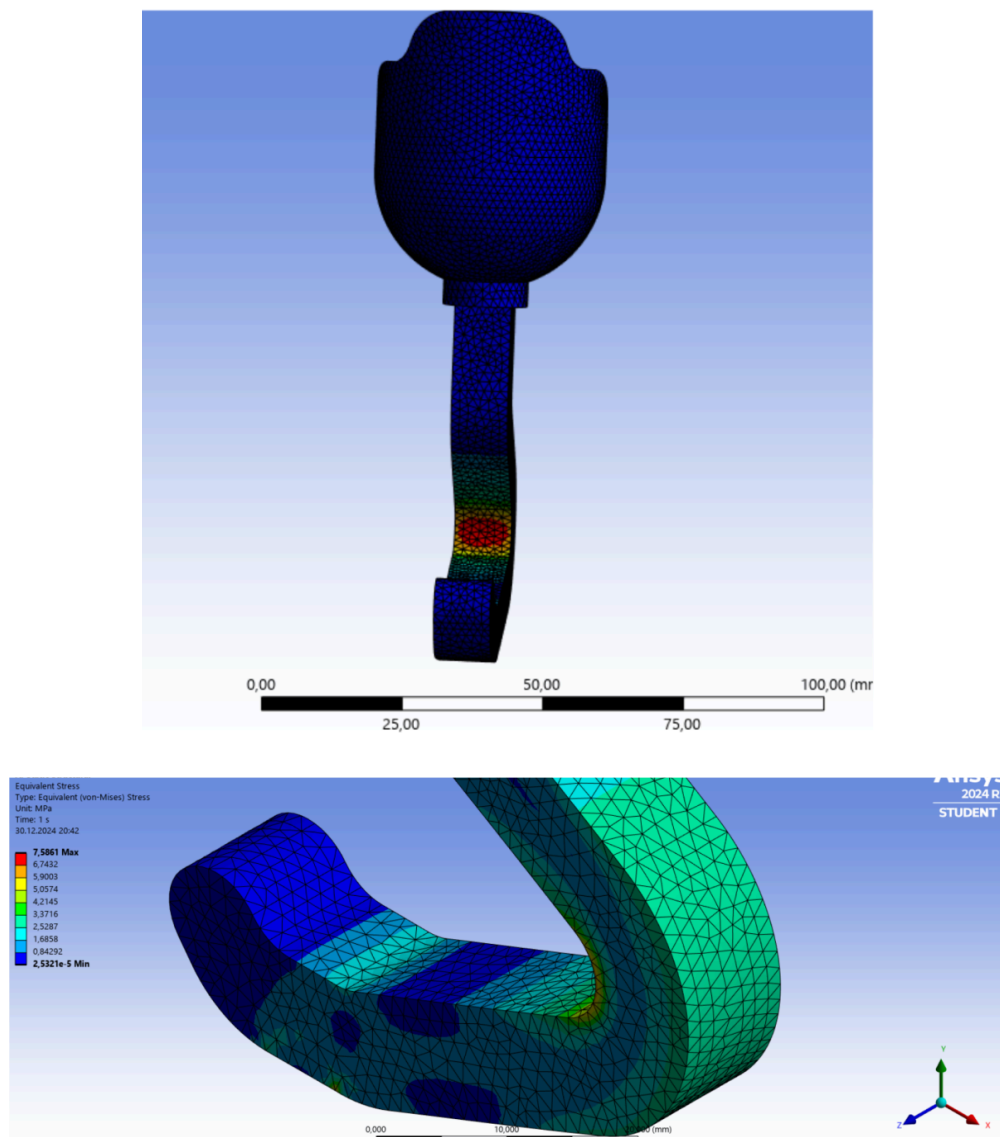
Współczynnik bezpieczeństwa, wyznaczony jako stosunek naprężeń krytycznych materiału PEEK (116 MPa) do maksymalnych naprężeń występujących w modelu (7,5861 MPa), wynosi 15,3. Taka wartość współczynnika bezpieczeństwa świadczy

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

o dużym marginesie wytrzymałości konstrukcji, co zapewnia bezpieczeństwo użytkowania protezy w warunkach eksploatacyjnych.



Rys. 8.6. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 1.

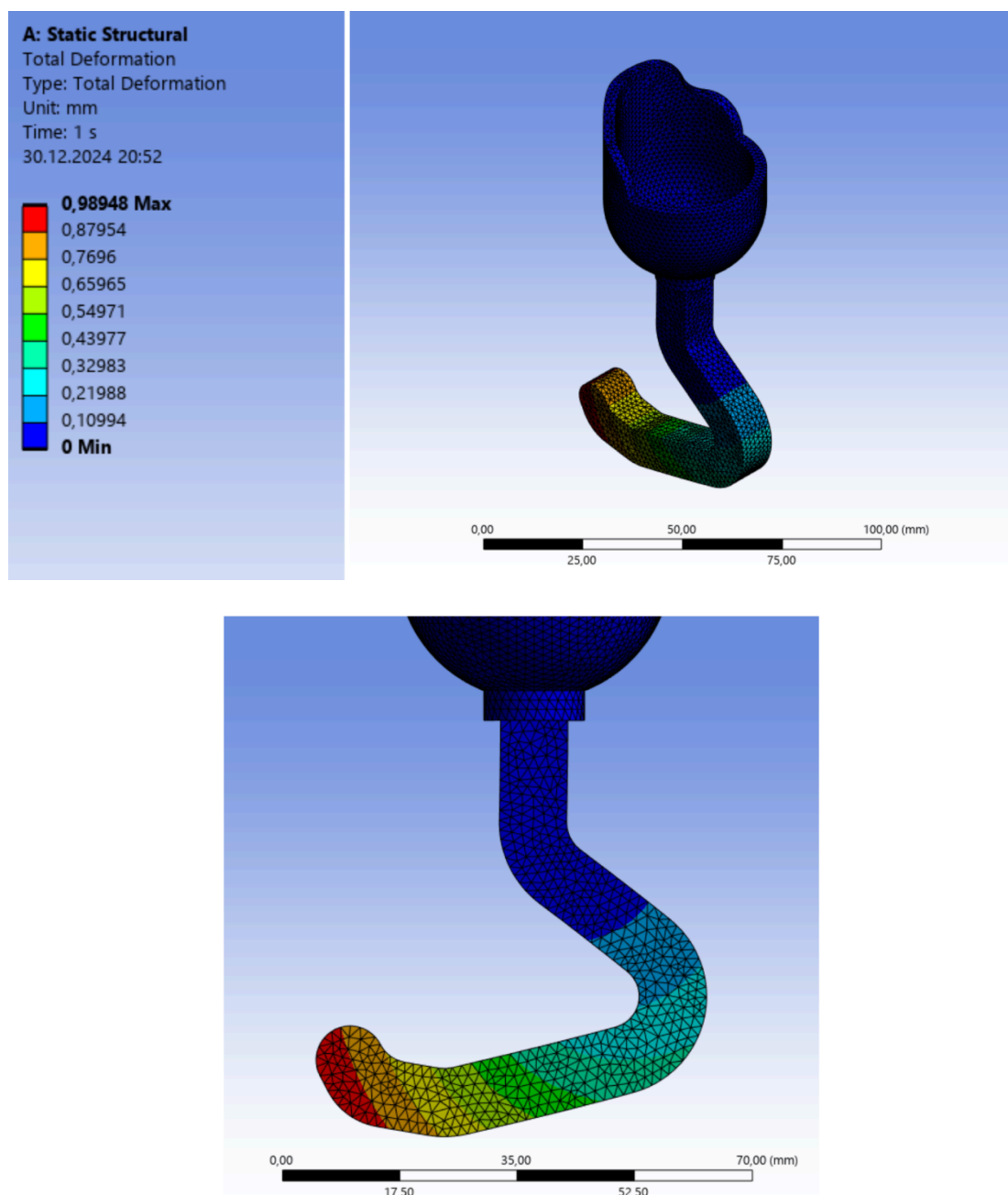


Rys. 8.7. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 1 – zbliżenie na miejsce kumulacji naprężeń.

8.2.1.2. Wariant 2.

W wariancie 2, gdzie siła została przyłożona do podeszwy protezy, wartości całkowitej deformacji są najwyższe w tym obszarze – wynoszą od 0,43977 mm do 0,98948 mm, czyli wartości maksymalnej. Wartość ta stanowi około 1% wysokości protezy co czyni ją wartością dopuszczalnego odkształcenia podczas zadanego obciążenia.

