



## CALCULATION AND CHOICE OF FRAME STRUCTURE FOR A 10 KG PAYLOAD AGRICULTURAL AIRCRAFT

Nguyen Song Thanh Thao<sup>1</sup>, Duong Van Hoa<sup>2</sup>, Vu Ngoc Anh<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>*Ho Chi Minh City University of Technology - VNU-HCM, No 268 Ly Thuong Kiet Street, Ho Chi Minh City, Vietnam.*

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 25/4/2019

Revised: 20/6/2019

Accepted: 28/6/2019

Published online: 16/9/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.1.41>

\* *Corresponding author*

Email: [nguyensongthanhtao@hcmut.edu.vn](mailto:nguyensongthanhthao@hcmut.edu.vn)

**Abstract.** The study presents a structural design calculation for agricultural aircraft satisfying the requirements of the current situation in our country. The design is based on the load-bearing capacity analysis of structure by Finite Element Method and the Tsai-Wu criterion applied to composite materials. The structure is divided into sections that are analyzed separately using appropriate boundary conditions and loads. Based on analysis of the displacement field, stress field and Tsai-Wu value, suitable materials are found for components, including the main frame and the rotor arms. A full model has been made and it shows reasonable design results. In addition, the actual model shows that the aircraft operate stably and sustainably.

**Keywords:** Carbon/epoxy composite, finite element method, pesticide spraying agricultural drone (PSA-D), structural design, Tsai-Wu criterion

© 2019 University of Transport and Communications



## TÍNH TOÁN VÀ LỰA CHỌN KẾT CẤU KHUNG SƯỜN MÁY BAY TẢI TRỌNG 10 KG SỬ DỤNG TRONG NÔNG NGHIỆP

Nguyễn Song Thanh Thảo<sup>1</sup>, Dương Văn Hòa<sup>2</sup>, Vũ Ngọc Ánh<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Trường Đại học Bách khoa - Đại học quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Số 268 Lý Thường Kiệt, Hồ Chí Minh.

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 25/4/2019

Ngày nhận bài sửa: 20/6/2019

Ngày chấp nhận đăng: 28/6/2019

Ngày xuất bản Online: 16/9/2019

<https://doi.org/10.25073/tcsj.70.1.41>

\* Tác giả liên hệ

Email: [nguyensongthanhtao@hcmut.edu.vn](mailto:nguyensongthanhthao@hcmut.edu.vn)

**Tóm tắt:** Bài báo đưa ra tính toán thiết kế kết cấu cho máy bay phục vụ nông nghiệp mà thỏa mãn các yêu cầu về thực trạng ở nước ta. Thiết kế dựa trên việc phân tích khả năng chịu tải của kết cấu bằng phương pháp phần tử hữu hạn và tiêu chuẩn phá hủy Tsai-Wu áp dụng cho composite. Kết cấu được chia thành nhiều phần và được phân tích riêng rẽ bằng cách sử dụng các điều kiện biên và tải áp dụng phù hợp. Dựa trên các phân tích về trường chuyển vị, trường ứng suất và tiêu chuẩn Tsai-Wu, bài báo đưa ra lựa chọn vật liệu phù hợp cho từng bộ phận, bao gồm khung chính và cánh tay rotor. Một mô hình đầy đủ được thực hiện cho thấy kết quả thiết kế hợp lý. Ngoài ra mô hình chế tạo thực tế cho thấy máy bay hoạt động ổn định và bền vững.

**Từ khóa:** Composite carbon/epoxy, phương pháp phần tử hữu hạn, máy bay nông nghiệp phun thuốc, thiết kế kết cấu, tiêu chuẩn Tsai-Wu.

© 2019 Trường Đại học Giao thông vận tải

### 1. GIỚI THIỆU

Việc sử dụng máy bay phun thuốc trong nông nghiệp đã rất phổ biến ở các nước có nền nông nghiệp phát triển do hiệu quả kinh tế và đáp ứng thời gian nhanh nhất cho việc phun

thuốc bảo vệ thực vật, đặc biệt vùng xa xôi, diện tích rộng lớn. Máy bay sử dụng các thiết bị chính xác như GPS, GIS, các hệ thống dự báo thời tiết thời gian thực, các hệ thống kiểm soát lượng phun thuốc nên việc sử dụng thuốc bảo vệ thực vật được giảm thiểu và thực hiện đúng mục tiêu, vị trí bị sâu bệnh, nâng cao hiệu quả xử lý dịch bệnh.

