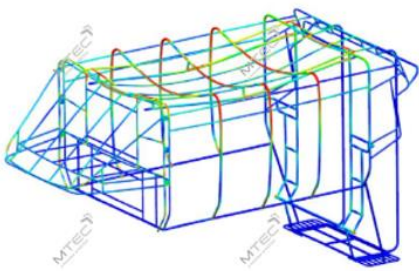


รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final Report)
“การศึกษาแนวทางการออกแบบเชิงวิศวกรรมเพื่อเพิ่มความปลอดภัยของ
รถสองแถวรับส่งนักเรียน”



โดย

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ระยะเวลาโครงการ 12 เดือน

คณะวิจัย

1. ดร. ศรารุช เลิศพลั่งสันติ
2. นายพีรภิตต์ วิริยะรัตนศักดิ์
3. นายณรงค์ พิทักษ์ทรัพย์สิน
4. นายประสิทธิ์ วัฒนวงศ์สกุล
5. ดร. ฉัตรชัย ศรีสุรางค์กุล
6. นายเศรษฐลัทธ์ แปงเครื่อง
7. นางสาวฝอยฝน ศรีสวัสดิ์
8. ดร. สุธี โอพารฤทธินันท์

แผนงานศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน ระยะที่ 5 มุขนิธินโยบายถนนปลอดภัย

บทคัดย่อ

ปัญหาที่มีอยู่ในปัจจุบันของการรับส่งนักเรียน คือ อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะในรถกระบะดัดแปลงที่มีความถี่และความรุนแรงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมีสาเหตุหลักๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของตัวรถ ดังนี้

- (1) มีการดัดแปลงรถกระบะที่นำมาใช้รับส่งนักเรียน โดยไม่ได้คำนึงถึงความปลอดภัยของผู้โดยสารเป็นหลัก แต่จะเป็นการผลิตตามความต้องการของผู้ประกอบการที่เน้นการบรรทุกผู้โดยสารได้มาก และราคาต่ำ เช่น มีการต่อเสริมเก้าอี้โดยสารออกนอกตัวรถ มีการบรรทุกคนเกินจำนวน ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันเด็กตกจากรถ รูปแบบการติดตั้งหลังคาและการเชื่อมต่อเข้ากับตัวรถไม่แข็งแรง
- (2) นอกจากมาตรฐานรถรับส่งนักเรียนที่มีอยู่ที่ประกาศโดย กรมการขนส่งทางบก อาทิ โครงสร้างหลังคามีความแข็งแรง ที่นั่งผู้โดยสารต้องยึดแน่นอย่างมั่นคงแข็งแรง และต้องไม่มีพื้นที่สำหรับนักเรียนยืนในห้องโดยสารเด็ดขาดแล้ว ควรมีแนวทางการออกแบบโครงสร้างของหลังคารับส่งนักเรียนเชิงวิศวกรรม

จากปัญหาดังกล่าวนี้ คณะวิจัยภายใต้แหล่งทุนจาก มูลนิธิถนนปลอดภัย ศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน (ศวปถ.) จึงได้ดำเนินโครงการนี้ โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เสนอแนะแนวทางการออกแบบเชิงวิศวกรรม (Design guideline) ของโครงสร้างหลักของรถรับส่งนักเรียนประเภทรถกระบะดัดแปลง ได้แก่ โครงสร้างหลังคา โดยมีเป้าหมายและผลผลิตหลักเป็น แบบเชิงวิศวกรรม (Technical drawings) เพื่อใช้เป็นข้อเสนอแนะในการประกาศมาตรฐานของกรมการขนส่งทางบก มาตรฐานรถรับส่งนักเรียน โดยกรมการขนส่งทางบก และใช้เป็นแนวทางการออกแบบ (Design guideline) ที่จะมีการถ่ายทอดไปยังผู้ผลิตหลังคารับส่งนักเรียนทั่วประเทศ

วัตถุประสงค์ของต้นแบบหลังคานี้ คือ การออกแบบหลังคาสำหรับรถรับส่งนักเรียนประเภทรถกระบะดัดแปลง ให้มีความแข็งแรงสอดคล้องตามมาตรฐาน FMVSS 220 (School Bus Rollover Protection) ซึ่งมีความท้าทายเชิงเทคนิค (Technical Challenges) ได้แก่ การออกแบบหลังคาให้มีความแข็งแรงตามมาตรฐานสากล โดยการใช้วัสดุและใช้วิธีการผลิต ที่ผู้ประกอบการผู้ต่อหลังคาทั้งรายใหญ่หรือรายย่อย สามารถเข้าถึงและดำเนินการได้ โดยมีผลลัพธ์ที่ ต้นทุนการผลิตที่ไม่สูงกว่าราคาหลังคาที่มีอยู่ในท้องตลาด ทฤษฎีที่ได้มีการนำมาใช้เพื่อออกแบบต้นแบบหลังคาให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าวคือ การเลือกวัสดุประเภทโลหะที่ได้รับความนิยมและมีราคาไม่สูงในท้องตลาด มาออกแบบร่วมกับการจัดวางโครงสร้าง โดยเน้นการเสริมโครงสร้าง (Reinforcement) ให้เกิดโครงสร้างที่รองรับแรงกระทำที่เกิดขึ้นในกรณีรถพลิกคว่ำหรือที่เรียกว่า “Superstructure” จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) แบบ Non-linear static เพื่อศึกษาการใช้ประสิทธิภาพของวัสดุให้สูงที่สุด และทำการพิสูจน์ความถูกต้องของการออกแบบ (Validation) ด้วยการทดสอบต้นแบบหลังคาแบบ Full-scale ในระดับห้องปฏิบัติการด้วย “แท่นทดสอบการกดหลังคา” ที่พัฒนาขึ้นเองโดยคณะวิจัย โดยผลการทดสอบพบว่า ค่าระยะการยุบตัวเสียรูปของโครงสร้าง (Deformation) ที่วัดได้จากการทดสอบเป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐาน FMVSS 220 กำหนด และพบว่ามีค่าใกล้เคียงและแนวโน้มเดียวกับการวิเคราะห์ผลด้วย Simulation จึงสามารถสรุปได้ว่า วิธีการที่คณะวิจัยนำมาใช้ในการทำนายด้านความแข็งแรงของหลังคามีความแม่นยำเพียงพอจากนั้นจึงได้ดำเนินการทดสอบต้นแบบในระดับภาคสนามด้วยการนำต้นแบบหลังคาไปติดตั้งจริงที่รถกระบะและนำไปใช้งานในสถานการณ์จริงในการรับส่งนักเรียน ในพื้นที่โรงเรียนบ้านตาเรือ อ.สอยดาว จ.จันทบุรี ซึ่งได้มีการประเมินผลการใช้งานในด้านความปลอดภัยโดยคนขับและผู้โดยสาร ต่อเนื่องตั้งแต่เดือนมิถุนายนที่ผ่านมา และมีแผนจะดำเนินขยายผลการใช้งานด้วยการถ่ายทอดความรู้พร้อมทั้งมอบแบบเชิงวิศวกรรมของโครงสร้างหลังคา ที่ประกอบด้วยโครงสร้างหลักและอุปกรณ์ต่อพ่วงอื่นๆ ได้แก่ ประตูท้ายบันไดท้ายให้แก่ผู้ประกอบการเดินรถ และอบรมผู้ประกอบการต่อไป

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	1
สารบัญ.....	2
บทที่ 1 บทนำ.....	4
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	4
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแบบ Non-linear Static.....	6
2.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	7
2.2.1 ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain).....	7
2.2.2 การเปลี่ยนรูป (Deformation).....	9
2.2.3 ความเค้นจุดคราก (Yield Strength).....	9
2.2.4 การยืดตัว (Elongation).....	9
2.2.5 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength).....	9
2.2.6 ความเหนียว (Ductility).....	9
2.2.7 ความแกร่ง (Toughness).....	9
2.2.8 ความแข็ง (Hardness).....	10
2.3 ชนิดของท่อที่ใช้ในโครงสร้างหลังคารับส่งนักเรียน.....	10
2.3.1 เหล็กกลมท่อดำ.....	10
2.3.2 ท่อประปาเคลือบสังกะสี.....	10
2.3.3 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกลม.....	10
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	12
3.1 แนวคิดในการดำเนินงาน.....	12
3.2 การสำรวจข้อมูลการดัดแปลงรถกระบะเป็นรถรับส่งนักเรียนจากผู้ประกอบการ.....	14
3.3 การศึกษารูปแบบรถกระบะที่ใช้รับส่งนักเรียน.....	16
3.4 การรวบรวมและวิเคราะห์ประเด็นปัญหาที่มีนัยสำคัญต่อความปลอดภัยของผู้โดยสาร.....	19
3.5 การออกแบบโครงสร้างภายในและภายนอกของรถสองแถว.....	19

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	20
4.1 ที่นั่งผู้โดยสาร.....	20
4.1.1 รูปแบบการจัดวาง	20
4.1.2 วิธีการจับยึดที่นั่งให้มีความแข็งแรง	22
4.2 โครงสร้างหลังคา.....	24
4.2.1 คุณลักษณะ (Features).....	25
4.2.2 เกณฑ์ในการออกแบบ (Design Criteria).....	25
4.2.3 การออกแบบและการวิเคราะห์ความแข็งแรงของต้นแบบ	26
4.3 แนวทางการนำอุปกรณ์ passive safety เข้ามาใช้เพื่อลดความรุนแรงของอุบัติเหตุ.....	33
4.4 การทดสอบต้นแบบระดับภาคสนามด้วยการนำไปใช้งานในพื้นที่จริง.....	33
4.4.1 โครงหลังคาสำหรับส่งนักเรียนที่พัฒนาขึ้นในโครงการ	34
4.4.2 ลักษณะการใช้งานรถทดสอบ	35
4.4.3 การประเมินผลการใช้งานโดยผู้ใช้ (คนขับและนักเรียน).....	35
4.5 สรุปข้อเสนอแนะแนวทางการออกแบบเชิงวิศวกรรมของรถสองแถวรับส่งนักเรียน	37
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	38
กิตติกรรมประกาศ	39
บรรณานุกรม	40
ภาคผนวก การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของท่อตัวอย่าง	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สืบเนื่องจากสถานการณ์ที่อุบัติเหตุรถรับส่งนักเรียนที่มีความถี่และความรุนแรงเพิ่มสูงขึ้น โดยศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน ได้สรุปสถิติอุบัติเหตุรถรับ-ส่งนักเรียน ตั้งแต่เดือนมกราคม 2559 ถึงเดือนพฤษภาคม 2559 พบรถกระบะดัดแปลงเกิดอุบัติเหตุ มีเด็กบาดเจ็บ และเสียชีวิตมากที่สุด มากกว่ารถหกล้อดัดแปลง และรถตู้รับ-ส่งนักเรียน เกิดอุบัติเหตุแล้ว 7 ครั้ง มีผู้บาดเจ็บ 90 คน เสียชีวิต 4 คน แม้ว่ากรมการขนส่งทางบกจะได้ออกมาตรการปฏิบัติในการอนุญาตให้ใช้รถรับจ้างรับส่งนักเรียน โดยมีข้อกำหนดต่างๆ อาทิ โครงสร้างหลังคามีค้ำยันแข็งแรง ที่นั่งผู้โดยสารต้องยึดแน่นอย่างมั่นคงแข็งแรง และต้องไม่มีพื้นที่สำหรับนักเรียนยืนในห้องโดยสารเด็ดขาด กรณีเป็นรถสองแถวต้องมีประตูและที่กั้นป้องกันนักเรียนตก อย่างไรก็ตาม การออกแบบโครงสร้างหลังคาสำหรับรถกระบะดัดแปลงที่กรมการขนส่งทางบกประกาศ ยังขาดความเป็นรูปธรรมที่ผู้ประกอบการหรือผู้ประกอบการหลังการดัดแปลงนำไปใช้ได้เลย กล่าวคือ ยังขาดแนวทางการออกแบบเชิงวิศวกรรมของหลังคา ได้แก่ ชนิดวัสดุที่ใช้ และรูปแบบการเชื่อมต่อของโครงสร้างหลังคา วิธีการจับยึดโครงสร้างหลังคาเข้ากับตัวกระบะ รวมถึงการออกแบบประตูท้ายเพื่อป้องกันนักเรียนตก หรือการออกแบบบันไดท้าย เพื่อลดอุบัติเหตุ เป็นต้น

สิ่งที่เป็นอยู่ในปัจจุบันคือ อุปกรณ์รถกระบะดัดแปลงส่วนใหญ่ที่ได้เข้าไปสำรวจที่จังหวัดต่างๆ ทั้งขนาดใหญ่และเล็ก ยังทำการดัดแปลงรถกระบะที่นำมาใช้รับส่งนักเรียน โดยไม่ได้คำนึงถึงความปลอดภัยของผู้โดยสารเป็นหลัก แต่จะเป็นการผลิตตามความต้องการของผู้ประกอบการที่เน้นการบรรทุกผู้โดยสารได้มาก และราคาต่ำ เช่น มีการต่อเสริมเก้าอี้โดยสารออกมานอกตัวรถ มีการบรรทุกคนเกินจำนวน ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันเด็กตกจากรถ รูปแบบการติดตั้งหลังคาและการเชื่อมต่อเข้ากับตัวรถไม่แข็งแรง

ด้วยเหตุนี้เอง แรงจูงใจที่นำมาซึ่งวัตถุประสงค์หลักในการดำเนินโครงการนี้ของคณะวิจัยคือ การออกแบบและพัฒนาต้นแบบหลังการดัดแปลงที่มีเงื่อนไขในการออกแบบ (Design criteria) ที่ท้าทายดังต่อไปนี้

- (1) โครงสร้างรองรับแรงกระทำจากการพลิกคว่ำ (Superstructure) ตามมาตรฐานสากล ได้แก่ FMVSS 220
- (2) ใช้วัสดุและวิธีการผลิตที่อยู่ต่อหลังคาเหล็กทั่วไปสามารถผลิตได้เอง
- (3) มีต้นทุนที่อยู่ในขอบเขตไม่เกิน 80,000 บาท ซึ่งเป็นราคาจำหน่ายหลังคาสำหรับรถกระบะดัดแปลงสูงสุดที่คณะวิจัยได้ข้อมูลจากการสำรวจและลงพื้นที่

ในโครงการนี้ คณะวิจัยได้เริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลรูปแบบและวิธีการต่อเติมรถรับส่งนักเรียนประเภทรถสองแถวที่เป็นอยู่ส่วนใหญ่ในปัจจุบันจากการสำรวจต่อหลังคาเหล็ก รวมถึงเก็บข้อมูลสถานการณ์การใช้รถสองแถวรับส่งนักเรียนที่พบได้ส่วนใหญ่ เช่น จำนวนผู้โดยสารโดยเฉลี่ย รูปแบบการโดยสาร (นั่ง-ยืน) ความเร็วเฉลี่ย ความเร็วสูงสุด ในหลายจังหวัด ตามด้วยการออกแบบหลังคาสำหรับรถกระบะดัดแปลงให้ได้ความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับแรงกระทำที่เกิดขึ้น กรณีที่รถเกิดอุบัติเหตุพลิกคว่ำ หรือที่เรียกว่า “Rollover” ซึ่งใช้เกณฑ์ในการออกแบบ (Design Criteria) ตามมาตรฐาน FMVSS 220 ที่ระบุเงื่อนไขและเกณฑ์สำหรับการทดสอบโครงสร้างความแข็งแรงของรถโดยสารโดยจำลองเหตุการณ์รถพลิกคว่ำด้วยการทดสอบด้วยแรงกระทำที่แผ่นหลังคาของโครงสร้างห้องโดยสารแบบ Static โดยการยุบตัว (Deformation) ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน ซึ่งคณะวิจัยได้ทำการออกแบบและทบทวนวิธีการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนโครงสร้างและเลือกวัสดุที่เหมาะสม ทั้งในด้านความแข็งแรง น้ำหนัก และต้นทุน และรวบรวมแนวทางในการเพิ่มความแข็งแรง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) พิสูจน์ความถูกต้องของการออกแบบ (Design Validation) ด้วยการทดสอบต้นแบบหลังคาแบบ Full scale ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งดำเนินการที่แทนทดสอบที่กรมการขนส่งทางบก อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี จากผลการทดสอบต้นแบบพบว่า ระยะยุบตัวจากแรงกระทำที่หลังคาของ

โครงสร้าง มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์สูงสุดที่กำหนด และสามารถนำวิธีการออกแบบโครงสร้างและวัสดุของต้นแบบ Full scale ไปใช้ในการกระบวนการผลิตหลังการรับส่งนักเรียนประเภทกระเบดัดแปลงต่อไป โดยผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของการเริ่มต้นจากจังหวัดจันทบุรี ที่ทางศวป. ได้สร้างเครือข่าย “จันทบุรีโมเดล” โดยการนำแนวทางบริหารจัดการความร่วมมือระหว่าง กรมการขนส่งทางบก-โรงเรียน-กลุ่มผู้ประกอบการ-ผู้ประกอบการเดินรถ เพื่อยกระดับการรับส่งนักเรียนให้มีความปลอดภัย ร่วมกับการนำการออกแบบเชิงวิศวกรรมของโครงสร้างรถ (โดย MTEC) และการนำระบบติดตามรถรับส่งนักเรียน (NECTEC) มาใช้ ซึ่งผลการจากดำเนินโครงการต่างๆ ของศวป. นี้ จะมีการขยายผลไปยังจังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์

- (1) ศึกษาปัญหาประเด็นปัญหาที่มีนัยสำคัญและมีความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของผู้โดยสาร ด้วยการเก็บข้อมูลรูปแบบวิธีการ และวัสดุที่ใช้ในการต่อเติมโครงสร้างหลังคาและที่นั่งของรถสองแถวรับส่งนักเรียน รวมถึงเก็บข้อมูลสถานการณ์การใช้รถสองแถวรับส่งนักเรียนที่พบได้ส่วนใหญ่ อาทิ จำนวนผู้โดยสารโดยเฉลี่ย รูปแบบการโดยสาร (นั่ง-ยืน) ความเร็วเฉลี่ย ความเร็วสูงสุด ความถี่ในการจอดเพื่อรับส่ง
- (2) เสนอแนวทางการออกแบบโครงสร้างของรถรับส่งนักเรียนให้มีความปลอดภัยสูงขึ้นด้วยการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

วัตถุประสงค์หลักในโครงการ คือการออกแบบและพัฒนาต้นแบบหลังการกระเบดัดแปลงให้มีความปลอดภัย โดยมีเงื่อนไขขอบเขตในการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

- (1) โครงสร้างรองรับแรงกระทำจากการพลิกคว่ำ (Superstructure) ตามมาตรฐานสากล ได้แก่ FMVSS 220
- (2) ใช้วัสดุและวิธีการผลิตที่อยู่ต่อหลังคาเหล็กทั่วไปสามารถผลิตได้
- (3) มีต้นทุนที่อยู่ในขอบเขตไม่เกิน 80,000 บาท ซึ่งเป็นราคาจำหน่ายหลังคาสำหรับรถกระเบดัดแปลงสูงสุดที่คณะวิจัยได้ ข้อมูลจากการสำรวจและลงพื้นที่
- (4) การลงพื้นที่สำรวจการใช้งานรถรับ-ส่งนักเรียน ทำในพื้นที่ตัวอย่างบางจุดใน กทม. ปทุมธานี ขอนแก่น และจันทบุรี
- (5) อ้างอิงตามแนวปฏิบัติในการอนุญาตให้ใช้รถรับจ้างรับส่งนักเรียน ของกรมขนส่งทางบก (สิงหาคม 2559)

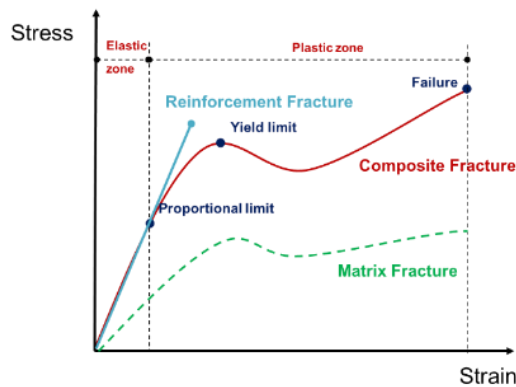
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีและหลักการที่นำมาใช้ในการออกแบบต้นแบบหลังคาในโครงการนี้คือ การวิเคราะห์ความแข็งแรงแบบ Non-linear analysis ของวัสดุโลหะที่อยู่ในช่วงเกิน Yield strength เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของต้นแบบดังกล่าวได้ โดยสามารถสรุปหลักการวิเคราะห์ได้ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแบบ Non-linear Static

