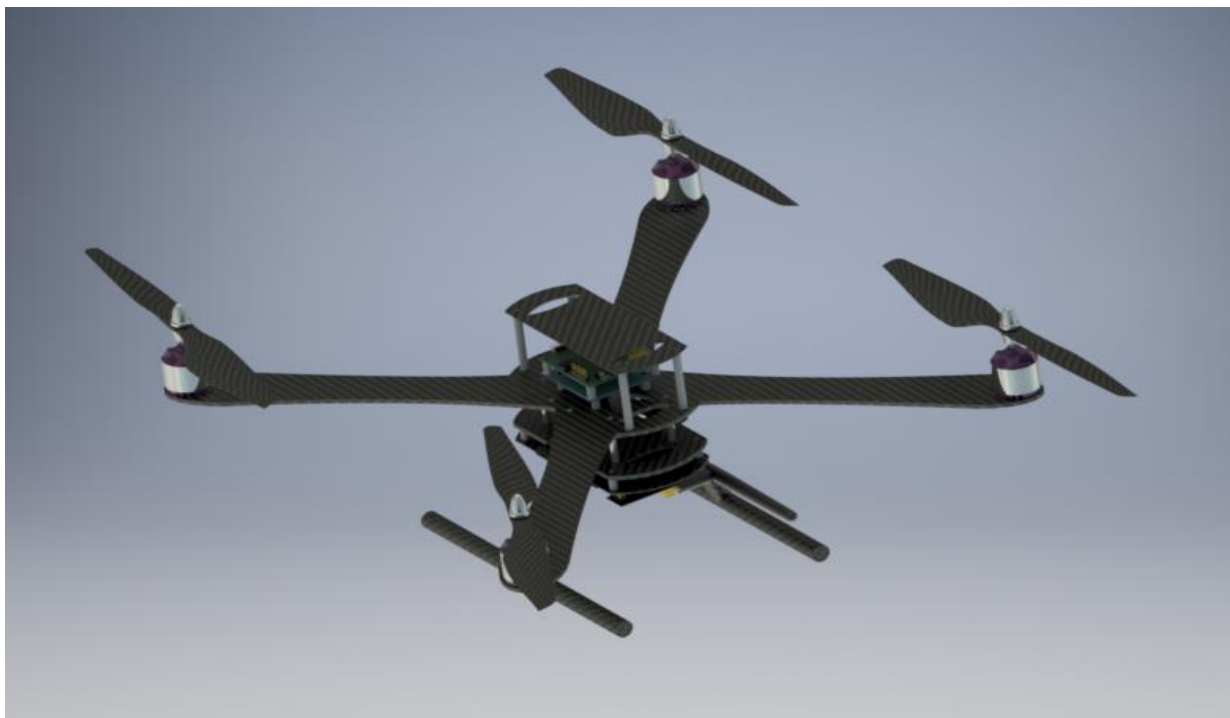


1.1. Model konstrukcji

Model 3D konstrukcji platformy powstał w programie Inventor Profesjonal 2017 firmy Autodesk w wersji studenckiej. Jako latającą platformę wybrany został układ quadcoptera w układzie „X” o rozmiarze klasy „450”, co oznacza rozmiar przekątnej ramy wynoszący 450 mm. Projekt powstał na podstawie obserwacji innych konstrukcji. Całość konstrukcji ma charakter modułowy, umożliwiając odpowiednio konfigurowanie platformy pod dane zastosowanie oraz możliwość serwisowania. Wszystkie elementy wyposażenia zostały zamodelowane w odpowiednim uproszczeniu, dbając o zachowanie znaczących rozmiarów oraz rozmieszczenie otworów montażowych. Pozwoliło to na ułatwienie procesu wykonawczego pojedynczych części.



Rys.1.1.1. Kompletny model 3D quadcoptera.

1.2. Konstrukcja ramy.

Rynek oferuje wiele gotowych rozwiązań, które można głównie podzielić na trzy kategorie ze względu na rodzaj zastosowanych ramion. Występują ramy o ramionach płaskich, ramionach rurowych oraz o kształtach nieregularnych. W przedstawionym projekcie została wybrana rama płaska, której zaletami są: jednolitość konstrukcji, brak połączeń między elementami oraz uproszczenie konstrukcji.

