

TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH



NGÔ VĂN THẬN

**NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ỨNG SUẤT VÀ BIẾN
DẠNG TRÊN KHUNG XE BUÝT ĐIỆN KHI VA
CHẠM TRỰC DIỆN**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

Ngành: Kỹ thuật ô tô

Mã ngành: 8520130

Thành phố Hồ Chí Minh, tháng 12 năm 2025

TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH



NGÔ VĂN THẬN

**NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG ỨNG SUẤT VÀ BIẾN
DẠNG TRÊN KHUNG XE BUÝT ĐIỆN KHI VA
CHẠM TRỰC ĐIỆN**

ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP THẠC SĨ

Ngành: Kỹ thuật ô tô

Mã ngành: 8520130

NGƯỜI HƯỚNG DẪN: TS. NGÔ DUY NAM

Thành phố Hồ Chí Minh, tháng 12 năm 2025

BỘ XÂY DỰNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

Số: 251212-19/QĐ-UTH-SĐH

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

TP. Hồ Chí Minh, ngày 12 tháng 12 năm 2025

QUYẾT ĐỊNH

Về việc thành lập Hội đồng đánh giá đề án tốt nghiệp thạc sĩ

HIỆU TRƯỞNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Quyết định số 66/2001/QĐ-TTg ngày 26/4/2001 của Thủ tướng Chính phủ về việc thành lập Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh;

Căn cứ Quy chế Tổ chức và hoạt động của Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh ban hành theo Nghị quyết số 14/NQ-HĐTĐHGTVT ngày 11/01/2021 của Hội đồng Trường;

Căn cứ Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ thạc sĩ ban hành kèm theo Quyết định số 33/QĐ-ĐHGTVT ngày 12/01/2022 của Hiệu trưởng Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh;

Căn cứ Quyết định số 250303-03/QĐ-UTH-SĐH ngày 03/3/2025 của Hiệu trưởng Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh về việc giao đề tài tốt nghiệp đối với các lớp chương trình đào tạo thạc sĩ;

Theo đề nghị của Viện trưởng Viện Đào tạo sau đại học.

QUYẾT ĐỊNH:

Điều 1. Thành lập Hội đồng đánh giá đề án tốt nghiệp thạc sĩ ngành Kỹ thuật ô tô (mã số 8520130) đối với học viên **Ngô Văn Thận** với đề tài: “Nghiên cứu mô phỏng ứng suất và biến dạng trên khung xe buýt điện khi va chạm trực diện”, người hướng dẫn: TS. Ngô Duy Nam, gồm các ông (bà) có tên sau:

1. TS. Lê Văn Vang	Trường ĐH GTVT TP.HCM	Chủ tịch Hội đồng;
2. PGS.TS. Đoàn Văn Đồng	Trường ĐH GTVT TP.HCM	Ủy viên, phản biện;
3. TS. Phạm Văn Chiến	Trường ĐH GTVT TP.HCM	Ủy viên, phản biện;
4. TS. Trương Thanh Hải	Trường ĐH GTVT TP.HCM	Ủy viên;
5. TS. Đinh Gia Huy	Trường ĐH GTVT TP.HCM	Ủy viên, thư ký.

Điều 2. Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký. Các ông (bà) Viện trưởng Viện Đào tạo sau đại học, Trưởng phòng Kế hoạch - Tài vụ và ông (bà) có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành Quyết định này./.

Nơi nhận:

- Như Điều 2;
- Hiệu trưởng (để b/c);
- Lưu: VT, VĐTSDH (Tú: 05b).

**KT. HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG**



NGUYỄN T.S. Lê Văn Vang

**ĐỀ ÁN TỐT NGHIỆP ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC GIAO THÔNG VẬN TẢI THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH**

Đại diện người hướng dẫn: TS. Ngô Duy Nam


Ngô Duy Nam

Đề án tốt nghiệp thạc sĩ được bảo vệ tại Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh ngày 20 tháng 12 năm 2025.

Thành phần Hội đồng đánh giá đề án tốt nghiệp thạc sĩ gồm:

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| 1. TS. Lê Văn Vang | Chủ tịch Hội đồng; |
| 2. PGS.TS. Đoàn Văn Đồng | Ủy viên, phản biện; |
| 3. TS. Phạm Văn Chiến | Ủy viên, phản biện; |
| 4. TS. Trương Thanh Hải | Ủy viên; |
| 5. TS. Đinh Gia Huy | Ủy viên, thư ký. |

CHỦ TỊCH HỘI ĐỒNG

TS. Lê Văn Vang

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan Đề án tốt nghiệp: “**Nghiên cứu mô phỏng ứng suất và biến dạng trên khung xe buýt điện khi va chạm trực diện**” là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn của TS. Ngô Duy Nam. Các số liệu, kết quả nêu trong Đề án tốt nghiệp là trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ công trình nào khác. Mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện Đề án tốt nghiệp này đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong Đề án tốt nghiệp đã được chỉ rõ nguồn gốc.

Tôi xin chịu trách nhiệm về đề **án** nghiên cứu của mình.

Hồ Chí Minh, **tháng 12** năm 2025

Học viên



Ngô Văn Thận

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập, nghiên cứu tại trường Đại học Giao thông Vận tải Thành phố Hồ Chí Minh, tôi đã được quý thầy cô hướng dẫn tận tình và nhà trường tạo điều kiện thuận lợi cho việc học tập, giúp tôi tiếp thu được nhiều kiến thức mới, bổ ích phục vụ công việc, nghiên cứu của tôi. Để hoàn thành đề án tốt nghiệp này, ngoài sự cố gắng của bản thân, tôi đã nhận được sự giúp đỡ và hỗ trợ quý báu từ nhiều cá nhân và tổ chức. Tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới:

TS. Ngô Duy Nam, người hướng dẫn khoa học, thầy đã tận tình chỉ bảo, định hướng nghiên cứu và cho tôi nhiều lời khuyên hữu ích trong suốt quá trình thực hiện đề án tốt nghiệp.

Ban lãnh đạo trường Đại học Giao thông Vận tải Thành phố Hồ Chí Minh đã tạo điều kiện thuận lợi cho tôi theo học ngành Kỹ thuật Ô tô chuyên ngành Kỹ thuật Ô tô.

Quý thầy cô tham gia giảng dạy lớp cao học CO2301 niên khóa 2023 – 2025 đã trang bị cho tôi nền tảng kiến thức vững chắc để thực hiện đề án này.

Gia đình, bạn bè đã luôn động viên, sẻ chia, hỗ trợ tôi trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu hoàn thành đề án.

Trong quá trình thực hiện đề án tôi có nhiều cố gắng, nhưng do hạn chế về kinh nghiệm nghiên cứu, kiến thức nên không tránh khỏi thiếu sót khi thực hiện đề án. Kính mong quý thầy cô và các bạn đọc góp ý để đề án được hoàn thiện hơn.

Xin trân trọng cảm ơn!

Hồ Chí Minh, tháng 12 năm 2025

Học viên



Ngô Văn Thận

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iv
DANH MỤC BẢNG.....	vii
DANH MỤC HÌNH ẢNH	viii
DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT	x
MỞ ĐẦU.....	1
1. Lý do chọn đề tài.....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu.....	2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu.....	3
4. Phương pháp nghiên cứu.....	3
5. Ý nghĩa thực tiễn của đề án.....	3
6. Bố cục của đề án tốt nghiệp	4
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ XE BUÝT ĐIỆN	5
1.1. Tổng quan về lĩnh vực nghiên cứu trước có liên quan.....	5
1.1.1. Nghiên cứu trong nước.....	5
1.1.2. Nghiên cứu ngoài nước	7
1.2. Giới thiệu chung về xe buýt điện	9
1.3. Tổng quan về khung gầm xe buýt điện	11
1.3.1. Khung sườn bên.....	12
1.3.2. Khung nóc xe.....	14
1.3.3. Khung sau/ khung đuôi xe buýt điện.....	14

1.3.4. Khung sàn gầm và giá chứa pin.	15
1.3.5. Khung trước – khung đầu xe buýt điện.	15
1.4. Tổng quan va chạm xe buýt điện.	15
1.5. Kết luận	16
CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU	17
2.1. Cơ sở lý thuyết về va chạm.	17
2.1.1. Khái niệm về va chạm.	17
2.1.2. Va chạm đàn hồi.....	18
2.1.3. Va chạm mềm.....	19
2.2. Động học và động lực học ô tô khi va chạm trực diện	21
2.2.1. Va chạm trực diện của ô tô vào vật cứng.	21
2.2.2. Va chạm của hai ô tô	22
2.3. Phương pháp phân tích ứng suất và biến dạng bằng phần mềm Ansys.....	23
2.3.1. Ứng suất trong phân tích va chạm động lực học	23
2.3.2. Biến dạng và hư hỏng.	24
2.3.3. Phương pháp phân tích ứng suất và biến dạng bằng phần mềm Ansys Dynamic.	24
2.3.4. Ưu điểm của phương pháp phân tích va chạm động lực học bằng Ansys	25
2.4. Kết luận	26
CHƯƠNG 3. MÔ PHỎNG ỨNG SUẤT VÀ BIẾN DẠNG KHUNG XE BUÝT ĐIỆN KHI VA CHẠM TRỰC DIỆN	27
3.1. Mô hình bài toán mô phỏng va chạm xe buýt điện.....	27
3.2. Thiết lập thông số và mô phỏng va chạm xe buýt điện	34
3.2.1. Chia lưới theo phương pháp phần tử hữu hạn cho mô hình mô phỏng....	34

3.2.2. Liên kết các bộ phận của khung xe buýt điện dùng mô phỏng.	43
3.2.3. Thiết lập vật liệu cho mô hình mô phỏng.....	45
3.2.4. Thiết lập điều kiện biên.	47
3.2.5. Cấu hình máy tính sử dụng trong mô phỏng.....	47
3.3. Phân tích kết quả mô phỏng.....	48
3.3.1. Ứng suất và phân bố lực tác động.....	48
3.3.2. Biến dạng tổng và khả năng hấp thụ năng lượng.....	49
3.3.3. So sánh mức độ hư hỏng giữa các vật liệu.....	56
3.3.4. Đánh giá mức độ an toàn và đề xuất cải tiến.....	60
3.4. Đề xuất giải pháp thiết kế khung xe buýt điện.....	60
KẾT LUẬN – KIẾN NGHỊ.....	63
1. Kết luận.....	63
2. Kiến nghị và hướng phát triển đề tài.....	64
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	66
PHỤ LỤC.....	69

DANH MỤC BẢNG

Bảng 1.1. Thành phần và chức năng của kết cấu bên hông xe buýt.....	13
Bảng 3.1. Bảng loại thép sử dụng khung xe buýt điện sử dụng mô phỏng trong đề án.....	28
Bảng 3.2. Thông số cơ bản của vật liệu sử dụng trong đề án.....	32
Bảng 3.3. Các trường hợp va chạm, vận tốc và gia tốc tương ứng trong mô phỏng.....	32
Bảng 3.4. Kích thước lưới được dùng để phân tích độc lập lưới cho mô hình	42
Bảng 3.5. Phân tích tính độc lập lưới.	43
Bảng 3.6. Giá trị ứng suất tối đa tại một số vị trí quan trọng của khung xe	49
Bảng 3.7. Bảng Phân bố biến dạng tổng của khung xe theo từng trường hợp va chạm	49
Bảng 3.8. Ứng suất và biến dạng tối đa của hai cấu trúc với tường cứng thép kết cấu và hợp kim nhôm 6061	56

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1. Kết cấu chung của xe buýt điện.....	10
Hình 1.2. Bố trí khung xương buýt điện.....	12
Hình 1.3. Kết cấu sườn phải xe buýt điện trong đề án	13
Hình 1.4. Kết cấu của khung nóc xe buýt điện.....	14
Hình 2.1. Mô hình va chạm đàn hồi của 2 vật.....	19
Hình 2.2. Mô hình va chạm mềm của 2 vật.....	20
Hình 2.3. Mô hình động lực học ô tô va chạm với vật cứng.....	21
Hình 2.4. Mô hình phân tích khung xe buýt điện trên phần mềm Ansys.....	25
Hình 3.1. Mô hình tổng thể khung xe buýt điện sử dụng trong đề án.....	27
Hình 3.2. Mô hình CAD của phần khung sàn xe buýt điện sử dụng để mô phỏng.....	29
Hình 3.3. Mô hình CAD phần khung đuôi và khung đầu xe buýt điện dùng mô phỏng. ..	30
Hình 3.4. Mô hình phần khung xương vách trái.	30
Hình 3.5. Bản vẽ 3D của phần khung mũi xe buýt điện sử dụng trong đề án.....	31
Hình 3.6. Mô hình va chạm tường cứng và va chạm xe khác trong mô phỏng.	33
Hình 3.7. Lưới phần tử hữu hạn của khung xe buýt điện được dùng để mô phỏng.....	34
Hình 3.8. Khung nóc được chia lưới và chất lượng lưới được chia.....	35
Hình 3.9. Chia lưới khung đầu và khung đuôi xe và chất lượng lưới được chia.	36
Hình 3.10. Lưới khung hông trái xe buýt điện dùng để mô phỏng	37
Hình 3.11. Mật độ lưới được thay đổi theo từng khu vực.....	38
Hình 3.12. Lưới phần tử hữu hạn toàn cục trong trường hợp xe va chạm xe khác.....	39
Hình 3.13. Lưới phần tử hữu hạn toàn cục trong trường hợp xe va chạm tường cứng.....	39
Hình 3.14. Bố trí cấu trúc các thành phần trong Ansys Workbench.....	40
Hình 3.15. Cửa sổ thiết lập kích thước lưới trong Ansys.....	41
Hình 3.16. Cửa sổ thiết lập kết quả phân tích trong mô phỏng.....	41
Hình 3.17. Thanh Parameter Set trong Workbench	42
Hình 3.18. Thiết lập liên kết giữa các bề mặt vật thể.....	44
Hình 3.19. Thiết lập body Interaction và các tham số liên quan.....	44

Hình 3.20. Kết quả sau khi tạo thư viện vật liệu VLBD trong Ansys.....	45
Hình 3.21. Thiết lập các thông số cho vật liệu thép C350.	46
Hình 3.22. Cửa sổ Model khi thiết lập vật liệu cho hông phải của xe	46
Hình 3.23. Cấu hình máy tính sử dụng trong mô phỏng	48
Hình 3.24. Biểu đồ phân bố ứng suất tổng của khung xe bằng thép trong trường hợp đang di chuyển với vận tốc 70km/h và chạm với tường cứng.	50
Hình 3.25. Biểu đồ phân bố ứng suất tổng của khung xe hợp kim nhôm trong trường hợp đang di chuyển với vận tốc 70km/h và chạm với tường cứng.	51
Hình 3.26. Biểu đồ phân bố ứng suất tổng của khung xe bằng thép trong trường hợp đang di chuyển với vận tốc 70km/h và chạm với xe đối diện.....	52
Hình 3.27. Biểu đồ phân bố ứng suất tổng của khung xe bằng hợp kim nhôm, trong trường hợp đang di chuyển với vận tốc 70km/h và chạm với xe đối diện.....	53
Hình 3.28. Biến dạng của khung xe bằng thép trong trường hợp chạm với xe đối diện....	54
Hình 3.29. Biến dạng của khung xe hợp kim nhôm trong trường hợp chạm với xe đối diện.	55
Hình 3.30. Biểu đồ cột so sánh biến dạng tối đa và mức hấp thụ năng lượng	57
Hình 3.31. Biểu đồ ứng suất theo thời gian.....	58
Hình 3.32. Biểu đồ mức hấp thụ năng lượng theo thời gian	60

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

TT	TỪ VIẾT TẮT	GIẢI NGHĨA
01	CAD	Computer-Aided Design/ Thiết kế có sự hỗ trợ của máy tính
02	CAE	Computer-Aided Engineering/ Kỹ thuật hỗ trợ bằng máy tính.
03	ECE	Economic Commission for Europe/ Ủy ban kinh tế Châu Âu
04	FEM	Finite Element Model/ Mô hình phần tử hữu hạn.
05	FFI	Front-Facing Impact/ Va chạm trực diện.
16	FOS	Factor of Safety/ Đánh giá hệ số an toàn.
07	HVAC	Heating – Ventilation – Air Conditioning/ Hệ thống sưởi – thông gió – điều hòa không khí.
08	LFP	Lithium Iron Phosphate/ Pin điện Lithium.
09	NMC	pin Nickel Manganese Cobalt.
10	RBF	Radial Basis Function/ Mô hình xấp xỉ và học máy
11	SPSS	Phần mềm Statistical Package for the Social Sciences.

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Hiện nay, việc bảo vệ môi trường và giảm thiểu khí thải nhà kính là những vấn đề toàn cầu đang được quan tâm sâu sắc. Ngành giao thông vận tải, đặc biệt là các phương tiện sử dụng nhiên liệu hóa thạch được cho là tác nhân chính gây ra tình trạng ô nhiễm môi trường và biến đổi khí hậu. Cần có những giải pháp để giảm thiểu ô nhiễm môi trường do phương tiện giao thông gây ra, nghiên cứu sử dụng phương tiện chạy điện để thay thế các phương tiện sử dụng nhiên liệu hóa thạch là một giải pháp tiềm năng giúp giải quyết những thách thức này, nhờ vào khả năng giảm thiểu lượng khí thải và tiếng ồn trong quá trình vận hành.

Tại các thành phố, xe buýt điện ngày trở lên phổ biến và thay thế dần cho các xe buýt truyền thống. Các nước trên thế giới đã có những bước chuyển biến mạnh mẽ trong việc sử dụng xe buýt điện. Theo Cơ quan năng lượng quốc tế tổng số xe buýt điện đang lưu hành trên thế giới vào năm 2023 là khoảng 63500 chiếc [1]. Cũng theo cơ quan này tính đến năm 2023 xe buýt năng lượng mới (chủ yếu là xe buýt điện) chiếm 81,2% tổng số xe buýt tại Trung Quốc, tương đương 554000 chiếc. Tại Châu Âu như Bỉ, Na Uy, Thụy Sĩ xe buýt điện đã đạt 50% [1], các nước như Hà Lan, Phần Lan, Iceland, Anh, Pháp, Đức cũng có nhiều chính sách thay thế xe buýt truyền thống bằng xe buýt điện, điều này được thể hiện qua doanh số bán xe buýt điện tại các quốc gia này vào năm 2024 đạt từ 44% đến 100% tùy vào mỗi nước [2]. Tại Mỹ mức tăng trưởng xe buýt điện đạt hơn 70% trong giai đoạn 2020 – 2024 [2].

Theo thống kê năm 2024, Việt Nam có khoảng 8800 xe buýt với 89% là xe buýt truyền thống (sử dụng diesel), 8% xe buýt chạy bằng khí thiên nhiên hóa lỏng/ khí thiên nhiên nén và 3% xe buýt điện, số xe buýt điện này chủ yếu tập trung ở Hà Nội (264 chiếc), Thành phố Hồ Chí Minh (19 chuyến xe buýt điện với 160 xe). Lộ trình thực hiện chuyển đổi và chính sách hỗ trợ chuyển đổi phương tiện vận tải hành khách công cộng bằng xe buýt sử dụng điện, năng lượng xanh trên địa bàn thành phố Hồ Chí Minh từ năm 2025, 100% xe buýt thay thế, đầu tư mới sử dụng điện, đến 2050, 100% xe buýt và xe tải sử dụng điện, năng

lượng xanh [3], [4]. Như vậy xe buýt điện là phương tiện công cộng đã và đang phát triển mạnh mẽ đáp ứng nhu cầu đi lại nhưng ít gây ô nhiễm môi trường. Nhu cầu tăng cao cũng đồng nghĩa các công ty tập trung nghiên cứu phát triển và sản xuất với mong muốn cải thiện hiệu quả cũng như đảm bảo an toàn khi vận hành. Một trong những bộ phận được quan tâm phát triển đó là khung xe buýt điện, khung xe buýt điện thường được cải tiến, phát triển từ khung xe buýt thông thường.

Trong quá trình thiết kế tính toán khung xe, ngoài tính toán và mô phỏng tĩnh, khung thân xe cần được mô phỏng động quá trình va chạm của xe. Va chạm của xe được xác định ở nhiều vị trí và chạm khác nhau như va chạm trực diện, va chạm sau, va chạm bên, va chạm nóc xe. Tại Việt Nam theo số liệu thống kê năm 2021 cho thấy tỉ lệ va chạm trực diện chiếm 40,5% [5][6]. Các nghiên cứu của Anh và Đức đều phát hiện ra rằng lần lượt khoảng 59% và 60% các vụ va chạm với xe ô tô chở khách là va chạm trực diện và 14% và 26% là va chạm bên hông [7]. Như vậy va chạm trực diện chiếm tỉ lệ cao, gây thiệt hại lớn cho người và phương tiện vì vậy cần tập trung nghiên cứu.

Với lý do nêu trên em chọn đề tài "**Nghiên cứu mô phỏng ứng suất và biến dạng trên khung xe buýt điện khi va chạm trực diện**". Đề án tập trung nghiên cứu và giải quyết vấn đề liên quan đến va chạm trực diện, cụ thể là ứng suất và biến dạng khung xe buýt điện khi va chạm, phục vụ thiết kế, tính toán kết cấu khung xe buýt điện. Ứng suất và biến dạng ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chịu đựng và hấp thụ năng lượng khi có tác động va chạm. Đây là một yếu tố quyết định đến sự an toàn của hành khách và an toàn cũng như độ bền của xe. Trong nghiên cứu này, các bố trí kết cấu khung sẽ được mô phỏng bằng phần mềm Ansys để phân tích ứng suất và biến dạng trên khung khi xảy ra va chạm trực diện qua đó đánh giá được độ bền, độ cứng của khung xe buýt điện.

2. Mục tiêu nghiên cứu.

- Xây dựng các bước trong mô phỏng ứng suất và biến dạng do va chạm đối với xe buýt điện 29 chỗ.
- Nêu các hướng cải tiến kết cấu khung cho xe buýt điện 29 chỗ.
- Ứng dụng phần mềm ANSYS mô phỏng và phân tích được ứng suất và biến dạng khi va chạm trực diện của khung xe buýt điện 29 chỗ.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1 Đối tượng nghiên cứu

- Đối tượng chính nghiên cứu là kết cấu khung của xe buýt điện 29 chỗ, vận hành trong điều kiện giao thông đô thị ở Việt Nam.

3.2 Phạm vi nghiên cứu

- Phạm vi nghiên cứu được giới hạn thực hiện trên xe buýt điện 29 chỗ, va chạm trực diện với gia tốc khác nhau ở 2 trường hợp: va chạm với vật cứng tuyệt đối (tường cứng) và va chạm mềm (trực diện với xe khác). Như vậy đề tài tập trung mô phỏng và phân tích đánh giá ứng suất và độ bền biến dạng của toàn bộ khung xương xe. Kết quả nghiên cứu đề xuất được **hướng cải tiến** cho khung xe buýt điện 29 chỗ.

4. Phương pháp nghiên cứu

- Tổng hợp, phân tích số liệu lựa chọn thông số hợp lý cho kết cấu khung xe buýt điện với các phương án cấu trúc phù hợp nhằm cải thiện độ bền và giảm thiểu trọng lượng. Để đảm bảo sự khách quan trong so sánh, tất cả các phương án thiết kế đều được chuẩn hóa về trọng lượng.

- Phương pháp mô phỏng được thực hiện để mô phỏng va chạm khung xe buýt điện bằng cách sử dụng phần mềm Ansys qua đó đánh giá được ứng suất và biến dạng của khung xương xe khi va chạm trực diện phía trước.

5. Ý nghĩa thực tiễn của đề án

- Ý nghĩa về khoa học.

+ Tổng hợp và trình bày lý thuyết về va chạm đảm bảo cơ sở khoa học, nội dung hợp lý, giúp người nghiên cứu sau có thể sử dụng làm tài liệu tham khảo cho các nghiên cứu về va chạm ô tô.

- Ý nghĩa thực tiễn của **đề án** tốt nghiệp:

+ Mô hình nghiên cứu có thể áp dụng có các bài toán va chạm xe buýt khác trong giai đoạn thiết kế.

+ Kết quả nghiên cứu có thể làm cơ sở so sánh với kết quả thực nghiệm trong nghiên cứu về xe buýt điện sau này.

+ Hướng nghiên cứu trong **đề án** tốt nghiệp có thể phối hợp với các trung tâm nghiên

cứu và kiểm nghiệm xe điện.

6. Bố cục của đề án tốt nghiệp

Bố cục của đề án “Nghiên cứu mô phỏng ứng suất và biến dạng trên khung xe buýt điện khi va chạm trực diện” bao gồm các phần sau:

MỞ ĐẦU

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ XE BUÝT ĐIỆN

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

CHƯƠNG 3. MÔ PHỎNG ỨNG SUẤT VÀ BIẾN DẠNG KHUNG XE BUÝT

ĐIỆN KHI VA CHẠM TRỰC DIỆN

KẾT LUẬN – KIẾN NGHỊ

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ XE BUÝT ĐIỆN

1.1. Tổng quan về lĩnh vực nghiên cứu trước có liên quan.

Nghiên cứu và chạm các phương tiện giao thông là một trong những vấn đề cần được quan tâm vì nó không chỉ liên quan đến an toàn cho phương tiện mà còn liên quan đến sức khỏe, tính mạng của người tham gia giao thông, nhiều công trình nghiên cứu về va chạm của các phương tiện giao thông, đặc biệt các phương tiện giao thông công cộng như xe buýt được công bố. Dưới đây là tổng hợp các đề tài nghiên cứu liên quan đến va chạm ô tô trong nước và nước ngoài đã công bố mà học viên đã đọc và tìm hiểu.

1.1.1. Nghiên cứu trong nước.

Nguyễn Văn Sỹ và cộng sự, Sự va chạm và hấp thụ động năng của phần trước khung xương ô tô khách trước động lực học va đập[8]. Nghiên cứu mô phỏng bằng phần tử hữu hạn về hấp thụ và va chạm phần trước của khung ô tô khách. Kết quả thu được giảm 50% lực đỉnh khi sử dụng ống nhôm hình nón đa ống, tổng động năng hấp thụ cũng tăng cao, vì vậy khả năng chịu đựng va chạm của khung trước ô tô khách được cải thiện đáng kể.

Nguyễn Thành Tâm, Thiết kế tối ưu kết cấu khung xương và sát xi ô tô khách [9]. Tác giả đã sử dụng phương pháp thiết kế trực giao để thiết kế thực nghiệm, mô phỏng phân tích trạng thái tĩnh kết cấu ô tô khách, nghiên cứu sử dụng phần mềm SPSS và MATLAB tiến hành phân tích kết quả mô phỏng, xây dựng hàm số hồi quy và tiến hành tối ưu hóa các biến lượng thiết kế. Kết quả cho thấy, ứng suất và biến dạng kết cấu thỏa mãn được yêu cầu điều kiện bền, trọng lượng kết cấu khung xương và sát-xi sau khi tối ưu hóa giảm 11.4% so với kết cấu ban đầu, thực hiện được nhẹ hóa trọng lượng ô tô khách.

Tào Quang Bằng và Đặng Minh Hải, Tối ưu hóa độ bền của khung xe buýt B45 bằng phương pháp phần tử hữu hạn [10]. Nghiên cứu tối ưu hóa quá trình thiết kế và sản xuất, cung cấp giải pháp toàn diện nhất mở ra giải pháp CAE trong nền công nghiệp bằng cách ứng dụng các phần mềm phần tử hữu hạn, bao gồm cả mô phỏng, phân tích, quản lý dữ liệu, tối ưu hoá cấu trúc, đảm bảo độ bền, mang lại giá trị kinh tế cho nhà sản xuất cũng như người tiêu dùng. Tính toán tối ưu hóa độ bền khung xe buýt B45 bằng phần mềm HyperWorks góp phần nâng cao độ bền, tuổi thọ, tiết kiệm vật liệu mà vẫn đảm bảo chất

lượng, sự an toàn của xe buýt.

Nguyễn Thành Tâm, Tối ưu hóa thiết kế kết cấu ô tô khách thỏa mãn tính an toàn va chạm trực diện [11]. Nghiên cứu đề cập đến việc xây dựng mô hình và mô phỏng phân tích tính năng an toàn kết cấu đầu ô tô khách khi xảy ra va chạm trực diện. Tác giả đã tiến hành thiết kế tối ưu kết cấu đầu ô tô khách dựa vào mô hình phân tích phần tử hữu hạn. Sử dụng phương pháp thiết kế trực giao tiến hành thiết kế thực nghiệm mô phỏng phân tích kết cấu ô tô khách cho các biến lượng thiết kế độ dày kết cấu đầu ô tô khách, ứng dụng phần mềm SPSS tiến hành phân tích hồi quy kết quả mô phỏng và xây dựng hàm số hồi quy, dùng phần mềm MATLAB tiến hành tối ưu hóa các biến lượng thiết kế. Kết quả thu được: gia tốc va chạm và không gian an toàn được đảm bảo, trọng lượng kết cấu đầu xe sau khi tối ưu hóa giảm 7.9% so với kết cấu ban đầu.

Nguyễn Thanh Quang và cộng sự, Ứng dụng Grabcad mô phỏng va chạm ô tô [12]. Tác giả ứng dụng Grabcad kết hợp sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn và phần mềm Ansys Workbench mô phỏng va chạm ô tô con ở những vận tốc khác nhau. Nghiên cứu đã phân tích ứng suất, biến dạng trên thân xe khi xe chạy ở vận tốc khác nhau cùng với phân tích tần số lực va chạm lên vỏ xe. Kết quả nghiên cứu đã lựa chọn kết cấu vỏ xe, sử dụng vật liệu tổng hợp giảm biến dạng của vỏ xe.

Phan Minh Đức và Lê Công Tín, ứng dụng phần mềm hyperworks tối ưu hóa thân xe buýt thaco city B60 [13]. Quy trình thiết kế ứng dụng CAE vào tối ưu hóa, phân tích độ bền kết cấu trong các trường hợp chịu tải thông thường của ô tô buýt để thực hiện thiết kế mới thân xe buýt Thaco City B60 đã được trình bày trong bài báo. Để mô phỏng độ bền và chuyển vị kết cấu thân xe, với phương pháp bù quán tính, 8 chế độ tải trọng khi ô tô chở số người định mức (60 người) được thiết lập bằng phần mềm HyperWorks. Kết cấu thân xe được tối ưu trên quan điểm giảm khối lượng, với các điều kiện ràng buộc về vật liệu sử dụng và thực tế công nghệ hiện nay của Thaco. Kết quả nghiên cứu giúp giảm chi phí thử nghiệm của nhà máy và giảm tiềm ẩn khiếm khuyết của sản phẩm, khẳng định độ tin cậy của sản phẩm, góp phần giảm giá thành sản phẩm.

Nguyễn Thanh Quang, Mô phỏng phân tích độ bền khung vỏ ô tô khách khi lật ngang [14]. Nghiên cứu trình bày về mô phỏng phân tích độ bền khung vỏ ô tô khách khi lật ngang

theo tiêu chuẩn châu Âu AIS 031/ECE R66 bằng phần mềm Ansys Worrkbench. Kết quả đã kiểm tra sự biến dạng thân vỏ khi lật ngang vuông góc. Mức độ biến dạng khung vỏ xe được xác định bởi các thông số khoảng cách từ trọng tâm xe đến đường trục dọc của xe, giá trị chuyển vị, biến dạng tương đương, ứng suất và gia tốc va chạm. Ứng suất biến dạng được so sánh theo tiêu chí ứng suất cho phép của vật liệu làm thân xe.

Nguyễn Phụ Thượng Lưu, Phân tích hiệu suất cấu trúc của xe buýt trong va chạm toàn phần phía trước[15]. Bài báo trình bày một phân tích về hiệu suất kết cấu của xe buýt trong trường hợp va chạm trực diện hoàn toàn (FFI), dựa trên mô hình mô phỏng va chạm trên máy tính. Mô hình xe được sử dụng để mô phỏng FFI theo điều kiện thử nghiệm FFI thực tế. Kết quả phân tích va chạm sử dụng mô hình phần hữu hạn cho thấy sự biến dạng nghiêm trọng nhất xảy ra ở khung trước của cấu trúc xe buýt. Khung xe buýt đã bị uốn cong trong mô phỏng khả năng chống va chạm. Năng lượng hấp thụ của cấu trúc xe buýt cần được cải thiện bằng cách tối ưu hóa khung và chassis.

1.1.2. Nghiên cứu ngoài nước

Sagar S cùng các cộng sự nghiên cứu thiết kế cấu trúc thân xe buýt bằng phân tích tĩnh [16]. Phân tích tĩnh được thực hiện cho thân xe buýt được làm từ Titanium, Nhôm và EGlass (Vật liệu Composites) đã được phân tích tĩnh để xác định ứng suất tương đương và độ biến dạng khi tính đến trọng lượng riêng của các vật liệu với nhiều điều kiện biên và tải trọng khác nhau. Kết quả từ báo cáo cho thấy vật liệu EGlass được cho là vật liệu tốt hơn so với các vật liệu khác, cùng với đó trọng lượng riêng của EGlass đã được xem xét để tối ưu hóa một thân xe buýt có thể tăng cường tuổi thọ và hiệu suất của khung thân xe.

