

## RESEARCH ON OPTIMAL CALCULATION OF QUADCOPTER FRAME STRUCTURE

Nguyen Hoang Quan, Luong Thi Na, Do Huy Diep\*

University of Engineering and Technology - Vietnam National University, Hanoi

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<b>Received:</b> 12/11/2024	The structural frame of an unmanned aerial vehicle is a critical determinant of flight performance and payload capacity. With the expanding applications of unmanned aerial vehicles in various fields such as agriculture, disaster relief, transportation, and military operations, there is an increasing demand for lightweight, durable, and aerodynamically optimized frame designs. This paper presents a structural analysis and optimization approach for a quadcopter frame, a type of unmanned aerial vehicles designed to carry a 2 kg payload. Based on the static structural analysis results, an optimal computational method for the quadcopter frame is proposed. The optimized model exhibits a 2.76% reduction in weight compared to the original design, a 66% reduction in storage volume when folded, and an evenly distributed load capacity without localized stress concentrations. The results underscore the importance of structural analysis and optimization in unmanned aerial vehicle design, particularly in achieving a balance between weight reduction and load capacity. Based on these research results, a small-scale unmanned aerial vehicle prototype will be developed in the near future for training and technology transfer at the University of Engineering and Technology, Vietnam National University, Hanoi.
<b>Revised:</b> 17/02/2025	
<b>Published:</b> 17/02/2025	
<b>KEYWORDS</b>	
UAV	
Quadcopter frame	
Design structure	
Optimize structure	
Ansys	

## NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN TỐI ƯU KẾT CẤU KHUNG CHO THIẾT BỊ BAY KHÔNG NGƯỜI LÁI QUADCOPTER

Nguyễn Hoàng Quân, Lương Thị Na, Đỗ Huy Điệp\*

Trường Đại học Công nghệ - ĐH Quốc gia, Hà Nội

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<b>Ngày nhận bài:</b> 12/11/2024	Kết cấu khung của máy bay không người lái là yếu tố quan trọng quyết định hiệu suất bay, khả năng chịu tải của thiết bị. Với sự mở rộng ứng dụng của máy bay không người lái trong nhiều lĩnh vực như nông nghiệp, cứu hộ, vận tải và quân sự, nhu cầu về các thiết kế khung nhẹ, bền và tối ưu hóa về khí động học ngày càng tăng. Bài báo này trình bày phương pháp tính toán kết cấu và tối ưu hóa khung Quadcopter, một dạng máy bay không người lái, để chở vật nặng 2 kg. Với bài toán tối ưu hóa kết cấu này, từ kết quả của hệ phân tích kết cấu tĩnh, quy trình tính toán tối ưu cho khung Quadcopter được đề xuất. Mẫu đề xuất có khung nhẹ hơn 2,76% so với mẫu ban đầu, thể tích chứa đồ sau khi gấp giảm 66% so với ban đầu, khả năng chịu lực được phân bố đều, không xuất hiện ứng suất cục bộ. Kết quả nghiên cứu nhấn mạnh tầm quan trọng của phân tích và tối ưu hóa kết cấu trong quá trình phát triển máy bay không người lái, đặc biệt là trong việc cân bằng giữa giảm trọng lượng và khả năng chịu tải. Dựa trên kết quả nghiên cứu này, mẫu máy bay không người lái cỡ nhỏ sẽ được chế tạo phục vụ đào tạo và chuyển giao công nghệ tại Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội trong thời gian tới.
<b>Ngày hoàn thiện:</b> 17/02/2025	
<b>Ngày đăng:</b> 17/02/2025	
<b>TỪ KHÓA</b>	
Máy bay không người lái	
Khung Quadcopter	
Thiết kế	
Tối ưu kết cấu	
Phần mềm Ansys	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11541>

\* Corresponding author. Email: diepdh@vnu.edu.vn

## 1. Mở đầu

Sự tăng trưởng bùng nổ của thương mại điện tử trong những năm gần đây cũng kéo theo sự phát triển của các dịch vụ logistics [1]. Các hình thức giao hàng truyền thống thường được thực hiện bằng xe tải nhỏ, xe máy, v.v. đang chịu áp lực bởi chi phí nhiên liệu và thời gian giao hàng. Loại hình vận chuyển hàng hóa sử dụng máy bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) đang được phát triển ở nhiều nước như Mỹ, Singapore, Ireland [2] – [4]. UAV có nhiều lợi thế trong việc sử dụng không gian ở độ cao mà không bị hạn chế bởi cơ sở hạ tầng đường bộ hay ùn tắc giao thông. Ở nước ta, UAV chỉ phổ biến trong lĩnh vực quân sự, giải trí và nông nghiệp. Chưa nơi nào chế tạo với mục đích vận chuyển hàng hóa. Thực tế này đã nảy sinh ý tưởng tiến hành nghiên cứu, học hỏi, phát triển và sản xuất UAV vận tải ở Việt Nam.