1.2.1. Materiały użyte w konstrukcji ramy.

Rama została wykonana w technologii kompozytowej. Do jej produkcji wykorzystano tkaninę węglową o gramaturze 200g/m² o splocie skośnym (twill), tkaninę szklaną 200g/m² również o splocie skośnym (twill), matę o strukturze plastra miodu Coremat firmy Lantor o grubości 4 mm. Wybrana została konstrukcja oparta na włóknie węglowym oraz szklanym, łącząc zalety obu rodzajów włókien. Pierwszym kryterium wyboru włókien szklanych w połączeniu z węglowymi jest ich niska cena. Obecnie stosunek cen kilograma włókna szklanego do włókna węglowego wynosi 1 do 10. Włókno węglowe zastosowano z uwagi na bardzo dobre właściwości wytrzymałościowe oraz wygląd kojarzony z produktami profesjonalnymi.

Tab.1.1 Wybrane własności niektórych polimerowych kompozytów konstrukcyjnych

| Material | Tkanina | Tkanina |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Właściwość | Szklana + epoksyd | Węglowa + epoksyd |
| V_f [%] | 33 | 50 |
| R_m [MPa] | 360 | 625 |
| E [GPa] | 17 | 70 |
| G [GPa] | 5 | 5 |
| Wsp. Poissona | 0,24 | 0,1 |
| Gęstość [kg/m³] | 1,92 | 1,53 |

Gdzie:

V_f – udział objętościowy włókien w materiale,

R_m – wytrzymałość na rozciąganie w kierunku ułożenia włókien i kierunku poprzecznym.

E – Moduł sprężystości wzdłużnej w kierunku ułożenia włókien.

G – moduł sprężystości poprzecznej przy ścinaniu w płaszczyźnie.

Kompozyt ma budowę kanapkową, której wierzchnią warstwę stanowi laminat węglowo-szklany, natomiast rdzeń wykonany jest z maty o strukturze sześciokątów. Coremat jest bazową włókniną zastępującą maty z włókien szklanych w laminatach wytwarzanych ręcznie lub metodą natryskową. Materiał ten podnosi nieporównywalnie wytrzymałość produktu oraz zmniejsza zużycie żywic ze względu na obecność mikro kulek wypełniających matę Coremat. Zaletami kompozytu wykorzystującego matę Coremat, są :

- lepsza wytrzymałość,
- poprawiona sztywność,
- obniżone zużycie żywicy,
- redukcja ciężaru produktu gotowego.

Jako osnowę zastosowano żywicę epoksydową LP 240, wraz z utwardzaczem HP 363. Żywica nie zawiera rozpuszczalników organicznych, jest bezbarwna, bezwonna, nie wymaga wygrzewania oraz nadaje się do aplikacji ręcznej. W temperaturze pokojowej produkt utwardza się, osiągając odporność cieplną około 60 °C, natomiast dzięki wygrzewaniu można uzyskać odporność na poziomie 120 °C. Utwardzacz również sprawdza się przy laminowaniu ręcznym niewielkich elementów lub przy naprawach miejscowych, kiedy zależy nam na szybkim utwardzeniu produktu. Czas żelowania 100 g przy 23°C wynosi 25-35 minut.

Jako materiał rozdzielający wykorzystany przy laminowaniu zastosowano papier silikonowy, który jest wykorzystywany przy zabezpieczeniu powierzchni pokrytej klejem np.: folie samoprzylepne. Odporność na przyleganie kleju oraz gładka powierzchnia powoduje powstawanie laminatów o bardzo wysokiej jakości powierzchni.