Toshiaki Sakurai và Takanobu Suzuki, với Nghiên cứu khả năng chống va chạm của xe buýt điện[17] đã mô tả khả năng chịu va chạm của xe điện khi xe có sự thay đổi từ động cơ xăng sang động cơ điện. Kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng chịu va chạm phụ thuộc vào chiều dài có thể bị biến dạng của khung xe và trọng tâm, việc chuyển đổi trọng tâm sẽ có bất lợi trong một vụ va chạm.

C. Sai Kiran, Thiết kế và phân tích va chạm của một chiếc ô tô sử dụng Ansys Workbench [18]. Nghiên cứu đề cập đến việc thiết kế và phân tích một khung xe với vật liệu nhôm được thiết kế bằng Solidworks. Phân tích va chạm phía trước của xe với một ô

tô khác ở vận tốc ban đầu 10 m/s và ô tô với tường với vận tốc ban đầu 15 m/s bằng phần mềm Ansys. Kết quả phân tích độ biến dạng tối đa trong các cấu trúc ô tô khi va chạm với ô tô và tường nằm trong giới hạn cho phép. Do đó, cấu trúc ô tô đã được mô hình hóa là an toàn cho hành khách khi di chuyển trong trường hợp xảy ra tai nạn ô tô.

Wuhua Jiang và cộng sự với nghiên cứu thiết kế tối ưu cho thân xe buýt điện bằng thép và hợp kim nhôm dựa trên mô hình RBF và thuật toán di truyền [19]. Mục đích của nghiên cứu nhằm giảm trọng lượng cho thân xe buýt điện, mô hình phần tử hữu hạn của thân xe được xác thực thông qua thực nghiệm. Kết quả cho thấy, so với thân xe hoàn toàn bằng thép truyền thống, việc sử dụng cấu trúc khung dưới hợp kim nhôm có thể giảm khối lượng thân xe đến 38,4%, và phương pháp tối ưu hóa được đề xuất có thể giảm khối lượng của thân xe thép-nhôm xuống 4,28% mà không ảnh hưởng đến độ cứng và hiệu suất chịu lực của thân xe.

Agenor Dias de Meira Jr và cộng sự, Đánh giá các kịch bản va chạm trực tiếp và bán trực tiếp thông qua phân tích số học của cấu trúc xe buýt [20]. Nghiên cứu sử dụng mô hình số của xe buýt đã được xây dựng với dầm đàn hồi - dẻo được thực hiện bằng Ls-Dyna với nhiều tình huống va chạm từ phía trước và bên phía trước khác nhau trên các con đường cao tốc của Brazil. Kết quả của nghiên cứu cho thấy một mô hình đơn giản được tạo ra với các khối lượng tập trung và các lò xo phi tuyến kết nối theo chuỗi, và mô hình dầm đàn hồi - dẻo. Các so sánh khác nhau được thực hiện cho phép xác thực mô hình xe buýt được tạo ra bằng cách sử dụng các phần tử dầm đàn hồi - dẻo và đề xuất sử dụng mô hình này như một công cụ hiệu quả để tìm kiếm các cấu hình, cấu trúc xe buýt hiệu quả hơn chống lại các tình huống va chạm.

S. Elhussieny và cộng sự, Tối ưu hóa động lực va chạm cho cấu trúc buồng lái xe buýt dựa trên sự xâm nhập và giảm tốc đạt được trong một vụ va chạm phía trước[21]. Nghiên cứu đánh giá cấu trúc xe buýt trong trường hợp va chạm trực diện. Mô phỏng bằng Ansys/dynamics được sử dụng để lập mô hình phần tử hữu hạn (FE) của cấu trúc phía trước của xe buýt. Mô phỏng đã nghiên cứu cả sự biến dạng phía trước và sự giảm tốc được tạo ra ở hai tốc độ va chạm khác nhau. MATLAB/Simulink đã được xây dựng để ước lượng các tham số thiết kế cho các khu vực được đề xuất. Các thử nghiệm thực nghiệm đã được

tiến hành trên bốn mẫu khác nhau. Kết quả mô phỏng kết luận rằng cả độ giảm tốc và biến dạng đều vượt khỏi giới hạn an toàn cho hành khách. Đề xuất nên tăng chiều dài khu vực phía trước.

Vincze-pap Sándor và Csiszár András, Thử nghiệm khả năng chịu đựng va chạm thực tế và mô phỏng trên xe buýt [22]. Nghiên cứu va chạm ở đầu xe buýt và khảo sát các điều kiện và kết quả của các thử nghiệm va chạm toàn phần trước đây, so sánh các kết quả mô phỏng FEM được thực hiện trên xe buýt Ikarus của Hungary. Bài báo cho thấy các sắp xếp thử nghiệm va chạm ở đầu xe của một chiếc xe buýt nặng 10 tấn với ba tốc độ va chạm khác nhau và các phiên bản mô phỏng máy tính của các thử nghiệm thực tế.

Zhuo Yang và cộng sự, Nghiên cứu, phân tích phần tử hữu hạn của khung xe buýt điện cho thiết kế nhẹ [23]. Nghiên cứu đã tối ưu hóa nhẹ khung xe buýt điện bằng cách sử dụng phương pháp phân tích phần tử hữu hạn. Bốn điều kiện lái xe (tình trạng uốn tải đầy, tình trạng xoắn, phanh khẩn cấp và lái xe khẩn cấp) đã được xem xét trong phân tích. Kết quả nghiên cứu cho thấy trọng lượng của xe buýt giảm trong khi các tính chất cơ học được cải thiện dưới các điều kiện lái xe đã áp dụng khi thay đổi cấu trúc của khung xe buýt.

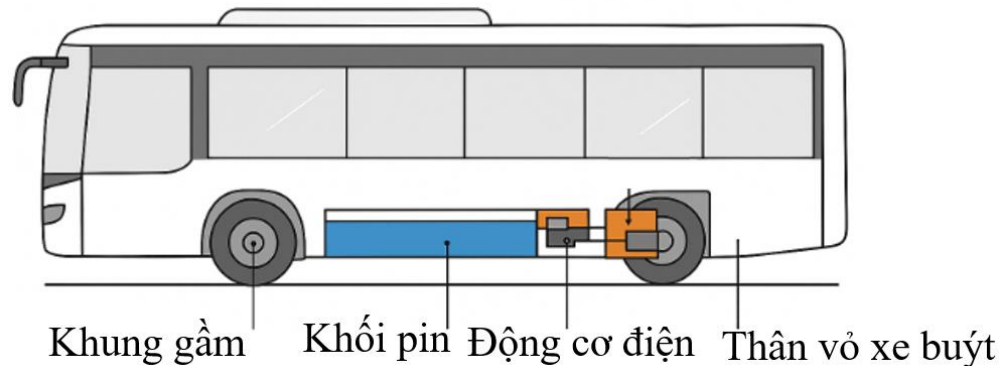
1.2. Giới thiệu chung về xe buýt điện

Xe buýt điện là loại xe buýt sử dụng điện năng để hoạt động nhằm giảm phụ thuộc vào nguồn nhiên liệu hóa thạch truyền thống như diesel, khí thiên nhiên hóa lỏng đang ngày càng cạn kiệt đồng thời giảm thiểu ô nhiễm môi trường. Theo nguồn động lực xe buýt điện được chia làm 3 loại: loại thứ nhất là xe buýt lai điện (Diesel hybrid bus) là loại xe buýt sử dụng kết hợp động cơ Diesel và động cơ điện; loại thứ hai là xe buýt điện dạng pin nhiên liệu (Hydrogen fuel cell hybrid bus), loại thứ 3 là xe buýt sử dụng thuần điện (Battery electric bus). Hai loại đầu ít được sử dụng hơn do cấu tạo phức tạp, giá thành cao, loại xe buýt thuần điện là loại được sử dụng chính yếu, hiện nay, khi đề cập đến xe buýt điện mà không có giải thích thêm thì đề cập đó được hiểu là đề cập xe buýt thuần điện.

Điểm mạnh của xe buýt điện so với xe buýt truyền thống bao gồm ít gây ô nhiễm môi trường do không trực tiếp phát thải ra môi trường khi vận hành, động cơ điện thường có hiệu suất cao trên 85% so với động cơ đốt trong khoảng 26% [24], [25] vì vậy xe điện cũng có hiệu suất tốt hơn, và chi phí vận hành thấp hơn. Tuy nhiên, một số thách thức vẫn còn

đối với xe buýt điện bao gồm giới hạn của công nghệ pin như khối lượng của pin còn lớn làm khối lượng của xe buýt điện lớn hơn nhiều so với xe buýt truyền thống, dung lượng của pin còn hạn chế nên quãng đường xe đi được sau 1 lần sạc đầy còn ngắn (Ví dụ xe buýt điện VinBus của Vinfast đang vận hành tại Việt Nam một lần sạc đầy xe di chuyển được quãng đường 220 – 260 Km trong điều kiện lý tưởng), thời gian sạc và cơ sở hạ tầng sạc chưa phát triển đầy đủ.

Cấu trúc chung của xe buýt thuần điện - loại xe buýt điện được sử dụng phổ biến hiện nay và cũng là đối tượng nghiên cứu của đề án. Xe buýt điện là loại xe buýt được phát triển từ xe buýt truyền thống, do đó kết cấu của nó được kế thừa và phát triển từ kết cấu của xe buýt truyền thống. Hệ thống năng lượng và truyền động điện có sự thay đổi lớn, hệ thống khung gầm và thân vỏ xe có sự thay đổi về kết cấu và tăng độ **bền** để chứa đựng khối pin rất lớn. **Các** hệ thống khác như lái, treo, điện thân xe không có nhiều thay đổi.



Hình 1.1. Kết cấu chung của xe buýt điện

Hệ thống năng lượng và hệ thống truyền động điện. Khối pin điện là bộ phận tích trữ và cung cấp năng lượng cho toàn bộ hoạt động của xe. Hiện nay loại pin dùng **phổ** biến nhất là pin Lithium - ion dung lượng lớn như: pin Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4) - LFP; pin Nickel Manganese Cobalt (LiNiMnCoO_2) - NMC và pin thể rắn được **đánh** giá có mật độ năng lượng cao và an toàn hơn cũng đang được nghiên cứu đưa vào ứng dụng. Khối lượng Pin phụ thuộc vào mật độ năng lượng của pin, pin LFP có mật độ năng lượng 120 – 160 Wh/Kg, pin NMC có mật độ khoảng 200 đến 250Wh/Kg[26]. Nếu tính cả khối lượng của khung, dây dẫn, làm mát, mật độ năng lượng của Pin giảm khoảng 30 – 40%. Hiện nay,

dung lượng pin xe buýt điện đô thị khoảng 200 đến 350 kWh, xe buýt cỡ lớn 350 đến 500 kWh. Khối lượng pin ước tính với xe buýt điện được xác định theo công thức:

$$\text{Khối lượng pin (kg)} = \frac{\text{Dung lượng (Wh)}}{\text{Mật độ năng lượng } \left(\frac{\text{Wh}}{\text{kg}}\right)}$$

độ năng lượng thực tế của khối pin 100 đến 110Wh/kg với dung lượng 281kWh thì khối lượng khối pin khoảng 2.550 đến 2.800kg, khối lượng rất lớn này ảnh hưởng rất nhiều đến việc tính toán kết cấu, độ bền của khung xe.

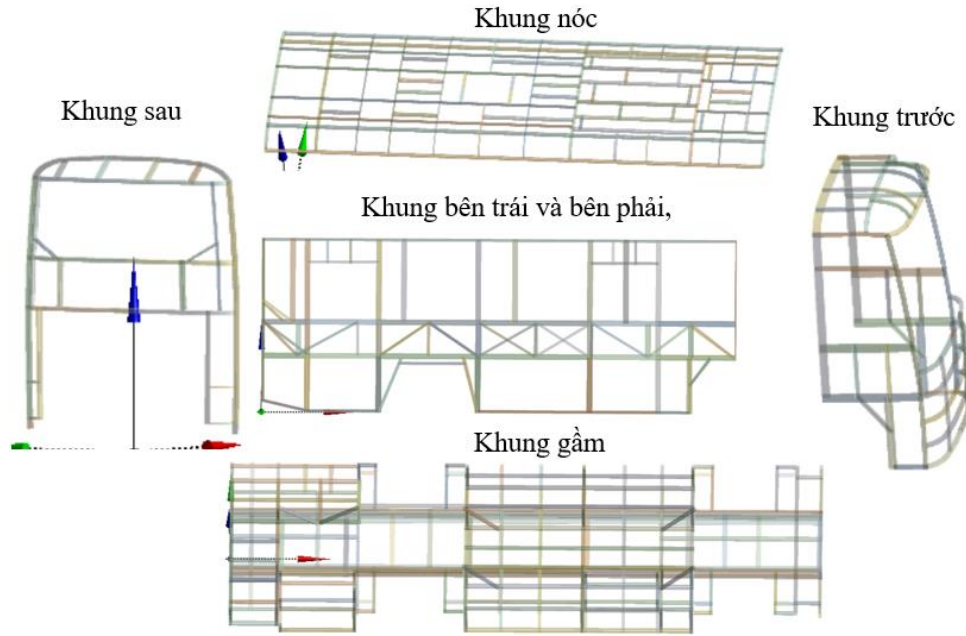
Động cơ điện trên xe buýt điện được lắp đặt ở giữa xe còn gọi là kiểu lắp đặt động cơ trung tâm hoặc được tích hợp trong bánh xe. Loại động cơ điện sử dụng trên xe buýt điện là động cơ đồng bộ man châm vĩnh cửu, động cơ cảm ứng xoay chiều hoặc động cơ từ trở với công suất từ 150 đến 300kW, Mô men xoắn cực đại đạt 2.500 – 4.000Nm cao hơn nhiều so với động cơ diesel, hiệu suất động cơ điện cũng vượt trội 85 – 95% so với động cơ đốt trong giới hạn trong khoảng 25 – 40%[24].

1.3. Tổng quan về khung gầm xe buýt điện

Khung thân xe buýt điện được sử dụng cùng loại với xe buýt truyền thống và phải đảm bảo tuân thủ các tiêu chuẩn kỹ thuật như đối với xe buýt thông thường.

Buýt điện hiện nay thường sử dụng cấu trúc thân liền khung thay vì cấu trúc thân trên khung, vì vậy trong nội dung của đề án chỉ đề cập đến kết cấu khung gầm xe buýt điện loại này.

Cấu trúc thân liền khung trên xe buýt điện là một giải pháp thiết kế hiện đại, tối ưu cho cả khối lượng, độ cứng vững và an toàn va chạm, đồng thời phù hợp với đặc tính bố trí pin và hệ truyền động điện. Đây là kiểu thiết kế trong đó khung chịu lực và vỏ xe được tích hợp thành một khối thống nhất, thay vì khung gầm riêng như xe buýt truyền thống chạy động cơ diesel. Lực tác dụng từ tải trọng, hành khách và hệ truyền động được phân bố đều trên thân xe.



Hình 1.2. Bố trí khung xương buýt điện.

Thân xe buýt điện kiểu thân liền khung sử dụng các thép ống hình chữ nhật được hàn lại với nhau do đó tạo thành một kết cấu không gian cứng vững, đảm bảo chịu tải tốt, độ bền và độ cứng xoắn cao. Nhờ kết cấu này, độ cứng tổng thể xe tăng, phân bố lực tốt hơn, sàn xe được hạ thấp, tăng không gian bên trong xe, tăng không gian chứa đựng pin và giảm đáng kể trọng lượng của khung xe, theo báo cáo Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles của tác giả Gao và Ehsani công bố 2020, thân liền khung có khối lượng giảm 10% đến 20% so với kết cấu khung rời truyền thống. Việc giảm khối lượng khung vỏ xe có ý nghĩa rất quan trọng với xe buýt điện trong việc tối ưu hóa quãng đường đi được của xe buýt trong 1 lần sạc. Kiểu thân liền khung trên xe buýt điện được chia thành các khối như sau: khung trước, khung sau, khung sườn bên trái và bên phải, khung nóc và khung gầm như được trình bày trong hình 1.2.

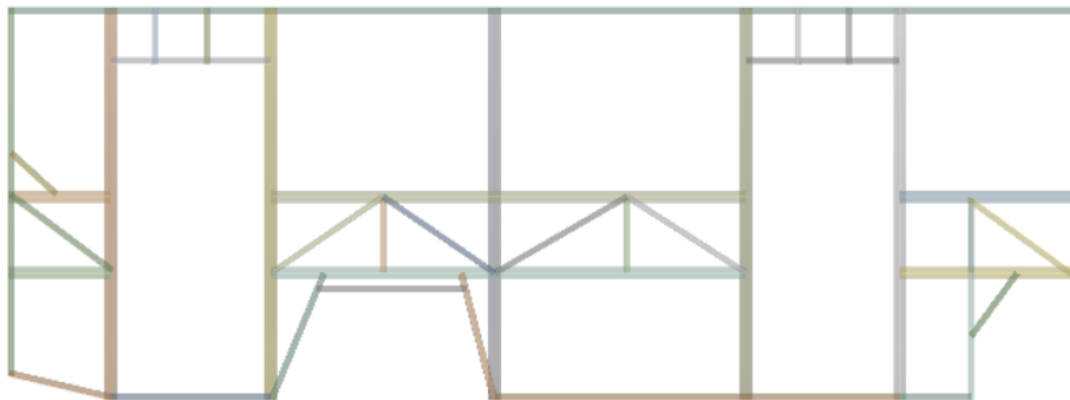
1.3.1. Khung sườn bên.

Khung sườn bên trong kết cấu thân liền khung bao gồm khung sườn bên trái và khung sườn bên phải và được kết cấu bởi các cột đứng kết hợp với thanh ngang và thanh giằng tạo sự vững chắc cho thành xe cũng như khu vực cửa và cửa sổ của xe. Khung hông vừa là vách ngăn bên vừa là kết cấu chịu lực chính, thay thế phần lớn chức năng của khung sườn

truyền thống. Khung sườn của xe buýt điện thường được làm bằng thép hợp kim cường độ cao, phổ biến nhất với độ bền kéo 350 đến 600Mpa, việc làm bằng thép hợp kim cường độ cao giúp giảm khối lượng của khung khoảng 10 – 15% [27] so với thép Cacbon. Hiện nay để giảm thiểu khối lượng khung hông xe buýt điện hiện đại đã bắt đầu sử dụng hợp kim nhôm thay thế cho thép, với loại vật liệu này khung sườn xe có thể giảm khối lượng tới 30 – 40% [28] so với khung thép. Kết cấu khung hông cần kết hợp với phần khung nóc, khung sàn tạo ra nhiều vòng chịu tải cứng quanh ca bin hành khách, tối đa hóa sự an toàn cho hành khách trong trường hợp có tai nạn, xe bị lật.

Bảng 1.1. Thành phần và chức năng của kết cấu bên hông xe buýt

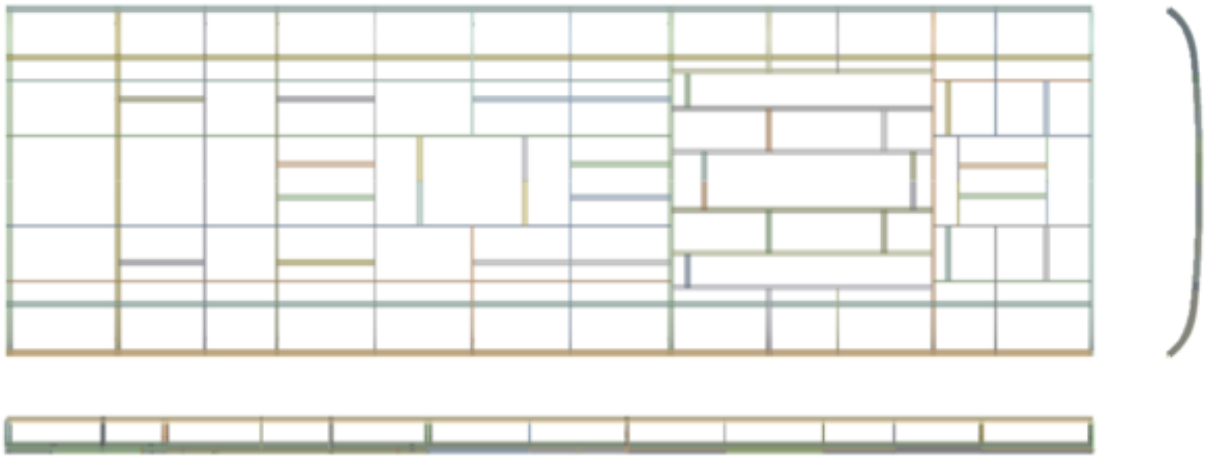
Thành phần	Chức năng chính
Cột đứng A, B, C, D	Chịu tải trọng dọc và va đập bên; là điểm liên kết giữa khung mái, khung sàn và khung cửa kính.
Thanh giằng ngang	Tăng độ cứng xoắn và liên kết các cột đứng, đồng thời là giá đỡ cho khung cửa sổ và tấm ốp hông.
Tấm ốp hông	Phân bố ứng suất đều trên bề mặt; có thể làm bằng thép cường độ cao, hợp kim nhôm, hoặc vật liệu composite.
Khung cửa ra/vào và cửa sổ	Gia cường thêm phần giữa của hông xe; thường được bo viền bằng thép hợp hoặc nhôm định hình.



Hình 1.3. Kết cấu sườn phải xe buýt điện trong đề án

1.3.2. Khung nóc xe.

Theo tiêu chuẩn ECE R66 - quy định về độ bền của cấu trúc xe buýt khi lật, khung nóc xe buýt phải chịu được tải trọng tập trung $1,5 - 2 \text{ kN/m}^2$ khi xảy ra lật xe. Đối với xe buýt điện khung nóc xe thường được lắp đặt pin hoặc hệ thống HVAC, nên khối lượng của khung mái thường tăng $10 - 15 \%$ so với xe buýt thông thường cùng kích cỡ và cùng loại vật liệu được thiết kế. Để giảm nhẹ khối lượng của khung nóc so với tổng khối lượng khung thân xe, khung nóc xe buýt điện hiện nay thường ứng dụng làm bằng hợp kim nhôm đúc ép hoặc vật liệu composite, khi sử dụng những vật liệu này khối lượng khung nóc xe được duy trì bằng hoặc thấp hơn 10 đến 15% so với khối lượng toàn bộ khung thân xe. Ngoài ra để tăng khả năng cứng vững, tăng khả năng chịu lực khung nóc xe buýt điện có kết cấu dạng vòm.



Hình 1.4. Kết cấu của khung nóc xe buýt điện

1.3.3. Khung sau/ khung đuôi xe buýt điện.

Khung đuôi của buýt điện là khu vực được lắp bộ điều khiển công suất, Inverter, pin phụ, trên một số xe động cơ điện cũng được lắp đặt tại đây. Tai nạn xảy ra ở phần đuôi xe cũng tương đối phổ biến, tại Việt Nam năm 2019 có $34,4\%$ tai nạn xe buýt liên quan đuôi xe [6]. Vì vậy phần đuôi xe cũng cần được tính toán và tăng cường độ cứng vững để đảm bảo đủ bền và đủ an toàn cho hành khách và các bộ phận của xe. Kết cấu điển hình của khung đuôi xe thường gồm 3 phần: Dầm dọc đuôi xe, dầm ngang đuôi xe và khung bao khoang thiết bị điện.

1.3.4. Khung sàn gầm và giá chứa pin.

Xe buýt điện hiện nay thường sử dụng kết cấu khung liền thân, với thiết kế này toàn bộ khung sàn gầm và khung chứa pin được hàn thành một khối thống nhất cố định. Khoang chứa pin thường được thiết kế nằm giữa 2 trục với kết cấu phẳng, dầm ngang được tăng mật độ, tăng độ cứng để có thể chứa khối pin xe dao động khoảng 800 – 1500 Kg. Thép được sử dụng thường là thép SPA -H, S355, Hoặc Q235B. Với xe buýt điện 12 m, yêu cầu độ cứng xoắn đạt 28 /40 KN/m, độ võng sàn nhỏ hơn 8 mm.

1.3.5. Khung trước – khung đầu xe buýt điện.

Tai nạn phía đầu xe là tai nạn xảy ra với tần suất cao nhất chiếm khoảng 40 đến 60% trong các vụ tai nạn so với các khu vực khác của xe[5], [6]. Do đó phần đầu xe cần được thiết kế để vừa chịu được tải trọng va đập vừa tạo ra vùng hấp thụ xung lực bảo vệ khoang lái. Theo tiêu chuẩn ECE R29 tiêu chuẩn quan trọng nhất cho khung đầu xe buýt là khung trước phải chịu được tải nén dọc 150 đến 300 KN mà vùng bảo vệ tài xế không bị xâm nhập. Để đảm bảo chống lật, khung trước phải đảm bảo chịu được nén và chịu xoắn, biến dạng mác đồng thời phần dầm trước phải truyền lực vào sàn mà không bị gãy.

1.4. Tổng quan va chạm xe buýt điện.

Do cấu trúc thân xe buýt điện cần đảm bảo bền để có thể chứa pin nặng, trọng tâm thay đổi, khung thân nhẹ kết hợp thép-nhôm. Nhiều nghiên cứu đã được tiến hành để đánh giá, mô phỏng và tối ưu cấu trúc nhằm đảm bảo vừa nhẹ, vừa chịu được va chạm. Các nghiên cứu về va chạm đặc biệt là va chạm xe buýt điện thường theo **hướng**:

- Phân tích cấu trúc khung thân và độ cứng tổng thể để đảm bảo an toàn trong va chạm và an toàn khi lật xe.
- Mô phỏng va chạm phía trước, va chạm bên hông, va chạm phía sau để đánh giá xâm nhập ca bin, phân tích đánh giá năng lượng hấp thụ và bảo vệ hành khách cũng như an toàn kết cấu của xe.
- Tối ưu hóa thiết kế để tiết kiệm trong sản xuất mà vẫn đảm bảo an toàn.
- Nghiên cứu vật liệu mới trong thiết kế thân xe như vật liệu composite, hợp kim nhôm kết hợp thép hợp kim với mục đích giảm tải trọng của khung đồng thời đảm bảo an toàn, đặc biệt đảm **bảo** bền của khung xe khi va chạm.

– Một hướng nghiên cứu khác cũng đang được tập trung nghiên cứu là đánh giá an toàn tổng thể toàn bộ xe, bao gồm an toàn Pin, an toàn hệ thống điện cao áp, bảo vệ cháy khi có va chạm.

Kết quả các nghiên cứu và va chạm mạng lại nhiều ý nghĩa khoa học cũng như thực tiễn sản xuất như:

– Cải thiện rất nhiều an toàn trong va chạm, kiểm soát biến dạng, giảm xâm nhập cabin xe.

– Tối ưu hóa trong tính toán thiết kế giúp giảm khối lượng, tiết kiệm vật liệu, nhưng vẫn đảm bảo độ cứng và khả năng hấp thụ va đập, bảo vệ người, xe và hàng hóa. Điều này đặc biệt có ý nghĩa với xe buýt điện với khối lượng pin rất lớn.

– Với những nghiên cứu mô phỏng kết hợp thử nghiệm thực tế song song giúp đánh giá chính xác khả năng chịu va chạm và hiệu chỉnh thiết kế trước khi đưa vào sản xuất.

1.5. Kết luận

Chương 1 đã trình bày được khái quát chung về kết cấu, cấu tạo của xe buýt điện đồng thời trình bày được tổng quan về va chạm xe buýt điện, trong phần này người nghiên cứu trình bày được các hướng nghiên cứu hiện nay về va chạm xe buýt điện, ý nghĩa của các nghiên cứu đối với khoa học và thực tiễn sản xuất. Chương 2 sẽ trình bày cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu đề án.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết về va chạm.

2.1.1. Khái niệm về va chạm.

Theo quan điểm cơ học, va chạm là quá trình hai hay nhiều vật tương tác xảy ra trong một khoảng thời gian rất ngắn. Khi xảy ra va chạm lực tiếp xúc tăng đột ngột và rất lớn, gây ra biến đổi lớn động lượng, gia tốc, làm vật va chạm bị biến dạng đàn hồi, dẻo hoặc có thể bị phá hủy tùy thuộc vào năng lượng va đập.

Trong nghiên cứu về tai nạn giao thông, va chạm được định nghĩa là sự giảm tốc đột ngột của phương tiện khi tiếp xúc với chướng ngại vật, quá trình này tạo ra các xung lực gây biến dạng và có thể phá hỏng kết cấu của phương tiện.

– Xung lực khi va chạm.

Khi va chạm, các vật xuất hiện lực va chạm $F(t)$, tác động của lực va chạm lên hệ được đánh giá qua xung lực P :

$$P = \int F(t)dt \quad (2.1)$$

Xung lực chi phối sự biến thiên vận tốc và động lượng của vật va chạm, nó quyết định mức độ hư hỏng của kết cấu.

– Động lượng của hệ va chạm.

Gọi vận tốc trước va chạm của m_1, m_2 lần lượt là v_1, v_2 ; vận tốc sau va chạm của m_1, m_2 lần lượt là v'_1, v'_2 . Động lượng của hệ được xác định theo công thức:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2 \quad (2.2)$$

– Hệ số hoàn nguyên của va chạm.

Hệ số hoàn nguyên (e) được xác định theo công thức

$$v'_2 - v'_1 = e(v_1 - v_2) \quad (2.3)$$

hay

$$e = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} \quad (2.4)$$

– Động năng của hệ

Trong quá trình va chạm một phần năng lượng đã bị tiêu tán. Gọi động năng bị tiêu tán

trong va chạm mềm (E_D), E_{k0} là động năng ban đầu của hệ và E_{k1} là động năng sau va chạm của hệ. Ta có

$$E_D = E_{k0} - E_{k1} \quad (2.5)$$

Với:

$$E_{k0} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (2.6)$$

$$E_{k1} = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2 \quad (2.7)$$

Ta có:

$$E_D = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (1 - e^2) (v_1 - v_2)^2 \quad (2.8)$$

Ta thấy $0 \leq e \leq 1$. Từ công thức tính E_D , khi e càng nhỏ thì năng lượng tiêu tán càng tăng.

Theo mức độ biến dạng va chạm được phân loại tùy thuộc vào hệ số hoàn nguyên e . Trường hợp $e = 1$ biểu thị va chạm đàn hồi thuần túy; $e = 0$ đại diện cho va chạm mềm hoàn toàn, tổng động năng lượng tiêu tán mà không có phục hồi năng lượng, sau va chạm 2 vật có cùng vận tốc; trường hợp còn lại biểu thị cho va chạm bán đàn hồi.

2.1.2. Va chạm đàn hồi

a) Khái niệm va chạm đàn hồi

Va chạm đàn hồi là va chạm mà tổng năng lượng cơ học được bảo toàn, nghĩa là mọi biến dạng trong quá trình va chạm là biến dạng đàn hồi và được phục hồi hoàn toàn sau khi tách khỏi nhau. Trong va chạm đàn hồi không có năng lượng tiêu tán thành nhiệt, âm, hay biến dạng dẻo. Vận tốc sau va chạm bằng vận tốc tiếp cận trước va chạm.

b) Va chạm **đàn hồi** xảy ra với các giả thiết sau:

- Vật thể tuyệt đối cứng hoặc đàn hồi tuyến tính hay nói cách khác là vật chịu lực theo định luật Hooke, không xuất hiện biến dạng dẻo và không hư hỏng.
- Thời gian va chạm rất ngắn $\Delta t \approx 10^{-3} \text{s}$ cho phép dùng mô hình xung lực.
- Ngoại lực như trọng lực, lực cản không khí không ảnh hưởng đến động lượng của hệ.

c) Mô hình va chạm.



Hình 2.1. Mô hình va chạm đàn hồi của 2 vật

- Hai vật có khối lượng lần lượt là m_1, m_2
- Vận tốc trước va chạm của m_1, m_2 lần lượt là v_1, v_2
- Vận tốc sau va chạm của m_1, m_2 lần lượt là v'_1, v'_2

d) Động lượng của hệ.

Theo định luật bảo toàn động lượng ta có:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad (2.9)$$

e) Động năng của hệ.

Tổng động năng của hệ trước va chạm bằng tổng động năng của hệ sau va chạm.