โครงสร้างที่มีการผสมผสานระหว่างวัสดุอย่างน้อยสองชนิด จะมีสมบัติทางกล ดังที่แสดงในรูปที่ 1 กล่าวคือลักษณะการบิดตัวหรือยุบตัว (Deformation) ต่อแรงกระทำแบบ Linear ใน Elastic Zone อันเนื่องมาจากส่วนประกอบโครงสร้างที่เป็นวัสดุเสริมแรง (เส้นสีฟ้า ในรูปที่ 1) และลักษณะการบิดตัวหรือยุบตัว (Deformation) ต่อแรงกระทำแบบ Non-linear ใน Plastic Zone อันเนื่องมาจากส่วนประกอบคอมโพสิตที่เป็นวัสดุเมทริกซ์ (เส้นสีเขียว ในรูปที่ 1)



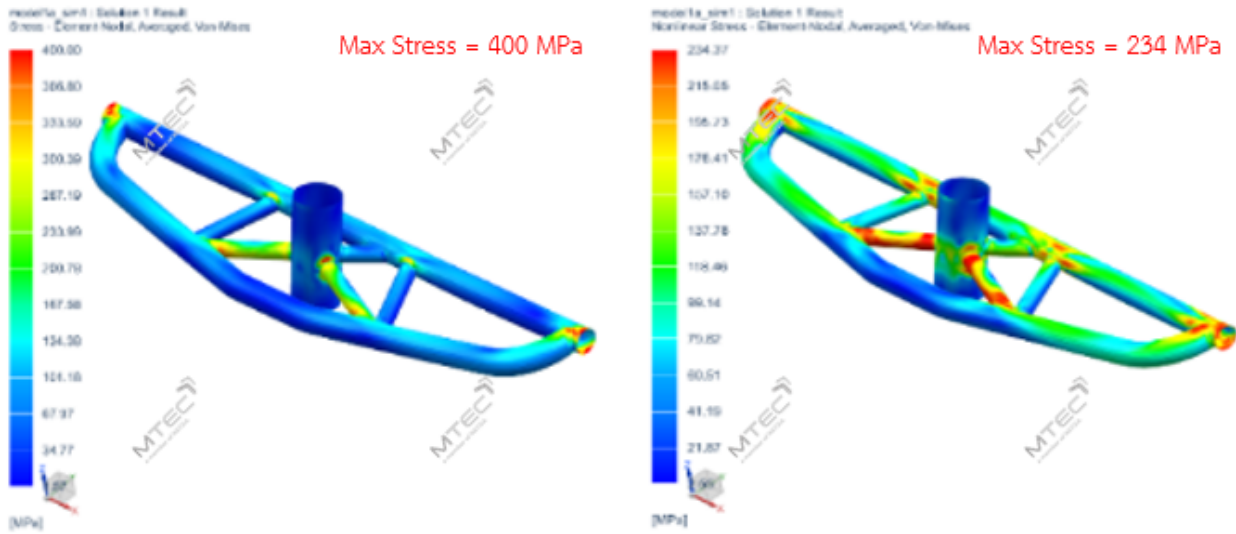
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของโครงสร้างที่มีการใช้วัสดุสองชนิดขึ้นไป

เนื่องจากเหตุการณ์จริงส่วนใหญ่จะมีพฤติกรรมแบบ Non-linear การวิเคราะห์แบบ Non-linear โดยกำหนดให้สมบัติของวัสดุ ได้แก่ ค่า Stiffness matrix มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างได้รับแรงกระทำ จึงถือว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมาก ซึ่งมีความแม่นยำมากกว่า การวิเคราะห์แบบ Linear ที่จะกำหนดให้ค่า Stiffness matrix มีค่าคงที่

การวิเคราะห์แบบ Non-linear analysis คือ การศึกษาความสัมพันธ์ที่ไม่ใช่แบบเส้นตรงระหว่างแรงกระทำ (Forces) หรือ ค่าความเค้น (Stress) และระยะการเสียรูป (Displacements) หรือ ค่าความเครียด (Strain) ของวัสดุ ซึ่งวิธีการนี้มีจุดเด่นในด้านความแม่นยำที่สูง และสามารถใช้ศึกษาขีดความสามารถของวัสดุไปถึงช่วง Plastic zone ที่เกินค่า Yield strength ได้ โดยการวิเคราะห์แบบ Non-linear จะคำนึงถึงกรณีต่างๆ ดังนี้

- 1) สมบัติของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลง (Material Non-linearity) กรณีที่ใช้วัสดุแบบ Elasto-plastic เช่น ยาง พลาสติก
- 2) รูปร่างของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลง (Geometrical Non-linearity) ชิ้นงานมีการบิดงอหรือเสียรูปขนาดใหญ่ (Large deformation) จนทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไปมากจากค่าเริ่มต้น
- 3) สภาวะหรือเงื่อนไขการทดสอบมีการเปลี่ยนแปลง (Constraint and Contact Non-linearity) เช่น จุดสัมผัสของชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ จะพบว่า ค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ Non-linear มีค่าต่ำกว่า แต่ค่าความเครียดหรือระยะการเสียรูปที่สูงกว่า แต่ต้องใช้เวลาานานกว่ามากในการคำนวณให้ได้ผลลัพธ์ออกมาดังที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 2 (ขวา)



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบ Linear และ Non-linear

2.2 สมบัติเชิงกลของวัสดุ

สมบัติเชิงกลเป็นสมบัติที่ตอบสนองต่อแรงกระทำจากภายนอก เช่น ความแข็งแรง ความแข็ง ความเหนียว และความล้า เป็นต้น ในการออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้าง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับสมบัติเหล่านี้ในการเลือกใช้วัสดุหรือกำหนดขนาดของวัสดุ เพื่อป้องกันการใช้งานผิดพลาดและการเกิดความเสียหาย

2.2.1 ความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain)

ความเค้นและความเครียดสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือความเค้นและความเครียดวิศวกรรม (Engineering Stress and Strain) และความเค้นและความเครียดจริง (True Stress and Strain)

2.2.1.1 ความเค้นวิศวกรรม (σ) สามารถหาได้จากการหารแรงดึงที่กระทำต่อชิ้นงานด้วยพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงานก่อนที่จะทำการดึง ดังสมการ

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

โดยที่ P คือแรงกระทำ และ A_0 คือพื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับแรงที่กระทำ ในกรณีของแรงดึงหรือแรงกด หน่วยของความเค้นที่นิยมใช้มีหลายหน่วยด้วยกัน เช่น ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) นิวตันต่อตารางเมตร (Pa) หรือกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นต้น

2.2.1.2 ความเครียดวิศวกรรม (ϵ) สามารถหาได้จากการหารความยาวที่เปลี่ยนไปของชิ้นงานด้วยความยาวเดิม

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

โดยที่ Δl คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และ l_0 คือความยาวเดิม ความเครียดเป็นค่าไร้หน่วย ซึ่งในทางปฏิบัติมักจะแสดงค่าความเครียดเป็นเปอร์เซ็นต์ เรียกว่า เปอร์เซ็นต์การยืด (Percent Elongation)

2.2.1.3 ความเค้นจริง (σ_t) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_t = \frac{P}{A_t}$$

โดย A_t คือพื้นที่หน้าตัดจริงของชิ้นงานที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขณะรับแรงดึง

ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดระหว่าง σ และ σ_t คือหลังจากเกิดคอคอดขึ้นบนชิ้นงานแล้ว σ มีแนวโน้มที่จะลดลง ในขณะที่ σ_t มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน

ในการทำงานเดียวกันแทนที่จะใช้ค่าความเครียดวิศวกรรม (ϵ) ซึ่งพิจารณาเพียงระยะยืด ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งของชิ้นงานเทียบกับความยาวเดิม ได้มีการนิยามความเครียดจริง (ϵ_t) ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานขึ้น ดังนี้

$$\epsilon_t = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

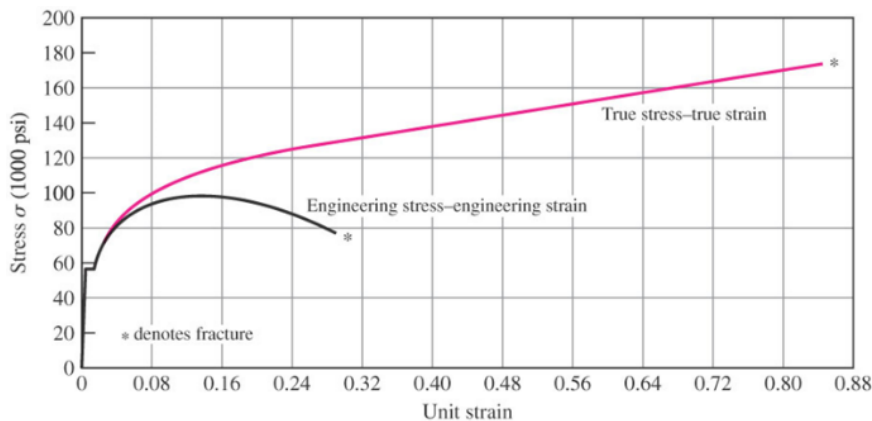
โดยที่ L คือความยาวของชิ้นงานขณะทำการดึง และ L_0 คือความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานก่อนทำการดึง

ค่าความเครียดจริงที่ได้จากสมการข้างต้นเป็นค่าที่เกิดจากการรวมสะสมความเครียดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานตั้งแต่เริ่มรับแรงจนกระทั่งขาดออกจากกัน รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างของการเปรียบเทียบระหว่างความเค้นและความเครียดวิศวกรรมกับความเค้นและความเครียดจริง

จากกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดจริง จะสามารถแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\sigma_t = K\epsilon^n$$

โดยที่ K คือค่าสัมประสิทธิ์ความแข็งแรง (Strength Coefficient) และ n คือเลขชี้กำลังการทำให้อ่อนลงด้วยความเครียด (Strain Hardening Exponent)



รูปที่ 3 แผนภาพความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม และความเค้น-ความเครียดจริง

นอกจากนี้เรายังสามารถแบ่งประเภทของความเค้นตามลักษณะทิศทางที่กระทำต่อหน้าตัดวัตถุได้เป็น 2 ประเภท คือ ความเค้นตั้งฉาก (Normal Stress) เป็นความเค้นที่เกิดจากพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานกับแรงภายนอกที่มากระทำนั้นตั้งฉากกัน ซึ่งสามารถแบ่งได้ออกเป็นอีก 2 ประเภท คือ ความเค้นดึง (Tensile Stress) และความเค้นอัด (Compressive Stress)

และความเค้นเฉือน (Shear Stress: τ) คือความเค้นที่เกิดจากแรงดึงหรือกดให้อะตอมของวัสดุนั้นเลื่อนผ่านกันหรือเคลื่อนออกจากกัน คิดเป็นแรงต่อพื้นที่ซึ่งขนานกับทิศทางของแรง แรงที่กระทำในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า แรงเฉือน (Shear Force)

2.2.2 การเปลี่ยนรูป (Deformation)

แบ่งเป็น **การเปลี่ยนรูปแบบไม่ถาวร (Elastic Deformation)** คือ การเปลี่ยนรูปที่สามารถคืนรูปเดิมของวัสดุได้หลังจากที่ได้รับแรงกระทำจากภายนอก การเปลี่ยนแปลงของอะตอมจะเป็นไปตามขนาดและทิศทางของแรงที่มากระทำในช่วงระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลง ขณะเดียวกันจะมีแรงต้านทานภายในซึ่งเกิดจากความพยายามกลับสู่ที่เดิมของอะตอม ทำให้อะตอมมีความเครียดเกิดขึ้นและเมื่อหลังจากเอาแรงภายนอกออก อะตอมจะเลื่อนกลับมาสู่ที่เดิมส่งผลให้วัตถุกลับสู่รูปร่างเดิม โดยวัตถุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปแบบไม่ถาวรได้ไม่เท่ากัน ในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบไม่ถาวรนี้ ความเค้นจะแปรผันตรงกับความเครียด และเมื่อนำเอาค่าความเค้นมาเทียบอัตราส่วนต่อค่าความเครียดจะได้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ค่าคงที่นี้ เรียกว่า ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity or Young's Modulus: E) มีหน่วยเดียวกับความเค้น ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

ส่วน **การเปลี่ยนรูปแบบถาวร (Plastic Deformation)** เป็นสมบัติของวัสดุที่ถูกแรงกระทำจนกระทั่งเกินจุดครากไป ส่งผลให้วัสดุนั้นเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรโดยไม่กลับคืนรูปเดิมถึงแม้จะเอาแรงภายนอกออกก็ตาม กลไกของการเปลี่ยนรูปแบบถาวรนั้น เกิดจากการที่ระนาบของอะตอมในโครงสร้างภายในเกิดการเลื่อนไถลจากตำแหน่งเดิมไปอยู่อีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งต้องอาศัยพลังงานปริมาณมาก

2.2.3 ความเค้นจุดคราก (Yield Strength)

เป็นค่าขีดจำกัดของการเปลี่ยนรูปแบบไม่ถาวร กล่าวคือ จุดสุดท้ายที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเส้นตรง ถ้าวัสดุได้รับความเค้นต่ำกว่าความเค้นจุดคราก วัสดุจะกลับมารูปเดิมได้หลังจากเอาแรงออก แต่ถ้าวัสดุได้รับความเค้นเกินกว่าค่านี้อาจเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวร ดังนั้น ในการขึ้นรูปโลหะต้องใช้แรงในการขึ้นรูปมากพอที่จะทำให้ค่าความเค้นเกินกว่าความเค้นจุดคราก

2.2.4 การยืดตัว (Elongation)

การยืดตัว (Elongation) เป็นค่าการยืดตัวของวัสดุตั้งแต่เริ่มตึงจนถึงจุดที่วัสดุขาด โดยจะเป็นค่าที่บอกกว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุแบบยืดหรือแบบเปราะ การยืดตัวสามารถหาได้จากการนำค่าความเครียดแตกหักคูณด้วย 100 เพื่อให้มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

2.2.5 ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength)

ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) เป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุสามารถรับได้ก่อนที่จะเกิดความเสียหาย ถ้าวัสดุได้รับความเค้นเกินกว่านี้ จะเกิดการฉีกขาด ในการตัดวัสดุ ต้องให้แรงจนกระทั่งความเค้นที่เกิดขึ้นเกินกว่าค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด วัสดุจึงจะขาดออกจากกัน แต่ในการขึ้นรูปต้องไม่ให้ค่าความเค้นในวัสดุสูงกว่าค่านี้ เพราะจะเกิดการฉีกขาดของวัสดุได้

2.2.6 ความเหนียว (Ductility)

ความเหนียว (Ductility) หมายถึง สมบัติของวัสดุต่อความสามารถที่จะยืดออกได้หรือถูกดึงออกได้ในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบถาวร โดยส่วนมากค่าของความเหนียวมักจะถูกคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืดออก (Percent of Elongation) ของชิ้นงานทดสอบเมื่อถูกดึงขาด

2.2.7 ความแกร่ง (Toughness)

ความแกร่ง (Toughness) และโมดูลัสความแกร่งของวัสดุ (Modulus of Toughness) เป็นปริมาณพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่วัสดุสามารถรับไว้ได้โดยที่ไม่เกิดการแตกหัก ค่าโมดูลัสความแกร่งของวัสดุจะมีค่าเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด วัสดุที่มีความแกร่งสูงจะสามารถรับแรงกระทำแตกได้ดีกว่าวัสดุที่มีความแกร่งต่ำ ดังนั้น

ในการเลือกวัสดุที่ต้องรับแรงกระแทก ต้องพิจารณาความแกร่งเป็นหลัก โดยวัสดุที่มีความแกร่งสูงต้องมีความแข็งแรงสูงและสามารถยึดตัวได้ดี อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับแรงกระแทกมักนิยามหาโดยตรงจากการทดสอบการกระแทก (Impact Test)

2.2.8 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็ง (Hardness) เป็นความต้านทานการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของวัสดุ สามารถวัดได้โดยการกดหัวกดที่ทำมาจากวัสดุที่มีความแข็งสูงมากลงในเนื้อวัสดุ โดยกำหนดให้แรงที่ใช้กดเป็นไปตามมาตรฐาน หลังจากกดแล้วให้เอาหัวกดออก แล้วทำการวัดขนาดของรอยกดที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปแปลงเป็นค่าความแข็งของวัสดุต่อไป

2.3 ชนิดของท่อที่ใช้ในโครงสร้างหลังการรับส่งนักเรียน

ท่อเหล็กชนิดและขนาดต่างๆ เป็นที่นิยมใช้ในการเชื่อมประกอบโครงสร้างหลังการรับส่งนักเรียน โดยสามารถสรุปได้เป็น 3 ประเภทดังต่อไปนี้

2.3.1 เหล็กกลมท่อดำ

เหล็กกลมท่อดำ (Carbon Steel Tubes) หรือที่นิยมเรียกกันว่า เหล็กท่อดำ แป๊บดำ หรือท่อดำ ผลิตจากเหล็กกล้าแผ่นคุณภาพสูง นิยมนำไปใช้เป็นโครงสร้างทั่วไปหรือใช้เป็นท่อลำเลียง ท่อประปา และท่อชลประทาน ท่อดำยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทั่วไปอื่นๆ ได้อีกเช่นกัน อาทิ ร้อยท่อสายไฟ รั้ว ประตู แม้กระทั่งงานตกแต่งทั่วไป โดยทั่วไปท่อดำจะมีลักษณะเป็นท่อเหล็กยาวตามมาตรฐาน มอก. 276-2532 ความยาวที่ใช้งานทั่วไปคือ 6 เมตร มีความสามารถในการรับแรงดัน มีความแข็งแรงทนทานแต่น้ำหนักเบาตะเข็บเรียบ สะดวกในการเชื่อมต่อ

2.3.2 ท่อประปาเคลือบสังกะสี

ท่อประปาเคลือบสังกะสี (Galvanized Steel Pipe) หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า ท่อประปา เกิดจากการนำท่อดำไปชุบสังกะสีเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดสนิมและการผุกร่อน มีความทนทาน และอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าท่อเหล็กดำที่เคลือบและไม่เคลือบสีรองพื้น โดยแบ่งตามความหนาเป็น 4 ประเภท คือ คาดเขียว (ผนังหนาที่สุด) คาดแดง คาดน้ำเงิน และคาดเหลือง (ผนังบางที่สุด) ท่อเหล็กเคลือบสังกะสีจึงเป็นที่นิยมใช้ในงานหรือบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการผุกร่อนของเหล็กสูง เช่น เครื่องจักรภายในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์และสิ่งปลูกสร้างบริเวณริมทะเล อย่างไรก็ตาม ท่อเหล็กชุบสังกะสีจะมีต้นทุนการผลิตและราคาจำหน่ายสูงกว่าท่อดำค่อนข้างมาก

ข้อดีของการใช้ท่อประปาเคลือบสังกะสีอีกประการหนึ่งคือ มีความแข็งแรงมาก สามารถรับแรงกดทับจากรถใหญ่ได้เหมาะกับการใช้ในบริเวณที่ต้องการความแข็งแรงสูง แต่อย่างไรก็ตาม ท่อประปาเคลือบสังกะสีมีข้อเสียคือ จะเป็นสนิมบริเวณที่รอยเชื่อมและรอยต่อ เนื่องจากต้องมีการขึ้นเกลียว จึงทำให้สังกะสีที่เคลือบหลุดออก ถึงกระนั้นก็ตาม อายุการใช้งานเฉลี่ยของท่อประปาเคลือบสังกะสีจะอยู่ที่ประมาณ 10-20 ปี ตามมาตรฐาน มอก. 277-2532

2.3.3 ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม

ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม 304 หรือเรียกทั่วไปว่า ท่อเหล็กกล้าไร้สนิม มีคุณสมบัติที่ตอบรับกับความต้องการของตลาดด้านคุณภาพและลักษณะเฉพาะตัวที่ทำให้เกิดความรู้สึกหรูหรา สวยงาม โดดเด่น จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในงานตกแต่ง เช่น ราวจับ ประตูรั้ว หรือรถเข็น เป็นต้น

