

## MODELLING AND STATIC ANALYSIS OF AUTOMOBILE WHEEL RIM USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

Tran Cong Chi

Vietnam National University of Forestry

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	23/3/2024	This article presents the results of a study on the modeling and static analysis of a type of automobile wheel rim structure using the finite element analysis (FEA) method. Five different materials were used in this structure, including AISI 1020 steel, AA7075 aluminum alloy, AZ91 magnesium alloy, Ti-6Al-4V titanium alloy, and carbon fiber-reinforced composite. The analysis results showed that AISI 1020 steel had the highest mass of 27.92 kg. The magnesium alloy AZ91 had the largest displacement and the lowest Factor of Safety (FOS) values, which corresponded to 1.495 mm and 2.55, respectively. On the other hand, the carbon fiber-reinforced composite had the lowest mass and deformation values, corresponding to 6.36 kg and 0.234 mm, respectively, while achieving the highest safety factor of 37.4. However, it should be noted that this material can easily crack or fracture under severe impact and is difficult to repair once damaged. The findings of this study provide information for selecting suitable materials for automobile wheel rims, serving as a reference for improving the performance and durability of wheel rims during operation and ensuring user safety.
Revised:	29/5/2024	
Published:	30/5/2024	

**KEYWORDS**

Modeling  
Static analysis  
Wheel rim  
Automobile  
FEA

## MÔ HÌNH HÓA VÀ PHÂN TÍCH TĨNH VÀNH BÁNH XE Ô TÔ SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH PHẦN TỬ HỮU HẠN

Trần Công Chi

Trường Đại học Lâm nghiệp

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	23/3/2024	Bài báo này trình bày kết quả của nghiên cứu về mô hình hóa và phân tích tĩnh của một loại kết cấu vành bánh xe ô tô bằng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (FEA). Năm loại vật liệu khác nhau được sử dụng trong kết cấu này, bao gồm thép AISI 1020, hợp kim nhôm AA7075, hợp kim Magie AZ91, hợp kim titan Ti-6Al-4V và composite có sợi các bon gia cường (composite-sợi các bon). Kết quả phân tích cho thấy thép AISI 1020 có khối lượng lớn nhất 27,92 kg; hợp kim Magie AZ91 có mức chuyển vị lớn nhất và hệ số an toàn (FOS) thấp nhất tương ứng là 1,495 mm và 2,55. Trong khi đó composite-sợi các bon có khối lượng, biến dạng thấp nhất tương ứng 6,36 kg và 0,234 mm, đồng thời hệ số an toàn cao nhất là 37,4. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng loại vật liệu này có thể dễ dàng bị nứt hoặc vỡ dưới tác động mạnh và khó sửa chữa sau khi bị hư hỏng. Kết quả nghiên cứu này cung cấp thông tin để lựa chọn vật liệu phù hợp cho vành bánh xe ô tô, là cơ sở tham khảo trong việc cải thiện hiệu suất và độ bền của vành bánh xe trong quá trình vận hành và đảm bảo an toàn cho người sử dụng.
Ngày hoàn thiện:	29/5/2024	
Ngày đăng:	30/5/2024	

**TỪ KHÓA**

Mô hình hóa  
Phân tích tĩnh  
Vành bánh xe  
Ô tô  
FEA

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.9952>

Email: trancongchi\_bk@yahoo.com

<http://jst.tnu.edu.vn>

100

Email: jst@tnu.edu.vn

## 1. Đặt vấn đề

Trong ngành công nghiệp ô tô, một số lượng lớn vật liệu được sử dụng chủ yếu là thép, sắt, nhôm, cao su, thủy tinh, đồng, vật liệu tổng hợp và nhiều vật liệu khác. Trong vài thập kỷ qua, những tiến bộ trong việc phát triển các vật liệu này đã dẫn tới việc sản xuất ngày càng phát triển và mức độ an toàn của ô tô cũng được cải thiện. Các nhà sản xuất ô tô luôn cố gắng giảm trọng lượng ô tô để tăng tốc độ và công suất, từ đó cải thiện hiệu suất của ô tô [1]. Ngoài ra, các nhà sản xuất còn mong muốn tăng mức độ an toàn khi tham gia giao thông bằng cách lựa chọn vật liệu phù hợp, có độ dẻo dai cao, có khả năng hấp thụ năng lượng khi va chạm [2].

