

TỐI ƯU KHUNG XE BUÝT MONOCOQUE TRONG ĐIỀU KIỆN LẬT NGANG

NGUYỄN VĂN SỸ¹, ĐÀO NGỌC QUỐC KHÁNH^{1,2*}, NGUYỄN THÀNH TÂM²,

PHẠM CÔNG TÍNH¹

¹ Trường Đại học Công Nghiệp thành phố Hồ Chí Minh,

² Trường Đại học Quy Nhơn,

Tác giả liên hệ: daongocquockhanh@qnu.edu.vn

DOIs: <https://www.doi.org/10.46242/jstih.v78i6.5670>

Tóm tắt. Nghiên cứu này đề xuất phương pháp cải tiến kết cấu khung xe buýt liên khối nhằm thỏa mãn điều kiện lật ngang, theo tiêu chuẩn ECE R66. Thanh chịu lực được gia cố bởi vật liệu composite từ sợi thủy tinh S2 kết hợp với nền keo epoxy được sử dụng và hiệu quả của phương pháp được xác nhận thông qua mô phỏng phân tích phần tử hữu hạn (FEA) sử dụng phần mềm Hypermesh với bộ giải LS-DYNA. Kết quả cho thấy, kết cấu xe buýt được gia cố bởi gân composite đảm bảo vùng không gian an toàn, đáp ứng yêu cầu của tiêu chuẩn ECE R66 trong khi trọng lượng kết cấu được giữ nguyên, mang lại giải pháp tối ưu về tính nhẹ hóa và cứng vững trong thiết kế khung xe buýt. Nghiên cứu này mở ra hướng phát triển tối ưu hóa bền vững và thân thiện với môi trường trong quá trình sản xuất khung vỏ ô tô buýt.

Từ khóa. Khung xe buýt monocoque, Ls Dyna, Phân tích phần tử hữu hạn (FEA), Composite.

1 GIỚI THIỆU

Xe buýt ngày nay là phương tiện thiết yếu cả trong và ngoài nước. Trong số nhiều loại xe buýt hiện có, dòng xe monocoque (khung liên khối) đã trở thành trọng tâm nghiên cứu và phát triển tại Việt Nam trong những năm gần đây. Với sự phát triển trên, việc nghiên cứu tối ưu kết cấu khung xe buýt monocoque không chỉ hướng đến việc giảm trọng lượng khung xe nhằm cải thiện hiệu suất tiêu thụ nhiên liệu, mà còn góp phần quan trọng trong việc giảm lượng khí thải giúp bảo vệ môi trường bền vững nhưng vẫn đảm bảo an toàn khi va chạm lật nghiêng theo tiêu chuẩn ECE R66 [1-2].

Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm nâng cao khả năng chịu lực và tính an toàn của khung xe buýt trong điều kiện lật ngang. He Hanqiao và cộng sự đề xuất tăng độ dày hoặc diện tích mặt cắt của ống thép để cải thiện an toàn; Tomas et al. tập trung gia cường tại các vị trí chịu biến dạng lớn, giúp tăng độ cứng; K. Friedman et al. sử dụng polymer sợi thủy tinh cho phần trên của thân xe; Salvador et al. đề xuất lắp đầy ống thép bằng vật liệu foam nhưng hiệu quả không đáng kể và chi phí lớn; Alam et al. áp dụng thiết kế khung đa vật liệu kết hợp nhôm và thép giúp giảm trọng lượng nhưng vẫn đáp ứng theo tiêu chuẩn ECE R66; Mikulski và Lavayen-Farfán cho thấy việc sử dụng sợi carbon cải thiện khả năng chịu lật và độ cứng [3-9]. Các nghiên cứu nêu trên mặc dù đạt được một số hiệu quả nhưng thường gặp hạn chế về tăng khối lượng, chi phí cao và tính phức tạp trong sản xuất, làm nổi bật nhu cầu tìm kiếm giải pháp tối ưu hơn.

Nguyễn Thành Tâm và cộng sự đã áp dụng phương pháp tube filling bằng vật liệu gia cường tại các khớp nối, giúp cải thiện khả năng chống lật và đáp ứng tiêu chuẩn ECE R66. Tuy nhiên, sự không đồng nhất trong vật liệu, ảnh hưởng của độ ẩm khiến tính chất cơ học không ổn định và giảm độ bền theo thời gian [10][11].

Trong nghiên cứu này, phương pháp gia cố lực dùng vật liệu composite bằng sợi thủy tinh S2 kết hợp nền keo epoxy [12] được đề xuất như một giải pháp tối ưu trong việc gia cường và cải thiện độ bền kết cấu khung xe buýt monocoque. Phương pháp này không chỉ mang lại khả năng chịu uốn và chịu lực tốt mà còn không làm tăng đáng kể trọng lượng xe cũng như giảm trọng lượng so với việc gia cố bằng phương pháp tăng độ dày khung chịu lực. Để phân tích và đánh giá hiệu quả của thiết kế, nghiên cứu sử dụng phần mềm Hypermesh với bộ giải LS-DYNA để mô phỏng phân tích phần tử hữu hạn (FEA), cho phép mô phỏng chính xác các trường hợp lật và phân tích khả năng chịu lực của khung xe trong các điều kiện tải trọng khác nhau. Kết quả nghiên cứu cho thấy, việc gia cố composite từ sợi thủy tinh S2 – epoxy trên thanh chịu lực có ưu điểm về khả năng tăng độ cứng kết cấu so với khi sử dụng ống thép rỗng lên đến 68% và vùng không gian an toàn không còn bị xâm phạm (hoàn toàn thỏa mãn tiêu chuẩn ECE R66).

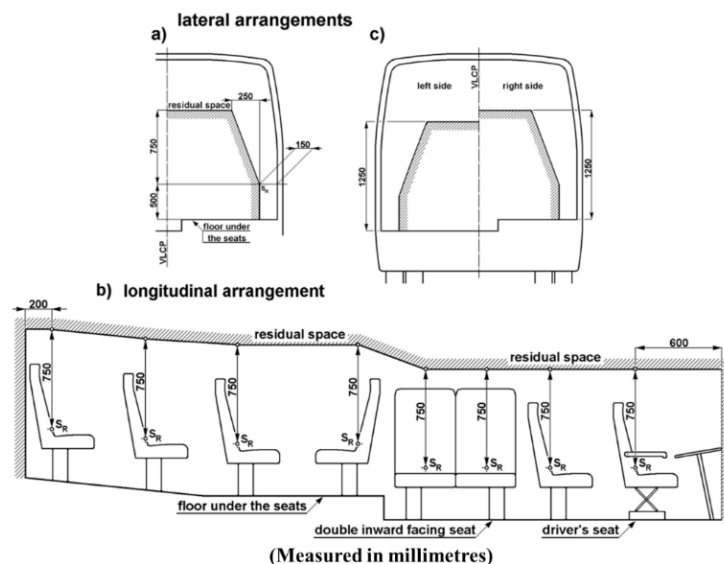
2 CƠ SỞ XÂY DỰNG MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN

2.1. Tiêu chuẩn an toàn và thử nghiệm lật

Tiêu chuẩn ECE R66 (Economic Commission for Europe Regulation No. 66) là một quy định kỹ thuật quốc tế do Ủy ban Kinh tế Châu Âu của Liên Hợp Quốc ban hành nhằm đảm bảo khả năng chống lật và an toàn cấu trúc cho các xe một tầng có sức chứa trên 22 hành khách [13]. Mục tiêu chính của tiêu chuẩn này là giảm thiểu nguy cơ thương vong trong trường hợp xe bị lật, bằng cách yêu cầu cấu trúc khung xe phải đảm bảo đủ độ bền để bảo vệ hành khách, tránh bị sập hoặc biến dạng nghiêm trọng khi xảy ra sự cố. Theo ECE R66, khung xe buýt phải trải qua các thử nghiệm mô phỏng va chạm và lật nghiêm ngặt, đảm bảo một "không gian an toàn" nhất định cho hành khách. Quy định này có vai trò quan trọng trong việc thiết kế và phát triển các phương tiện vận tải công cộng an toàn hơn, phù hợp với nhu cầu bảo vệ hành khách và đáp ứng yêu cầu của các quốc gia tuân thủ tiêu chuẩn ECE.