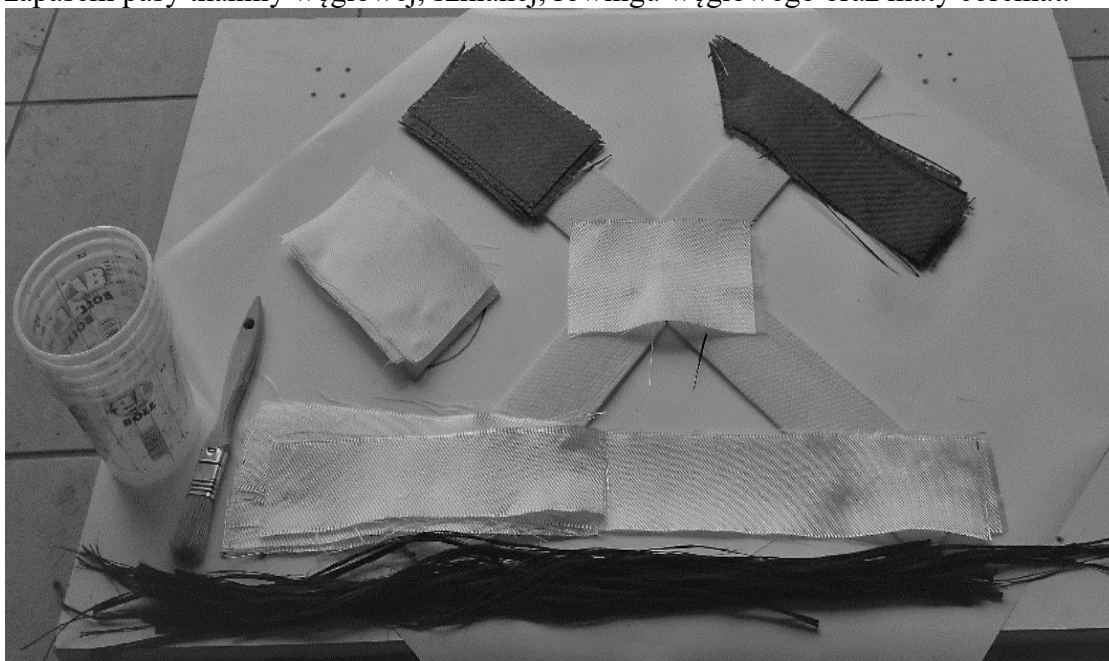


Rys.1.2. Wykorzystane materiały, od dołu: Coremat, tkanina węglowa, tkanina szklana, żywica wraz z utwardzaczem.

1.2.2. Budowa płyt kompozytowej ramy

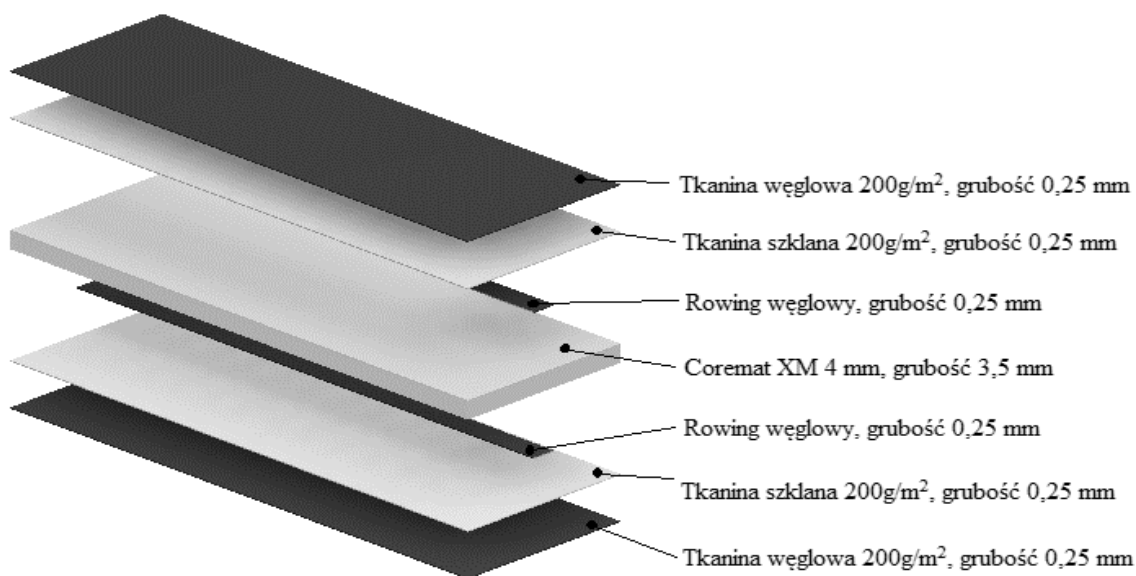
Rama składa się z płyt wykonanych techniką laminowania ręcznego (ang. hand lay-up), połączonego z prasowaniem wyrobu. Zastosowanie metody było możliwe dzięki zaprojektowaniu ramy składających się z płaskich elementów. Prostota tej metody pozwala na szybkie produkowanie nowych wyrobów, przy niskich kosztach oprzyrządowania, jednak jakość wyrobu w dużym stopniu zależy od dobrze przygotowanej technologii produkcji, przestrzegania zawartych w niej procedur oraz od rzemieślniczych umiejętności i solidności bezpośredniego wykonawcy wyrobu.

Korzystając z zaprojektowanego modelu 3D, geometria elementów ramy została wydrukowana, a następnie przeniesiona na papier silikonowy. Następnie przygotowano materiały, przycięte z odpowiednim zapasem pasy tkaniny węglowej, szklanej, rowingu węglowego oraz maty coremat.