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

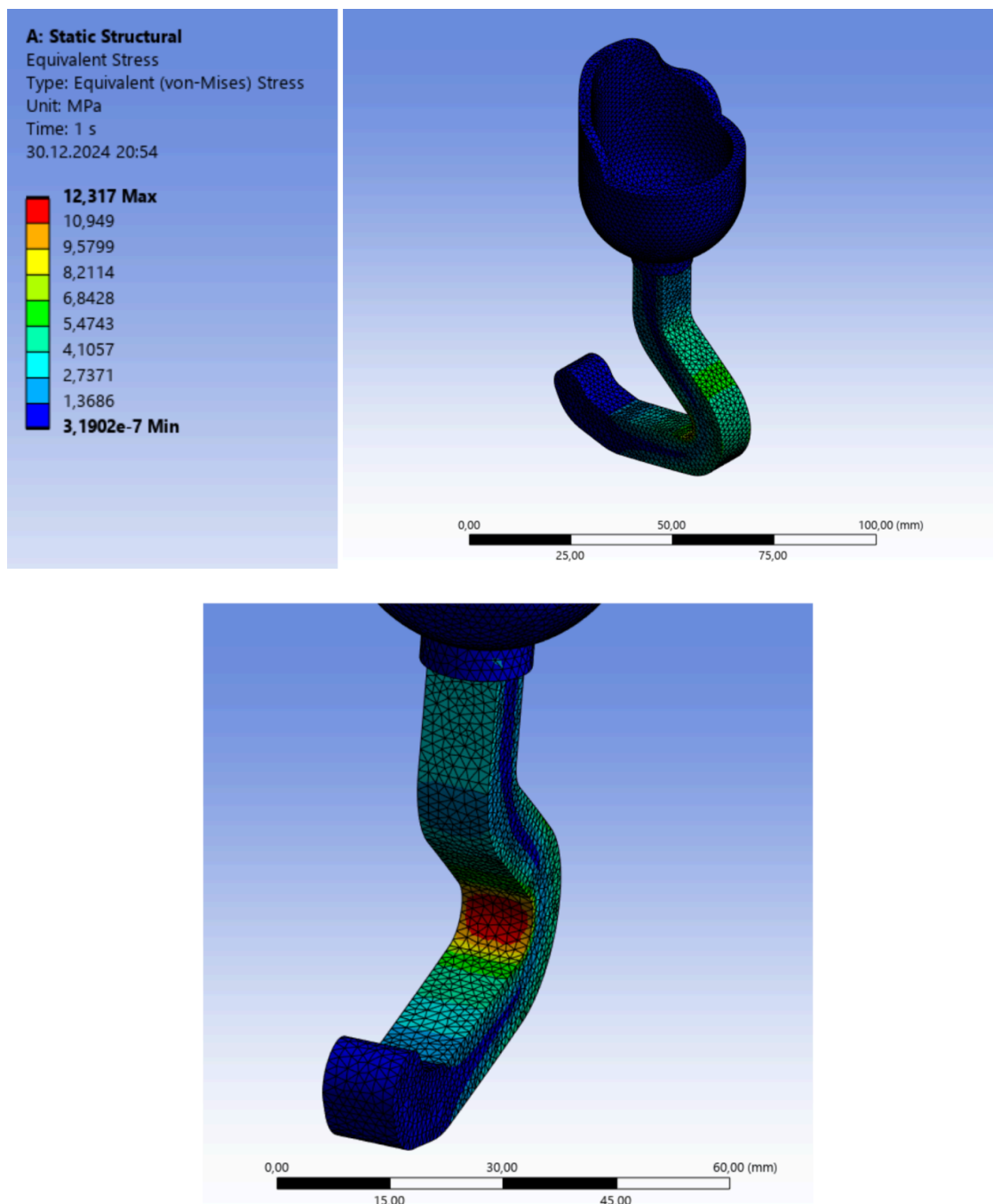


Rys. 8.8. Wynik całkowitego przemieszczenia dla wariantu 2.

Współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji wynosi 9,14. Wskazuje to, iż naprężenia występujące w modelu nie przekraczają granicy plastyczności materiału. Wyniki analizy naprężeń von Misesa wykazały, że wartości naprężeń w modelu mieszczą się w zakresie od $3,1902 \cdot 10^{-7}$ MPa do 12,317 MPa (rys. 8.9.). Maksymalne naprężenia zlokalizowane są, podobnie jak w wariacie 1, w dolnej części protezy, w miejscu koncentracji naprężeń w obszarze przejścia geometrycznego w zakrzywionej części konstrukcji. Ze względu iż w analizowanym przypadku siła przyłożona została do

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

podstaw protezy naprężenia w tym obszarze są około dwukrotnie większe. Jest to widoczne jako obszar oznaczony kolorem czerwonym na mapie naprężeń. Obszary o najniższych wartościach naprężeń znajdują się w górnej części protezy – miejscu utwierdzenia oraz na powierzchniach oddalonych od strefy obciążenia.

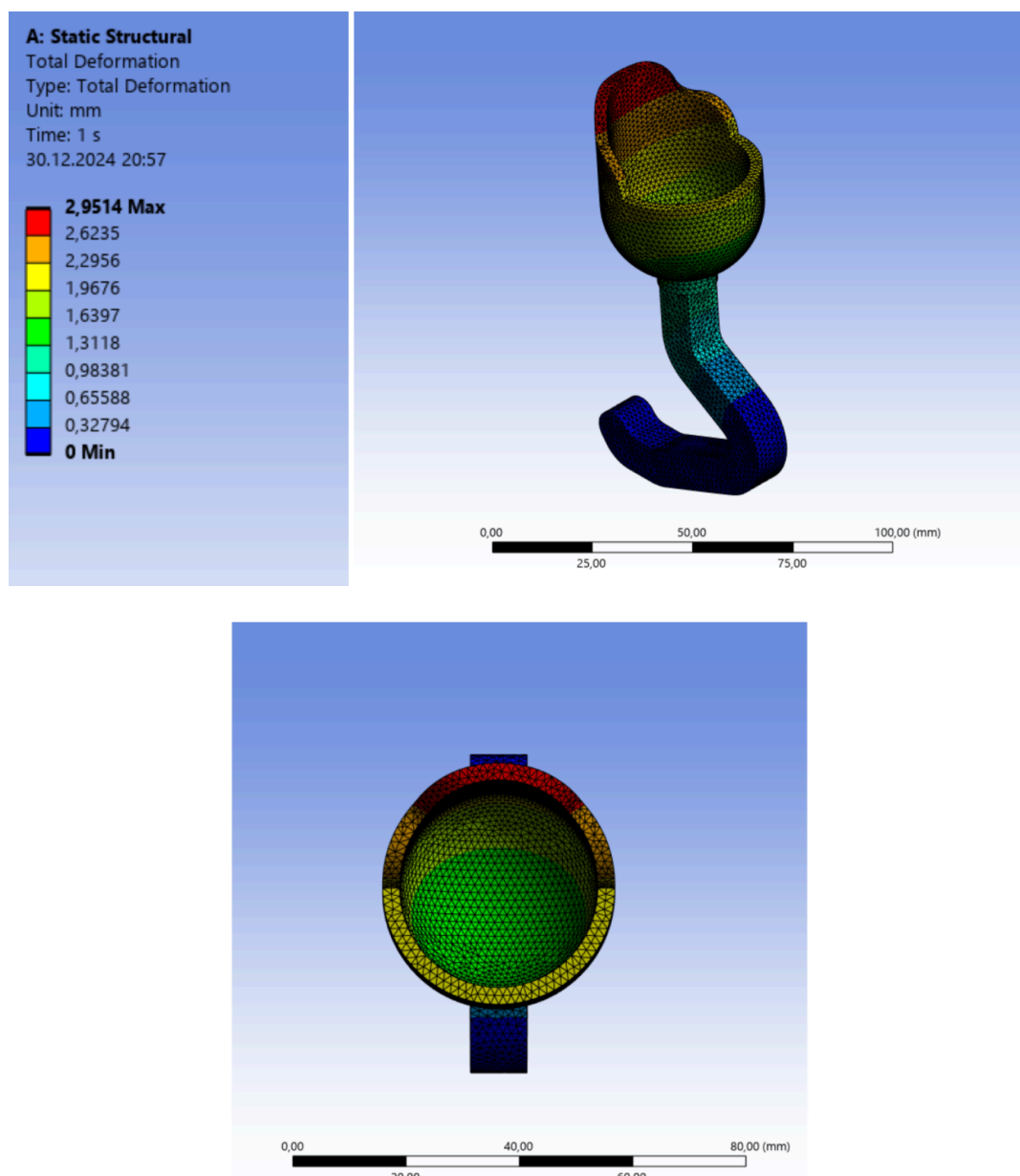


Rys. 8.9. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 2.