Vành bánh xe (la zăng, mâm xe) là thành phần quan trọng của hệ thống bánh xe trên các phương tiện di chuyển như ô tô, xe hơi, xe máy, xe đạp, và các phương tiện khác. Nó có vai trò chịu trọng lực từ xe và tạo điểm tiếp xúc với mặt đường thông qua lốp xe. Nó giúp truyền lực từ hệ thống treo đến lốp và đồng thời tạo ra độ bám và ổn định cho xe khi di chuyển [3]. Ngoài ra, vành còn có tác dụng làm mát lốp bằng cách tản nhiệt nhanh chóng qua các lỗ thông gió trên mâm. Các loại vành bánh xe thường được làm từ các vật liệu như hợp kim nhôm, thép, hợp kim magie,... Chúng có nhiều kiểu dáng và thiết kế khác nhau, từ các mâm đơn giản với thiết kế thanh mảnh cho đến các mâm đa chấu phức tạp với thiết kế thể thao và thẩm mỹ. Do đó, việc lựa chọn một loại vành bánh xe có kết cấu và vật liệu phù hợp không chỉ ảnh hưởng đến hiệu suất và an toàn của xe, mà còn góp phần tạo nên phong cách và cá nhân hóa cho phương tiện di chuyển.

Bằng việc sử dụng mô hình hóa và phân tích tĩnh trong quá trình thiết kế vành bánh xe, ngành công nghiệp ô tô có thể nâng cao chất lượng và hiệu suất của sản phẩm, giảm thiểu nguy cơ hỏng hóc và tai nạn do lỗi cấu trúc [4]. Đồng thời, phương pháp này cũng giúp giảm thời gian và chi phí trong quá trình thiết kế và phát triển vành bánh xe mới. Trong bối cảnh công nghệ ngày càng tiến bộ, mô hình hóa và phân tích tĩnh vật liệu khác nhau trong vành xe ô tô đang được phát triển và cải tiến liên tục. Các phương pháp tính toán và mô phỏng ngày càng chính xác, nhiều công trình nghiên cứu đã thực hiện các phân tích chi tiết và đa dạng hơn về các yếu tố tải trọng, vật liệu và thiết kế [5] - [10]. Điều này đóng góp vào việc nâng cao sự đáng tin cậy và an toàn của vành bánh xe ô tô [3].

Việc lựa chọn vật liệu cho vành bánh xe ô tô rất quan trọng do nó phải chịu toàn bộ trọng lượng của xe, đồng thời còn phải chịu các lực tác động khác trong quá trình di chuyển như phanh, va chạm trên đường, rẽ và các yếu tố khác trên mặt đường gồ ghề. Theo truyền thống, vành bánh xe ô tô chủ yếu được làm từ hợp kim thép, nhôm hoặc magie. Tuy nhiên, trong thời gian gần đây đã có nhiều vật liệu khác được xem xét để sử dụng cho vành bánh xe.

Đối với vành bánh xe bằng thép, việc lựa chọn vật liệu phù hợp phụ thuộc phần lớn vào thông số kỹ thuật liên quan đến yêu cầu về cường độ vận hành và trọng lượng. Ưu điểm chính của vành bánh xe thép là chi phí thấp, linh hoạt, giảm xóc tốt và chống biến dạng, cũng như sửa chữa đơn giản và rẻ tiền trong trường hợp bị uốn cong [3], [11]. Tuy nhiên, bánh xe thép cũng có nhược điểm là thường nặng hơn so với các vật liệu khác, góp phần làm tăng trọng lượng tổng thể của xe. Ngoài ra, khả năng chống ăn mòn của thép kém hơn so với những vật liệu khác.