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v'^2_1 + \frac{1}{2} m_2 v'^2_2 \quad (2.10)$$

Trong các phân tích bằng FEM, giai đoạn đầu khi lực tăng nhanh từ 0 đến đỉnh tải được mô hình hóa bằng tiếp xúc đàn hồi, theo lý thuyết tiếp xúc Hertz hoặc tiếp xúc tuyến tính. Giai đoạn sau, biến dạng dẻo lan rộng trong cột giàn đầu xe mới được mô phỏng bằng mô hình Johnson–Cook, Cowper–Symonds hoặc Von Mises dẻo.

Như vậy, lý thuyết va chạm đàn hồi và các phương trình bảo toàn nêu trên là nền tảng quan trọng cho phân tích phản ứng ban đầu của khung trước xe buýt điện trong các nghiên cứu va chạm chính diện.

2.1.3. Va chạm mềm

a) Khái niệm va chạm mềm

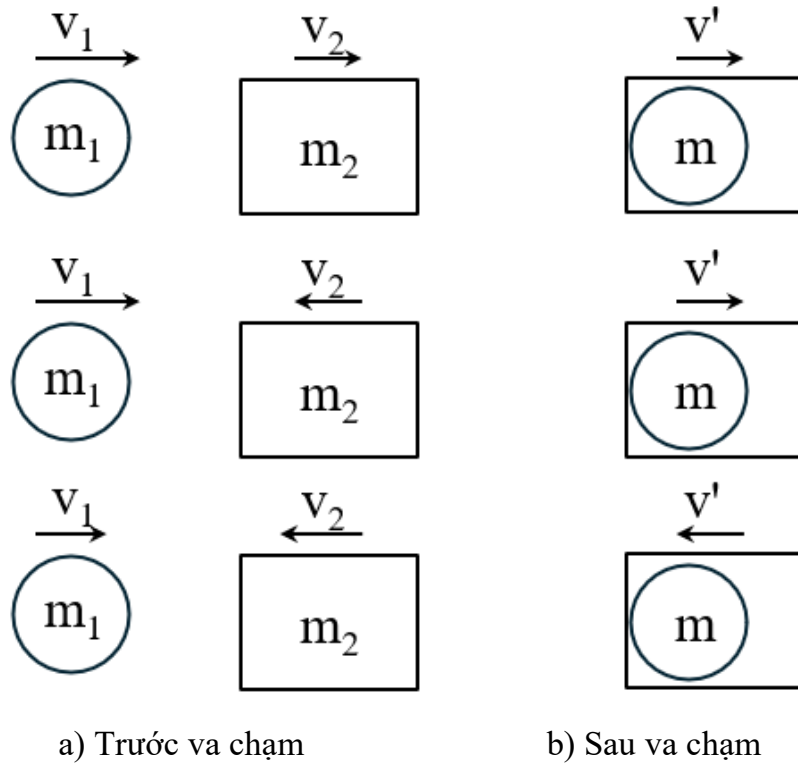
Va chạm mềm là loại va chạm mà các vật tham gia va chạm bị biến dạng dẻo vĩnh viễn, sau va chạm hai vật chuyển động với cùng vận tốc, phần lớn năng lượng bị tiêu tán qua

biến dạng không phục hồi của vật va chạm, năng lượng biến dạng dẻo, nhiệt và âm thanh.

Va chạm mềm là mô hình được ứng dụng phổ biến trong phân tích va chạm ô tô, đặc biệt ở vùng hấp thụ xung lực như khung đầu xe, thanh cản trước, vùng dập biến dạng.

b) Mô hình va chạm mềm

Mô hình điển hình gồm hai vật khối lượng m_1, m_2 có vận tốc ngay trước khi va chạm lần lượt là v_1, v_2 ; sau va chạm hai vật dính với nhau và có cùng vận tốc v'



Hình 2.2. Mô hình va chạm mềm của 2 vật

c) Động lượng của hệ.

Động lượng của hệ được bảo toàn, ta có công thức bảo toàn động lượng của hệ va chạm mềm như sau:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v' \quad (2.11)$$

d) Động năng của hệ.

Động năng của hệ không được bảo toàn, do trong quá trình va chạm một phần năng lượng đã bị tiêu tán. Ta có

$$E_D = E_{k0} - E_{k1} \quad (2.12)$$

Với:

$$E_{k0} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (2.13)$$

$$E_{k1} = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v^2 \quad (2.14)$$

Ta có:

$$E_D = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2)^2 \quad (2.15)$$

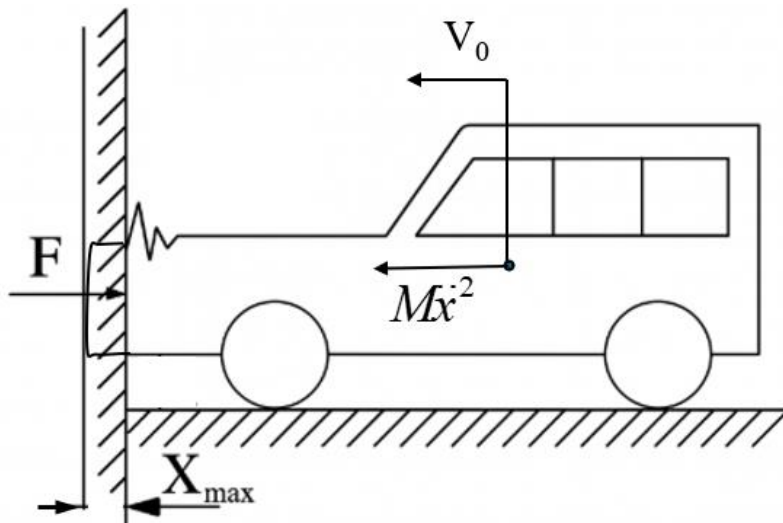
2.2. Động học và động lực học ô tô khi va chạm trực diện

2.2.1. Va chạm trực diện của ô tô vào vật cứng.

Xét va chạm của ô tô vào vật cản cứng là một va chạm biến dạng dẻo, động năng của ô tô biến đổi hoàn toàn thành công biến dạng khung vỏ ô tô theo phương trình.

$$T = \frac{1}{2} M V_0^2 = \int_0^{x_{\max}} F(x, \dot{x}) dx \quad (2.16)$$

Trong đó: T: Động năng của ô tô; M: Khối lượng khung ô tô; V_0 : Vận tốc của hệ; F: Lực gây biến dạng; x: Biến dạng tức thời; $\dot{x}$: Vận tốc biến dạng; $x_{\max}$: Biến dạng lớn nhất của đầu xe khi đã dừng lại.



Hình 2.3. Mô hình động lực học ô tô va chạm với vật cứng

Khi xe va chạm vào vật cản, ta có 3 quá trình cơ bản có thể xảy ra của lực va chạm gây biến dạng:

a) Khi lực F là hằng số. Ta có động năng của hệ:

$$T = \frac{1}{2}MV_0^2 = F.x_{\max} \quad (2.17)$$

Biến dạng lớn nhất được xác định:

$$x_{\max} = \frac{1}{2F}MV_0^2 = \frac{V_0^2}{2a_{\max}} \quad (2.18)$$

Với $a_{\max}$ là gia tốc cực đại của hệ (m/s^2)

b) Lực va chạm phụ thuộc tuyến tính vào biến dạng.

Ta có:

$$F = k.x \quad (2.19)$$

Với F là tổng lực tác dụng (N); k là độ cứng của hệ; x là độ biến dạng (m).

Khi đó động năng của ô tô khi va chạm được xác định qua công thức:

$$T = \frac{1}{2}MV_0^2 = \int_0^{x_{\max}} kx dx = \frac{1}{2}kx_{\max}^2 \quad (2.20)$$

Biến dạng lớn nhất của khung xe.

$$x_{\max} = \frac{Ma_{\max}}{k} = \frac{V_0^2}{a_{\max}} \quad (2.21)$$

c) Lực va chạm phụ thuộc tuyến tính vào vận tốc biến dạng

Ta có phương trình chuyển động:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} = 0 \quad (2.22)$$

Biến dạng lớn nhất:

$$x_{\max} = \frac{MV_0}{c} = \frac{V_0^2}{a_{\max}} \quad (2.23)$$

Theo tiêu chuẩn FMV SS208 quy định gia tốc va chạm lớn nhất mà cơ thể có thể chịu được là $a_{\max}=300\text{m/s}^2$, $a_{\max}$ thường được xác định bằng thực nghiệm.

2.2.2. Va chạm của hai ô tô

a) Hai ô tô va chạm cùng chiều.

Khi ô tô va chạm cùng chiều, ta có thể chia quá trình va chạm theo hai giai đoạn là biến dạng và phục hồi. Trong giai đoạn biến dạng dẻo, hai khối tâm của hai xe chuyển động cùng vận tốc:

$$V = \frac{M_1 V_1 + M_2 V_2}{M_1 + M_2} \quad (2.24)$$

Trong công thức này M_1, M_2 lần lượt là khối lượng của hai xe tương ứng có vận tốc V_1 và V_2 , V là vận tốc của 2 xe sau va chạm.

Năng lượng hấp thụ ΔT khi 2 xe va chạm được xác định bởi công thức:

$$\Delta T = E_D = \frac{1}{2} \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} (1 - e^2) (V_1 - V_2)^2 \quad (2.25)$$

b) Va chạm ngược chiều của hai ô tô.

Trong trường hợp hai ô tô va chạm ngược chiều với giả thiết quá trình va chạm chỉ có biến dạng dẻo ($e = 0$) mà không phục hồi, sau va chạm hai ô tô chuyển động cùng vận tốc, ta có:

$$V = \frac{M_1 V_1 + M_2 V_2}{M_1 + M_2} \quad (2.26)$$

Năng lượng hấp thụ khi va chạm là:

$$\Delta T = E_D = \frac{1}{2} \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} (V_1 - V_2)^2 \quad (2.27)$$

2.3. Phương pháp phân tích ứng suất và biến dạng bằng phần mềm Ansys

2.3.1. Ứng suất trong phân tích va chạm động lực học

Ứng suất trong mô phỏng va chạm được xác định thông qua phương trình Cauchy:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.28)$$

Trong đó:

- σ là ứng suất (Pa).
- F là lực tác dụng (N)
- A là diện tích mặt cắt ngang chịu tải (m^2)

Ứng suất trong phân tích động lực học thường không đồng nhất và thay đổi theo thời gian, đặc biệt tại các vùng chịu tác động mạnh như điểm tiếp xúc va chạm. **Ansys Dynamic** cung cấp khả năng phân tích ứng suất Von Mises, giúp đánh giá nguy cơ phá hủy của vật liệu.

2.3.2. Biến dạng và hư hỏng.

Biến dạng trong mô phỏng va chạm được xác định thông qua phương trình:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2.29)$$

Với:

- ε là biến dạng khi chịu tác dụng **lực**.
- ΔL là sự thay đổi chiều dài **(mm)**.
- L_0 là chiều dài ban đầu của vật **(mm)**.

Trong phân tích va chạm, biến dạng có thể là biến dạng đàn hồi (vật liệu trở về trạng thái ban đầu sau va chạm) hoặc biến dạng dẻo (kết cấu bị biến dạng vĩnh viễn). **Ansys Dynamic** sử dụng các mô hình vật liệu tiên tiến như mô hình Johnson-Cook để mô phỏng sự phát triển của biến dạng và hư hỏng trong điều kiện tải trọng va chạm cao.

2.3.3. Phương pháp phân tích ứng suất và biến dạng bằng phần mềm **Ansys Dynamic**.

Việc mô phỏng va chạm động lực học của khung xe buýt điện bằng **Ansys Dynamic** tuân theo các bước sau:

a) Xây dựng mô hình hình học

Thiết lập mô hình khung xe buýt điện dựa trên bản vẽ CAD.

Chia lưới phần tử bằng phương pháp Adaptive Meshing để tăng độ chính xác tại các vùng chịu tải trọng cao.

b) Thiết lập điều kiện biên và tải trọng

Xác định tốc độ va chạm và góc va chạm theo kịch bản thực tế (ví dụ: va chạm trực diện ở tốc độ 50 km/h).

Xác định vật liệu khung xe, nghiên cứu này sử dụng thép cường độ cao, với các đặc

tính cơ học được định nghĩa trong mô-đun vật liệu của **Ansys**.

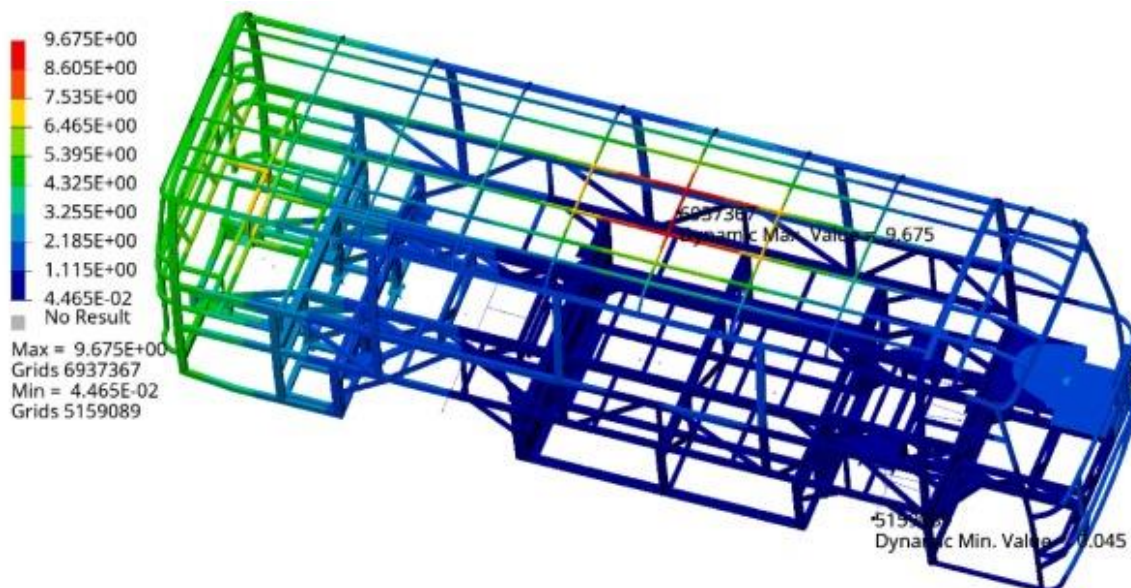
Áp dụng điều kiện biên ràng buộc, chẳng hạn như điểm tiếp xúc giữa xe buýt và chương ngại vật.

c) Chạy mô phỏng và phân tích kết quả

Mô phỏng phi tuyến theo thời gian để xác định ứng suất, biến dạng và vùng chịu hư hỏng của kết cấu.

Sử dụng biểu đồ năng lượng để phân tích sự phân bố năng lượng động học và năng lượng biến dạng trong quá trình va chạm.

Đánh giá hệ số an toàn (Factor of Safety - FOS) để xác định giới hạn bền của kết cấu khung xe buýt điện.



Hình 2.4. Mô hình phân tích khung xe buýt điện trên phần mềm Ansys

2.3.4. Ưu điểm của phương pháp phân tích va chạm động lực học bằng Ansys

– Mô phỏng chính xác các tình huống va chạm thực tế: **Ansys Dynamic** cung cấp khả năng phân tích chi tiết sự thay đổi của ứng suất, biến dạng theo thời gian, giúp tối ưu hóa thiết kế khung xe.

– Giảm thiểu số lần thử nghiệm thực tế: Mô phỏng giúp phát hiện các điểm yếu của thiết kế trước khi chế tạo nguyên mẫu, tiết kiệm chi phí và thời gian.

– Tích hợp mô hình vật liệu phi tuyến: Cho phép đánh giá các vật liệu tiên tiến với các

đặc tính cơ học phức tạp.

– Hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế: Các kết quả mô phỏng giúp xác định các vùng cần gia cường hoặc cải thiện để nâng cao độ bền và giảm trọng lượng xe buýt điện.

2.4. Kết luận

Việc sử dụng **Ansys Dynamic** trong phân tích va chạm động lực học là một phương pháp khoa học và hiệu quả trong thiết kế và tối ưu hóa kết cấu khung xe buýt điện. Bằng cách mô phỏng chính xác quá trình va chạm, đánh giá ứng suất và biến dạng theo thời gian, phương pháp này giúp đảm bảo độ an toàn của xe, nâng cao hiệu suất vận hành và giảm thiểu chi phí phát triển. Với sự phát triển của công nghệ mô phỏng số, các kỹ sư có thể liên tục cải tiến thiết kế xe buýt điện, hướng tới một phương tiện giao thông công cộng bền vững và an toàn hơn trong tương lai.

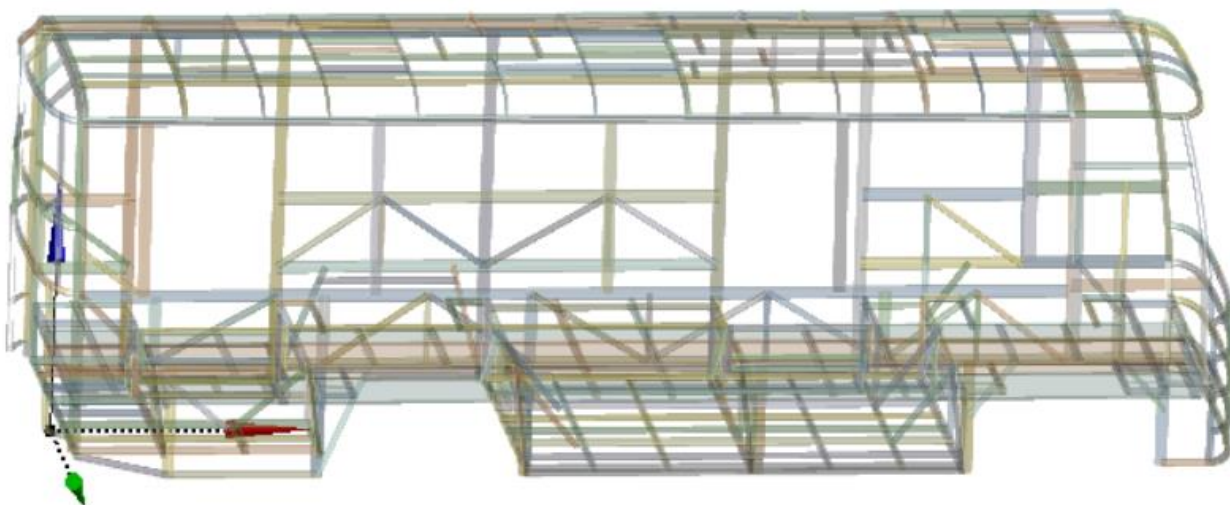
CHƯƠNG 3. MÔ PHỎNG ỨNG SUẤT VÀ BIẾN DẠNG KHUNG XE BUÝT ĐIỆN KHI VA CHẠM TRỰC DIỆN

3.1. Mô hình bài toán mô phỏng va chạm xe buýt điện

Va chạm trực diện là một trong những tình huống nguy hiểm nhất đối với kết cấu của xe buýt điện, đòi hỏi phân tích ứng suất và biến dạng chính xác để đảm bảo an toàn. Mô hình mô phỏng được thiết lập trên nền tảng **Ansys** Dynamic, sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để đánh giá sự phân bố ứng suất và biến dạng khi xảy ra va chạm.

a) Mô hình xe buýt điện được sử dụng trong đề án.

Mô hình xe buýt điện được lựa chọn có sức chứa 29 chỗ ngồi, kích thước tổng thể chiều dài x chiều rộng x chiều cao là: **8100** x 2210 x **2550** mm, với trọng lượng không tải khoảng 7.400 Kg (bao gồm khung xe, pin và hệ thống truyền động). Khung xe bao gồm các bộ phận chính: Khung xương đầu, khung xương đuôi, khung mũi, khung hông trái, khung hông phải, khung sàn và sát xi. Vật liệu được sử dụng với nhiều loại thép có thiết diện khác nhau đảm bảo độ bền và độ an toàn cho toàn bộ xe.



Hình 3.1. Mô hình tổng thể khung xe buýt điện sử dụng trong đề án.

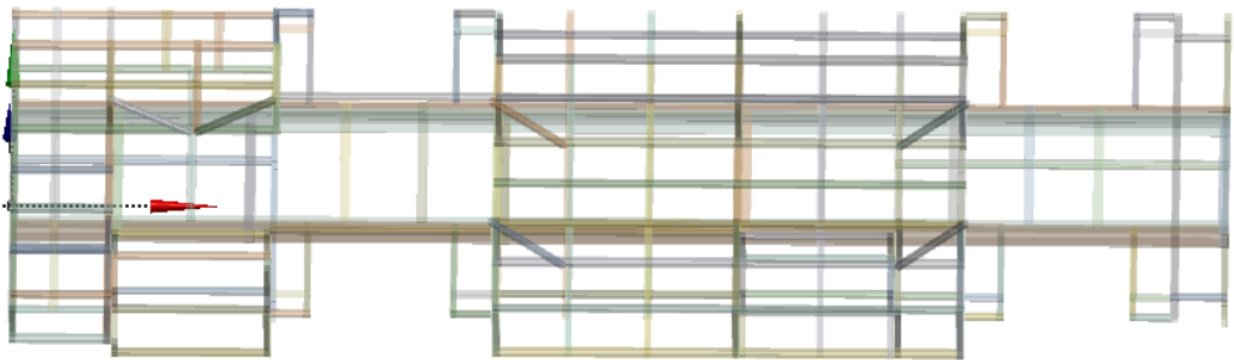
Phần khung xương của xe được chế tạo bằng thép khác nhau với quy cách được **thể** hiện như bảng 3.1.

Bảng 3.1. Bảng loại thép sử dụng khung xe buýt điện sử dụng mô phỏng trong đề án.

STT	Bộ phận	Loại thép	Thông số kích thước
1	Khung xương đầu	C350	□ 80x40x2,0
		C350	□ 40x40x2,0
		C350	□ 20x40x1,6
		C350	□ 30x30x1,4
2	Khung đuôi	C350	□ 40x40x2,0
		C350	□ 20x40x1,6
3	Khung mũi xe	C350	□ 40x40x2,0
		C350	□ 20x40x1,6
		Q235B	└ 42x22x3,0
4	Khung hông trái và phải	C350	□ 80x40x2,0
		C350	□ 40x40x2,0
		Q235B	□ 20x60x3,0
		C350	□ 20x40x1,6
5	Khung sàn và sát xi	SPA-H	□ 100x40x4,0
		Q235B	□ 60x20x3,0
		Q235B	└ 60x20x3,0
		Q235B	∨ 40x40x3,0

Mô hình 3D của xe buýt điện được thiết kế bằng phần mềm CATIA, dựa trên các bản vẽ kỹ thuật 2D. Quá trình dựng mô hình bao gồm việc xác định các thông số hình học quan trọng, từ đó chuyển đổi sang mô hình 3D để có cái nhìn trực quan hơn về kết cấu tổng thể của xe. Từng thành phần như khung xe, hệ thống chịu lực, bộ phận truyền động, và hệ thống pin đều được mô phỏng chính xác, đảm bảo phù hợp với thực tế sản xuất và các tiêu chuẩn kỹ thuật liên quan.

Mô hình hình học của xe buýt điện được xây dựng với độ chính xác cao, bao gồm khung gầm, các bộ phận kết cấu chính như cột, dầm và thanh giằng. Hệ thống pin của xe được đặt ở vị trí thấp, gần sàn xe, giúp giảm trọng tâm và tăng tính ổn định khi va chạm. Tuy nhiên, khối pin cũng đóng vai trò quan trọng trong việc phân phối lực tác động. Động cơ điện và hệ thống truyền động, vốn có khối lượng đáng kể, cũng sẽ ảnh hưởng đến sự lan truyền ứng suất và biến dạng trong khung xe khi xảy ra va chạm. Những yếu tố này được tích hợp vào mô phỏng để đảm bảo độ chính xác cao nhất trong việc đánh giá an toàn kết cấu của xe buýt điện.



Hình 3.2. Mô hình CAD của phần khung sàn xe buýt điện sử dụng để mô phỏng.

Cấu trúc khung sàn chính của xe buýt điện được thể hiện ở hình 3.2. Dầm ngang chính và phụ sử dụng thép hình C với quy cách C 100x40x4.0 cho dầm ngang chính, dầm dọc chính và C 60x20x3.0 cho dầm ngang phụ, V 40x40x3.0 cho dầm dọc phụ. Các dầm dọc, dầm ngang sử dụng thép V 40x40x3.0. Vật liệu sử dụng là thép cấu trúc mác Q235B. Phương pháp thi công sử dụng hàn MAG/CO₂, chiều cao mỗi hàn 3mm, được mô hình hóa như liên kết cứng.



(a) Khung đuôi

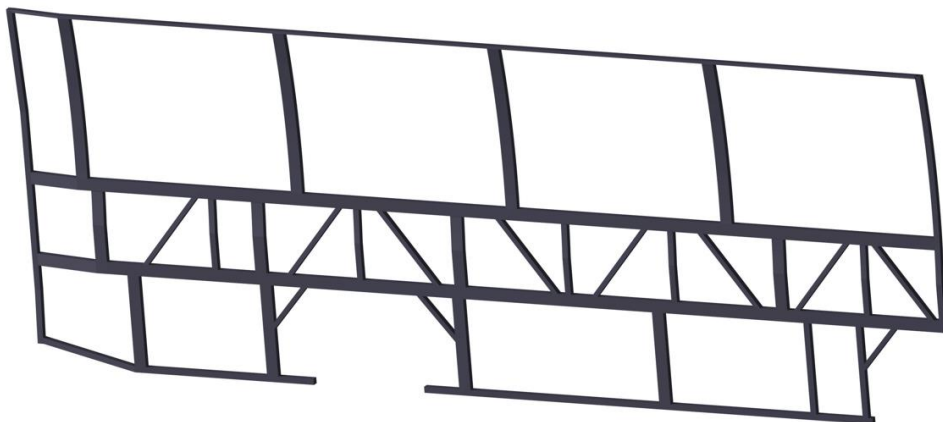


(b) Khung đầu

Hình 3.3. Mô hình CAD phần khung đuôi và khung đầu xe buýt điện dùng mô phỏng.

Khung sàn được thiết kế nhằm tạo không gian cho việc bố trí hệ thống pin và động cơ PMSM phía đầu hoặc đuôi xe, hoặc cả hai nếu sử dụng loại động cơ PMSM công suất nhỏ.

Cấu trúc khung đầu và đuôi của xe buýt điện sử dụng hỗn hợp giữa thép ống mặt cắt hộp với quy cách 40x40x2.0, 80x40x2.0, 30x30x1.4, 20x40x1.6. Loại vật liệu được lựa chọn là thép C350. Cấu trúc các thanh ngang, thanh dọc, thanh xiên, thanh đứng được mô tả cụ thể trong bản vẽ ở phụ lục. Phương pháp thi công sử dụng hàn MAG/CO₂, chiều cao mối hàn 3mm, được mô hình hóa như liên kết cứng.



Hình 3.4. Mô hình phần khung sườn vách trái.

Cấu trúc trái và phải của xe buýt điện sử dụng hỗn hợp giữa thép C350 dạng ống mặt cắt hộp với quy cách 40x40x2.0, 80x40x2.0, 20x40x1.6. Bên cạnh đó, Cấu trúc các thanh ngang, thanh dọc, thanh xiên, thanh đứng được mô tả cụ thể trong bản vẽ ở phụ lục. Riêng khung bên phải sẽ được thiết kế tạo khung cửa cho hệ thống cửa bên của xe buýt. Phương pháp thi công sử dụng hàn MAG/CO₂, chiều cao mỗi hàn 3mm, được mô hình hóa như liên kết cứng.



Hình 3.5. Bản vẽ 3D của phần khung mũi xe buýt điện sử dụng trong đề án.

Cấu trúc khung mũi của xe buýt điện được thể hiện ở hình 3.5. Thép C350 được sử dụng với thiết diện có kích thước 40x40x2.0, 80x40x2.0, 30x30x1.4, 20x40x1.6. Khung mũi sử dụng phương pháp hàn MAG/CO₂ để liên kết các thanh thép thành khối thống nhất, chiều cao mỗi hàn 3mm, được mô hình hóa như liên kết cứng. Cấu trúc các thanh ngang, thanh dọc, thanh xiên, thanh đứng được mô tả cụ thể trong bản vẽ ở phụ lục.

b) Thuộc tính vật liệu được sử dụng để chế tạo khung xương xe mô phỏng.

Các thông số vật liệu như modul đàn hồi, giới hạn chảy, giới hạn bền của thép và hợp kim nhôm cũng được xem xét để đánh giá ảnh hưởng của vật liệu đến khả năng chịu lực của khung xe. Các thông số cơ bản ảnh hưởng đến quá trình tính toán mô phỏng được cung cấp bởi bảng 3.2.

Bảng 3.2. Thông số cơ bản của vật liệu sử dụng trong đề án.

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Thép C350	Thép Q235B	SPA-H	Hợp kim nhôm 6061-T4
Khối lượng riêng	ρ	kg/m ³	8020	7850	7850	2703
Mô đun đàn hồi	E	Gpa	200	200	205	68.9
Hệ số poisson	ν		0.3	0,26	0,30	0.33
Yield Stress	YS	MPa	827	≥ 235	≥ 355	110
Độ bền kéo	A	MPa	1140	500	620	186
Độ bền tới hạn	B	MPa	430	500	620	210

Nghiên cứu này tập trung vào phân tích va chạm trực diện của xe buýt điện với hai trường hợp, bao gồm va chạm với vật cứng tuyệt đối (tường cứng) – mô phỏng tình huống xe buýt đâm vào một bức tường không biến dạng và va chạm mềm (trực diện với xe khác) – mô phỏng tình huống va chạm với một xe khác có tính đàn hồi nhất định. Mỗi trường hợp va chạm sẽ được phân tích với năm mức gia tốc khác nhau để đánh giá ảnh hưởng của động lực học lên khung xe.

c) Điều kiện va chạm:

– Vận tốc va chạm và gia tốc khi va chạm: Trong đề án vận tốc và gia tốc của xe mô phỏng được giả định trong khoảng 30 km/h đến 70 km/h, đây là khoảng vận tốc thường xảy ra các tai nạn nghiêm trọng của xe buýt, chiếm khoảng 70%. Vận tốc dưới 30km/h lực sinh ra va chạm chưa đủ để đánh giá khả năng an toàn của khung thân xe, khả năng gây thương tích cho hành khách chỉ ở mức nhẹ - trung bình.

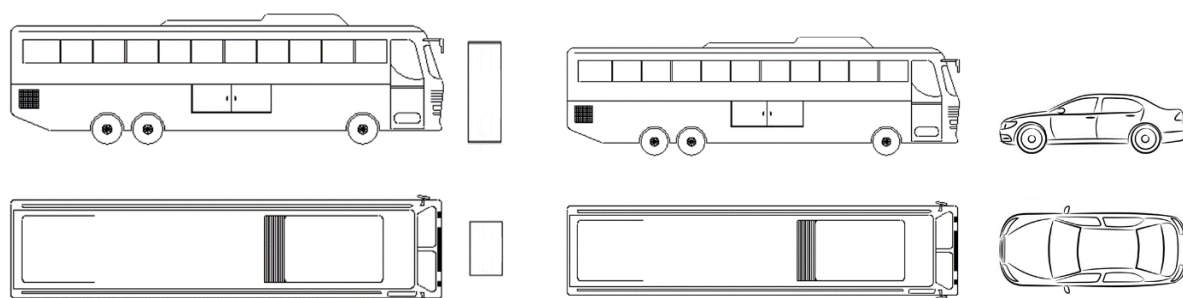
Bảng 3.3. Các trường hợp va chạm, vận tốc và gia tốc tương ứng trong mô phỏng.