Khoảng 87% máy bay sử dụng là máy bay cánh cứng, 13% là máy bay trực thăng. Máy bay cánh cứng (ví dụ 188 AGwagon 230) có công suất và năng suất sử dụng rất lớn nhưng chi phí hoạt động và kỹ năng phi công trực tiếp điều khiển máy bay là rất cao, đòi hỏi việc trồng trọt tập trung và đồng bộ. Máy bay trực thăng điều khiển từ xa (ví dụ Yamaha R-Max) có năng suất phun thấp hơn nhưng cho phép người lái giữ một khoảng cách an toàn với các chất hóa học, không đòi hỏi đường băng cất hạ cánh, chi phí hoạt động thấp nhưng giá thành của loại máy bay này rất cao, việc sử dụng rất phức tạp, việc chuyển giao các loại máy bay như vậy vào thực tế rất khó khăn. Máy bay trực thăng loại nhiều rotor (ví dụ Zion AC 940-D) được cải tiến và thiết kế mang theo thuốc trừ sâu là khá phổ biến ở Nhật, Hàn Quốc, Trung Quốc, Đài Loan. Trong điều kiện nông nghiệp nước ta hiện nay (diện tích trồng trọt nhỏ, không tập trung) thì máy bay trực thăng nhiều rotor cần phát triển và đưa vào ứng dụng. Trong những năm gần đây, tác giả Phan Kế Hiền đã chế tạo thành công thiết bị bay phun thuốc cho cây trồng lâm nghiệp [1]. Tuy nhiên máy bay này chỉ có thể bay được khoảng 10 phút với tải trọng tối đa 5 kg, năng suất hoạt động của máy bay còn thấp.

Các nghiên cứu về giải thuật điều khiển sliding mode, giải thuật mới giúp máy bay hoạt động ổn định hơn đã được Trần Minh Đức và cộng sự thực hiện [2,3]. Ngoài ra cũng đã có một số kết quả nghiên cứu về thiết kế tối ưu khí động lực học của cánh rotor [4], thiết kế tối ưu khí động lực học và động lực học kết cấu của cánh rotor máy bay trực thăng [5,6] cho phép đánh giá lực khí động tác dụng lên máy bay trực thăng nhiều rotor trong quá trình hoạt động. Các tính toán phân tích kết cấu bằng phương pháp phần tử hữu hạn cũng đã được thực hiện trên loại máy bay nhiều rotor cho các ứng dụng và các loại vật liệu khác nhau: nhựa ABS cho máy bay vận hành trên không và dưới nước khối lượng 1.5 kg [7], nhôm cho máy bay quadrotor loại 4.5 kg [8], compositơ sợi carbon cho quadrotor khối lượng 2 kg dùng để vận chuyển hàng hóa dưới 2 kg [9]. Tất cả các phân tích này đều dùng trường biến dạng và trường ứng suất Von Mises (vật liệu đẳng hướng) để đánh giá độ bền của kết cấu.

Những kết quả nghiên cứu trên là cơ sở cho việc thiết kế, chế tạo một máy bay nhiều rotor phục vụ sản xuất nông nghiệp cũng như giám sát, xử lý dịch bệnh ở Việt Nam: dễ dàng vận hành, sử dụng và chuyển giao; giá thành thấp; có khả năng cất hạ cánh thẳng đứng để chủ động về không gian hoạt động; có khả năng mang theo thuốc bảo vệ thực vật dạng lỏng 10 kg; thực hiện phun thuốc trong quá trình bay; thời gian bay đủ để phun hết lượng thuốc mang theo khoảng từ 10-15 phút; tốc độ phun thuốc 0.8-1 lít/phút, rải phun trên 3 m; tầm bay trong bán kính 3-5 km, độ cao tối đa đạt 1.5 km so với mực nước biển; máy bay có khả năng tự cân bằng, ổn định dưới tác động của gió ngang tối đa 6-8 m/s mà không cần tác động điều khiển của người điều khiển máy bay. Bài báo trình bày nghiên cứu tính toán thiết kế kết cấu máy

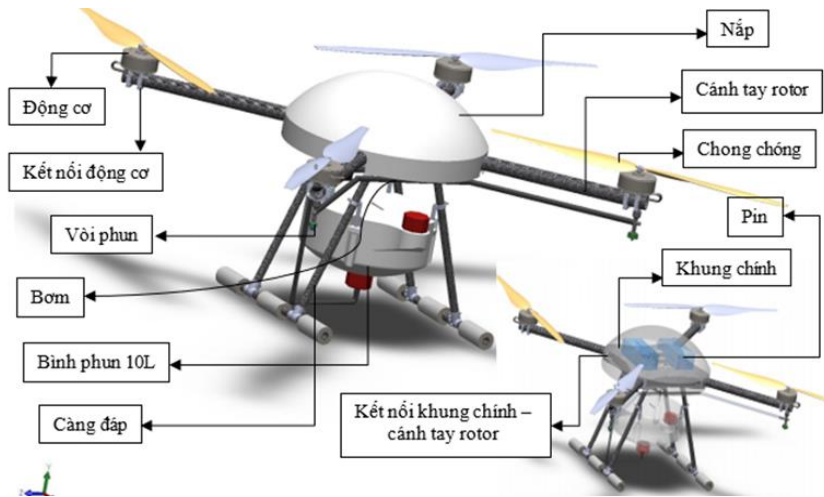
bay phun thuốc bằng vật liệu composite sau khi đã có thiết kế sơ bộ hình học từ các tính toán khí động học.

## 2. THIẾT KẾ KẾT CẤU

Từ các yêu cầu thiết kế của máy bay, sử dụng giải thuật tối ưu về khối lượng, thông số đầu vào của thiết kế kích thước hình học máy bay được cho trong bảng 1 [10].