Để thiết kế, chế tạo UAV thực hiện một mục tiêu cụ thể, các yếu tố kỹ thuật, yêu cầu an toàn bay cần được thực hiện qua nhiều công đoạn, nhiều bài toán như: phân tích kết cấu, khí động biên dạng cánh, các hệ thống điện - điện tử, v.v. [5]. Các phân tích đánh giá trước hết được thực hiện bằng việc mô phỏng trên các phần mềm chuyên dụng nhằm thu thập các kết quả để đánh giá phản hồi của mẫu thiết kế đối với những điều kiện đã cho nhằm giảm thiểu những chi phí mẫu vật và thời gian thử nghiệm.

Bài toán tối ưu kết cấu để tìm ra dạng hình học, vật liệu khung là một phần trong quá trình thiết kế, chế tạo UAV. Đối với các thiết bị bay, kết cấu quan trọng nhất là khung. Tùy thuộc vào nhiệm vụ của mình, UAV được trang bị thiết bị khác nhau dẫn đến sự điều chỉnh hình dạng hệ thống khung đỡ cần phù hợp với trọng tải [6], [7]. Từ ý tưởng đó, nghiên cứu thiết kế tối ưu khung cho Quadcopter, một loại kết cấu UAV, chở vật phẩm nặng 2kg được thực hiện trong bài báo này, qua đó quy trình thiết kế, tính toán tối ưu kết cấu được xây dựng và áp dụng vào thực tế.

Trong bài báo này, mô hình Quadcopter được thiết kế bằng phần mềm thiết kế CAD - Solidworks, và được phân tích bên, mô phỏng động lực học dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn bằng phần mềm CAE – ANSYS Static Structural [8], [9]. Quy trình thiết kế tối ưu kết cấu được đề xuất để chọn được mẫu Quadcopter phù hợp nhất.

## 2. Cơ sở lý thuyết

Về thiết kế khung, mẫu khung Quadcopter ban đầu được lên ý tưởng và thiết kế trong môi trường CAD bằng phần mềm Solidworks. Mô hình được đưa vào phân tích kết cấu bằng phần mềm CAE - Static Structural (ANSYS) để phân tích các bài toán vật lý cơ học. Trong phần mềm ANSYS, ta thực hiện các bước gán vật liệu cho từng thành phần của khung, tiến hành chia lưới toàn khung đỡ, đặt các điều kiện biên để phần mềm có thể thực hiện chương trình giải ra kết quả. Với bài toán kết cấu, kết quả phần mềm đưa ra cho biết giá trị chuyển vị, trường ứng suất; từ đó tính toán kiểm tra độ bền, biến dạng, tối ưu hóa kết cấu.

### 2.1. Các phương trình cơ bản và phương pháp giải

Đối với bài toán tính toán kết cấu, việc áp dụng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm mục tiêu tìm chuyển vị, ứng suất và biến dạng của vật thể dựa trên phương pháp tính toán số. Dưới tác dụng của lực, các thành phần chuyển vị theo các phương x, y, z lần lượt là u, v, w được biểu thị bằng vector chuyển vị:  $\mathbf{u} = [u, v, w]^T$

Các thành phần tensor biến dạng được ký hiệu:  $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{xx} \ \gamma_{xy}]^T$

Trong đó mối quan hệ giữa biến dạng và chuyển vị được biểu thị bằng các phương trình sau:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

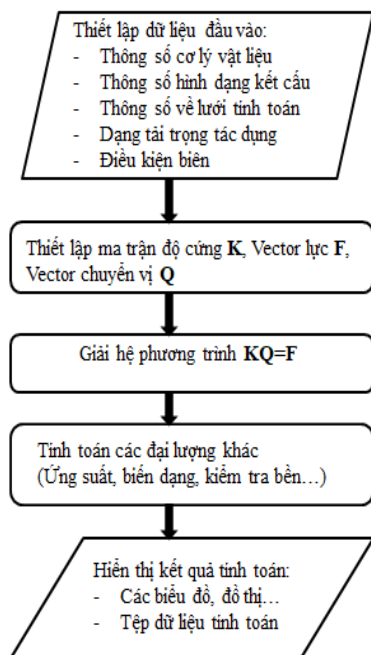
$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; \gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; \gamma_{yz} = 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \quad (1)$$

Các thành phần tensor ứng suất:  $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{yz} \ \tau_{xx} \ \tau_{xy}]^T$

