

## การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างตู้รถไฟโดยสารเพื่อการใช้งานบนทางวิ่งขนาด 1.0 เมตรของประเทศไทย STRUCTURAL ANALYSIS AND DESIGN OF RAILWAY PASSENGER COACH FOR THAILAND METER GAUGE TRACK

พงศกร ภู่อหิม<sup>1\*</sup>, ทรงศักดิ์ สุชาติประดิษฐ์<sup>2</sup> และ รัฐภูมิ ปรีชาตปรีชา<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนครสวรรค์, จังหวัดพิษณุโลก, ประเทศไทย

<sup>2</sup> สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมถนนและระบบราง, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยนครสวรรค์, จังหวัดพิษณุโลก

Corresponding author address: pongsakorp94@gmail.com

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการลงทุนและพัฒนาระบบขนส่งทางรางทั้งในด้านโครงสร้างพื้นฐานและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับตัวรถไฟ ทั้งนี้เพื่อยกระดับเทคโนโลยีภายในประเทศรวมทั้งช่วยลดการนำเข้าจากต่างประเทศ อย่างไรก็ตามการผลิตรถไฟขึ้นเองภายในประเทศยังมีข้อจำกัดทางด้านเทคโนโลยีในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างรถไฟให้เหมาะสมกับบริบทของการใช้งานในประเทศ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาแนวทางการออกแบบโครงสร้างตู้รถไฟโดยสารเพื่อการใช้งานในประเทศไทย ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อให้บริการบนทางวิ่งขนาด 1.0 เมตร โดยการออกแบบจะดำเนินการตามมาตรฐานสากล EN-12663 และมาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย ซึ่งจะคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวกับความปลอดภัยต่างๆทั้งในเชิงสถิตย์ (static) และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของรูปแบบโครงสร้างที่ต่างกันคือ แบบ Differential construction และแบบ Hybrid construction ในส่วนของกาวิเคราะห์โครงสร้างได้ทำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในส่วนของการขึ้นส่วนเพื่อตรวจสอบถึงพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้ภาระแรงกระทำต่างๆ โดยผลการศึกษาจะแสดงถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ น้ำหนัก สมรรถนะการใช้งาน รวมไปถึงราคาต้นทุนก่อสร้างของผู้โดยสารรถไฟที่ใช้รูปแบบของโครงสร้างที่ต่างกัน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและผลิตตู้รถไฟที่เหมาะสมต่อการใช้งานในประเทศไทยต่อไป

**คำสำคัญ:** โครงสร้างรถไฟ, ตู้รถไฟโดยสาร, วัสดุแซนวิช, โครงประธานรถไฟ, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

### Abstract

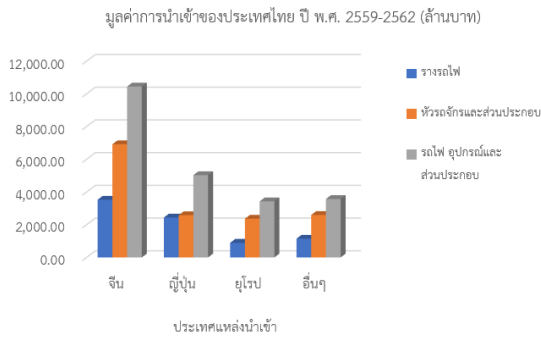
Currently, Thailand invests and develops rail transport in both infrastructure and the industry which relates to trains in order to enhance domestic technology and decrease importation. However, domestic train production has a limitation in technology to analyze and design the train's structure suitable for domestic use. The research has researched the method to design the passenger coach structure for running on the 1.0-meter runway and for use in Thailand. The design is performed according to the international standards EN-12663 and the State Railway standards of Thailand. The design concerns statistical safety and compares the varied structures' capabilities such as Differential Construction and Hybrid Construction. The structure analytics was analyzed by the Finite Element Method in components to inspect the structure under various loads. The result shows the comparison of weight competency and competency of using, including the construction price of passenger coach structure that are different structures to be a guideline for designing and producing the passenger coach suitable for domestic use.

**Keywords:** Rail vehicle, Passenger Coach, Sandwich structure, Car body, Finite element

### 1. บทนำ

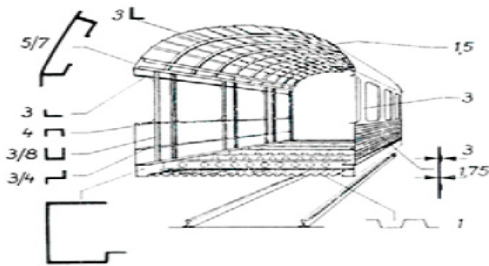
ในปัจจุบัน การคมนาคมขนส่งทางรางถือได้ว่าเป็นระบบการขนส่งที่สำคัญในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของประเทศ โดยระบบรางได้รับการยอมรับในระดับสากลว่าเป็นวิธีการขนส่งที่มีต้นทุนการขนส่งต่อหน่วยต่ำที่สุด ในปัจจุบันประเทศไทยให้ความสำคัญกับระบบรางมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีการนำเข้าชิ้นส่วนของรถไฟจากต่างประเทศ ประกอบด้วย รางรถไฟ หัวรถจักร ตู้โดยสารรถไฟ และอุปกรณ์ภายในรถ เป็นมูลค่าจากการนำเข้าเฉลี่ยปีละหลายหมื่น