Trường hợp	Loại va chạm	Vận tốc va chạm	Gia tốc tác động
------------	--------------	-----------------	------------------

		(km/h)	(m/s ²)
Trường hợp 1	Tường cứng	30	5
Trường hợp 2	Tường cứng	50	8
Trường hợp 3	Tường cứng	70	12
Trường hợp 4	Xe khác	50	6
Trường hợp 5	Xe khác	70	10

Do xe khách có khối lượng rất lớn, khi va chạm ở vận tốc trên 70 km/h sẽ tạo ra lực tác động vượt quá **giới** hạn bền của kết cấu khung xe. Như vậy, khoảng vận tốc 30 km/h đến 70 km/h, lực va chạm đủ lớn để gây thương tích nghiêm trọng cho hành khách, đồng thời lực va chạm sinh ra trong giới hạn bền của kết cấu khung xe, phù hợp với thực tế. Đây cũng là khoảng vận tốc tiêu chuẩn trong thử nghiệm của **UNECE** cho các phương tiện giao thông thương mại. Gia tốc của xe va chạm được chọn tương ứng trong khoảng 5m/s^2 đến 12m/s^2 . Các giá trị vận tốc và gia tốc của xe mô phỏng được cho cụ thể theo bảng 3.3

– Vị trí va chạm khi mô phỏng: Trong nội dung đề án tập trung mô phỏng va chạm trực diện ở phần đầu xe buýt, tác động trực tiếp lên khung trước và hệ thống dầm chịu lực chính. Va chạm trực diện là va chạm có tỉ lệ xảy ra cao so với vị trí va chạm khác, đồng thời đây cũng là va chạm gây chấn thương nghiêm trọng đối với hành khách.



a. Mô hình va chạm với tường cứng

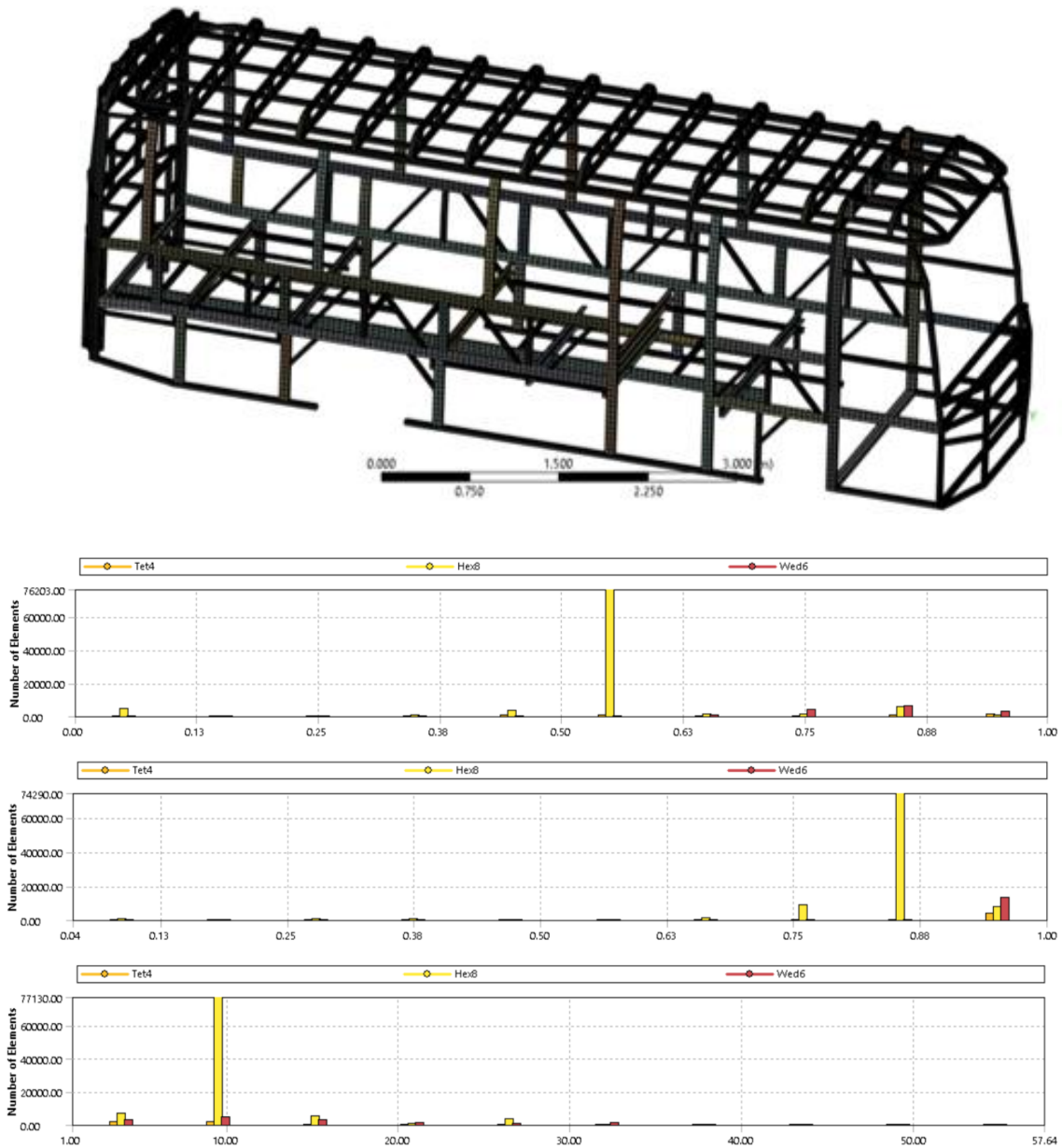
b. Mô hình va chạm với xe khác

Hình 3.6. Mô hình va chạm tường cứng và va chạm xe khác trong mô phỏng.

– Vật cản trong va chạm được mô phỏng: Đề án mô tả va chạm với 2 loại vật cản: 1 là tường cứng tuyệt đối; 2 là xe con tương ứng va chạm đàn hồi, tương tự như thử nghiệm va chạm tiêu chuẩn của **UNECE**.

3.2. Thiết lập thông số và mô phỏng va chạm xe buýt điện

3.2.1. Chia lưới theo phương pháp phần tử hữu hạn cho mô hình mô phỏng.

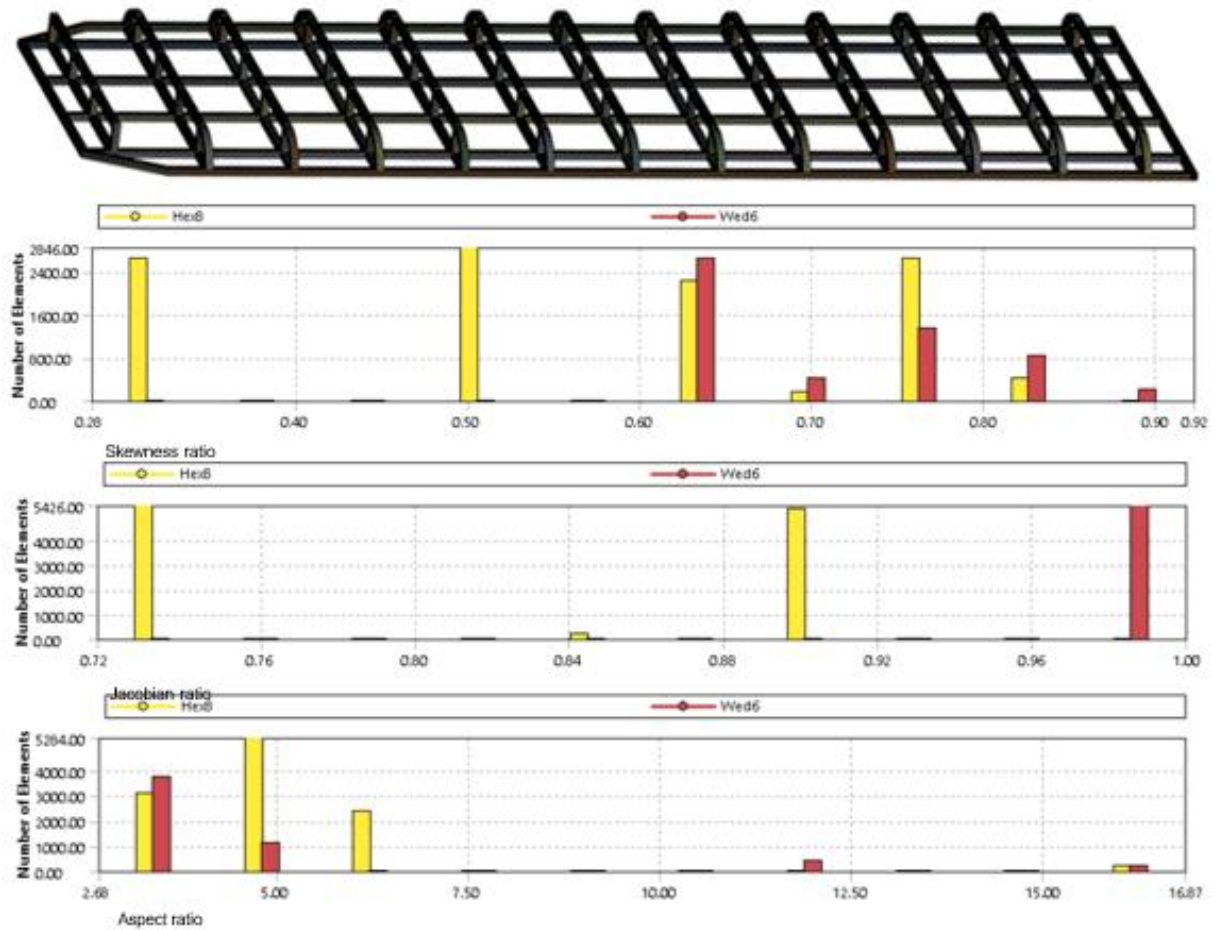


Hình 3.7. Lưới phần tử hữu hạn của khung xe buýt điện được dùng để mô phỏng

Lưới phần tử hữu hạn được tạo bằng các phần tử bậc thấp nhằm làm giảm khối lượng và thời gian tính toán. Để đảm bảo độ chính xác trong mô phỏng, tiêu chí chất lượng lưới như Skewness, Aspect Ratio và Jacobian được kiểm tra nghiêm ngặt nhằm tránh sai số số

học trong quá trình tính toán. Trong nghiên cứu này, hai loại phần tử chính được sử dụng bao gồm phần tử Hexahedral (Hexa) và phần tử Tetrahedral (Tetra). Phần tử Hexa được áp dụng ở các vùng có hình học đơn giản, giúp cải thiện độ chính xác và hiệu suất tính toán. Trong khi đó, phần tử Tetra được sử dụng ở các khu vực có hình dạng phức tạp hoặc các vị trí cần mô phỏng chi tiết, đảm bảo khả năng hội tụ của bài toán.

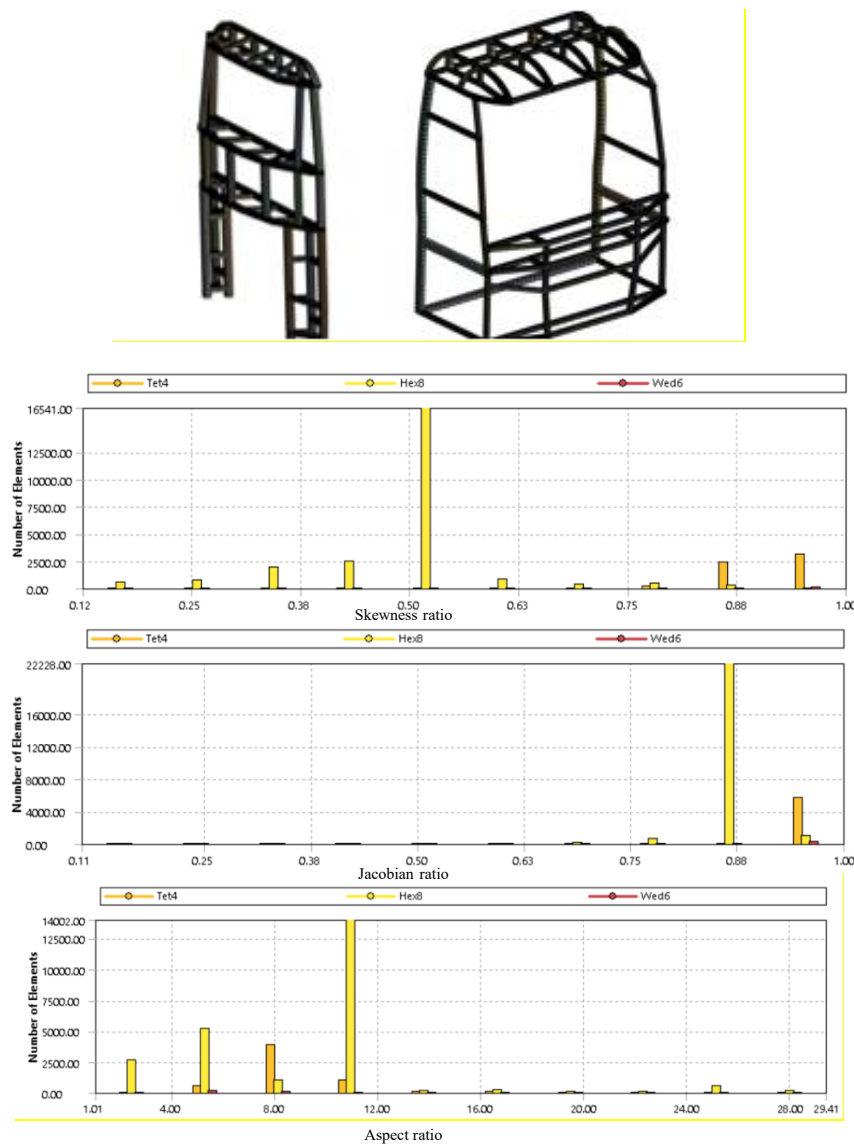
a) Chia lưới từng bộ phận của khung xe



Hình 3.8. Khung nóc được chia lưới và chất lượng lưới được chia

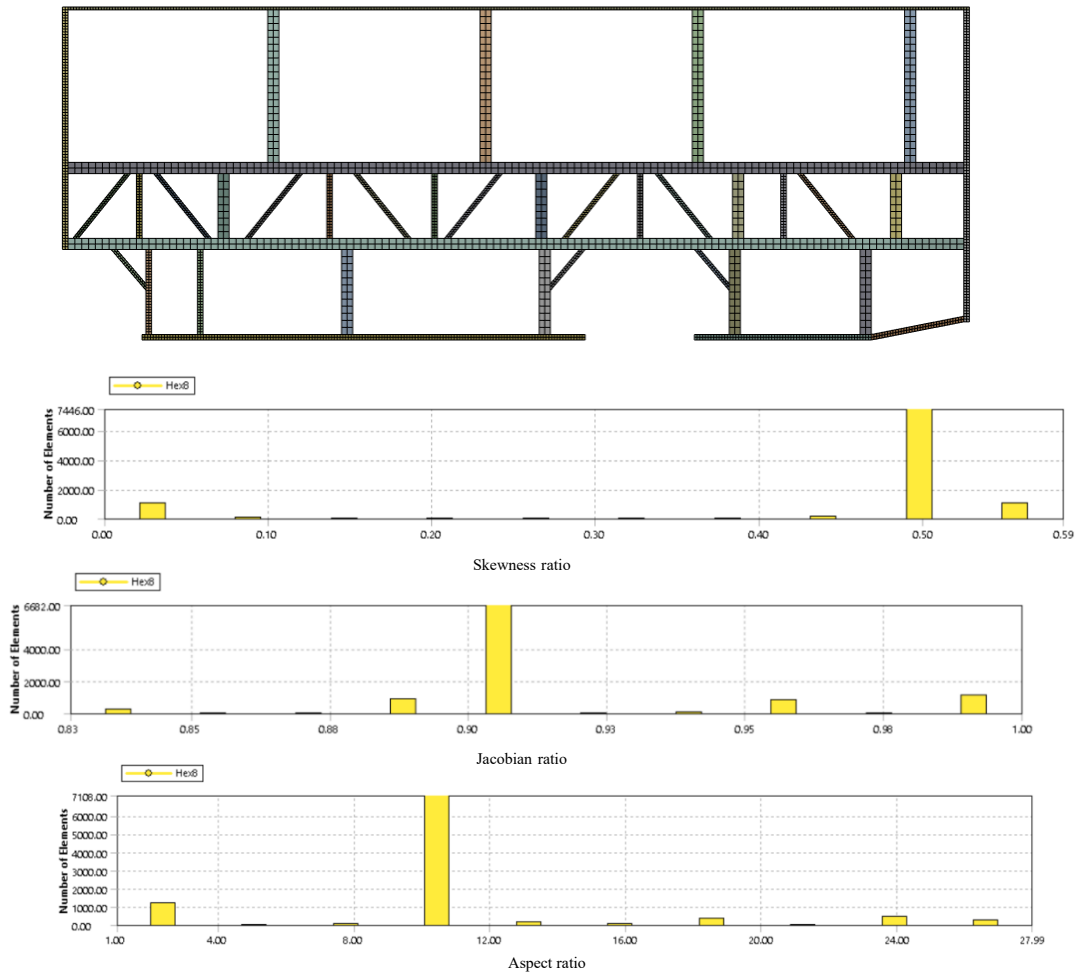
Số lượng phần tử và nút tính toán trung bình trong mô phỏng đạt khoảng 211214 phần tử và 110099 nút tính toán. Các tiêu chí đánh giá chất lượng lưới được áp dụng nghiêm ngặt để đảm bảo độ chính xác của mô phỏng, bao gồm Skewness, Aspect Ratio và Jacobian Ratio như đã nêu trên. Tiêu chí Skewness giúp đảm bảo các phần tử lưới không bị méo quá mức, Aspect Ratio duy trì tỷ lệ cạnh phần tử hợp lý để tránh sai số số học, trong khi Jacobian

Ratio kiểm tra độ chính xác của nội suy phần tử, đảm bảo độ ổn định trong quá trình mô phỏng. Toàn bộ lưới phần tử hữu hạn của mô hình được trình bày ở hình 3.7. Phần tử lục diện tám nút (Hex8) chiếm tỉ trọng cao trong toàn bộ lưới, tại các khu vực thanh dầm C, thanh hộp, thanh V. Tại các khu vực chuyển tiếp hoặc bo cạnh, khu vực mối hàn, phần tử tứ diện (Tet4) và hình nêm (Wed6) được sử dụng để đảm bảo biến dạng phức tạp trong quá trình va chạm. Hệ số skewness trung bình nằm ở ngưỡng 0.57, hệ số Jacobian trung bình nằm ở ngưỡng 0.88, hệ số aspect trung bình nằm ở ngưỡng dưới 10, điều này giúp đảm bảo tính hội tụ của quá trình mô phỏng.



Hình 3.9. Chia lưới khung đầu và khung đuôi xe và chất lượng lưới được chia.

Chất lượng lưới của khung nóc của xe buýt điện được thể hiện như hình 3.8. Chỉ số Aspect của phần lớn các phần tử đạt dưới giá trị 7.5. Khung trần có tổng cộng 77900 phần tử và 37280 nút tính toán. Tại các khu vực chuyển tiếp hoặc bo cạnh, khu vực mối hàn nhằm đảm bảo biến dạng phức tạp trong quá trình va chạm các phần tử tứ diện (Tet4) và hình nêm (Wed6) được sử dụng tại các vị trí này.



Hình 3.10. Lưới khung hông trái xe buýt điện dùng để mô phỏng

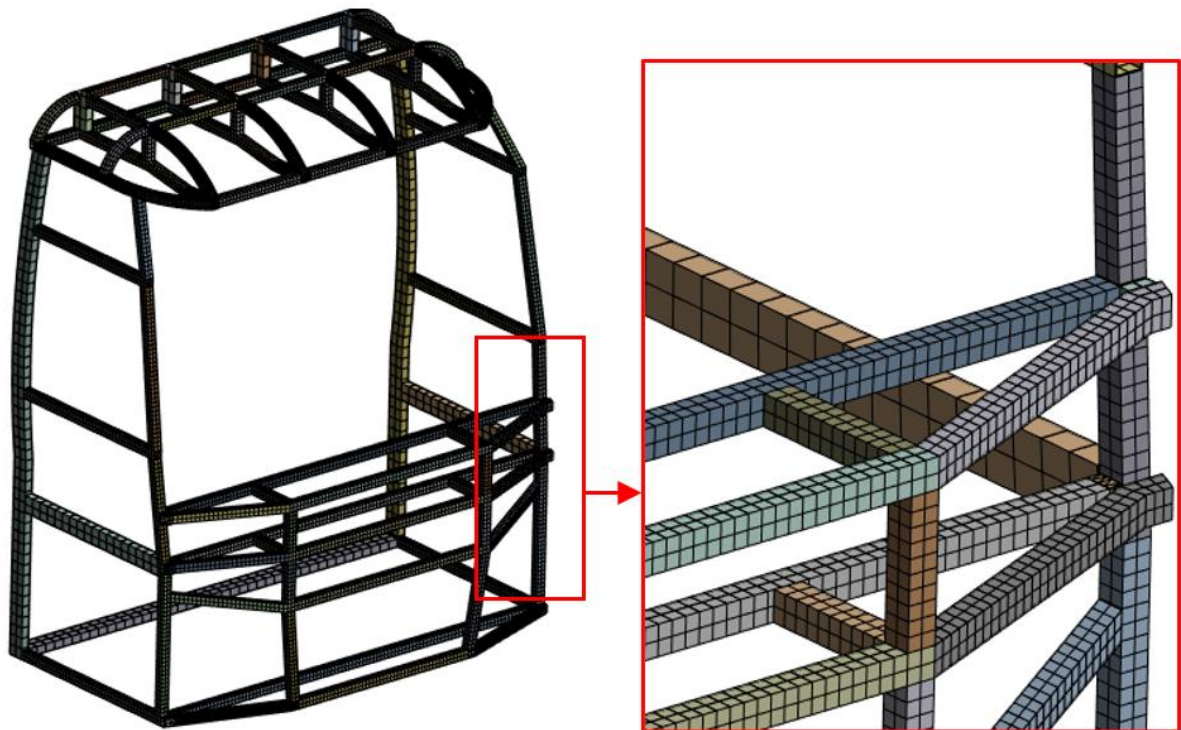
Khung trước và khung sau của xe mô hình được chia lưới như thể hiện trong hình 3.9. Chỉ số Aspect của phần lớn các phần tử đạt dưới giá trị 12. Khung trước có tổng cộng 48150 phần tử, 31255 nút tính toán, khung sau có tổng cộng 27382 phần tử và 13412 nút tính toán. Đối với lưới của khung trước và khung sau, phần tử lục diện tám nút chiếm tỉ trọng cao trong toàn bộ lưới. Phần tử tứ diện và hình nêm được sử dụng nhiều tại các khu vực chuyển

tiếp hoặc bo cạnh, khu vực mối hàn.

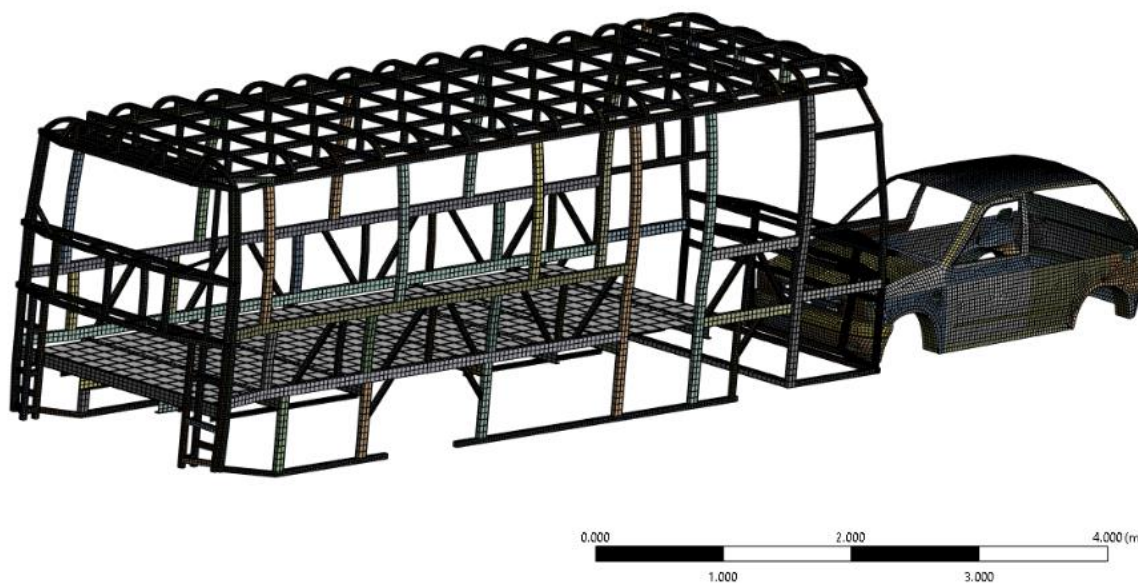
Khung trái và khung phải của xe buýt điện được sử dụng trong đề án được thể hiện như hình 3.10. Chỉ số Aspect của phần lớn các phần tử đạt dưới giá trị 11. Khung cạnh trái có tổng cộng 20920 phần tử, 9610 nút tính toán, khung cạnh phải có tổng cộng 21080 phần tử và 9728 nút tính toán. Phần tử lục diện tám nút (Hex8) chiếm tỉ trọng cao trong toàn bộ lưới. Các khu vực chuyển tiếp hoặc bo cạnh, khu vực mối hàn, phần tử Tet4 và Wed6 được sử dụng nhằm đảm bảo biến dạng phức tạp trong quá trình va chạm.

Trong quá trình chia lưới, kỹ thuật chia lưới cục bộ theo mức độ quan trọng của khu vực va chạm được áp dụng, các khu vực có xác suất va chạm cao như phần đầu xe, dầm chịu lực chính, cột gia cố và vị trí liên kết quan trọng sẽ sử dụng lưới mịn hơn để đảm bảo kết quả phân tích chính xác.

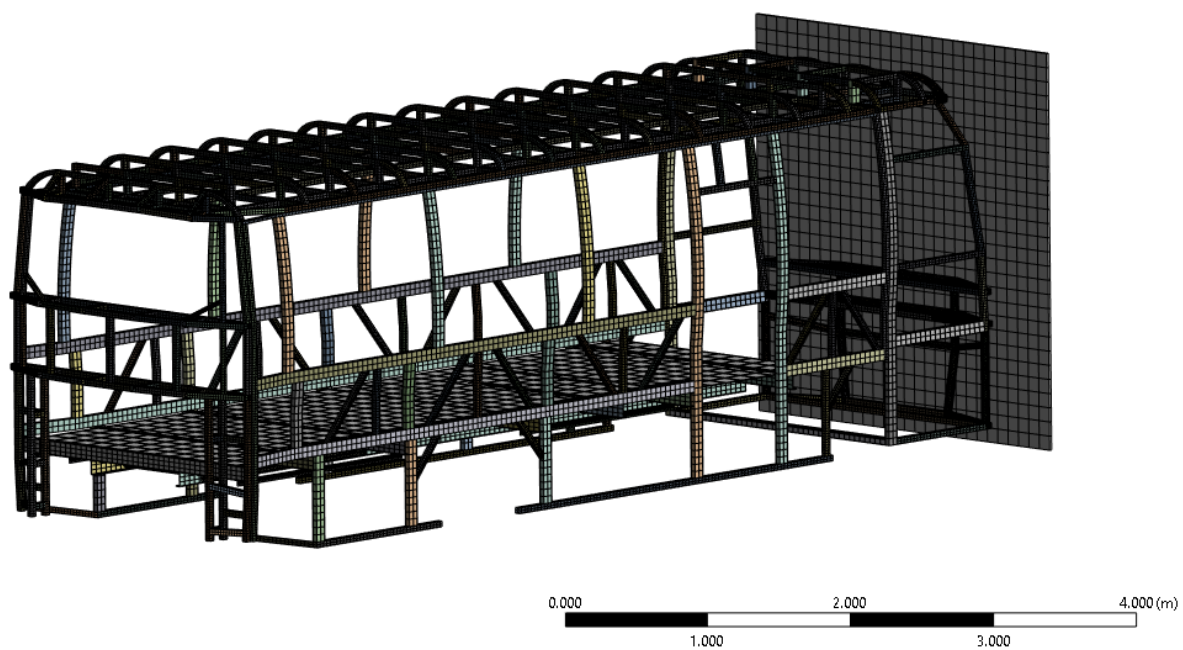
Ngược lại, những vùng có mức độ ảnh hưởng thấp hơn như phần đuôi xe hoặc các khu vực xa điểm va chạm sẽ sử dụng lưới thô hơn để tối ưu tài nguyên tính toán mà không làm ảnh hưởng đáng kể đến độ chính xác của mô phỏng.



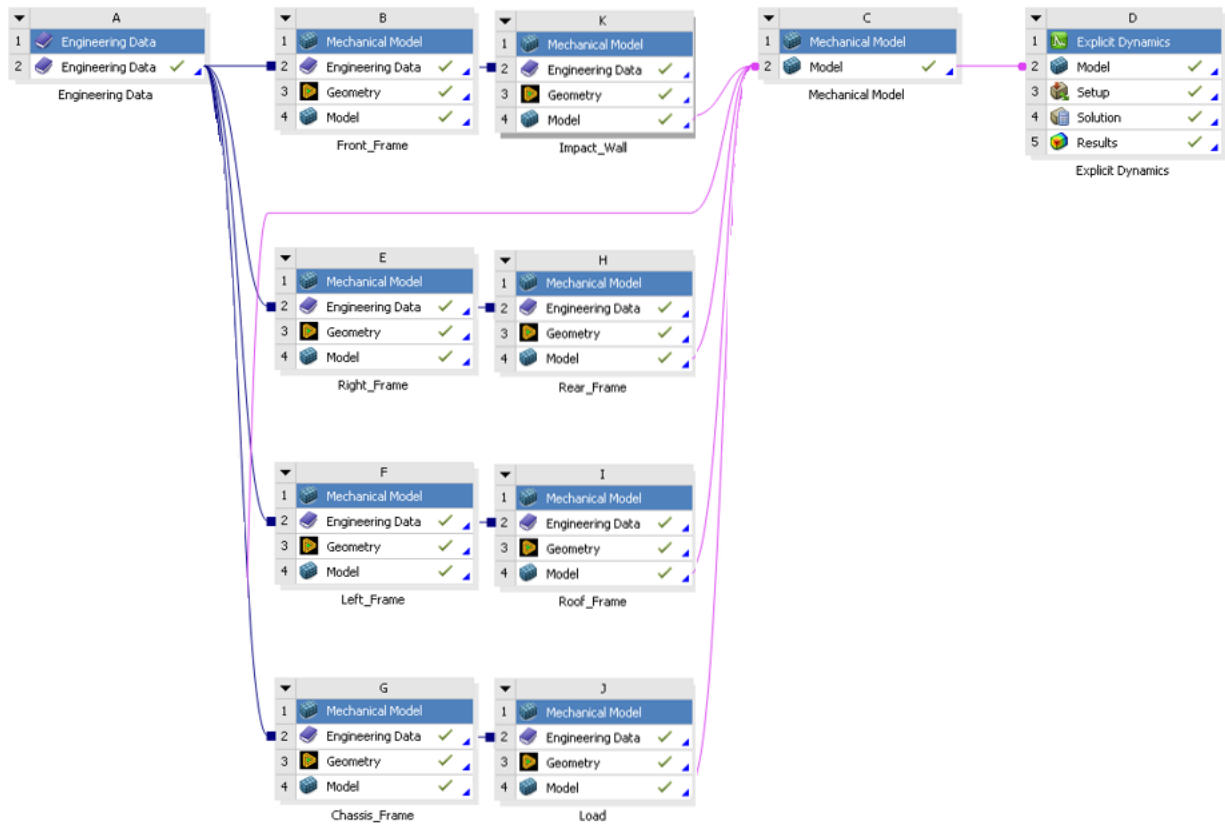
Hình 3.11. Mật độ lưới được thay đổi theo từng khu vực.



Hình 3.12. Lưới phần tử hữu hạn toàn cục trong trường hợp xe va chạm xe khác



Hình 3.13. Lưới phần tử hữu hạn toàn cục trong trường hợp xe va chạm tường cứng



Hình 3.14. Bố trí cấu trúc các thành phần trong **Ansys Workbench**

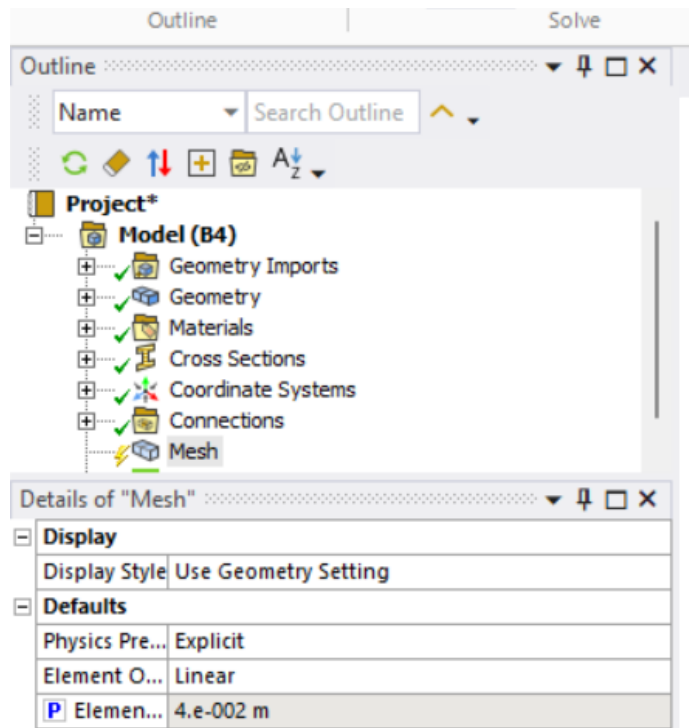
b) Cấu trúc các thành phần trong **Ansys Workbench**.