2.1.1. Không gian an toàn

Mục đích của quy định ECE R66 là đảm bảo rằng kết cấu khung trên của xe có đủ độ bền để không gian an toàn vẫn duy trì không bị tổn hại trong và sau quá trình thử nghiệm lật toàn bộ xe. Điều này có nghĩa là không có bộ phận nào của xe, chẳng hạn như hành lý hoặc các vật dụng bên ngoài không gian an toàn ban đầu, xâm nhập vào khu vực này khi lật. Đồng thời, không phần nào của không gian an toàn bị nhô ra ngoài so với kết cấu đã biến dạng. Không gian an toàn được xác định bằng cách tạo ra một mặt phẳng dọc vuông góc với phương ngang trong xe, với biên giới được mô tả trong hình 1. Điểm SR nằm trên tựa lưng ghế, cao 500 mm so với sàn dưới ghế và cách tường bên trong 150 mm và 250 mm ở các vị trí tương ứng.



Hình 1: Quy định về không gian an toàn theo tiêu chuẩn ECE R66 [13]

2.1.2. Thử nghiệm lật

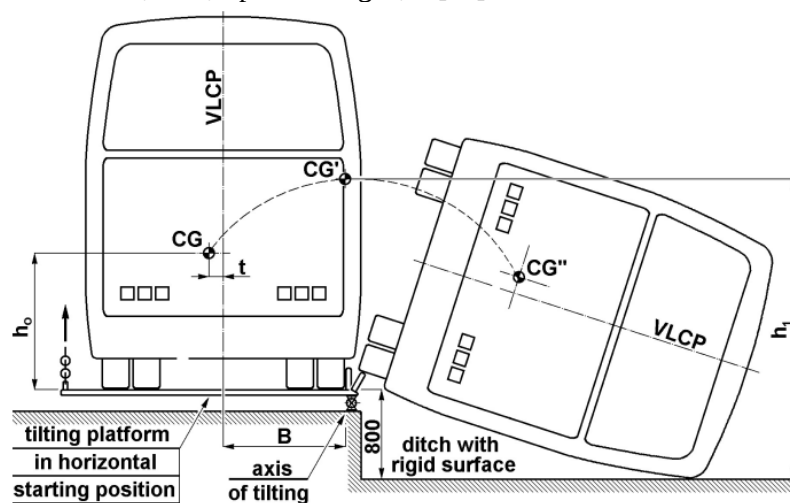
Theo quy định ECE R66, thử nghiệm lật xe là một bước đánh giá quan trọng nhằm đảm bảo an toàn cho hành khách trong trường hợp xảy ra tai nạn lật xe. Quá trình này bắt đầu bằng việc đặt xe lên một bệ nghiêng với hệ thống treo được khóa cố định, sau đó xe được nghiêng dần cho đến khi đạt đến trạng thái cân bằng không ổn định.

Thử nghiệm lật bắt đầu từ vị trí cân bằng không ổn định, nơi mà vận tốc góc của xe bằng không và trục quay được thiết lập thông qua điểm tiếp xúc giữa bánh xe và mặt đất. Xe sẽ được nghiêng và lật vào một rãnh có bề mặt bê tông phẳng, khô ráo và nhẵn mịn, với độ sâu danh định được xác định là 800 mm như hình 2.

Thử nghiệm được thực hiện ở phía bên xe mà khả năng không gian an toàn dễ bị xâm phạm nhất. Quyết định về phía nào của xe sẽ được kiểm tra phụ thuộc vào kết luận của bộ phận kỹ thuật, sau khi tham khảo ý kiến của nhà sản xuất và xem xét một số yếu tố kỹ thuật. Những yếu tố này bao gồm độ lệch tâm của trọng tâm xe, tác động của độ lệch này đến năng lượng tham chiếu (reference energy) khi xe đạt đến trạng

TỐI ƯU KHUNG XE BUÝT MONOCOQUE TRONG ĐIỀU KIỆN LẬT NGANG

thái cân bằng không ổn định và tính bất đối xứng của không gian an toàn. Ngoài ra, các đặc điểm cấu trúc bất đối xứng giữa hai bên của xe, cũng như sự hỗ trợ từ các bộ phận bên trong xe, cũng là những yếu tố quan trọng được xem xét khi lựa chọn phía thử nghiệm [13].



Hình 2: Tiến trình thử nghiệm lật [13]

2.2. Mô hình phân tích phần tử hữu hạn

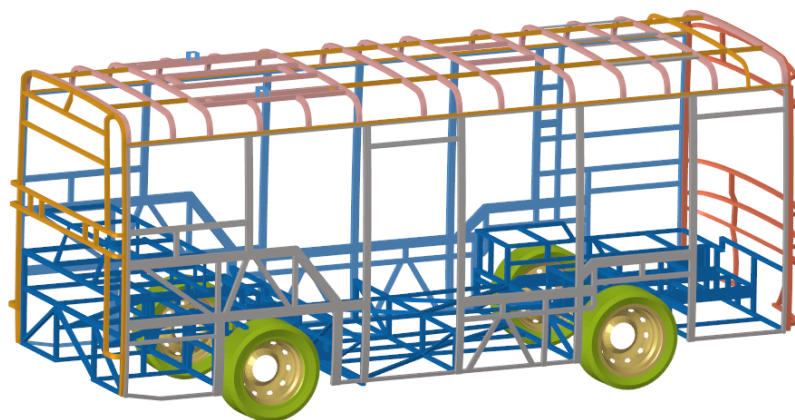
2.2.1. Mô hình xe buýt monocoque

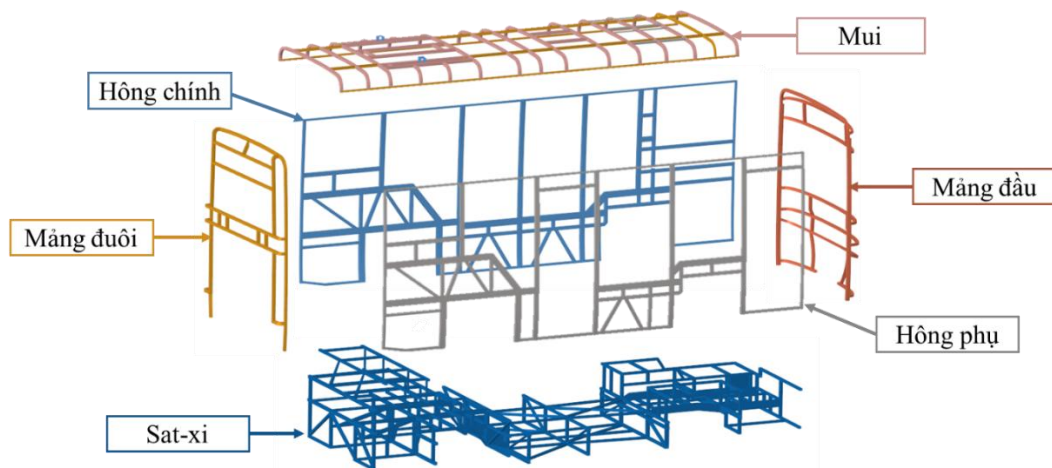
Trong bài báo này, tiêu chuẩn ECE R66 được xét trên mẫu xe buýt 29 chỗ cụ thể với mô hình 3D ban đầu của xe buýt monocoque, với chiều dài tổng thể 8,7 m và chiều rộng 2,4 m; được phát triển dựa trên sự hợp tác kỹ thuật chặt chẽ cùng nhà sản xuất nhằm mô phỏng chi tiết cấu trúc xe. Khung xương của xe bao gồm sáu bộ phận chính: mảng đầu, mảng mũi, hai mảng hông trái và phải, mảng đuôi và sát-xi được thể hiện trong hình 3.