Rys.1.3. Przygotowane materiały wykorzystane do laminowania

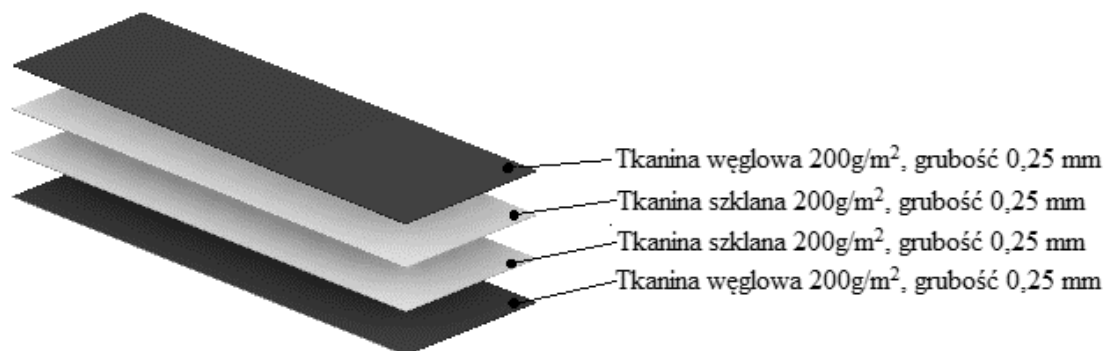
Kolejną czynnością była laminacja przy użyciu mieszaniny żywicy oraz utwardzacza, wymieszanych w proporcjach wagowych 100:60. Nasączenie tkanin odbyło się metodą kontaktową za pomocą pędzla. Kolejne warstwy zostały naniesione zgodnie z założoną budową kompozytu kanapkowego pokazanego na rysunku 1.4.



Rys.1.4. Schemat ułożenia warstw kompozytu kanapkowego głównych elementów ramy o grubości 4 mm.

Po nałożeniu ostatniej warstwy tkaniny, całość części przykryto papierem silikonowym. Do prasowania zostały użyte dwie płyty meblowe, zapewniające odpowiednią gładkość oraz sztywność. Laminat pokryty obustronnie papierem silikonowym został umieszczony między dwa blaty, w celu uzyskania jednakowej grubości 4 mm zastosowano płaskowniki aluminiowe o grubości 4 mm, ułożone wzdłuż obrysu konstrukcji. Następnie całość została obciążona ciężarem około 1000 N i pozostawiona na 48 h w celu utwardzenia.

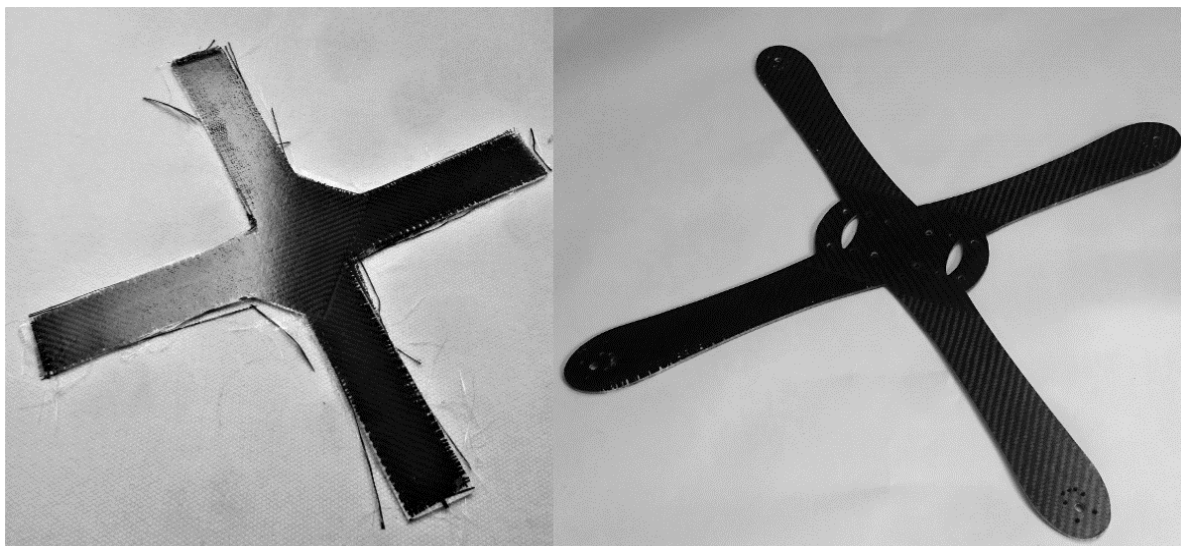
Podobnie wykonane zostały elementy kompozytowe takie jak: podstawa odbiornika, podstawa modułu pomiarowego oraz elementy podwozia. Zostały wykonane z laminatu węglowo – szklanego, zgodnie ze schematem na rysunku 1.5.