8.2.2. Klus (przypadek II)

8.2.2.1. Wariant 1.

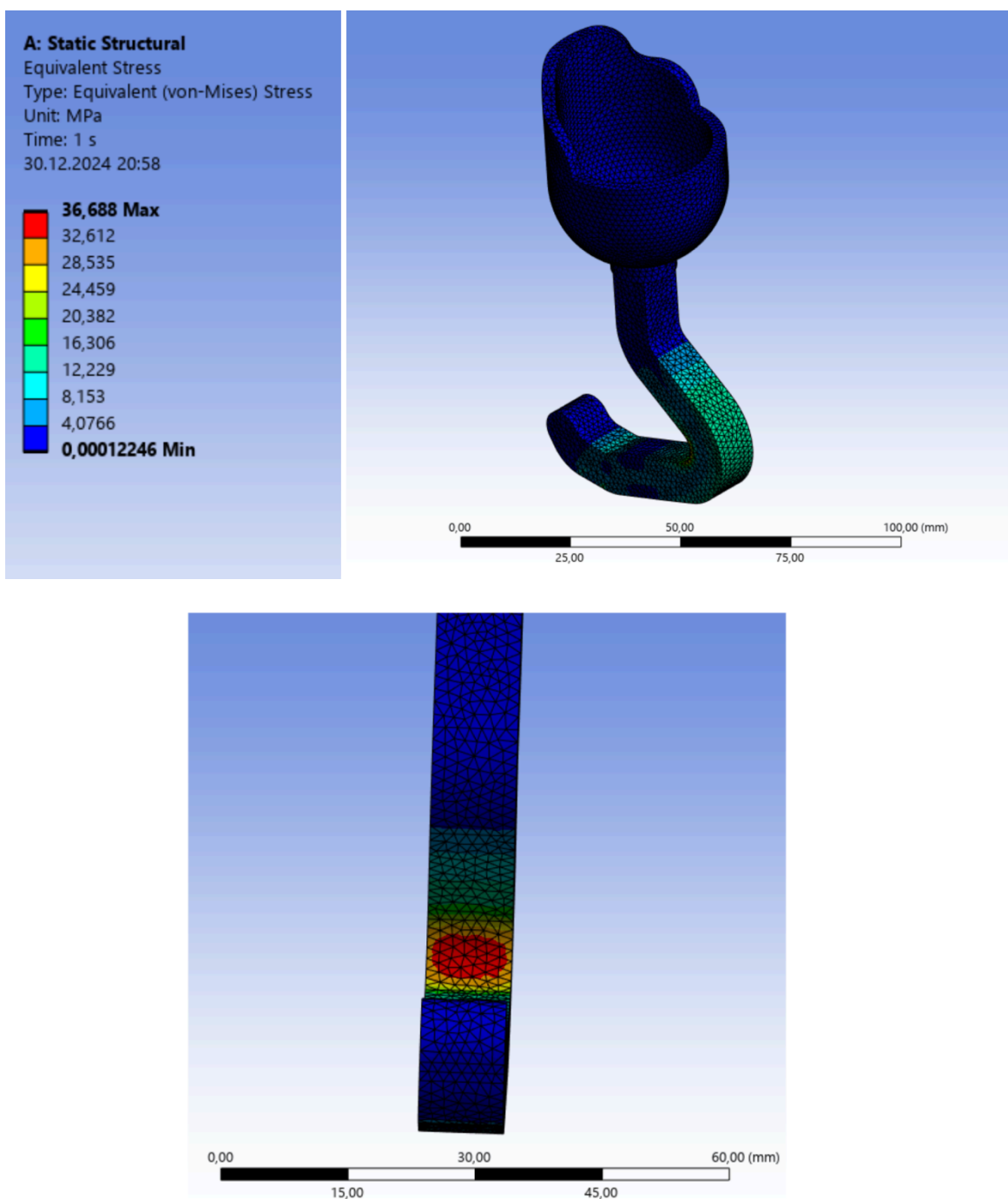
Maksymalne przemieszczenie w przypadku 1. Wariantu klusu wyniosło 2,9514 mm i było skoncentrowane głównie w górnej części leja protezowego. Stanowi to około 2,48% całkowitej wysokości protezy (119 mm). Taka wartość jest stosunkowo niska i może być uznana za akceptowalną w kontekście obciążeń statycznych. Deformacje zmniejszały się w kierunku trzpienia protezy.



Rys. 8.10. Wynik całkowitego przemieszczenia dla wariantu 1.

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

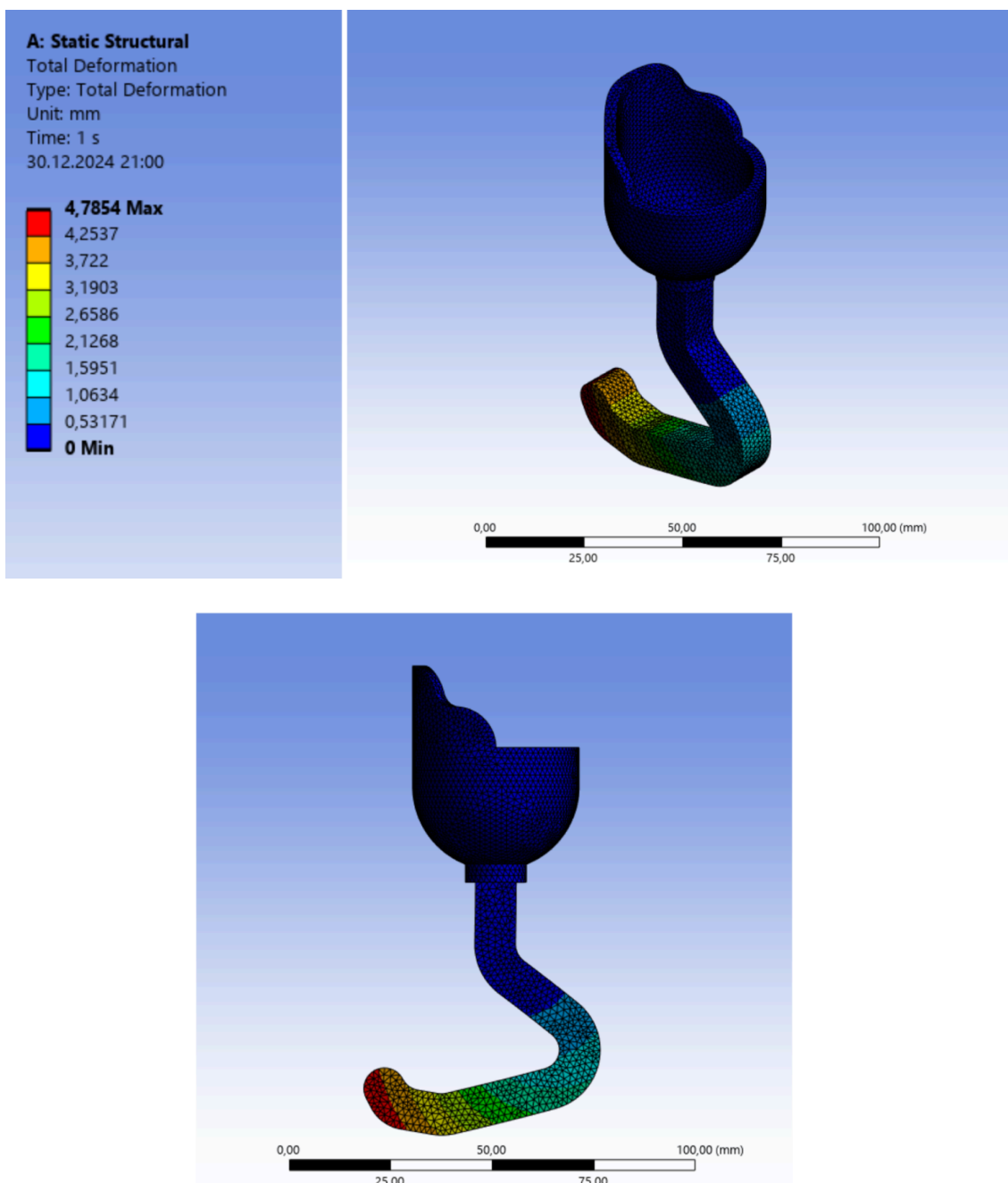
Podczas analizy naprężeń von Misesa wykazano iż naprężenia o wyższych wartościach znajdują się w dolnej części modelu – na wysokości pierwszego wygięcia protezy. Maksymalne naprężenia wynoszące 36,688 MPa, zlokalizowane są wokół obszaru zakrzywienia nogi protezy. Naprężenia te spełniają jednak warunek bezpieczeństwa, współczynnik bezpieczeństwa jest większy od 1 i wynosi 3,16.