Các loại thép chất lượng cao để cấu thành các bộ phận của xe buýt được chọn từ nhiều nguồn khác nhau. Trong đó, thép D135 được cung cấp bởi Công ty Nhật Quang steel, thép D159 nhập khẩu từ Malaysia và thép D357 từ châu Âu được sử dụng trong cấu trúc, nhằm gia tăng khả năng chịu tải và độ bền của khung xương. Bảng 1 cung cấp các đặc tính của từng loại thép được sử dụng, đảm bảo rằng các thành phần khung đáp ứng tốt các tiêu chuẩn cơ bản về an toàn và khả năng chịu lực.

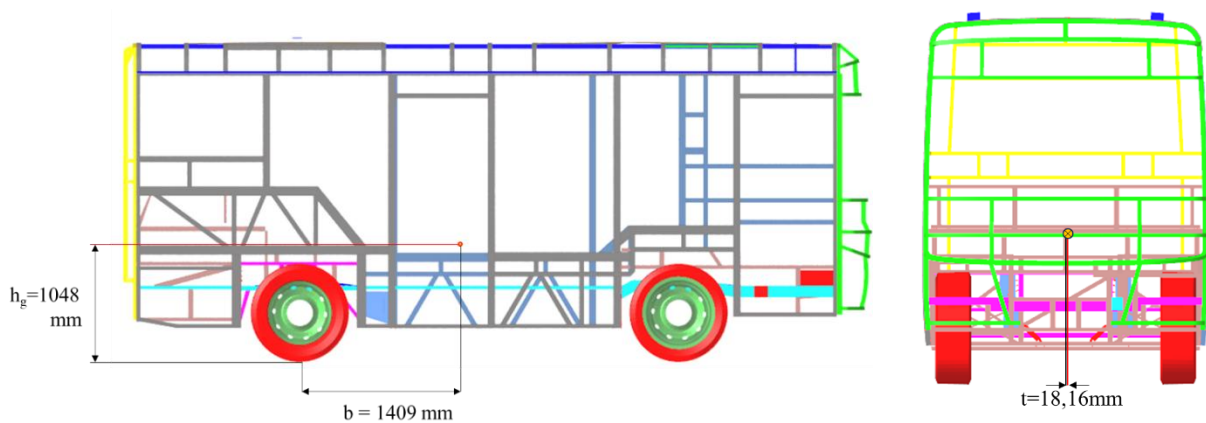
Bảng 1: Đặc tính các loại thép sử dụng cho kết cấu khung xương

Tên thép	Khối lượng riêng (kg/m ³)	Mô đun đàn hồi (GPa)	Hệ số Poisson	Ứng suất chảy (MPa)
D357	7760	196	0.27	470
D135	7840	199	0.26	341
D159	7660	196	0.28	382





Hình 3: Mô hình xe buýt 29 chỗ và các thành phần chính



Hình 4: Tọa độ trọng tâm

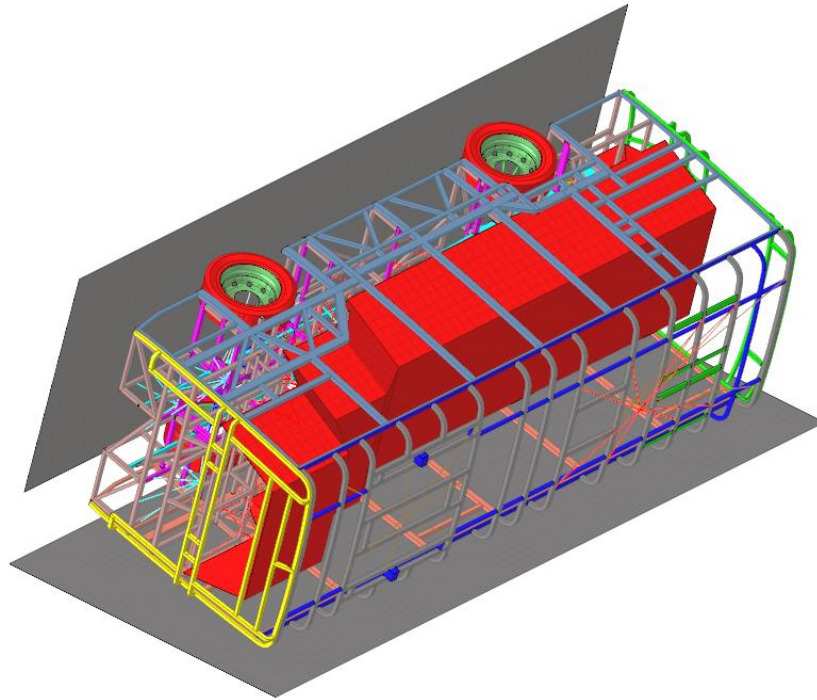
2.2.2. Mô hình phân tích phần tử hữu hạn thử nghiệm lật

Dựa vào mô hình CAD ô tô khách, môi trường LsDyna trong phần mềm Hypermesh được dùng để xây dựng mô hình phần tử hữu hạn nhằm phân tích xe buýt trong thử nghiệm lật. Cấu trúc của thân xe là khung xương chịu lực, có độ phức tạp cao; vì vậy trong quá trình mô phỏng, toàn bộ phần tử thanh dầm được mô hình hóa. Trong quá trình xây dựng mô hình phân tích phần tử hữu hạn, việc sử dụng loại phần tử phù hợp cho từng bài toán là rất quan trọng, vì nó quyết định độ chính xác của kết quả tính toán mô phỏng so với mô hình thực tế. Trong bài nghiên cứu này, 6 màng chính của khung xe sử dụng MATL 24 (cho vật liệu thép cần phân tích biến dạng) với mức lưới 10 cùng các đặc tính được đề cập trong bảng 1, trong khi vỏ và chạm được sử dụng phần tử MATL 20 (cứng hoàn toàn) với mức lưới 100. Ngoài ra, để xây dựng các bộ phận có khối lượng như hành khách, ghế ngồi, hành lý, động cơ, ắc quy, hệ thống điều hòa không khí, cửa kính,... người ta sử dụng phần tử CONM2. Tại các vị trí nối giữa các thanh và để tạo các liên kết cùng tiếp điểm, phần tử RBE2 được dùng để liên kết các phần tử cứng. Đồng thời, phần tử RBE3 được áp dụng cho việc liên kết các phần tử có khối lượng. Gia tốc trọng trường được tính là $g = 9.806 \text{ m/s}^2$. Tọa độ trọng tâm (CG) khi xe ô tô toàn tải được xác định dựa vào phần mềm LS Dyna như hình 4, từ đó đưa ra hướng va chạm lật của xe là về phía phần hông phụ do tọa độ trọng tâm đang nghiêng về hông chính [4].

Một thử nghiệm lật xe được thực hiện trên một phương tiện hoàn chỉnh, mô phỏng trên máy tính để tái hiện các điều kiện thực tế. Mô hình thử nghiệm bao gồm một xe buýt tỷ lệ đầy đủ và bộ nghiêng. Mô hình được thiết kế để lật từ độ cao 800 mm tương tự tiêu chuẩn ECE R66 [4]. Góc nghiêng của bộ thử nghiệm được điều chỉnh với vận tốc góc là 0,087 radian/giây trong quá trình mô phỏng (như minh họa trong Hình 5). Vận tốc góc trong mô hình này được tính toán (1) là $3,815 \times 10^{-3}$ radian/mili-giây để mô phỏng điều kiện lật xe khi xảy ra va chạm. Khối lượng tải đầy đủ của mô hình được xác định là 7765 kg.