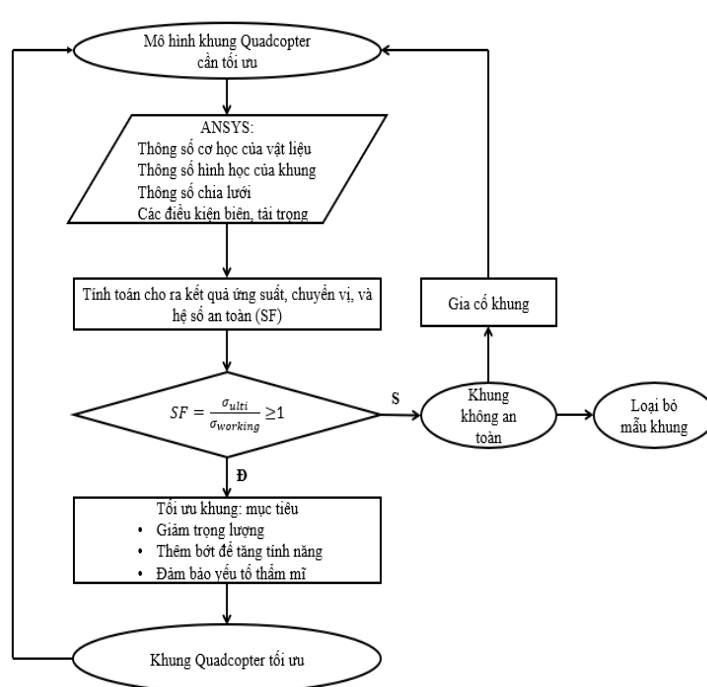
Theo [8], mối liên hệ giữa ứng suất - biến dạng suy ra từ định luật Hooke tổng quát:  $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}$

Với  $D$  là ma trận  $6 \times 6$  và được gọi là *ma trận đặc trưng của vật liệu* do nó chỉ phụ thuộc vào tính chất của vật liệu như modul đàn hồi  $E$  và hệ số Poisson  $\nu$  của vật liệu.

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5-\nu \end{bmatrix} \quad (2)$$



Hình 1. Sơ đồ khối của chương trình PTHH [8]



Hình 2. Sơ đồ quy trình tối ưu

Giải thuật tính toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH), được miêu tả trên Hình 1, là đi tìm ma trận chuyển vị rồi từ đó áp dụng các định luật và nguyên lý ở trên để tính ra ứng suất và biến dạng tại từng điểm của kết cấu.

## 2.2. Phương pháp tối ưu cho kết cấu

Tối ưu kết cấu là việc tìm ra hình dạng hình học hợp lý của kết cấu trên cơ sở bảo đảm các điều kiện về độ bền cũng như điều kiện làm việc đã đặt ra với trọng lượng hoặc chi phí vật liệu thấp nhất. Ngoài ra, tối ưu hóa kết cấu còn bao gồm thao tác thêm bớt cấu kiện để tạo ra các tính năng tốt hoặc tăng tính thẩm mỹ cho kết cấu. Bài toán tối ưu được đặt ra như sau [4]:

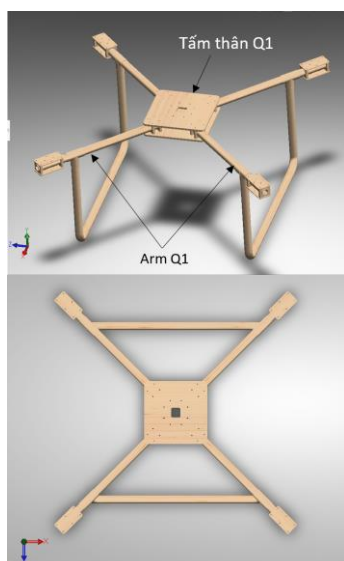
Cực tiểu hóa (hoặc cực đại hóa) hàm mục tiêu:  $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  (3)

Với điều kiện ràng buộc:  $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \geq, =, \leq \} b_i$  (4)

