การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22
15-17 ตุลาคม 2551 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

การออกแบบและพัฒนาโครงคัสซีรถโดยสาร 2 ชั้น (มาตรฐาน 4)

Design and Development of Chassis Frame for Double Deck Bus (Standard No. 4)

อิสรา โรจนะ[1*] สายประสิทธิ์ เกิดนิยม[2]
[1,2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถ.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ จ.กรุงเทพมหานคร 10800
[*]อีเมล์ itsa_ra@hotmail.com, อีเมล์ saps@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

การประกอบและผลิตโครงคัสซีรถโดยสารภายในประเทศอาศัยความรู้และความชำนาญของช่างซึ่งขาดการออกแบบตามหลักวิศวกรรม ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษา ออกแบบและพัฒนาโครงคัสซีรถโดยสาร 2 ชั้น (มาตรฐาน 4) ตามหลักการออกแบบทางวิศวกรรม ช่วงหลายปีที่ผ่านมานี้คอมพิวเตอร์มีส่วนสำคัญสำหรับการออกแบบและการคำนวณความแข็งแรง ดังนั้นการออกแบบโครงคัสซีจึงใช้วิธีการคำนวณความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบคาน (Beam Element) เพื่อคำนวณสนามโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง จากนั้นนำผลการคำนวณดังกล่าวเลือกขนาดหน้าตัดของโครงสร้างเพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติ และคำนวณความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบของแข็ง (Solid Element) การคำนวณทั้งหมดได้จำลองภาระซึ่งเกิดจากการขับขี่ยานพาหนะคือ ภาระโมเมนต์ดัด, ภาระแรงบิด, ภาระแรงกระทำจากด้านข้าง และแรงกระทำตามแนวยาวรถ ซึ่งผลการคำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างมีค่าอยู่ในช่วงสภาวะยืดหยุ่น

Abstract

Locally assembly and manufacturing frame chassis of double deck bus (standard no. 4) neglected the principle of engineering design. This paper describes method of engineering design for adequate strength. Recently in the past years, finite element method was applied to design and analyze the structural members. To begin with constructing finite model (beam element) for calculating the bending moment contour. From calculation selected section modulus for created 3D chassis frame by CAE (computer aided engineering). Use finite element method to simulated stress contour occurred in structural members. All simulating condition included bending, torsion, combined, lateral load and longitudinal load. Summarized the stress occurred in chassis is less than yield point.

1. ความเป็นมา

การขนส่งเดินทางและการท่องเที่ยวนับเป็นอุตสาหกรรมหลักที่ทำรายได้ให้กับประเทศมาเป็นเวลานาน การเดินทางของคณะนักท่องเที่ยวส่วนใหญ่อาศัยรถโดยสารขนาดใหญ่ หรือรถบัส ซึ่งเป็นยานพาหนะที่ได้รับความนิยมสำหรับชนิดหนึ่งในการขนส่งและเดินทางของนักท่องเที่ยวทั้งในประเทศ และต่างประเทศ จากข้อมูลของกรมขนส่งทางบกแสดงให้เห็น ว่าปัจจุบันประเทศไทยมีรถบัสไม่ประจำทางราวหมื่นหกพันคัน และมีความต้องการเพิ่มขึ้นทุกปี ตามสัดส่วนของจำนวนประชากร และขนาดของอุตสาหกรรมการท่องเที่ยว ดังนั้นการพัฒนาและตรวจสอบคุณภาพของรถบัสเพื่อเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้โดยสารและผู้ใช้ถนนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ด้วยเหตุดังกล่าวการออกแบบโครงคัสซีรถโดยสาร 2 ชั้น มาตรฐาน 4 เป็นรถ 2 ชั้นซึ่งมีโครงคัสซีเป็นคัสซีรถโดยสาร มีห้องโดยสารทั้งชั้นล่างและชั้นบนโดยพื้นห้องโดยสารทั้ง 2 ชั้น แยกจากกันโดยเด็ดขาด มีทางขึ้นลงชั้นล่างอยู่ด้านข้าง และมีทางขึ้นลงชั้นบนอยู่ภายในตัวรถอย่างน้อยหนึ่งทางให้มีความแข็งแรงและปลอดภัยจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง จึงเป็นที่มาของการศึกษาและออกแบบโครงคัสซีตามหลักการทางวิศวกรรมโดยศึกษาเงื่อนไขการออกแบบต่างๆ ซึ่งเป็นจำลองจากสถานการณ์จริงที่เกิดขึ้นกับโครงคัสซีและเพื่อให้ได้ความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นจึงได้ใช้คอมพิวเตอร์และโปรแกรมการคำนวณความแข็งแรงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ

2. วัตถุประสงค์

จากเดิมการประกอบและผลิตอาศัยทักษะความชำนาญของช่างเพียงอย่างเดียว งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและพัฒนาโครงคัสซีรถโดยสาร 2 ชั้น (มาตรฐาน 4) อาศัยหลักการการออกแบบทางวิศวกรรมโดยให้มีความแข็งแรงสามารถรับภาระแรงกระทำต่างๆ ได้

3. ทฤษฎี

โครงคัสซีของรถโดยสารขนาดใหญ่ประกอบด้วยส่วนของเครื่องยนต์, ระบบส่งกำลัง, ช่วงล่างของล้อหน้าและหลัง, ล้อ และโครงคัสซี โครงคัสซีจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่เพราะต้องรับน้ำหนัก

บรรทุกและอุปกรณ์ต่างๆ ของรถโดยสาร ส่วนประกอบหลักของโครงคัสซีคือ เหล็กหน้าตัดรูปตัวซี (C-channel) ซึ่งนำมาเป็นโครงสร้างตามแนวยาว (Frame rails) ของรถเพราะเหล็กที่มีหน้าตัดรูปตัวซีนี้ง่ายต่อการประกอบเข้าชิ้นส่วนอื่นๆ ของโครงสร้าง ส่วนเหล็กที่นำมาเป็นโครงสร้างตามแนวขวาง (Cross members) นิยมใช้เหล็กหน้าตัดรูปตัวไอ (I-channel) เพราะโครงสร้างสามารถรับภาระได้ดีกว่าการใช้เหล็กที่มีหน้าตัดแบบอื่นๆ [1] ลักษณะโครงคัสซีที่ประกอบขึ้นมีลักษณะรูปร่างเหมือนบันได (Ladder frame) โครงสร้างนี้ต้องประกอบจากเหล็กที่มีคุณสมบัติทางกายภาพเหมาะสม และสามารถรับภาระต่างๆ ได้ โครงคัสซีต้องมีความแข็งแรงพอที่จะต้านทานภาระแรงดัด, แรงบิด และการล้าตัวของโครงสร้าง รวมทั้งสามารถทนการสั่นสะเทือนได้