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) เป็นโลหะผสมเหล็กที่มีโครเมียมอย่างน้อยที่สุด 10.5% จึงเกิดปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนในอากาศกับโครเมียมในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดเป็นฟิล์มบางๆ เคลือบผิวไว้ ทำหน้าที่ปกป้องการเกิดความเสียหายให้กับตัวเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมได้เป็นอย่างดี ปกป้องการกัดกร่อน และไม่ขรุขระหรือสึกกร่อนง่ายอย่างโลหะทั่วไป ในท้องตลาดสามารถพบเห็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 18-8 มากที่สุด

สำหรับโครงการรถรับส่งนักเรียนตามโครงการวิจัยนี้ได้เลือกใช้ท่อประปาเคลือบสังกะสีที่มีความแข็งแรงเพื่อลดต้นทุนการผลิต แต่ยังให้ประสิทธิภาพในการใช้งานระยะยาวเนื่องจากการเคลือบสังกะสีเพื่อป้องกันการกัดกร่อน และใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกลมภายนอกเพื่อความสวยงาม ป้องกันการกัดกร่อน และความแข็งแรงที่สูงยิ่งขึ้นของโครงสร้างหลังคา โดยขนาดของท่อประปาเคลือบสังกะสีและท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกลมมีตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ¾ นิ้ว และ ½ นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 4



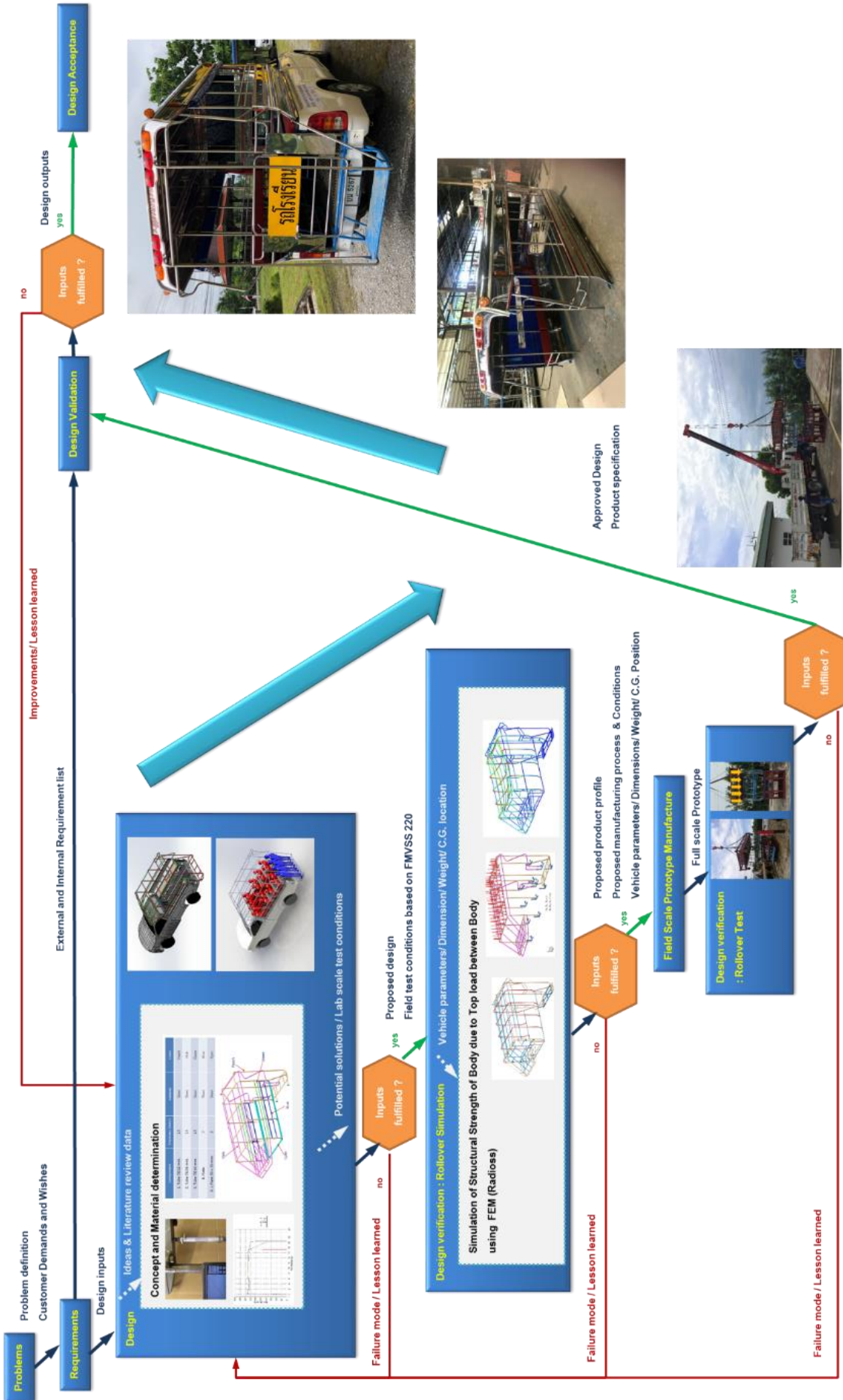
รูปที่ 4 ตัวอย่างท่อประปาเคลือบสังกะสีและท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกลมที่ใช้ในงานโครงสร้าง

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 แนวคิดในการดำเนินงาน

แนวทางในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบหลังการรับส่งนักเรียนในโครงการนี้ มีขั้นตอนต่างๆ โดยยึดหลักการออกแบบจากแนวทาง VDI 2221 โดยนำเสนอในลักษณะที่เรียกว่า “V-Model” ดังที่แสดงในรูปที่ 5 โดยเริ่มจากการอภิปรายรวบรวมปัญหา (Problems) ความต้องการของผู้ใช้ (User Demands and Wishes) รวมถึงข้อกำหนดภายในของผู้พัฒนา (Internal Requirements) มาสรุปเป็นรายการข้อกำหนด (Requirement list) ที่รวบรวมคุณลักษณะ (Features) ต่างๆ ของต้นแบบที่พัฒนาที่ต้องบรรลุในขั้นตอนการตรวจสอบความสมบูรณ์ (Validation) เช่น โครงสร้างลักษณะโมดูล ความแข็งแรงของโครงสร้าง ต้นทุน ซึ่งรวมถึงเกณฑ์ในการออกแบบ (Design Criteria) ตามมาตรฐานดังกล่าว และจึงนำมาสรุปเป็นข้อมูลตั้งต้น (Design inputs) ของต้นแบบหลังคาที่จะทำการพัฒนา จากนั้นเป็นขั้นตอนการออกแบบ (Design) ซึ่งทำการออกแบบและค้นคว้าหาทฤษฎีการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนโครงสร้าง และเลือกวัสดุที่เหมาะสม ทั้งในด้านความแข็งแรง ความทนทาน น้ำหนัก และต้นทุน และรวบรวมแนวทางในการเพิ่มความแข็งแรง จากนั้นจึงทำการตรวจสอบความถูกต้องตรวจสอบของแนวคิดการออกแบบ (Proof of Concept) ด้วยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง (FE-Model Validation) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดล (FE-Model) ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนต่อไป ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้ คือ แนวคิดการออกแบบ (Proposed Design) จะเป็นข้อมูลตั้งต้น (Inputs) ของขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบ (Design Verification) ซึ่งประกอบด้วยสองขั้นตอนย่อย ได้แก่ การวิเคราะห์ทำนายผลการทดสอบการพลิกคว่ำของหลังคาด้วย Simulation และการทดสอบต้นแบบหลังคาโดยใช้แทนทดสอบ ทั้งนี้การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง (Structural Strength Simulation) ตามมาตรฐาน FMVSS 220 ผลลัพธ์ที่ได้จากวิเคราะห์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์ในการออกแบบ (Design Criteria) ได้แก่ ระยะเวลาตัวของโครงสร้างสูงสุดที่ยอมรับได้ตามมาตรฐานที่กำหนด ในกรณีที่ผลลัพธ์ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ในออกแบบ จะนำข้อมูลลักษณะความเสียหาย (Failure mode) และข้อปรับปรุง (Lesson learned data) ไปปรับปรุง และดำเนินการวิเคราะห์ทำนายผลการทดสอบต้นแบบด้วย Simulation อีกครั้งจนกว่าผลลัพธ์ที่ได้จะได้ตามเกณฑ์ในออกแบบ แล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตต้นแบบเชิงอุตสาหกรรม (Industrial Prototype Manufacture) โดยคำนึงถึงกระบวนการผลิตที่สามารถทำได้จริง วัสดุที่สามารถหาได้ในประเทศ ขั้นตอนที่ต่อไปเป็นการพิสูจน์ความถูกต้องของการออกแบบ (Design Validation) ด้วยการทดสอบความถูกต้องของวิธีการติดตั้งบนรถ ด้วยการทดสอบการวิ่งรถในภาคสนาม ในกรณีที่ผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามเกณฑ์ในออกแบบ จึงสามารถนำผลลัพธ์จากการออกแบบ (Design outputs) ไปใช้ในกระบวนการผลิตเชิงพาณิชย์ และขยายผลด้วยการถ่ายทอดเทคโนโลยีได้



รูปที่ 5 ขั้นตอนการออกแบบและพัฒนาต้นแบบหลังการรับสั่งนักเรียนประเภทกระบะดัดแปลง ด้วยลักษณะ V-Model ที่ประยุกต์ใช้ในโครงการนี้

3.2 การสำรวจข้อมูลการดัดแปลงรถกระบะเป็นรถรับส่งนักเรียนจากผู้ประกอบการ

คณะวิจัยได้ทำการลงพื้นที่เก็บข้อมูลรูปแบบ วิธีการ และวัสดุที่ใช้ในการต่อเติมโครงสร้างหลังคาและที่นั่งของรถสองแถวรับส่งนักเรียนในสถานประกอบการ ได้แก่ อู่ต่อหลังคาเหล็ก และอู่ดัดแปลงรถกระบะที่ใช้เป็นรถสองแถวและรถรับส่งนักเรียน โดยคณะวิจัยได้ทำการลงพื้นที่สำรวจอยู่ในจังหวัดปทุมธานีและชลบุรี เป็นพื้นที่ตัวอย่าง เนื่องจากมีพื้นที่ที่มีอู่ต่อหลังคารถจำนวนมาก ดังรูปที่ 6 และรูปที่ 7



รูปที่ 6 การลงพื้นที่สำรวจอู่ต่อหลังคารถสองแถวและรถรับส่งนักเรียนจังหวัดปทุมธานี



รูปที่ 7 การลงพื้นที่สำรวจอู่ต่อหลังคารถสองแถวและรถรับส่งนักเรียนจังหวัดชลบุรี

โดยสามารถสรุปข้อมูลที่ได้รับจากการสำรวจอู่ต่อหลังคารถสองแถวและรถรับส่งนักเรียนได้ดังต่อไปนี้

- (1) อู่ต่อหลังคาเหล็กที่พบได้ทั่วไป จะมีทั้งเป็นอู่ที่มีขนาดเล็กและขนาดกลาง
- (2) การผลิตหลังคาเหล็กที่พบส่วนใหญ่เป็นการผลิตตามสั่งหรือจากตัวอย่างหลังคาที่อยู่เคยผลิตแล้ว โดยมากจะมีความกว้างของโครงหลังคาไม่เกินกระจกมองข้าง และมีความสูงของโครงหลังคาวัดจากพื้นกระบะตั้งแต่ 1.5 เมตร จนถึง 1.8 เมตร
- (3) ข้อมูลที่อุตสาหกรรมการจากลูกค้า คือ ความสูงหลังคา วัสดุที่ใช้ทำโครงหลังคา เบาะหุ้มที่นั่ง รวมถึงสีของเบาะ และสีภายนอก
- (4) วัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตโครงสร้างหลังคามีดังนี้
 - ท่อประปาเหล็กอบสังกะสี ใช้เป็นทั้งโครงสร้างหลักและโครงสร้างภายใน
 - ท่อเหล็กเหล็กกล้าไร้สนิม ใช้ในส่วนที่ต้องการโชว์ผิววัสดุและในส่วนของชิ้นส่วนที่ต้องใช้มือสัมผัส
 - ท่อเหล็กดำ ส่วนใหญ่ใช้ในรถกระบะประเภทขนส่งสินค้า หรือในกรณีที่ต้องการลดต้นทุนการผลิต
 - ขนาดท่อที่ได้รับความนิยมสูง คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว และ 3/4 นิ้ว และความหนา 1.2 มิลลิเมตรและ 1.5 มิลลิเมตร
 - เหล็กฉาก ใช้เป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อโครงหลังคาเข้ากับกระบะรถยนต์ และใช้ยึดเบาะพนักพิงหลัง
 - แผ่นอะลูมิเนียม หรือแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม หรือผ้าใบ ใช้เป็นส่วนครอบหลังคาด้านนอก

- (5) ช่างเชื่อมในอุ้งส่วนใหญ่ไม่ได้พื้นฐานและทักษะในงานเชื่อมที่ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม แต่อาศัยประสบการณ์และการสอนงานจากรุ่นสู่รุ่น ดังนั้น รูปแบบและวิธีการในการทำงานจะแตกต่างกันไปตามแต่ละอู่ เช่น วิธีการบากท่อเหล็กเพื่อเชื่อมต่อชนดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งจะทำให้ความต้านทานต่อการดัดโค้งของโครงสร้างหลังคามีค่าเฉลี่ยที่เท่ากันในทุกทิศทาง แต่ในบางอู่จะใช้วิธีการตีแบนเพื่อเชื่อมต่อชน ทำให้ได้โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดที่ไม่เท่ากันในแต่ละทิศทาง ส่งผลให้ความต้านทานต่อการดัดโค้งของโครงสร้างหลังคามีค่าที่สูงในทิศทางหนึ่งแต่จะมีค่าที่ต่ำมากในอีกทิศทางหนึ่ง เป็นต้น



รูปที่ 8 การบากท่อเหล็กเพื่อเชื่อมต่อชนทำโครงหลังคา

- (6) เครื่องมือกลและอุปกรณ์จับยึดที่ใช้ในแต่ละอู่มีมาตรฐานแตกต่างกัน โดยหากเป็นอู่ขนาดกลางขึ้นไปจะใช้เครื่องมือกลและอุปกรณ์จับยึดที่ได้มาตรฐานซึ่งส่งผลอย่างมากต่อความเที่ยงตรงของโครงสร้างหลังคาที่ได้ ในทางกลับกัน อู่ขนาดเล็กจะใช้เพียงคีมและอุปกรณ์จับยึดอย่างง่าย ซึ่งอาจทำให้โครงสร้างหลังคามีการบิดเบี้ยวและเพิ่มภาระในการประกอบเข้ากับตัวกระเบื้องได้
- (7) วิธีการเชื่อมที่ใช้ส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็นอู่ขนาดเล็กหรือขนาดกลาง จะใช้วิธีการเชื่อมรูปไฟฟ้าทั้งท่อเหล็กและท่อเหล็กกล้าไร้สนิม แต่จะมีความแตกต่างกันด้านการเดินแนวเชื่อม ซึ่งอู่ที่มีการทำงานอย่างมาตรฐานจะเดินแนวเชื่อมรอบรอยตัด ในขณะที่ อู่ที่ไม่ได้มาตรฐานจะลดต้นทุนการเชื่อมด้วยการเชื่อมแถม ซึ่งจะส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างหลังคาโดยตรง
- (8) สำหรับวิธีการติดตั้ง เป็นการใช้น็อตยึดเข้ากับขอบกระเบื้อง โดยส่วนมากจะใช้วิธีการประมานในการติดตั้ง แต่สำหรับอู่ที่มีมาตรฐานจะกำหนดขนาด จำนวน และตำแหน่งในการยึดน็อตที่ใช้ เพื่อความมั่นคงของโครงสร้างหลังคา
- (9) เวลาที่ใช้ในการผลิตโครงสร้างหลังคาประมาณ 2 สัปดาห์ต่อหลัง และมีราคาระหว่าง 24,000 - 80,000 บาท ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่เลือกใช้ เช่น ท่อเหล็กดำจะมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด และท่อเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีต้นทุนในการผลิตสูงที่สุด รวมถึงอุปกรณ์เสริมต่างๆ เช่น ประตูปิดท้าย บันไดขึ้นลง และลวดลายการตกแต่งภายนอกโครงหลังคา เป็นต้น

3.3 การศึกษารูปแบบรถกระบะที่ใช้รับส่งนักเรียน

ขั้นตอนนี้เป็นการเก็บข้อมูลสถานการณ์การใช้รถกระบะรับส่งนักเรียนที่พบได้ส่วนใหญ่ โดยจะดำเนินการเก็บข้อมูลในพื้นที่โรงเรียนต่างๆ ในกรุงเทพมหานคร และปริมณฑล รวมถึงศึกษาการดำเนินการให้เป็นไปตามแนวปฏิบัติในการอนุญาตให้ใช้รถรับจ้างรับส่งนักเรียน ที่กำหนดโดยกรมขนส่งทางบก (สิงหาคม 2559) ดังที่แสดงในรูปที่ 9

กรมการขนส่งทางบก
กำหนด!!! มาตรฐานความปลอดภัยของรถรับส่งนักเรียนทุกคัน

- ✓ ต้อง **ผ่านการรับรองจากโรงเรียน** หรือสถานศึกษา
- ✓ ต้องได้มาตรฐานตามที่ **กรมการขนส่งทางบกกำหนด**
- ✓ **นำรถเข้าตรวจสภาพ** ณ สำนักงานขนส่งจังหวัดที่โรงเรียนหรือสถานศึกษาตั้งอยู่โดยเขตพื้นที่ ซึ่งจะได้รับอนุญาต ครั้งละ 1 ภาคการศึกษา

กำหนดแนวทางปฏิบัติในการอนุญาตให้ใช้รถรับจ้างรับส่งนักเรียน

- รถรับส่งนักเรียนไม่เกิน 7 คน แต่ไม่เกิน 12 คน รถสองแถวหรือรถตู้โรงเรียนที่สัญจรภายในพื้นที่จังหวัดหรือจังหวัดขึ้น
- ที่นั่งผู้โดยสารต้องมั่นคง และต้องมีเข็มขัดนิรภัยสำหรับเด็ก หรือมีเครื่องยึดรถนิรภัย
- รถสองแถวถึงมีประตู และที่กั้นป้องกันนักเรียนตก
- รถตู้ต้องวางที่นั่งเป็นแถวตอนตามความกว้างของตัวรถเท่านั้น

ห้ามสิ่งผิดกฏอนหนึ่งสิ่งอนุญาตใช้รถทันที ไปสามารถขอใช้รถจะขยับ 1 ปี

ศูนย์ประสานงานและแจ้งเหตุร้องทุกข์ กรมการขนส่งทางบก
 Everyday for Everyone
 ทุกวัน ทุกที่ทุกคน
 Call Center 1584



รูปที่ 9 แนวทางปฏิบัติในการอนุญาตให้ใช้รถรับส่งนักเรียน¹

จากการลงพื้นที่สำรวจโรงเรียนในพื้นที่ กทม. และจังหวัดต่างๆ ได้แก่ ปทุมธานี นครปฐม สมุทรสาคร ขอนแก่น และจันทบุรี พบรูปแบบการโดยสารรถรับส่งนักเรียนกระบะดัดแปลง ดังตัวอย่างในรูปที่ 10 รวมถึงรถกระบะที่ได้รับการดัดแปลงในรูปที่ 11

¹ ที่มา: กรมการขนส่งทางบก



รูปที่ 10 ความเสี่ยงจากความปลอดภัยที่พบจากการลงพื้นที่สำรวจรูปแบบการใช้รถกระบะเพื่อรับส่งนักเรียน



รูปที่ 11 ตัวอย่างรถรับส่งนักเรียนประเภทกระบะดัดแปลงที่พบในปัจจุบัน

3.4 การรวบรวมและวิเคราะห์ประเด็นปัญหาที่มีนัยสำคัญต่อความปลอดภัยของผู้โดยสาร

จากการลงพื้นที่สำรวจ คณะวิจัยได้รวบรวมและจัดหมวดประเด็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยงต่อการโดยสารรถรับส่งนักเรียน โดยในโครงการวิจัยนี้ จะพิจารณาปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโครงสร้างเชิงวิศวกรรมที่สามารถนำมาวิเคราะห์ประเด็นความเสี่ยงต่างๆ* ดังต่อไปนี้