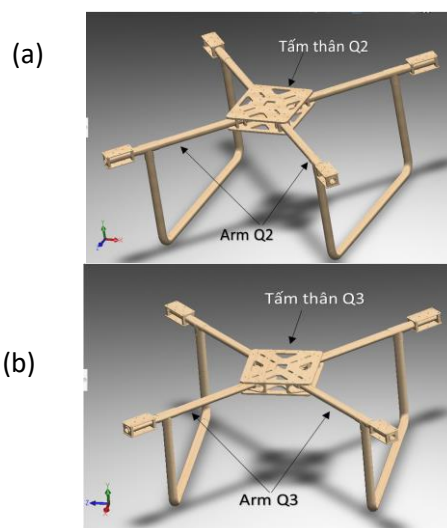
Trong bài báo này, để tối ưu khung Quadcopter, đại lượng lựa chọn để tối ưu là trọng lượng của khung. Ngoài ra, trong quá trình tham khảo các mẫu Quadcopter đang có trên thị trường, bài báo đề xuất phương án điều chỉnh cấu kiện để cho Quadcopter có thêm tính năng gấp gọn giúp giảm thể tích chứa đựng sau khi sử dụng mà vẫn đảm bảo yêu cầu chở vật phẩm nặng 2kg. Hàm ràng buộc ở đây là hệ số an toàn của vật liệu. Hệ số an toàn (SF) là tỉ số giữa độ bền kéo tới hạn (yield ultimate strength) của vật liệu với ứng suất làm việc (working stress). Nếu hệ số SF nhỏ hơn 1 thì vị trí xảy ra ứng suất làm việc đó được đánh giá là không an toàn. Hình 2 biểu diễn sơ đồ phương pháp tối ưu kết cấu.

### 3. Thiết lập mô hình mô phỏng và tính toán, phân tích kết quả

#### 3.1. Mô hình hóa khung Quadcopter



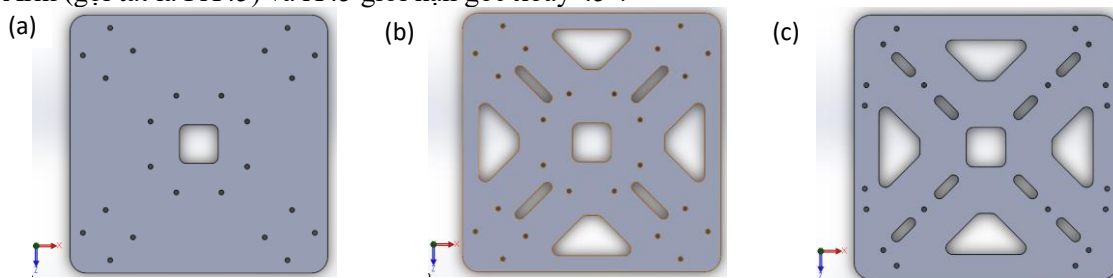
**Hình 3.** Mô hình Quadcopter ban đầu – Q1



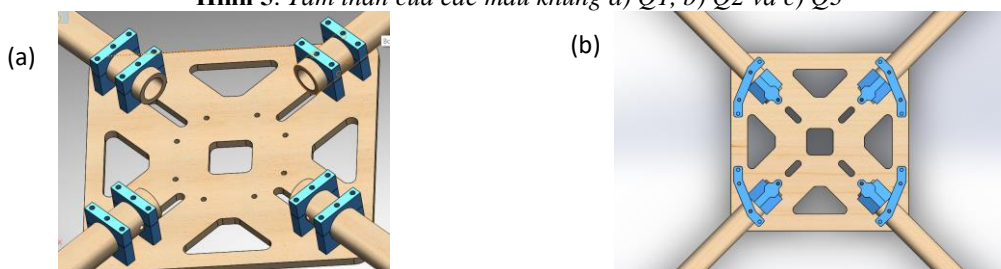
**Hình 4.** Mô hình Quadcopter tối ưu (a) khung Q2, và (b) khung Q3

Quá trình mô hình hóa để dựng khung Quadcopter ban đầu (khung Q1) được thực hiện trên phần mềm thiết kế cơ khí Solidworks. Kích thước ban đầu của Quadcopter sau khi bản vẽ đầu hoàn thành có kích thước dài × rộng × cao là 620 mm × 620 mm × 300 mm và có trọng lượng khoảng 632,06 g. Trong bài báo này, có 3 mẫu khung được sử dụng là mẫu Q1, Q2 và Q3 (Hình 3 và Hình 4). Trong đó, các mẫu khung Q2 và Q3 được dựng lên sau khi tối ưu dần từ mẫu khung ban đầu Q1.

Hình 5 và Hình 6 mô tả kích thước hình học của ba mẫu khung Q1, Q2, Q3. Các tấm trung tâm có cùng kích thước bao ngoài 160 mm × 160 mm × 5 mm. Trên hai khung Q1 và Q2, thanh Arm được liên kết cố định với 2 tấm trung tâm. Với trường hợp khung Q3, thanh Arm có thể xoay góc 45° và liên kết với hai tấm trung tâm qua 2 chi tiết mới là đầu cố định trục xoay của Arm (gọi tắt là FX45) và X45 giới hạn góc xoay 45°.