TỐI ƯU KHUNG XE BUÝT MONOCOQUE TRONG ĐIỀU KIỆN LẬT NGANG

$$\omega = \sqrt{\frac{2.m.g.(h_1 - h_2)}{J}} = \sqrt{\frac{2.7765.0,009806.366}{3,82.10^9}} \approx 3,815.10^{-3} \text{ (rad/ ms)} \quad (1)$$

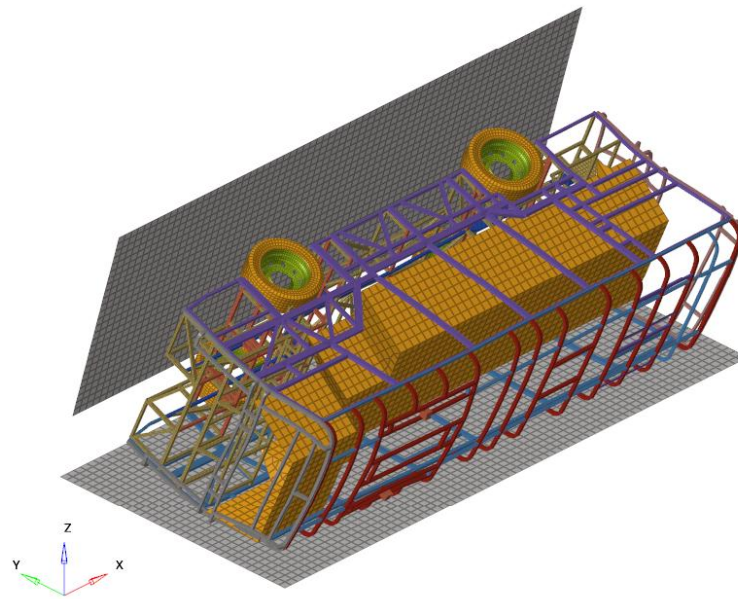


Hình 5. Mô hình FEA xe buýt theo tiêu chuẩn ECE R66

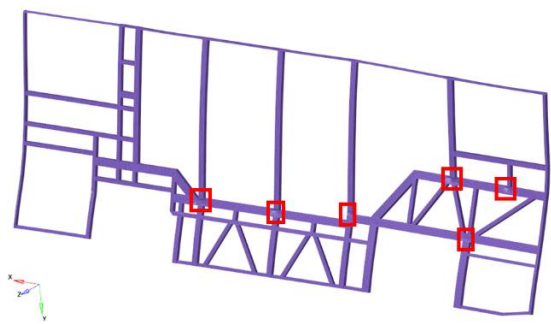
3 KẾT QUẢ VÀ ĐỀ XUẤT

3.1. Kết quả mô phỏng mô hình thiết kế

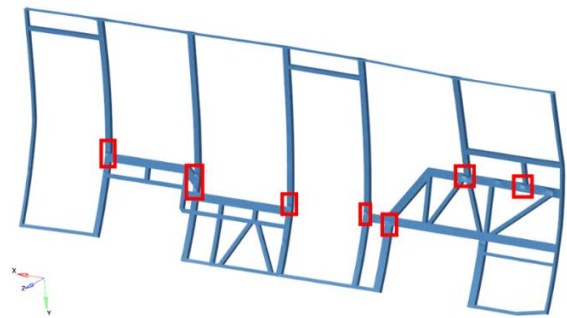
Kết quả mô phỏng thử nghiệm lật ngang với mô hình thiết kế ban đầu của khung xe bus monocoque được trình bày trong Hình 6. Trong quá trình mô phỏng, cấu trúc khung không đảm bảo khả năng duy trì vùng không gian an toàn, một yếu tố quan trọng theo yêu cầu của tiêu chuẩn ECE R66, vốn yêu cầu rằng không gian này phải được bảo vệ trong suốt và sau quá trình lật xe. Cụ thể, các biến dạng của khung dẫn đến việc các thành phần kết cấu xâm nhập vào vùng không gian an toàn, tạo ra nguy cơ đáng kể đối với hành khách trong tình huống lật xe.



Hình 6. Mô phỏng lật với mô hình thiết kế ban đầu



a. Vị trí biến dạng nghiêm trọng trên hông chính



b. Vị trí biến dạng nghiêm trọng trên hông phụ

Hình 7. Khu vực biến dạng nghiêm trọng (bóp méo) trên khung xe buýt

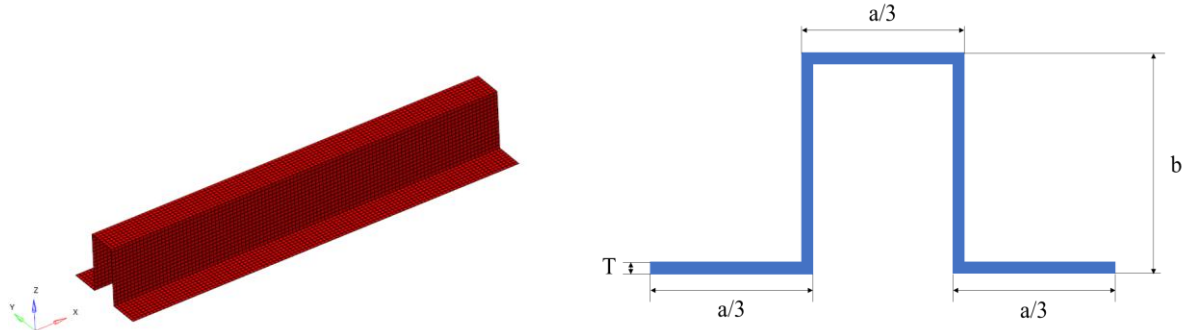
Biến dạng nghiêm trọng được ghi nhận tại nhiều vị trí trên khung xe, đặc biệt ở phần hông chính, hông phụ và khu vực tiếp giáp với mũi (hình 7). Biến dạng này không chỉ là sự uốn cong của các bộ phận, mà còn bao gồm sự méo mó không thể phục hồi do vật liệu bị vượt ngưỡng chịu lực, dẫn đến biến dạng dẻo. Hiện tượng này làm suy giảm khả năng chống chịu tải trọng lật và gây xâm nhập vào không gian bảo vệ hành khách.

Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng thiết kế khung hiện tại thiếu độ cứng và không đáp ứng tiêu chuẩn ECE R66 trong tình huống lật xe. Khung xe không chỉ bị uốn cong mà còn biến dạng dẻo nghiêm trọng, làm suy giảm tính toàn vẹn kết cấu và không duy trì được không gian an toàn cho hành khách. Điều này cho thấy thiết kế ban đầu không đảm bảo khả năng bảo vệ trong trường hợp lật xe, vi phạm các yêu cầu an toàn của ECE R66 [13].

Những kết quả này nhấn mạnh sự cần thiết phải tối ưu thiết kế khung xe nhằm tăng cường độ cứng và giảm thiểu biến dạng dẻo. Giải pháp cải tiến khung xe sẽ được trình bày chi tiết ở các phần tiếp theo, bao gồm phương pháp tối ưu và đánh giá hiệu quả của các biện pháp cải tiến nhằm đảm bảo tuân thủ tiêu chuẩn quốc tế trên.

3.2. Phương pháp tối ưu và thử nghiệm

Để cải thiện khả năng chịu lật ngang và đáp ứng tiêu chuẩn ECE R66, phương pháp gia cường khung xe buýt bằng gân composite S2-glass/epoxy được đề xuất. Gân composite được thiết kế với các kích thước a và b , tương ứng với chiều rộng và chiều cao của lòng ống thép rỗng, như mô tả trong Hình 8. Việc bố trí này giúp tăng cường khả năng chịu lực mà không làm thay đổi cấu trúc của khung xe.