- **การใช้ความเร็วสูง** : ในการรับส่งผู้โดยสารส่วนใหญ่พบว่าขึ้นอยู่กับพื้นที่และระยะทาง ซึ่งมีตั้งแต่ 20 - 100 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งถ้าพิจารณาร่วมกับประเด็นอื่นๆ จะพบว่ามีความเสี่ยงสูงที่ผู้โดยสารจะได้รับบาดเจ็บกรณีที่เกิดอุบัติเหตุ
- **จำนวนผู้โดยสารเกินกำหนด** : ส่วนใหญ่จะมีผู้โดยสารมากกว่า 12 คน (จำนวนที่กรมการขนส่งทางบกได้กำหนดแนวทางปฏิบัติไว้) โดยมีจำนวนเฉลี่ยตั้งแต่ 16 - 30 คน ซึ่งพบว่า
 - มีการเสริมที่นั่งแถวกลางเพื่อเพิ่มจำนวนผู้โดยสาร
 - มีผู้โดยสารยืนโหนท้ายรถ
 - มีผู้โดยสารนั่งบนหลังคารถ
- **ไม่มีอุปกรณ์ป้องกันผู้โดยสารตกที่ท้ายรถ** : การที่ห้องโดยสารไม่มีประตูหรือที่กั้นท้ายรถ ทำให้มีความเสี่ยงสูงที่ผู้โดยสารจะตกจากรถในกรณีที่รถเร่งหรือเบรกกะทันหันหรือใช้ความเร็วสูง
- **ไม่มีผู้ควบคุมดูแลนักเรียน** : มีจำนวนมากที่ไม่มีผู้ควบคุมดูแลนักเรียนท้ายรถ ซึ่งบางส่วนแก้ปัญหาโดยให้นักเรียนเป็นผู้ควบคุมดูแลเอง
- **ไม่มีไฟส่องสว่าง หรือป้ายรถรับส่งนักเรียน** : มีความเสี่ยงที่ทำให้รถที่วิ่งตามด้านท้ายขาดความระมัดระวังในกรณีที่รถต้องหยุดเพื่อรับส่งนักเรียน และใช้ความเร็วสูง
- **การเสริมความยาวที่นั่งผู้โดยสารออกมานอกตัวรถ** : มีความเสี่ยงด้านความแข็งแรง และมีโอกาสที่ผู้โดยสารจะพลัดตกจากรถ
- **การเสริมพื้นที่สำหรับยืน** : ทำให้ผู้โดยสารยืนโหนท้ายรถได้ ซึ่งมีความเสี่ยงต่อการตกจากรถ
- **บันไดสำหรับขึ้นลงมีขนาดเล็ก** : มีความเสี่ยงที่ผู้โดยสารจะก้าวพลาดในการขึ้นลงรถ
- **การใช้งานบรรทุกของอื่น** : นอกจากการนำรถไปใช้รับส่งนักเรียนแล้ว ส่วนมากเจ้าของรถมีการนำรถกระบะตัดแปลงไปใช้รับจ้างบรรทุกสินค้า พืชผลการเกษตร หรือวัสดุก่อสร้างระหว่างวัน หรือช่วงวันเสาร์อาทิตย์อีกด้วย

* หมายเหตุ : ข้อมูลที่สรุปมาจากการลงพื้นที่สำรวจที่คณะวิจัยใช้เป็นตัวอย่างกรณีศึกษาเท่านั้น โดยไม่ได้มุ่งเน้นเพื่อครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศแต่อย่างใด

3.5 การออกแบบโครงสร้างภายในและภายนอกของรถสองแถว

คณะวิจัยได้ทำการศึกษาแนวทางการออกแบบโครงสร้างภายในและภายนอกของรถสองแถวรับส่งนักเรียนให้มีความปลอดภัยสูงขึ้นด้วยการออกแบบและวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม อ้างอิงจากข้อเสนอแนะ และมาตรฐานสากล โดยจากขอบเขตของโครงการวิจัยนี้ คณะวิจัยได้กำหนดแนวทางการออกแบบในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

- **รูปแบบการจัดวางและติดตั้งที่นั่งผู้โดยสาร** : มีรูปแบบการจัดวางที่มีความเสี่ยงน้อยที่สุดกรณีผู้โดยสารได้รับบาดเจ็บ และมีการติดตั้งเก้าอี้โดยสารจับยึดมั่นคงกับโครงสร้างรถ
- **โครงสร้างหลังคา** : มีความแข็งแรง ป้องกันผู้โดยสารกรณีเกิดอุบัติเหตุ (ชน หรือ พลิกคว่ำ)
- **ความแข็งแรงของการติดตั้งหลังคา** : หลังคาได้รับการติดตั้งที่แข็งแรง ป้องกันการหลุดออกจากกระบะ ในกรณีที่ได้รับแรงกระทำจากอุบัติเหตุ
- **ประตูและบันไดขึ้นลง** : มีความแข็งแรงและใช้งานได้อย่างปลอดภัย

โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานในบทที่ 4 ต่อไป

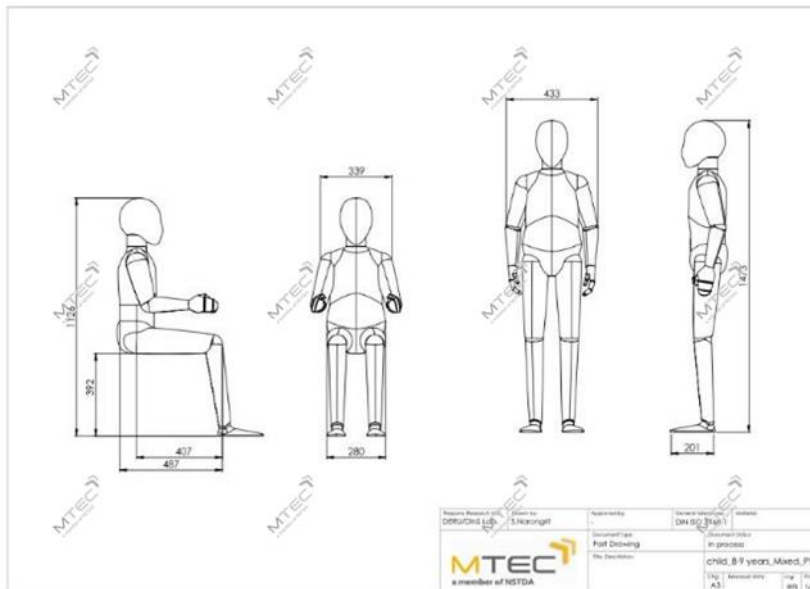
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ที่นั่งผู้โดยสาร

4.1.1 รูปแบบการจัดวาง

เป็นการศึกษาวิธีการจัดวางที่นั่งผู้โดยสารรูปแบบต่างๆ โดยกำหนดให้จำนวนที่นั่ง ทิศทางการจัดวางเก้าอี้ รูปแบบของเก้าอี้ พื้นที่สำหรับทางเดินเข้าออก ให้มีความปลอดภัยในกรณีรถเร่งหรือเบรกกะทันหัน เป็นตัวแปรในการออกแบบ (design parameters) และมีเงื่อนไขพิถีพิถันที่สุดที่กำหนดจากผู้ผลิตรถกระบะเป็นเงื่อนไข ซึ่งจากที่ได้ทำการสำรวจนักเรียนที่ใช้รถรับส่งนักเรียนส่วนใหญ่เป็นนักเรียนระดับประถมศึกษาหรือมัธยมต้น ด้วยเหตุนี้ คณะวิจัยจึงได้เลือกโมเดลเด็กนักเรียนระดับประถมศึกษาหรือมัธยมต้น (เปอร์เซนไทล์ที่ 95) ซึ่งมีความสูง 147.3 เซนติเมตร มีน้ำหนักประมาณ 40 กิโลกรัม ดังตัวอย่างในรูปที่ 12



รูปที่ 12 โมเดลนักเรียน (ระดับประถม-มัธยมต้น) สำหรับการออกแบบการจัดวางที่นั่งผู้โดยสาร

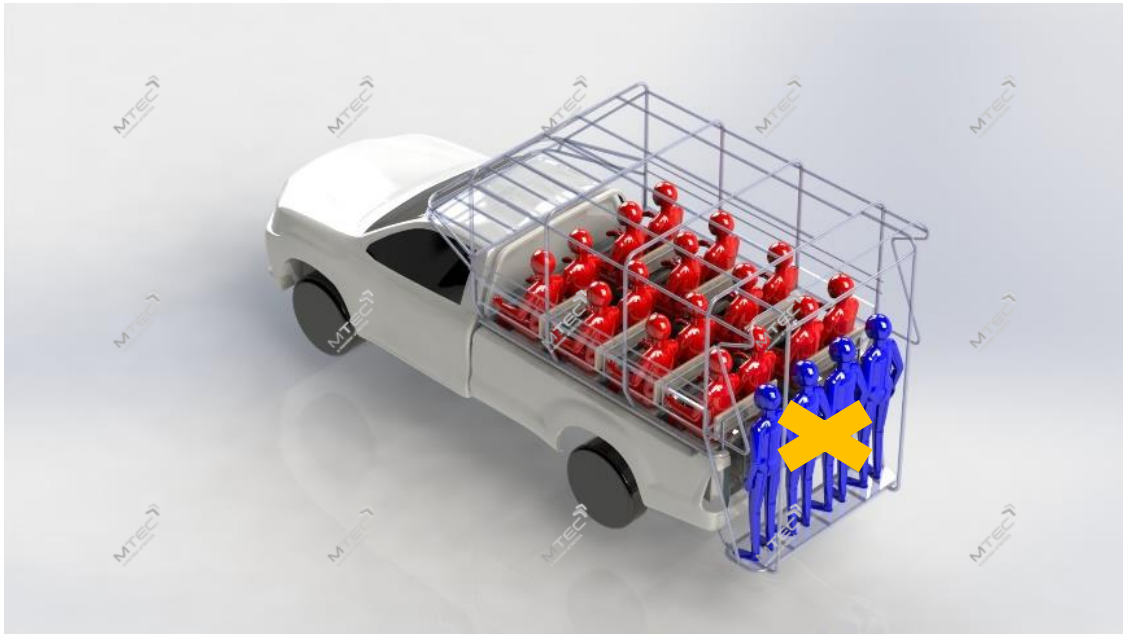
สำหรับการคำนวณจำนวนผู้โดยสารที่เหมาะสมเชิงวิศวกรรมสำหรับรถกระบะที่ดัดแปลงเพื่อรับส่งนักเรียนนั้น คณะวิจัยได้ใช้ข้อมูลเชิงเทคนิคจาก ตัวอย่างรถกระบะที่ได้รับความนิยมใช้เป็นรถรับส่งนักเรียนหรือรถสองแถวในประเทศไทยมากที่สุดรุ่นหนึ่ง โดยสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$n = \frac{CapPay Load - Extra}{m}$$

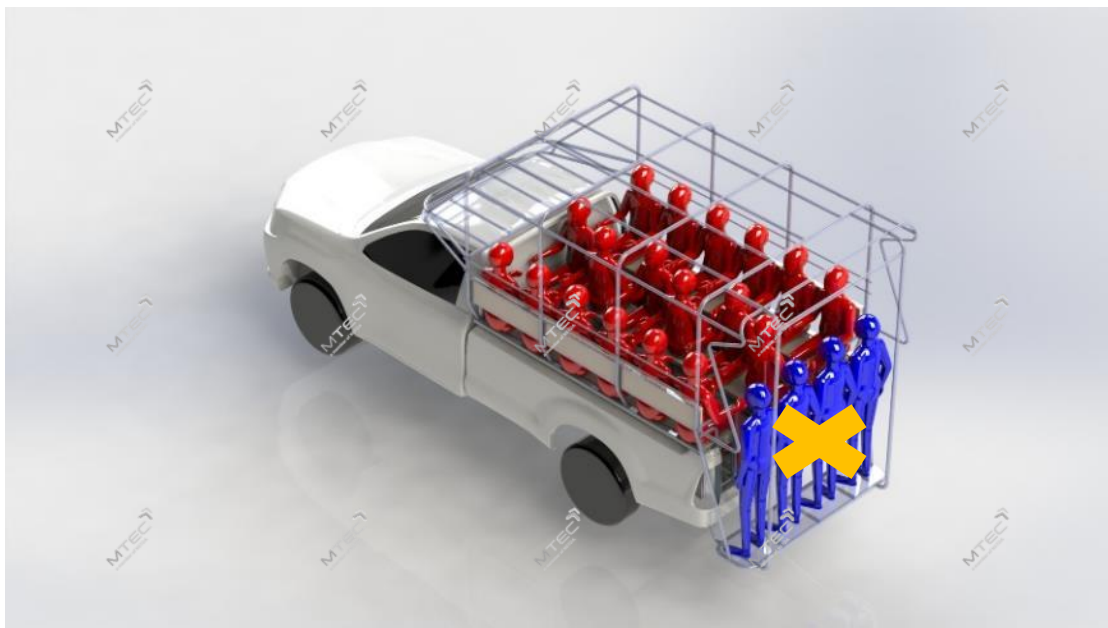
- เมื่อ n คือ จำนวนผู้โดยสาร
- $CapPay Load$ คือ พิกัดบรรทุก (Pay load capacity) = 900 - 1,100 กิโลกรัม²
- $Extra$ คือ น้ำหนักหลังคารถและอุปกรณ์เสริม ประมาณ 200 กิโลกรัม
- m คือ น้ำหนักผู้โดยสาร = 45 กิโลกรัมต่อคน

² ที่มา: toyota, isuzu, nissan

จากสมการข้างต้น สามารถประเมินจำนวนผู้โดยสารที่เป็นนักเรียนระดับประถมและมัธยมได้ โดยไม่เกินพิกัดบรรทุกของผู้ผลิตเป็นจำนวนประมาณ 20 คน โดยคณะวิจัยได้เสนอแนะรูปแบบการจัดวางที่นั่งผู้โดยสาร เป็น 2 รูปแบบได้แก่ การจัดวางที่นั่งตามแนวขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ (รูปที่ 13) และการจัดวางที่นั่งแบบตามแนวยาวกับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ (รูปที่ 14)





รูปที่ 13 การจัดวางที่นั่งตามแนวขวางกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Transverse layout) ในรถรับส่งนักเรียนประเภทกระบะดัดแปลง



รูปที่ 14 การจัดวางที่นั่งตามแนวยาวกับทิศทางการเคลื่อนที่ (Longitudinal layout) ในรถรับส่งนักเรียนประเภทกระบะดัดแปลง

ซึ่งการจัดวางที่นั่งผู้โดยสารทั้งสองรูปแบบ จะมีผู้โดยสารนั่งหน้ารถ 2 คน และนั่งท้ายรถ 18 คน (สีแดง) โดยไม่มีผู้โดยสารอื่น (สีน้ำเงิน) ทั้งนี้สามารถเปรียบเทียบจุดเด่นและจุดด้อยของการจัดการที่นั่งโดยสารทั้งสองแบบดังนี้

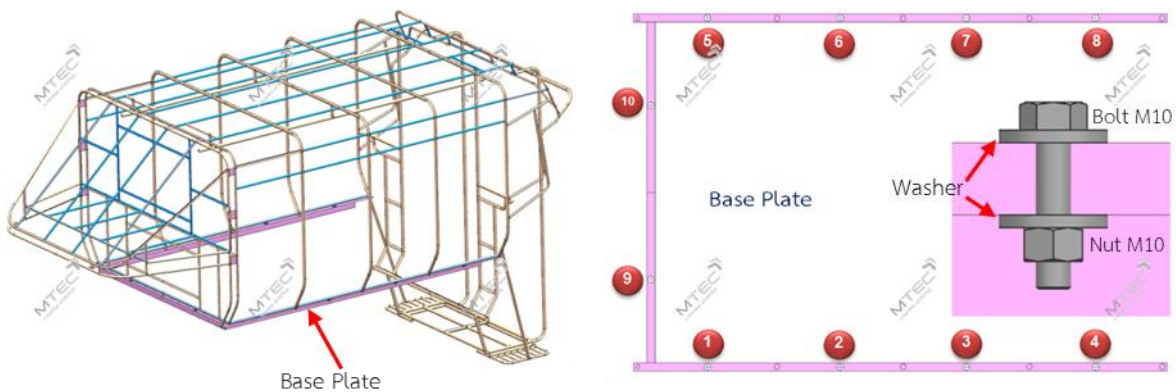
ตารางที่ 1 จุดเด่นและจุดด้อยของการจัดวางที่นั่งโดยสารของรถรับส่งนักเรียนประเภทกระบะดัดแปลง

การจัดวางที่นั่ง	
ตามแนวขวาง	ตามแนวยาว
	
จุดเด่น <ol style="list-style-type: none"> 1. ลดความเสี่ยงที่ศีรษะผู้โดยสารจะกระแทกกันเองกรณีเบรกฉุกเฉิน 2. สามารถติดตั้งเข็มขัดนิรภัยที่ที่นั่งได้ง่าย 	<ol style="list-style-type: none"> 1. ผู้โดยสารสามารถขึ้น-ลงรถได้สะดวก 2. สามารถใช้งานเพื่อขนส่งสินค้าหรือวัสดุ
จุดด้อย <ol style="list-style-type: none"> 1. ไม่เหมาะสมสำหรับใช้งานเพื่อขนส่งสินค้าหรือวัสดุ 2. ผู้โดยสารขึ้น-ลงรถไม่สะดวก 	<ol style="list-style-type: none"> 3. มีความเสี่ยงที่ศีรษะผู้โดยสารจะกระแทกกันเองกรณีเบรกฉุกเฉิน 4. ทำการติดตั้งเข็มขัดนิรภัยที่ที่นั่งได้ยาก

จากการเปรียบเทียบจุดเด่นและจุดด้อยของการจัดวางที่นั่งที่คณะวิจัยเสนอแนะ พบว่าการจัดวางที่นั่งแบบตามแนวขวาง จะมีความปลอดภัยต่อผู้โดยสารสูงกว่า เนื่องจากจะช่วยลดความเสี่ยงที่ศีรษะของผู้โดยสารจะกระแทกกันเองกรณีที่เกิดเบรกฉุกเฉิน อีกทั้งยังสามารถติดตั้งเข็มขัดนิรภัยประเภทสองจุดที่ที่นั่งได้ง่าย ช่วยยกระดับด้านความปลอดภัยอีกด้วย อย่างไรก็ตาม หากคำนึงถึงสภาพวิถีชีวิตการใช้งานรถกระบะดัดแปลงของผู้ที่รับจ้างรับส่งนักเรียนแล้ว การจัดวางตามแนวยาว จะเหมาะสมในเรื่องของการที่จะสามารถใช้งานเพื่อขนส่งสินค้า พืชผลทางการเกษตร และวัสดุก่อสร้างได้ (กรณีได้รับการอนุโลมหรือยกเว้น ตามแผนงานของ “จันทบุรีโมเดล”)

4.1.2 วิธีการจับยึดที่นั่งให้มีความแข็งแรง

เพื่อหาวิธีการจับยึดที่นั่งให้มีความแข็งแรง จึงทำการวิเคราะห์คำนวณความแข็งแรงของโครงสร้างจับยึดเก้าอี้โดยสาร ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดตำแหน่งการยึดโครงสร้างกระบะเข้ากับตัวรถด้วยสลักเกลียวขนาด M10 พร้อมน็อต และแหวนรองหนา 2 มม. จำนวน 10 ตำแหน่งดังรูปที่ 15 จากนั้นกำหนดภาระแรงกระทำเป็นความเร่งขนาด 10G ของน้ำหนักเก้าอี้รวมผู้โดยสาร (อ้างอิงมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบเก้าอี้โดยสารในรถฉุกเฉิน EN 1789) กระทำในทิศทางตามแนวขวาง แนวยาว และทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้าง ดังรูปที่ 16 โดยความแข็งแรงของแผ่นยึดโครงสร้าง (Base Plate) ที่บริเวณจุดยึด ต้องมีค่าต่ำกว่าความเค้นประลัยของวัสดุเป็นหลัก โดยไม่คำนึงถึงความเสียหายของสลักเกลียวและโครงหลังคาที่อยู่เหนือแผ่นยึด

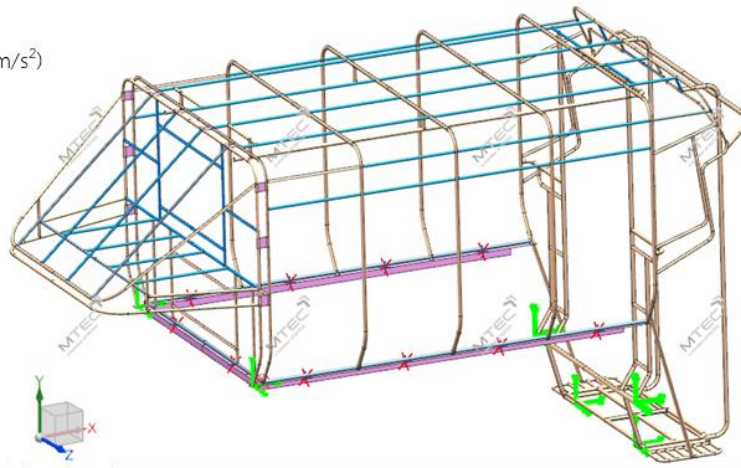


รูปที่ 15 การกำหนดตำแหน่งการยึดโครงสร้างหลังคารถกระบะเข้ากับตัวรถ

Applied Load (1G=9.81 m/s²)