**Hình 5.** Tấm thân của các mẫu khung a) Q1, b) Q2 và c) Q3



**Hình 6.** Vùng liên kết Arm và các tấm trung tâm a) Q1, Q2 và b) Q3

### 3.2. Thiết lập điều kiện biên cho mô phỏng

Tre là loại vật liệu được sử dụng để làm khung Quadcopter. Tre có trọng lượng nhẹ, dẻo, dai, chịu lực cao, và phổ biến ở nước ta. Ngoài ra, tre còn là loại vật liệu xanh, phát triển bền vững, thân thiện với môi trường. Bảng 1 giới thiệu thông số đặc trưng cơ lý cho loài tre được dùng để thiết kế cho Quadcopter [10].

**Bảng 1.** Một vài đặc tính cơ học của tre [10]

Tre	Giá trị
Khối lượng riêng	$812 \text{ kg/m}^3$
Mô đun đàn hồi	$6255 \text{ MPa}$
Hệ số Poisson	0,3
Ứng suất tới hạn	$92,84 \text{ MPa}$

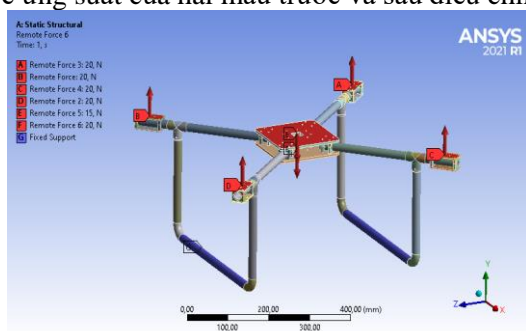
Khi phân tích tĩnh, khung Quadcopter chịu các lực và tải trọng tác dụng bao gồm: lực đẩy hướng lên ở bốn động cơ; tải trọng của các thiết bị, linh kiện được đặt trên Quadcopter; tải trọng của chính khung Quadcopter. Trong nghiên cứu này, động cơ quay sử dụng là động cơ T-motor MN601S KV170 với pin Lipo 6S (khoảng 22,2V). Cánh quạt (Propeller) dự tính sử dụng có chiều dài  $D = 21''$  với Pitch  $P = 6,3''$ . Trong đó, Pitch là quãng dịch chuyển tịnh tiến của quạt sau khi quay được 1 vòng  $360^\circ$ . Ta có công thức tính, lực đẩy của động cơ [7] cho như sau:

$$T_{lt} = P \times D^3 \times \text{RPM}^2 \times 10^{-10} \text{ oz} = 6,3 \times 21^3 \times (22,2 \times 170)^2 \times 10^{-10} \text{ oz} = 83,1 \text{ oz} \approx 23 \text{ N}$$

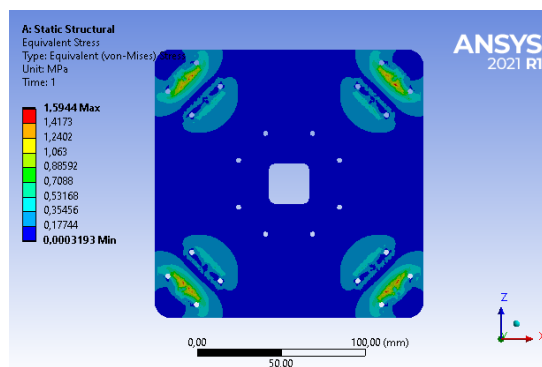
Lực đẩy còn lại của từng động cơ tác động lên để đặt động cơ sau khi triệt tiêu đi trọng lượng của motor là:  $T_s = 23 - 3 = 20 \text{ (N)}$

Tám trung tâm chịu tải trọng của các thiết bị linh kiện như pin, thiết bị định vị, thu phát và các thiết bị khác. Trọng lượng của các thiết bị này là 15N, tác động vào tám trung tâm ở trên. Quadcopter mang vật phẩm có khối lượng 2 kg (xấp xỉ 20 N). Tải trọng này sẽ đặt vào mặt dưới của tám trung tâm dưới. Các điều kiện biên được áp dụng trong phân tích tĩnh của khung được thể hiện trong Hình 7.

Sau bước thiết lập điều kiện biên và chia lưới cho kết cấu, phần mềm tiến hành tính toán, thời gian tính toán còn phụ thuộc vào số lượng nút lưới và cấu hình máy của người dùng. Trong bài toán này, số lượng điểm nút và phần tử được chia sử dụng trong chia lưới là: 1166027 nút và 235400 phần tử. Quá trình tính toán kết thúc, tùy thuộc vào kết quả cần lấy mà phần mềm cho ra những hình ảnh mô phỏng và các trường số liệu tính toán. Từ các số liệu mô phỏng thu được lấy ra kết quả của ứng suất và chuyển vị và tiến hành tối ưu kết cấu. Sau đó tiến hành so sánh kết quả về ứng suất của hai mẫu trước và sau điều chỉnh.