Hình 8. Mô hình cấu tạo gân composite

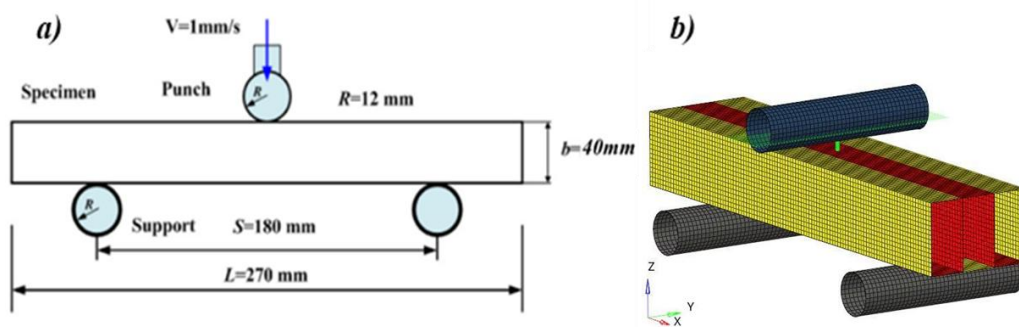
Vật liệu composite này được mô phỏng và phân tích bằng mô hình phần tử hữu hạn trong phần mềm LS-DYNA, sử dụng mã vật liệu MAT 054 (MAT_ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE) [14,15]. Tính chất cơ lý của composite được trình bày chi tiết trong Bảng 1, dựa trên kết quả tham khảo từ nghiên cứu [12]. Sau đó, thí nghiệm uốn ba điểm (3-point bending) được thực hiện nhằm đánh giá độ cứng của ống thép khi được gia cường bằng gân composite. Thí nghiệm này cho phép kiểm tra hiệu quả của gân composite trong việc nâng cao độ cứng và khả năng chịu lực của kết cấu khung xe buýt.

Bảng 2: Cơ tính vật liệu được thiết lập theo MAT 054 [12,15]

Kí hiệu	Đơn vị	Giá trị	Mô tả
Rho	kg/mm ³	1,783.10 ⁻⁶	Khối lượng riêng
EA	GPa	24.1	Mô-đun đàn hồi theo hướng chính sợi (a-hướng dọc theo sợi của lớp composite). (Young's modulus - longitudinal direction)
EB	GPa	24.1	Mô-đun đàn hồi theo hướng vuông góc với hướng sợi (trong mặt phẳng của lớp composite, nhưng không dọc theo sợi-b). (Young's modulus - transverse direction)
EC	GPa	10.4	Mô-đun đàn hồi theo hướng pháp tuyến với bề mặt lớp composite (c) (Young's modulus - normal direction)
PRBA		0.12	Hệ số Poisson giữa hướng b và a (Poisson's ratio ba)
PRCA		0.4	Hệ số Poisson giữa hướng c và a (Poisson's ratio ca)
PRCB		0.4	Hệ số Poisson giữa hướng c và b (Poisson's ratio cb)
GAB	GPa	5.9	Mô-đun trượt giữa hướng a và b (shear modulus ab)
GBC	GPa	5.9	Mô-đun trượt giữa hướng b và c (shear modulus bc)
GCA	GPa	5.9	Mô-đun trượt giữa hướng c và a (shear modulus ca)
XC	GPa	0.35	Độ bền nén dọc sợi (Longitudinal compressive strength)
YC	GPa	0.59	Độ bền nén ngang sợi (Transverse compressive strength, b-axis - positive value)
XT	GPa	0.35	Độ bền kéo dọc sợi (Longitudinal tensile strength)
YT	GPa	0.59	Độ bền kéo ngang sợi (Transverse tensile strength, b-axis)
SC	GPa	0.55	Độ bền cắt (Shear strength, ab-plane)
n		4	Số lớp (Layer)
T	mm	0.5	Độ dày mỗi lớp (Thickness)

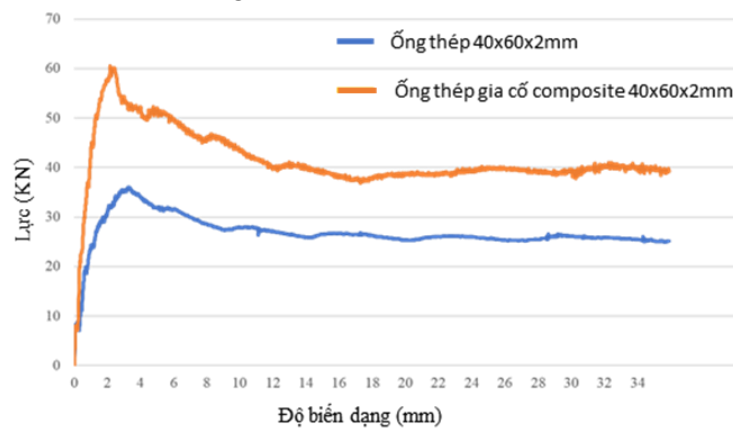
3.2.1. Thử nghiệm vật liệu-uốn 3 điểm (3 point bending)

Mô hình thử nghiệm được dựa vào thí nghiệm [16] như hình 9



Hình 9: a) Sơ đồ minh họa của thử nghiệm uốn ba điểm; b) Mô hình phần tử hữu hạn

Thí nghiệm được thực hiện trên các mẫu vật liệu là ống thép D159 với chiều cao $b=40\text{mm}$, $a=60\text{mm}$ và chiều dài $L=270\text{mm}$, bán kính của gối đỡ và đầu tác động lực (Punch) $R=12\text{mm}$; với khoảng cách của hai gối đỡ là $S=180\text{mm}$. Mô hình phần tử hữu hạn được thiết lập với mức lưới vuông với kích thước lưới là $2,5\text{mm}$. Thử nghiệm uốn ba điểm được thực hiện trên các mẫu vật liệu này nhằm khảo sát sự biến dạng và khả năng chịu lực của vật liệu dưới tải trọng tĩnh.



Hình 10: Biểu đồ Force-Displacement của ống thép 40x60x2mm nguyên bản và ống thép 40x60x2mm gia cố bằng gân composite

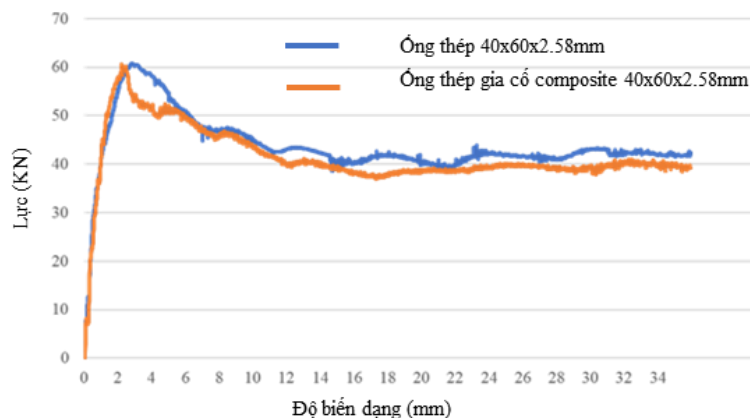
Kết quả thử nghiệm so với ống thép được thể hiện trong hình 10. Biểu đồ lực-độ chuyển vị cho thấy ống thép sau khi gia cố gân chịu lực tăng lên đến 68% so với ống thép ban đầu với cùng kích thước.