Một trong những ưu điểm chính của vành bánh xe hợp kim nhôm là trọng lượng nhẹ. Với khả năng giảm trọng lượng so với vành bánh xe thép, vành bánh xe nhôm giúp giảm tải trọng tổng thể của xe và cải thiện hiệu suất nhiên liệu [3], [9], [12]. Điều này đồng nghĩa với việc xe có khả năng di chuyển một cách linh hoạt và tiết kiệm nhiên liệu hơn. Vành bánh xe hợp kim nhôm cũng có khả năng tản nhiệt tốt hơn so với vành bánh xe thép. Việc tản nhiệt hiệu quả giúp làm mát hơn cho hệ thống phanh và kéo dài tuổi thọ của các thành phần quan trọng. Điều này đảm bảo an toàn và hiệu suất của hệ thống phanh trong quá trình vận hành [10]. Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng vành bánh xe hợp kim nhôm có thể nhạy cảm hơn đối với các va chạm và va đập, do đó chúng có thể dễ bị hỏng khi gặp các tác động mạnh.

Magiê là một kim loại nhẹ hơn nhôm khoảng 30% và được sử dụng rộng rãi trong các xe thể thao so với các vật liệu khác do khối lượng thấp của nó [13], [14]. Nó có độ cứng, tính chất cơ

học tốt và nó cũng có đặc tính đúc, rèn, hàn. Tuy nhiên, kim loại này nguy hiểm khi ở dạng bụi hoặc bột vì mật độ thấp, có nguy cơ cháy nổ cao và có xu hướng bị ăn mòn bên khi tiếp xúc với không khí mặn. Để khắc phục những vấn đề này, công nghệ đã được cải tiến trong việc đúc, rèn và chống ăn mòn cho vật liệu magiê. Hợp kim magiê đạt được bằng cách thêm Si, Mn, Al, Zn và các nguyên tố khác nhằm khắc phục các nhược điểm trên. Do đó, các ưu điểm chính của các vành được làm từ hợp kim magiê là khối lượng nhẹ, chịu nhiệt, thẩm mỹ và giá thành.

Hợp kim titan có độ cứng và độ bền vững ở nhiệt độ trung bình và cả ở nhiệt độ cao tốt hơn so với các hợp kim nhôm hoặc magiê. Ngoài ra, nó cũng có tính thẩm mỹ, mang lại vẻ đẹp và sự sang trọng cho các bộ phận của xe. Tuy nhiên, hợp kim titan cũng có một số hạn chế. Đặc tính cơ học của nó yêu cầu quá trình gia công và sản xuất đặc biệt để đảm bảo chất lượng. Hơn nữa, hợp kim này có chi phí sản xuất cao hơn so với nhiều vật liệu khác, góp phần làm tăng giá thành của các vành xe [15].

Hiện nay, vành bánh xe bằng các vật liệu Composite có sợi các bon gia cường (Composite - sợi các bon) đang được nghiên cứu để triển khai thương mại do có trọng lượng nhẹ hơn đáng kể so với các loại vành bánh xe truyền thống làm từ kim loại [16]. Điều này có tác động tích cực đến hiệu suất xe, giúp giảm tải trọng tổng thể và cải thiện khả năng tăng tốc cũng như tiết kiệm nhiên liệu. Không chỉ có tính chất kỹ thuật vượt trội, loại vành bánh xe vật liệu này còn mang đến một vẻ ngoài thẩm mỹ cao, nổi bật và thể hiện sự hiện đại, thể thao và sang trọng. Tuy nhiên, vật liệu composite - sợi các bon có giá thành cao, việc chế tạo khó khăn, đặc biệt đối với các chi tiết phức tạp. Do đó, việc ứng dụng của chúng vẫn còn nhiều hạn chế, chủ yếu mới chỉ sử dụng cho các loại xe sang trọng và xe thể thao [9].

Nghiên cứu này tiến hành mô hình hóa và sử dụng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element Analysis - FEA) để phân tích tĩnh kết cấu của một loại vành bánh xe với một số loại vật liệu khác nhau. Kết quả nghiên cứu cung cấp thông tin về các vùng có ứng suất và biến dạng cao, giúp xác định vị trí có nguy cơ hỏng hóc hoặc độ bền thấp. Đây là cơ sở tham khảo khi thiết kế, lựa chọn vật liệu phù hợp để cải thiện hiệu suất và đảm bảo an toàn cho vành bánh xe.