ล้านบาทแสดงในรูปที่ 1 และในอนาคตประเทศไทยมีแผนที่จะพัฒนาระบบขนส่งทางรางในหลายโครงการประกอบด้วย รถไฟฟ้าในเมือง รถไฟทางคู่ทั่วประเทศ โครงการความร่วมมือด้านรถไฟระหว่างไทย-จีน โครงการความร่วมมือด้านรถไฟระหว่างไทย-ญี่ปุ่น โครงการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูง ส่งผลให้มีความต้องการหัวรถจักรและตู้โดยสารอีกเป็นจำนวนมาก



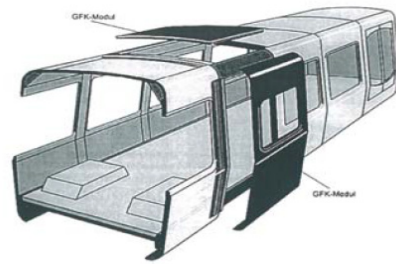
รูปที่ 1 แสดงมูลค่าการนำเข้าของอุปกรณ์รถไฟ [1]

การให้บริการขนส่งทางรางของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) มีมาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน โดยเปิดให้บริการทั้งขบวนรถไฟขนส่งสินค้าและขบวนรถไฟโดยสารซึ่งวิ่งอยู่บนสายทางขนาด 1.0 เมตร โดยส่วนใหญ่โครงสร้างของตู้โดยสารรถไฟที่ประเทศไทยใช้ในปัจจุบันเป็นรูปแบบ Differential construction แสดงในรูปที่ 2 โดยใช้โลหะเป็นโครงสร้างหลักมักจะเชื่อมต่อกันด้วยวิธีการเชื่อมแผ่นเหล็กเป็นผนังและหลังคาส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงสูง [2]



รูปที่ 2 โครงสร้างตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ Differential construction [2]

ปัจจุบันนอกเหนือจากรูปแบบข้างต้นแล้วการก่อสร้างตู้รถไฟโดยสารได้มีการพัฒนาโครงสร้างรูปแบบ Hybrid construction แสดงในรูปที่ 3 ที่เน้นการใช้คุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานส่งผลให้โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบามากขึ้น โดยส่วนใหญ่โครงสร้างรูปแบบนี้จะประกอบด้วยวัสดุโลหะร่วมกับวัสดุแซนวิช (Sandwich material) [3] โดยจะส่งผลดี เช่น ส่งผลให้น้ำหนักต่อเพลาลดลง ลดการสึกหรอของราง ลดโครงสร้างของสะพานที่รถไฟวิ่งผ่าน สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้เพิ่มมากขึ้น และยังช่วยประหยัดพลังงานกว่าโครงสร้างที่ใช้ในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม การนำโครงสร้างดังกล่าวมาใช้ ยังต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านอื่นๆ เช่น การเชื่อมต่อชิ้นส่วนเข้าด้วยกันยังต้องใช้เทคโนโลยีค่อนข้างสูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการทำงานทั้งตอนสร้างรถใหม่และตอนทำการซ่อมแซมตัวถังหลังจากใช้งานไปแล้ว เป็นต้น



รูปที่ 3 โครงสร้างตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ Hybrid construction [2]

## 2. ความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากประเทศไทยได้มีแนวคิดให้มีการวิจัยและพัฒนาเพื่อผลิตรถไฟขึ้นมาเอง ซึ่งนโยบายดังกล่าวจะสามารถส่งเสริมให้คนไทยได้มีความรู้ในการผลิตและออกแบบ เพื่อยกระดับเทคโนโลยีภายในประเทศรวมทั้งช่วยลดการนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อตอบสนองต่อนโยบายดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาแนวทางการออกแบบโครงสร้างตู้รถไฟโดยสารเพื่อการใช้งานในประเทศไทย ที่ให้บริการบนทางวิ่งขนาด 1.0 เมตร ในการออกแบบจะดำเนินการตามมาตรฐานสากลการวิเคราะห์ทางด้านสถิตย์ (Static) ตามเกณฑ์และข้อกำหนดของมาตรฐาน EN-12663-1 [4] และใช้วิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมผ่านวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยใช้วิธีสร้างแบบจำลองตัวตู้โดยสารรถไฟ

ผลการศึกษาจะแสดงถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของน้ำหนัก สมรรถนะการใช้งาน รวมไปถึงราคาค่าก่อสร้างโดยประมาณของผู้โดยสารรถไฟที่ใช้รูปแบบของโครงสร้างที่ต่างกัน ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและผลิตตู้รถไฟที่เหมาะสมต่อการใช้งานในประเทศไทยต่อไป

## 3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

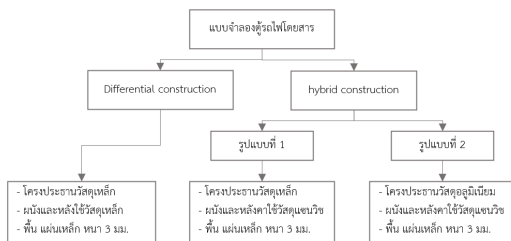
งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างตู้รถไฟโดยสารที่แตกต่างกัน ทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังรูปที่ 4 โดยอยู่ภายใต้ข้อกำหนดของการติดตั้งตำแหน่งของอุปกรณ์ทั้งภายนอกและภายในและจำนวนผู้โดยสารที่เท่ากันโดยอ้างอิงกับรถไฟโดยสารของการรถไฟแห่งประเทศไทย

รูปแบบ Differential construction เป็นรูปแบบของโครงสร้างที่ใช้วัสดุเหล็กเป็นโครงสร้างหลัก และใช้แผ่นเพลทเป็นแผ่นผนัง ผนังและหลังคา โดยในการออกแบบนี้ใช้แผ่นเพลทที่มีขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร

รูปแบบ Hybrid construction คือ การผสมผสานของวัสดุที่แตกต่างกันที่มีความโดดเด่นของการแต่ละการใช้งานมาประกอบ โดยมีจุดประสงค์หลักเพื่อลดน้ำหนักของโครงสร้าง ซึ่งในการศึกษานี้แบ่งการออกแบบทั้งหมด 2 รูปแบบ คือ

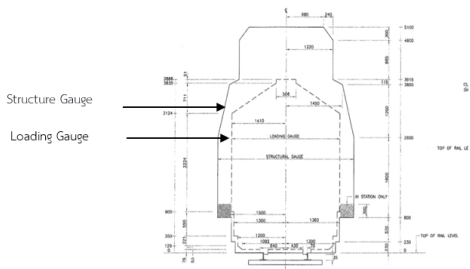
รูปแบบที่ 1 โครงสร้างของตู้รถไฟโดยสารจะใช้วัสดุเหล็ก โดยผนังและหลังคาจะใช้วัสดุแซนวิช (Sandwich material) ซึ่ง ข้อดีของวัสดุแซนวิช (Sandwich material) คือ เป็นวัสดุที่มี น้ำหนักเบาและมีความสามารถรับแรงบิดได้สูงมีพฤติกรรม เหมือนกับเหล็กไอบีม (I-BEAM) [3] และในส่วนของพื้นใช้แผ่นเพลท ที่มีขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร

รูปแบบที่ 2 โครงสร้างของตู้รถไฟโดยสารจะใช้วัสดุ อลูมิเนียมซึ่งมีข้อดี คือ น้ำหนักเบากว่าวัสดุเหล็กประมาณ 3 เท่า โดยผนังและหลังคาจะใช้วัสดุแซนวิช (Sandwich material) และ ในส่วนของพื้นใช้แผ่นเพลทที่มีขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร



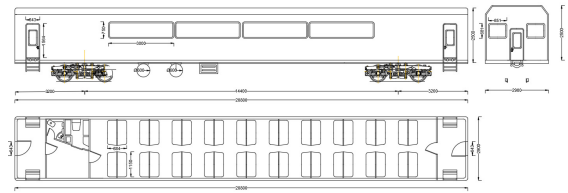
รูปที่ 4 แสดงรูปแบบจำลองของตู้รถไฟโดยสารทั้ง 3 รูปแบบ

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงของการออกแบบตู้โดยสารรถไฟ คือ มิติของตู้รถไฟโดยสารทั้งด้านหน้าและด้านข้างเพื่อให้แน่ใจว่าขณะรถไฟแล่นผ่านสะพาน อุโมงค์หรือโครงสร้างอื่น ๆ ไม่มีการเฉี่ยวชนก่อให้เกิดเป็น เหตุอันตรายต่อผู้โดยสาร เรียกว่า เขตบรรทุก (Loading gauge) ในการออกแบบนี้จะอ้างอิงเขตบรรทุก (Loading gauge) ของการรถไฟแห่งประเทศไทย ดังแสดงในรูป 5



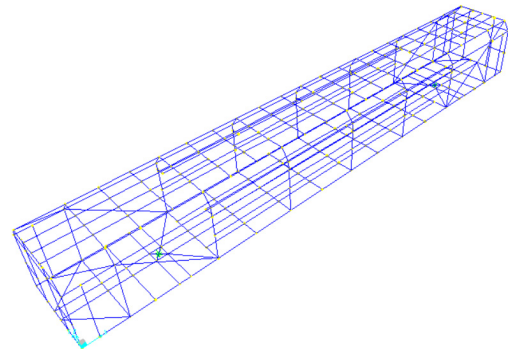
รูปที่ 5 แสดงเขตบรรทุกของตู้รถไฟโดยสาร (Loading gauge)

ในการออกแบบขนาดมิติของตู้รถไฟโดยสารจะกำหนดไม่เกิน เขตบรรทุก และผลจากการลงภาคสนามวัดขนาดมิติของตู้รถไฟโดยสารขบวนท้องถิ่นเพื่อนำมาพิจารณาในการกำหนดขนาดในการ ออกแบบได้ดังนี้ ความกว้าง 2.9 เมตร ความยาว 20.8 เมตร และความสูง 2.5 เมตร ภายในตู้โดยสารมีห้องน้ำ 1 ห้องอยู่บริเวณหัวตู้ของขบวน มีพื้นที่ใช้งานสำหรับผู้โดยสารของตู้รถไฟโดยสารเท่ากับ 46.11 ตารางเมตร แสดงในรูปที่ 6 และสามารถรับผู้โดยสารความ หนาแน่นปกติและความหนาแน่นสูงสุด เท่ากับ 80 และ 120 คน ตามลำดับ



รูปที่ 6 ขนาดมิติของตู้รถไฟโดยสารที่ใช้ในการออกแบบ

จากข้อมูลข้างต้นจะนำไปสร้างแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method) จะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เฟรมอีลิเมนต์ (Frame element) ร่วมกับชิ้นส่วนโครงสร้างเปลือกบาง (Shell Element) โดยให้โครงสร้าง และคาน เป็นแบบชนิดเฟรมอีลิเมนต์ (Frame element) ส่วนพื้นและผนังจะเป็น ชิ้นส่วนชนิด Shell Element ดังรูปที่ 7 ซึ่งน้ำหนักโครงสร้างตู้รถไฟ ทั้ง 3 รูปแบบรวมน้ำหนักของผู้โดยสารหนาแน่นสูงสุดต้องไม่เกิน 25 ตัน โดยประมาณ ซึ่งไม่รวมน้ำหนักของโบกี้ตามข้อกำหนดการรถไฟแห่งประเทศไทย