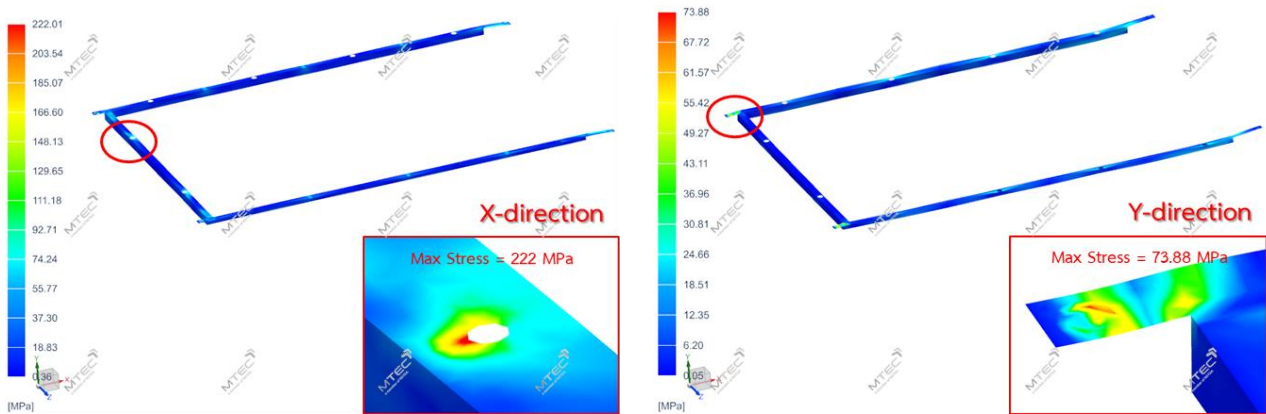
1. 10G in +X direction
2. 10G in -X direction
3. 10G in +Y direction
4. 10G in +Z direction
5. 10G in -Z direction

- Tx, Ty, Tz = 0
Rx, Ry, Rz = 0
- Tx, Ty, Tz = 0
Rx, Ry, Rz = Free

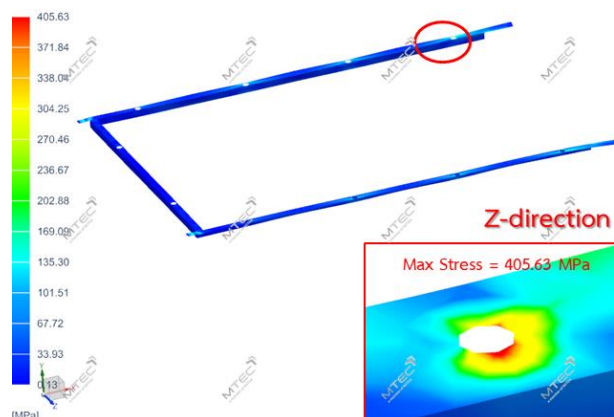


รูปที่ 16 เงื่อนไขขอบเขตของโครงสร้าง และการกำหนดภาระขนาด 10G

สำหรับผลวิเคราะห์ความแข็งแรงที่จุดยึดภายใต้ค่าความเร่ง 10G ในทุกทิศทาง พบว่าการใช้สกรูและน็อตขนาด M10 ที่ใช้ร่วมกับแหวนรองความหนา 2 มม. ยึดโครงสร้าง 10 จุด เพียงพอต่อการยึดโครงสร้างหลังคา และที่นั้งให้มีความแข็งแรง โดยภายใต้ค่าความเร่ง 10G ในทิศทางตามความยาวของโครงสร้าง ($\pm X$) และทิศทางตั้งฉากกับโครงสร้าง (+Y) ดังรูปที่ 17 แผ่นยึดโครงสร้างไม่เกิดการเสียรูปถาวร ในขณะที่แผ่นยึดโครงสร้างภายใต้ค่าความเร่ง 10G ในทิศทางตามความขวางของโครงสร้าง ($\pm Z$) ดังรูปที่ 18 เกิดการเสียรูปถาวรในตำแหน่งที่ 2-4 และ 6-8



รูปที่ 17 ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นภายใต้ค่าความเร่ง 10G ในทิศทางตามความยาว ($\pm X$) และทิศทางตั้งฉาก (+Y) กับโครงสร้าง



รูปที่ 18 ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นภายใต้ค่าความเร่ง 10G ในทิศทางตามขวางโครงสร้าง ($\pm Z$)

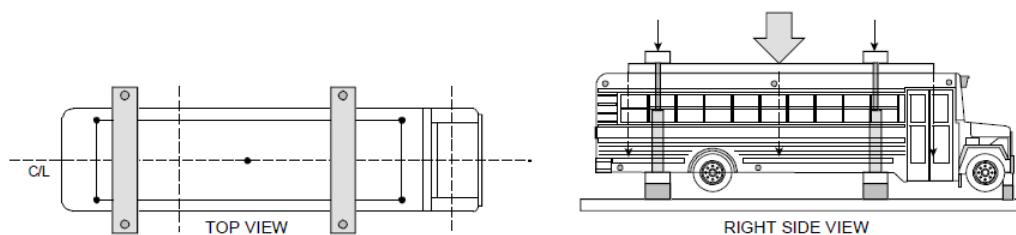
4.2 โครงสร้างหลังคา

ต้นแบบหลังคากระดุมดัดแปลง ได้ถูกออกแบบเพื่อจำลองลักษณะโครงสร้างที่ทำให้เกิดความแข็งแรง (Superstructure) เสมือนการนำไปติดตั้งจริงบนรถกระบะ (กรณีนี้ ใช้รถกระบะยี่ห้อ Toyota รุ่น Hilux Vigo ที่มีความนิยมในท้องตลาดสูงสุดรุ่นหนึ่งในประเทศ เป็นรถตัวอย่าง) ทั้งขนาดมิติต่างๆ (ความกว้าง ความยาว ความสูง) และใช้พารามิเตอร์หลักที่นำไปสู่การแก้ปัญหาข้างต้น ได้แก่ (I) ชนิดและขนาดวัสดุที่ใช้ผลิต (II) รูปแบบการเชื่อมต่อโครงสร้างหลังคา รวมถึง (III) วิธีการติดตั้งหลังคาเข้ากับตัวกระบะ โดยมีการจำลองตัวกระบะและแชสซี ด้วยโครงสร้างเหล็กที่มีความสูงเท่ากับรถจริง เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้เป็นแบบหรือแนวทางในการผลิตเป็นรถรับส่งนักเรียนได้จริง ซึ่งการผลิตต้นแบบนี้ จะเป็นไปตามผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนการพิสูจน์ความถูกต้องของแนวคิดการออกแบบ (Design Validation) ด้วยการวิเคราะห์ความแข็งแรงตามข้อกำหนดในการออกแบบจากการทดสอบตามมาตรฐาน FMVSS 220 ซึ่งใช้พารามิเตอร์การยุบตัว (Deformation) ของโครงสร้างจากแรงกระทำขนาด 1.5 เท่าของน้ำหนักตัวเปล่าของรถกระบะหลังดัดแปลง เป็นตัวชี้วัดว่าได้ทำการออกแบบผ่านเกณฑ์ข้อกำหนดตามมาตรฐานหรือไม่



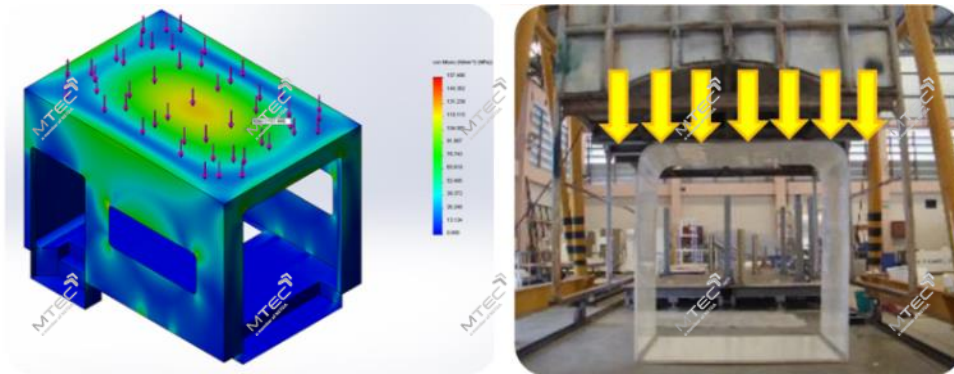
รูปที่ 19 ต้นแบบ Full scale ที่ใช้ในการจำลองต้นแบบหลังคารับส่งนักเรียนประเภทกระบะดัดแปลง

ในโครงการวิจัยนี้ คณะวิจัยได้นำมาตรฐาน FMVSS 220 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีข้อกำหนดด้านการวิเคราะห์ทดสอบแบบ Static ของโครงสร้างหลังคาของรถรับส่งนักเรียนในกรณีที่เกิดการพลิกคว่ำ (รูปที่ 20) โดยจากข้อกำหนดของการทดสอบจะมีการสร้างภาระกระทำต่อชิ้นส่วนหลังคาเป็นจำนวน 1.5 เท่าของน้ำหนักรวมของรถทั้งคัน (ไม่รวมน้ำหนักบรรทุก) โดยตามข้อกำหนดความถูกต้องของการออกแบบตามมาตรฐานนั้น โครงสร้างต้องยุบตัวไม่เกิน 13 เซนติเมตร และประตูรถต้องไม่เสียรูปจนไม่สามารถเปิดใช้งานได้ โดยคณะวิจัยจะทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างหลังคาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 21 (ซ้าย)



รูปที่ 20 แนวทางการวิเคราะห์ทดสอบโครงสร้างหลังคารับส่งนักเรียนตามมาตรฐาน FMVSS 220 ³

³ ที่มา: FMVSS 220 - School Bus Rollover Protection



รูปที่ 21 ตัวอย่างการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างหลังคาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ซ้าย) กับการทดสอบจริงตามมาตรฐาน (ขวา) ⁴

4.2.1 คุณสมบัติ (Features)

การออกแบบต้นแบบดังกล่าว คณะวิจัยได้ดำเนินการร่วมกับศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน (ศวปถ.) มูลนิธิเพื่อผู้บริโภค และสำนักวิศวกรรมยานยนต์ กรมการขนส่งทางบก ในการสรุปข้อกำหนดในออกแบบ (Design inputs) ไว้เพื่อใช้ในการออกแบบและพัฒนา จากการสำรวจจุดที่ผู้ประกอบการเดินรถและผู้ผลิตหลังคารถ ซึ่งเป็นคุณลักษณะของโครงสร้างหลังคาดังกล่าวนี้ ดังที่แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อกำหนด (Design inputs) ที่ใช้ในการออกแบบและคุณลักษณะของต้นแบบหลังคารถรับส่งนักเรียน

No.	คุณลักษณะของต้นแบบ	บรรลุข้อกำหนด
1	โครงสร้างห้องโดยสารลักษณะโมดูล สามารถผลิตและนำไปประกอบกับรถภายหลังได้	ใช่
2	มีความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยการทดสอบการพลิกคว่ำตามมาตรฐานสากล FMVSS 220	ใช่
3	ใช้วัสดุและวิธีการผลิตที่ต่อหลังคาเหล็กทั่วไปสามารถผลิตได้เอง	ใช่
4	มีต้นทุนที่อยู่ในขอบเขตไม่เกิน 80,000 บาท	ใช่

4.2.2 เกณฑ์ในการออกแบบ (Design Criteria)

ในหัวข้อนี้ จะอธิบายถึงลำดับขั้นตอนในการดำเนินงานเพื่อให้บรรลุตามคุณลักษณะของต้นแบบในตารางที่ 2 และผลลัพธ์ในการวิเคราะห์ทำนายผลการทดสอบการพลิกคว่ำของห้องโดยสารด้วย Simulation และการทดสอบต้นแบบในระดับห้องปฏิบัติการ และระดับภาคสนาม โดยใช้เกณฑ์ในการออกแบบ (Design Criteria) และคัดเลือกวัสดุของโครงสร้างวัสดุของต้นแบบในโครงการนี้คือ การสร้างความแข็งแรงให้แก่โครงสร้างสามารถรับแรงที่กระทำ ซึ่งกำหนดให้ยอมรับภาวะหรือความเค้นที่ทำให้การยุบตัว (Deformation) ไปถึงในกรณีที่มีแรงกระทำหรือความเค้นเกินค่า Yield strength ของวัสดุ จนทำให้โครงสร้างเกิดการเสียรูปอย่างถาวรใน Plastic Zone จนเกิดความเสียหายฉีกขาด ซึ่งตามเกณฑ์ด้านความปลอดภัยที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน FMVSS 220 นั้น ยอมรับความเสียหายที่เกิดขึ้นกับวัสดุใน Plastic Zone ภายใต้ระยะการยุบตัวตามที่กำหนดไว้ ผลที่ได้จากพิสูจน์ความถูกต้องของการออกแบบ (Validation) พบว่า ค่าระยะยุบตัว (Deformation) ของโครงสร้างจากแรงกระทำขนาด 1.5 เท่าของน้ำหนักตัวเปล่า ที่ได้

⁴ ที่มา: โครงการออกแบบและพัฒนาต้นแบบห้องโดยสารรถพยาบาลและวิเคราะห์ทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยวิธีการตามมาตรฐาน FMVSS 220 ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

จากการทดสอบนั้นมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) จึงสามารถสรุปได้ว่า เทคนิคที่ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขของแรงกระทำ รวมถึงเทคนิคการเตรียมไฟไนต์เอลิเมนต์โมเดล เพื่อลดความซับซ้อนและลดระยะเวลาในการคำนวณ (FE-Model Simplification) สามารถใช้ทำนายผลการทดสอบต้นแบบ ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

จากผลการทดสอบแรงดึงของท่อประปาเคลือบสังกะสีและท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกลมขนาดต่างๆ ดังรายละเอียดในภาคผนวก จะเห็นว่าท่อประปาเคลือบสังกะสีจะมีค่าความเค้นจุดครากประมาณ 380 MPa และค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดประมาณ 425 MPa โดยมีค่าการยืดตัวที่ประมาณ 30% ในขณะที่ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกลมจะมีค่าความเค้นจุดครากประมาณ 460 MPa และค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดประมาณ 730 MPa โดยมีค่าการยืดตัวที่ประมาณ 50%

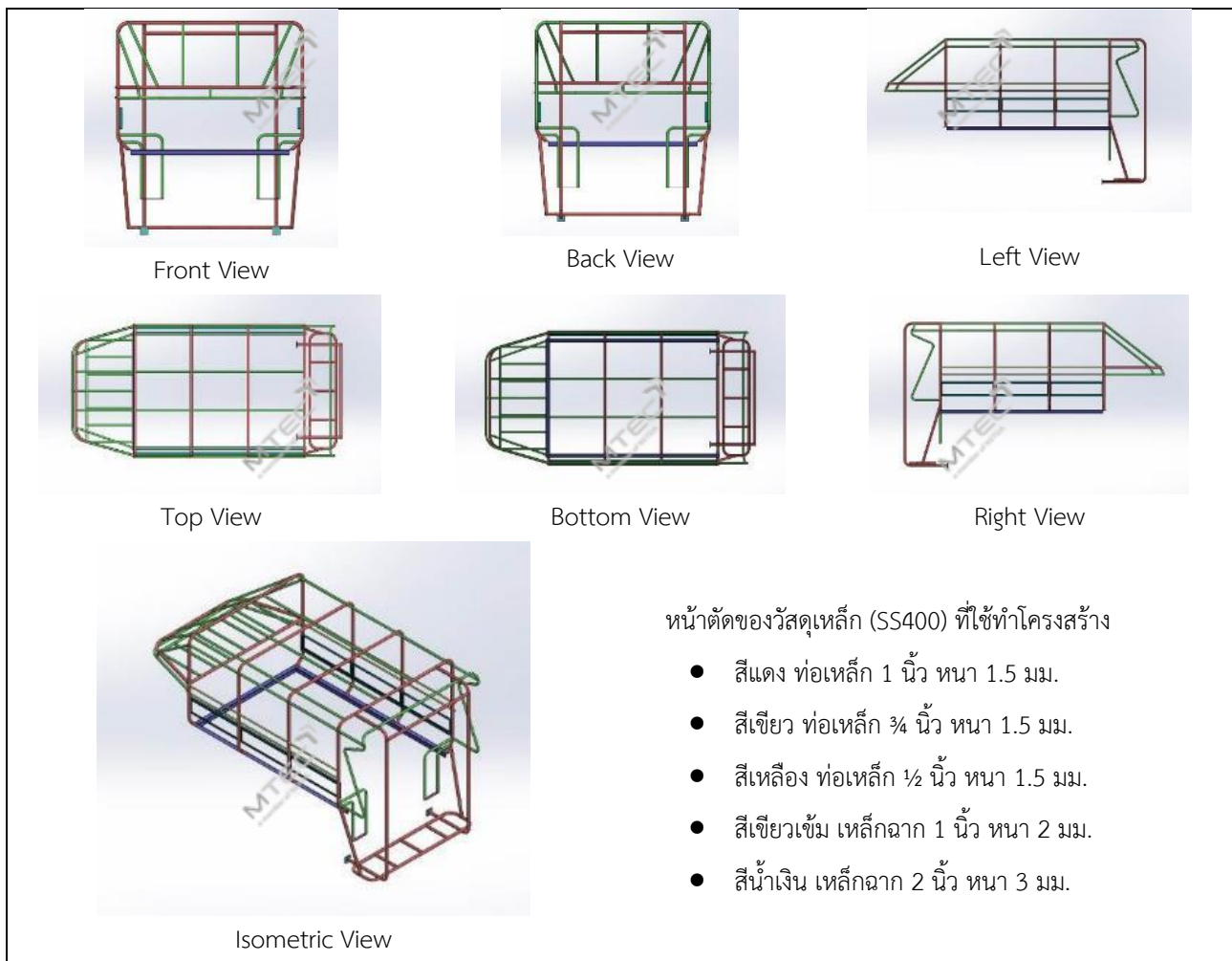
จะเห็นได้ว่าท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกลมจะมีความสามารถในการรับแรงและความทนทานต่อการเสียรูปที่สูงกว่าท่อเหล็กประปาเคลือบสังกะสีที่ขนาดและความหนาเท่ากัน ดังนั้น กรณีต้องการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างให้สูงยิ่งขึ้นไปอีก จึงควรใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกลมทั้งหมดเป็นชิ้นส่วนโครงหลังคารถรับส่งนักเรียน แต่อย่างไรก็ตาม หากมีความจำเป็นต้องลดต้นทุนการผลิตโดยที่โครงสร้างสามารถผ่านมาตรฐานการทดสอบการยุบตัว สามารถใช้ท่อประปาเคลือบสังกะสีในบางส่วนของโครงหลังคาที่ไม่สัมผัสกับอากาศภายนอกโดยตรงได้



รูปที่ 22 โครงหลังคารถรับส่งนักเรียน

4.2.3 การออกแบบและการวิเคราะห์ความแข็งแรงของต้นแบบ

จากการประเมินคุณสมบัติของวัสดุที่เลือกนำมาใช้งาน แบบจำลองของต้นแบบโครงหลังคารถรับส่งนักเรียนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 มุมมองและข้อมูลด้านวัสดุของต้นแบบโครงหลังคากรับส่งนักเรียนในโครงการ

แบบจำลองข้างต้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อจำลองการทดสอบอ้างอิงจากมาตรฐาน FMVSS220 ในขณะเดียวกัน ต้นแบบโครงหลังคาจริงจะถูกสร้างขึ้นเพื่อนำไปทดสอบต้นแบบด้วย Static Load ตามมาตรฐานเดียวกันบนแท่นทดสอบ โดยใช้พารามิเตอร์ที่มีนัยสำคัญในการเปรียบเทียบ ได้แก่ ค่าระยะการเปลี่ยนรูป (Deformation) และค่าความเครียด (Strain) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของโครงสร้างที่มีแนวโน้มจะเกิดค่าความเค้น (Stress) สูง