**Hình 7.** Các điều kiện biên



**Hình 8.** Ứng suất phân bố tại tám thân của khung Q1

### 3.3. Phân tích, đánh giá kết quả

Mục đích của việc tối ưu là loại bỏ kết cấu dư thừa để làm nhẹ kết cấu, hoặc thay đổi cấu kiện để tăng tính thẩm mỹ mà vẫn đảm bảo mục tiêu yêu cầu ban đầu của kết cấu. Hình 8 biểu thị giá trị ứng suất tại tám trung tâm của khung Q1. Sau quá trình phân tích số liệu, ta thấy ứng suất ở các bộ phận như tám trung tâm trên, tám trung tâm dưới có giá trị hệ số an toàn cao. Điều này chứng tỏ khung Quadcopter thừa bền để chịu tải nên cần được loại bỏ bớt kết cấu dư thừa. Dựa trên kết quả phân tích trên, khung Q2 được tạo ra bằng cách cắt khoét một số khu vực trên hai

tâm trung tâm của khung Q1, khung Q3 được tạo ra dựa trên sự thay thế cánh tay có thể gấp gọn cho Quadcopter. Các kết quả tính toán cho các mẫu khung được trình bày trong các bảng, biểu đồ và nhận xét như dưới đây.

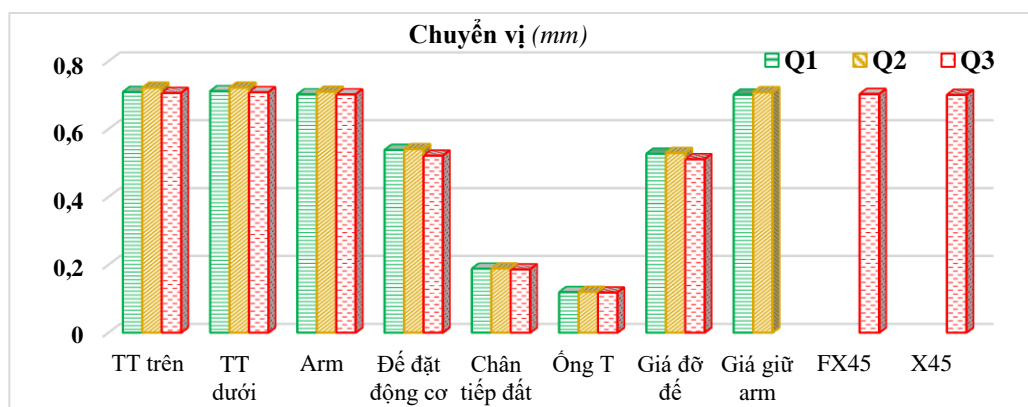
**Bảng 2.** Chuyển vị lớn nhất (mm) trên các bộ phận của 3 mẫu khung Q1, Q2 và Q3

Chuyển vị Max	Q1	Q2	Q3
Tâm thân trên	0,70937	0,72193	0,70664
Tâm thân dưới	0,71178	0,72193	0,70876
Arm	0,70238	0,70973	0,70252
Đế đặt động cơ	0,53877	0,54098	0,52203
Chân tiếp đất	0,1888	0,1891	0,18656
Ống T	0,11953	0,12003	0,11833
Giá đỡ đế	0,52772	0,52988	0,51118
Giá giữ arm	0,70165	0,7088	
FX45			0,70332
X45			0,70107

**Bảng 3.** Thống kê kết quả ANSYS cho ứng suất lớn nhất (MPa) của 3 mẫu khung

Ứng suất Max	Q1	Q2	Q3
Tâm thân trên	1,5944	1,4187	1,5829
Tâm thân dưới	1,3836	1,2639	1,5461
Arm	4,9817	5,1991	5,8891
Đế đặt động cơ	3,9285	3,8028	3,9604
Chân tiếp đất	5,8952	7,7265	7,842
Ống T	11,818	11,38	10,995
Giá đỡ đế	5,8168	6,2814	5,9184
Giá giữ arm	6,691	6,7175	
FX45			1,7818
X45			5,1853

Từ Bảng 2, ta thu được các biểu đồ so sánh về chuyển vị lớn nhất của khung Q1, Q2 và Q3. Hình 9 biểu diễn các giá trị chuyển vị lớn nhất trong từng bộ phận.