## 2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Vật liệu vành bánh xe

Trong nghiên cứu này, năm loại vật liệu khác nhau là thép AISI 1020, hợp kim nhôm AA7075, hợp kim Magie AZ91, hợp kim titan Ti-6Al- 4V và composite - sợi các bon đã được sử dụng để mô phỏng về tải trọng ô tô và áp suất của lốp lên vành bánh xe (Bảng 1). Các điều kiện khác như kích thước vành bánh xe và tải trọng đều giống nhau đối với tất cả các vật liệu được phân tích.

**Bảng 1.** Thông số các loại vật liệu được phân tích

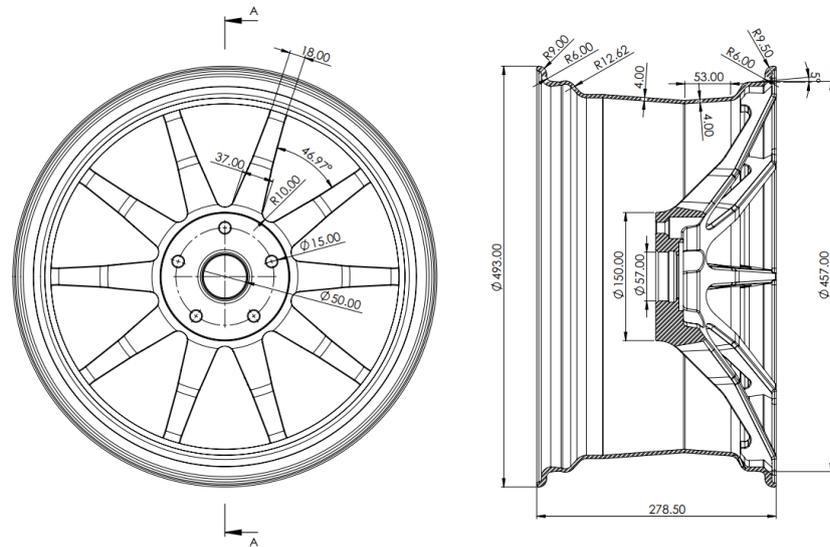
Tính chất	Loại vật liệu				
	Thép AISI 1020	Hợp kim nhôm AA7075	Hợp kim Magie AZ91	Hợp kim Ti-6Al- 4V	Composite - sợi các bon
Khối lượng riêng (kg/m <sup>3</sup> )	7900	2830	1830	4429	1800
Mô đun đàn hồi (N/mm <sup>2</sup> )	200000	72000	45000	104800	290000
Hệ số Poát xông	0,29	0,33	0,35	0,31	0,2
Giới hạn chảy (N/mm <sup>2</sup> )	352	470	150	827,4	2500

### 2.2. Mô hình 3D và phân tích tĩnh bằng FEA

#### 2.2.1. Mô hình 3D

Loại vành bánh xe được chọn trong bài báo này là vành có rãnh sâu 5° (góc mặt tựa của mép lốp) [17], [18]. Một số thông số quan trọng khác gồm độ dày và đường kính vành lần lượt là 4 mm và 457 mm. Cấu trúc nan hoa 10 nan với hình dạng mặt cắt của nan hoa được thiết kế dưới dạng sóng. Vị trí của lỗ van hơi nằm trên thành bên của rãnh vành với đường kính 11,3 mm. Hình

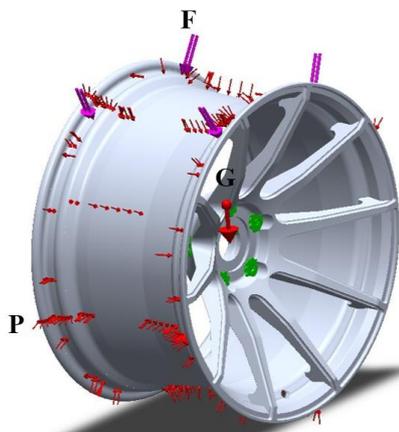
1 giới thiệu một số kích thước chính của vành bánh xe và hình 2 là mô hình 3D sau khi được xây dựng bằng phần mềm Solidworks.