Rys. 8.11. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 1.

8.2.2.2. Wariant 2.

Wariant 2 wykazał większe wartości deformacji całkowitej. Maksymalne przemieszczenie wyniosło 4,7854 mm, co stanowi około 4,02% całkowitej wysokości protezy. Taka deformacja może być uznana za znaczącą, szczególnie w obszarze dolnego zakrzywienia trzpienia, gdzie zlokalizowano największe przemieszczenia.

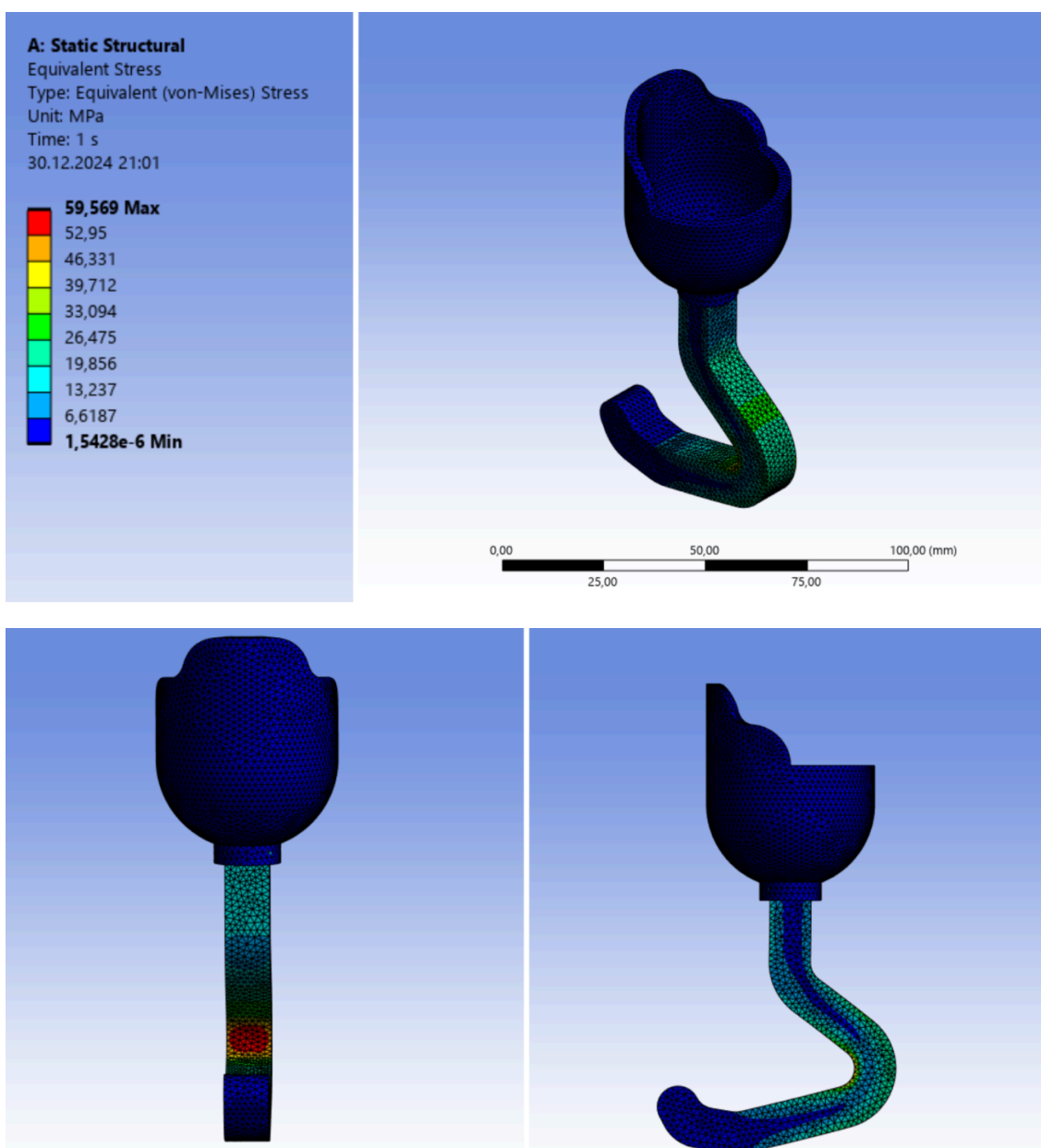


Rys. 8.12. Wynik całkowitego przemieszczenia dla wariantu 2.

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

Dla utwierdzenia w górnej części protezy widoczne jest, podobnie jak w wariancie 1. dla tego samego przypadku, że naprężenia przyjmują wyższe wartości w części nogi protezy. Jednakże wzrost naprężeń rozpoczyna się na wysokości łącznika leja protezowego i trzpienia i znajduje się w narożnikach geometrii. Maksymalne naprężenie wynosi 59,569 MPa oraz skumulowane jest w zakrzywieniu nogi protezy.

Wyznaczony współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji wynosi 1,94 mieści się on więc powyżej dopuszczalnej granicy. Materiał pod wpływem działania naprężeń nie ulega zniszczeniu.



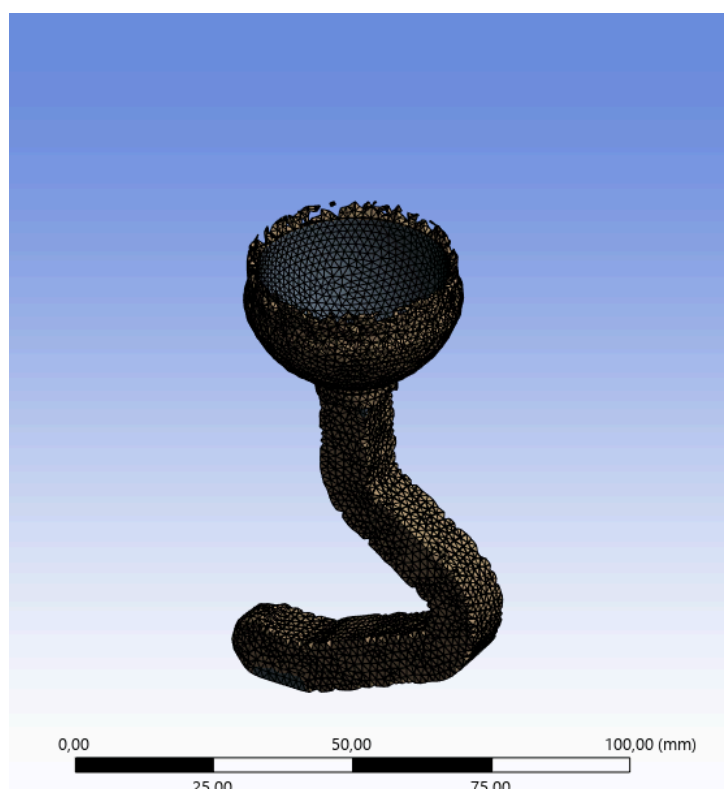
Rys. 8.13. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 2.