Hình 3.14 mô tả bố trí các mô-đun phân tích trong phần mềm ANSYS, theo đó **mỗi** lưới của mỗi khung sẽ được tiến hành chia lưới ở một mô-đun đơn lẻ, sau đó được lắp ghép trong một mô-đun lưới tổng thể. Phương pháp này giúp giảm thiểu độ phức tạp trong quá trình chia lưới, giúp cho việc chia lưới dễ dàng tiến hành thủ công và bám sát các tiêu chí Aspect, Jacobian, Skewness.

c) Phân tích độc lập lưới cho mô hình.

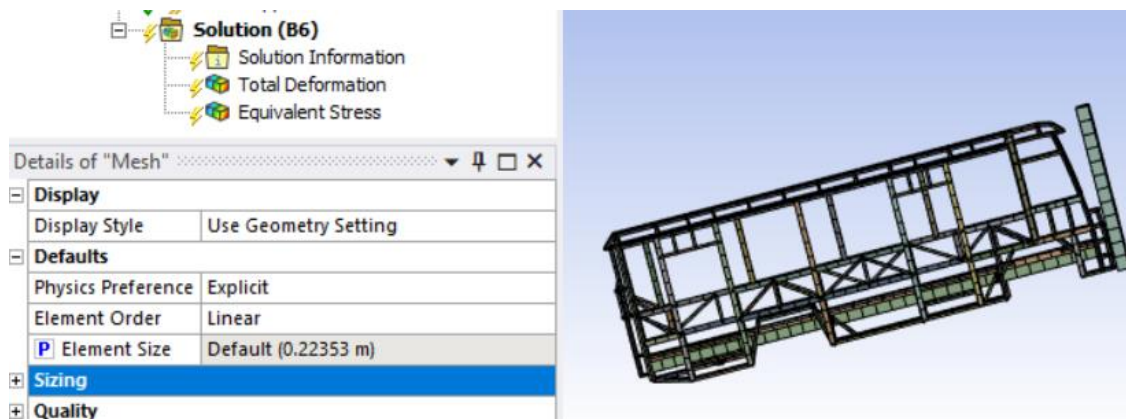
Để tìm ra kích thước lưới tối ưu cho kết quả mô phỏng được hội tụ. Học viên đã thực hiện phân tích tính độc lập lưới bằng cách sử dụng Parameter Set trong Ansys để tự động phân tích tính độc lập lưới với các bước thực hiện:

- **Thiết lập biến kích thước lưới:** nhấp chuột vào ô vuông nhỏ trống bên trái chữ "Element Size". Một chữ "P" màu xanh sẽ hiện ra. Đây chính là bước biến kích thước lưới thành một tham số (Parameter)



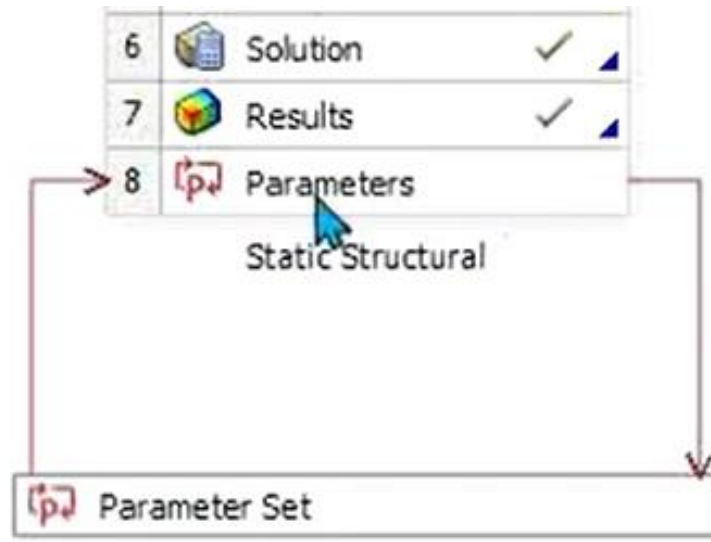
Hình 3.15. Cửa sổ thiết lập kích thước lưới trong Ansys

- **Thiết lập biến kết quả đầu ra:** phần này chỉ chọn Equivalent Stress (ứng suất) và biến dạng tổng như mục tiêu ban đầu của mô phỏng. Với bảng Detail chọn Maximum. Sau đó nhập vào ô vuông bên trái để hiện chữ "P". Ansys tự động ghi lại giá trị này sau mỗi lần chạy.



Hình 3.16. Cửa sổ thiết lập kết quả phân tích trong mô phỏng

- **Thiết lập bảng kích bản trong Workbench.** Trong giao diện Workbench, nhấp chuột vào thanh Parameter Set nhập kích thước lưới ở ô bảng kích thước lưới cài đặt.



Hình 3.17. Thanh Parameter Set trong Workbench

Bảng 3.4. Kích thước lưới được dùng để phân tích độc lập lưới cho mô hình

Design Point	Cỡ lưới (mm)	Ghi chú
DP 0 (Coarse)	50 mm	Lưới thô, dùng để kiểm tra xem mô hình có lỗi ràng buộc (boundary conditions) hay không.
DP 1 (Medium)	30 mm	Mức bắt đầu cho kết quả có thể chấp nhận được về mặt hình học khung.
DP 2 (Fine)	20 mm	Mức tiêu chuẩn cho mô phỏng va chạm xe khách/xe buýt cỡ trung.
DP 3 (Very Fine)	10 mm	Lưới rất mịn, dùng để khẳng định tính độc lập lưới. Rất tốn thời gian tính toán.

- Cập nhật Design Points.

Sau khi cập nhật Design Points, chờ máy tự động phân tích độc lập lưới, ta có kết quả như bảng sau:

Bảng 3.5. Phân tích tính độc lập lưới.

Design Point	P1 - Mesh Element Size (mm)	P2 - Total Deformation Maximum (mm)
DP 0 (Current)	50	142.5
DP 1	30	151.2
DP 2	20	154.8
DP 3	10	155.1

- Phân tích kết quả.

+ Dựa vào bảng ta phân tích kết quả như sau:

+ Từ 50mm sang 30mm: Kết quả thay đổi khoảng 6.1% (142.5 → 151.2). Sự thay đổi này khá lớn, cho thấy lưới 50mm quá thô, không đủ độ chính xác.

+ Từ 30mm sang 20mm: Kết quả thay đổi khoảng 2.3% (151.2 → 154.8). Sai số đã giảm xuống, lưới bắt đầu ổn định.

+ Từ 20mm sang 10mm: Kết quả chỉ thay đổi 0.19%.

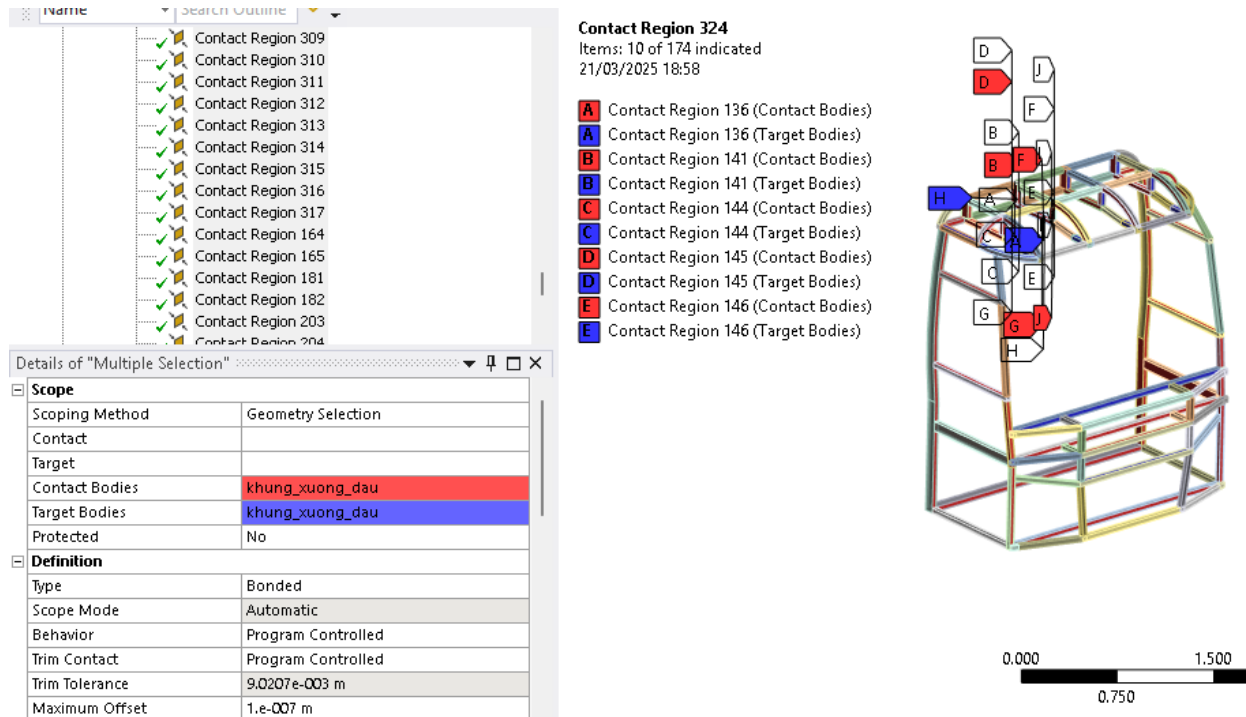
Kết luận:

+ Vì sự khác biệt giữa 20mm và 10mm là cực kỳ nhỏ (dưới 1%), ta có thể khẳng định lưới đạt tính độc lập tại kích thước 20mm.

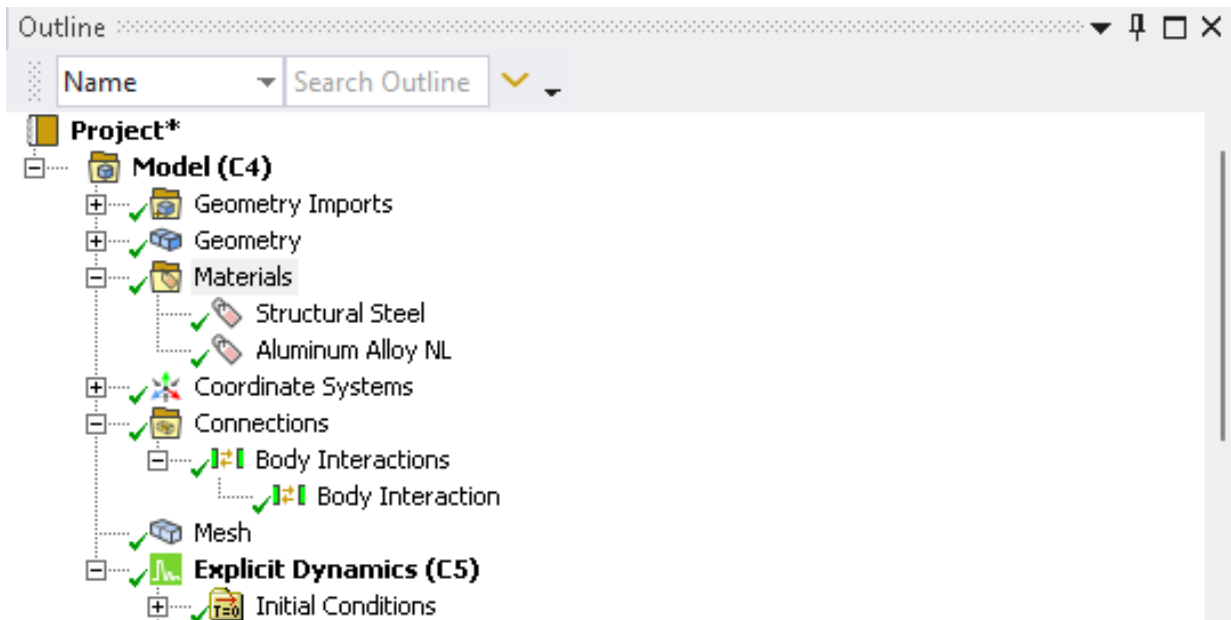
+ Lựa chọn cuối cùng ta nên chọn bộ lưới 20mm (DP 2) để trình bày kết quả cuối cùng vì nó vừa chính xác vừa tiết kiệm thời gian tính toán hơn rất nhiều so với lưới 10mm.

3.2.2. Liên kết các bộ phận của khung xe buýt điện dùng mô phỏng.

Liên kết hàn trong mô hình mô phỏng bằng phương pháp Bonding Type, đại diện cho các mối hàn giữa các thành phần kết cấu, giúp đảm bảo sự gắn kết giữa các bộ phận chính của khung xe. Ngoài ra, các phần tử tiếp xúc được sử dụng để mô phỏng chính xác sự phân bố ứng suất tại vùng liên kết hàn, từ đó đánh giá mức độ chịu tải của các vị trí này.



Hình 3.18. Thiết lập liên kết giữa các bề mặt vật thể



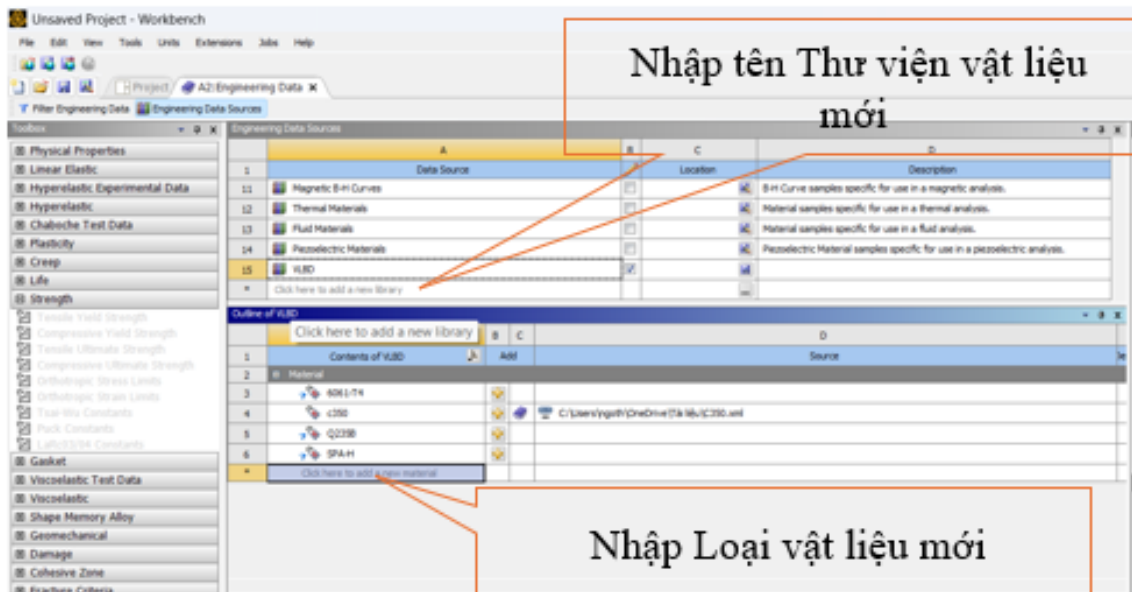
Hình 3.19. Thiết lập body Interaction và các tham số liên quan

Thiết lập body Interaction được áp dụng để mô phỏng sự tương tác giữa các bộ phận trong cấu trúc xe buýt điện sử dụng trong đề án. Sự tương tác giữa khung xe và vỏ xe cũng

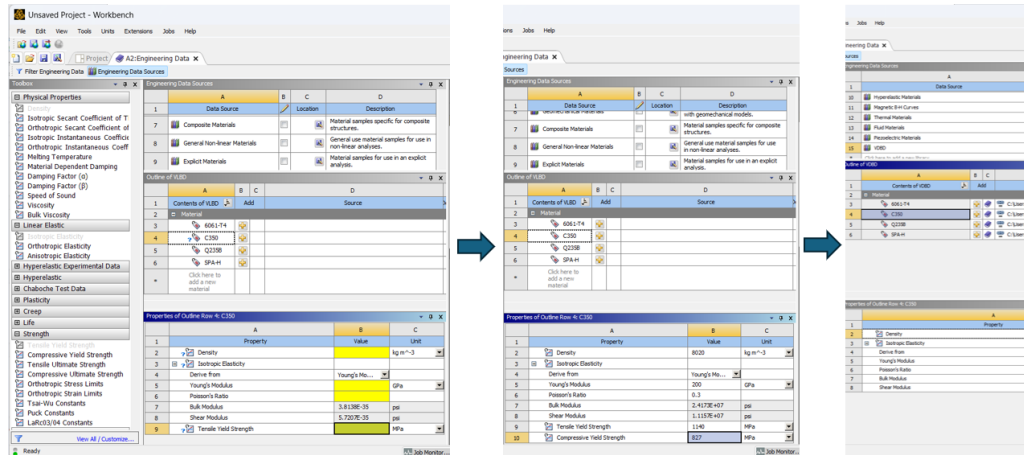
được tính toán nhằm phản ánh chính xác cách phân bố ứng suất khi xảy ra va chạm. Bên cạnh đó, khối **pin ảnh** hưởng lớn đến động lực học tổng thể, do đó tương tác giữa hệ thống pin và khung xe cũng được xem xét cẩn thận trong mô hình. Hệ thống truyền động và động cơ điện cũng tác động đáng kể đến cách phân bố lực khi xảy ra va chạm, vì vậy mô phỏng sự tương tác giữa các thành phần này giúp đảm bảo kết quả mô phỏng phản ánh đúng thực tế

3.2.3. Thiết lập vật liệu cho mô hình mô phỏng.

– Vật liệu dùng trong thiết kế khung xương xe buýt điện chưa có trong thư viện vật liệu của Ansys, để thuận tiện cho quá trình mô phỏng, nghiên cứu viên đã tạo thư viện vật liệu mang tên VLBD (Vật liệu dùng mô phỏng buýt điện) bao gồm các vật liệu thép C350, thép Q235B và thép SPA-H và hợp kim nhôm 6061-T4. Để thiết lập các thông số vật liệu, nghiên cứu viên nhấp kép chuột vào Engineering Data của trong Ansys, của sổ Engineering Data hiện ra như hình sau. Trên **cửa sổ** này ta nhập tên thư viện vật liệu (VLBD) vào ô Click here to a new library. Và nhập tên loại vật liệu (C350, Q235B, SPA-H, 6061-T4) vào ô Click here to a new material. Hình dưới là kết quả sau khi tạo thư viện vật liệu mới cho Ansys.

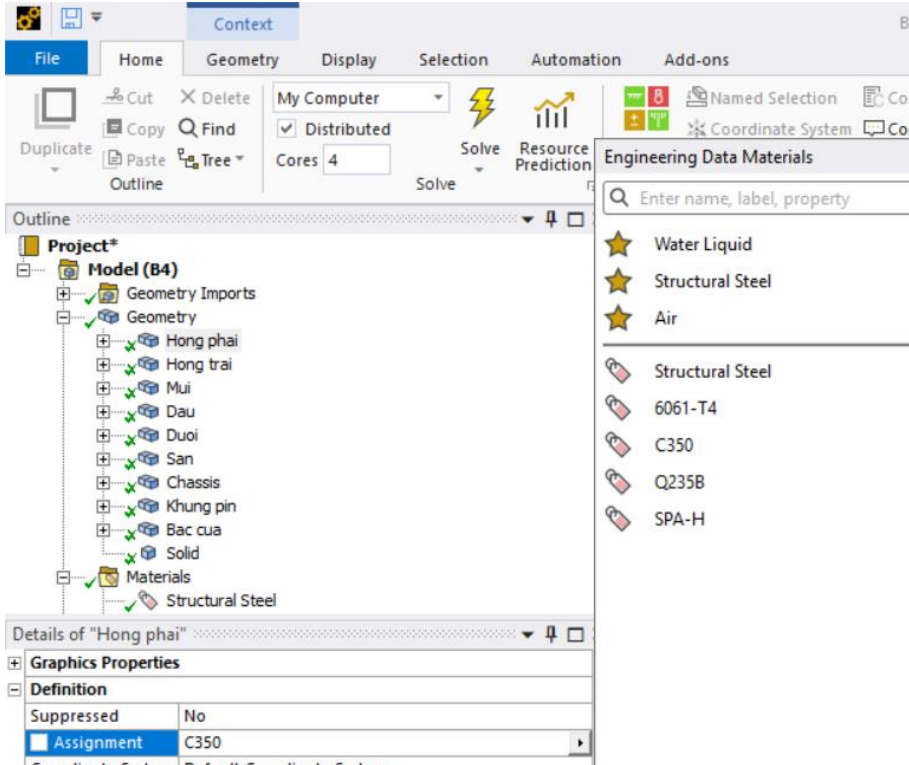


Hình 3.20. Kết quả sau khi tạo thư viện vật liệu VLBD trong Ansys



Hình 3.21. Thiết lập các thông số cho vật liệu thép C350.

– Nhập các thuộc tính vật liệu với các thông số được cung cấp trong bảng 3.2. Chọn loại vật liệu muốn **nhập** thuộc tính, chọn các thuộc tính muốn thiết lập trong toolbox, nhập các thông số cho vật liệu. Hình 3.21 thể hiện việc thiết lập thông số kỹ thuật cho vật liệu thép C350. Các thông số được nhập gồm: Khối lượng riêng: 8020 Kg/m³; Mô đun đàn hồi 200 GPa; Hệ số poisson 0.3; Cường độ chịu kéo: 827 Mpa; Độ bền kéo 1140 Mpa



Hình 3.22. Cửa sổ Model khi thiết lập vật liệu cho hông phải của xe

Vào Model chọn thiết lập thuộc tính vật liệu cho từng chi tiết của khung thân xe. Như hình 3.22 thể hiện đang thiết lập thuộc tính vật liệu cho khung hông phải của xe. Tất cả khung hông thép của xe được sử dụng thép C350 theo bản vẽ thiết kế.

3.2.4. Thiết lập điều kiện biên.

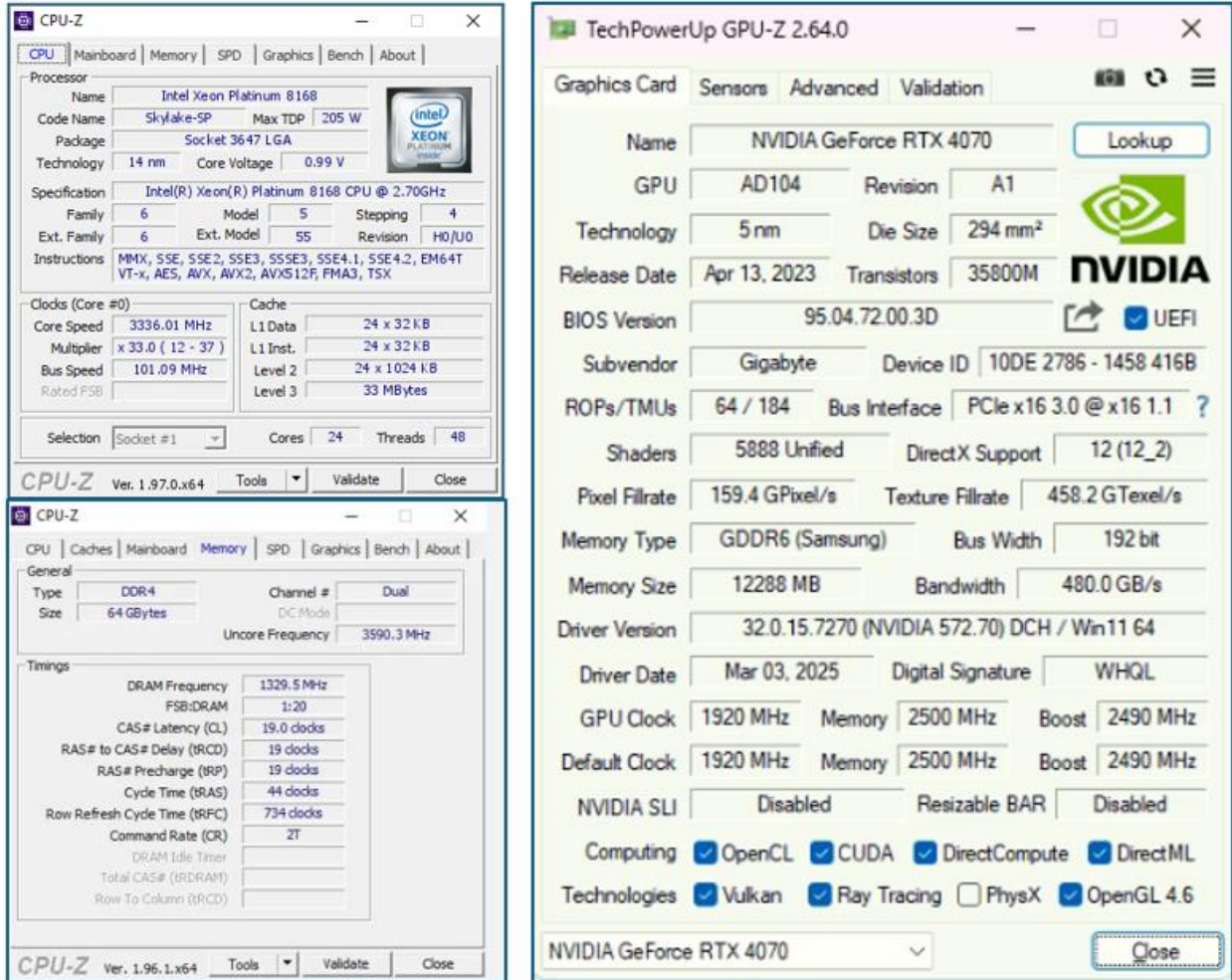
- Thiết lập tường cứng.
- Thiết lập xe cản.
- Thiết lập đường.
- Thiết lập vận tốc ban đầu, vận tốc khi va chạm.
- Thiết lập thời gian va chạm.

3.2.5. Cấu hình máy tính sử dụng trong mô phỏng

Mô phỏng va chạm yêu cầu hiệu suất tính toán cao để xử lý lượng lớn dữ liệu và thuật toán phức tạp. Để đảm bảo quá trình mô phỏng diễn ra hiệu quả, hệ thống máy tính sử dụng bao gồm một workstation chuyên dụng với cấu hình như sau:

- Bộ xử lý (CPU): Dual Intel Xeon Platinum 8168, mỗi CPU có 48 nhân (24 core 48 threads), tổng cộng 96 nhân xử lý.
- Bộ nhớ RAM: 64GB DDR4 bus 3600 MHz, đảm bảo khả năng xử lý dữ liệu lớn trong quá trình mô phỏng.
- Ổ cứng: SSD NVMe 1TB, giúp tăng tốc độ đọc/ghi dữ liệu.
- Card đồ họa (GPU): NVIDIA RTX 4070 với 12GB VRAM, hỗ trợ tính toán đồ họa và xử lý mô phỏng hiệu quả hơn sử dụng CUDA.

Cấu hình này giúp đảm bảo tốc độ tính toán nhanh, giảm thời gian xử lý trong các bước mô phỏng, từ thiết lập lưới phần tử đến quá trình chạy phân tích động lực học.



Hình 3.23. Cấu hình máy tính sử dụng trong mô phỏng

3.3. Phân tích kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng được phân tích nhằm đánh giá mức độ hư hỏng của khung xe buýt điện trong các điều kiện va chạm khác nhau. Các giá trị ứng suất, biến dạng, cũng như sự lan truyền lực trong toàn bộ hệ thống xe được xem xét dựa trên dữ liệu thu được từ ANSYS Dynamic. Mục tiêu chính của phân tích này là xác định vùng có nguy cơ hư hỏng cao nhất, đánh giá khả năng chịu lực của vật liệu và so sánh sự khác biệt giữa các trường hợp va chạm.

3.3.1. Ứng suất và phân bố lực tác động

Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng ứng suất Von Mises tập trung cao nhất tại khu vực đâm trước của khung xe, đặc biệt tại các mối hàn nối giữa dầm ngang và trụ chính. Ở vận tốc va

chạm 70 km/h với tường cứng, ứng suất tại khu vực này đạt giá trị cực đại khoảng 550 MPa, tiến gần tới giới hạn bền kéo của thép kết cấu. Ngược lại, khi va chạm với một xe khác ở cùng vận tốc, ứng suất cực đại chỉ đạt khoảng 380 MPa, cho thấy rằng va chạm mềm giúp giảm đáng kể tải trọng tác động lên khung xe.

Bảng 3.6. Giá trị ứng suất tối đa tại một số vị trí quan trọng của khung xe

Vị trí	Ứng suất tối đa (MPa) - Tường cứng	Ứng suất tối đa (MPa) - Xe khác
Dầm ngang trước	550	380
Cột trụ A	470	320
Liên kết hàn giữa dầm và trụ	510	350
Thanh giằng dọc	430	300

Đối với trường hợp va chạm với một xe khác, do sự hấp thụ lực tốt hơn của vật liệu mềm, vùng biến dạng rộng hơn nhưng mức ứng suất đỉnh thấp hơn so với va chạm với tường cứng. Lực tác động được phân bố đều hơn trên toàn bộ cấu trúc xe, làm giảm nguy cơ gãy đột ngột tại các điểm chịu lực lớn.

3.3.2. Biến dạng tổng và khả năng hấp thụ năng lượng

Kết quả mô phỏng cho thấy biến dạng tổng của khung xe phụ thuộc rất lớn vào loại va chạm và vận tốc ban đầu. Trong trường hợp va chạm với tường cứng ở vận tốc 70 km/h, phần đầu xe bị ép lại với mức dịch chuyển tối đa 680 mm, trong khi ở vận tốc 50 km/h mức dịch chuyển giảm xuống 420 mm.

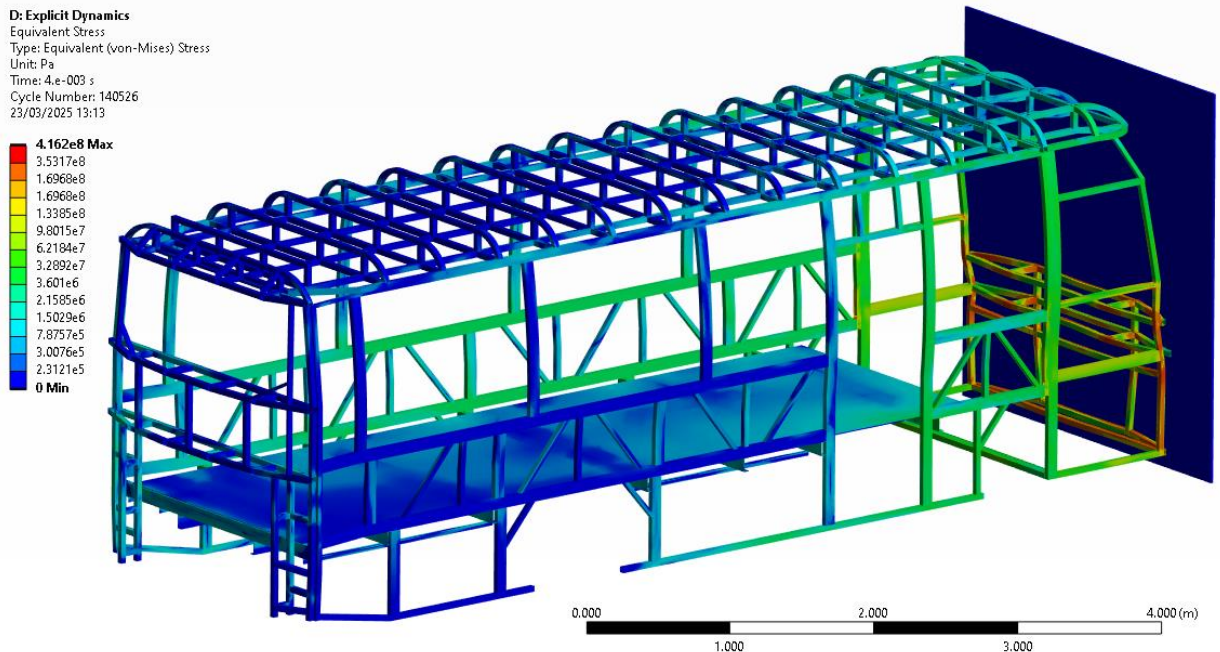
Bảng 3.7. Bảng Phân bố biến dạng tổng của khung xe theo từng trường hợp va chạm

Trường hợp	Biến dạng tối đa (mm)
Tường cứng - 30 km/h	230
Tường cứng - 50 km/h	420
Tường cứng - 70 km/h	680

Xe khác - 50 km/h	340
Xe khác - 70 km/h	510

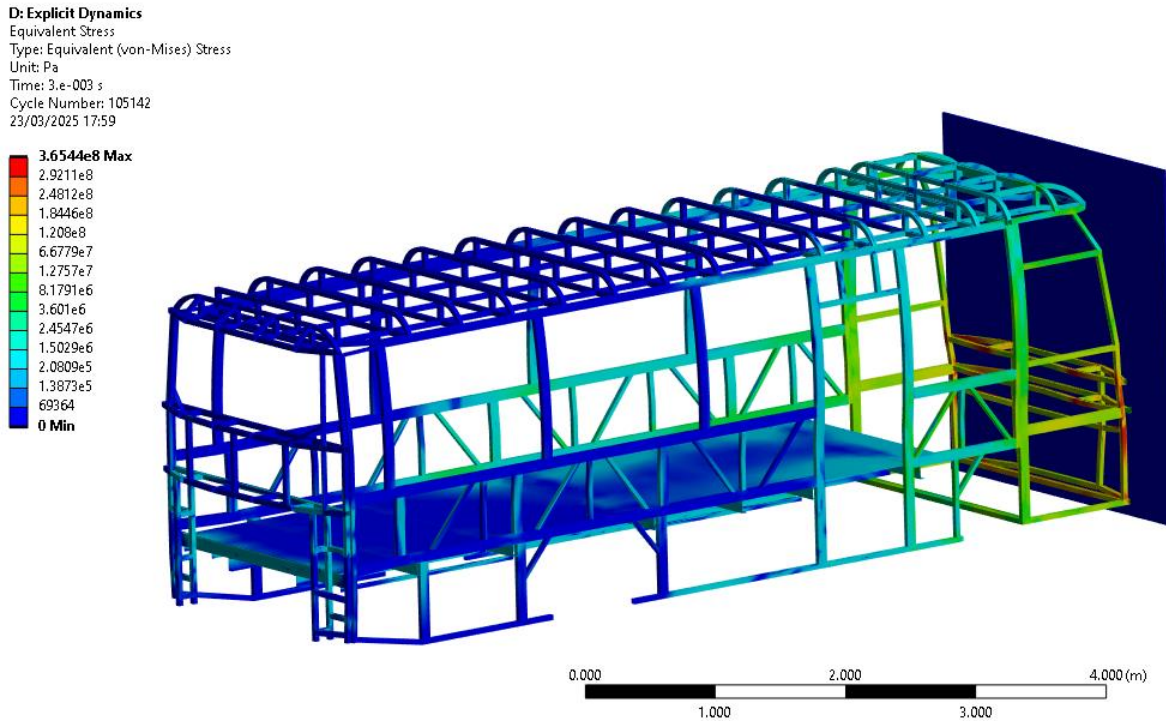
Khi va chạm với một xe khác, do hệ số đàn hồi của vật thể đối diện, mức biến dạng tổng ở vận tốc 70 km/h giảm xuống còn 510 mm, giúp bảo toàn một phần cấu trúc khung xe. Các bộ phận chịu lực chính ít bị tổn thương hơn, nhưng vỏ xe và các bộ phận ngoại thất có thể bị méo mó nghiêm trọng hơn do sự lan truyền lực va chạm.

a) Khi va chạm với tường cứng



Hình 3.24. Biểu đồ phân bố ứng suất tổng của khung xe bằng thép trong trường hợp đang di chuyển với vận tốc 70km/h và va chạm với tường cứng.