**Hình 1.** Bản vẽ kỹ thuật vành bánh xe ô tô sử dụng trong nghiên cứu



**Hình 2.** Mô hình 3D vành bánh xe ô tô



**Hình 4.** Điều kiện phân tích và ràng buộc

Mesh Details	
Study name	Static 1 (-Default-)
Mesh type	Solid Mesh
Meshes Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points for High quality mesh	4 points
Element size	5 mm
Tolerance	0.25 mm
Mesh quality	High
Total nodes	451 998
Total elements	260851
Maximum Aspect Ratio	19.11
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	92.5
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.427
Percentage of distorted elements	0
Number of distorted elements	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:05:39

**Hình 3.** Thiết lập và tạo lưới cho kết cấu vành bánh xe ô tô

### 2.2.2. Phương pháp chia lưới

Trong nghiên cứu này, mô đun Simulation của phần mềm Solidworks được sử dụng để phân tích FEA. Dựa trên yêu cầu phân tích và đặc điểm hình học của vành bánh xe, loại lưới tam giác được sử dụng để chia lưới vành bánh xe. Kích thước lưới được thiết lập là 5 mm, dung sai 0,25 mm, 4 điểm Jacobian. Kết quả sau khi thiết lập lưới gồm 260851 phần tử và 451998 nút, các thông số khác được giới thiệu trên hình 3.

### 2.2.3. Điều kiện biên và tải trọng

Nghiên cứu này được thực hiện với một mẫu xe giả định với tổng khối lượng xe và tải khoảng 2500 kg. Giả thiết tải trọng phân bố đều cho các bánh thì mỗi bánh xe chịu tải là 6250 N. Do trục bánh xe được liên kết với vành bánh xe bằng 5 bu lông nên các lỗ bu lông và bề mặt lắp ghép được chọn làm các ràng buộc cố định. Các tải trọng và ràng buộc tác dụng lên mâm bánh xe được minh họa trên Hình 4. Xét trường hợp phân tích tĩnh nên không xem xét mô men tác dụng lên vành bánh xe truyền từ động cơ. Tải trọng tác dụng lên vành bánh xe bao gồm ba thành phần chính. Thứ nhất, tải trọng phân bố trên vành bánh xe trong vùng cung  $\pi/3$ , được ký hiệu là  $F = 6250$  N. Thứ hai, coi áp suất lốp  $P = 0,35$  MPa tác dụng đều trên toàn bộ vành bánh xe. Thứ 3 là trọng lực  $G$ . Các đặc tính vật liệu như mô đun đàn hồi, hệ số Poisson và khối lượng riêng..., được thiết lập dựa trên loại vật liệu.