Rys.1.5. Schemat ułożenia warstw kompozytu części o mniejszych wymaganiach wytrzymałościowych.

Wymienione części charakteryzują się brakiem wymagań wytrzymałościowych, mogły więc zostać wykonane z uwzględnieniem kryterium minimalnej masy. Powstałe płyty posiadają grubość 1 mm.

Utwardzone elementy zostały obcięte do wymaganych kształtów. Posłużyły do tego szablony przygotowane z rysunków 2D elementów. Rysunki wydrukowane zostały w skali 1:1, a następnie naklejone na elementy. Do wycięcia posłużyła piła włosowa z brzeszczotem przeznaczonym do cięcia metalu, o drobnych zębach. Wycięte elementy zostały przeszlifowane wzdłuż krawędzi cięcia, doprowadzając do założonego kształtu. Otwory montażowe zostały wykonane na wiertarce stołowej za pomocą wiertel ϕ 3 mm, ϕ 4 mm oraz ϕ 7 mm.



Rys.1.6. Po lewej płyta ramy po wyciągnięciu z prasy, z prawej gotowa płyta.

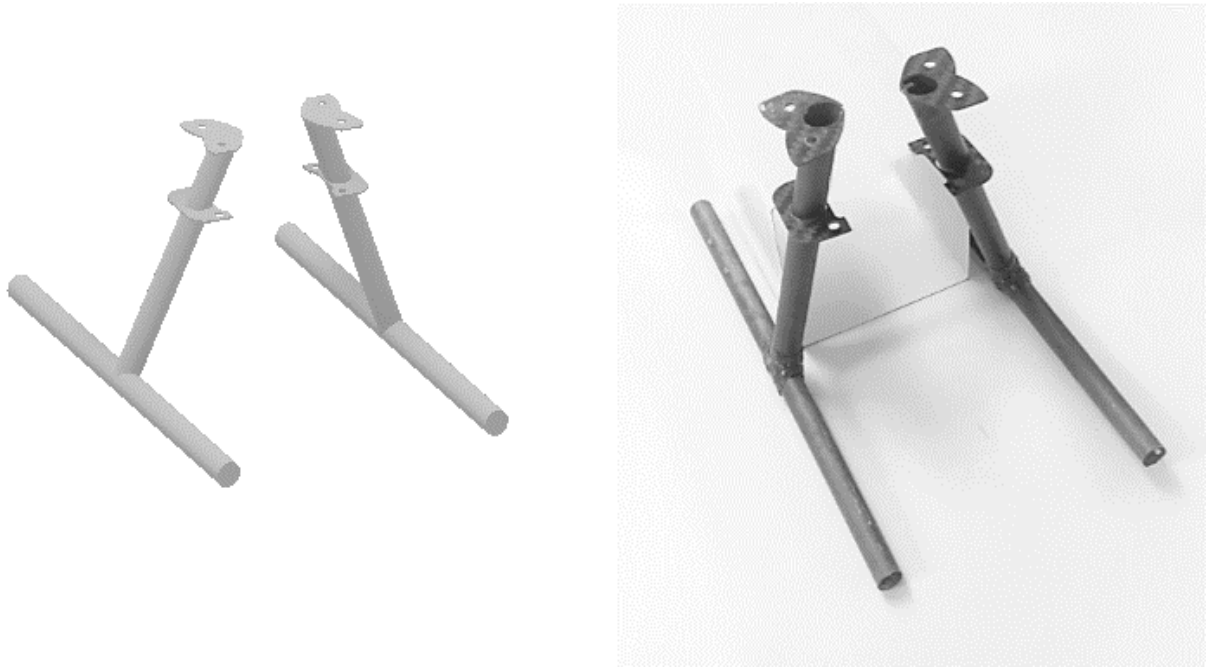
Tab.2 Ilości zużytych materiałów oraz koszty