3.2.2. Đánh giá hiệu quả gia cường bằng gân composite so với tăng độ dày thanh thép

Trong thử nghiệm uốn ba điểm (3-point bending), để đạt được khả năng chịu lực tương đương với phương pháp gia cường bằng gân composite, thanh thép rỗng được tăng độ dày. Kết quả cho thấy, trọng lượng của thanh thép có sự khác biệt đáng kể giữa các phương pháp:

- Thanh thép nguyên bản nặng 0.827 kg .
- Khi gia cường bằng gân composite S2-epoxy, trọng lượng tăng lên 0.962 kg .
- Khi tăng độ dày của thanh thép để đạt khả năng chịu lực tương đương, trọng lượng thanh thép tăng lên $1,067\text{ kg}$ ứng với độ dày ống thép là 2.58mm .

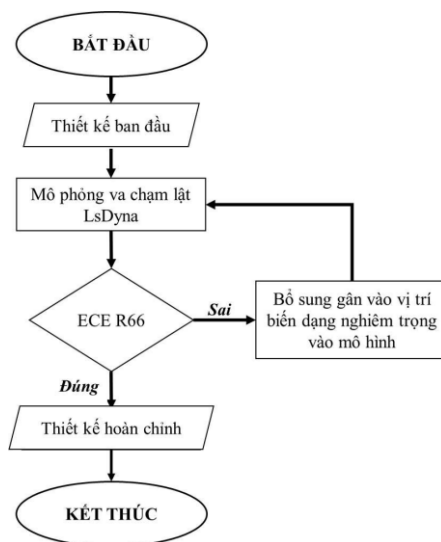
TỐI ƯU KHUNG XE BUÝT MONOCOQUE TRONG ĐIỀU KIỆN LẬT NGANG



Hình 11: Biểu đồ Force-Displacement của ống thép 40x60x2.58mm nguyên bản và ống thép 40x60x2mm gia cố bằng gân composite

3.2.3. Vị trí và phương pháp gia cố

Phần gân chịu lực được gia cố tại các vị trí có nguy cơ biến dạng nghiêm trọng trong cấu trúc khung xe. Quá trình gia cố được thực hiện theo các phương pháp được trình bày trong biểu đồ của Hình 12. Cụ thể, các gân này được thiết kế và đặt tại những khu vực có độ căng và ứng suất cao, nơi có khả năng xảy ra biến dạng hoặc hư hỏng trong các tình huống tải trọng cực đại, nhằm tăng cường độ bền và khả năng chịu lực của khung xe. Phương pháp gia cố này không chỉ giúp cải thiện độ cứng của khung xe trong quá trình thử nghiệm lật theo tiêu chuẩn ECE R66, từ đó giảm thiểu nguy cơ lật xe và nâng cao mức độ an toàn cho người sử dụng.



Hình 12: Quy trình bổ sung gân chịu lực

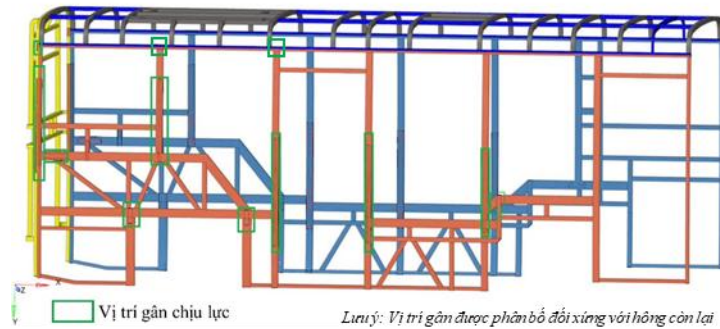
Ngoài ra, do phần khung an toàn bị xâm phạm tại khu vực đuôi xe, phần lớn các gân chịu lực được tập trung bố trí ở vị trí này và được sắp xếp đối xứng trên cả hai bên hông chính và hông phụ của khung. Việc bố trí này giúp cân bằng tải trọng, giảm thiểu biến dạng không đồng đều và tăng hiệu quả chịu lực tổng thể, đặc biệt trong các tình huống tải trọng phức tạp.

Các gân gia cường được ưu tiên đặt tại những vị trí có nguy cơ biến dạng nghiêm trọng trong cấu trúc khung xe, bao gồm các khu vực có ứng suất cao hoặc tại các mối nối quan trọng như giao điểm giữa dầm chính và cột đứng, góc nối giữa phần mũi và hông, các vị trí xung quanh cửa ra vào hoặc cửa sổ. Việc bố trí gân tại các khu vực này giúp phân tán đều ứng suất và tăng cường độ bền cho khung xe, đồng thời giảm thiểu nguy cơ xuất hiện biến dạng dẻo hay hư hỏng cục bộ dưới tác động của tải trọng cực đại.

Quy trình gia cố khung xe được thực hiện theo các phương pháp đã trình bày trong Hình 12, với việc lựa chọn vật liệu và vị trí bố trí gân tối ưu nhằm đạt hiệu quả chịu lực cao nhất. Các gân composite được

thiết kế để tăng cường độ cứng và khả năng hấp thụ năng lượng trong trường hợp xe lật ngang, đảm bảo vùng không gian an toàn không bị xâm phạm theo yêu cầu của tiêu chuẩn ECE R66.

Hình 13 minh họa chi tiết các vị trí gân chịu lực sau quá trình tối ưu. Các gân này được bố trí theo cấu trúc đối xứng dọc trên cả hai phần hông, tập trung chủ yếu tại đuôi xe – nơi ứng suất tập trung cao nhất khi xảy ra lật ngang. Kết quả mô phỏng được thể hiện trong phần 6, cho thấy sự sắp xếp này không chỉ giúp giảm đáng kể biến dạng cục bộ mà còn tăng cường đáng kể độ cứng tổng thể của khung xe, từ đó cải thiện khả năng bảo vệ hành khách trong tình huống tai nạn lật xe.



Hình 13: Vị trí gân chịu lực sau quá trình tối ưu

3.3. Kết quả mô hình sau tối ưu

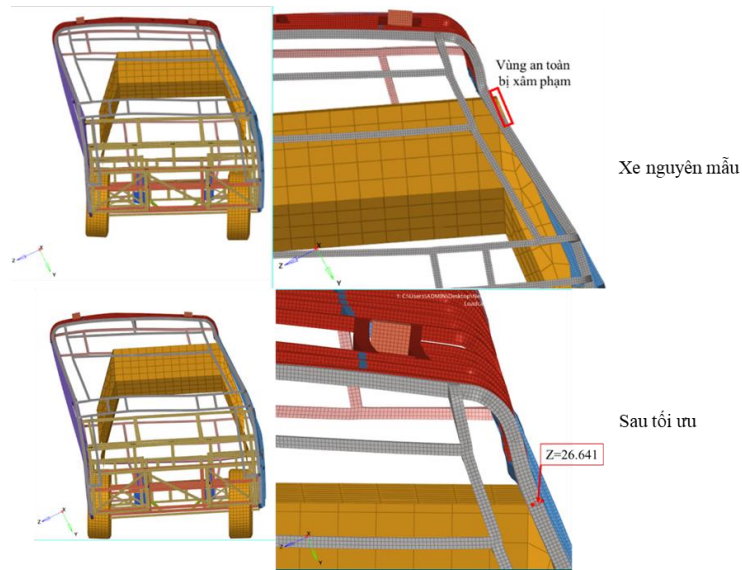
Phương pháp gia cố khung xe buýt monocoque bằng gân composite S2-glass/epoxy đã được kiểm chứng thông qua mô phỏng thử nghiệm lật ngang theo tiêu chuẩn ECE R66. Kết quả mô phỏng cho thấy rằng, sau khi tối ưu, khung xe buýt đáp ứng đầy đủ các yêu cầu về an toàn, đặc biệt là khả năng duy trì vùng không gian an toàn trong tình huống tai nạn lật ngang. Điều này chứng tỏ hiệu quả của giải pháp gia cố trong việc cải thiện độ cứng kết cấu, tăng khả năng chịu lực và bảo vệ hành khách khỏi nguy cơ thương vong trong trường hợp xảy ra va chạm nghiêm trọng.