9. Optymalizacja topologiczna

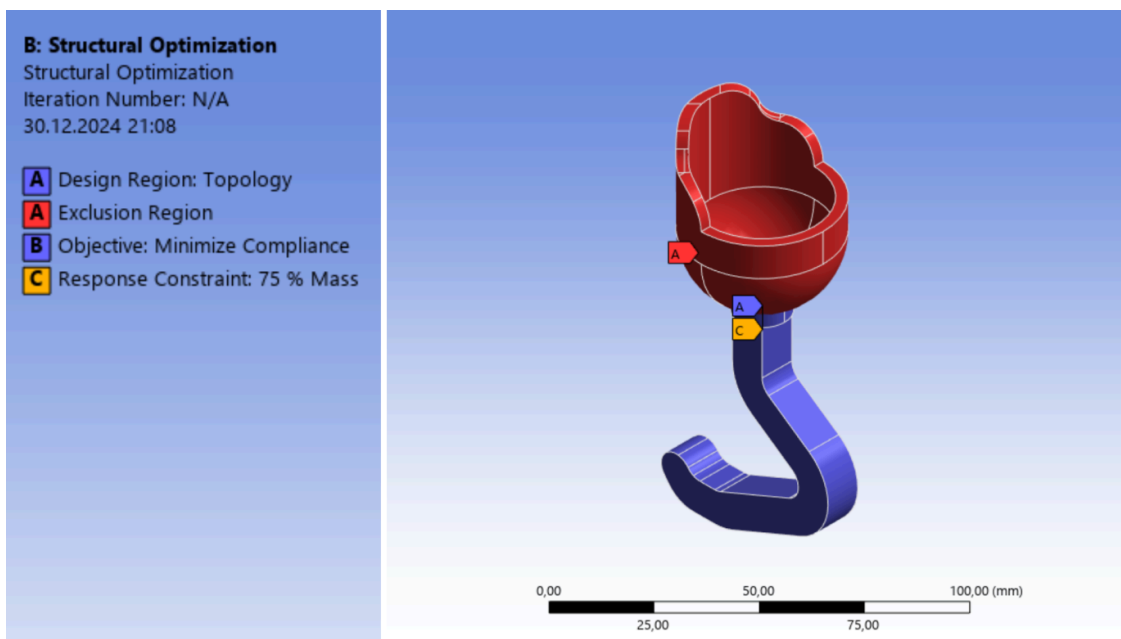
9.1. Analizowany przypadek

Optymalizacji topologicznej poddany został model poddawany analizie w przypadku I w wariancie 1.. Podczas optymalizacji topologicznej jako kryterium odpowiedzi konstrukcji na naprężenia wybrano minimalizację objętości materiału. Takie podejście umożliwiło uzyskanie efektywnej redukcji masy przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej wytrzymałości konstrukcji w obszarze rozpatrywanych naprężeń.

Sprawdzono optymalizację przy zachowaniu odpowiednio 25%, 50% oraz 75% objętości całego materiału. Przy wykonaniu pierwszej optymalizacji zauważono, że w przypadku przyłożonego obciążenia wewnątrz leja protezowego ulegał on redukcji w części mocowania do kończyny oraz wspierającej tył kończyny (rys. 9.1.). Dlatego też powtórzono optymalizację z dodatkowym warunkiem – cały lej protezowy nie jest poddawany optymalizacji. Warunek przedstawiono na rysunku 9.2. Początkowa objętość modelu wynosiła 24341 mm^3 .



Rys. 9.1. Widok pierwszej optymalizacji z redukcją kształtu leja protezowego.

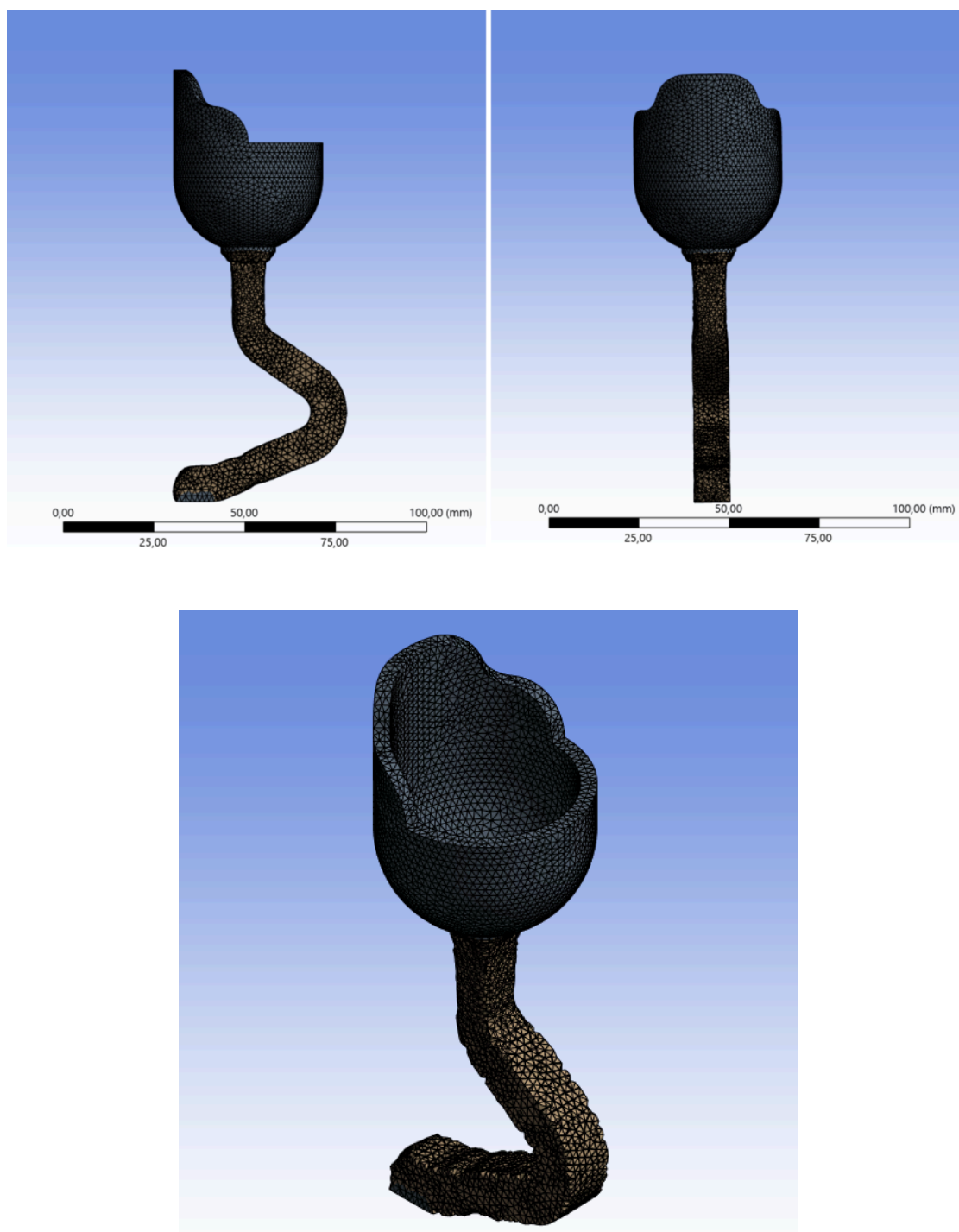


Rys. 9.2. Objętość zachowana oraz poddawana optymalizacji.

9.2. Uzyskane wyniki

Dla optymalizacji zachowania 75% materiału (rys. 9.3.), otrzymana geometria nie wykazuje znaczących zmian w porównaniu do początkowej struktury. Widoczne jest jedynie nieznaczne usunięcie materiału w obszarach o najmniejszym udziale naprężeń, co skutkuje jedynie minimalną poprawą w zakresie redukcji masy elementu. Taka konfiguracja pozostawia strukturę w dużej mierze zbliżoną do pierwotnej, przez co możliwości optymalizacji są ograniczone.