รูปที่ 7 แบบจำลองตู้รถไฟโดยสารโดยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method)

### 3.1. รูปแบบของโครงสร้างตู้รถไฟโดยสาร

#### 3.1.1. การออกแบบตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ

##### DIFFERENTIAL CONSTRUCTION

แบบจำลองของตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ Differential Construction ซึ่งประกอบด้วย โครงสร้าง ผนัง หลังคา และพื้น ใช้วัสดุเหล็กทั้งหมด โดยที่ ผนัง หลังคา และพื้น ใช้แผ่นเพลทที่มีความหนา 3 มิลลิเมตร เหล็กที่ใช้ในการออกแบบเป็นเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน เกรด SM520 มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถรับแรงดึงและอัดได้สูง (High Strength Steel) และมีความสามารถในการเชื่อมได้ดี ส่งผลให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับเหล็กโครงสร้างทั่วไป ซึ่งออกโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) มอก.1227-2539 คุณสมบัติของวัสดุ แสดงตามตารางที่ 1

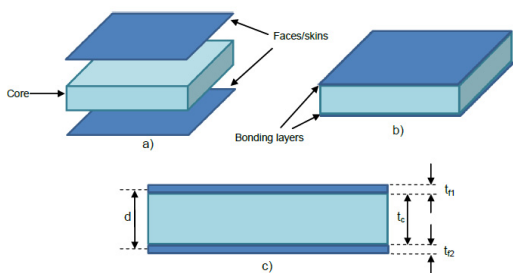
ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุของเหล็กที่ใช้ออกแบบตู้รถไฟโดยสาร

คุณสมบัติ	วัสดุ
	เหล็ก เกรด SM520
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	7850
โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	210000
อัตราส่วนของปัวซอง	0.3
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	580
ค่าความแข็งแรงคราก (MPa)	365

### 3.1.1. การออกแบบตู้โดยสารรถไฟรูปแบบ HYBRID CONSTRUCTION

แบบจำลองของตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ Hybrid Construction จะมีทั้งหมด 2 รูปแบบ จะมีขนาดมิติและอุปกรณ์ภายในของตู้รถไฟ โดยตามรูปที่ 6

รูปแบบที่ 1 ออกแบบโครงประธานด้วยวัสดุเหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน เกรด SM520 พื้นของตู้รถไฟโดยสารใช้แผ่นเหล็ก ความหนา 3 มิลลิเมตร ส่วนผนังและหลังคาของตู้รถไฟโดยสารใช้วัสดุแซนวิช (Sandwich material) ซึ่งเป็นวัสดุคอมโพสิต (Composite Materials) ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ แผ่นด้านนอก หรือสกินสองชั้นและมีแกนกลางคั่นระหว่างสองชั้นด้านนอก [5] แสดงดังรูปที่ 8 ในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุแผ่นด้านนอกเป็นแผ่นเหล็ก แกนกลางคือวัสดุโฟม คุณสมบัติของวัสดุแซนวิชที่ใช้ออกแบบ เป็นไปตามตารางที่ 2 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีน้ำหนักเมื่อเทียบกับแผ่นเหล็ก



รูปที่ 8 แสดงโครงสร้างของวัสดุแซนวิช (Sandwich material) [5]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติกายภาพของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้ออกแบบตู้รถไฟโดยสาร

คุณสมบัติ	สกิน	แกนกลาง
	(face sheets)	(core)
ความหนา (mm.)	0.3	60
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	7850	200
โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	200056	200

รูปแบบที่ 2 ออกแบบโครงประธานด้วยวัสดุอลูมิเนียม (Aluminum alloy) คุณสมบัติทางกายภาพของอลูมิเนียมตาม ตารางที่ 3 ส่วนผนังและหลังคาใช้วัสดุแซนวิช (Sandwich material) และพื้นใช้แผ่นเพลท ความหนา 3 มิลลิเมตร

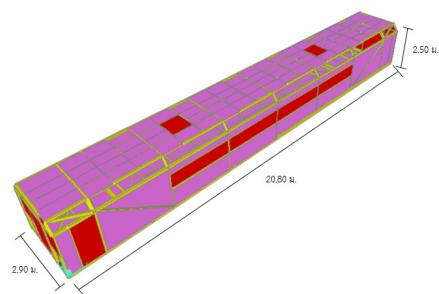
ตารางที่ 3 คุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum alloy)

คุณสมบัติ	วัสดุ
	อลูมิเนียมอัลลอย
ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	2,700
โมดูลัสยืดหยุ่น (MPa)	68900
อัตราส่วนของปัวซอง	0.33
ความทนต่อแรงดึง (MPa)	310
ค่าความแข็งแรงคราก (MPa)	276

## 4. ขั้นตอนการวิเคราะห์ตู้รถไฟโดยสาร

### 4.1. แบบจำลองของตู้โดยสารรถไฟ

โครงสร้างของตู้โดยสารรถไฟถูกจำลองโดยใช้วิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนผนังใช้ชิ้นส่วนชนิด Shell Element ส่วนของโครงตู้รถไฟโดยสารใช้ส่วนเฟรมเอลิเมนต์ (Frame element) ดังแสดงในรูปที่ 9 สำหรับการกำหนดน้ำหนักของผู้โดยสารและสัมภาระได้กำหนดตามมาตรฐานสากลข้อกำหนดอ้างอิงมวลบรรทุก EN 15663 [6]



รูปที่ 9 แสดงแบบจำลอง 3 มิติ ตู้รถไฟโดยสารโดยใช้วิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์