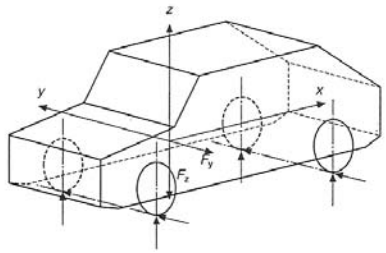
การออกแบบโครงคัสซีสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่พิจารณาจากตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ขนาดใหญ่ซึ่งโครงคัสซีต้องสามารถรับน้ำหนักบรรทุกดังนั้นความต้องการสำหรับการออกแบบถูกกำหนดโดยมาตรฐานอุตสาหกรรมและกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

การกำหนดภาระที่กระทำต่อโครงคัสซีและโครงสร้างตัวถังของรถโดยสารหรือรถเพื่อการขนส่งเชิงพาณิชย์เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการออกแบบโครงคัสซี เนื่องจากภาระที่กระทำต่อโครงคัสซีซึ่งเป็นผลจากอุปสรรคต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการขับเคลื่อนของตัวรถ ดังนั้นสามารถแบ่งสภาวะของภาระที่กระทำต่อโครงคัสซีเพื่อใช้ในการพิจารณาและการออกแบบโครงคัสซีได้ออกเป็น 5 สภาวะ [2] ดังนี้

3.1 สภาวะที่ใช้ในการพิจารณาและออกแบบโครงคัสซี

3.1.1 สภาวะโมเมนต์ดัด (Bending Case)

ลักษณะภาระที่กระทำแบบนี้จะเกิดจากภาระของแรงกระทำระนาบแนวตั้ง (x-z plane) เมื่อเทียบกับโครงคัสซี ซึ่งภาระของแรงกระทำมาจากน้ำหนักของส่วนประกอบต่างๆ ที่ติดตั้งไว้บนโครงคัสซี ซึ่งแรงกระทำนี้



รูปที่ 1 สภาวะโมเมนต์ดัด (Bending Case)

สภาวะโมเมนต์ดัด (Bending case) ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของอุปกรณ์หลักและน้ำหนักบรรทุกของรถโดยสาร การพิจารณาขั้นแรกคือสภาวะสถิต (Static condition)โดยการคำนวณหาแรงกระจายที่เกิดขึ้นตามโครงคัสซี น้ำหนักลงเพลาสามารถคำนวณได้จากแรงกระทำและหาค่าโมเมนต์จากตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์นั้นโครงสร้างถูกพิจารณาในลักษณะ 2 มิติ โดยสมมาตรตามแนวยาวของตัวรถโดยสาร

แรงกระจายถูกประมาณค่าจากน้ำหนักของตัวถังต่อความยาวของตัวรถซึ่งรวมรายละเอียดต่างๆ ของตัวรถโดยสารไว้ด้วย แต่ไม่คิดน้ำหนักของล้อ, ระบบเบรก และระบบช่วงล่าง ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ไม่เกิดภาระกระทำต่อโครงคัสซี

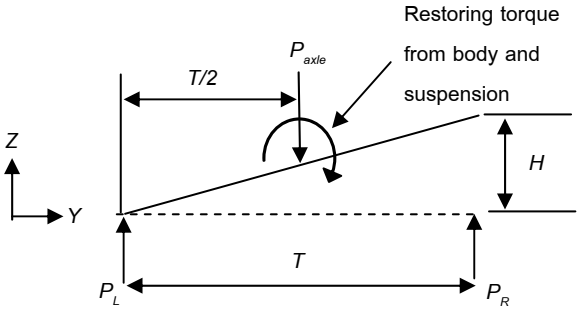
สำหรับสภาวะพลศาสตร์ (Dynamics Condition) ของกรณีนี้พิจารณาอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการใช้รถโดยสาร ตัวอย่างเช่น รถโดยสารแล่นผ่านหลุมที่เกิดบนถนน เป็นต้น ผลจากสภาวะลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงกระแทกต่อโครงคัสซีจึงต้องพิจารณาแรงกระทำที่มากกว่าสภาวะสถิต จากประสบการณ์ของผู้ผลิตยานยนต์ได้เพิ่มค่าสัมประสิทธิ์เพื่อใช้ในการคำนวณไว้ที่ 1.3 สำหรับการใช้ทั่วไป [4] นักออกแบบบางท่านได้ให้ค่าความปลอดภัยดังแสดงตามตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าความปลอดภัยสำหรับสภาวะโมเมนต์ดัด [5]

	โดยปกติ	Pawlowski (1969)
ค่าความปลอดภัย	1.5	1.4-2.0

3.1.2 สภาวะแรงบิด (Torsion Case)

การออกแบบเพื่อรับภาระแรงบิดค่อนข้างซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับทฤษฎีซึ่งต้องคอมพิวเตอร์ช่วยการคำนวณ โครงคัสซีรับภาระแรงบิดจากโมเมนต์บิดตามแนวยาวของรถโดยสาร โมเมนต์แรงบิดอาจเกิดขึ้นตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกาขึ้นอยู่กับอุปสรรคที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของรถโดยสาร เมื่อพิจารณาแต่แรงบิดเพียงอย่างเดียว แรงกระทำจะกระทำต่อล้อข้างใดข้างหนึ่งซึ่งทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาเกิดขึ้นกับเพลาอื่น ค่าสูงสุดที่เกิดโมเมนต์บิดสามารถคำนวณได้จากแรงกระทำที่ล้อและคูณระยะห่างของฐานล้อ (Track)
โมเมนต์แรงบิด [5]



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพแรงอิสระ(Free-Body Diagram) ขณะล้อหน้าด้านขวาถูกยกขึ้น

$$T_{\max} = P_{axle}\, T/2 \qquad (1)$$

โดยที่ T_{max} คือแรงบิด P_{axle} คือน้ำหนักลงเพลา T คือระยะห่างฐานล้อ H คือระยะยกของล้อ P_L คือน้ำหนักลงล้อซ้าย และ P_R คือน้ำหนักลงล้อขวา