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

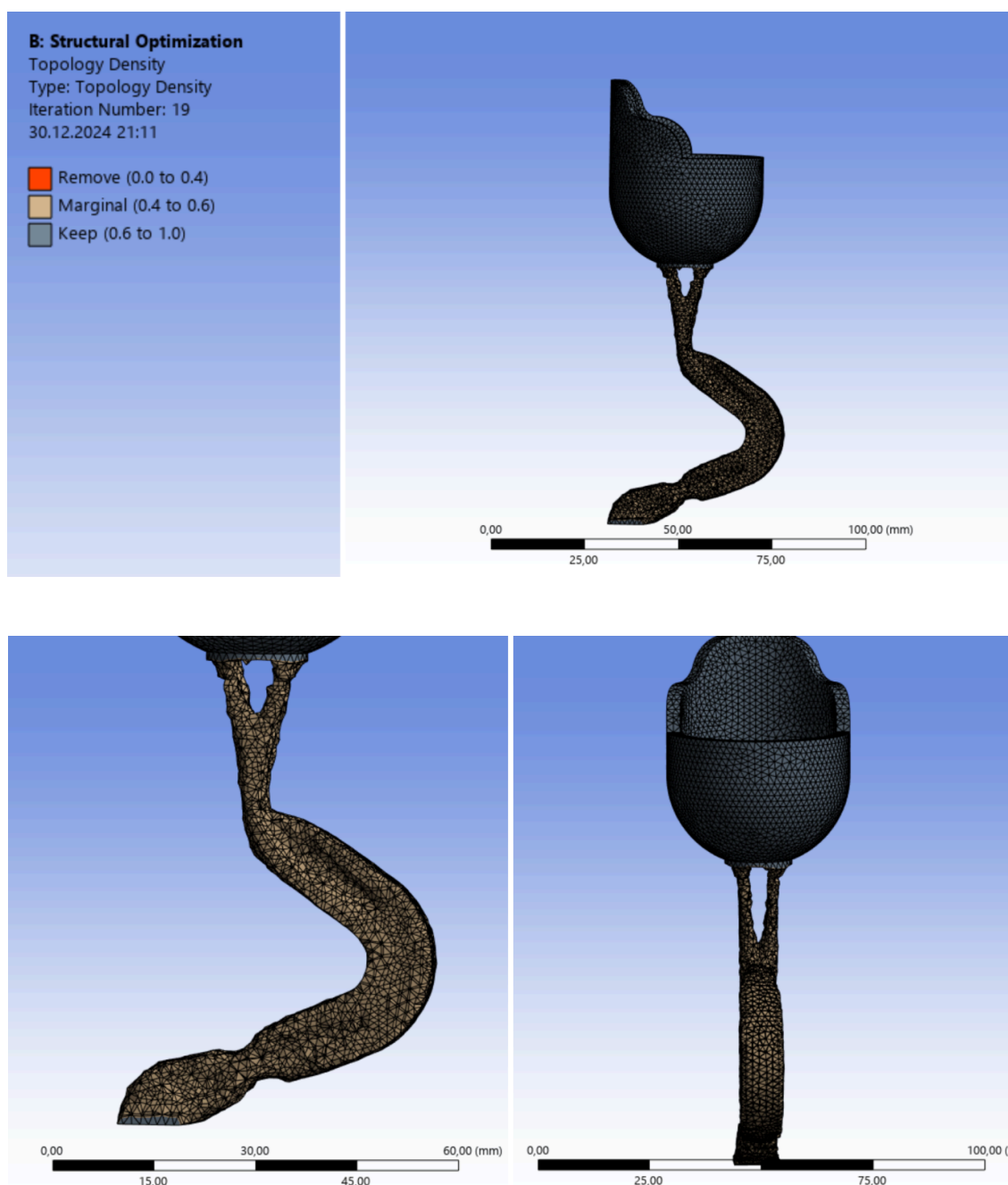


Rys. 9.3. Kształt protezy przy zachowaniu 75% początkowej objętości

W przypadku redukcji zachowanego materiału do 50% (rys. 9.4.), struktura wykazuje znacznie bardziej widoczne zmiany. Obszary o niskiej wartości gęstości topologicznej (od 0 do 0.4) zostały usunięte, co pozwoliło na wyraźne zmniejszenie masy. Optymalizacja wskazała istotne usunięcia materiału w miejscach o mniejszym

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

znaczeniu dla wytrzymałości, jednocześnie zachowując integralność mechaniczną kluczowych elementów konstrukcyjnych.

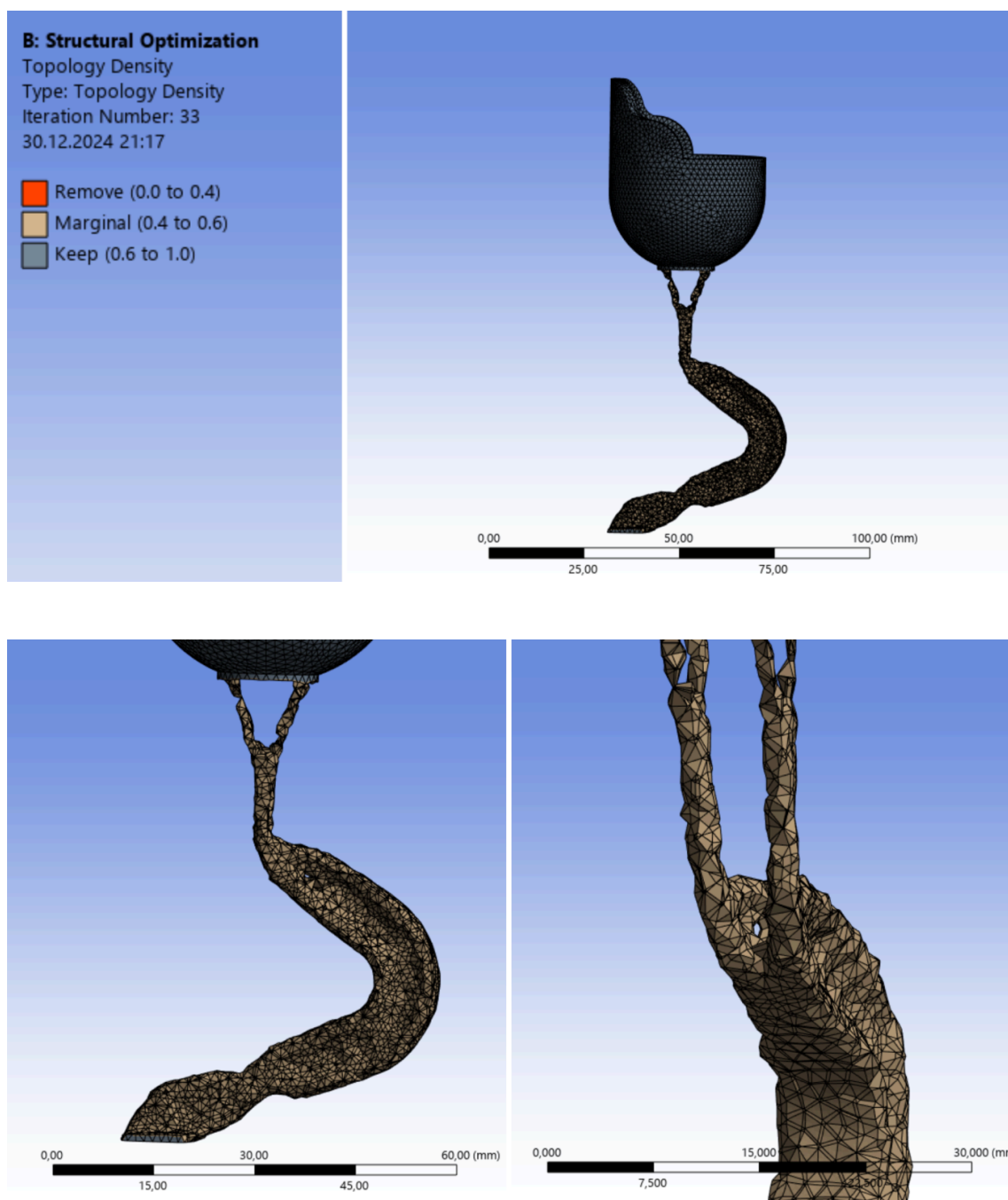


Rys. 9.4. Kształt protezy przy zachowaniu 50% początkowej objętości

Najbardziej interesujące wyniki uzyskano przy założeniu zachowania jedynie 25% materiału (rys. 9.5.). Struktura została zoptymalizowana w sposób radykalny, pozostawiając jedynie niezbędne do przenoszenia obciążeń elementy. W tej konfiguracji zgodnie z założeniem lej protezowy pozostaje nienaruszony, natomiast kształt łączącej

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

go struktury znacząco zmienił się, przypominając strukturę organiczną, która efektywnie rozkłada obciążenia przy minimalnej masie. Taka geometria charakteryzuje się znacznym uproszczeniem i redukcją materiału, jednocześnie zachowując funkcjonalność mechaniczną.



Rys. 9.5. Kształt protezy przy zachowaniu 25% początkowej objętości

10. Wnioski

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie oraz modelowanie protezy kończyny przedniej dla psa rasy jamnik na podstawie zebranych wymiarów zdrowej kończyny oraz mając na uwadze jej naturalny kształt. W ramach pracy przeprowadzono symulację różnych przypadków - chodu oraz klusu, a następnie poddano model optymalizacji topologicznej, by zapewnić wydajność konstrukcji.