### 4.2. การวิเคราะห์โดยวิธีสถิตย์

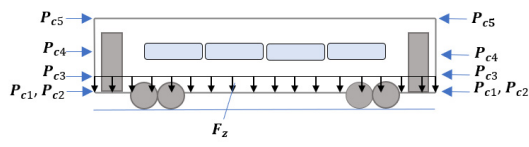
สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ตู้รถไฟโดยสารโดยวิธีสถิตย์จะ ออกแบบเป็นไปตามเกณฑ์ข้อกำหนดการออกแบบตู้รถไฟโดยสาร ตามมาตรฐานสากล EN12663-1 ซึ่งจะทำการทดสอบ แบ่งเป็น 3 กรณี คือ กรณีแรงกระทำตามยาว กรณีแรงกระทำแนวตั้ง และกรณีแรงกระทำสูงสุดของตู้รถไฟโดยสาร

#### 4.2.1. กรณีแรงกระทำตามยาว

เป็นแรงกระทำต่อตู้รถไฟโดยสารทั้งแรงอัดและแรงดึง เพื่อพิสูจน์ความแข็งแรงของตู้รถไฟโดยสารเมื่อเกิดแรงกระทำแบบจุด (Point load) มีทั้งหมด 6 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 และขนาดของแรงกระทำแสดงดังตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงตำแหน่งแรงอัดและแรงดึงกระทำต่อตู้โดยสารรถไฟ

ตำแหน่ง	แรง (KN)
แรงอัดที่กันชนและ/หรือข้อพ่วง ( $P_{c1}$ )	2000
แรงอัดในแนวทแยงมุมที่ตำแหน่งกันชน ( $P_{c2}$ )	500
แรงอัดที่ระดับ 150 มม. เหนือพื้นของโครงสร้างที่หน้าและหลังของโครงประธาน ( $P_{c3}$ )	400
แรงอัดที่ความสูงของขอบหน้าต่าง ( $P_{c4}$ )	300
แรงอัดที่ระดับความสูงของโครงหลังคา	
ด้านข้าง ( $P_{c5}$ )	300
แรงดึงสูงสุดในขณะเดินรถ ( $P_{t1}$ )	1000

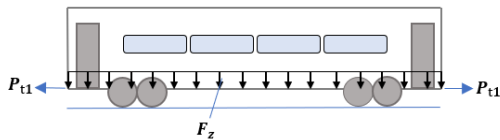


ก. มุมมองด้านข้าง

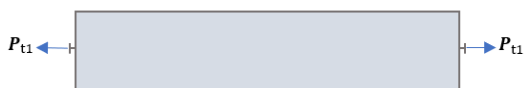


ข. มุมมองด้านบน

รูปที่ 10 แสดงตำแหน่งแรงแรงอัดที่กระทำต่อตู้รถไฟโดยสาร



ก. มุมมองด้านข้าง



ข. มุมมองด้านบน

รูปที่ 11 แสดงตำแหน่งแรงแรงดึงที่กระทำต่อตู้รถไฟโดยสาร

#### 4.2.2. กรณีแรงกระทำแนวตั้ง

มวลรถไฟแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ มวลของตู้โดยสารรถไฟ มวลของโบกี้ และมวลบรรทุก ซึ่งกำหนดสัญลักษณ์ตามตารางที่ 5

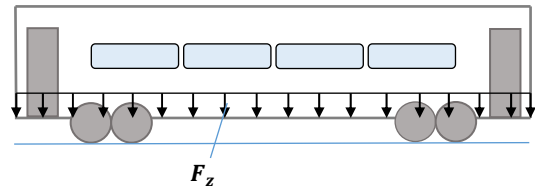
ตารางที่ 5 แสดงประเภทของแรงกระทำต่อตู้รถไฟโดยสาร

สัญลักษณ์	ความหมาย
$m_1$	มวลของตู้โดยสารรถไฟที่มีอุปกรณ์ครบครัน (kg)
$m_2$	มวลของโบกี้รถไฟ (kg)
$m_3$	น้ำหนักของผู้โดยสารแบบปกติ (kg)
$m_4$	น้ำหนักของผู้โดยสารหนาแน่นสูงสุด (kg)

ซึ่งในการออกแบบตู้รถไฟแนวตั้งจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 เพื่อพิสูจน์ความแข็งแรงของโครงสร้างตู้รถไฟโดยสารจะถูกทดสอบภาระน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ดังแสดงในสมการที่ 1 และน้ำหนักบรรทุกเหล่านี้กระจายทั่วพื้นของตู้รถไฟโดยสารแสดงในรูปที่ 12

$$F_z = 1.3 \cdot (m_1 + m_4) \cdot g \quad (1)$$

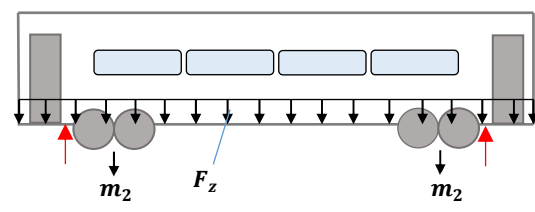


รูปที่ 12 แสดงแรงกระทำแนวตั้งสำหรับพาหนะขนส่งสาธารณะ

กรณีที่ 2 เกณฑ์การยกของตู้รถไฟโดยสาร โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 เหตุการณ์