Trước khi được tối ưu, mô hình khung xe buýt cho thấy nhiều biến dạng dẻo nghiêm trọng tại các vị trí như hông chính, hông phụ và khu vực đuôi xe, như được mô tả trong Hình 6 và Hình 7. Những khu vực này bị xâm phạm vào vùng không gian an toàn – khu vực bảo vệ hành khách – gây nguy hiểm trực tiếp đến người ngồi trong xe. Cụ thể, các bộ phận kết cấu của khung xe bị uốn cong và méo mó, vượt quá giới hạn chịu đựng của vật liệu, dẫn đến sự suy giảm nghiêm trọng về độ bền và khả năng chống chịu tải trọng lật. Hiện tượng này là nguyên nhân chính khiến khung xe không đạt được yêu cầu của tiêu chuẩn ECE R66.

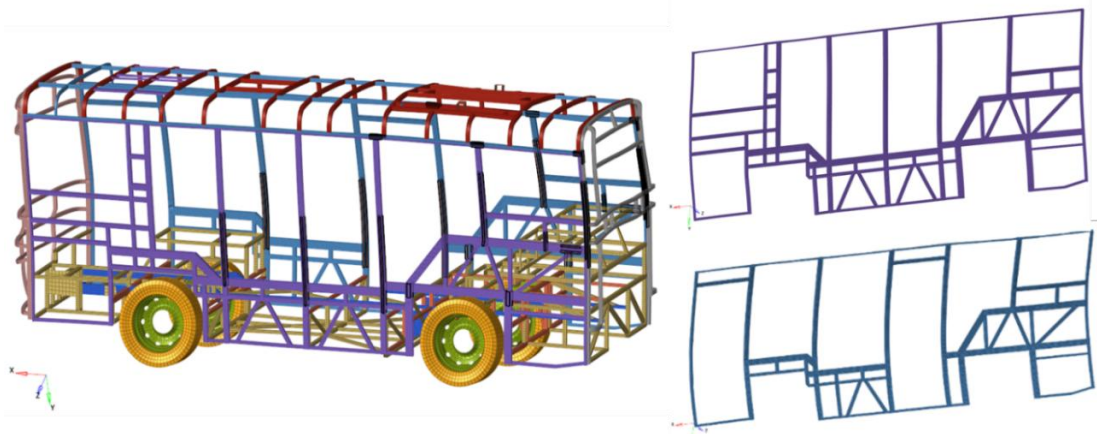
Tuy nhiên, sau khi gia cố bằng gân composite, mô hình khung xe đã duy trì được vùng không gian an toàn trong suốt quá trình thử nghiệm lật ngang, như thể hiện trong Hình 14. Các gân composite được bố trí tại những khu vực có ứng suất cao và các mối nối quan trọng trong khung xe, chẳng hạn như giao điểm giữa dầm chính và cột đứng, góc nối giữa phần mũi và vách bên, và khu vực xung quanh cửa ra vào. Việc bổ sung các gân composite tại các vị trí này giúp giảm thiểu biến dạng dẻo và phân tán ứng suất đều hơn trên toàn bộ khung xe, từ đó ngăn ngừa nguy cơ xâm phạm vào vùng không gian an toàn. Sự phân bố gân composite này cũng làm giảm đáng kể khả năng xảy ra biến dạng cục bộ tại những khu vực xảy ra biến dạng dẻo hay phá hủy, đặc biệt là phần đuôi xe – nơi thường tập trung ứng suất cao nhất trong quá trình lật ngang (như minh họa trong Hình 13). Việc bố trí đối xứng này giúp cân bằng tải trọng, giảm thiểu biến dạng không đồng đều và tăng khả năng chịu lực tổng thể, đặc biệt trong các tình huống tải trọng phức tạp. Vì gân được thiết kế theo dạng đối xứng nên không ảnh hưởng đến hướng lật của xe trong bài thử nghiệm được quy định trong tiêu chuẩn ECE R66; đồng thời đảm bảo rằng khả năng bảo vệ hành khách được duy trì dù xe lật về phía hông chính hay hông phụ.

Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng các vị trí biến dạng nghiêm trọng trong mô hình thiết kế ban đầu đã được kiểm soát tốt hơn sau khi gia cố. Như được thể hiện trong Hình 15, sự biến dạng dẻo trên khung xe đã giảm đáng kể, đặc biệt ở các vị trí như hông phụ và khu vực tiếp giáp với phần mũi. Điều này chứng minh rằng giải pháp gia cố bằng gân composite không chỉ giúp cải thiện khả năng chịu tải trọng mà còn duy trì độ bền kết cấu của khung xe trong suốt quá trình va chạm.

TỐI ƯU KHUNG XE BUÝT MONOCOQUE TRONG ĐIỀU KIỆN LẬT NGANG



Hình 14: Kết quả mô phỏng lật với mô hình trước và sau khi tối ưu



Hình 16: Sự biến dạng dẻo được giảm đáng kể trên khắp khung xe

Bảng 3: So sánh kết quả mô phỏng trước và sau khi tối ưu hóa khung xe buýt

Tiêu chí	Trước tối ưu	Sau tối ưu
Đảm bảo vùng an toàn	Không đạt	Đạt
Biến dạng dẻo	Cao	Giảm đáng kể
Khối lượng xe (toàn tải)	7765 (kg)	7776 (kg)

Một yếu tố quan trọng khác được đánh giá là ảnh hưởng của việc gia cố đến trọng lượng xe. Theo kết quả mô phỏng, việc bổ sung gân composite chỉ làm tăng trọng lượng xe buýt từ 7765 kg lên 7776 kg, tương đương mức tăng khoảng 0,14%. Đây là mức tăng không đáng kể so với các phương pháp gia cố truyền thống, chẳng hạn như tăng độ dày của thanh thép. Điều này giúp xe buýt vẫn duy trì được hiệu suất vận hành tối ưu, đồng thời giảm thiểu tiêu hao nhiên liệu, đáp ứng yêu cầu về hiệu quả kinh tế và bảo vệ môi trường.

So sánh trước và sau khi tối ưu, như tóm tắt trong Bảng 3, cho thấy sự khác biệt rõ rệt về hiệu quả bảo vệ của khung xe buýt. Trước khi gia cố, khung xe không đáp ứng được yêu cầu về vùng không gian an toàn, với nhiều khu vực bị biến dạng dẻo nghiêm trọng. Sau khi gia cố bằng gân composite, các vấn đề này đã được khắc phục đáng kể, giúp khung xe duy trì được vùng không gian an toàn và giảm thiểu nguy cơ gây hư hỏng cấu trúc trong các tình huống tai nạn lật ngang.

Từ các kết quả trên, kết quả mô phỏng khẳng định rằng phương pháp gia cố khung xe buýt bằng gân composite S2-glass/epoxy là một giải pháp hiệu quả trong việc cải thiện khả năng chịu lực và bảo vệ hành

khách theo tiêu chuẩn ECE R66. Việc bố trí các gân composite tại những vị trí trọng yếu giúp giảm thiểu biến dạng cục bộ, phân tán ứng suất đều hơn và duy trì độ bền kết cấu của khung xe. Đặc biệt, thiết kế đối xứng của các gân composite đảm bảo rằng khung xe giữ được khả năng bảo vệ hành khách trong cả hai hướng lật, đáp ứng đầy đủ yêu cầu của thử nghiệm lật ngang. Giải pháp gia cố này cũng cho thấy tính hiệu quả về mặt kinh tế, khi chỉ làm tăng trọng lượng xe không đáng kể, giúp duy trì hiệu suất vận hành và tiết kiệm nhiên liệu. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng phương pháp gia cố khung xe bằng vật liệu composite là một giải pháp tối ưu, góp phần nâng cao độ an toàn cho hành khách, đồng thời thúc đẩy xu hướng phát triển các phương tiện giao thông công cộng bền vững và thân thiện với môi trường.