## 3. Kết quả và thảo luận

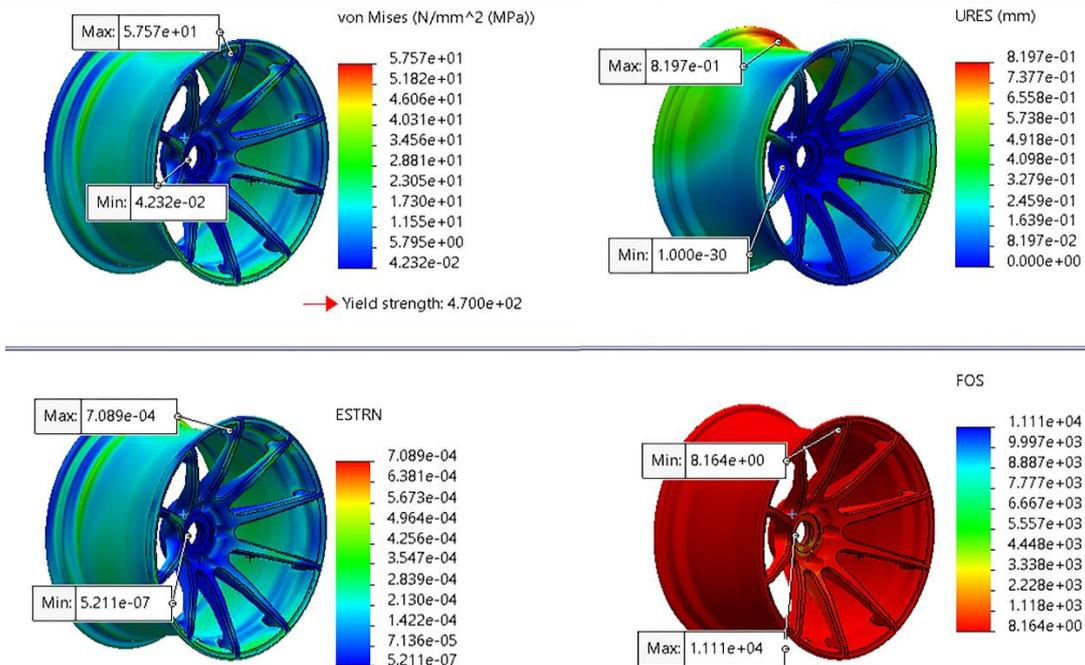
Kết quả phân tích khi so sánh giữa năm loại vật liệu khác nhau là thép AISI 1020, hợp kim nhôm AA7075, hợp kim Magie AZ91, hợp kim titan Ti-6Al-4V và composite - sợi các bon trong Bảng 2 cho thấy mỗi vật liệu này có những đặc tính riêng, đóng vai trò quan trọng trong hiệu suất và tính năng của vành bánh xe.

**Bảng 2.** Kết quả phân tích cho 5 loại vật liệu

Kết quả phân tích	Vật liệu				
	Thép AISI 1020	Hợp kim nhôm AA7075	Hợp kim Magie AZ91	Hợp kim titan Ti-6Al-4V	composite - sợi các bon
Khối lượng (kg)	27,92	10,01	6,47	15,65	6,36
Von Mises (N/mm <sup>2</sup> )	60,57	57,57	58,98	59,07	65,96
Chuyển vị (mm)	0,338	0,819	1,495	0,645	0,234
Độ biến dạng	$2,23 \times 10^{-4}$	$7,09 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-3}$	$4,30 \times 10^{-4}$	$1,43 \times 10^{-4}$
Min FOS	5,8	8,16	2,55	14,01	37,9

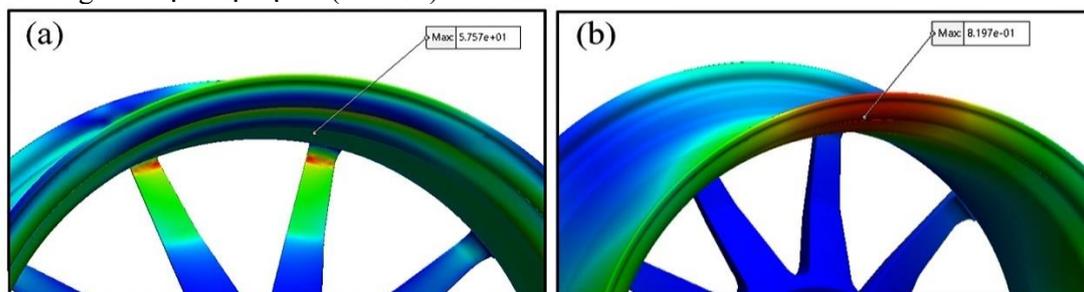
Với thiết kế trên, thép AISI 1020 có khối lượng lớn nhất, trong khi vật liệu composite - sợi các bon có khối lượng nhẹ nhất. Khối lượng của vành bánh xe cung cấp một phần của khối lượng tổng thể của xe. Khi khối lượng tổng thể tăng lên, công suất cần thiết để di chuyển xe cũng tăng, và điều này có thể dẫn đến tăng tiêu hao nhiên liệu. Tuy nhiên, tác động của khối lượng của vành bánh xe đối với tiêu hao nhiên liệu thường không đáng kể so với tác động của các yếu tố khác như khối lượng của phần thân xe, hệ thống lái, và tải trọng.