Mô phỏng va chạm khung xe bằng vật liệu thép ở vận tốc 70 km/h (hình 3.24), với khối lượng áp đặt **bao gồm hành khách** là 1800 kg, cho thấy phân bố ứng suất tương đương (von-Mises) đặc trưng của trạng thái chịu tải động cường độ cao. Trong mô phỏng tại thời điểm 4 ms, ứng suất cực đại đạt đến 4.16×10^8 Pa, tập trung chủ yếu ở vùng đầu xe, đặc biệt là các thanh dọc và ngang ở mặt trước tiếp xúc trực tiếp với tường chắn. Đây là vùng chịu tải va chạm chính, phản ánh hiện tượng tập trung ứng suất (stress concentration) và là nơi dễ xảy ra biến dạng dẻo cục bộ (localized plastic deformation).



Hình 3.25. Biểu đồ phân bố ứng suất tổng của khung xe hợp kim nhôm trong trường hợp đang di chuyển với vận tốc 70km/h và chạm với tường cứng.

Nhờ đặc tính cơ học của thép với mô đun đàn hồi và giới hạn chảy cao, phần còn lại của khung xe – bao gồm vùng thân giữa và đuôi – vẫn duy trì cấu trúc ổn định, với ứng suất phân bố chủ yếu trong khoảng 10^6 – 10^7 Pa, dưới ngưỡng chảy của vật liệu. Điều này thể hiện khả năng phân tán năng lượng và chạm hiệu quả, đồng thời giảm thiểu độ xuyên vào khoang hành khách (intrusion) – một yếu tố quan trọng trong đánh giá an toàn va chạm. Việc áp đặt khối lượng bổ sung 1800 kg làm tăng động lượng của hệ thống, từ đó đòi hỏi khung xe phải hấp thụ một lượng lớn nội năng (internal energy) thông qua biến dạng vật liệu. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng cho thấy hệ kết cấu thép vẫn đảm bảo giới hạn làm việc an toàn, đồng thời gợi ý tiềm năng tối ưu hóa thêm ở vùng đầu xe nhằm giảm khối lượng mà không ảnh hưởng đến khả năng hấp thụ xung lực.

Hình 3.22 mô phỏng động học rõ ràng thể hiện hiệu ứng phân bố ứng suất tương đương (von-Mises stress) trên khung xe bằng vật liệu hợp kim nhôm khi va chạm trực diện. Tại

thời điểm 3 ms, ứng suất cực đại đạt 3.565×10^8 Pa, tập trung chủ yếu ở phần đầu xe – nơi tiếp xúc trực tiếp với vật cản, phản ánh hiện tượng tập trung ứng suất nghiêm trọng tại các cấu kiện thanh dọc và thanh chéo chịu lực chính.

Với đặc tính cơ học của hợp kim nhôm – có mô đun đàn hồi và giới hạn chảy thấp hơn thép – khung xe dễ bước vào vùng biến dạng dẻo (plastic deformation) sớm hơn khi ứng suất vượt qua ngưỡng bền. Mô hình cũng cho thấy các vùng ứng suất lan tỏa rộng vào phần thân trước và trung tâm của xe, chứng tỏ mức độ truyền lực động học lan rộng (stress propagation) cao hơn so với cấu trúc sử dụng thép. Điều này là hệ quả trực tiếp của khả năng hấp thụ năng lượng va chạm kém hơn của vật liệu từ nhôm, khiến thiết kế cần được gia cường tại các vùng trọng yếu. Mặc dù vậy, việc sử dụng vật liệu từ nhôm mang lại lợi ích đáng kể về giảm khối lượng, giúp hạ thấp động lượng ban đầu và phần nào giảm mức năng lượng va chạm cần hấp thụ.

Tổng thể, kết quả cho thấy nhôm có thể được sử dụng hiệu quả trong thiết kế khung xe, tuy nhiên cần có chiến lược tối ưu hóa hình học và phân vùng vật liệu hợp lý để đảm bảo hiệu suất hấp thụ xung lực và độ bền kết cấu trong các kịch bản va chạm tốc độ cao.

D: Explicit Dynamics

Equivalent Stress

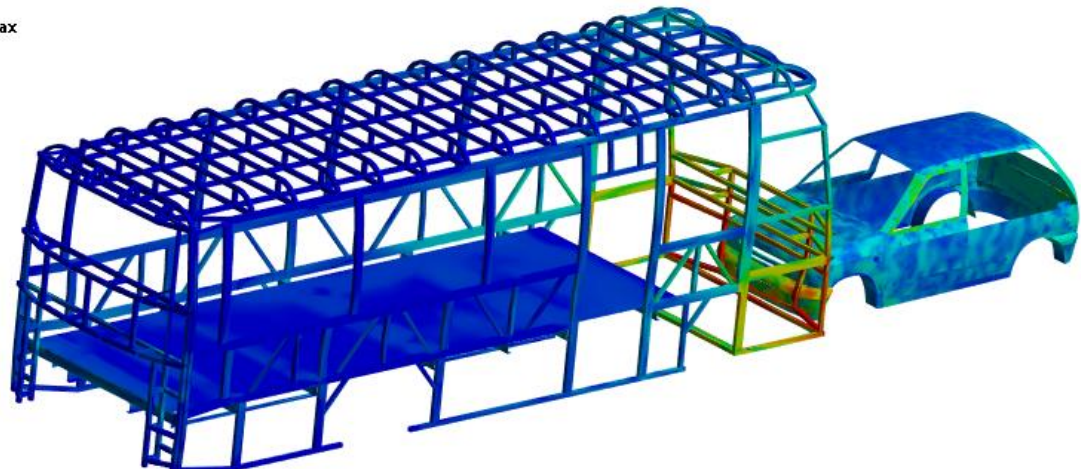
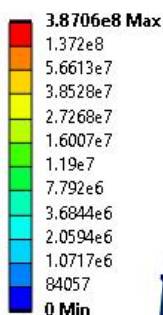
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom

Unit: Pa

Time: 4.e-003 s

Cycle Number: 139852

24/03/2025 08:46

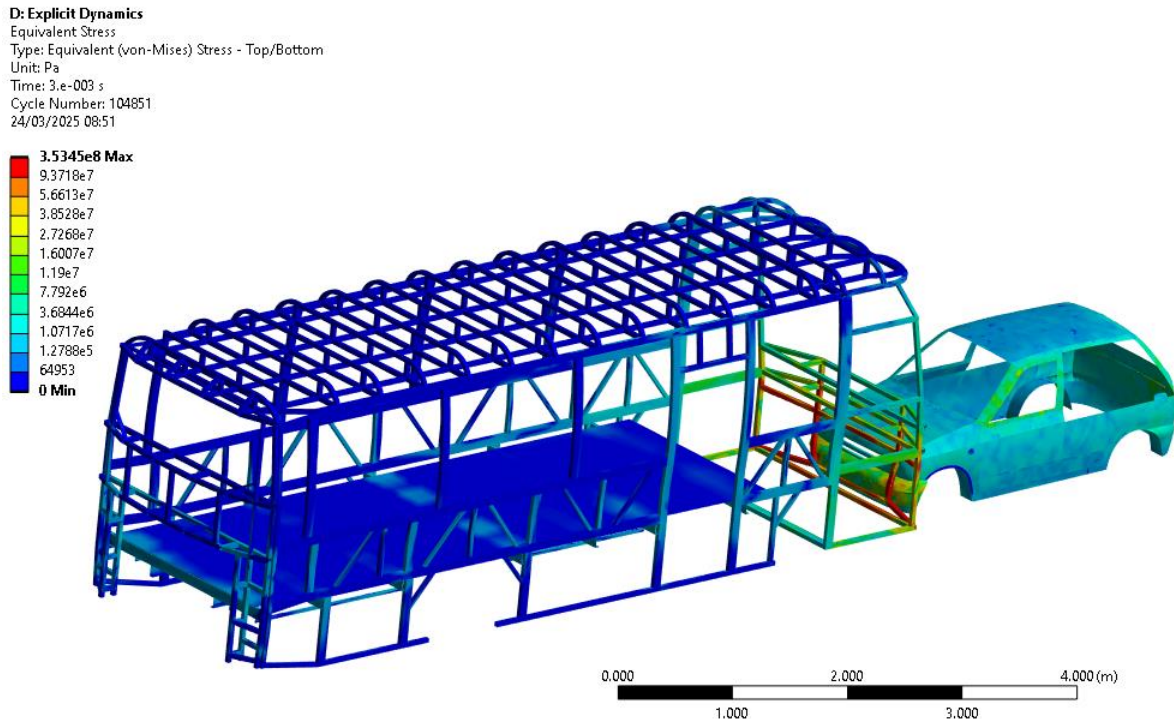


Hình 3.26. Biểu đồ phân bố ứng suất tổng của khung xe bằng thép trong trường hợp đang di chuyển với vận tốc 70km/h và chạm với xe đối diện.

b) Khi va chạm với xe khác.

Mô phỏng va chạm trực diện giữa xe buýt điện và xe đôi điện (hình 3.26), với vật liệu khung là thép. Trong mô phỏng, kết quả tại thời điểm 4 ms cho thấy ứng suất tương đương (von-Mises) cực đại đạt đến 3.87×10^8 Pa, phân bố chủ yếu tại vùng đầu xe và khung sàn phía trước, nơi trực tiếp tiếp nhận và hấp thụ xung lực va chạm. Các cấu kiện dọc, chéo và hệ giằng ngang tại đây biểu hiện rõ rệt hiện tượng tập trung ứng suất, có thể dẫn đến biến dạng dẻo cục bộ trong vùng vượt ngưỡng giới hạn chảy.

Với đặc tính cơ học của thép như mô đun đàn hồi lớn (≈ 200 GPa) và giới hạn chảy cao, hệ kết cấu cho thấy khả năng duy trì ổn định tốt, với phần lớn cấu trúc thân giữa và mái xe vẫn nằm trong ngưỡng ứng suất an toàn. Hiện tượng phân tán xung lực theo phương dọc trục được ghi nhận rõ, cho thấy hiệu quả trong việc giảm thiểu ảnh hưởng lan truyền đến khoang hành khách – một tiêu chí quan trọng trong đánh giá an toàn thụ động.



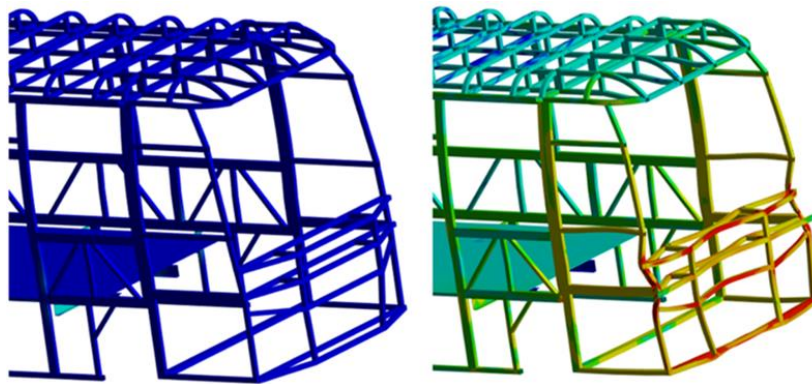
Hình 3.27. Biểu đồ phân bố ứng suất tổng của khung xe bằng hợp kim nhôm, trong trường hợp đang di chuyển với vận tốc 70km/h và va chạm với xe đôi điện.

Tổng thể, mô hình cho thấy rằng vật liệu thép vẫn đóng vai trò then chốt trong thiết kế

khung xe buýt điện nhờ vào khả năng chịu tải lớn, hiệu suất hấp thụ năng lượng tốt và tính ổn định hình học cao trong điều kiện tải trọng động lớn. Tuy nhiên, để đáp ứng yêu cầu tối ưu khối lượng trong phương tiện điện hóa, cần kết hợp thiết kế tối ưu hóa hình học và phân vùng kết cấu hợp lý, hoặc hướng tới vật liệu lai (hybrid structures) để cân bằng giữa độ bền và hiệu quả khối lượng.

Hình 3.27 mô phỏng va chạm trực diện giữa xe buýt điện và xe đối diện trong đó khung xe buýt được chế tạo bằng hợp kim nhôm. Tại thời điểm 3 ms, kết quả phân tích ứng suất cho thấy giá trị von-Mises cực đại đạt 3.535×10^8 Pa, tập trung tại các thanh khung trước của xe buýt – nơi tiếp nhận trực tiếp lực va đập từ đầu xe đối phương. Đây là dấu hiệu của hiện tượng tập trung ứng suất cục bộ, phản ánh rõ rệt biến dạng dẻo sớm tại các cấu kiện biên chịu lực chính của vật liệu nhôm.

Mặc dù giá trị ứng suất cực đại tương đương với mô hình thép trong điều kiện tương tự, do giới hạn chảy và độ cứng thấp hơn, hợp kim nhôm có xu hướng xuất hiện biến dạng dẻo lan rộng và có nguy cơ nứt gãy tại các điểm giao cắt hoặc nút nối yếu nếu không được gia cường phù hợp. Biểu đồ màu sắc cũng cho thấy mức lan truyền ứng suất kéo dài từ vùng va chạm đến các thanh bên và phần sàn khung giữa, cho thấy khả năng lan truyền xung lực mạnh, đặt ra yêu cầu nghiêm ngặt về thiết kế tối ưu để kiểm soát độ xuyên (intrusion) vào khoang hành khách.

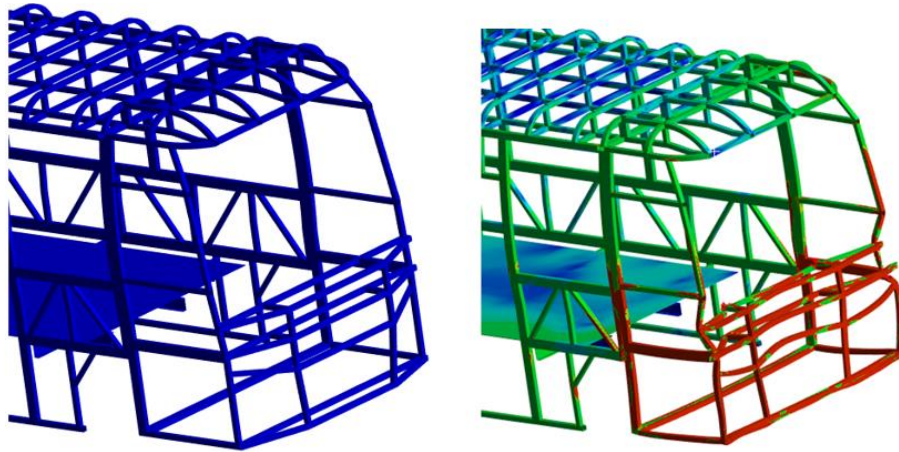


Hình 3.28. Biến dạng của khung xe bằng thép trong trường hợp va chạm với xe đối diện.

Tuy nhiên, việc sử dụng hợp kim nhôm mang lại ưu thế rõ rệt về giảm trọng lượng,

giúp hạn chế tổng động lượng của hệ trong va chạm và góp phần tăng hiệu suất vận hành đối với phương tiện điện. Điều này làm nổi bật tiềm năng của vật liệu nhôm trong thiết kế hiện đại, với điều kiện phải kết hợp với tối ưu hóa hình học, gia cường cục bộ và thậm chí là kết cấu vật liệu hỗn hợp (multi-material design) để cân bằng giữa độ nhẹ và khả năng chống chịu va chạm. Hình 3.28 mô phỏng va chạm trực diện xe buýt điện, trong đó vật liệu khung là thép. Hình ảnh thể hiện trạng thái khung trước và sau va chạm tại thời điểm 50 ms. Giá trị ứng suất von-Mises cực đại đạt khoảng 6.9032×10^8 Pa, cho thấy mức độ chịu tải lớn tại vùng đầu xe.

Sau va chạm, có thể quan sát rõ hiện tượng biến dạng dẻo cục bộ tại các thanh dọc, thanh xiên và hệ khung bao quanh phần đầu xe. Màu đỏ và cam phân bố rộng trong khu vực này, phản ánh tình trạng tập trung ứng suất cao, dẫn đến méo mó hình học nhưng vẫn giữ được sự liên kết kết cấu tổng thể. So với vật liệu nhôm trong cùng điều kiện, thép thể hiện ưu thế rõ rệt về khả năng hấp thụ xung lực thông qua biến dạng phân tán, đồng thời giới hạn sự lan truyền ứng suất về phía sau xe – minh chứng qua việc các vùng giữa và mái xe vẫn duy trì trong ngưỡng ứng suất an toàn.



Hình 3.29. Biến dạng của khung xe hợp kim nhôm trong trường hợp va chạm với xe đôi điện.

Hình 3.29 mô phỏng va chạm trực diện giữa xe buýt điện và xe đôi điện với khung xe sử dụng vật liệu hợp kim nhôm. Kết quả mô phỏng tại thời điểm 4 ms cho thấy ứng suất tương đương (von-Mises stress) tại phần trước khung xe đạt cực đại lên tới 3.8706×10^8

Pa, tập trung rõ rệt ở các thanh dọc, giằng ngang và vùng bao quanh cửa lên xuống phía trước – chính là nơi tiếp nhận trực tiếp xung lực từ phương tiện va chạm.

Phân bố ứng suất trong khu vực này thể hiện qua các dải màu đỏ, cam và vàng – tương ứng với vùng có ứng suất vượt ngưỡng chảy của hợp kim nhôm. Điều này dẫn đến hiện tượng biến dạng dẻo cục bộ (localized plastic deformation) và có nguy cơ méo mó kết cấu (structural buckling) tại các mối nối, đặc biệt là tại giao điểm giữa các thanh chịu lực và khung bao cửa. Ngoài ra, hình ảnh bên phải còn cho thấy lan truyền ứng suất từ điểm va chạm đến phần thân giữa, phản ánh mức độ truyền lực dọc trục cao, đặc trưng cho vật liệu có độ cứng tương đối thấp như nhôm.

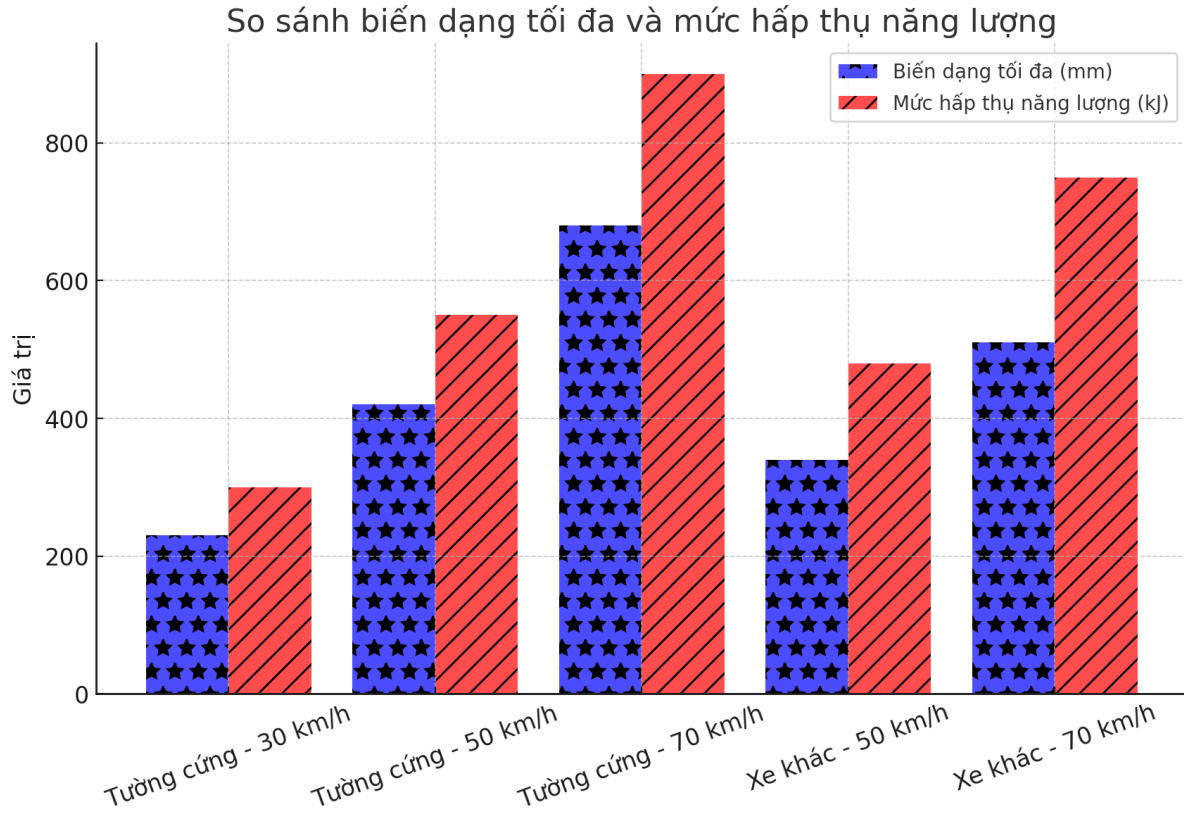
3.3.3. So sánh mức độ hư hỏng giữa các vật liệu

Việc thay đổi vật liệu sử dụng trong cấu trúc khung xe ảnh hưởng đáng kể đến khả năng hấp thụ năng lượng khi va chạm. Mô phỏng với khung xe làm bằng hợp kim nhôm 6061T4 cho thấy mức độ biến dạng tăng lên khoảng 18% so với khi sử dụng thép kết cấu, mặc dù ứng suất tối đa giảm xuống do đặc tính dẻo hơn của nhôm. Tuy nhiên, nhôm lại có xu hướng tập trung biến dạng tại một số vị trí nhất định thay vì phân tán đều như thép, khiến nguy cơ phá hỏng cục bộ tại các điểm yếu tăng cao.

Bảng 3.8. Ứng suất và biến dạng tối đa của hai cấu trúc với tường cứng thép kết cấu và hợp kim nhôm 6061

Vật liệu	Ứng suất tối đa (MPa) - Tường cứng	Biến dạng tối đa (mm) - Tường cứng
Thép kết cấu	550	680
Hợp kim nhôm 6061	410	800

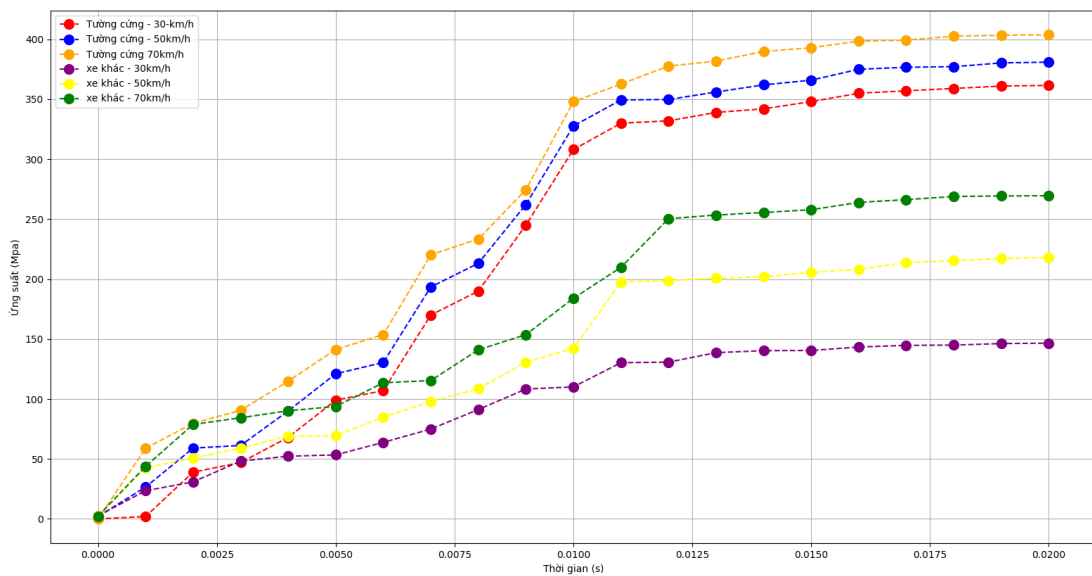
Trong trường hợp va chạm với xe khác, hợp kim nhôm thể hiện khả năng hấp thụ năng lượng tốt hơn nhờ đặc tính đàn hồi cao hơn so với thép. Ở vận tốc 70 km/h, biến dạng tổng của khung xe nhôm đạt 620 mm, cao hơn so với thép nhưng vẫn trong giới hạn an toàn của thiết kế. Điều này cho thấy việc sử dụng nhôm có thể giúp giảm trọng lượng tổng thể của xe mà vẫn đảm bảo khả năng hấp thụ va chạm tốt.



Hình 3.30. Biểu đồ cột so sánh biến dạng tối đa và mức hấp thụ năng lượng

Biểu đồ cột thể hiện rõ sự khác biệt về biến dạng tổng thể của khung xe buýt điện và mức hấp thụ năng lượng trong từng trường hợp va chạm khác nhau. Khi xe buýt điện va chạm với tường cứng, biến dạng tổng thể tăng dần theo mức tăng của vận tốc. Ở tốc độ 30 km/h, mức biến dạng đo được khoảng 230 mm, nhưng khi tốc độ tăng lên 50 km/h, biến dạng tăng gần gấp đôi, đạt 420 mm. Khi vận tốc va chạm đạt 70 km/h, phần đầu xe bị ép lại với mức dịch chuyển tối đa lên đến 680 mm, cho thấy rằng kết cấu thép của xe không thể hoàn toàn hấp thụ năng lượng va chạm mà thay vào đó, xảy ra biến dạng dẻo nghiêm trọng tại khu vực va chạm. Mức hấp thụ năng lượng trong các trường hợp va chạm với tường cứng cũng cho thấy sự gia tăng đáng kể khi vận tốc tăng lên. Ở vận tốc 30 km/h, mức hấp thụ năng lượng là 300 kJ, nhưng khi tăng lên 50 km/h, con số này tăng lên 550 kJ, gần gấp đôi. Ở vận tốc 70 km/h, mức hấp thụ năng lượng đạt đỉnh với giá trị 900 kJ, cho thấy năng lượng từ va chạm hoàn toàn truyền vào hệ thống khung xe, gây ra mức hư hỏng nghiêm trọng nhất. Khi so sánh với các trường hợp va chạm với xe khác, có thể thấy rằng

mức biến dạng tổng thể và mức hấp thụ năng lượng giảm đi đáng kể. Ở tốc độ 50 km/h, mức biến dạng chỉ là 340 mm, thấp hơn đáng kể so với 420 mm của trường hợp va chạm với tường cứng. Điều này cho thấy rằng xe khác đóng vai trò như một bộ đệm hấp thụ lực va chạm, giúp giảm thiểu tổn hại trực tiếp lên khung xe buýt điện. Tương tự, ở tốc độ 70 km/h, biến dạng tổng thể của xe buýt khi va chạm với xe khác đạt 510 mm, thấp hơn gần 25% so với trường hợp va chạm với tường cứng. Điều này cũng đúng với mức hấp thụ năng lượng khi va chạm với xe khác. Ở vận tốc 50 km/h, mức hấp thụ năng lượng là 480 kJ, thấp hơn so với 550 kJ của tường cứng. Ở vận tốc 70 km/h, mức hấp thụ năng lượng đạt 750 kJ, thấp hơn 150 kJ so với trường hợp tường cứng. Điều này chứng minh rằng vật liệu mềm có khả năng hấp thụ một phần năng lượng va chạm, giúp giảm tải trọng tác động lên khung xe buýt, làm giảm thiểu nguy cơ hư hỏng nghiêm trọng.

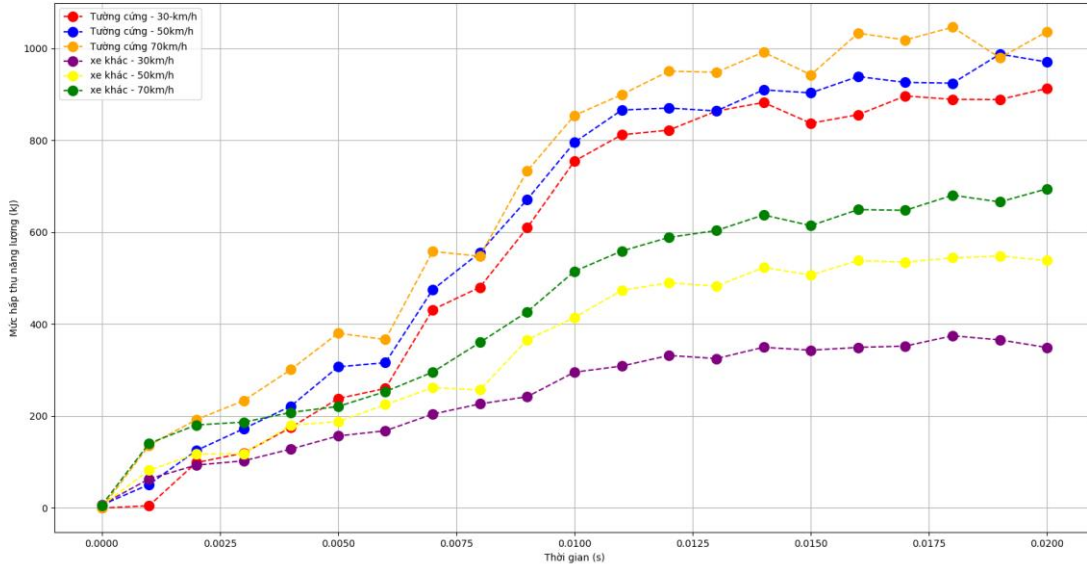


Hình 3.31. Biểu đồ ứng suất theo thời gian

Biểu đồ ứng suất theo thời gian (hình 3.31) cung cấp cái nhìn chi tiết hơn về cách ứng suất lan truyền trong kết cấu khung xe trong quá trình va chạm. Ở thời điểm bắt đầu, khi xe chưa tiếp xúc với vật cản, ứng suất vẫn ở mức 0 MPa. Khi va chạm xảy ra, ứng suất tăng đột biến trong thời gian rất ngắn do lực tác động trực tiếp lên khung xe. Trong trường hợp va chạm với tường cứng ở vận tốc 70 km/h, ứng suất nhanh chóng đạt đỉnh khoảng 417 MPa chỉ trong vòng 0.02 giây. Điều này cho thấy rằng lực tác động từ tường cứng được

truyền trực tiếp vào khung xe mà không có sự hấp thụ hoặc phân tán đáng kể. Khi so sánh với trường hợp va chạm với xe khác ở cùng vận tốc, có thể thấy rằng ứng suất tăng chậm hơn, đạt đỉnh khoảng **260 MPa** trong vòng **0.02** giây. Điều này phản ánh thực tế rằng vật liệu mềm giúp làm chậm lại quá trình truyền tải lực, cho phép kết cấu xe có thời gian hấp thụ va chạm tốt hơn. Khi xem xét vận tốc 50 km/h, ứng suất tối đa đo được trong trường hợp tường cứng đạt **375 MPa**, trong khi va chạm với xe khác, giá trị này chỉ khoảng **217 MPa**. Điều này một lần nữa khẳng định rằng va chạm với xe khác giúp giảm ứng suất đỉnh trong hệ thống khung xe, nhờ vào sự hấp thụ lực của vật liệu mềm. Khi tốc độ giảm xuống 30 km/h, ứng suất tối đa trong trường hợp tường cứng chỉ còn 360 MPa, trong khi va chạm với xe khác, giá trị này còn thấp hơn, khoảng 150 MPa. Dữ liệu từ biểu đồ cũng cho thấy rằng sau khi đạt đỉnh, ứng suất giảm dần theo thời gian khi năng lượng từ va chạm được phân tán và biến dạng ổn định. Trong tất cả các trường hợp, ứng suất giảm về gần 0 sau khoảng 0.2 giây, chứng minh rằng va chạm chỉ diễn ra trong thời gian rất ngắn, nhưng có ảnh hưởng lớn đến tính toàn vẹn của kết cấu khung xe.