การทดสอบอ้างอิงจากมาตรฐาน FMVSS220 สามารถอธิบายวิธีการทดสอบและเกณฑ์ชี้วัดโดยสังเขป* ดังนี้

- วิธีการวิเคราะห์โดยสรุป (Test Method): ใช้แรงกดที่กระจายอยู่ทั่วหลังคาของโครงสร้างเท่ากับ 1.5 เท่าของน้ำหนักเปล่าของรถ (ไม่รวมน้ำหนักบรรทุก) โดยในโครงการนี้ น้ำหนักเปล่าของรถเท่ากับ 2,120 กก. ในการทดสอบจึงใช้แรงกดด้วยแท่นด้วยภาระทดสอบ 3,180 กก. หรือคิดเป็น 31,196 นิวตัน ดังที่แสดงในรูปที่ 24
- เกณฑ์ชี้วัดการทดสอบ (Design Criteria): โครงสร้างต้องยุบตัวไม่เกิน 130 มม. และประตูทุกด้านของรถต้องสามารถใช้งานเปิดปิดได้

* การอธิบายเกี่ยวกับมาตรฐานข้างต้นเป็นเพียงการสรุปเท่านั้น ไม่ได้แสดงถึงความครบถ้วนตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐานแต่อย่างใด

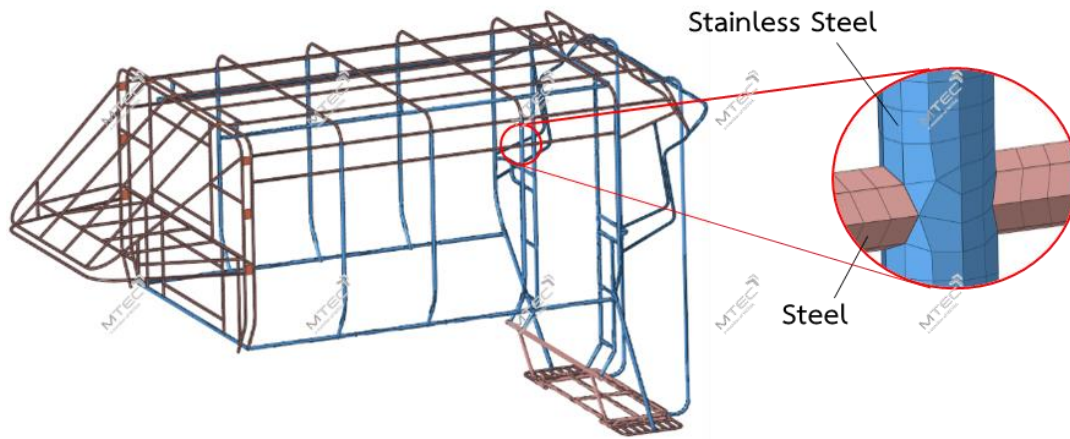


รูปที่ 24 แทนทดสอบทดสอบ Static Load ตามมาตรฐาน FMVSS 220 ที่พัฒนาในโครงการ

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างตามมาตรฐาน FMVSS 220 ซึ่งแม้ว่าการวิเคราะห์จะอ้างอิงการให้ภายใต้ภาระสถิต (Static Load) หากแต่ในการทดสอบจริงนั้นการให้ภาระจะเป็นไปตามเวลา เพื่อให้การวิเคราะห์สอดคล้องกับการทดสอบจริงมากที่สุด คณะวิจัยจึงนำกระบวนการหาผลเฉลยแบบชัดแจ้ง (Explicit Dynamic) มาใช้วิเคราะห์ความแข็งแรง โดยกำหนดเงื่อนไขของการวิเคราะห์ ไว้ดังนี้

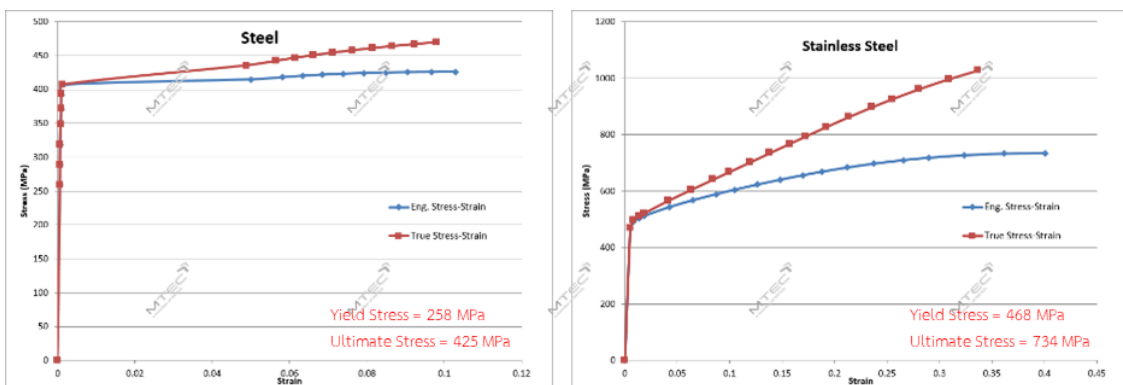
- การวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐาน FMVSS 220
- การวิเคราะห์มุ่งเน้นไปที่โครงสร้างหลังการถดถอยกระบะตัดแปลง โดยไม่พิจารณาถึงโครงจุดยึดและส่วนประกอบเสริมอื่นๆ
- การวิเคราะห์ไม่คำนึงถึงแนวรอยเชื่อม
- การวิเคราะห์อ้างอิงสมบัติของวัสดุ (Mechanical Properties) ที่ได้จากข้อมูลจากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) ตามมาตรฐาน ASTM E8 ซึ่งจัดทำที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย

คณะวิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติจากแบบจำลองทรงตันของโครงสร้างหลังการถดถอยกระบะตัดแปลง โดยใช้เทคนิคของการสร้างแบบจำลองผิวกึ่งกลาง (Mid Surface) ดังที่แสดงในรูปที่ 25 โดยโครงสร้างของส่วนห้องโดยสารสีฟ้าผลิตขึ้นจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ส่วนโครงสร้างสีชมพูที่เหลือของสีฟ้าผลิตขึ้นจากเหล็ก (Steel) และมีค่าความหนาของแบบจำลองท่อแต่ละชนิดตามรูปที่ 23



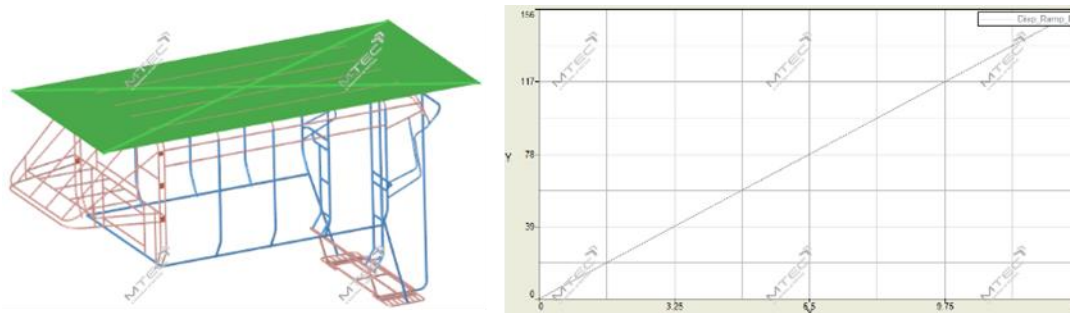
รูปที่ 25 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ ของโครงสร้างหลังการกระเบียดแปลง

ในส่วนสมบัติของวัสดุเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิมนั้น คณะผู้วิจัยได้นำทฤษฎีงานจากผู้ผลิตมาตัดเป็นทำชิ้นงานทดสอบเพื่อทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8 ที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย โดยมีผลการทดสอบดังรูปที่ 26

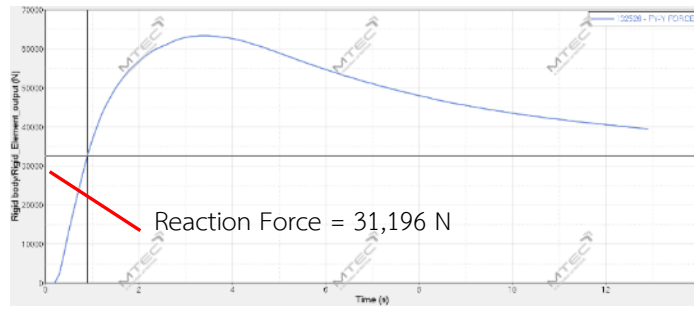


รูปที่ 26 ค่าสมบัติวัสดุเหล็ก (ซ้าย) และเหล็กกล้าไร้สนิม (ขวา)

สำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างนั้น ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Altair – Radioss คำนวณผลลัพธ์ด้วยวิธี Explicit Dynamic โดยทำการสร้างแบบจำลองของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ขนาดและตำแหน่งเทียบเท่าแทนคดหลังคา แล้วให้ภาระกับ Rigid Body ดังกล่าวด้วยฟังก์ชันของระยะและเวลา (Time-Displacement Function) จากนั้นทำการพิจารณาแรงปฏิกิริยา (Reaction Force) ที่เกิดขึ้นระหว่างโครงสร้าง และ Rigid Body ณ จุดที่ตรงกับแรงกดที่ต้องการตาม FMVSS 220 เพื่อดูผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 27 และรูปที่ 28

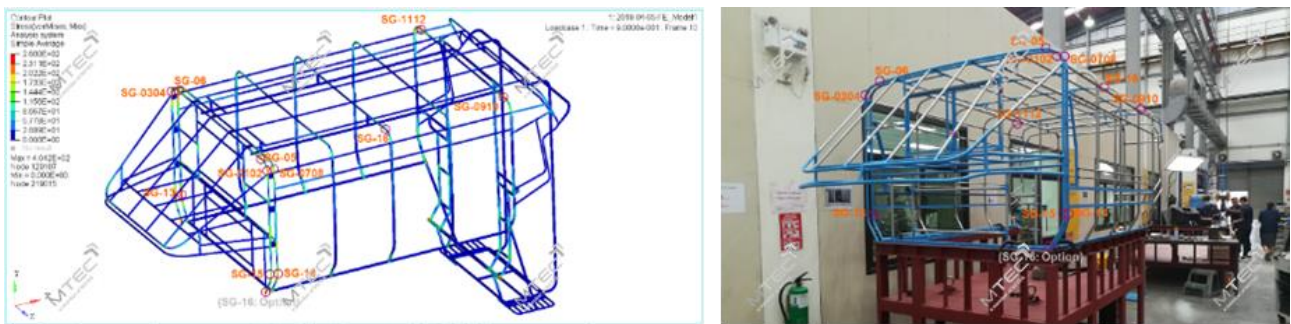


รูปที่ 27 การให้ภาระตามฟังก์ชันระยะและเวลากับแบบจำลองกับโครงสร้างที่เป็น Rigid Body



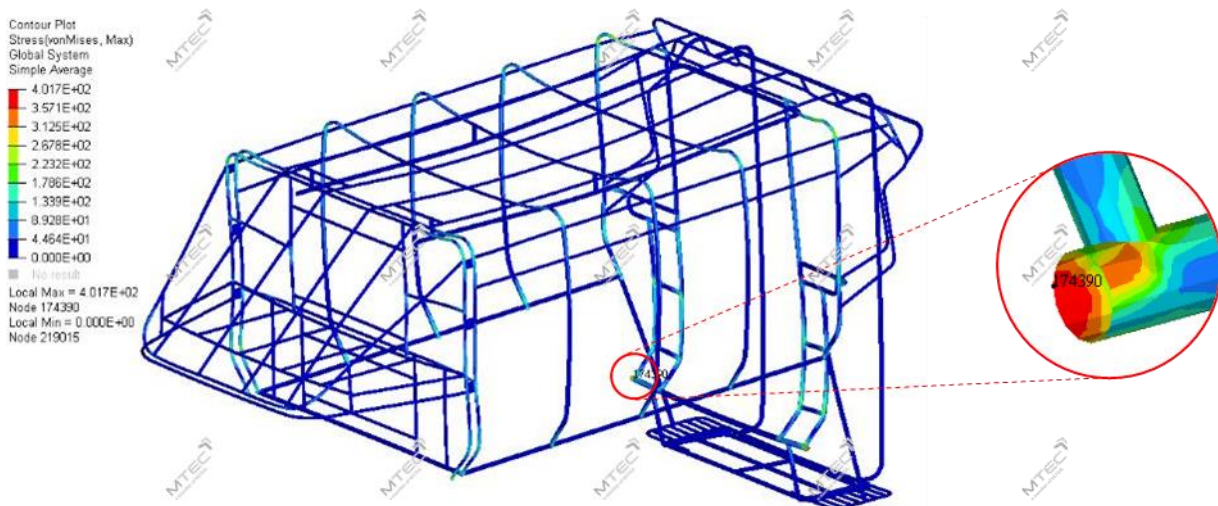
รูปที่ 28 การคำนวณหาตำแหน่งของผลลัพธ์จาก Reaction Force ที่เกิดขึ้น

โดยตำแหน่งที่วัดค่าในการจำลองอ้างอิงจากตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียด (Strain gauges) บนต้นแบบจริง จำนวน 16 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 29



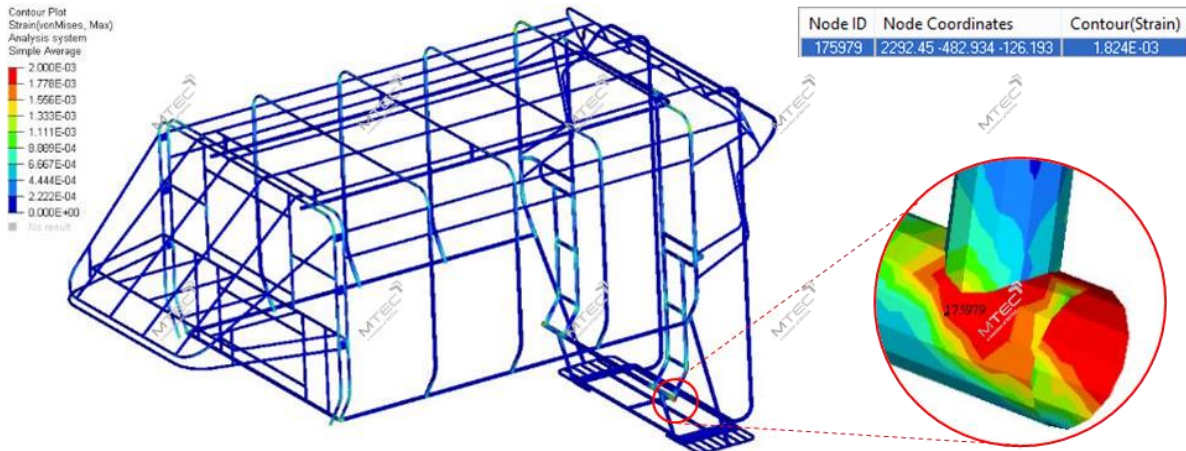
รูปที่ 29 ตำแหน่งบนโครงสร้างหลังคาที่มีการอ่านค่าความเครียดจากการวิเคราะห์ด้วย FEM (ซ้าย) และตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเครียด (Strain gauges) ที่ต้นแบบ (ขวา)

เมื่อพิจารณาค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง พบว่ามีค่าเท่ากับ 401 MPa โดยเกิดขึ้นที่บริเวณท่อยึดด้านหลังซึ่งผลิตจากเหล็กกล้าไร้สนิม ดังรูปที่ 30 และมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุที่ 468 MPa ในขณะที่โครงสร้างในส่วนที่ผลิตขึ้นจากเหล็กมีค่าความเค้นโดยรวมต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุที่ 258 MPa เช่นกัน นั่นคือโครงสร้างไม่เกิดความเสียหายภายใต้ภาระการกดดังกล่าว และสอดคล้องกับมาตรฐาน FMVSS 220



รูปที่ 30 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างหลังการกระชกดัดแปลง

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบค่าความเครียด (Strain) พบว่าตำแหน่งของโครงสร้างที่ได้รับแรงกระทำจะเกิดค่าความเครียด (Strain) สูงสุดประมาณ 0.2% ดังรูปที่ 31 ซึ่งยังอยู่ใน Elastic Zone โดยมีระยะหัดตัวที่น้อยกว่า 25 มม. และสอดคล้องกับผลของค่าความเครียดที่คำนวณได้

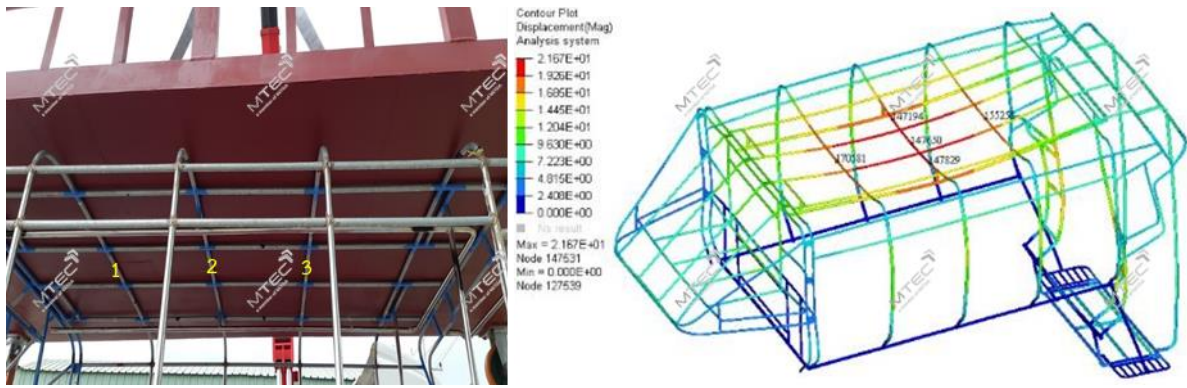


รูปที่ 31 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วย Static Load ตามมาตรฐาน FMVSS 220

ในการทดสอบต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน FMVSS 220 ตามเงื่อนไขดังที่อธิบายไว้ข้างต้น ดำเนินการโดยสร้างแรงกระทำจากด้านบน (Top loader) ด้วยโครงสร้างเหล็กถ่วงด้วยแผ่นพื้นสำเร็จรูป ที่มีความเป็นระนาบทำให้สามารถกระจายน้ำหนักจำนวน 3,180 กิโลกรัม (เทียบเท่ากับ 31,196 นิวตัน หรือ 1.5 เท่าของน้ำหนักรถที่มีการติดตั้งหลังคา) ลงบนต้นแบบหลังคาได้อย่างสม่ำเสมอ โดยดังที่แสดงในรูปที่ 32 (ซ้าย) ได้ใช้รถเครนขนาด 8 ตัน ค่อยๆ ปล่อยโครงสร้างถ่วงน้ำหนักที่วัดค่าด้วยเครื่องชั่งชนิดแขวนดังที่แสดงในรูปที่ 32 (กลาง) เพื่อให้เกิดการสร้างแรงแบบ Static และ จากนั้นจึงทำการวัดค่า Deformation และ ค่าความเครียด (Strain) ดังที่แสดงใน Error! Reference source not found. (ขวา) และ รูปที่ 32 (ขวาบน) ตามลำดับ และได้ผลการทดสอบที่พบว่าโครงสร้างหลังคามีการยุบตัวจัดจากสามตำแหน่ง มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 30 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ใน Elastic Zone และไม่พบความแตกหักเสียหายแต่อย่างใด ซึ่งอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน FMVSS 220 ส่วนของค่าความเครียด (Strain) ทั้ง 16 ตำแหน่ง ก็มีความแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 32 แทนทดสอบแรงกดหลังคา Static Load ตามมาตรฐาน FMVSS 220 (ซ้าย) เครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้ในการสร้างแรงกดแบบแขวน (กลาง) การวัดค่าระยะ Deformation หลังการทดสอบ (ขวาบน) และการควบคุมอุปกรณ์วัดด้วย Toughbook (ขวาล่าง)



รูปที่ 33 ค่าการยุบตัวที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ เมื่อเทียบกับการทดสอบ

คณะวิจัยได้ดำเนินการวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยกำหนดเงื่อนไขที่สำคัญดังที่อธิบายไว้ข้างต้น และได้ผลการวิเคราะห์ดังที่แสดงในรูปที่ 33 โดยพบว่าที่ภาระการกด 3,180 กก. หรือ 31,196 นิวตัน โครงสร้างมีค่าการยุบตัวสูงสุดเท่ากับ 21.7 มม. ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหลังคา ซึ่งเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่วัดได้จริงจากการทดสอบ ณ ตำแหน่งเดียวกันอยู่ที่ 25 มม. และต่ำกว่าข้อกำหนดของ FMVSS 220 ที่ 130 มม. โดยได้มีการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ ตามตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าระยะการเปลี่ยนรูป (Deformation) จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ต้นแบบหลังการรับส่งนักเรียน