Protezę zaprojektowano w oparciu o wymiary zdrowego przedstawiciela rasy. Dzięki specyficznej konstrukcji nogi protezowej oraz uwzględnieniu podczas projektowania powiększenia średnicy, zastosowanie linera, możliwe jest dostosowanie protezy dla dowolnego przedstawiciela tej rasy. Liner oraz pasy mocujące umożliwiają dopasowanie obwodu leja, a przez zmianę wymiarów łącznika lub części dolnej protezy możliwe jest wpłynięcie na wysokość nogi protezowej.

Symulacja komputerowa użytkowania protezy pozwala na analizę naprężeń oraz przemieszczeń pojawiających się w konstrukcji. Wybór materiału PEEK okazał się uzasadniony ze względu na jego właściwości mechaniczne, takie jak wysoka wytrzymałość i niewielka masa, które są kluczowe dla protez kończyn.

Przeprowadzono po dwa warianty (w 1-szym obciążenie zadano w części wewnętrznej leja protezowego, a miejscem utwierdzenia była powierzchnia styku protezy z podłożem, w wariacie drugim wewnątrz leja było miejscem podpory, a siła oddziaływała na podeszwę protezy) dla każdego z przypadków - 30% masy ciała (chód) oraz klusu.

Przeprowadzone symulacje obciążeń w warunkach chodu i klusu wykazały, że naprężenia w konstrukcji protezy mieściły się w granicach współczynnika bezpieczeństwa. Współczynnik bezpieczeństwa wynosił maksymalnie 15,3 dla wariantu pierwszego chodu, a minimalną wartość przyjmował dla klusu w wariacie 2 - 1,94. Pomimo ogólnej stabilności projektu pod względem naprężeń, szczególnej uwagi wymagał przypadek obciążeń w miejscu styku protezy z podłożem, gdzie zaobserwowano większe przemieszczenia całkowite, wynoszące prawie 5 mm, co może wpłynąć na codzienne użytkowanie konstrukcji.

Optymalizacja topologiczna jest kluczowym elementem analizy, umożliwiając znaczną redukcję masy protezy bez utraty jej funkcjonalności. Pierwsza próba optymalizacji ujawniła problemy związane z redukcją materiału w obrębie leja protezowego, szczególnie w obszarach jego mocowania do kończyny oraz wspierania tylnej części kończyny. W odpowiedzi na wynik wprowadzono dodatkowe ograniczenie, uniemożliwiające optymalizację materiału w obrębie całego leja. Zachowanie 75% objętości materiału nie wprowadza większych zmian w geometrii modelu - redukcji uległy części nieprzenoszące naprężeń. Dla zmniejszonej wielkości materiału widoczna była tendencja w obrębie części łącznika oraz górnej części nogi protezowej. Najbardziej obiecujące wyniki uzyskano przy zachowaniu jedynie 25% początkowej objętości materiału, co wskazuje na potencjał dalszego rozwoju konstrukcji w kierunku minimalizacji masy przy jednoczesnym zachowaniu integralności strukturalnej.

Praca ta dostarcza cennych danych dotyczących projektowania, symulacji i optymalizacji protez dla zwierząt. Stanowi ona podstawę do dalszych badań w tej dziedzinie i wykazuje, że zastosowanie nowoczesnych narzędzi inżynierskich pozwala na tworzenie rozwiązań, które mogą znacząco poprawić jakość życia zwierząt z amputacjami kończyn. Pomimo uzyskanych pozytywnych wyników, symulacje komputerowe nie odzwierciedlają w pełni naturalnego użytkowania protezy przez zwierzę, co utrudnia uwzględnienie specyfiki ruchu oraz interakcji z tkankami i podłożem. Indywidualne cechy pacjentów, jak zachowanie psa, sposób poruszania się, mogą wpływać na użytkowanie protezy. Konieczne są badania eksperymentalne nad protezą, aby ocenić jej rzeczywistą funkcjonalność, trwałość i reakcję na użytkowanie. Wyniki teoretyczne należy traktować jako punkt wyjścia do dalszych, bardziej zaawansowanych analiz i testów.

Bibliografia

- [1] Przespolewska H., Kobryń H., Szara T., Bartyzel B. J., *Podstawy anatomii zwierząt domowych*. Wieś Jutra Sp. z o.o., Warszawa 2014.
- [2] <https://www.medianauka.pl/szkielet-psa> (dostęp 08.09.2024).
- [3] Dyce K. M., Syke W. O., Wensing C. J. G., *Anatomia weterynaryjna*. Saunders Elsevier Inc., St. Louis 2011.
- [4] <https://veteriankey.com/canine-anatomy/> (dostęp 09.09.2024).
- [5] <http://e-zwierzaki.com.pl/konczyny-przednie-psa-ocena/> (dostęp 09.09.2024).
- [6] Wzorzec FCI nr 148 - <https://www.zkwp.pl/wzorze/148.pdf> (dostęp 09.09.2024).
- [7] https://planetajamnikow.pl/przewodnik-po-rodzajach-siersci-i-umaszczeniu-jamnikow/#Umaszczenie_Jamnikow_%E2%80%93_Jamniki_o_Nietypowym_Kolorze_Siersci (dostęp 11.09.2024).
- [8] <https://psy-pies.com/artykul/jamnik-krotkowlosy,105.html> (dostęp 11.09.2024).
- [9] https://www.physio-pedia.com/Anatomy_of_the_Canine_Front_Limb (dostęp 29.09.2024).
- [10] Kastlunger T. , *Design of Prototype Prosthesis for a Canine with a Right Front Limb Deformity as an alternate approach to stabilize gait and withstand gait forces*, 2020, doi:10.15368/theses.2020.26.
- [11] <https://www.psy.pl/artykuly/aktualnosci/piekny-jak-pies-w-klusie> (dostęp 16.09.2024).
- [12] <https://bordogi.weebly.com/wisdom/canine-gaits> (dostęp 16.09.2024).
- [13] <https://www.psy.pl/artykuly/ciekawostki/jak-sie-porusza-pies> (dostęp 16.09.2024).
- [14] Arauz P. G., Chiriboga P., Garcia M. G., Kao I., Diaz E. A., *New technologies*

- applied to canine limb prosthesis: A review*, Vet World 2021; 14(10): 2793-2802, doi:10.14202/vetworld.2021.2793-2802.
- [15] <https://b3d.com.pl/weterynaria-i-3d-czy-takie-polaczenie-jest-mozliwe/> (dostęp 29.09.2024).
- [16] <https://am3d.pl/blog/start-up-vet-tech-wprowadza-drukowane-w-3d-ortezy-i-protezy-dla-zwierzat/> (dostęp 29.09.2024).
- [17] <https://www.avma.org/javma-news/2019-07-01/one-mans-wheelchairs-have-kept-thousands-disabled-pets-moving> (dostęp 19.09.2024).
- [18] <https://bestomed.pl/pl/c/Wozki-inwalidzkie-dla-psow/143> (dostęp 19.09.2024).
- [19] Krawczuk M., *Mechanika Ciała Stałego*, Skrypt do zajęć z przedmiotu Mechanika Ciała Stałego, 2005: 6-7
- [20] Bower A. F., *Applied Mechanics of Solids*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton (FL) 2010. (<https://solidmechanics.org/>)
- [21] Sikora J., *Numeryczne metody rozwiązywania zagadnień brzegowych. Podstawy metody elementów skończonych i metody elementów brzegowych*, Politechnika Lubelska, Lublin 2012.
- [22] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L., *The Finite Element Method*. Butterworth-Heinemann, Oxford 2000.
- [23] Logan D. L., *A First Course in the Finite Element Method*. Thomson, Canada 2012.
- [24] Szeptyński P., *Szczegółowe omówienie podstawowych zagadnień teorii sprężystości*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2020.
- [25] https://komes.pl/analiza-mes-zastosowanie/#Czym_jest_analiza_MES (dostęp 11.11.2024).
- [26] Oladapo B. I., Zahedi S. A., Ismail S. O., Omigbodun F. T. , *3D printing of PEEK and its composite to increase biointerfaces as a biomedical material- A*