Kết quả ứng suất tương đương Von Mises của năm loại vật liệu cho thấy đều nhỏ hơn rất nhiều giới hạn chịu tải của vật liệu nên vật liệu sẽ đảm bảo đủ bền. Ngoài ra, chuyển vị và độ biến dạng của vật liệu composite - sợi các bon có độ biến dạng và chuyển vị thấp nhất 0,234 mm, cho thấy sự ổn định và độ chính xác của vành bánh xe trong quá trình sử dụng. Giá trị Min FOS đã được sử dụng để đánh giá mức độ an toàn của các vật liệu. Vật liệu composite - sợi các bon cho thấy giá trị Min FOS cao nhất, cho thấy khả năng chịu lực và độ an toàn cao hơn so với các vật liệu khác. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong việc đảm bảo sự an toàn và độ tin cậy của vành bánh xe trong quá trình vận hành.



**Hình 5.** Kết quả phân tích đối với vật liệu hợp kim nhôm AA7075

Hình 5 giới thiệu chi tiết kết quả phân tích vành bánh xe đối với loại vật liệu là hợp kim nhôm AA7075. Nơi tập trung ứng suất lớn nhất tại vị trí uốn cong của đầu nhỏ của các nan hoa chịu lực F trực tiếp (hình 6a). Vị trí chuyển vị lớn nhất là vành ngoài đối diện phía bố trí nan hoa, cũng là nằm trong khu vực chịu lực F (hình 6b).



**Hình 6.** Vị trí tập trung ứng suất (a) và chuyển vị (b) của vành bánh xe

Việc chọn vật liệu phù hợp cho vành bánh xe cần xem xét đầy đủ các yếu tố như khối lượng, khả năng chịu lực, độ biến dạng, chuyển vị và độ an toàn để đảm bảo hiệu suất và độ bền của vành bánh xe. Theo kết quả của nghiên cứu, vật liệu composite - sợi các bon đã cho thấy nhiều ưu điểm vượt trội trong các khía cạnh khác nhau, bao gồm khả năng chịu tải cao, độ bền cao và độ an toàn cao. Tuy nhiên cần lưu ý theo khuyến cáo mặc dù vật liệu này chắc chắn nhưng nó có thể giòn và dễ bị nứt hoặc vỡ dưới tác động mạnh, điều này có thể khiến nó kém bền hơn trong một số trường hợp. Ngoài ra nó cũng khó sửa chữa sau khi bị hư hỏng và việc sửa chữa thường tốn kém hơn so với vật liệu truyền thống. Do đó, việc lựa chọn vật liệu phù hợp cũng phụ thuộc vào các yếu tố khác như mục đích sử dụng, điều kiện hoạt động và chi phí.

#### 4. Kết luận

Vành bánh xe ô tô là một thành phần quan trọng phải chịu đựng các lực tác động cơ học thường xuyên, dẫn đến nguy cơ biến dạng, trầy xước và hỏng hóc. Vì vậy, phân tích cấu trúc và