ตำแหน่งที่วัด	ค่าระยะการเปลี่ยนรูป (Deformation) [mm]	
	จากการทดสอบและวัดผล	จาก Simulation
จุดที่ 1	25	21.7
จุดที่ 2	22	18.9
จุดที่ 3	22	17.9
ค่าเฉลี่ย	23	19.5

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความเครียด (Strain) จากผลการทดสอบและวิเคราะห์ต้นแบบหลังการรับส่งนักเรียน

ตำแหน่งที่วัด	ค่าความเครียด (Strain) [$\mu\epsilon$]		ตำแหน่งที่วัด	ค่าความเครียด (Strain) [$\mu\epsilon$]	
	Real Test	Simulation		Real Test	Simulation
SG01	-2.61E-04	-3.44E-04	SG09	-5.42E-05	-1.46E-04
SG02	-1.14E-04	-6.07E-05	SG10	7.57E-06	3.59E-05
SG03	-2.10E-04	-1.77E-04	SG11	-7.81E-05	-7.35E-05
SG04	-8.70E-05	-6.07E-05	SG12	1.30E-05	5.62E-05
SG05	-2.54E-04	-2.32E-04	SG13	-2.37E-04	-2.81E-04
SG06	-1.75E-04	-4.47E-04	SG14	-2.95E-04	-2.69E-04
SG07	-2.27E-04	-1.30E-04	SG15	-1.00E-04	-3.56E-04
SG08	-7.38E-05	-6.68E-05	SG16	-9.94E-05	2.13E-04

4.3 แนวทางการนำอุปกรณ์ passive safety เข้ามาใช้เพื่อลดความรุนแรงของอุบัติเหตุ

อุปกรณ์ด้าน Passive safety ที่คณะวิจัยเสนอแนะให้ติดตั้งเข้ากับรถรับส่งนักเรียน มีดังต่อไปนี้

- (1) ประตูท้ายรถ พร้อมกลอนล็อกสองชั้น เพื่อป้องกันนักเรียนพลัดตกจากรถกรณีเบรกฉุกเฉิน
- (2) สัญญาณแจ้งเตือนประตูเปิด เพื่อแสดงผลด้วยสัญญาณเตือนที่คนขับรถ เพื่อตรวจสอบประตูท้ายรถ
- (3) บันไดขึ้นลงท้ายรถ ที่มีลูกนอนกว้างและลูกตั้งเหมาะสมต่อการก้าวขึ้นลงบันได ไม่มีพื้นที่สำหรับการโหนท้ายรถ และมีความแข็งแรงลดความรุนแรงจากการชนจากด้านท้าย
- (4) ไฟสัญญาณเหลืองกระพริบ ติดตั้งอย่างน้อย 4 จุดที่หลังคารอบคัน โดยมีความสว่าง มองเห็นได้ตอนกลางวันได้ไกลถึง 150 เมตร
- (5) ไฟสัญญาณเบรกและไฟเลี้ยว: ติดตั้งเพิ่มที่หลังคารถด้านท้าย ที่มีความสว่าง มองเห็นได้ตอนกลางวันได้ไกลถึง 150 เมตร
- (6) ติดตั้งเข็มขัดนิรภัยประเภทสองจุดที่นั่งด้านท้ายรถ

โดยได้ติดตั้งอุปกรณ์ด้าน Passive safety รายการที่ (1) – (5) ดังกล่าวกับรถที่ใช้ในการทดสอบภาคสนาม โดยแสดงผลการใช้งานในหัวข้อ 4.4

4.4 การทดสอบต้นแบบระดับภาคสนามด้วยการนำไปใช้งานในพื้นที่จริง

คณะวิจัยได้ดำเนินการทดสอบภาคสนามของต้นแบบด้วยการผลิตและนำต้นแบบไปติดตั้งบนรถและใช้งานจริงในการรับส่งนักเรียนในพื้นที่และสภาพแวดล้อมจริง และทำการตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบให้เป็นตามคุณลักษณะข้อที่ 1 ตามที่ได้เสนอไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สามารถการออกแบบห้องโดยสารในลักษณะโมดูลคือ แยกขั้นตอนการผลิตประกอบห้องโดยสารออกจากกระบวนการผลิตอื่นๆ เพื่อสามารถประกอบเป็นโมดูลแยกไว้สำหรับนำไปติดตั้งกับรถภายหลังได้ ซึ่งจากผลการดำเนินการทดสอบการติดตั้งต้นแบบห้องโดยสารนี้เข้ากับกระบะของรถยนต์ Toyota Vigo รุ่น Single Cab สรุปว่าสามารถติดตั้งต้นแบบที่ทำการประกอบไว้สำเร็จก่อนได้จริง ดังที่แสดงในรูปที่ 34

จากนั้น จึงดำเนินการทดสอบภาคสนามด้วยการใช้งานในพื้นที่จริง ในการรับส่งนักเรียนโรงเรียนบ้านตาเรือง อ.สอยดาว จ.จันทบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ถนนมีลักษณะเป็นดินลูกรัง เป็นเนินเขาและดินโคลนในกรณีที่ฝนตกทุกวัน โดยสามารถประเมินผลความทนทานต่อการสั่นสะเทือนจากพื้นถนน ภายใต้สภาพการติดตั้งอุปกรณ์ภายในพื้นฐาน ได้แก่ การมีผู้โดยสารและติดตั้งเก้าอี้ ประตูท้ายบันไดท้าย หรือผ้าใบกันแดด/ฝน เป็นต้น และสภาพการจราจร อากาศ และพื้นผิวถนนจริง โดยไม่พบความเสียหายในโครงสร้างแต่อย่างใด



รูปที่ 34 ต้นแบบหลังคาห้องโดยสารในลักษณะโมดูล (ซ้าย) และการประกอบต้นแบบเข้ากับรถกระบะ (ขวา)

4.4.1 โครงหลังคาถรถรับส่งนักเรียนที่พัฒนาขึ้นในโครงการ

รูปที่ 35 การเปรียบเทียบโครงหลังคาที่มีอยู่เดิม (ซ้าย) และโครงหลังคาตัวที่พัฒนาขึ้นใหม่ (ขวา)

จากรูปที่ 35 (ซ้าย) จะเห็นได้ว่าโครงหลังคาแต่เดิมที่ติดตั้งใช้งานอยู่นั้นผลิตจากท่อเหล็กดำซึ่งไม่ทนทานต่อสภาพอากาศในระยะยาว อีกทั้งขนาดของท่อเหล็ก รวมถึงวิธีการยึดติดกับตัวถังรถ ไม่ได้รับการคำนวณอย่างถูกต้องตามหลักวิศวกรรม ในทางกลับกัน จากรูปที่ 35 (ขวา) จะเห็นได้ว่าโครงหลังคาที่ทางกลุ่มวิจัยฯ ได้พัฒนาขึ้นมีความมั่นคงแข็งแรงมากกว่า โดยชิ้นส่วนที่ต้องสัมผัสกับอากาศภายนอกทั้งหมดจะใช้ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมกลมเพื่อป้องกันการเกิดสนิมกัดกร่อน และหลังคาเป็นแผ่นอะลูมิเนียม ซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนเช่นเดียวกันแต่น้ำหนักที่เบากว่า นอกจากนี้ โครงหลังคาถรถ ที่ได้พัฒนาขึ้น ยังมีจุดเด่นอื่นๆ อาทิ

- (1) บันไดขึ้นลงที่ได้รับการออกแบบและคำนวณให้สามารถรับแรงในกรณีที่ถูกชนด้านท้ายได้ โดยแรงจะถ่ายเทไปยังแชสซีของรถ จึงทำหน้าที่เป็นกันชนด้านท้ายไปในตัว
- (2) ความสูงของหลังคาที่ได้ปรับเพิ่มขึ้นเป็น 180 ซม. วัดจากพื้นกระบะ ทำให้ผู้โดยสารรู้สึกปลอดภัยในขณะนั่งโดยสาร
- (3) มีประตูกันตกพร้อมเซ็นเซอร์ตรวจจับการปิดประตู จะช่วยให้ผู้ขับขี่ทราบว่าประตูยังไม่ปิดและไม่พร้อมสำหรับการออกรถ
- (4) มีกริ่งเตือนในรถ ทำให้นักเรียนสามารถแจ้งให้ผู้ขับขี่ทราบได้อย่างรวดเร็วในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุขึ้น
- (5) ไฟกะพริบสีเหลืองแสดงสัญญาณที่ติดรอบตัวรถทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ช่วยให้รถยนต์ที่อยู่ทั้งด้านหน้าและด้านหลังทราบว่าป็นรถนักเรียน ช่วยก่อให้เกิดความระมัดระวังในการขับขี่มากขึ้น
- (6) โครงสร้างช่องไฟด้านข้างรถที่มีความถี่มากขึ้น จะช่วยป้องกันไม่ให้นักเรียนตกออกนอกรถ
- (7) แผ่นปิดด้านข้างรถบริเวณที่นั่งจะช่วยป้องกันไม่ให้สิ่งของตกและกันฝนสาดไปในตัว

ทั้งหมดนี้เป็นฟังก์ชันต่างๆ ที่สนับสนุนความสะดวกสบาย และความปลอดภัยในการใช้งาน นอกเหนือจากโครงสร้างหลังคาที่สามารถรับแรงกดได้ตามมาตรฐาน

4.4.2 ลักษณะการใช้งานรถทดสอบ

ลักษณะการใช้งานโครงหลังคารับส่งนักเรียนต้นแบบนี้เป็นการใช้งานจริงในพื้นที่อำเภอสอยดาว ซึ่งมีตั้งแต่ทางลูกรัง ทางลาดยางมะตอย และถนนคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นระยะทางประมาณ 20 กิโลเมตรต่อการรับส่งนักเรียนหนึ่งรอบ จำนวนประมาณ 30 คน ซึ่งจะได้รูปแบบของถนนที่ครอบคลุมตั้งแต่ทางเรียบไปจนถึงทางขรุขระ และสภาพดินฟ้าอากาศตั้งแต่เช้ามีจนถึงแดดจ้า ในช่วงบ่ายหลังโรงเรียนเลิก นอกจากนี้ ยังได้ทำการทดสอบอุปกรณ์ต่อพ่วงโครงสร้างไปด้วย กล่าวคือ ประตูเปิดปิดท้ายป้องกันนักเรียนตกซึ่งวงกบของประตูเป็นโครงสร้างเสริมแรงบริเวณท้ายด้วย

รูปแบบการทดสอบดังกล่าวข้างต้น จะสามารถยืนยันความแข็งแรงของโครงสร้างหลังคาในการใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความแข็งแรงของโครงสร้างงานเชื่อมและการจับยึด ซึ่งจะสะท้อนความสำคัญของการออกแบบและผลิตให้ถูกตามหลักวิศวกรรมได้เป็นอย่างดี

4.4.3 การประเมินผลการใช้งานโดยผู้ใช้ (คนขับและนักเรียน)

สำหรับโครงหลังคารับส่งนักเรียนต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้น ได้นำไปติดตั้งเพื่อการใช้งานจริงบนรถกระบะ 2 ประตู (ตอนเดียว) ยี่ห้อ Toyota Vigo รุ่น Single Cab สำหรับรับส่งนักเรียนที่โรงเรียนบ้านตาเรือง (ตำรวจชายแดนสงเคราะห์) อ.สอยดาว จ.จันทบุรี โดยหลังจากผ่านการใช้งานไปแล้วประมาณ 2 เดือน จึงได้ทำการสำรวจความคิดเห็นของทั้งผู้ขับขีและนักเรียนที่โดยสารดังต่อไปนี้

จำนวนนักเรียนที่ตอบแบบสอบถามนี้มีทั้งหมด 21 คน เป็นนักเรียนของโรงเรียนบ้านตาเรือง ตั้งแต่ระดับชั้นประถมศึกษาปีที่ 4 ถึงมัธยมศึกษาปีที่ 3 จะเห็นได้ว่านักเรียนส่วนใหญ่แสดงความพึงพอใจในการใช้รถรับส่งนักเรียนที่ติดตั้งโครงหลังคาต้นแบบที่ทางกลุ่มวิจัยฯ ได้พัฒนาขึ้น เช่น การเปิดปิดประตู บันไดขึ้นลง เบาะที่นั่ง กันสาด ความสูงของโครงหลังคา ไฟส่องสว่างภายใน และกริ่งเตือน ดังแสดงในตารางที่ 5 ส่วนตารางที่ 6 แสดงถึงความพึงพอใจของผู้ขับขี ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งการทรงตัวในขณะขับขี และเซ็นเซอร์ประตู รวมถึงสัญญาณไฟกะพริบ เป็นประโยชน์ในการใช้งานจริง โดยถึงแม้หน้าหนักของตัวรถโดยรวมจะเพิ่มขึ้นแต่ก็ไม่เป็นอุปสรรคต่อระยะเบรกและการออกตัวแต่อย่างใด

ตารางที่ 5 แบบสอบถามความพึงพอใจของ “นักเรียนที่โดยสาร” ต่อโครงหลังคารับส่งนักเรียน

หน่วย : จำนวนนักเรียนที่ตอบคำถาม

ข้อ	รายการ	ดี	เฉยๆ	ไม่ดี
1	เปิดปิดประตูสะดวกหรือไม่	20	1	
2	บันไดขึ้นลงเหยียบง่ายหรือไม่	21		
3	เบาะที่นั่งสบายหรือไม่	20	1	
4	ฝนสาดหรือไม่	17	4	
5	หลังคาสูงพอดีไหม	18	3	
6	ไฟเพดานในรถเพียงพอหรือไม่	20	1	
7	กริ่งใช้งานง่ายหรือไม่	20	1	

ตารางที่ 6 การแบบสอบถามความพึงพอใจต่อโครงหลังคารับส่งนักเรียน (สำหรับผู้ขับขี่)

ข้อ	รายการ	ดี	เฉยๆ	ไม่ดี
1	หลังคาสูงไปหรือไม่	✓		
2	การทรงตัวขณะขับดีหรือไม่	✓		
3	สัญญาณไฟกะพริบใช้งานสะดวกหรือไม่	✓		
4	สัญญาณแจ้งเตือนประตูปิดไม่สนิทใช้งานสะดวกหรือไม่	✓		
5	มีระยะเบรกเพิ่มขึ้นหรือไม่		✓	
6	การออกตัวช้าลงหรือไม่		✓	

โดยจากการสอบถามความพึงพอใจจากทั้งนักเรียนและผู้ขับขี่ซึ่งจะเห็นได้ว่า ต่างมีความพอใจในการใช้งานรถกระบะที่ติดตั้งโครงหลังคาที่ทางกลุ่มวิจัยฯ ได้พัฒนาขึ้น ซึ่งจะเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาโครงหลังคารับส่งนักเรียนต่อไปในอนาคต โดยการเพิ่มฟังก์ชันการใช้งานอื่นๆ อาทิ ที่วางกระเป๋าต้านบน ซึ่งจะเป็นคานเสริมช่วยรับแรงในตัว และการปรับรูปแบบที่นั่งให้เหมาะสม มีเข็มขัดนิรภัยเพื่อลดระดับความรุนแรงในขณะเกิดอุบัติเหตุ เป็นต้น

ตารางที่ 7 การประเมินผลการทดสอบใช้งานต้นแบบหลังคารับส่งนักเรียน โรงเรียนบ้านตาเรือง อ.สอยดาว จ.จันทบุรี

หัวข้อการประเมิน	ผู้ประเมิน	ผลการประเมิน
1. เสียงหรือการสั่นสะเทือนที่ผิดปกติจากหลังคา	คนขับ	ไม่พบความผิดปกติ
2. ทิศนวิสัย	คนขับ	ดี
3. การทรงตัวขณะขับ	คนขับ	ปลอดภัยดี (ปกติไม่ได้ใช้ความเร็วสูง)
4. ระยะเบรก	คนขับ	ปลอดภัยดี
5. การออกตัวรถ	คนขับ	ตอบสนองดี
6. หลังคาสูง	นักเรียน	อยากให้ลดความสูงลง 5 เซนติเมตร
7. การเปิดปิดประตูท้าย	นักเรียน	สะดวกและรู้สึกปลอดภัยดี
8. บันไดขึ้นลง	นักเรียน	ความกว้างเหมาะสม ขึ้นลงได้ปลอดภัย
9. ความเสียหายในโครงสร้าง	คณะวิจัย	ไม่พบความเสียหาย (รอยเชื่อม น็อตคลาย)
10. การใช้งานโดยคนขับ	คนขับ/คณะวิจัย	ตอบสนองวิถีชีวิตประจำวัน (เช้า/เย็น ใช้รับส่งนักเรียน) กลางวัน (รับจ้างทั่วไป)
11. การใช้งานโดยนักเรียน	นักเรียน/ คณะวิจัย	ความรู้สึกปลอดภัย จากการติดตั้งประตูท้าย บันไดที่ขึ้นลงได้สะดวก มีกริ่งและสัญญาณแจ้งคนขับรถขณะประตูเปิด

4.5 สรุปข้อเสนอแนะแนวทางการออกแบบเชิงวิศวกรรมของรถสองแถวรับส่งนักเรียน

จากการดำเนินงานในโครงการนี้ คณะวิจัยสามารถสรุปผลที่ได้จากการออกแบบโครงหลังคา รูปแบบการจัดวางและวิธีติดตั้งเก้าอี้โดยสาร และการวิเคราะห์ผลด้านความแข็งแรง รวมถึงแนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ ได้ดังที่แสดงในรูปที่ 36 โดยสามารถประมาณการงบประมาณของการนำรถกระบะไปติดตั้งโครงสร้างหลังคานี้ที่อุต่างๆ ประมาณ 50,000 - 60,000 บาท ซึ่งเป็นงบประมาณที่อยู่ในขอบเขตของการติดตั้งหลังคารถสองแถวทั่วไปจากการสำรวจ (40,000 - 80,000 บาท)



รูปที่ 36 ข้อเสนอแนะแนวทางการออกแบบเชิงวิศวกรรมของรถสองแถวรับส่งนักเรียน

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

คณะวิจัยได้ดำเนินงานและได้บรรลุวัตถุประสงค์หลักในการดำเนินโครงการนี้ของคณะวิจัยคือ การออกแบบและพัฒนาต้นแบบหลังคารถกระบะดัดแปลงที่มีเงื่อนไขในการออกแบบ (Design criteria) ที่ท้าทาย อันได้แก่

- โครงสร้างหลังคารองรับแรงกระทำจากการพลิกคว่ำ (Superstructure) ตามมาตรฐานสากล ได้แก่ FMVSS 220
- ใช้วัสดุและวิธีการผลิตที่ต่อหลังคาเหล็กทั่วไปสามารถผลิตได้เอง ได้แก่ ท่อเหล็ก และท่อเหล็กกล้าไร้สนิม
- มีต้นทุนที่อยู่ในขอบเขตอยู่ที่ประมาณ 60,000 บาท ซึ่งเป็นราคาจำหน่ายหลังคาสำหรับรถกระบะดัดแปลงสูงสุดที่คณะวิจัยได้ข้อมูลจากการสำรวจและลงพื้นที่