**Bảng 1.** Thông số đầu vào [10].

Đặc tính	Giá trị	Kích thước	Giá trị
Khối lượng khung thân ước lượng (kg)	12.663	Đóng gói (mm)	952×952×611
Khối lượng bình thuốc, càng đáp (kg)	2.337	Khung chính (mm)	400×400
Khối lượng tải (kg)	10	Cánh tay rotor (mm)	500×Φ36
Khối lượng thiết bị điện tử (g)	224	Ống càng đáp đứng (mm)	400×Φ20
Khối lượng pin (g)	5050	Ống càng đáp ngang (mm)	500×Φ20
Khối lượng dây điện (g)	567.5	Góc nghiêng càng đáp (°)	20
Khối lượng bộ điều khiển vận tốc (g)	75.7	Chong chóng (mm)	76.2
Khối lượng động cơ (g)	477	Bình thuốc (mm)	Φ330
Khối lượng chong chóng (g)	125.83		
<b>Tổng khối lượng cất cánh (kg)</b>	<b>25</b>		



**Hình 1.** Cấu trúc máy bay.

Kết cấu máy bay được lựa chọn là loại bốn chong chóng quadrotor có dạng chữ “X” bao gồm sáu phần chính: khung chính, cánh tay rotor, khớp nối và thanh nối, bình phun, nắp và càng đáp (hình 1). Phần càng đáp có tác dụng phân bố tải trọng của bình thuốc lên kết cấu khung chính và chịu tải nén khi hạ cánh. Phần này được chế tạo từ các ống composite sợi carbon đường kính 18 mm dày 2 mm và các khớp nối nhôm hợp kim 6061. Chi tiết thiết kế càng đáp không được đề cập trong nội dung bài báo. Bình phun được đúc từ nhựa cứng (có sẵn trên thị trường). Nắp bảo vệ các bộ phận điện và điện tử của máy bay tránh xa các tác động bên ngoài được làm bằng nhựa bằng cách in 3D với độ dày 1-2 mm. Khung chính chịu lực và các ống cánh tay để gắn rotor làm bằng vật liệu composite lưới đan sợi carbon nền

epoxy. Các khớp nối và thanh nối được gia công từ nhôm hợp kim 6061. Việc lựa chọn vật liệu dựa trên sự tham khảo các máy bay phun thuốc hiện có và tính thông dụng cũng như giá thành của vật liệu trên thị trường. Đặc tính cơ học composite phụ thuộc vào phần trăm khối lượng (hoặc thể tích) giữa sợi và nền cũng như kỹ thuật chế tạo và nguyên liệu chế tạo [11]. Ngoài ra đặc tính của composite vải sợi lưới đan thấp hơn của composite xếp lớp sợi đơn hướng [12]. Do đó ở bước thiết kế, thông số các vật liệu sử dụng được tham khảo trong thư viện vật liệu của ANSYS và cho trong bảng 2 và bảng 3 ứng với composite sợi lưới đan carbon nền epoxy có tỉ lệ thể tích sợi khoảng 50%.

**Bảng 2.** Đặc tính vật liệu nhôm hợp kim 6061.

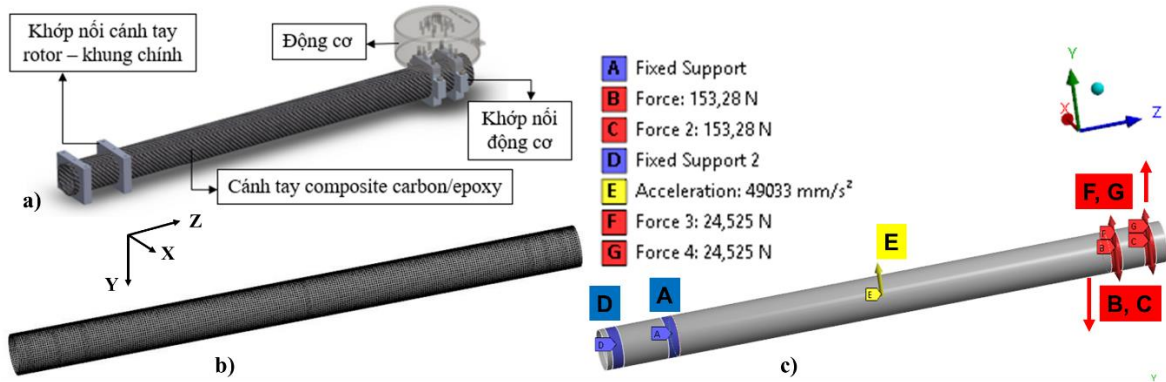
Đặc tính	Giá trị	Đặc tính	Giá trị
Khối lượng riêng ( $\text{g/cm}^3$ )	2.77	Giới hạn bền kéo (MPa)	310
Mô đun Young $E$ (MPa)	71000	Giới hạn bền nén (MPa)	310
Hệ số Poisson $\nu$	0.33	Giới hạn đàn hồi kéo (MPa)	280
Mô đun trượt $G$ (MPa)	26692	Giới hạn đàn hồi nén (MPa)	280
Mô đun khối $K$ (MPa)	69608		