เหตุการณ์แรก คือการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างในขณะที่เคลื่อนย้ายจากโรงงาน ตู้รถไฟโดยสารจะถูกยกขึ้นจากจุดยกที่ระบุส่งผลให้ทั้งสองโบกี้จะห้อยอยู่ที่ตู้รถไฟโดยสาร โดยแรงกระทำแนวตั้งแสดงวงสมการที่ 2

$$F_z = 1.1 \cdot (m_1 + 2m_2) \cdot g \quad (2)$$

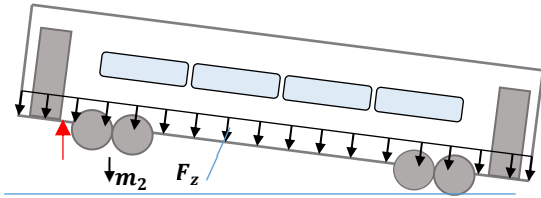


รูปที่ 13 แสดงแรงกระทำแนวตั้งสำหรับการเคลื่อนย้าย

เหตุการณ์ที่สอง เมื่อรถไฟตกรางโดยที่มีโบกี้หนึ่งยังอยู่บนราง ในระหว่างการยกโบกี้มาวางบนราง โบกี้หนึ่งจะห้อยอยู่ที่ตกราง

ด้วย ดังนั้นแรงกระทำแนวตั้งแสดงในสมการที่ 3

$$F_z = 1.1 \cdot (m_1 + m_2) \cdot g \quad (3)$$



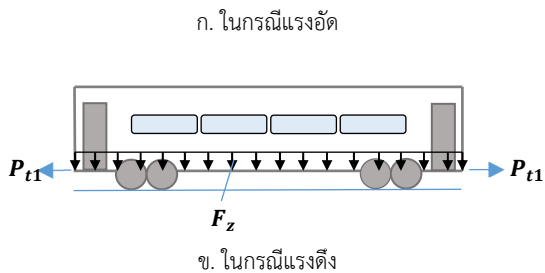
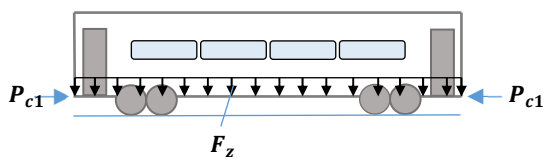
รูปที่ 14 แสดงแรงกระทำแนวตั้งสำหรับการยกตู้โดยสารฝั่งเดียว

#### 4.2.3. กรณีแรงกระทำสูงสุด

การพิสูจน์ความแข็งแรงของตู้รถไฟโดยสาร โดยทดสอบภาระน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ( $F_z$ ) ร่วมกับแรงอัดที่กันชนหรือขอฟวง ( $P_{c1}$ ) และแรงดึงสูงสุด ( $P_{t1}$ ) ในขณะเดินรถดังรูป 15 โดยการน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ( $F_z$ ) ตามสมการที่ 4 และสมการที่ 5

$$F_z = P_{c1} \text{ ร่วมกับ } 1 \cdot (m_1 + m_4) \cdot g \quad (4)$$

$$F_z = P_{t1} \text{ ร่วมกับ } 1 \cdot (m_1 + m_4) \cdot g \quad (5)$$



รูปที่ 15 แสดงกรณีแรงกระทำสูงสุดของตู้รถไฟโดยสาร

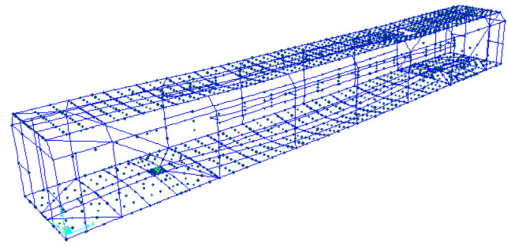
### 5. ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของโครงสร้างตู้รถไฟโดยสาร

การประเมินสมรรถนะของโครงสร้างตู้รถไฟโดยสารจะเปรียบเทียบในสามประเด็นคือ

- สมรรถนะด้านการรับน้ำหนัก
- น้ำหนักโดยรวมของโครงสร้าง
- ราคาค่าก่อสร้างโดยประมาณ

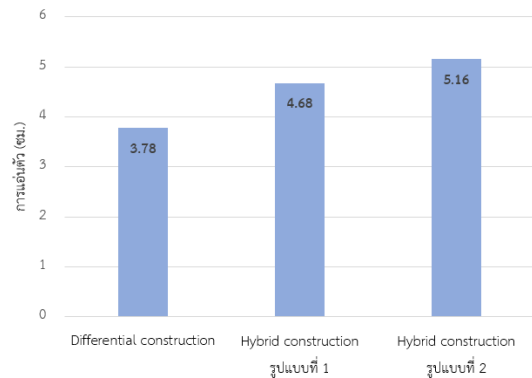
### 5.1. การเปรียบเทียบการสมรรถนะของโครงสร้างตู้รถไฟโดยสารด้านการรับน้ำหนัก

การประเมินผลสมรรถนะด้านการรับน้ำหนักของตู้รถไฟโดยสารทั้ง 3 รูปแบบ จากการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดส่งผลให้ตู้รถไฟโดยสารมีการแอ่นตัว (Deformation) ที่ตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางของขบวนสูงสุดและมีการแอ่นตัวเล็กน้อยที่บริเวณหัวและท้ายขบวน ซึ่งมีพฤติกรรมเหมือนกับคานช่วงเดี่ยวยาวยื่น (over-hanging beam) ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 แสดงการแอ่นตัวของตู้รถไฟโดยสารโดยรับภาระน้ำหนักบรรทุกสูงสุด