| Material | Zużyta ilość | Cena jednostkowa | Koszt | Wymagana ilość żywicy do przesączenia | Wymagane zużycie przeliczone na zużytą ilość |
|--|-----------------------|----------------------|----------|---------------------------------------|--|
| Coremat XM 4 | 0,0717 m ² | 40 zł/m ² | 2,90 zł | 1500 g/m ² | 107,55g |
| Tkanina szklana | 0,2388 m ² | 8 zł/m ² | 1,91 zł | 165 g/m ² | 39,4 g |
| Tkanina węglowa | 0,2196 m ² | 70 zł/m ² | 15,37 zł | 234 g/m ² | 51,39 g |
| Żywica LP 240 | 0,1 kg | 46,74 zł/kg | 4,67 zł | Suma | 198,34 g |
| Utwardzacz HP 363 | 0,06 kg | 84,05 zł/kg | 5,04 zł | | |
| Całkowita ilość wykorzystanej żywicy oraz utwardzacza | 160 g | Suma kosztów | 29,87 zł | | |

Tabela pokazuje niski koszt budowy elementów ramy, w porównaniu z konstrukcjami gotowymi, które są od dwóch do dziesięciu razy droższe. Należy jednak zwrócić uwagę, że otrzymany koszt byłby osiągalny podczas produkcji seryjnej, gdyż minimalna ilość zamawianych materiałów to 1 m² w przypadku tkanin oraz 1 kg w przypadku żywicy. Zauważyć można także różnice w ilości zużytej mieszaniny żywicy i utwardzacza w porównaniu do wymaganej katalogowo ilości do przesączenia. Wynika to z racji zastosowania metody laminowania ręcznego, które utrudnia odpowiednie przesączenie materiałów.

1.2.3. Podwozie

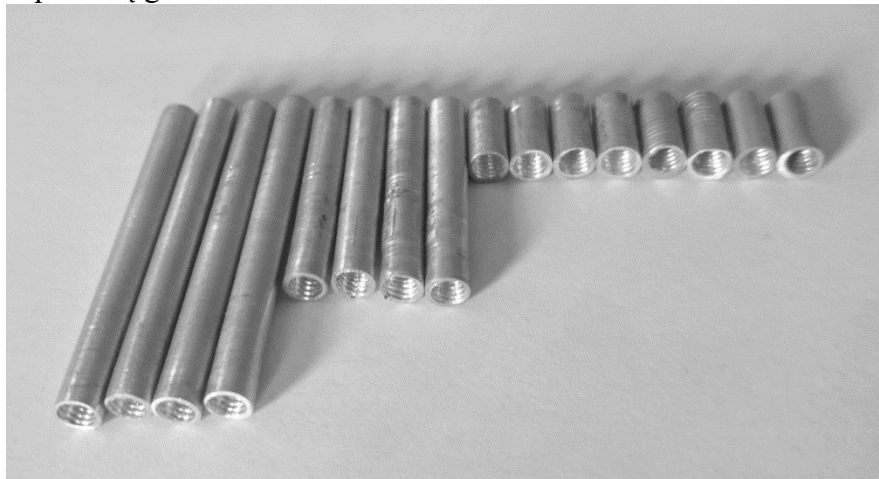
Podwozie zbudowane zostało z rurek wykonanych z włókna węglowego, o średnicy ϕ 11 mm i grubości ścianek 0,5 mm. Rurki podwozia posiadają dwa punkty montażu do konstrukcji ramy, co w połączeniu z płozami o długości 200 mm pozwala na stabilny start oraz lądowanie. Prześwit podwozia wynoszący 70 mm umożliwia montaż modułu pomiarowego pod konstrukcją ramy.



Rys.1.7. Porównanie modelu podwozia z rzeczywistą konstrukcją.

1.2.4. Tulejki dystansowe

W celu montażu różnych części wyposażenia niezbędne było zamontowanie płytek dodatkowych na różnych wysokościach, zarówno pod, jak i nad płytą główną ramy. W tym celu wykonane zostały tulejki dystansowe, w trzech rozmiarach: 45 mm, 30 mm i 10 mm. Wykonane zostały z rurki duraluminiowej o średnicy zewnętrznej ϕ 5 mm. Tuleje zostały przycięte do odpowiednich rozmiarów, a następnie nagwintowano otwory za pomocą gwintownika M4.



Rys.1.8. Gotowe, gwintowane tulejki dystansowe.