**Bảng 3.** Đặc tính vật liệu composite lưới đan sợi carbon nền epoxy.

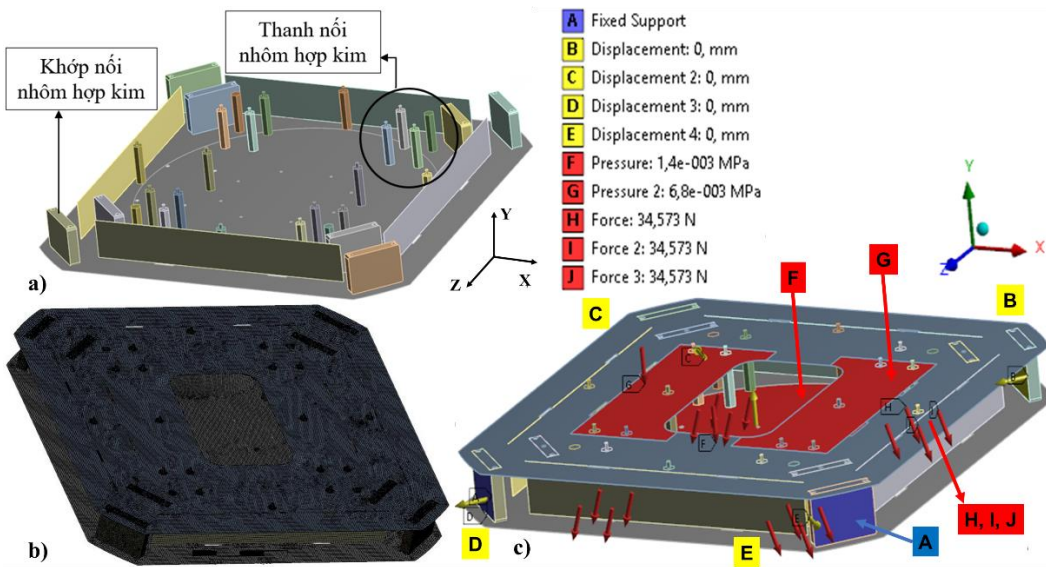
Đặc tính	Giá trị	Đặc tính	Giá trị
Khối lượng riêng ( $\text{g/cm}^3$ )	1.451	Độ bền kéo hướng sợi $(\sigma_1^T)_{ult}$ (MPa)	513
Mô đun đàn hồi hướng sợi $E_1$ (MPa)	59160	Độ bền kéo vuông góc sợi $(\sigma_2^T)_{ult}$ (MPa)	513
Mô đun đàn hồi vuông góc sợi $E_2$ (MPa)	59160	Độ bền kéo ngoài mặt phẳng $(\sigma_3^T)_{ult}$ (MPa)	50
Mô đun đàn hồi ngoài mặt phẳng $E_3$ (MPa)	7500	Độ bền nén hướng sợi $(\sigma_1^C)_{ult}$ (MPa)	-437
Hệ số Poisson $\nu_{12}$	0.04	Độ bền nén vuông góc sợi $(\sigma_2^C)_{ult}$ (MPa)	-437
Hệ số Poisson $\nu_{23}$	0.3	Độ bền nén ngoài mặt phẳng $(\sigma_3^C)_{ult}$ (MPa)	-150
Hệ số Poisson $\nu_{13}$	0.3	Độ bền trượt $(\tau_{12})_{ult}$ (MPa)	120
Mô đun trượt $G_{12}$ (MPa)	17500	Độ bền trượt $(\tau_{23})_{ult}$ (MPa)	55
Mô đun trượt $G_{23}$ (MPa)	2700	Độ bền trượt $(\tau_{13})_{ult}$ (MPa)	55
Mô đun trượt $G_{13}$ (MPa)	2700		

Bài báo không trình bày phần tính toán kích thước hình học máy bay từ phân tích khí động lực học mà chỉ xem xét bố trí các bộ phận kết nối và phân tích độ bền của khung chính và cánh tay rotor ở trạng thái tĩnh (Hình 2(a) và 3(a)). Từ thiết kế hình học các khớp nối và lựa chọn phân bố các bộ phận và hệ thống điều khiển, cánh tay rotor được chế tạo từ các ống carbon/epoxy dài 500 mm và có đường kính ngoài là 36 mm. Để có thể nâng đỡ động cơ chong chóng cũng như chịu tải khi bay ổn định, cần xác định số lớp composite cần thiết hay bề dày của ống. Việc này được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong ANSYS với lưới chia cấu trúc và các phần tử tứ giác như trong Hình 2(b). Hình 2(c) trình bày điều kiện biên và phân bố tải trên cánh tay rotor: cánh tay bị ngàm tại các khớp nối với khung

chính (A và D), chịu trọng lượng phân bố đều của bản thân cánh tay thông qua cài đặt gia tốc trọng trường (E), chịu trọng lượng của hệ thống động cơ, chong chóng và khớp nối động cơ là 1 kg tại các khớp nối động cơ (F và G) và chịu lực nâng do chong chóng hướng lên thẳng đứng, bằng tổng tải trọng cất cánh chia đều cho 4 cánh tay rotor là 6.25 kg, tại các khớp nối với động cơ (B và C).