4 KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất phương pháp gia cố khung xe buýt monocoque bằng gân composite từ sợi thủy tinh S2 với nền keo epoxy nhằm cải thiện khả năng chịu lực và đảm bảo an toàn trong tình huống lật ngang, đáp ứng đầy đủ các yêu cầu của tiêu chuẩn ECE R66. Kết quả phân tích mô phỏng phần tử hữu hạn cho thấy phương pháp gia cố này giúp giảm thiểu đáng kể hiện tượng biến dạng dẻo tại các vị trí trọng yếu, đảm bảo khung xe duy trì vùng không gian an toàn trong toàn bộ quá trình thử nghiệm lật.

Đặc biệt, việc bố trí các gân composite theo dạng đối xứng trên khung xe đảm bảo rằng khả năng chịu lực không bị ảnh hưởng bởi hướng lật của xe trong thử nghiệm. Điều này giúp khung xe duy trì hiệu quả bảo vệ hành khách trong cả hai hướng lật, phù hợp với yêu cầu của tiêu chuẩn ECE R66. Thiết kế đối xứng này còn giúp phân tán đều ứng suất và giảm nguy cơ hư hỏng cục bộ tại các khu vực dễ bị tổn thương như hông phụ, hông chính và đuôi xe.

Một ưu điểm nổi bật của phương pháp gia cố này là trọng lượng xe chỉ tăng thêm khoảng 0,14% sau khi tối ưu hóa, đảm bảo rằng xe vẫn duy trì được hiệu suất vận hành và giảm thiểu tiêu hao nhiên liệu. So với các phương pháp gia cố truyền thống như tăng độ dày vật liệu, việc sử dụng gân composite không chỉ nhẹ hơn mà còn mang lại hiệu quả chịu lực tốt hơn.

Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng việc áp dụng gân composite vào khung xe buýt là một giải pháp khả thi, góp phần nâng cao độ an toàn của phương tiện giao thông công cộng, đồng thời hướng đến mục tiêu phát triển bền vững và thân thiện với môi trường. Nghiên cứu này mở ra hướng đi mới trong thiết kế khung xe buýt tại Việt Nam, tạo tiền đề cho các ứng dụng rộng rãi hơn của vật liệu composite trong ngành công nghiệp xe khách trên phạm vi toàn cầu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. Kunakorn-ong, K. Ruangjirakit, P. Jongpradist, S. Aimmanee, and Y. Laoonual, Design and optimization of electric bus monocoque structure consisting of composite materials, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 234, no. 20, 2020. DOI: 10.1177/0954406220917690.
- [2] I. Widiyanto, S. Sutinim, F. B. Laksono, and A. R. Prabowo, Structural assessment of monocoque frame construction using finite element analysis: A study case on a designed vehicle chassis referring to Ford GT40, *Procedia Structural Integrity*, vol. 33, pp. 27–34, 2021.
- [3] H. Hanqiao and Z. Weigang, Simulation study on structural safety of high-floor buses in rollover, *Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 7, pp. 922–930, 2007.
- [4] W. T. Tomas, I. Ignacio, and D. M. J. Agenor, Numerical simulation of bus rollover, in *XVI Congresso e Exposicao Internacionais da Tecnologia de Mobilidade*, SAE, 2007, pp. 2007-01-2718.
- [5] K. Friedman, J. Hutchinson, E. Weerth, and D. Mihora, Transit bus design effects utilizing improved steel or fiber-reinforced composite structures, in *2007 World Congress*, Detroit, MI, USA: SAE, 2007, pp. 2007-01-0457.
- [6] R. Salvador, C. Pablo, S. Blai, and W. Erich, Optimizing bus structures for improved rollover safety using high-strength steel foam-filled hollow tubes, *SAE Technical Paper*, vol. 2009-26-0003, 2009.
- [7] M. Alam, X. Luo, Y. Liu, and X. Li, Design optimization of an aluminum-steel multi-material electric bus body structure, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 60, no. 5, pp. 245–258, 2019.
- [8] M. Mikulski, J. Kurek, and T. Skrodzki, Using carbon fiber composites to enhance the rollover resistance of steel buses, *Composite Structures*, vol. 267, no. 113844, 2021.
- [9] D. Lavayen-Farfán, J. A. Butenegro-García, M. J. López-Boada, M. Á. Martínez-Casanova, and J. A. Rodriguez-Hernandez, Rollover safety enhancement of buses using carbon fiber composite materials, in *Proceedings of the XV Ibero-American Congress of Mechanical Engineering*, pp. 168–174, 2023.
- [10] C. Libo, N. T. Tâm, H. Xingang, and P. Jinjun, Enhancing bus rollover crashworthiness using the tube filling method, *Journal of Automotive Engineering*, vol. 45, no. 3, pp. 345–355, 2021.

- [11] I. T. Amarasinghe, Y. Qian, T. Gunawardena, P. Mendis, and B. Belleville, Composite panels from wood waste: A detailed review of processes, standards, and applications, *Journal of Composite Science*, vol. 8, no. 417, 2024. DOI: 10.3390/jcs8100417.
- [12] C. F. Yen, Ballistic impact modeling of composite materials, in *Proceedings of the 7th International LS-DYNA Users Conference*, Detroit, Michigan, pp. 15–25, 2002.
- [13] Economic Commission for Europe (ECE), ECE Regulation No. 66: Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure, United Nations Economic Commission for Europe, 2010.
- [14] M. Hörmann and M. Wacker, Simulation of the crash performance of crash boxes based on advanced thermoplastic composite, in *Proceedings of the 5th European LS-DYNA Users Conference*, CADFEM GmbH and Jacob Composite GmbH, Germany, 2005.
- [15] Livermore Software Technology Corporation (LSTC), LS-DYNA Keyword User's Manual: Volume II - Material Models, Version R13, Sept. 27, 2021. Livermore, CA: LSTC, An Ansys Company.
- [16] Z. Huang and X. Zhang, Three-point bending of thin-walled rectangular section tubes with indentation mode, *Thin-Walled Structures*, vol. 137, pp. 231-250, 2019.
- [17] Thanh Tam Nguyen, Cong Thanh Nguyen, Van Sy Nguyen and Duc Nam Nguyen, Optimal Design for Body Structure of Coach Bus to Satisfy Rollover Collision Safety Based on ECE R66 Standard, In: *International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation and Sustainable Development*. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 76-85.

OPTIMIZATION OF MONOCOQUE BUS FRAME FOR ROLLOVER CRASHWORTHINESS

NGUYEN VAN SY, DAO NGOC QUOC KHANH*, NGUYEN THANH TAM,
PHAM CONG TINH

* Corresponding author: daongocquockhanh@qnu.edu.vn

Abstract. This study proposes an improved design method for monocoque bus frames under rollover conditions according to the ECE R66 standard by reinforcing the frame with composite ribs made of S2 glass fibers and epoxy. The effectiveness of the method is validated through finite element analysis (FEA) simulations using Hypermesh and the LS-DYNA solver. The results demonstrate that the bus structure reinforced with composite ribs maintains a residual space, meeting the ECE R66 safety requirements. Moreover, the vehicle's weight remains nearly unchanged, providing an optimal solution for sustainable bus frame design. This research offers a pathway toward developing safer, more sustainable, and environmentally friendly public transportation vehicles.

Ngày gửi bài: 19/3/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025