Biểu đồ mức hấp thụ năng lượng theo thời gian (hình 3.32) cho thấy sự thay đổi dần dần của năng lượng hấp thụ trong quá trình va chạm. Khi xe bắt đầu va chạm với vật cản, mức hấp thụ năng lượng tăng lên nhanh chóng do lực tác động lớn truyền vào kết cấu xe. Đối với trường hợp va chạm với tường cứng ở vận tốc 70 km/h, mức hấp thụ năng lượng tăng đột biến, đạt 1065 KJ chỉ sau 0.02 giây và duy trì ở mức này cho đến khi va chạm kết thúc. Điều này cho thấy toàn bộ năng lượng va chạm gần như ngay lập tức được hấp thụ bởi khung xe mà không có sự phân tán nhiều. Khi so sánh với trường hợp va chạm với xe khác, mức hấp thụ năng lượng tăng chậm hơn, đạt khoảng 697 KJ trong vòng 0.02 giây, cho thấy sự hấp thụ dần dần của năng lượng thay vì truyền ngay lập tức vào hệ thống khung. Ở vận tốc 50 km/h, mức hấp thụ năng lượng trong trường hợp tường cứng đạt 969 KJ trong khoảng 0.02 giây, trong khi trong trường hợp va chạm với xe khác, giá trị này chỉ đạt 523 KJ trong cùng khoảng thời gian.



Hình 3.32. Biểu đồ mức hấp thụ năng lượng theo thời gian

Khi vận tốc giảm xuống 30 km/h, mức hấp thụ năng lượng đối với tường cứng chỉ đạt 910 KJ sau 0.02 giây, cho thấy rằng khi tốc độ giảm, mức năng lượng được hấp thụ cũng giảm theo. Một điểm quan trọng từ biểu đồ này là khi va chạm xảy ra với tường cứng, mức hấp thụ năng lượng đạt đến đỉnh trong thời gian rất ngắn và không thay đổi đáng kể sau đó. Ngược lại, trong trường hợp va chạm với xe khác, mức hấp thụ năng lượng tăng lên từ từ và đạt đỉnh muộn hơn, cho thấy quá trình truyền lực diễn ra mượt mà hơn, giảm thiểu tác động tiêu cực đến khung xe. Từ kết quả này, có thể rút ra rằng việc thiết kế các vùng hấp thụ năng lượng mềm trên xe buýt điện, hoặc sử dụng vật liệu có tính đàn hồi cao hơn, có thể giúp giảm thiểu tác động va chạm và bảo vệ hành khách tốt hơn.

3.3.4. Đánh giá mức độ an toàn và đề xuất cải tiến

Kết quả mô phỏng cho thấy rằng thiết kế khung xe hiện tại chịu được va chạm trực diện ở mức vận tốc thấp đến trung bình, nhưng có nguy cơ bị hỏng nghiêm trọng khi va chạm ở vận tốc cao với vật thể cứng. Điều này đòi hỏi các biện pháp cải tiến như tăng cường hệ thống thanh giằng và sử dụng vật liệu lai ghép để cân bằng giữa khả năng chịu lực và hấp thụ năng lượng.

3.4. Đề xuất giải pháp thiết kế khung xe buýt điện

Dựa trên kết quả phân tích mô phỏng, có thể thấy rằng khung xe buýt điện hiện tại đã

đạt được những tiêu chí an toàn cơ bản nhưng vẫn tồn tại nhiều vấn đề cần cải thiện để nâng cao khả năng bảo vệ hành khách và đảm bảo độ bền trong điều kiện va chạm thực tế. Các cải tiến thiết kế cần hướng đến mục tiêu tối ưu hóa kết cấu khung xe để giảm mức độ hư hỏng, gia tăng khả năng hấp thụ năng lượng và đảm bảo sự ổn định của toàn bộ hệ thống.

Một trong những giải pháp quan trọng nhất là tăng cường vùng chịu lực chính bằng cách tối ưu hóa hình dạng kết cấu. Các phân tích mô phỏng đã chỉ ra rằng vùng dầm ngang trước và các liên kết hàn giữa các thanh chịu lực là những vị trí có ứng suất tập trung cao nhất khi xảy ra va chạm. Do đó, cần thiết kế lại những khu vực này để phân bố lực đều hơn và giảm nguy cơ hỏng hóc cục bộ. Việc bổ sung các thanh giằng hỗ trợ hoặc sử dụng kết cấu hộp kép có thể giúp cải thiện đáng kể độ cứng vững của khung xe mà không làm gia tăng đáng kể trọng lượng tổng thể.

Ngoài tối ưu hóa hình dạng, việc thay đổi vật liệu hoặc phối hợp thép và hợp kim nhôm cũng là một giải pháp khả thi nhằm giảm khối lượng xe trong khi vẫn đảm bảo độ cứng vững cần thiết. Phân tích đã chỉ ra rằng hợp kim nhôm có thể giảm trọng lượng đáng kể nhưng lại dễ bị biến dạng cục bộ hơn so với thép kết cấu. Do đó, một thiết kế lai ghép giữa hai vật liệu có thể là lựa chọn tối ưu, trong đó các khu vực chịu lực chính như dầm ngang và cột trụ sử dụng thép cường độ cao, còn các bộ phận ít chịu tải hơn như vỏ xe và các thanh chịu lực phụ có thể làm từ hợp kim nhôm để giảm trọng lượng xe. Việc này không chỉ giúp tăng hiệu suất vận hành mà còn giảm tiêu hao năng lượng, kéo dài tuổi thọ pin và tối ưu hóa hiệu suất động lực học tổng thể.

Bên cạnh đó, cải thiện tiêu chí lưới trong mô hình phần tử hữu hạn (FEM) cũng đóng vai trò quan trọng trong việc tăng độ chính xác của phân tích va chạm. Việc chia lưới mịn hơn tại các khu vực có xác suất hư hỏng cao, chẳng hạn như phần đầu xe và các mối hàn quan trọng, sẽ giúp cải thiện khả năng dự báo ứng suất tập trung và biến dạng của mô hình. Trong khi đó, ở những khu vực ít chịu ảnh hưởng hơn, có thể sử dụng lưới thô hơn để giảm thiểu thời gian tính toán mà không làm ảnh hưởng đến độ chính xác tổng thể của mô phỏng. Điều này giúp cải thiện hiệu suất tính toán, cho phép thực hiện các phân tích nâng cao với độ chính xác cao hơn mà không làm tăng quá nhiều chi phí tính toán.

Một khía cạnh quan trọng khác là tăng cường các khu vực dễ bị phá hủy bằng cách gia

cố liên kết hàn và bổ sung các thanh giằng. Kết quả mô phỏng đã chỉ ra rằng các liên kết hàn giữa các thành phần chịu lực chính là điểm yếu dễ bị tổn thương nhất trong quá trình va chạm. Việc cải tiến công nghệ hàn, chẳng hạn như sử dụng phương pháp hàn xung điện hoặc hàn ma sát khuấy, có thể giúp tăng độ bền của các mối nối và giảm nguy cơ nứt gãy. Đồng thời, việc bổ sung các thanh giằng chéo hoặc sử dụng các mối nối bằng bu lông cường độ cao tại các vị trí quan trọng cũng giúp cải thiện độ bền tổng thể của kết cấu xe, từ đó giảm thiểu mức độ hư hỏng khi xảy ra va chạm mạnh.

Một đề xuất cải tiến đáng chú ý khác là thiết kế vùng hấp thụ năng lượng thông minh. Các vùng này có thể được thiết kế dưới dạng hệ thống thanh chịu lực biến dạng có kiểm soát, cho phép hấp thụ năng lượng va chạm mà không làm tổn hại đến khoang hành khách. Một số phương án khả thi bao gồm việc sử dụng thanh chịu lực bằng vật liệu composite hoặc hợp kim nhôm có tính đàn hồi cao, kết hợp với các cơ cấu biến dạng có chủ đích giúp giảm thiểu tác động của lực va chạm lên phần khung chính của xe. Điều này giúp giảm thiểu nguy cơ thương tích cho hành khách và tăng khả năng bảo vệ toàn bộ hệ thống.

Ngoài ra, một phương pháp tiếp cận hiệu quả trong việc cải thiện tính an toàn của xe buýt điện là sử dụng vật liệu kết hợp giữa nhôm và thép để tối ưu hóa trọng lượng và độ bền của khung xe. Thép có ưu điểm về độ bền cao nhưng nặng, trong khi nhôm có khả năng hấp thụ năng lượng tốt nhưng dễ bị biến dạng. Một thiết kế kết hợp hai vật liệu này sẽ giúp tận dụng những ưu điểm của từng loại, tạo ra một cấu trúc khung xe vừa nhẹ vừa bền, giúp nâng cao hiệu suất tổng thể mà vẫn đảm bảo mức độ an toàn cao nhất.

Tóm lại, các phân tích mô phỏng đã chỉ ra những điểm yếu và thách thức trong thiết kế hiện tại của khung xe buýt điện khi xảy ra va chạm. Các cải tiến đề xuất bao gồm tối ưu hóa hình dạng kết cấu, lựa chọn vật liệu phù hợp, cải thiện tiêu chí lưới FEM, tăng cường các khu vực dễ bị phá hủy, thiết kế vùng hấp thụ năng lượng hiệu quả và sử dụng vật liệu kết hợp. Những cải tiến này không chỉ giúp nâng cao độ bền của khung xe mà còn giảm thiểu nguy cơ thương tích cho hành khách, góp phần cải thiện tính an toàn và độ tin cậy của phương tiện. Từ đó, việc áp dụng những công nghệ và phương pháp thiết kế tiên tiến vào quá trình sản xuất xe buýt điện sẽ giúp đáp ứng các tiêu chuẩn an toàn quốc tế, đồng thời tối ưu hóa hiệu suất hoạt động của xe trong điều kiện vận hành thực tế.

KẾT LUẬN – KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Nghiên cứu này đã tiến hành mô phỏng va chạm trực diện của xe buýt điện nhằm phân tích mức độ hư hỏng của khung xe dưới các điều kiện va chạm khác nhau. Thông qua việc sử dụng phần mềm ANSYS Dynamic và phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), các thông số quan trọng như ứng suất Von Mises, biến dạng tổng và mức hấp thụ năng lượng đã được xác định. Kết quả nghiên cứu cho thấy rằng va chạm với tường cứng gây ra ứng suất tập trung cao hơn đáng kể so với va chạm với xe khác, dẫn đến nguy cơ hư hỏng cục bộ lớn hơn. Trong khi đó, va chạm với xe khác có xu hướng làm giảm ứng suất đỉnh nhờ vào khả năng hấp thụ lực tốt hơn của vật liệu đối diện.

Phân tích ứng suất chỉ ra rằng các vị trí có nguy cơ hư hỏng cao nhất bao gồm dầm ngang trước, liên kết hàn giữa dầm và trụ, cũng như các thanh giằng chịu lực chính. Khi va chạm xảy ra ở vận tốc 70 km/h với tường cứng, ứng suất cực đại tại dầm ngang trước đạt khoảng 550 MPa, tiệm cận giới hạn bền của thép kết cấu. Trong trường hợp va chạm với xe khác, giá trị này giảm xuống còn 380 MPa, cho thấy rằng việc phân tán lực va chạm đóng vai trò quan trọng trong việc giảm mức độ hư hỏng của xe buýt điện. Biến dạng tổng thể của khung xe cũng bị ảnh hưởng mạnh mẽ bởi loại va chạm. Khi va chạm với tường cứng, mức biến dạng tổng thể đạt 680 mm tại vận tốc 70 km/h, trong khi va chạm với xe khác, mức biến dạng chỉ đạt 510 mm. Sự khác biệt này cho thấy rằng vật liệu mềm hơn có thể giúp giảm thiểu tác động trực tiếp lên khung xe, đồng thời hạn chế mức độ biến dạng dẻo.

Mô phỏng cũng so sánh sự khác biệt giữa hai loại vật liệu chính là thép kết cấu và hợp kim nhôm 6061. Kết quả cho thấy rằng hợp kim nhôm giúp giảm đáng kể khối lượng xe nhưng lại có xu hướng biến dạng nhiều hơn khi va chạm. Khi sử dụng hợp kim nhôm 6061, biến dạng tổng thể tăng lên khoảng 18% so với thép kết cấu. Tuy nhiên, điều này cũng đồng nghĩa với việc khả năng hấp thụ năng lượng của nhôm tốt hơn, giúp phân tán lực va chạm hiệu quả hơn so với thép truyền thống.

Dựa trên những phát hiện từ mô phỏng, đề tài đã đề xuất một loạt cải tiến nhằm tăng

cường độ an toàn của xe buýt điện. Các biện pháp này bao gồm tối ưu hóa kết cấu khung xe, tăng cường liên kết hàn, thiết kế hệ thống hấp thụ năng lượng hiệu quả hơn và sử dụng vật liệu kết hợp giữa nhôm và thép để cân bằng giữa trọng lượng và độ bền. Những giải pháp này không chỉ giúp cải thiện tính an toàn mà còn góp phần nâng cao hiệu suất vận hành của xe buýt điện, giảm tiêu hao năng lượng và kéo dài tuổi thọ phương tiện[19].

Tóm lại, nghiên cứu này đã cung cấp một đánh giá toàn diện về ứng suất và biến dạng của xe buýt điện 29 chỗ khi va chạm, đồng thời đưa ra các giải pháp tối ưu hóa nhằm nâng cao mức độ an toàn của phương tiện. Những kết quả đạt được không chỉ có ý nghĩa trong lĩnh vực thiết kế xe buýt điện mà còn có thể được ứng dụng rộng rãi cho các phương tiện giao thông công cộng khác nhằm cải thiện khả năng chống va chạm và đảm bảo an toàn cho hành khách.

2. Kiến nghị và hướng phát triển đề tài

Mặc dù nghiên cứu này đã cung cấp một cái nhìn toàn diện về ảnh hưởng của va chạm đến kết cấu xe buýt điện, vẫn còn một số hạn chế cần được khắc phục trong các nghiên cứu tiếp theo. Trước hết, mô phỏng hiện tại chỉ tập trung vào va chạm trực diện mà chưa xem xét đến các kịch bản va chạm khác như va chạm bên hông hoặc va chạm từ phía sau. Những dạng va chạm này cũng đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá mức độ an toàn của xe và cần được nghiên cứu kỹ hơn để hoàn thiện mô hình phân tích.

Một hướng nghiên cứu quan trọng khác là mở rộng phạm vi vật liệu được sử dụng trong mô phỏng. Hiện tại, nghiên cứu mới chỉ so sánh giữa thép kết cấu và hợp kim nhôm 6061. Trong tương lai, có thể xem xét các vật liệu tiên tiến hơn như hợp kim nhôm-lithium, thép cường độ cao thế hệ mới hoặc vật liệu composite để đánh giá khả năng giảm khối lượng và tăng cường độ bền của khung xe. Ngoài ra, việc tích hợp các hệ thống bảo vệ chủ động, chẳng hạn như các vùng hấp thụ năng lượng có thể tái cấu trúc hoặc cơ chế phân tán lực thông minh, cũng có thể là một hướng đi tiềm năng nhằm tối ưu hóa khả năng chịu va chạm của xe buýt điện.

Ngoài các yếu tố về vật liệu và kết cấu, các nghiên cứu tiếp theo cũng nên tập trung vào tác động của tải trọng hành khách và phân bố khối lượng lên kết quả mô phỏng. Hiện

tại, mô hình mô phỏng chỉ xem xét khung xe trong điều kiện không tải hoặc tải trọng cố định. Trong thực tế, sự phân bố không đồng đều của hành khách và tải trọng có thể ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu lực của khung xe trong quá trình va chạm. Do đó, việc mở rộng mô phỏng để bao gồm nhiều kịch bản tải trọng khác nhau. Cần so sánh kết quả mô phỏng với các kết quả mô phỏng đã được công bố trên tạp trí khoa học để có đánh giá khách quan về kết quả mô phỏng. việc này sẽ giúp cải thiện tính chính xác và độ tin cậy của kết quả.

Một hướng phát triển quan trọng khác là ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy (Machine Learning) vào việc tối ưu hóa thiết kế khung xe. Các thuật toán AI có thể được sử dụng để xác định những thiết kế tối ưu nhất nhằm giảm khối lượng mà vẫn đảm bảo độ bền, hoặc đề xuất các cải tiến về kết cấu dựa trên dữ liệu mô phỏng thực tế. Việc kết hợp AI với mô phỏng phần tử hữu hạn có thể giúp đẩy nhanh quá trình thiết kế và tối ưu hóa xe buýt điện, mở ra nhiều cơ hội mới cho việc phát triển phương tiện giao thông công cộng an toàn hơn.

Tóm lại, nghiên cứu này đã mô phỏng xác định được ứng suất và biến dạng trong việc đánh giá tác động của va chạm đối với xe buýt điện, đề án cũng đề xuất một số giải pháp cải tiến thiết kế. Tuy nhiên, vẫn còn nhiều hướng phát triển cần tiếp tục nghiên cứu để nâng cao độ chính xác của mô hình mô phỏng, mở rộng phạm vi vật liệu và áp dụng các công nghệ tiên tiến để tối ưu hóa thiết kế xe buýt điện trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] “Outlook for electric vehicle charging infrastructure,” IEA. Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-heavy-electric-vehicles>
- [2] “Trends in heavy-duty electric vehicles,” IEA. Accessed: Jun. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/trends-in-heavy-duty-electric-vehicles>
- [3] Sở Giao thông vận tải TP. HCM, “Tờ trình số 1268/SGTVT-QLVT về Lộ trình chuyển đổi phương tiện vận tải hành khách công cộng bằng xe buýt điện, năng lượng xanh trên địa bàn TP. Hồ Chí Minh,” Hồ Chí Minh, Feb. 2025.
- [4] Thủ tướng Chính phủ, “Quyết định số 876/QĐ - TTg về Chuyển đổi năng lượng xanh, giảm phát thải khí các bon và mê tan của ngành giao thông vận tải,” Hà Nội, 2022.
- [5] Nguyễn Quang Anh, “Nghiên cứu động lực học và độ bền khung vỏ ô tô khi va chạm trực diện,” Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Học viện kỹ thuật quân sự, Hà Nội, 2007.
- [6] T. C. Nguyen, M. H. Nguyen, J. Armoogum, and T. T. Ha, “Bus Crash Severity in Hanoi, Vietnam,” *Safety*, vol. 7, no. 3, p. 65, Sep. 2021, doi: 10.3390/SAFETY7030065.
- [7] European Union, “Light vans and minibuses.” Accessed: Nov. 25, 2025. [Online]. Available: https://road-safety.transport.ec.europa.eu/eu-road-safety-policy/priorities/safe-vehicles/archive/safety-design-needs/light-vans-and-minibuses_en
- [8] N. V. Sỹ, N. T. Tâm, and T. T. Long, “Sự va chạm và hấp thu động năng của phần trước khung xương ô tô khách trước động lực học va đập,” *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ Thuật*, vol. 44B, pp. 37–42, Oct. 2017.
- [9] N. T. Tâm, “Thiết kế tối ưu kết cấu khung xương và sát-xi ô tô khách,” *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ Thuật*, vol. 31, pp. 29–35, Nov. 2014.
- [10] T. Quang Bàng and Đ. Minh Hải, “Tối ưu hóa độ bền của khung xe buýt B45 bằng phương pháp phần tử hữu hạn,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng*,

vol. 130, no. 9, pp. 1–6, Sep. 2018.

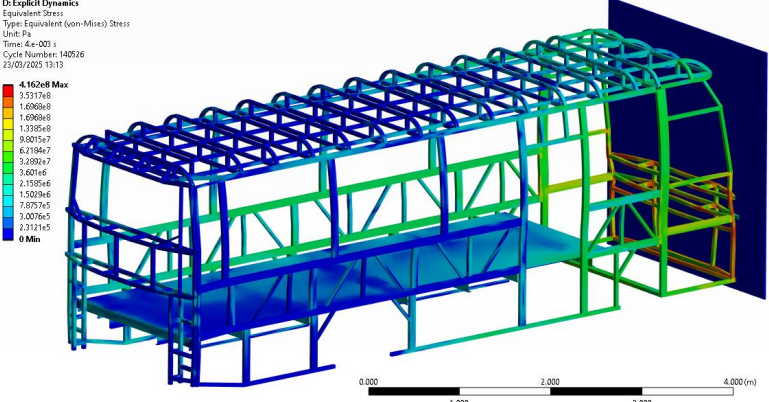
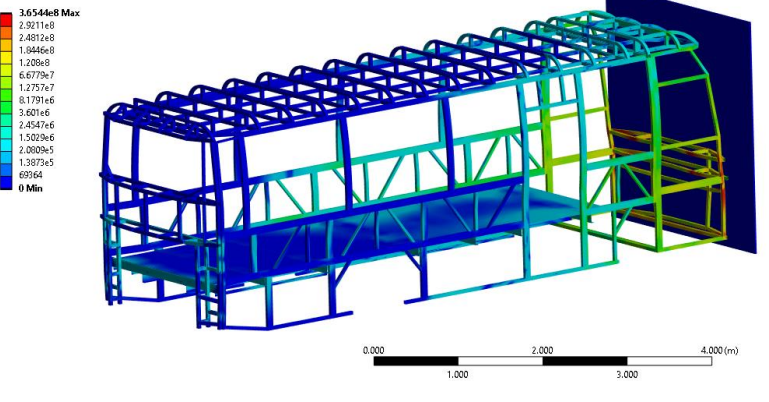
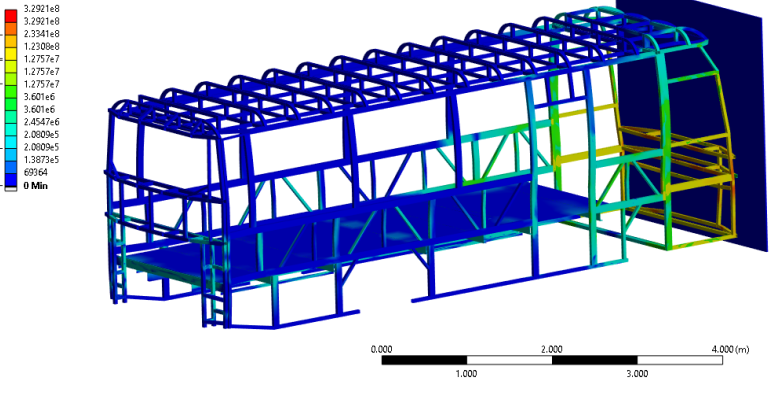
- [11] N. Thành Tâm, “Tối ưu hóa thiết kế kết cấu ô tô khách thỏa mãn tính an toàn va chạm trực diện,” *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ Thuật*, vol. 37, pp. 44–49, Sep. 2016.
- [12] N. Quang Thanh, N. Thế Anh, and P. Việt Thành, “Ứng dụng GRABCAD mô phỏng va chạm ô tô,” in *Hội nghị khoa học HaUI lần thứ IV*, P. Việt Thành, Ed., Hà nội: Đại học Công Nghiệp Hà Nội, Apr. 2021, pp. 152–158.
- [13] P. Minh Đức and L. Công Tín, “Ứng dụng phần mềm hyperworks tối ưu hóa thân xe buýt Thaco City B60,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, Đại học Đà Nẵng, no. 10, Jan. 2019.
- [14] N. Thanh Quang, P. Việt Thành, L. Văn Anh, L. Hồng Quân, and D. Thị Thanh Thùy, “Công nghệ mô phỏng phân tích độ bền khung vỏ ô tô khách khi lật ngang,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, vol. 58, no. 1, Feb. 2022.
- [15] N. Phụ Thượng Lưu, “Analysis of bus structural performance during full frontal impact,” in *International Conference on System Science and Engineering*, N. Phụ Thượng Lưu, Ed., Hồ Chí Minh: IEEE, 2019, pp. 635–638. doi: 10.1109/ICSSE.2019.8823416.
- [16] S. Sagar, N. S. Manjunatha Babu, A. Nanjunda Reddy, and K. Mohan Kumar, “Design Of Bus Body Structure By Static Analysis,” *Int J Res Eng Technol*, vol. 07, no. 08, pp. 84–91, Aug. 2018, doi: 10.15623/ijret.2018.0708010.
- [17] T. Sakurai and T. Suzuki, “Crashworthiness of Electric Vehicles,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 4, pp. 41–48, Nov. 2010.
- [18] C. Sai Kiran, J. Sruthi, and S. Chandrahas Balaji, “Design and Crash Analysis of a Passenger Car using ANSYS Workbench,” *CVR Journal of Science and Technology*, vol. 13, pp. 96–100, Dec. 2017.
- [19] W. Jiang, Y. Zhang, J. Liu, D. Zhang, Y. Yan, and C. Song, “Multi-objective optimization design for steel-aluminum lightweight body of pure electric bus based on RBF model and genetic algorithm,” *Electronic Research Archive*, vol. 31, no. 4, pp. 1982–1997, 2023, doi: 10.3934/era.2023102.
- [20] A. D. de Meira, I. Iturrioz, M. Walber, and F. Goedel, “Numerical analysis of an

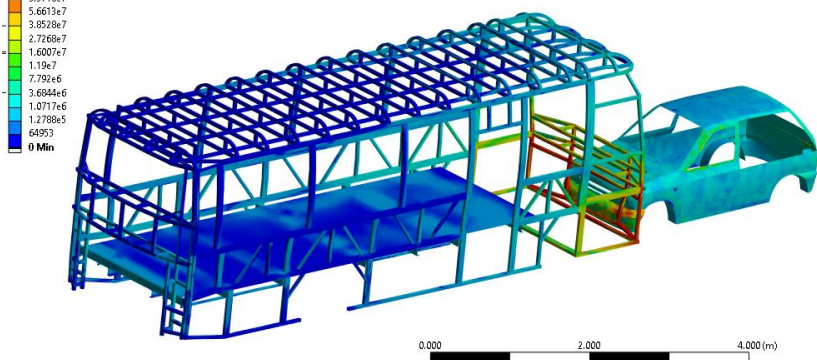
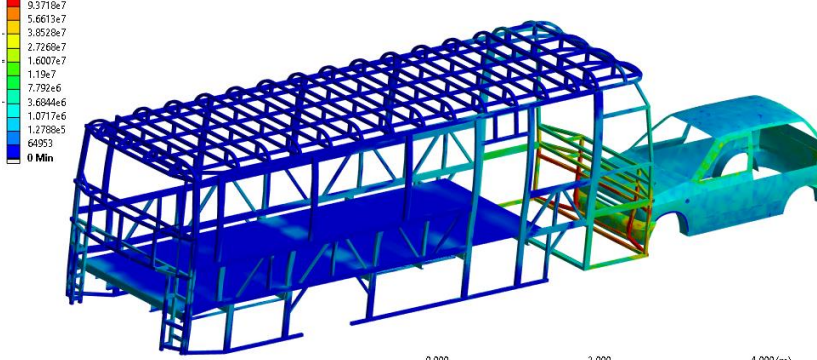
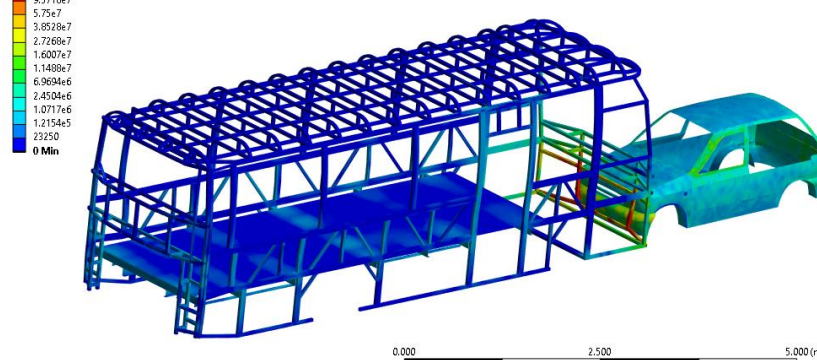
- intercity bus structure: A simple unifilar model proposal to assess frontal and semifrontal crash scenarios,” *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 13, no. 9, pp. 1616–1640, 2016, doi: 10.1590/1679-78252440.
- [21] S. Elhussieny, W. Oraby, M. Elkady, A. Abdelhamid, and S. El-Demerdash, “Optimisation of crash dynamics for bus cabin structure based on attained intrusion and deceleration during a frontal collision,” *International Journal of Crashworthiness*, vol. 26, no. 5, pp. 501–514, 2021, doi: 10.1080/13588265.2020.1754648.
- [22] V.-P. Sándor and A. Csiszár, “Real and simulated crashworthiness tests on buses,” V.-P. Sándor, Ed., Hungary: European engineering conference, Sep. 2023, pp. 11–21.
- [23] Z. Yang, B. Deng, M. Deng, and G. Sun, “A Study on Finite Element Analysis of Electric Bus Frame for Lightweight Design,” vol. 175, no. 03049, Jan. 2018, doi: 10.1051/mateconf/2018175.
- [24] R. Y. Dahham, H. Wei, and J. Pan, “Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges,” Sep. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/en15176222.
- [25] Pandu T C, Papareddy N, and Amar C, “Hybrid and electric powertrains: Optimizing efficiency and performance in next-generation electric vehicles,” *World Journal of Advanced Research and Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 817–826, Aug. 2022, doi: 10.30574/wjarr.2022.15.2.0857.
- [26] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, and G. Yushin, “Li-ion battery materials: Present and future,” Jun. 01, 2015, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.mattod.2014.10.040.
- [27] F. Czerwinski, “Current trends in automotive lightweighting strategies and materials,” *Materials*, vol. 14, no. 21, p. 11, Nov. 2021, doi: 10.3390/ma14216631.
- [28] W. Jiang, Y. Zhang, J. Liu, D. Zhang, Y. Yan, and C. Song, “Multi-objective optimization design for steel-aluminum lightweight body of pure electric bus based on RBF model and genetic algorithm,” *Electronic Research Archive*, vol. 31, no. 4, pp. 1982–1997, 2023, doi: 10.3934/era.2023102.