**Hình 2.** Cánh tay rotor (a) Hình học và kết nối, (b) lưới chia và (c) tải và điều kiện biên.



**Hình 3.** Khung chính (a) Hình học và kết nối, (b) lưới chia và (c) tải và điều kiện biên.

Tương tự, bề dày hay số lớp composite của phần khung chính cũng được tính toán nhờ phần tử hữu hạn với lưới cấu trúc và phần tử tứ giác trong hình 3(b) cũng như điều kiện biên và phân bố tải trong hình 3(c). Khung chính được ngàm tại các khớp nối cánh tay rotor (A, B, C, D, E), hai tấm khung chính được nối với nhau thông qua liên kết dính chặt với các thanh nối hợp kim nhôm. Khung chính chịu trọng lượng phân bố đều của bản thân và các khớp nối thông qua cài đặt gia tốc trọng trường. Trọng lượng pin 5 kg được phân bố đều trên vùng diện tích  $200 \times 90 \text{ mm}^2$  ở tấm khung chính phía trên (G). Trọng lượng các thiết bị điện, điện tử 2 kg được phân bố đều trên vùng diện tích tròn bán kính 150 mm ở tấm khung chính phía dưới (F). Trọng lượng bình có chứa thuốc và còng đáp 12 kg tác động lên tấm khung chính phía dưới

chia đều tại vị trí 16 thanh nối dưới dạng lực tập trung theo phương nghiêng góc  $20^0$  của còng đáp (H, I và J).

Trong quá trình thiết kế kết cấu, các loại tải tác dụng được nhân thêm hệ số tải để xét đến sự thay đổi trạng thái hoạt động có gia tốc của máy bay (trạng thái động) và hệ số an toàn để xét đến những sai số từ quá trình thiết kế, thông số vật liệu và gia công chế tạo. Từ các yêu cầu thiết kế và vật liệu được lựa chọn, sử dụng các mô hình đánh giá hệ số an toàn, bài báo sử dụng hệ số tải bằng 2 và hệ số an toàn 2.5.

Số lớp composite được quyết định dựa trên đánh giá độ bền kết cấu dùng cho vật liệu composite theo tiêu chuẩn Tsai-Wu [11].

$$H_1\sigma_1 + H_2\sigma_2 + H_{11}\sigma_1^2 + H_{22}\sigma_2^2 + H_{66}\tau_{12}^2 + 2H_{12}\sigma_1\sigma_2 < 1 \quad (1)$$

Với các hệ số Tsai-Wu được định nghĩa dựa trên các giới hạn bền vật liệu như sau:

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_1^C)_{ult}}; & H_2 &= \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}} - \frac{1}{(\sigma_2^C)_{ult}}; \\ H_{11} &= \frac{1}{(\sigma_1^T)_{ult}(\sigma_1^C)_{ult}}; & H_{22} &= \frac{1}{(\sigma_2^T)_{ult}(\sigma_2^C)_{ult}}; \\ H_{66} &= \frac{1}{(\tau_{12})_{ult}^2}; & H_{12} &= -0.5\sqrt{H_{11}H_{22}} \quad (Mises - Hencky) \end{aligned} \quad (2)$$

Với  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{12}$  là các thành phần ứng suất trong hệ tọa độ vật liệu.

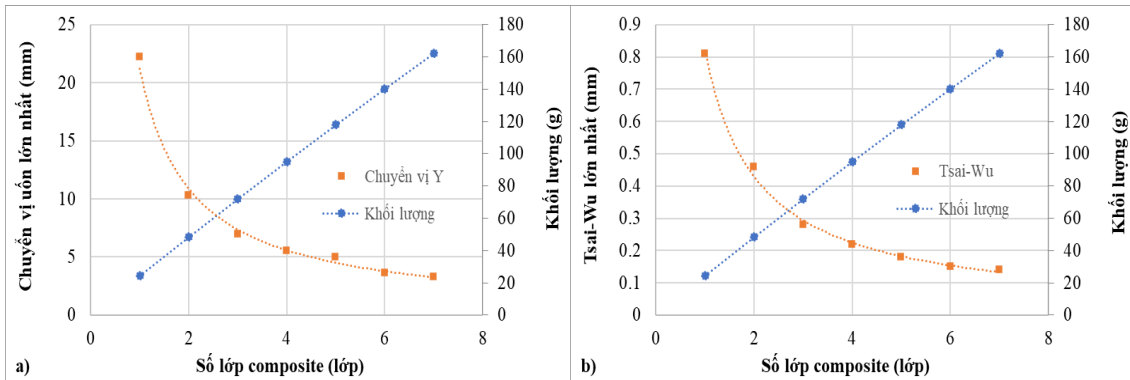
### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Thông thường bề dày một lớp sợi đơn carbon/epoxy nằm trong khoảng 0.09-0.15 mm tùy chất lượng vật liệu và nhà sản xuất nên bề dày một lớp lưới đan carbon/epoxy nằm trong khoảng 0.2-0.3 mm. Vì vậy với mục đích thiết kế nên bề dày một lớp lưới đan sẽ được chọn là 0.3 mm.