lựa chọn vật liệu phù hợp để đảm bảo độ bền làm việc là rất quan trọng. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp mô hình hóa và phân tích tĩnh bằng FEA để đánh giá hiệu quả của năm loại vật liệu bao gồm thép AISI 1020, hợp kim nhôm AA7075, hợp kim magie AZ91, hợp kim titan Ti-6Al-4V và composite có sợi các bon gia cường được sử dụng chế tạo vành bánh xe ô tô. Phần mềm Solidwork được sử dụng để xây dựng mô hình 3D và phân tích FEA. Kết quả phân tích cho thấy thép AISI 1020 có khối lượng lớn nhất 27,92 kg; vật liệu composite-sợi các bon có khối lượng, biên dạng thấp nhất tương ứng 6,36 kg và 0,234 mm, đồng thời FOS cao nhất là 37,4. Hợp kim magie AZ91 có mức chuyển vị lớn nhất và FOS thấp nhất tương ứng là 1,495 mm và 2,55. Kết quả của nghiên cứu này cung cấp một số thông tin quan trọng để lựa chọn vật liệu phù hợp cho vành bánh xe ô tô, làm cơ sở tham khảo để cải thiện hiệu suất, độ bền của vành bánh xe từ đó đảm bảo an toàn cho người sử dụng. Tuy nhiên, cần có những nghiên cứu chuyên sâu đánh giá tuổi thọ, phân tích động lực học cấu trúc, rung động và khả năng chống chịu của chúng trong điều kiện làm việc cụ thể.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] E. Desnica, M. Đurđev, B. Vašćić, R. Turmanidze, and P. Dašić, "Determination of a safety factor of a car wheel rim using finite element analysis in solidworks," *Applied Engineering Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 163-171, 2022.
- [2] G. Lu and T. Yu, *Energy absorption of structures and materials*, Elsevier, 2003.
- [3] G. Leister, *Passenger car tires and wheels: Development-Manufacturing-Application*, Springer, 2018.
- [4] P. Mahajan, R. Ishar, and D. Prajapati, "Static analysis of truck wheel rim using ANSYS Software," *International Journal of Management, IT and Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 104-121, 2017.
- [5] Y. Sanjaya, A. R. Prabowo, F. Imaduddin, and N. A. B. Nordin, "Design and analysis of mesh size subjected to wheel rim convergence using finite element method," *Procedia Structural Integrity*, vol. 33, pp. 51-58, 2021.
- [6] N. K. P. Kankariya and S. Pimple, "Three Piece Wheel Rim Weight Reduction by Finite Element Analysis," *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 440-442, 2020.
- [7] W. K. Gadwala, "Modeling and analysis of car wheel rim for weight optimization to use additive manufacturing process," *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 336-345, 2022.
- [8] H. Fathi, Z. El-Sayegh, J. Ren, and M. El-Gindy, "Modeling and Validation of a Passenger Car Tire Using Finite Element Analysis," *Vehicles*, vol. 6, no. 1, pp. 384-402, 2024.
- [9] T. Korkut, E. Armakan, O. Ozaydin, K. Ozdemir, and A. Goren, "Design and comparative strength analysis of wheel rims of a lightweight electric vehicle using Al6063 T6 and Al5083 aluminium alloys," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 99, no. 2, pp. 57-63, 2020.
- [10] M. Zanchini, D. Longhi, S. Mantovani, F. Puglisi, and M. Giacalone, "Fatigue and failure analysis of aluminium and composite automotive wheel rims: Experimental and numerical investigation," *Engineering Failure Analysis*, vol. 146, 2023, Art. no. 107064.
- [11] M. N. Ahmad and W. M. W. Muhamad, "Application of Size Optimization on Steel Wheel Rim," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 315, pp. 309-314, 2013.
- [12] T. S. Prasad, T. Krishnaiah, J. M. Iliyas, and M. J. Reddy, "A review on modeling and analysis of car wheel rim using CATIA & ANSYS," *International Journal of Innovative Science and Modern Engineering (IJISME)*, vol. 2319, 2014, Art. no. 6386.
- [13] A. A. Luo, "Magnesium casting technology for structural applications," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 1, no. 1, pp. 2-22, 2013.
- [14] C. Moosbrugger, *Engineering properties of magnesium alloys*, ASM International, Ohio, USA, 2017.
- [15] V. Karthi, N. Ramanan, and J. J. M. Hillary, "Design and analysis of alloy wheel rim," *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 71-77, 2014.
- [16] S. Y. Kandukuri, A. Pai, and M. Manikandan, "Scope of carbon fibre-reinforced polymer wheel rims for formula student racecars: A finite element analytical approach," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 103, no. 4, pp. 939-948, 2022.
- [17] T. T. N. Pham, Q. C. Nguyen, and T. C. Nguyen, "Research of design and durability assessment of automobile wheel rims," *Journal of Science and Technology, Hanoi University of Industry*, vol. 57, no. 5, pp. 84-89, 2021.
- [18] P. Cang, X. Zhang, and W. Cui, "Static and Modal Models of Automotive Wheel Hubs Based on Lightweight Design and Cost-Effectiveness," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 18, 2023, Art. no. 10164.