1.3. Montaż konstrukcji

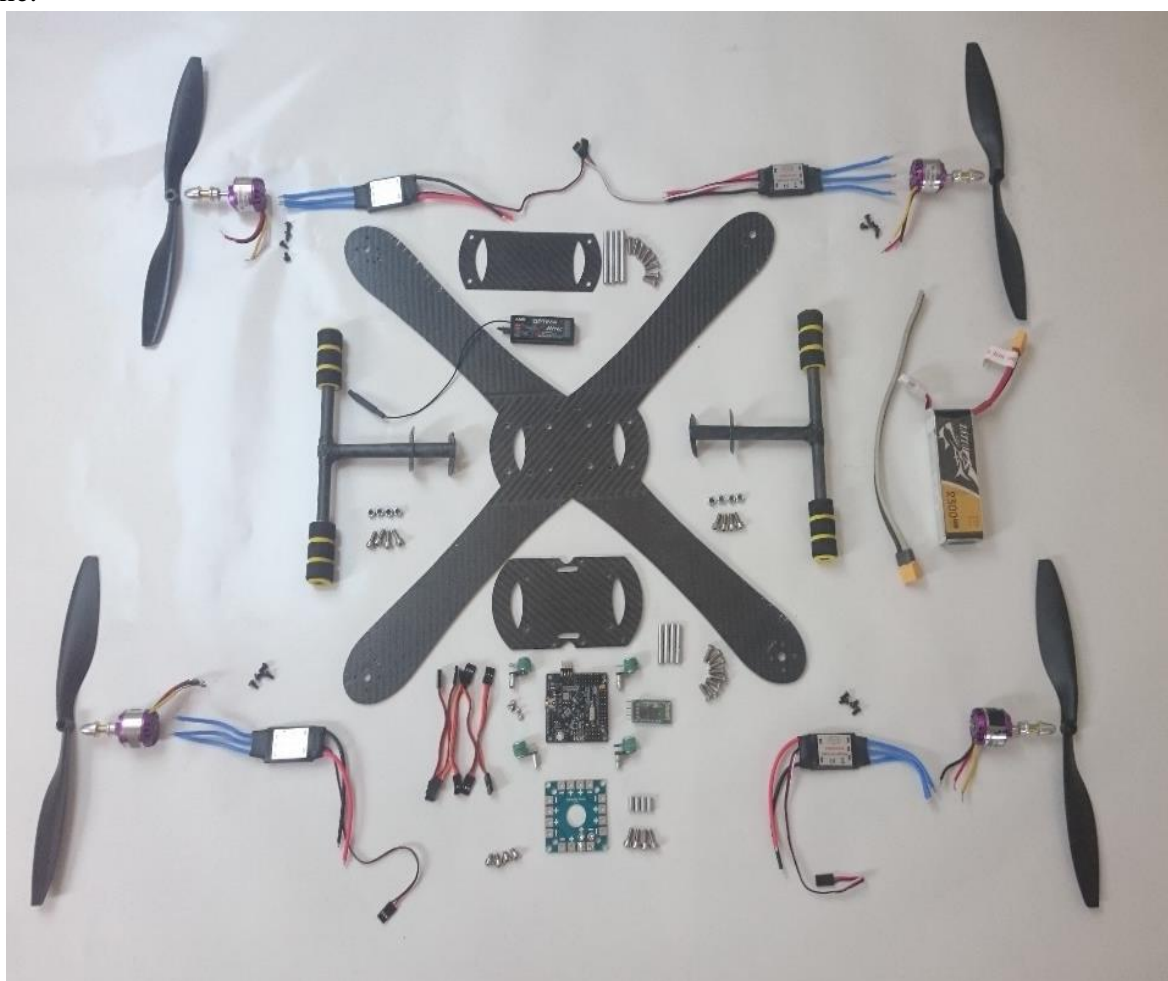
Konstrukcja zbudowana została w sposób zabezpieczający quadcopter przed wpływem drgań pochodzących z pracy napędu. W celu wyeliminowania skutków drgań wszystkie połączenia gwintowane zostały zabezpieczone klejem anaerobowym, zapobiegającym samo odkręcaniu się śrub lub użyto nakrętek samohamownych. Kontroler lotu został zamontowany na stworzonych do tego celu wibroizolatorach widocznych na rysunku 1.9. Elementem izolującym są gumowe wibroizolatory pochodzące z rozbiórki stacji dysków CD o wysokości 9 mm i średnicy zewnętrznej ϕ 12 mm. Według dokumentacji producenta podobnych wibroizolatorów pracują one dla obciążenia do 100 g. Częstotliwość rezonansowa wynosi około 30 Hz przy wzmocnieniu 13 dB. Efektywny zakres pracy dla drgań o częstotliwości do około 40 Hz

. Pozwala to na odizolowanie czujników znajdujących się na płytce kontrolera lotu od drgań ramy pochodzących od pracy układów napędowych.