Kết quả sự thay đổi của chuyển vị uốn lớn nhất tại đầu cánh tay nối với động cơ và giá trị Tsai-Wu lớn nhất cũng như khối lượng của một cánh tay rotor theo số lớp composite lần lượt được biểu diễn trên hình 4(a) và (b). Cả chuyển vị uốn lớn nhất và giá trị Tsai-Wu lớn nhất trên cánh tay rotor đều giảm theo hàm mũ của số lớp composite. Hai đại lượng này giảm nhanh khi số lớp ít (dưới 5 lớp) và sau đó tốc độ giảm sẽ chậm lại khi số lớp tăng lên. Như vậy kết cấu càng bền khi số lớp tăng. Tuy nhiên khối lượng của cánh tay rotor lại tăng theo số lớp. Vì vậy cần lựa chọn số lớp phù hợp để có khối lượng nhỏ nhưng vẫn có độ bền cao. Theo tiêu chuẩn Tsai-Wu, kết cấu đủ bền hay vật liệu không bị phá hủy khi giá trị Tsai-Wu không vượt quá 1. Theo kết quả phân tích, kết cấu đủ bền ngay từ 1 lớp. Tuy nhiên giá trị Tsai-Wu



lại thay đổi nhanh khi số lớp ít, vì vậy để đảm bảo độ bền cho kết cấu trong các phân tích động (khi máy bay chịu nhiều động lớn hoặc máy bay bị va đập) thì cần chọn số lớp trong vùng giá trị Tsai-Wu ổn định. Vì vậy cánh tay rotor được lựa chọn chế tạo từ ống composite 6 lớp, ứng với bề dày khoảng 1.8 mm.

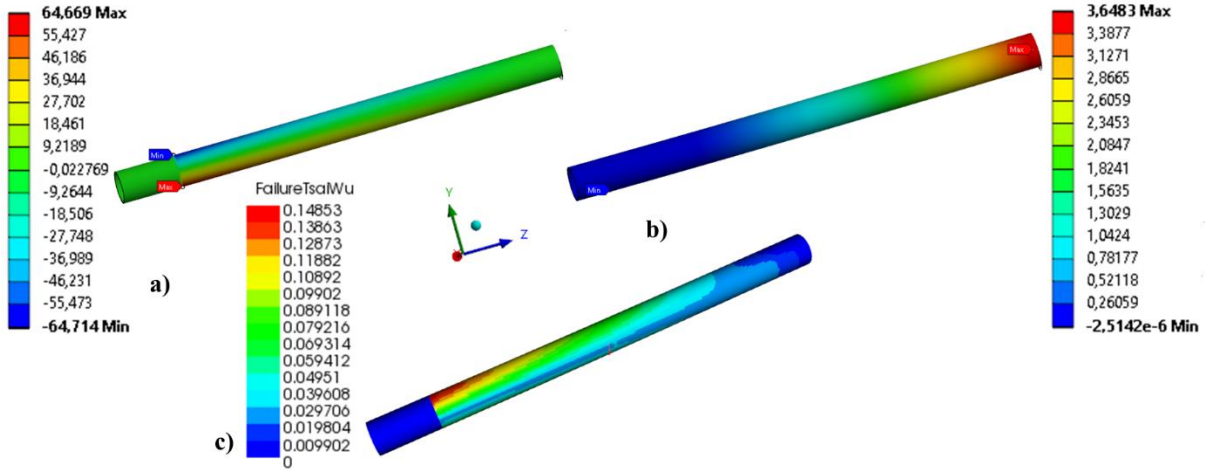


**Hình 4.** Biến thiên của (a) chuyển vị uốn lớn nhất và (b) giá trị Tsai-Wu lớn nhất theo số lớp composite cánh tay rotor.

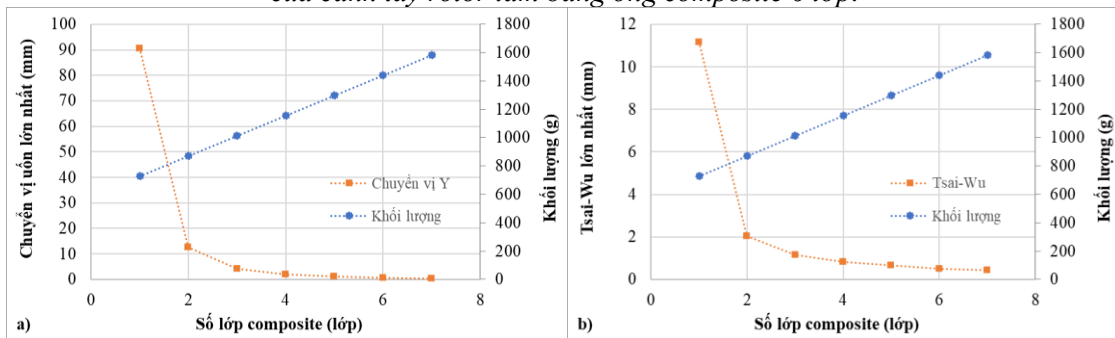
Kết quả về phân bố ứng suất kéo nén, chuyển vị uốn và giá trị Tsai-Wu trên cánh tay rotor cho trường hợp 6 lớp được biểu diễn trên Hình 5. Dưới tác động của lực nâng chong chóng, cánh tay rotor bị uốn nên thớ trên cánh tay bị nén và thớ dưới cánh tay bị kéo. Ứng suất kéo nén tập trung tại vị trí ngàm cánh tay rotor nhưng chúng vẫn rất nhỏ so với giới hạn bền của vật liệu. Trường chuyển vị uốn phân bố đồng đều tại mỗi mặt cắt dọc theo chiều dài ống và chuyển vị uốn tối đa là 3.65 mm (nhỏ hơn 1 % chiều dài cánh tay rotor) nên độ uốn của ống là phù hợp. Chuyển vị theo phương dọc ống gần như có thể bỏ qua, điều này quan trọng vì sự thay đổi kích thước giữa các chong chóng sẽ ảnh hưởng đến việc điều khiển ổn định của máy bay. Giá trị Tsai-Wu lớn tập trung tại vùng khớp ngàm cánh tay rotor nên đây sẽ là vị trí có khả năng xảy ra hư hỏng đầu tiên trên cánh tay rotor.