นักออกแบบท่านอื่นได้แนะนำค่าระยะยกของล้อ (*H*) ตามตารางข้างล่างนี้[4]

ตารางที่ 2 แสดงระยะยกของล้อ

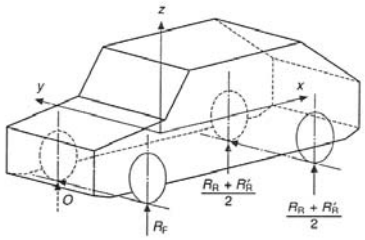
	Pawlowski (1969)	Erz (1957)
H	0.2 m	0.2 m
Inertia factor	1.3	-

สำหรับสภาวะพลศาสตร์ กรณีนี้ได้กำหนดค่าสัมประสิทธิ์

สำหรับสภาวะพลศาสตร์เพื่อใช้คำนวณเท่ากับ 1.5 สำหรับรถบรรทุกขนาดใหญ่ [2]

3.1.3 ภาระรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด (Combined Case)

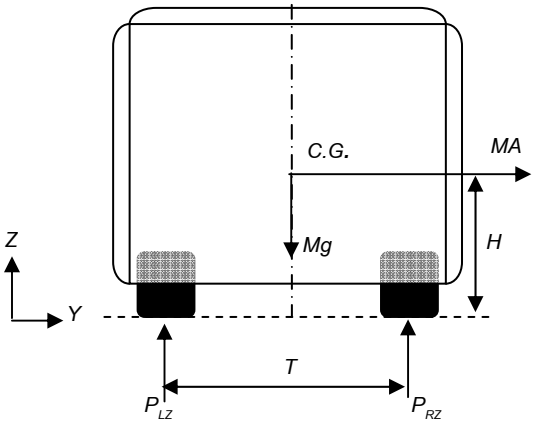
สำหรับสภาวะจริงภาวะแรงบิดไม่สามารถเกิดขึ้นเพียงอย่างเดียวได้ ต้องมีภาวะแรงดัดเกิดขึ้นร่วมด้วยเสมอซึ่งเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงของโลกนั่นเอง ดังนั้นภาวะทั้งสองกรณีต้องรวมเข้าด้วยกันเพื่อให้เสมือนกับสภาวะจริงที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน



รูปที่ 3 สภาวะรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด

3.1.4 ภาวะแรงกระทำจากด้านข้าง (Lateral Loading)

ขณะที่รถกำลังแล่นในทางโค้ง แรงกระทำจากด้านข้างจะเกิดขึ้นและกระทำที่ตำแหน่งของล้อสัมผัสกับพื้นถนน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เมื่อพิจารณาขณะรถแล่นอยู่ในทางโค้งด้วยความเร็วคงที่ (Steady-state cornering) สามารถนำกฎข้อที่ 2 ของนิวตันมาประยุกต์ใช้เพื่ออธิบายแรงกระทำต่างๆ ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4 แสดงแรงกระทำทั้งหมดขณะรถเลี้ยวโค้งซ้ายด้วยความเร็วคงที่

จากรูปที่ 4 แสดงแผนภาพแรงอิสระ (Free-Body Diagram) ด้านหลังของรถมีลักษณะ 2 มิติ ขณะรถเลี้ยวโค้งทางซ้ายภายใต้สภาวะความเร็วและรัศมีความโค้งคงที่ (Steady-state left-hand cornering) ซึ่งแรงกระทำจากผลของมวลคูณกับความเร่งหนีศูนย์กลางทางด้านข้างจะมีค่าเท่ากับแรงเสียดทานกระทำที่ล้อทั้ง 2 ข้าง และน้ำหนักของรถเท่ากับแรงปฏิกิริยาของล้อทั้งซ้ายและขวากระทำกับพื้น

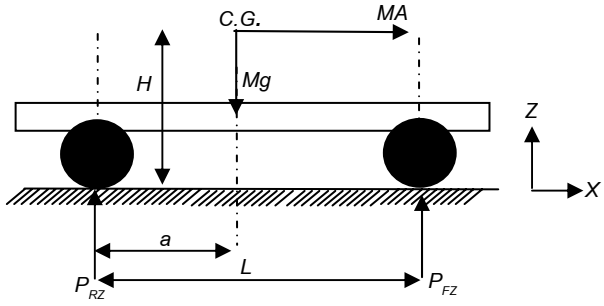
เพราะฉะนั้นแรงกระทำทั้งหมดที่ถ่ายโอน คือ ครึ่งหนึ่งของผลต่างของแรงกระทำแนวตั้งกระทำกับยาง

$$\frac{P_L - P_R}{2} = \frac{MAH}{T} \qquad (2)$$

โดยที่ P_L คือน้ำหนักลงล้อด้านซ้าย P_R คือน้ำหนักลงล้อด้านขวา M คือมวลรถ A คือความเร่ง H คือระยะสูงของจุดศูนย์กลางมวล และ T คือระยะห่างฐานล้อ

3.1.5 ภาวะแรงกระทำตามแนวยาวรถ (Longitudinal Loading)

เมื่อรถแล่นด้วยความเร่งหรือลดความเร็วด้วยความหน่วง ผลคูณของมวลกับความเร่งหรือแรงเฉื่อยจะเกิดขึ้นและกระทำผ่านจุดศูนย์ถ่วงของรถเกิดเป็นภาระกระทำต่อโครงคัสซี ขณะที่รถกำลังเพิ่มความเร็วด้วย อัตราเร่งนั้นมีการถ่ายเทบรรทุกน้ำหนักจากเพลาล้อหน้าส่งผ่านไปยังเพลาล้อหลัง และรถ กำลังลดความเร็วด้วยอัตราความหน่วงนั้นก็จะเกิดการถ่ายเทบรรทุกน้ำหนักจากเพลาล้อ หลังส่งผ่านไปยังเพลาล้อหน้า จาก SAE Handbook ได้ระบุความต้องการและวิธีการทดสอบสำหรับอุปกรณ์และระบบเบรก วิธีการทดสอบได้กำหนดข้อมูลจำเพาะไว้หลายอย่าง การวัดค่าอัตราความหน่วง, ระยะทางใช้ในการหยุดรถ, แรงบิดเฉลี่ยและค่าสูงสุด, ค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดของทุกการทดลอง เมื่อไม่พิจารณารายละเอียดต่างๆ การทดสอบการเบรกสำหรับกรณีฉุกเฉินได้กำหนดค่าอัตราหน่วงเท่ากับ 0.65g หรือ 6.3765 m/s^2 และ สำหรับกรณีเบรกภาวะปกติกำหนดค่าอัตราหน่วงเท่ากับ 0.31g หรือ 3.0411 m/s^2 สมการสำหรับสมรรถนะของการเบรกสามารถหาได้จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's Second Law) และภายใต้สมมติฐานคือ อัตราหน่วงคงที่ ดังนั้นสามารถหาแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ ดังสมการข้างล่างนี้