โดยคณะวิจัยได้เริ่มต้นจากการเก็บข้อมูลรูปแบบและวิธีการต่อเติมรถรับส่งนักเรียนประเภทรถสองแถวที่เป็นอยู่ส่วนใหญ่ในปัจจุบันจากการสำรวจต่อหลังคาเหล็ก รวมถึงเก็บข้อมูลสถานการณ์การใช้รถสองแถวรับส่งนักเรียนที่พบได้ส่วนใหญ่ อาทิ เช่น จำนวนผู้โดยสารโดยเฉลี่ย รูปแบบการโดยสาร (นั่ง-ยืน) ความเร็วเฉลี่ย ความเร็วสูงสุด ในหลายจังหวัด ตามด้วยการออกแบบหลังคาสำหรับรถกระบะดัดแปลงให้ได้ความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับแรงกระทำที่เกิดขึ้น กรณีที่รถเกิดอุบัติเหตุพลิกคว่ำ หรือที่เรียกว่า “Rollover” ซึ่งใช้เกณฑ์ในการออกแบบ (Design Criteria) ตามมาตรฐาน FMVSS 220 ที่ระบุเงื่อนไขและเกณฑ์สำหรับการทดสอบโครงสร้างความแข็งแรงของรถโดยสารโดยจำลองเหตุการณ์รถพลิกคว่ำด้วยการทดสอบด้วยแรงกระทำที่แผ่นหลังคาของโครงสร้างห้องโดยสารแบบ Static โดยการยุบตัว (Deformation) ต้องอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดตามมาตรฐาน ซึ่งคณะวิจัยได้ทำการออกแบบและทบทวนวิธีการเชื่อมต่อของชิ้นส่วนโครงสร้างและเลือกวัสดุที่เหมาะสม ทั้งในด้านความแข็งแรง น้ำหนัก และต้นทุน และรวบรวมแนวทางในการเพิ่มความแข็งแรง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) พิสูจน์ความถูกต้องของการออกแบบ (Design Validation) ด้วยการทดสอบต้นแบบหลังคาแบบ Full scale ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งดำเนินการที่แทนทดสอบที่กรมการขนส่งทางบก อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี จากผลการทดสอบต้นแบบพบว่า ระยะยุบตัวจากแรงกระทำที่หลังคาของโครงสร้าง มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์สูงสุดที่กำหนด และสามารถนำวิธีการออกแบบโครงสร้างและวัสดุของต้นแบบ Full scale ไปใช้ในการกระบวนการผลิตหลังคารับส่งนักเรียนประเภทกระบะดัดแปลงต่อไป โดยผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการนี้จะเป็นส่วนหนึ่งของการเริ่มต้นจากจังหวัดจันทบุรี ที่ทาง ศวปถ. ได้สร้างเครือข่าย “จันทบุรีโมเดล” โดยการนำแนวทางบริหารจัดการความร่วมมือระหว่าง กรมการขนส่งทางบก-โรงเรียน-กลุ่มผู้ปกครอง-ผู้ประกอบการเดินรถ เพื่อยกระดับการรับส่งนักเรียนให้มีความปลอดภัย ร่วมกับการนำการออกแบบเชิงวิศวกรรมของโครงสร้างรถ (โดย MTEC) และการนำระบบติดตามรถรับส่งนักเรียน (NECTEC) มาใช้ ซึ่งผลการจากดำเนินโครงการต่างๆ ของ ศวปถ. นี้ จะมีการขยายผลไปยังจังหวัดต่างๆ ทั่วประเทศ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน (ศวปถ.) ที่ให้ความร่วมมือในการลงพื้นที่จังหวัดจันทบุรี และร่วมงานในโครงการ “จันทบุรีโมเดล” ขอขอบคุณสำนักวิศวกรรมยานยนต์ กรมการขนส่งทางบก ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทดสอบต้นแบบ อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี และมูลนิธิเพื่อผู้บริโภค ที่ได้ร่วมดำเนินการกับคณะผู้วิจัยในสังกัดหน่วยวิจัยออกแบบและวิศวกรรมศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในการออกแบบและพัฒนาต้นแบบหลังการรับส่งนักเรียนประเภทกระบะดัดแปลง เพื่อขยายผลในการผลิตเชิงสาธารณประโยชน์ และขอขอบคุณศูนย์วิชาการเพื่อความปลอดภัยทางถนน (ศวปถ.) ที่ได้ผลักดันและสนับสนุนให้เกิดโครงการนี้

บรรณานุกรม

1. US Department of Transportation (1998). Federal Motor Vehicle Safety Standards and Regulations FMVSS 220 School Bus Rollover Protection.
2. Association of German Engineers. VDI 2221. Systematic Approach to the Development and Design of Technical Systems and Products. May 1993.
3. Gepner, B., Bojanowski, C., Kwasniewski, L. and Wekezer, J., “Effectiveness of ECE R66 and FMVSS 220 standards in rollover crashworthiness assessment of paratransit buses”. International Journal of Automotive Technology. 2014, Volume 15, Issue 4, pp 581-591.
4. ปราโมทย์ เดชะอำไพ, “ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม”, พิมพ์ครั้งที่ 5, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์

ภาคผนวก

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของท่อตัวอย่าง

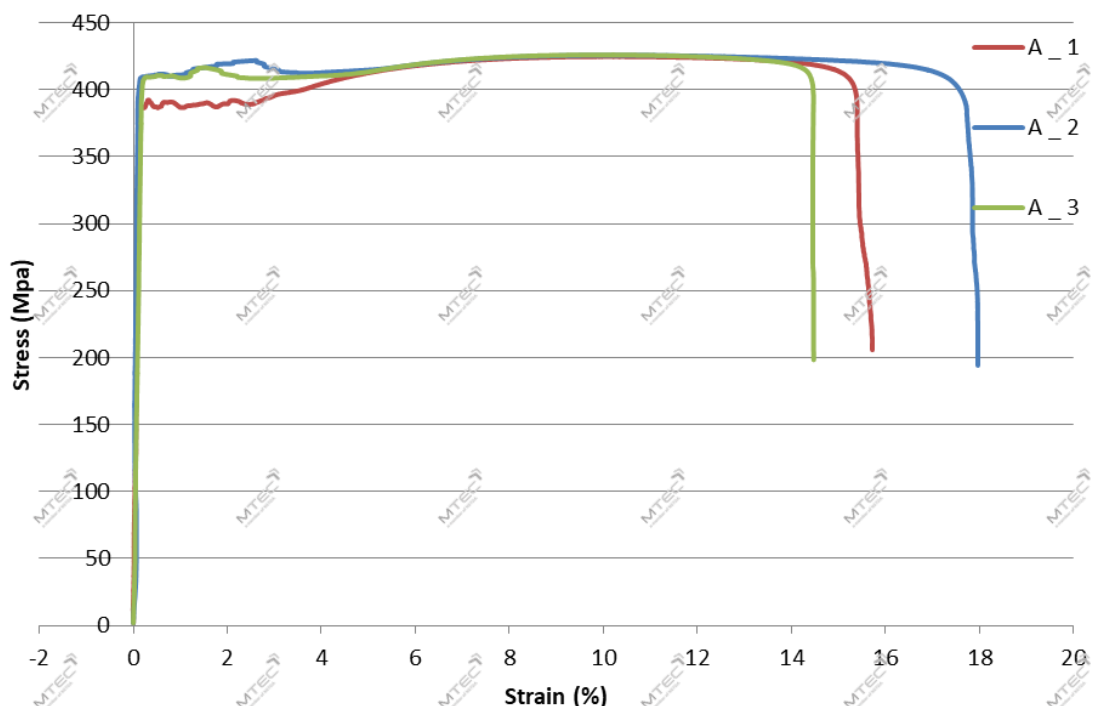
เพื่อวัตถุประสงค์ในการยืนยันความแข็งแรงของท่อชนิดต่างๆ ที่ใช้ในงานโครงหลังคาถรับส่งนักเรียน และเพื่อทดสอบหาค่าคุณสมบัติเชิงกลของท่อ รวมถึงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (CAE) จึงได้ดำเนินการทดสอบความต้านทานแรงดึงของท่อโดยมีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

1. ท่อประปาเคลือบสังกะสีขนาด 1 นิ้ว

Name	Elastic	YP(%YP)_Stress	YP(%YP)_Force	Max_Stress
Parameters	Stress 320 – 370 N/mm2	0.1 %	0.1 %	Calc. at Entire Areas
Unit	GPa	N/mm2	kN	N/mm2
1_1	300.684	388.83	44.4560	424.71
1_2	235.374	411.70	47.0709	425.74
1_3	239.553	410.54	46.9384	425.98

Name	Max_Force	Max_Ext.1(Strain)	Elongation	Final Length
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas		
Unit	kN	%	%	mm
1_1	48.5578	10.3	16.7	57.680
1_2	48.6755	10.4	30.9	64.630
1_3	48.7037	10.1	31.5	65.380

Name	n_value	r_value	Outer_Diameter	Thickness
Parameters	5% – 10% – Intervals:20	10 %		
Unit			mm	mm
1_1	0.11307	0.37712	26.0700	1.4800
1_2	0.11267	0.51245	26.0700	1.4800
1_3	0.11489	0.71682	26.0700	1.4800

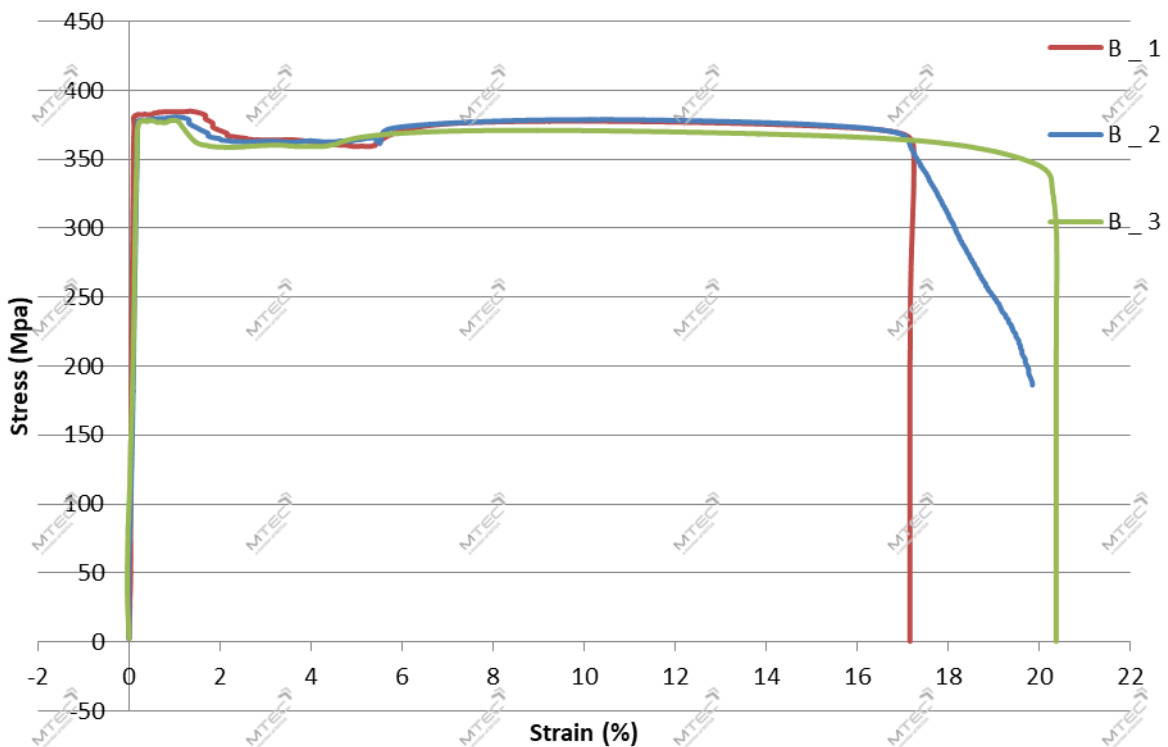


2. ท่อประปาเคลือบสังกะสีขนาด ¼ นิ้ว

Name	Elastic	YP(Disp.)_Stress	YP(Disp.)_Force	Max_Stress
Parameters	Stress 200 – 300 N/mm2	Strain 2 %	Strain 2 %	Strain 6 – 20 %
Unit	GPa	N/mm2	kN	N/mm2
B_1	396.413	384.91	34.2900	377.72
B_2	198.505	380.72	33.9166	378.83
B_3	209.959	378.40	33.7101	371.10

Name	Max_Force	Max_Ext.1(Strain)	Elongation	Final Length
Parameters	Strain 6 – 20 %	Strain 6 – 20 %		
Unit	kN	%	%	mm
B_1	33.6491	9.8	28.0	63.530
B_2	33.7482	10.1	29.1	63.820
B_3	33.0599	8.7	27.9	63.550

Name	n_value	r_value	Outer_Diameter	Thickness
Parameters	6% – 8% – Intervals:20	8 %		
Unit			mm	mm
B_1	0.12628	0.78556	20.6400	1.4800
B_2	0.10670	0.45214	20.6400	1.4800
B_3	0.08685	0.76197	20.6400	1.4800

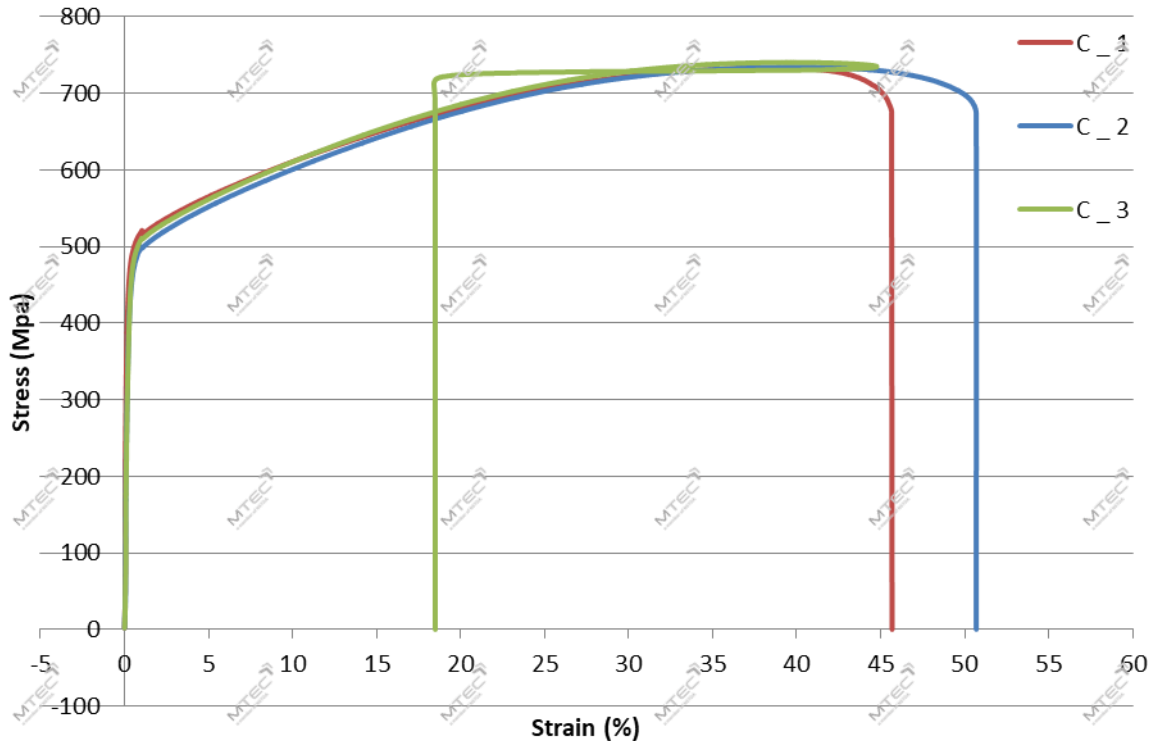


3. ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 1 นิ้ว

Name	Elastic	YS1_Stress	YS1_Force	Max_Stress
Parameters	Stress 240 – 300 N/mm2	0.2 %	0.2 %	Calc. at Entire Areas
Unit	GPa	N/mm2	kN	N/mm2
C_1	186.103	480.53	51.6805	733.10
C_2	134.351	461.12	49.5933	734.33
C_3	136.635	473.76	50.9527	740.42

Name	Max_Force	Max_Ext.1(Strain)	Elongation	Final Length
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas		
Unit	kN	%	%	mm
C_1	78.8444	38.9	54.1	76.460
C_2	78.9770	40.9	54.3	75.970
C_3	79.6319	40.2	53.9	76.270

Name	n_value	r_value	Outer_Diameter	Thickness
Parameters	10% – 20% – Intervals:20	20 %		
Unit			mm	mm
C_1	0.30532	0.62521	25.37	1.430
C_2	0.31867	0.65880	25.37	1.430
C_3	0.31503	0.57154	25.37	1.430

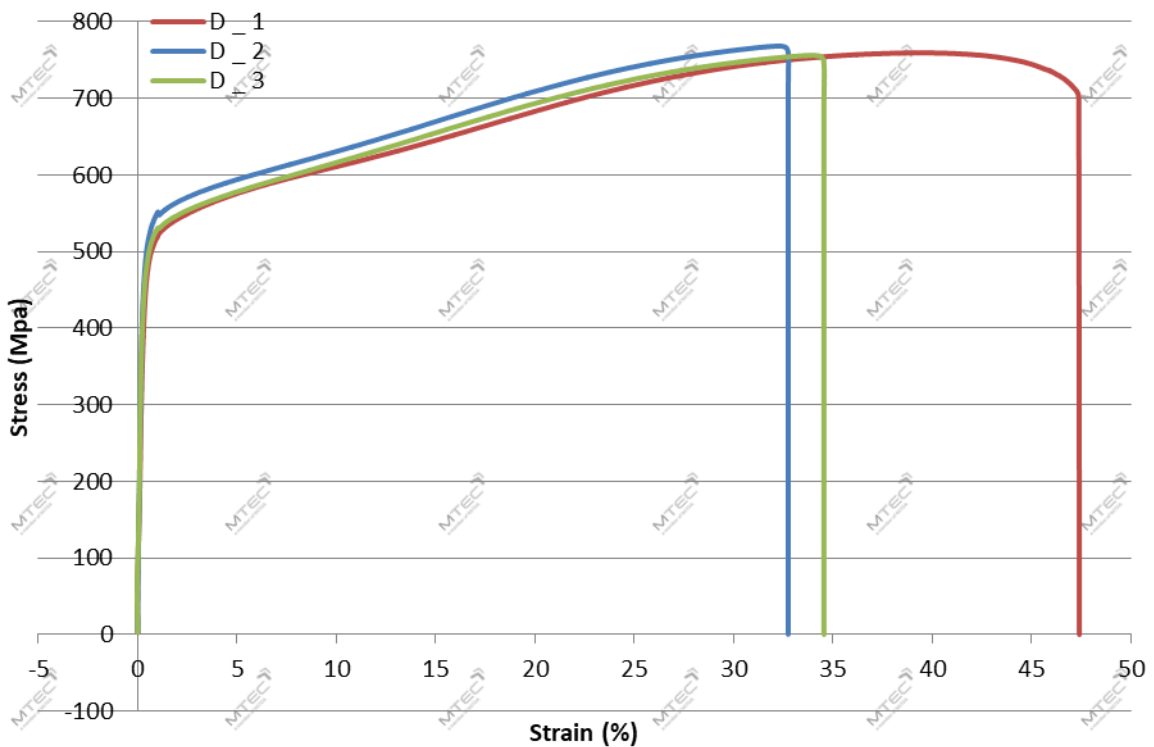


4. ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด ๓ นิ้ว

Name	Elastic	YS1_Stress	YS1_Force	Max_Stress
Parameters	Stress 200 – 220 N/mm2	0.2 %	0.2 %	Calc. at Entire Areas
Unit	GPa	N/mm2	kN	N/mm2
D_1	173.537	467.98	36.0217	759.44
D_2	183.813	501.54	38.6042	768.20
D_3	174.554	479.22	36.8862	756.04

Name	Max_Force	Max_Ext.1(Strain)	Elongation	Final Length
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas		
Unit	kN	%	%	mm
D_1	58.4556	39.7	49.1	74.030
D_2	59.1300	32.7	48.2	73.340
D_3	58.1942	34.3	48.9	73.840

Name	n_value	r_value	Outer_Diameter	Thickness
Parameters	10% – 20% – Intervals:20	20 %		
Unit			mm	mm
D_1	0.30766	0.94020	18.97	1.394
D_2	0.31714	1.03100	18.97	1.394
D_3	0.31840	0.93764	18.97	1.394



5. ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมขนาด 1/2 นิ้ว

Name	Elastic	YS1_Stress	YS1_Force	Max_Stress
Parameters	Stress 140 – 200 N/mm2	0.2 %	0.2 %	Calc. at Entire Areas
Unit	GPa	N/mm2	kN	N/mm2
E_1	168.745	468.53	23.8743	728.17
E_2	135.063	469.61	23.9295	733.21
E_3	178.380	468.60	23.8775	724.05

Name	Max_Force	Max_Ext.1(Strain)	Elongation	Final Length
Parameters	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas		
Unit	kN	%	%	mm
E_1	37.1042	38.5	50.6	74.620
E_2	37.3609	41.8	50.5	75.240
E_3	36.8945	41.6	51.2	74.940

Name	n_value	r_value	Outer_Diameter	Thickness
Parameters	10% – 20% – Intervals:20	20 %		
Unit			mm	mm
E_1	0.29437	0.61830	15.87	1.098
E_2	0.30189	0.78415	15.87	1.098
E_3	0.29774	0.59356	15.87	1.098