Những phân tích tương tự trên khung chính được trình bày trong hình 6 và 7. Cả chuyển vị lớn nhất và giá trị Tsai-Wu lớn nhất trên khung chính đều giảm theo hàm mũ của số lớp composite, giảm nhanh khi số lớp ít (dưới 5 lớp) và sau đó tốc độ giảm sẽ chậm lại khi số lớp tăng. Theo những biện luận giống như trong trường hợp cánh tay rotor, tấm composite 6 lớp được lựa chọn làm khung chính cho máy bay.

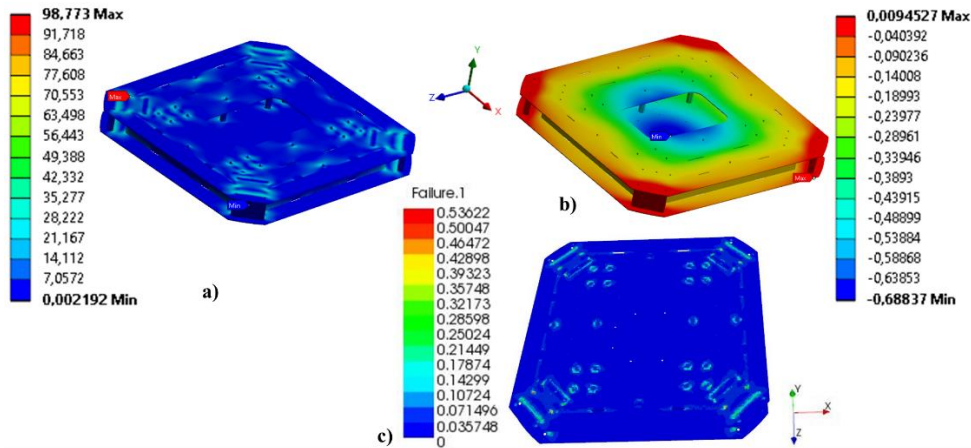




**Hình 5.** Phân bố (a) ứng suất kéo nén, (b) chuyển vị uốn và (c) giá trị Tsai-Wu của cánh tay rotor làm bằng ống composite 6 lớp.



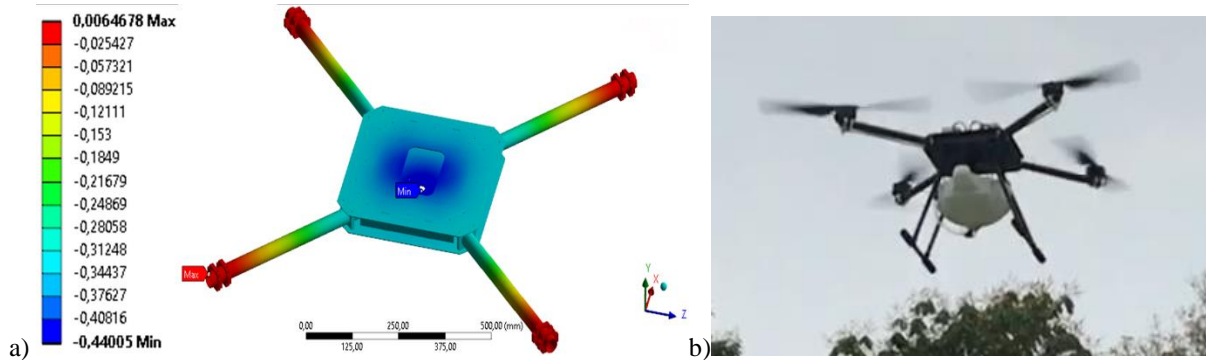
**Hình 6.** Biến thiên của (a) chuyển vị uốn lớn nhất và (b) giá trị Tsai-Wu lớn nhất theo số lớp composite khung chính.



**Hình 7.** Phân bố (a) ứng suất tương đương, (b) chuyển vị uốn và (c) giá trị Tsai-Wu của khung chính làm bằng tấm composite 6 lớp.

Các thông số đặc tính cơ học của tấm composite vải sợi lưới đan carbon/epoxy 6 lớp và ống composite sợi carbon/epoxy 6 lớp từ thực nghiệm (không thay đổi nhiều so với thông số trong thư viện ANSYS) được đưa vào mô hình đầy đủ gồm khung chính được ghép nối với các cánh tay rotor và chịu tải trọng bình phun thuốc đến 15 kg (hình 8(a)) cho thấy kết cấu đảm bảo độ bền như phân tích với chuyển vị lớn nhất nhỏ hơn 1 mm. Ngoài ra mô hình máy bay được chế tạo thực tế (hình 8(b)) có khối lượng rỗng 12.372 kg nhỏ hơn so với yêu cầu

thiết kế (12.663 kg) cho thấy kết cấu máy bay đảm bảo được các yêu cầu về độ bền cũng như cấu trúc đáp ứng tốt về mặt điều khiển với sự rung động rất nhỏ.