รูปที่ 5 แสดงแรงปฏิกิริยาของล้อกระทำต่อพื้นถนน

สำหรับแรงปฏิกิริยาของทุกเพลา [2] คือ

$$P_{FZ} = \frac{Mg + MAH}{L} \qquad (3)$$

$$P_{RZ} = \frac{(Mg - a) + MAH}{L} \qquad (4)$$

จากเงื่อนไขของสภาวะแรงกระทำทั้งหมดข้างต้นทำให้เกิดความเค้นตลอดทั้งโครงสร้างคัสซี ภายใต้เงื่อนไขของสภาวะที่เกิดความเสียหายมากที่สุด ความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างต้องไม่เกิดขีดจำกัดที่ยอมรับได้

3.2 ความเค้นสำหรับการออกแบบ

การออกแบบโครงคัสซียอมให้ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นไม่เกิน 67 เปอร์เซ็นต์ของความเค้นที่จุดคราก [2] ดังนั้นจึงสนใจพฤติกรรมของวัสดุในช่วงยืดหยุ่น และความเค้นนั้นไม่เกินความเค้นคราก (Yield stress) สภาวะของความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงคัสซีจะมีลักษณะที่ค่อนข้างซับซ้อนและมีทิศทางต่างกัน ความเค้นในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอาจจะมีค่าสูงกว่าความเค้นจุดคราก อย่างไรก็ตามความเค้นรวมจะต้องไม่สูงกว่าความเค้นครากของวัสดุนั้นมากนัก แต่ถ้าความเค้นในโครงคัสซีสูงกว่าความเค้นครากมาก ก็อาจเป็นสาเหตุให้เกิดการแตกร้าวในเนื้อวัสดุของโครงสร้างได้

$$\sigma_{static} \times D.F. \leq 2/3 \times \sigma_y \qquad (5)$$

โดยที่ σ_{static} คือความเค้นสภาวะสถิต $D.F.$ คือสัมประสิทธิ์สภาวะพลศาสตร์ และ σ_y คือความเค้นจุดคราก

4. เงื่อนไขและผลการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์

กำหนดแกน 1 คือแกนตามขวางรถ แกน 2 คือแกนตามความสูงรถ และแกน 3 คือแกนตามยาวรถ แบบจำลองถูกสร้างขึ้นและถูกกำหนดชนิดของวัสดุสำหรับการคำนวณความแข็งแรง (AISI 1020, Structural Steel) ดังแสดงตามตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 3 แสดงคุณสมบัติวัสดุสำหรับการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์ [3]

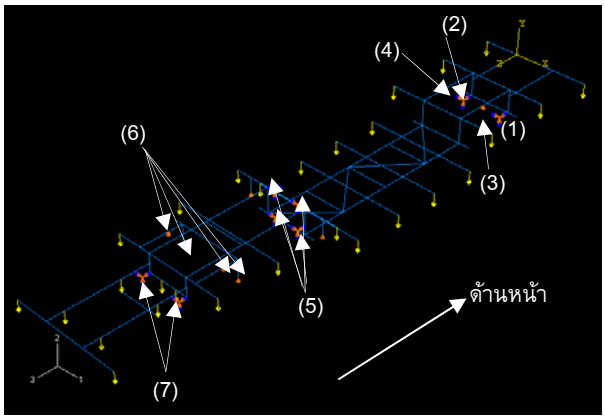
Modulus of Elasticity	200 GPa
Poisson's Ratio	0.25
Weight Density	7860 kg/m^3
Yield Stress	350 MPa
Tensile Stress	420 MPa
Stress Design	210 MPa

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลรถโดยสาร 2 ชั้น

รายละเอียด	
น้ำหนักรถรวมอุปกรณ์ทั้งหมด	18,300 กก.
น้ำหนักโครงคัสซี (สามารถวิ่งได้)	7,896 กก.
น้ำหนักลงเพลาล้อหน้า	4,360 กก.
น้ำหนักลงเพลาล้อคู่หลัง	13,410 กก.
น้ำหนักเครื่องยนต์	1,100 กก.
ระยะห่างเพลาล้อหน้าถึงกึ่งกลางเพลาล้อคู่หลัง	6,400 มม.
ระยะห่างระหว่างเพลาคู่ล้อหลัง	1,300 มม.
ระยะห่างฐานล้อ	2,350 มม.
ความสูงจุดศูนย์กลางมวล	2,160 มม.

4.1 เงื่อนไขการคำนวณ

4.1.1 เงื่อนไขสภาวะโมเมนต์ดัด (Bending Case) เอลิเมนต์แบบคาน (Beam Element)



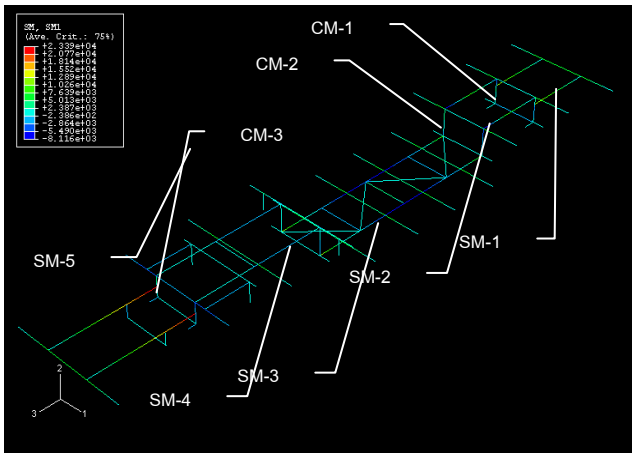
รูปที่ 6 แสดงเงื่อนไขการคำนวณกรณีสภาวะโมเมนต์ดัด

ตำแหน่ง (1), (2), (5) และ (7) กำหนด U_1, U_2, U_3, R_1, R_2 และ R_3 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้นและเชิงมุมทุกแกน

ตำแหน่ง (3), (4) และ (6) กำหนด U_2 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น

ลูกศรสีเหลืองแทนน้ำหนักบรรทุกทั้งหมดเท่ากับ 11504 กก.