**Hình 9.** Biểu đồ so sánh mức chuyển vị trong 3 mẫu khung Quadcopter

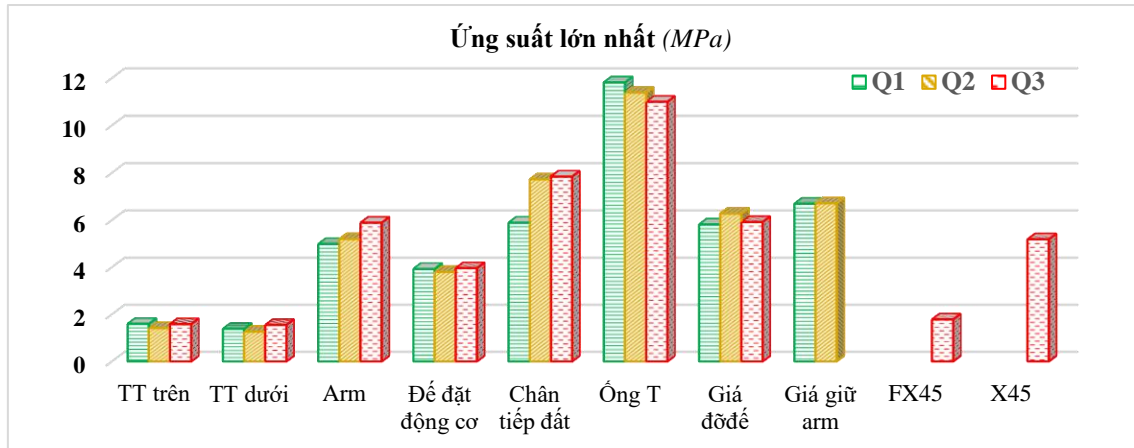
Kết quả thu được cho thấy chuyển vị của từng bộ phận trong các khung chênh lệch nhau không đáng kể. Giá trị chuyển vị rất nhỏ hơn 0,8 mm. Trong cả ba mẫu, vị trí chuyển vị lớn nhất nằm ở các tâm trung tâm – nơi chịu ngoại lực tác động lớn nhất trên toàn hệ khung. Giá trị này lớn hơn 6 lần giá trị chuyển vị nhỏ nhất ở chi tiết ống T. Đánh giá về chuyển vị, ta nhận thấy chuyển vị của cả 3 mẫu khung không có sự khác biệt quá nhiều về độ lớn nên chưa thể xác định được mẫu khung nào tối ưu hơn.

Ứng suất lớn nhất trong từng bộ phận của 3 mẫu khung Q1, Q2 và Q3 được liệt kê trong Bảng 3 và Hình 10. Với mẫu khung Q1, ứng suất lớn nhất trên ống nối T cao gấp 8,5 lần ứng suất lớn nhất ở tâm trung tâm dưới. Với mẫu khung Q2 và Q3, tỉ lệ này lần lượt là 9 và 7,1. Kết quả cho thấy ứng suất lớn nhất của mẫu khung Q3 giảm 7% so với mẫu khung Q1, giảm từ 11,818 Mpa xuống còn 10,995 MPa.

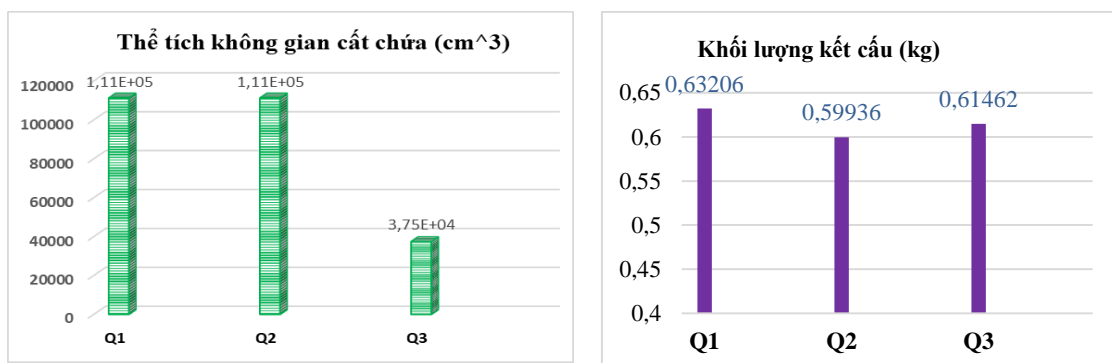
Mục tiêu tối ưu được đặt ra là giảm bớt trọng lượng kết cấu khung để Quadcopter đảm bảo chịu lực trong quá trình vận hành. Từ kết quả phân tích ở trên, ta nhận thấy mẫu khung tối ưu được lựa chọn là mẫu khung Q3. Mẫu này có các ưu điểm sau:

- Đạt mục tiêu nâng vật nặng 2 kg.
- Khối lượng giảm 2,67% so với mẫu khung Q1 (Hình 11).