- review*. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 2021; 203, doi: 10.1016/j.colsurfb.2021.111726.
- [27] <https://www.plastem.pl/oferta/tworzywa-sztuczne/peek/>, dostęp 11.12. 2024.
- [28] Kanade D., Sheikh A., Umbre S., Shinde P., Tile P., Utwale S., Thakur A., *3D Printed Prosthetics Limb for Dog*. NeuroQuantology 2022; 20(13): 2695-2701, doi:10.14704/nq.2022.20.13.NQ88337.
- [29] <https://www.facebook.com/upwroclaw> (dostęp 11.12.2024).
- [30] Kingman J. J., Tsavdaridis K. D., Toropov V., *Applications of topology optimization in structural engineering: High-rise buildings and steel components*. Jordan Journal of Civil Engineering 2015; 9(3): 335-357, doi:10.14525/jjce.9.3.3076.
- [31] <https://3d.edu.pl/co-to-jest-optymalizacja-topologii-proste-wyjasnienie/> (dostęp 11.12.2024).
- [32] Paulino, D. M. S., Leonel, E. D., *Topology optimization and geometric nonlinear modeling using positional finite elements*. Optimization and Engineering 2021; 23(11), doi:10.1007/s11081-021-09661-9.
- [33] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.stfactory.anglemeter> (dostęp 18.12.2024).
- [34] <https://www.autodesk.com/pl> (dostęp 12.12.2024).
- [35] <https://www.cyfronet.pl/komputery/13387,artykul,ansys.html> (dostęp 20.12.2024).
- [36] <https://mesco.com.pl/produkty-ansys/ansys/> (dostęp 20.12.2024)..
- [37] <https://www.ansys.com/> (dostęp 20.12.2024).
- [38] https://help.solidworks.com/2011/polish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Checking_stresses/Factor_of_Safety_Definition.htm (dostęp 30.12.2024).

- [39] <https://cador.pl/uslugi/analizy-wytrzymalosciowe/> (dostęp 30.12.2024).
- [40] Voss K., Galeandro L., Wiestner T., Haessig M., Montavon P. M., *Relationships of body weight, body size, subject velocity, and vertical ground reaction forces in trotting dogs*. *Veterinary Surgery* 2010; 39(7), 863-869. doi: 10.1111/j.1532-950X.2010.00729.x.
- [41] Lesiuk G., Swicka A., Correia J. A. F. O., Frątczak R., *Fracture resistance analysis of PEEK-polymer*. *Engineering Structures and Technologies* 2017; 9(4): 207–213, doi:10.3846/2029882X.2017.1417062.
- [42] <https://www.tworzywa.pl/wiedzopedia/bazatworzyw/97,polieteroeteroketon-pe-ek,polimer.html> (dostęp 30.12.2024).
- [43] Moszyński W., *O wyznaczaniu współczynników bezpieczeństwa konstrukcji*, Warszawa 1954.
- [44] Gokhale N. S., Deshpande S., Bedekar S., Anand N. T., *Practical Finite Element Analysis Finite to Infinit*, 2008: 1-15.
- [45] <https://polskiprzemysl.com.pl/cam-cad-cae/podstawy-analizy-mes-w-praktyce/> (dostęp dnia 20.01.2025).
- [46] <https://enterfea.com/pl/dobry-rozmiar-siatki-mes/> (dostęp dnia 20.01.2025).
- [47] <https://solidmania.com/optymalizacja-topologii-solidworks-simulation-2018/> (dostęp dnia 20.01.2025).
- [48] Bendsoe M. P., Sigmund O., *Topology optimization theory, methods and applications* Springer, 2003.
- [49] <https://www.swiatdruku3d.pl/optymalizacja-topologii-w-druku-3d/> (dostęp dnia 20.01.2025).
- [50] <https://3d.edu.pl/co-to-jest-optymalizacja-topologii-proste-wyjasnienie/> (dostęp dnia 20.01.2025).

Spis rysunków

Rys. 2.1. Szkielet psa [2].....	8
Rys. 2.2. Mięśnie skórne psa z odsłoniętymi mięśniami powierzchniowymi głowy [1].....	10
Rys. 2.3. Płaszczyzny ciała zwierzęcia [3].....	11
Rys. 2.4. Kości kończyny przedniej wraz z ruchomością stawów [4].....	12
Rys. 2.5. Łopatka psa (widok od strony bocznej – A oraz przyśrodkowej – B): 1 - grzebień łopatki, 2 - dół podgrzebieniowy, 3 - dół nadgrzebieniowy, 4 - wyrostek barkowy, 5 - guzek nadpanewkowy, 6 - brzeg dogrzebietowy, 7 - dół podłopatkowy, 8 - wydrążenie stawowe, 9 - powierzchnia zębata [1].....	13
Rys. 2.6. Kości przedramienia psa: 1 – głowa kości promieniowej, 2 – trzon kości promieniowej, 3 - bloczek kości promieniowej, 4- wyrostek łokciowy, 8 – trzon kości łokciowej, 9 – głowa kości łokciowej [1].....	14
Rys. 2.7. Kościec ręki psa widok z przodu: 1- kości nadgarstka, 2- kości śródreżca, 3 - człon palcowy bliższy, 4 - człon palcowy środkowy, 5 - człon palcowy dalszy, 6 - kość rysikowa [1].....	15
Rys. 2.8. Różne odmiany jamników (od lewej): szorstkowłosey, długowłosey i krótkowłosey (gładkowłosey) [7].....	17
Rys. 2.9. Przykładowa budowa jamnika [8].....	18
Rys. 5.1. Wózek inwalidzki dla psów Corgie wyprodukowany przez firmę Walkinpets [18].....	26
Rys. 5.2. Połączenie endo-egzoprotezy: a) implant wszczepiany w kość zwierzęcia, b) połączenie implant-proteza, c) pozostała część protezy.....	27
Rys. 5.3. Proteza dla psa [28].....	28
Rys. 6.1. Wyniki deformacji w zależności od gęstości siatki [46].....	35

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

Rys. 6.2. Porównanie metod optymalizacji strukturalnej: rozmiaru, kształtu i topologii [48].....	36
Rys. 7.1. Wymiary kończyny przedniej.....	38
Rys. 7.2. Kąt α między osią kończyny przedniej a paliczkami.....	40
Rys. 7.3. Pomiar kąta α za pomocą aplikacji Angle Mater.....	40
Rys. 7.4. Interfejs programu Autodesk Inventor Professional 2024.....	41
Rys. 7.5. Interfejs programu Ansys.....	42
Rys. 7.6. Model protezy kończyny piersiowej jamnika, widok: a) z przodu, b) z boku.....	43
Rys. 7.7. Model protezy kończyny piersiowej jamnika, widok szczegółowy na elementy leja protezowego.....	43
Rys. 7.8. Model protezy kończyny piersiowej jamnika, widok na szczegóły części podporowej.....	44
Rys. 7.9. Wymiary protezy widok od boku.....	45
Rys. 8.1. Wariant 1. – siła przyłożona do wnętrza leja, utwierdzenie znajduje się w podszwie protezy.....	46
Rys. 8.2. Wariant 2. – siła przyłożona do podeszwy protezy, utwierdzenie znajduje się we wnętrzu leja.....	47
Rys. 8.3. Uproszczony model protezy poddawany analizie.....	48
Rys. 8.4. Siatka elementów.....	49
Rys. 8.5. Wynik całkowitego przemieszczenia dla wariantu 1.....	51
Rys. 8.6. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 1.....	52
Rys. 8.7. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 1 – zbliżenie na miejsce kumulacji naprężeń.....	53
Rys. 8.8. Wynik całkowitego przemieszczenia dla wariantu 2.....	54

Modelowanie komputerowe protezy kończyny dla psa rasy jamnik

Rys. 8.9. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 2.....	55
Rys. 8.10. Wynik całkowitego przemieszczenia dla wariantu 1.....	56
Rys. 8.11. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 1.....	57
Rys. 8.12. Wynik całkowitego przemieszczenia dla wariantu 2.....	58
Rys. 8.13. Rozkład naprężeń Von Misesa dla wariantu 2.....	59
Rys. 9.1. Widok pierwszej optymalizacji z redukcją kształtu leja protezowego.....	60
Rys. 9.2. Objętość zachowana oraz poddawana optymalizacji.....	61
Rys. 9.3. Kształt protezy przy zachowaniu 75% początkowej objętości.....	62
Rys. 9.4. Kształt protezy przy zachowaniu 50% początkowej objętości.....	63
Rys. 9.5. Kształt protezy przy zachowaniu 25% początkowej objętości.....	64

Spis tabel

Tab. 7.1. Wartości wymiarów kończyny przedniej.....	39
Tab. 8.1. Wielkości obciążeń dla przypadku I i II.....	48
Tab. 8.2. Właściwości mechaniczne polieteroeteroketonu (PEEK) wykorzystywane podczas symulacji.....	49