โดยที่ U_x คือการเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวแกน X และ R_x คือการเคลื่อนที่เชิงมุมรอบแกน X



รูปที่ 7 แสดงสนามโมเมนต์ดัด (เอลิเมนต์แบบคาน)

จากรูปที่ 7 ทำให้ทราบค่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นและนำมาคำนวณเพื่อหาค่าโมดูลัสหน้าตัด (Section Modulus) ตามสมการข้างล่างนี้

$$\sigma_{design} = M/Z \qquad (6)$$

โดยที่ σ_{design} คือความเค้นสำหรับการออกแบบ M คือโมเมนต์ดัด (Bending Moment) และ Z คือโมดูลัสหน้าตัด (Section Modulus)

จากผลการคำนวณสนามโมเมนต์ดัดตามรูปที่ 6 และนำค่าดังกล่าวมาคำนวณเพื่อค่าโมดูลัสหน้าตัดซึ่งแสดงผลการคำนวณตามตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 5 แสดงผลการคำนวณโมดูลัสหน้าตัด

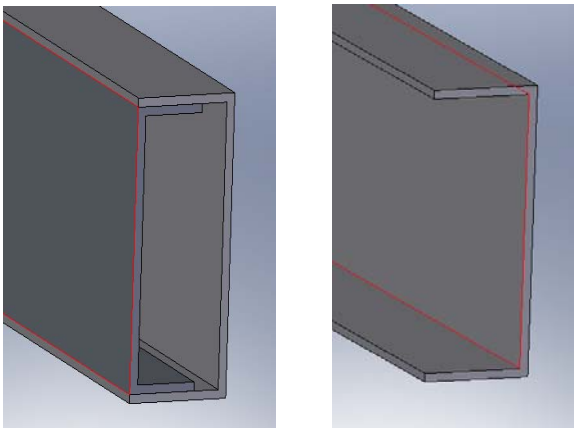
ชิ้นส่วน	โมเมนต์ดัด (Nm)	โมดูลัสหน้าตัด, Z_{cal} (cm^3)	โมดูลัสหน้าตัด, Z_{design}(cm^3)
CM-1	10761	51.1	108
CM-2	12132	57.7	108
CM-3	11379	54.2	108
SM-1	15569	74.1	120
SM-2	10145	48.3	120
SM-3	14405	68.6	120
SM-4	7562	36.1	120
SM-5	34410	163.8	267

โดยที่ Z_{cal} คือโมดูลัสหน้าตัดซึ่งได้จากการคำนวณ และ Z_{design} คือโมดูลัสหน้าตัดสำหรับการออกแบบโครงคัสซี

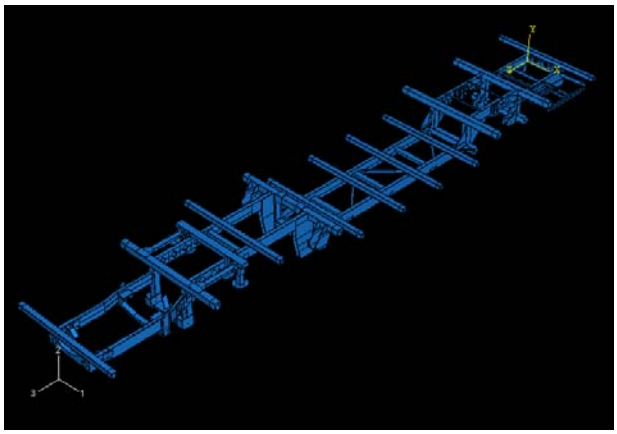
ตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดขนาดและรูปร่างส่วนประกอบโครงคัสซี

ชิ้นส่วน	ขนาด (mm)	รูปร่าง
CM-1	100x100x6	Square Box
CM-2	100x100x6	Square Box
CM-3	100x100x6	Square Box
SM-1	75x200x6	C-Channel
SM-2	75x200x6	C-Channel
SM-3	75x200x6	C-Channel
SM-4	75x200x6	C-Channel
SM-5	75x200x6-DC	C-Channel (Double)

จากตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดส่วนประกอบโครงคัสซีและนำข้อมูลดังกล่าวสร้างแบบจำลองโครงคัสซีสามมิติซึ่งใช้ในการคำนวณความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้เอลิเมนต์แบบโซลิด (Solids Element) เพื่อวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นในสภาวะต่าง ๆ

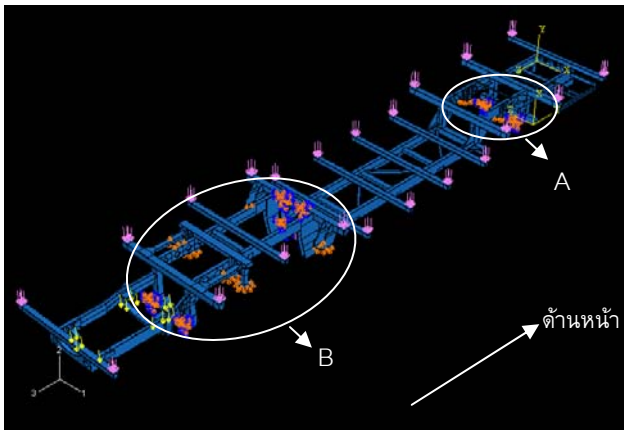


รูปที่ 8 แสดงลักษณะเหล็กรูปตัวซีซ้อนกัน (Double C-Channel) และเหล็กรูปตัวซี

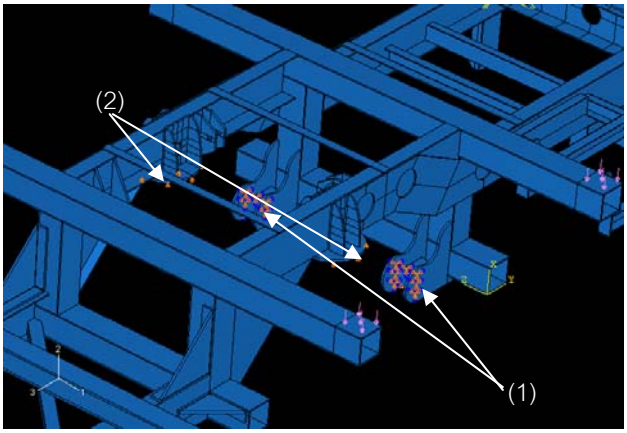


รูปที่ 9 แสดงลักษณะโครงคัสซีสามมิติสำหรับการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์