- Giá trị ứng suất trung bình nhỏ nhất trong ba mẫu khung. Giá trị ứng suất lớn nhất cũng thấp hơn khung Q1 và Q2.
- Thể tích cất chứa khung Q3 giảm 66% so với hai mẫu khung Q1 và Q2.



Hình 10. Biểu đồ so sánh ứng suất lớn nhất trong 3 mẫu khung Q1, Q2 và Q3



Hình 11. Thể tích không gian cất chứa và khối lượng của 3 mẫu khung Q1, Q2 và Q3

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đã đề xuất giải pháp tối ưu hóa kết cấu khung Quadcopter đáp ứng yêu cầu mang tải trọng 2 kg. Quy trình tính toán tối ưu dựa trên các công cụ mô phỏng số và phương pháp phần tử hữu hạn được giới thiệu chi tiết. Kết quả cho thấy trọng lượng khung giảm 2,76% so với mẫu ban đầu, đồng thời thể tích giảm tới 66% khi gấp cánh tay. Mẫu khung này đảm bảo các tiêu chuẩn về độ bền, ứng suất và chuyển vị, phù hợp để sản xuất Quadcopter đáp ứng nhu cầu vận chuyển hàng hóa tại Việt Nam. Hạn chế của nghiên cứu là các kết quả chủ yếu dựa trên mô phỏng phần mềm mà chưa có thử nghiệm vật lý để kiểm chứng độ bền và hiệu suất của mẫu khung UAV trong điều kiện vận hành thực tế. Trong thời gian tới, nhóm sẽ thực hiện chế tạo nguyên mẫu và tiến hành các bài kiểm tra thực tế về khả năng chịu tải, hiệu suất bay và độ ổn định. Song song với đó là so sánh đối chiếu kết quả thực nghiệm với kết quả tính toán mô phỏng để cải thiện và hiệu chỉnh mô hình tính toán từ đó hoàn thiện quy trình chế tạo máy bay không người lái thương mại.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] T. K. C. Nguyen, T. P. Le, and T. H. Nguyen, "The drone delivery services: An innovative application in an emerging economy," *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, vol. 39, no. 2, pp. 39-45, 2023.
- [2] W. Yoo, E. Yu, and J. Jung, "Drone delivery: Factors affecting the public's attitude and intention to adopt," *Telematics and Informatics*, vol. 35, no. 6, pp. 1687-1700, 2018.

- 
- [3] A. A. Siddiqui and P. D. Le, "Impact of trade facilitation on trade performance in case of Vietnam, Kenya and Germany," *Journal of International Economics and Management*, vol. 118, pp. 64-74, 2019.
- [4] J. J. Kim and J. Hwang, "Merging the norm activation model and the theory of planned behavior in the context of drone food delivery services: Does the level of product knowledge really matter?" *Journal of Hospitality and Tourism Management*, vol. 42, pp. 1-11, 2020.
- [5] D. Perikleous, G. Koustas, S. Velanas, K. Margariti, P. Velanas, and D. Gonzalez-Aguilera, "A Novel Drone Design Based on a Reconfigurable Unmanned Aerial Vehicle for Wildfire Management," *Drones*, vol. 8, 2024, Art. no. 203.
- [6] R. Chaurasia and V. Mohindru, "Unmanned aerial vehicle (UAV): A comprehensive survey Unmanned Aerial," *Vehicles for Internet of Things (IoT) Concepts, Techniques, and Applications*, 2021, pp. 1-27.
- [7] R. Singh, R. Kumar, A. Mishra, and A. Agarwal, "Structural Analysis of Quadcopter Frame," *Materials Today: Proceedings*, vol. 22, pp. 3320-3329, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.295.
- [8] D. L. Logan, *A first course in the finite element method*. Cengage Learning, 2011.
- [9] V. Jagota, A. Sethi, and K. Dr-Khushmeet, "Finite Element Method: An Overview," *Walailak Journal of Science & Technology*, vol. 10, pp. 1-8, 2013, doi: 10.2004/wjst.v10i1.499.
- [10] H. M. A. Mahzuz, M. Ahmed, J. Dutta, and R. H. Rose, "Determination of Several Properties of a Bamboo of Bangladesh," *Journal of Civil Engineering Research*, vol. 3 no. 1, pp. 16-21, 2013 doi: 10.5923/j.jce.20130301.02.