**Hình 8.** (a) chuyển vị thẳng đứng của mô hình đầy đủ khi mang tải 15 kg, (b) máy bay thực tế mang tải 10 kg.

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đưa ra một tính toán thiết kế kết cấu cho máy bay bằng composite phục vụ trong nông nghiệp thỏa mãn các yêu cầu về thực trạng ở nước ta. Việc thiết kế dựa trên việc phân tích khả năng chịu tải của kết cấu bằng phương pháp phần tử hữu hạn và tiêu chuẩn phá hủy Tsai-Wu áp dụng cho vật liệu composite. Kết cấu được chia thành nhiều phần và được phân tích riêng rẽ bằng cách sử dụng các điều kiện biên và tải áp dụng phù hợp. Trong phạm vi bài báo chỉ phân tích khung chính và các cánh tay rotor. Vật liệu được lựa chọn để chế tạo các bộ phận chính của máy bay là composite lưới đan sợi carbon nền epoxy. Các mô hình số của khung chính làm từ các tấm composite và cánh tay rotor làm từ các ống composite được phân tích để tìm ra số lớp phù hợp. Dựa trên các phân tích về trường chuyển vị, trường ứng suất và tiêu chuẩn Tsai-Wu, bài báo đã đưa ra lựa chọn vật liệu phù hợp cho từng bộ phận, khung chính và các cánh tay rotor đều làm từ composite có 6 lớp. Sau đó, một mô hình đầy đủ gồm khung chính được ghép nối với các cánh tay rotor đã được thực hiện để kiểm chứng lại toàn bộ kết cấu cho thấy kết quả thiết kế hợp lý, chuyển vị toàn bộ cấu trúc nhỏ hơn 1 mm. Ngoài ra mô hình chế tạo thực tế thỏa mãn yêu cầu về khối lượng rỗng cũng như tải trọng bình thường cho thấy máy bay hoạt động ổn định và kết cấu bền vững thông qua các dữ liệu thu thập được trong quá trình bay thử.

#### Lời cảm ơn

Bài báo thuộc đề tài Nghiên cứu khoa học của Sở KH&CN tỉnh Đắk Lắk (Hợp đồng số 564/HĐ-SKH&CN).

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Vietnamnet.vn, ‘Máy bay không người lái phun thuốc trừ sâu’, 2016. [Online]. <https://vietnamnet.vn/vn/thoi-su/may-bay-khong-nguoi-lai-phun-thuoc-tru-sau-317174.html>.
- [2]. Minh Duc Tran, Hee-Jun Kang, A novel adaptive finite-time tracking control for robotic

manipulators using nonsingular terminal sliding mode and RBF neural networks, *International Journal of Precision Engineering Manufacturing*, 17 (2016) 863–870. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0105-x>

[3]. Minh Duc Tran, Hee-Jun, Adaptive terminal sliding mode control of uncertain robotic manipulators based on local approximation of a dynamic system, *Neurocomputing Journal*, 228 (2017) 231-240. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.09.089>

[4]. Vũ Ngọc Ánh, Báo cáo phần mềm thiết kế sơ bộ máy bay lên thẳng có gắn cánh cứng, Công ty Phát Triển Quốc Phòng Hàn Quốc, 2017.

[5]. Ngoc Anh Vu, Jae Woo Lee, Tuan Phuong Nam Le, Song Thanh Thao Nguyen, A fully automated framework for helicopter rotor blades design and analysis aerodynamics, structure and manufacturing, *Chinese Journal of Aeronautics*, 29 (2016) 1602-1617. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.10.001>

[6]. N.A. Vu, J.W. Lee, Aerodynamic design optimization of helicopter rotor blades including airfoil shape for forward flight, *Aerospace Science and Technology*, 42 (2015) 106. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2014.10.020>

[7]. A.H. Abishini, B.B. Priyanka, B.A. Raque, H.A. Kumar, Design and static structural analysis of an aerial and underwater drone, *International Research Journal of Engineering and Technology*, 5 (2018) 1610-1616.

[8]. A.V. Javir, K. Pawar, S. Dhudum, N. Patale, S. Patil, Design, analysis and fabrication of quadcopter, *Journal of Advance Research in Mechanical and Civil Engineering*, 2 (2015) 16-26.

[9]. V. Bhatia, R. Karthikeyan, R.K. Ganesh Ram, Y. Nari Cooper, Design Optimisation and Analysis of a Quadrotor Arm using Finite Element Method, *Applied Mechanics and Materials*, 664 (2014) 371-375. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.664.371>

[10]. Duy Khang Dang, Ngoc Anh Vu, Electric Propulsion System Sizing Methodology for Multicopters, The 2nd SAWAE Workshop, Ho chi Minh City, 2017.

[11]. Autar K. Kaw, *Mechanics of composite materials*, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, 2006.

[12]. Kadhim H. Ghilaim, Woven factor for the mechanical properties of woven composite materials. *Journal of Engineering*, 16 (2010) 6012-6027.