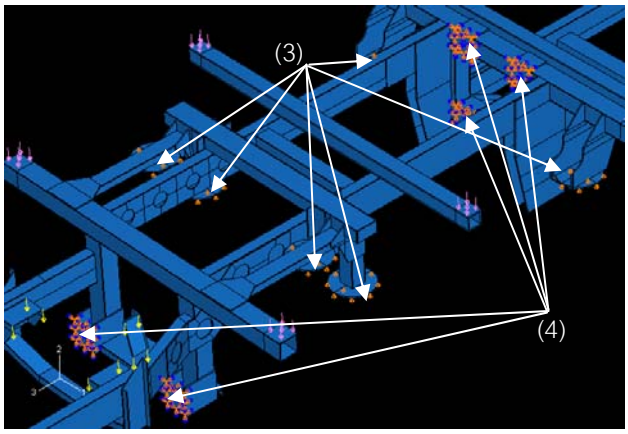
4.1.2 เงื่อนไขสภาวะโมเมนต์ดัด (Bending Case) แบบโซลิดเอลิเมนต์ (Solids Element)



รูปที่ 10 แสดงเงื่อนไขการคำนวณสภาวะโมเมนต์ดัด



รูปที่ 11 แสดงรูปขยาย A เงื่อนไขการคำนวณบริเวณล้อหน้า



รูปที่ 12 แสดงรูปขยาย B เงื่อนไขการคำนวณบริเวณล้อหลัง

เงื่อนไขการคำนวณสภาวะนี้คือ รถวิ่งทางตรงด้วยความเร็วคงที่พร้อมบรรทุกอุปกรณ์มาตรฐานทั้งหมด จากรูป 10-12 แสดงเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณกรณีสภาวะโมเมนต์ดัด กำหนดสัมประสิทธิ์สำหรับสภาวะพลศาสตร์ $(D.F.)$เท่ากับ 1.3 [6] ลูกศรสีชมพูแทนน้ำหนักบรรทุก, ลูกศรสีเหลืองแทนน้ำหนักเครื่องยนต์ ตำแหน่ง (1) และ (4) กำหนดให้ U_1, U_2, U_3, R_1, R_2 และ R_3 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้นและเชิงมุมทุกแกน และตำแหน่ง (2) และ(3) กำหนดให้ U_2 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น [7]

4.1.3 เงื่อนไขสภาวะรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด (Combined Case) แบบโซลิดเอลิเมนต์ (Solids element)

เงื่อนไขการคำนวณสภาวะนี้คือ ล้อข้างหน้าด้านขวาถูกยกลอยขึ้นเหนือพื้นจนกระทั่งล้ออีกข้างหนึ่งกำลังยกลอยขึ้นจากพื้นตาม ทำให้แรงปฏิกิริยาของล้อด้านซ้ายที่กระทำกับพื้นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์กำหนดสัมประสิทธิ์สำหรับสภาวะพลศาสตร์ $(D.F.)$ เท่ากับ 1.5 จากรูป 10-12 ตำแหน่ง (1) และ (4) กำหนดให้ U_1, U_2, U_3 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น R_1 และ R_2 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงมุม ส่วน R_3 อิสระ[8] และตำแหน่ง (2) และ(3) มีแรงทำให้เกิดโมเมนต์กระทำ

4.1.4 เงื่อนไขสภาวะแรงกระทำจากด้านข้าง (Lateral Loading) แบบโซลิดเอลิเมนต์ (Solids Element)

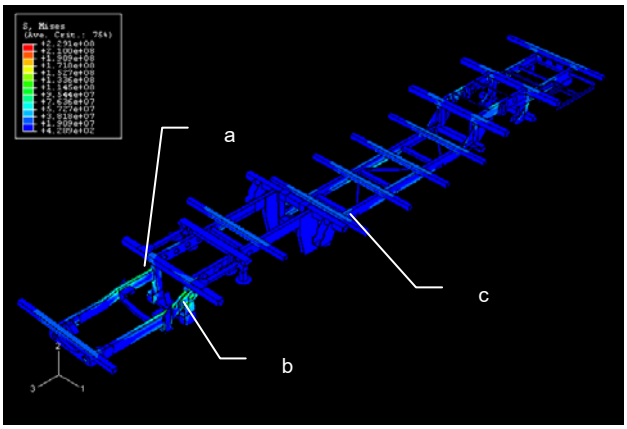
กำหนดสัมประสิทธิ์สำหรับสภาวะพลศาสตร์ $(D.F.)$ เท่ากับ 1.4 จากรูป 10-12 ตำแหน่ง (1) และ (4) กำหนดให้ U_1, U_2, U_3 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น R_1 , R_2 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงมุม และ R_3 อิสระ และตำแหน่ง (2) และ(3) [2] กำหนดให้ U_2 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น

4.1.5 เงื่อนไขสภาวะแรงกระทำตามแนวยาว (Longitudinal Loading) แบบโซลิดเอลิเมนต์ (Solids Element)

กำหนดสัมประสิทธิ์สำหรับสภาวะพลศาสตร์ $(D.F.)$ เท่ากับ 1.75 จากรูป 10-12 ตำแหน่ง (1) และ (4) กำหนดให้ U_1, U_2, U_3 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น R_2 และ R_3ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงมุม ส่วน R_1 อิสระ และตำแหน่ง (2) และ(3) กำหนดให้ U_2 ไม่มีการเคลื่อนที่เชิงเส้น

4.2 ผลการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์แบบโซลิดเอลิเมนต์

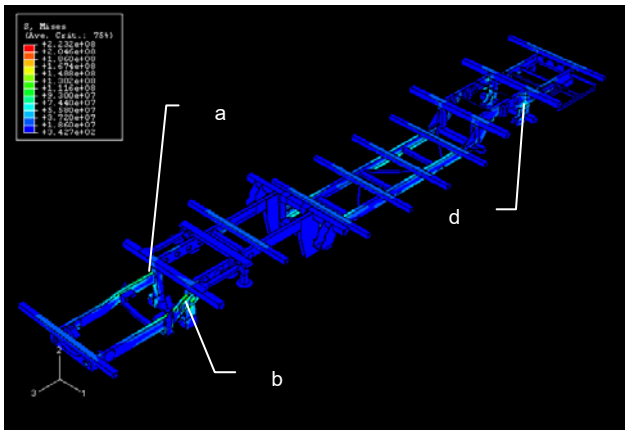
4.2.1 สภาวะโมเมนต์ดัด (Bending Case)