สำหรับผลการเปรียบเทียบการการแอ่นตัว (Deformation) ทั้ง 3 รูปแบบ แสดงในรูปที่ 17 พบว่าการแอ่นตัวมีค่า 3.78 - 5.16 เซนติเมตร ซึ่งรูปแบบ Differential Construction มีค่าการแอ่นตัวน้อยที่สุด คือ 3.37 เซนติเมตร บ่งบอกถึงรูปแบบนี้มีความแข็งแรง (Rigidity) มากที่สุด โดย Hybrid Construction รูปแบบที่ 2 มีการแอ่นตัวสูงสุด คือ 5.16 เซนติเมตร



รูปที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบการแอ่นตัวของตู้รถไฟโดยสารทั้ง 3 รูปแบบ

### 5.2. เปรียบเทียบน้ำหนักโดยรวมของตู้รถไฟโดยสาร

ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักของโครงสร้างตู้รถไฟไม่รวมน้ำหนักอุปกรณ์ภายในทั้ง 3 รูปแบบ มีค่าดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงผลของน้ำหนักตู้รถไฟโดยสาร

รูปแบบตู้รถไฟโดยสาร	น้ำหนัก (กก.)	
Differential construction	10,909	
Hybrid construction	รูปแบบที่ 1	9,956
	รูปแบบที่ 2	6,322

จากตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบน้ำหนักของตู้รถไฟโดยสาร แสดงให้เห็นน้ำหนักของตู้รถไฟโดยสาร มีค่า 6,322 - 10,909 กิโลกรัม ซึ่งรูปแบบ Hybrid construction รูปแบบที่ 2 มีค่าน้ำหนักน้อยที่สุด คือ 6,322 กิโลกรัม โดยรูปแบบที่มีน้ำหนักมากที่สุดคือรูปแบบ Differential construction มีค่าน้ำหนักมากที่สุดคือ 10,909 กิโลกรัม เมื่อน้ำหนักของตู้รถไฟโดยสารมีน้ำหนักเบาส่งผลให้เกิดผลดีหลายประการ เช่น ลดการใช้พลังงานในการขับเคลื่อน ลดขนาดของเครื่องยนต์และระบบเบรกให้มีขนาดเล็กลง ลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา สามารถรองรับผู้โดยสารมากขึ้น ลดการเสียหายของช่วงล่าง ลดขนาดของโครงสร้างที่รถไฟแล่นผ่าน เป็นต้น

### 5.3. เปรียบเทียบราคาตู้รถไฟโดยสาร

ผลการเปรียบเทียบราคาของตู้รถไฟโดยสารทั้ง 3 รูปแบบ แสดงดังตารางที่ 7 ประเมินราคาการก่อสร้างของตู้รถไฟโดยสารไม่รวมอุปกรณ์ภายใน โดยอ้างอิงราคาจากบัญชีราคาค่าวัสดุและค่าแรงงานสำหรับปีงบประมาณ พ.ศ. 2563 [7] ส่วนค่าวัสดุอะลูมิเนียมจะเป็นการประมาณราคาคิดเป็นสองเท่าของค่าวัสดุเหล็ก เนื่องจากประเทศไทยนั้นยังไม่มีราคาอ้างอิงของวัสดุอะลูมิเนียม

ตารางที่ 7 แสดงราคาของตู้รถไฟโดยสารแต่ละรูปแบบ

รูปแบบตู้รถไฟโดยสาร	ราคา (บาท)	
Differential construction	442,941.25	
Hybrid construction	รูปแบบที่ 1	467,283.00
	รูปแบบที่ 2	706,972.31

จากตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบราคาของการก่อสร้างตู้รถไฟโดยสาร แสดงให้เห็นราคาการก่อสร้างมีค่า 442,941.25 - 706,972.31 บาท ซึ่งรูปแบบ Differential Construction มีค่าการก่อสร้างน้อยที่สุด คือ 442,941.25 บาท โดยรูปแบบที่มีราคาการก่อสร้างมากที่สุดคือรูปแบบ Hybrid construction รูปแบบที่ 2 คือ 706,972.31 บาท

## 6. สรุปผลการวิจัย

จากการออกแบบและวิเคราะห์ตู้รถไฟโดยสารโดยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ตามมาตรฐานการออกแบบตู้โดยสารรถไฟ EN12663-1 เป็นเกณฑ์ สำหรับการ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพของตู้รถไฟโดยสารในแต่ละรูปแบบแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะของโครงสร้างตู้รถไฟโดยสารแต่ละรูปแบบ

รูปแบบตู้รถไฟโดยสาร	การแอ่นตัว	น้ำหนัก	ราคา
Differential construction	ต่ำ	สูง	ต่ำ
Hybrid construction รูปแบบที่ 1	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
		สูง	สูง
Hybrid construction รูปแบบที่ 2	สูง	ต่ำ	สูง

ตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ Differential construction มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของความแข็งแรงและราคาการก่อสร้างเมื่อเทียบกับรูปแบบ Hybrid construction ทั้งสองรูปแบบ แต่ในทางกลับกันเป็นโครงสร้างที่มีน้ำหนักสูงที่สุด ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่าตู้รถไฟโดยสารในรูปแบบ Hybrid construction รูปแบบที่ 2 เท่ากับ 4,587 กิโลกรัม คิดเป็น 72.56 %

ตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ Hybrid construction รูปแบบที่ 1 พบว่ามีคุณสมบัติอยู่ในระดับปานกลางและเมื่อเทียบกับตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ Differential construction พบว่ามีน้ำหนักน้อยกว่า 953 กิโลกรัม คิดเป็น 8.74 % แต่มีสมรรถนะต่ำกว่า 23.81 % และมีราคาที่สูงกว่า 5.50 %

ตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ Hybrid construction รูปแบบที่ 2 พบว่ามีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของน้ำหนัก และเมื่อเทียบกับตู้รถไฟโดยสารรูปแบบ Differential construction พบว่ามีน้ำหนักน้อยกว่า 4,587 กิโลกรัม คิดเป็น 42.04 % แต่มีสมรรถนะต่ำกว่า 36.51 % และมีราคาที่สูงกว่า 59.61 %

การเลือกวัสดุให้เหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทยเป็นอีกหนึ่งเรื่องที่สำคัญ ในแต่ละวัสดุมีทั้งข้อได้เปรียบและเสียเปรียบอย่างเช่นวัสดุเหล็กมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของความแข็งแรง แต่เรื่องการดูแลรักษาและอายุการใช้งาน วัสดุอะลูมิเนียมอาจเป็นทางเลือกที่ดีกว่า แต่ในเรื่องของการเชื่อมต่อของอะลูมิเนียมมีความยุ่งยากกว่ารวมทั้งเทคโนโลยีและช่างที่มีฝีมือมีความเชี่ยวชาญนั้นหาได้ยาก อย่างไรก็ตามการลดลงของน้ำหนักของตู้โดยสารรถไฟส่งผลในการประหยัดพลังงานและลดภาระน้ำหนักเพลานอกจากนี้ยังมีลดความเสียหายของรางสามารถยืดระยะเวลาการใช้งานของรางได้ยาวนานขึ้นและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของรางและโครงสร้างส่วนบน จากสิ่งเหล่านี้โครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาจึงมีบทบาทสำคัญของการพัฒนาระบบขนส่งด้วยรถไฟต่อไป

ในอนาคตเมื่อเทคโนโลยีในการผลิตมีสูงชันการพัฒนาการออกแบบตู้รถไฟโดยสารอาจเปลี่ยนวัสดุ โดยใช้อลูมิเนียมหรือใช้

วัสดุแซนด์วิช (Sandwich material) ที่มีแผ่นสกินเป็นโฟเบอร์นำมาสร้างเป็นผนัง ทั้งนี้จะส่งผลให้น้ำหนักโดยรวมของตู้รถไฟโดยสารมีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

## 7. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณสถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมถนนและระบบรางคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารสำนักงานปลัดกระทรวงพาณิชย์ โดยความร่วมมือจากกรมศุลกากร. (2559-2562). URL: <http://www.ops3.moc.go.th>
- [2] Koenig J., & E. Friedrich H. (2011). Integral consideration of the lightweight design for railway vehicles. Young Researchers Seminar, June 8-10, Copenhagen, Denmark.
- [3] Konig J., Kopp G.H., Winter J.C. (2012). Methodology for force flow optimised car body structures and implementation. Proceedings - 12th Stuttgart International Symposium Automotive and Engine Technology, March 13-14, Stuttgart, Germany
- [4] European Committee For Standardization. (2010). EN12663-1 Railway applications -Structural requirements of railway vehicle bodies - Part 1: Locomotives and passenger rolling stock (and alternative method for freight wagons).
- [5] Wennberg D.V. (2009). A Light Weight Car Body for High-Speed Trains. Ph.D. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [6] European Committee For Standardization. (2009). EN15663 Railway applications - Definition of vehicle reference masses.
- [7] สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์การค้า กระทรวงพาณิชย์. (2563). บัญชีราคาค่าวัสดุก่อสร้าง
- [8] ศิริชัย ต่อสกุล และไพฑูริย์ พูลสุขโข (2553). การศึกษาวัสดุแซนด์วิชสำหรับงานโครงสร้างเบาในประเทศไทยโดยการใช้วิธีการประเมิน UVA. การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 7, ประเทศไทย
- [9] Grasso M., Gallone A., Genovese A., Macera L., Penta F., Pucillo G., Strano S. (2015). Composite Material

Design for Rail Vehicle Innovative Lightweight Components. Proceedings of the World Congress on Engineering 2015 Vol II WCE 2015, July 1 - 3, London, U.K.

- [10] Ulianov C., Onder A., Peng Q. (2018). Analysis and selection of materials for the design of lightweight railway vehicles. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 292. DOI:10.1088/1757-899X/292/1/012072
- [11] Jaxa-Rozen W.S. (2014). Cold-worked austenitic stainless steels in passenger railcars and in other applications. Thin-Walled Structures 83, 190-199. DOI: 10.1016/j.tws.2014.01.027
- [12] Petr heller et al. (2012). Hybrid body of underground railway car: path towards reduced weight of rail vehicles. Regional Technological Institute, Faculty of Mechanical Engineering, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic. DOI: 10.17973/MMSJ.2015-10\_201514
- [13] Connor P. (2011) Railway Passenger Vehicle Capacity. Railway Technical Web Pages.
- [14] Skillingberg M.C., Green J. (2007). Aluminum Applications in the rail industry. Light metal age, October.
- [15] Bosso N.L., Gugliotta A.N., Zampieri N.L. (2018). Design and Simulation of a Railway Vehicle for the Transport of People with Reduced Mobility. Hindawi Shock and Vibration. DOI:10.1155/2018/9207639
- [16] Vani A., Dr. Jayachandriaiah B. (2015). Crashworthiness of a railway vehicle to reduce overriding effect by using Abaqus Software. International Journal of Engineering Science Invention, DOI:10.6084/M9.FIGS-HARE.1502440.V1
- [17] Wennberg D.V. (2013). Multi-Functional Composite Design Concepts for Rail Vehicle Car Bodies. Ph.D. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [18] Wennberg D.V. (2011). Light-Weighting Methodology in Rail Vehicle Design through Introduction of Load Carrying Sandwich Panels. Ph.D. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.