Rys.1.9. Wibroizolatory

Wszystkie elementy zostały przedstawione na rysunku 1.10. W tabeli 2 zebrano użyte elementy konstrukcyjne.



Rys.1.10. Elementy konstrukcji quadcoptera.

Tab.3. Wykaz elementów konstrukcyjnych

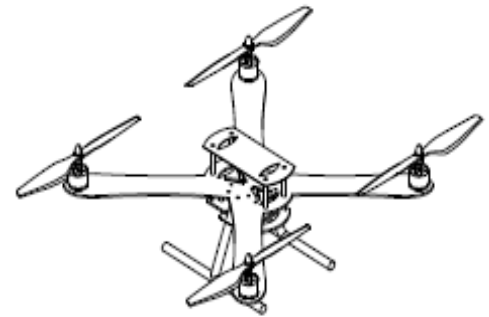
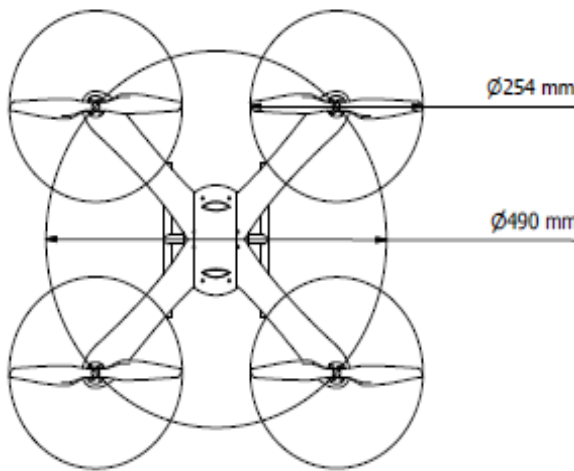
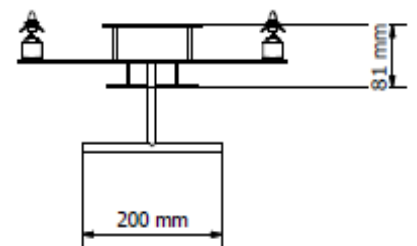
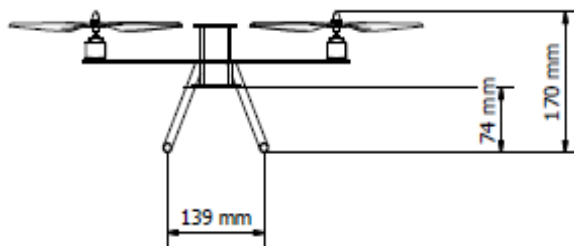
| Nazwa | Liczba sztuk | Waga |
|---|--------------|---------------|
| Płyta główna | 1 | 122 g |
| Płyta pod akumulator | 1 | 18 g |
| Płyta pod odbiornik | 1 | 7,5 g |
| Podwozie | 2 | 25 g |
| Wibroizolator | 4 | 4x2,5g=10g |
| Tulejka $\phi 5\text{mm} \times 30\text{ mm}$ | 4 | 4x0,6g=2,4g |
| Tulejka $\phi 5\text{mm} \times 65\text{ mm}$ | 4 | 4x1,7g=6,8g |
| Tulejka $\phi 5\text{mm} \times 10\text{ mm}$ | 4 | 4x0,2g=0,8g |
| Śruba m4x12mm | 16 | 16x1,3g=20,8g |
| Śruba m4x10mm | 16 | 16x1,1g=17,6g |
| Śruba m4x5mm | 4 | 4x0,6g=2,4g |
| Śruba m3x5mm | 16 | 16x0,6g=9,6g |
| Nakrętka M4 | 8 | 8x0,8g=6,4g |



Rys.1.11. Gotowa platforma latająca typu quadcopter

Tab.4. Główne parametry platformy

| Parametr | Wartość | Jednostka |
|--|---------|-----------|
| Rozpiętość maksymalna | 0,745 | m |
| Odległość między przeciwnymi silnikami | 0,492 | m |
| Wysokość od podłoża | 0,18 | m |
| Waga | 0,858 | kg |



Rys.1.12. Wymiary charakterystyczne konstrukcji.