รูปที่ 13 แสดงสนามความเค้นสภาวะโมเมนต์ดัด (เอลิเมนต์แบบโซลิด)

จากรูปที่ 13 แสดงสนามเค้นสภาวะโมเมนต์ดัด เมื่อพิจารณาตำแหน่ง a พบว่ามีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 229 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 256 MPa ส่วนตำแหน่ง b มีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 189 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 201 MPa และตำแหน่ง c มีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 102 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 116 MPa

4.2.2 สภาวะรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด (Combined Case)

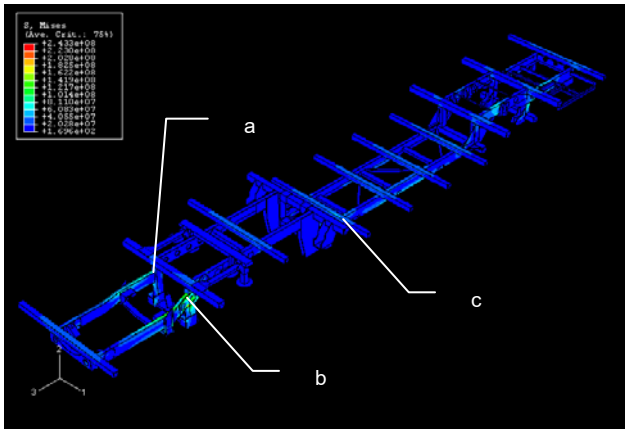


รูปที่ 14 แสดงสนามความเค้นสภาวะรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด (เอลิเมนต์แบบโซลิด)

จากรูปที่ 14 แสดงสนามความเค้นสภาวะรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด เมื่อพิจารณาตำแหน่ง a พบว่าความเค้นแบบวอน มิส (Von

Mises Stress) เท่ากับ 232 MPa และความเค้นแกน 3 เท่ากับ 249 MPa ส่วนตำแหน่ง b มีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 191 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 198 MPa และตำแหน่ง d มีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 125 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 201 MPa

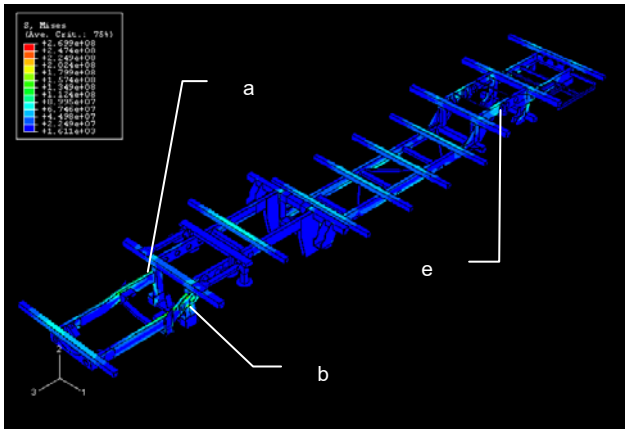
4.2.3 สภาวะแรงกระทำจากด้านข้าง (Lateral Loading)



รูปที่ 15 แสดงสนามความเค้นสภาวะแรงกระทำจากด้านข้าง (เอลิเมนต์แบบโซลิด)

จากรูปที่ 15 แสดงสนามเค้นสภาวะแรงกระทำจากด้านข้าง เมื่อพิจารณาตำแหน่ง a พบว่ามีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 188 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 210 MPa ส่วนตำแหน่ง b มีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 243 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 221 MPa และตำแหน่ง c มีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 120 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 122 MPa

4.2.4 สภาวะแรงกระทำตามแนวยาวรถ (Longitudinal Loading)



รูปที่ 16 แสดงสนามความเค้นสภาวะแรงกระทำตามแนวยาว (เอลิเมนต์แบบโซลิด)

จากรูปที่ 16 แสดงสนามเค้นสภาวะแรงกระทำตามแนวยาว เมื่อพิจารณาตำแหน่ง a พบว่ามีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 235 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 179 MPa ส่วนตำแหน่ง b มีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 155 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 157 MPa และตำแหน่ง e มีความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises Stress) เท่ากับ 126 MPa และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress, S33) เท่ากับ 105 MPa

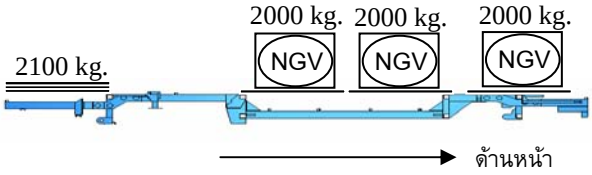
ตารางที่ 7 แสดงค่าความเค้นสูงสุดสำหรับกรณีการคำนวณต่างๆ

รายละเอียด	Von Mises (MPa)	Max. Principal Stress, S33 (MPa)
สภาวะโมเมนต์ดัด (Bending Case)	229	256
สภาวะรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด (Combined Case)	232	198
สภาวะแรงกระทำจากด้านข้าง (Lateral Loading)	243	253
สภาวะแรงกระทำตามแนวยาว (Longitudinal Loading)	235	179

จากผลการคำนวณซึ่งแสดงดังตารางที่ 7 พบว่าทุกกรณีความเค้นสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่ง a ซึ่งบริเวณดังกล่าวเป็นตำแหน่งติดตั้งเครื่องยนต์

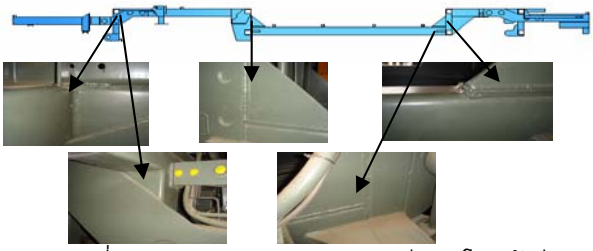
5. ผลการทดสอบ

การทดสอบนี้ได้จำลองสภาวะรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด โดยการติดตั้งน้ำหนักบรรทุกซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำบรรทุกจริงและทำการยกล้อหน้าด้านขวาลอยขึ้นเหนือจากพื้นเป็นระยะ 20 เซนติเมตร วิธีการทดสอบดังแสดงตามรูปข้างล่างนี้