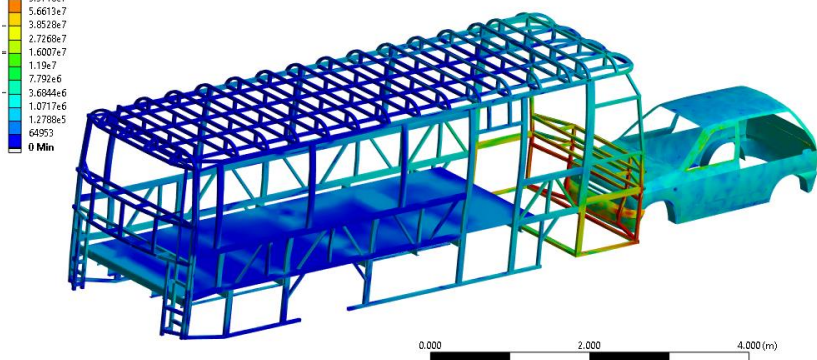
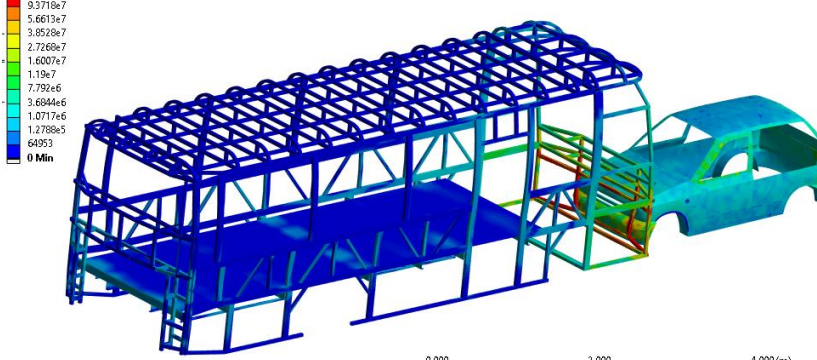
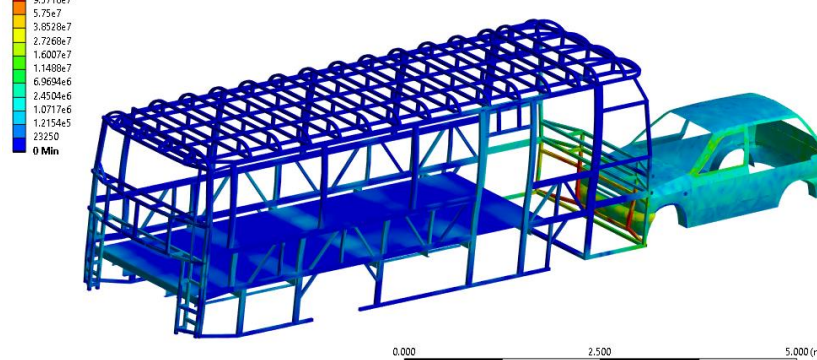
PHỤ LỤC

PHỤ LỤC A. ỨNG SUẤT VA CHẠM CỦA XE BUÝT ĐIỆN 29 CHỖ ỨNG VẬN TỐC KHÁC NHAU ĐƯỢC THỰC HIỆN TRONG ĐỀ ÁN

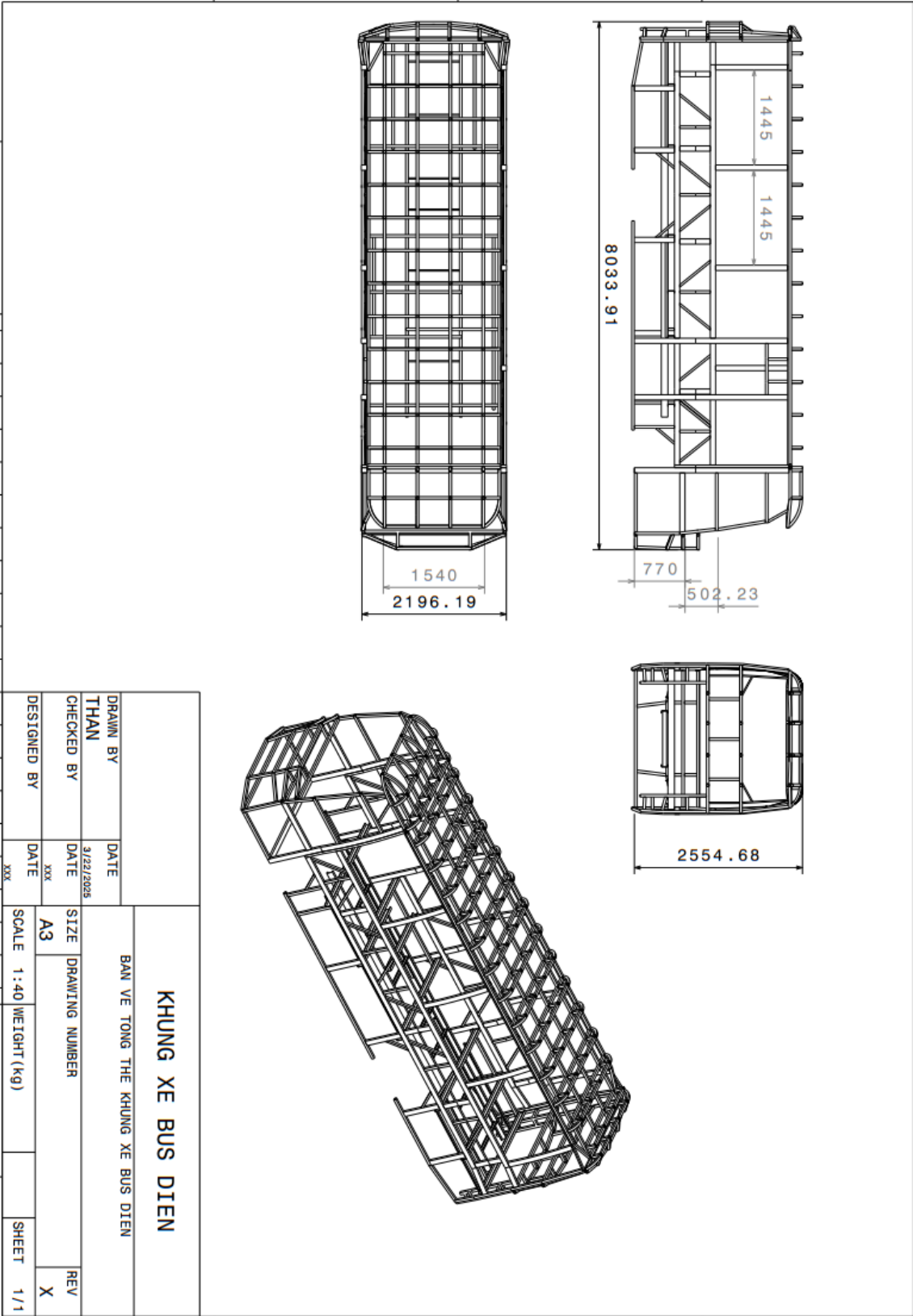
TT	Hình minh họa	Chú thích
1	D: Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 4.e-003 s Cycle Number: 140266 23/03/2025 13:13 4.162e8 Max 2.5317e8 1.4960e8 1.4960e8 1.3985e8 8.0015e7 6.2154e7 3.2892e7 3.601e6 3.1550e6 1.5020e6 2.8973e5 3.0076e5 2.3121e5 0 Min 0.000 1.000 2.000 3.000 4.000 (m)	Vật liệu: Hợp kim nhôm Vận tốc: 70 km/h Vật thể: Tường cứng
2	D: Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 3.e-003 s Cycle Number: 105142 23/03/2025 13:59 3.6544e8 Max 2.9211e8 2.4812e8 1.9446e8 1.205e8 6.6779e7 1.2757e7 8.1791e6 3.601e6 2.4547e6 1.5020e6 2.0009e5 1.3073e5 69364 0 Min 0.000 1.000 2.000 3.000 4.000 (m)	Vật liệu: Hợp kim nhôm Vận tốc: 50 km/h Vật thể: Tường cứng
3	D: Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 2.5e-003 s Cycle Number: 67569 23/03/2025 18:02 3.2921e8 3.2921e8 2.5341e8 1.2308e8 1.2757e7 1.2757e7 1.2757e7 3.601e6 3.601e6 2.4547e6 2.0009e5 1.3873e5 69364 0 Min 0.000 1.000 2.000 3.000 4.000 (m)	Vật liệu: Hợp kim nhôm Vận tốc: 30 km/h Vật thể: Tường cứng

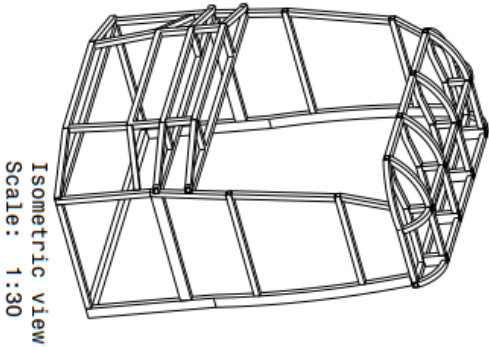
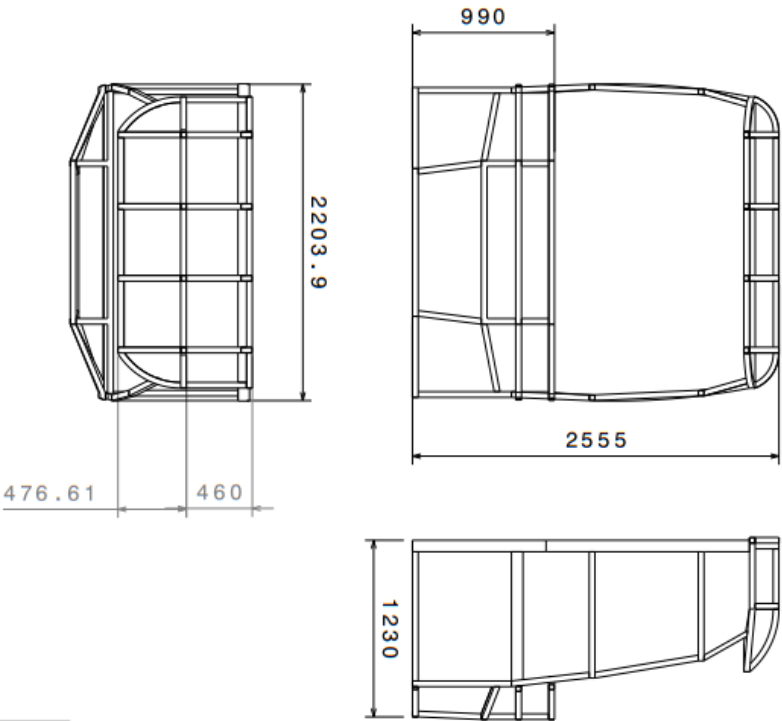
4	Dr:Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 4.e-003 s Cycle Number: 140526 23/03/2025 13:13 4.162e8 Max 3.5317e8 1.6960e8 1.6960e8 1.3385e8 9.9201e7 6.2194e7 3.2892e7 3.601e6 2.1550e6 1.5029e6 7.8757e5 3.0076e5 2.3121e5 0 Min 	Vật liệu: Thép Vận tốc: 70 km/h Vật thể: Tường cứng
5	Dr:Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 3.e-003 s Cycle Number: 105142 23/03/2025 11:59 3.6544e8 Max 2.9211e8 2.4812e8 1.8446e8 1.208e8 6.6779e7 1.2757e7 8.1791e6 3.601e6 2.4547e6 1.5029e6 2.0809e5 1.3873e5 69564 0 Min 	Vật liệu: Thép Vận tốc: 50 km/h Vật thể: Tường cứng
6	Dr:Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: Pa Time: 2.5e-003 s Cycle Number: 87569 23/03/2025 18:02 3.2921e8 3.2921e8 2.3541e8 1.2300e8 1.2757e7 1.2757e7 1.2757e7 3.601e6 3.601e6 2.4547e6 2.0809e5 2.0809e5 1.3873e5 69564 0 Min 	Vật liệu: Thép Vận tốc: 30 km/h Vật thể: Tường cứng

7	D: Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: Pa Time: 4.e-003 s Cycle Number: 139852 24/03/2025 08:52 3.8706e8 Max 9.3719e7 5.6613e7 3.8528e7 2.7269e7 1.6007e7 1.19e7 7.792e6 3.6044e6 1.0717e6 1.2788e5 64953 0 Min  0.000 1.000 2.000 3.000 4.000 (m)	Vật liệu: Hợp kim nhôm Vận tốc: 70 km/h Vật thể: Xe khác
8	D: Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: Pa Time: 3.e-003 s Cycle Number: 104851 24/03/2025 08:51 3.5345e8 Max 9.3719e7 5.6613e7 3.8528e7 2.7269e7 1.6007e7 1.19e7 7.792e6 3.6044e6 1.0717e6 1.2788e5 64953 0 Min  0.000 1.000 2.000 3.000 4.000 (m)	Vật liệu: Hợp kim nhôm Vận tốc: 50 km/h Vật thể: Xe khác
9	D: Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: Pa Time: 2.5e-003 s Cycle Number: 87338 24/03/2025 08:53 3.4191e8 Max 9.3719e7 5.75e7 3.8528e7 2.7269e7 1.6007e7 1.1489e7 6.9694e6 2.4504e6 1.0717e6 1.2154e5 23250 0 Min  0.000 1.250 2.500 3.750 5.000 (m)	Vật liệu: Hợp kim nhôm Vận tốc: 30 km/h Vật thể: Xe khác

10	D: Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: Pa Time: 4.e-003 s Cycle Number: 139852 24/03/2025 08:52 3.8706e8 Max 9.3719e7 5.6613e7 3.8528e7 2.7269e7 1.6007e7 1.19e7 7.792e6 3.6044e6 1.0717e6 1.2788e5 64953 0 Min  0.000 1.000 2.000 3.000 4.000 (m)	Vật liệu: Thép Vận tốc: 70 km/h Vật thể: Xe khác
11	D: Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: Pa Time: 3.e-003 s Cycle Number: 104851 24/03/2025 08:51 3.5345e8 Max 9.3719e7 5.6613e7 3.8528e7 2.7269e7 1.6007e7 1.19e7 7.792e6 3.6044e6 1.0717e6 1.2788e5 64953 0 Min  0.000 1.000 2.000 3.000 4.000 (m)	Vật liệu: Thép Vận tốc: 50 km/h Vật thể: Xe khác
12	D: Explicit Dynamics Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom Unit: Pa Time: 2.5e-003 s Cycle Number: 87338 24/03/2025 08:53 3.4191e8 Max 9.3719e7 5.75e7 3.8528e7 2.7269e7 1.6007e7 1.1489e7 6.9694e6 2.4504e6 1.0717e6 1.2154e5 23250 0 Min  0.000 1.250 2.500 3.750 5.000 (m)	Vật liệu: Thép Vận tốc: 30 km/h Vật thể: Xe khác

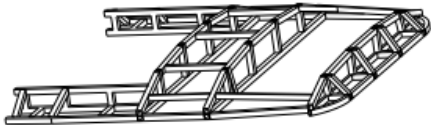
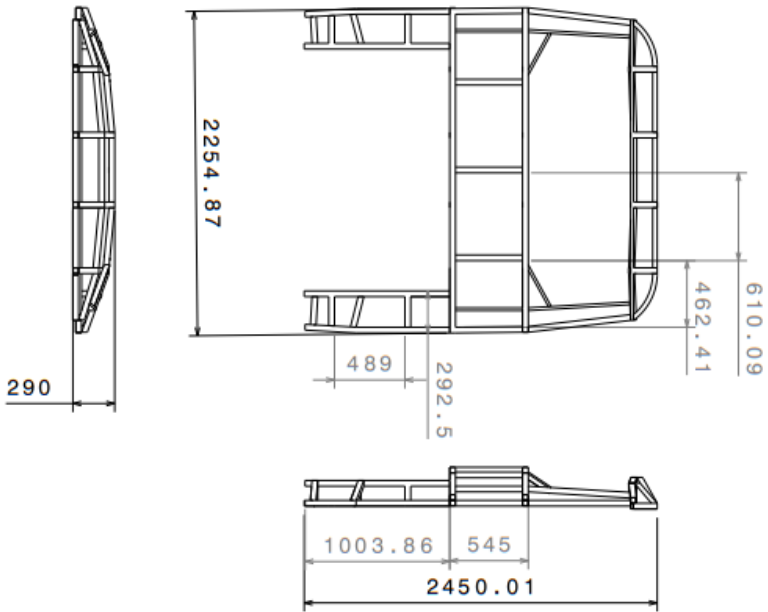
PHỤ LỤC B. BẢN VẼ CƠ KHÍ CỦA CÁC KHUNG THÀNH PHẦN



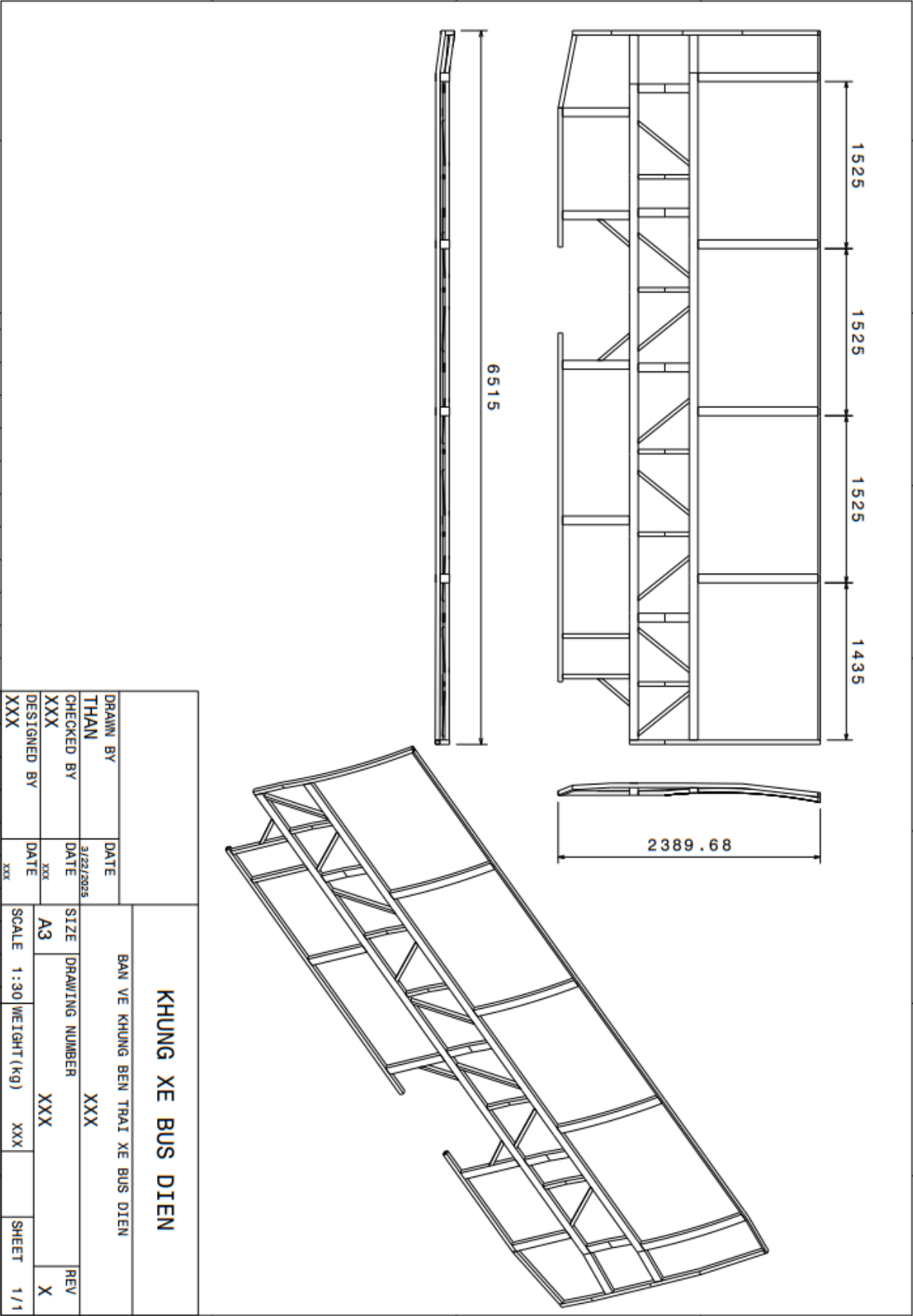


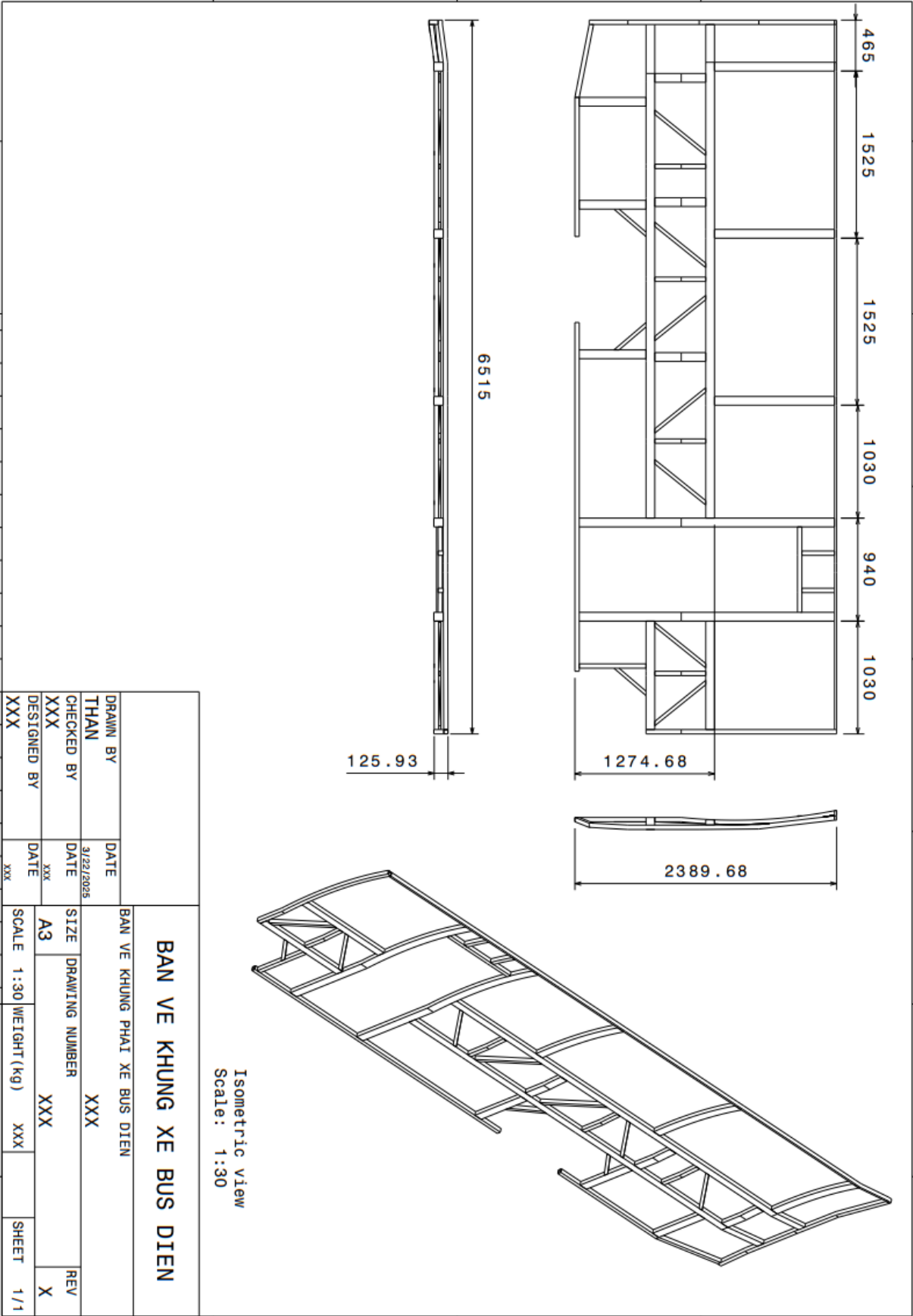
Isometric view
Scale: 1:30

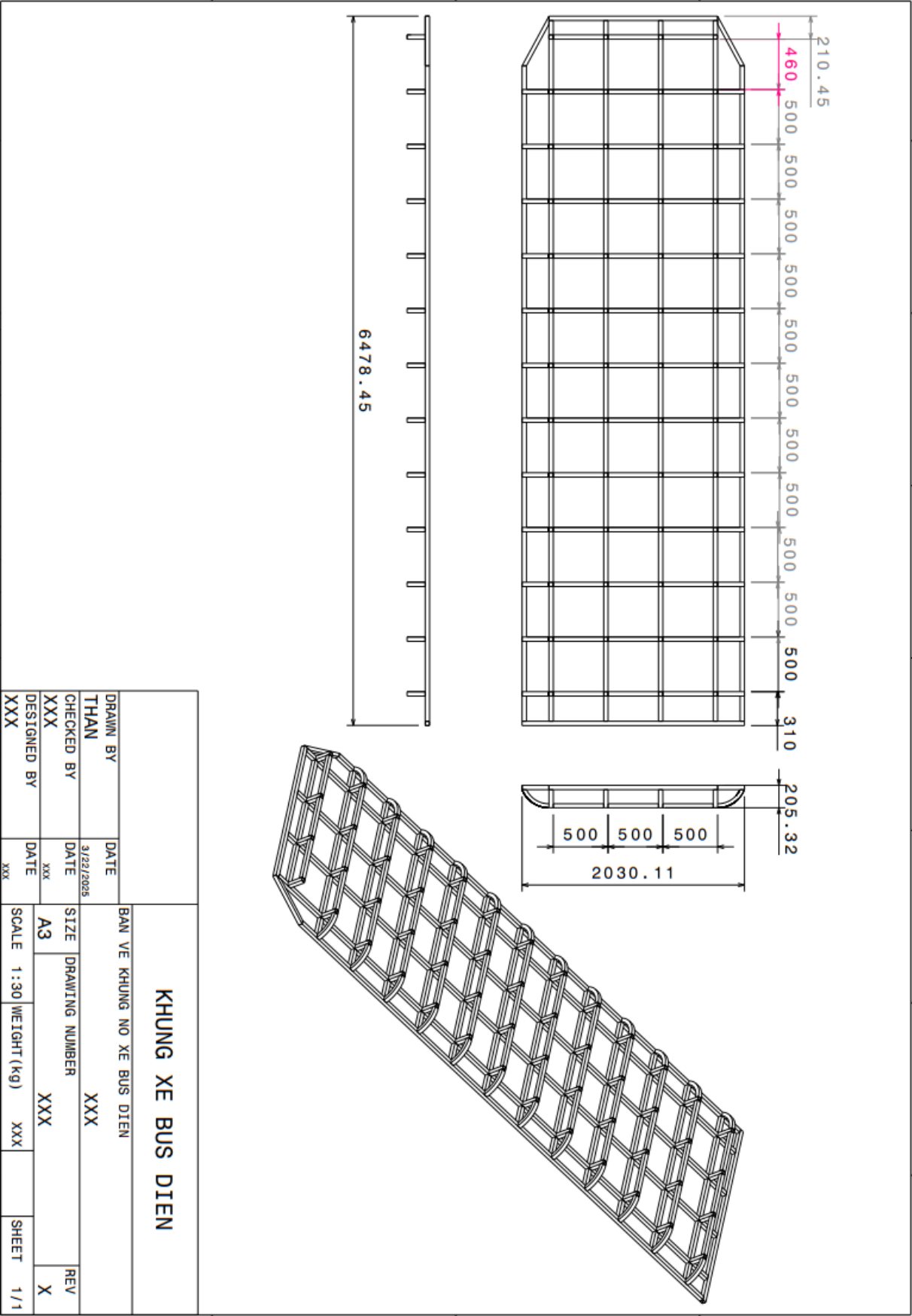
KHUNG XE BUS DIEN				BAN VE KHUNG DAU XE BUS DIEN			
DRAWN BY	THAN	DATE	3/22/2025	SIZE	DRAWING NUMBER		REV
CHECKED BY	XXX	DATE	xxx	A3	XXX		X
DESIGNED BY	XXX	DATE	xxx	SCALE	1:30	WEIGHT (kg)	XXX
						SHEET	1/1

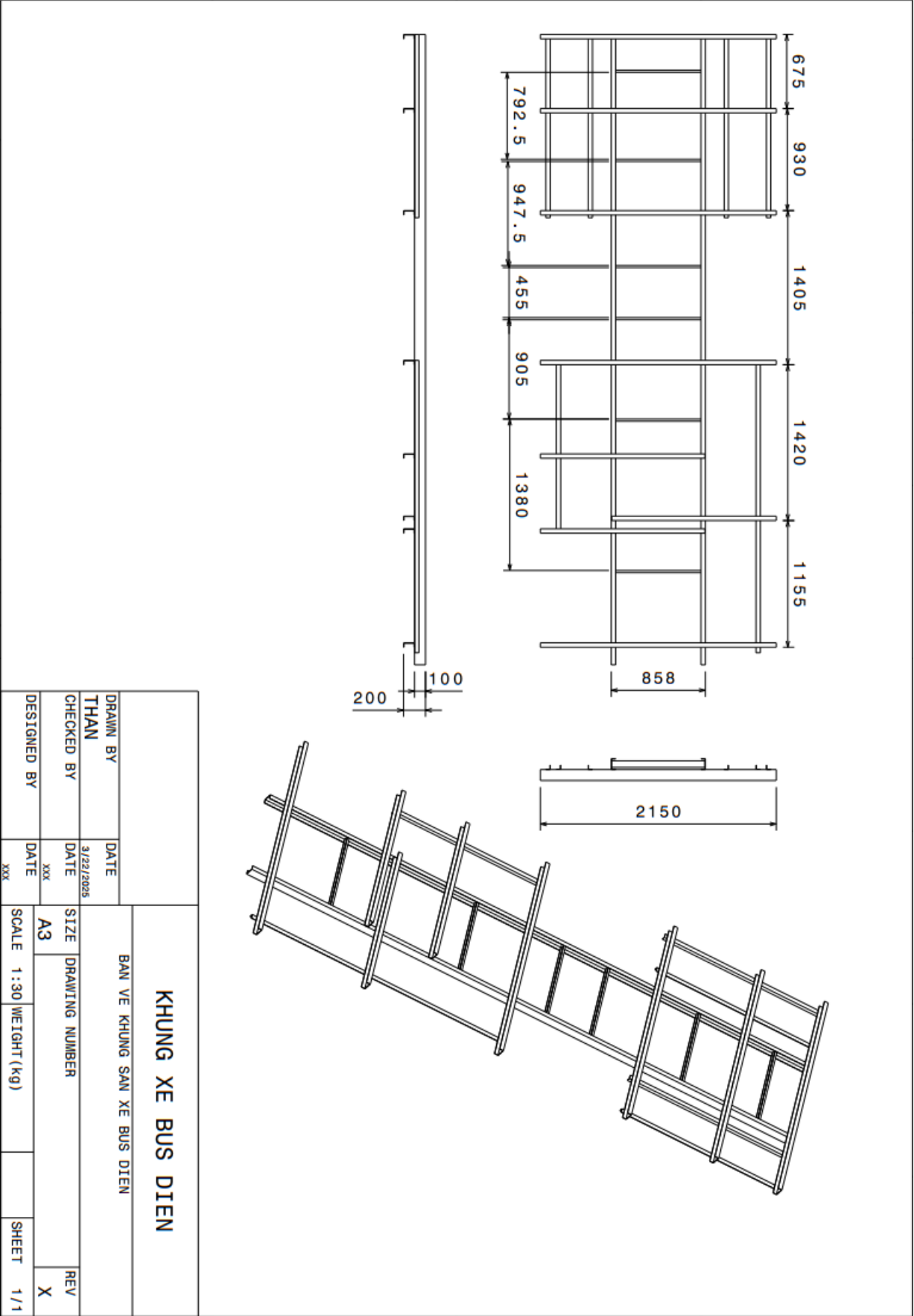


		KHUNG XE BUS DIEN			
DRAWN BY		DATE		BAN VE KHUNG SAU XE BUS DIEN	
THAN		3/22/2025		XXX	
CHECKED BY		DATE		SIZE	
XXX		XXX		A3	
DESIGNED BY		DATE		DRAWING NUMBER	
XXX		XXX		XXX	
		SCALE		WEIGHT (kg)	
		1:30		XXX	
				SHEET	
				1 / 1	
				REV	
				X	









PHỤ LỤC C. Bảng quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN về an toàn xe buýt

TT	Đối tượng đánh giá	Quy chuẩn Việt Nam (QCVN) tương đương	Quy định UNECE	Mục tiêu mô phỏng chính
1	Va chạm Cabin & Bảo vệ người lái	QCVN 09:2015/BGTVT (Sửa đổi 2024)	UNECE R29	Đánh giá độ bền cột A, khả năng chống bẹp mui và không gian sống sót của tài xế.
2	Độ bền kết cấu lật xe	QCVN 09:2015/BGTVT (Phụ lục 5)	UNECE R66	Đảm bảo khung xương không lấn vào không gian an toàn của hành khách khi xe lật.
3	Ghế ngồi và điểm neo	QCVN 10:2023/BGTVT	UNECE R80	Kiểm tra độ bền chân ghế và khả năng giữ hành khách khi có gia tốc lớn.
4	Cấu trúc chung xe khách	QCVN 10:2023/BGTVT	UNECE R107	Quy định về lối thoát hiểm, cửa thoát hiểm và bố trí ghế ngồi.
5	An toàn hệ thống Pin (EV)	QCVN 09:2023/BGTVT (Sửa đổi)	UNECE R100	Đánh giá an toàn điện và chống cháy nổ cụm pin khi va chạm.