รูปที่ 17 แสดงแบบจำลองการติดตั้งน้ำหนักบรรทุกสำหรับการทดสอบสภาวะรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด

รูปที่ 18 แสดงการยกล้อหน้าด้านขวาลอยขึ้นเหนือจากพื้น 20 ซม. (สภาวะรวมโมเมนต์ดัดและแรงบิด)



รูปที่ 19 แสดงผลการตรวจสอบความเสียของโครงคัสซี

การทดสอบโครงคัสซีโดยติดตั้งน้ำหนักบรรทุกรวมทั้งหมด 8,100 กิโลกรัม เฉพาะส่วนท้ายของรถบริเวณติดตั้งเครื่องยนต์ติดตั้งน้ำหนักสำหรับการทดสอบ 2,100 กิโลกรัม ซึ่งมากกว่าเงื่อนไขขอบเขตการคำนวณประมาณ 500 กิโลกรัม แสดงตามรูปที่ 17 สำหรับรูปที่ 18 แสดงการทดสอบโครงคัสซีโดยยกล้อหน้าด้านขวาลอยขึ้นเหนือจากพื้นเป็นระยะ 20 เซนติเมตร และรูปที่ 18 แสดงผลการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงคัสซี จากการตรวจดูลักษณะภายนอกพบว่าตลอดทั้งโครงคัสซีไม่มีชิ้นส่วนใดเกิดการแตกหักเสียหาย

6. สรุปผลการคำนวณและออกแบบ

งานวิจัยฉบับนี้ใช้การคำนวณความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองสนามเค้นที่เกิดขึ้นจากสภาวะต่างๆ ผลการคำนวณดังกล่าวทำให้สามารถเลือกขนาดและชนิดของเหล็กโครงสร้างที่นำประกอบและผลิตเป็นโครงคัสซีซึ่งผ่านการออกแบบตามหลักการทางวิศวกรรม จากผลการคำนวณทุกกรณีพบว่าความเค้นแบบวอนมิส (Von Mises) และความเค้นแกน 3 (Max. Principal Stress) สูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง a เป็นตำแหน่งติดตั้งเครื่องยนต์ (ด้านท้ายของตัวรถ) อย่างไรก็ตามความเค้นทั้งสองแบบยังคงมีค่าอยู่ในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุ ถ้าเปรียบเทียบค่าความเค้นสูงสุดทั้งสองแบบจากทุกกรณีพบว่ามีค่าความเค้นเกิน 2 ใน 3 ของความเค้นจุดคราก (ความเค้นออกแบบ) แต่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบโครงคัสซีพบว่าโครงคัสซีไม่เกิดความเสียหายและการแตกหักเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนของโครงคัสซี ดังนั้นโครงคัสซีมีความแข็งแรงเพียงพอสามารถรับภาระที่ออกแบบไว้ได้โดยไม่เกิดความเสียหายและโครงคัสซีมีน้ำหนักเท่ากับ 1567 กก. อย่างไรก็ตามโครงสร้างทุกโครงสร้างรวมถึงโครงคัสซีนี้ต้องมีอายุการใช้งานอยู่ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ดังนั้นการดูแลและบำรุงรักษาตามระยะเวลาที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้โครงคัสซีมีสภาพพร้อมใช้งานตลอดเวลาและลดการเกิดความเสียหายอย่างกะทันหัน เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดอุบัติเหตุซึ่งมีสาเหตุมาจากรถนำสภาพไม่สมบูรณ์ไปใช้งาน

7. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้ทำการออกแบบและคำนวณความแข็งแรงเฉพาะโครงคัสซีเพียงอย่างเดียว ซึ่งรถโดยสาย 2 ชั้นมีส่วนประกอบของตัวถังรวมอยู่ด้วย ดังนั้นการวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงคัสซีรวมกับโครงสร้างของตัวถังจะทำให้ผลการคำนวณมีความถูกต้องมากขึ้น ส่วนของการทดสอบซึ่งงานวิจัยฉบับนี้ขาดการทดสอบความล้าตัววัสดุที่ใช้ประกอบเป็นโครงคัสซี ข้อมูลจากการทดสอบความล้านี้เองสามารถนำไปใช้ในการคำนวณอายุการใช้งานได้ ทำให้โครงคัสซีดังกล่าวนี้มีความน่าเชื่อถือด้านความแข็งแรงและเพิ่มความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.สายประสิทธิ์ เกิดนิยมที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำเป็นอย่างดี ขอขอบคุณเจ้าหน้าธุรการภาควิชาวิศวกรรมเครื่องและการบิน-อวกาศที่ให้แนะนำเรื่องเอกสารต่างๆ เป็นอย่างดี และขอบคุณพี่ๆน้องๆ และเพื่อนภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศที่เสนอและแลกเปลี่ยนความคิดเห็นเรื่อยมา

เอกสารอ้างอิง

1. Don Knowles, Jack Erjavec, 1995. Classroom Manual for Medium/Heavy Duty Truck Steering and Suspension , Albany, Delmar.
2. Julian Happian-Smith, 2004. An Introduction to Modern Vehicle Design, SAE International, Warren dale.
3. Matweb-Online Material Data Sheet. Steel, General Properties. Available from http://www.matweb.com
4. Jason C. Brown, A. John Robertson and Stan T. Serpento, 2002. Motor Vehicle Structures Concepts and Fundamentals. SAE International, Warren dale.
5. Thomas D. Gillespie, 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Warren dale.
6. Jin Yi-Min, 2000. Analysis and Evaluation of Minivan Body Structure Finite Element Methods, Technology Research Institute Beiqi Futian Vehicle Co., Ltd.
7. Cicek Karaoglu, N. Sefa Kuralay, 2001. “Stress Analysis of A Truck Chassis with Riveted Joints” Finite Elements in Analysis and Design 38 (2002) 1115–1130.
8. Weerawut Charubhun, Supasit Rodkwan. Design of the Space Frame Racing Car Front Clip and Rear Clip for Torsional Rigidity, ในการสัมมนาวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 18, ขอนแก่น, 18-20 ตุลาคม 2547.