การวิเคราะห์ความแข็งแรงของคานชานบรรทุกรถกึ่งพ่วงแบบถังด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Strength Analysis of Beams of a Tank Semi-trailer Using the Finite Element Method

ไพศาล คุ้มวงศ์ (Paisarn Khumwong)* ดร.สิริวรรณ บริพัตรโกศล (Dr.Siriwan Boripatkosol)[1]**

(Received: *October 7, 2021*; Revised: *January 24, 2022*; Accepted: *January 24, 2022*)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคานชานบรรทุกที่ใช้สำหรับรถกึ่งพ่วงแบบถัง ลักษณะโครงสร้างแชสซีสั้น รูปแบบการติดตั้งขาตั้งถังไม่ตรงกับเต้าแหนบ โดยมีรูปแบบคานชานบรรทุกที่ใช้เหล็กรูปพรรณ H-BEAM ขนาด 300x150x6.5 mm และคานชานบรรทุกที่ใช้เหล็กแผ่นเชื่อมประกอบขนาด 300x150 mm นำมาศึกษาและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หาค่าความปลอดภัยขณะรับภาระน้ำหนักบรรทุก ผลการศึกษาพบว่า คานชานบรรทุก H-BEAM มีความแข็งแรงสูง มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 3 แต่เนื่องจากมีน้ำหนักที่สูงถึง 181 kg จึงไม่เหมาะกับการพัฒนาโครงสร้างแชสซีที่มีน้ำหนักเบา ต่างจากคานชานบรรทุกที่ใช้เหล็กแผ่นเชื่อมประกอบ จากการจำลองความหนาทั้งหมด 18 รูปแบบ คานรูปแบบที่มีน้ำหนักมากสุดคือ 134 kg มีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 3.2 ซึ่งใกล้เคียงกับคานชานบรรทุก H-BEAM และมี 2 รูปแบบ ที่ไม่ควรนำมาใช้งาน เนื่องจากมีชิ้นส่วนคานที่บางเกินไป ทำให้ค่าความปลอดภัยน้อยกว่า 2

ABSTRACT

This paper presents a study on loading platform beam utilized for tank semi-trailers, short truck chassis structure, and the setup design of tank stand holder would not mount with bracket. There is the platform beam form that is made of H-BEAM steel, estimated at 300 x 150 x 6.5 mm. And loading platform beams utilizing welded steel plates, size 300 x 150 mm. They were examined and analyzed by finite element method in order to determine the factor of safety whereas carrying the stack. The results showed that H-BEAM loading platform beams have high strength and safety value of 3. However, due to its high weight of 181 kg, hence it is not appropriate for the development of a lightweight chassis structure. On the other hand, the truck loading platform beams utilizing welded steel plates from 18 distinctive thickness simulations, it is illustrated that Beam 18 incorporates a maximum weight of 134 kg with a safety value of 3.2, which is comparable to the H-BEAM loading platform beam, and there are 2 types that should not be utilized because the beam parts are too thin. As a result, the factor of safety is less than 2.

คำสำคัญ: คานชานบรรทุก รถกึ่งพ่วงแบบถัง ไฟไนต์เอลิเมนต์

Keywords: Beam, Tank semi-trailer, FEM

[1]*Corresponding author: siriwan.b@cit.kmutnb.ac.th*

**นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการเผาไหม้และพลังงานทางเลือก(CTAE) ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*

บทนำ

ในปัจจุบันรถกึ่งพ่วงแบบถังสำหรับบรรทุกสารเคมี มีความจำเป็นอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม [1] เนื่องจากสารเคมีถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบ ตัวทำละลาย ตัวทำปฏิกิริยา หรือตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นต้น ดังนั้นความต้องการในการใช้สารเคมีเป็นวัตถุดิบต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ธุรกิจรถขนส่งสารเคมีจำเป็นต้องเพิ่มปริมาณรถกึ่งพ่วงแบบถังและเพิ่มรอบการขนส่ง เพื่อให้ขนส่งสารเคมีทันตามความต้องการของโรงงานอุตสาหกรรม มีผลทำให้อัตราการเกิดอุบัติเหตุจากการขนส่งสารเคมีเพิ่มขึ้น โดยคิดเป็นร้อยละ 27 ซึ่งเป็นอุบัติภัยเกี่ยวกับสารเคมีบนถนน [2] ก่อให้เกิดผลกระทบต่อความปลอดภัยของประชาชนบนเส้นทางจราจรและสิ่งแวดล้อมบริเวณใกล้เคียงหากเกิดการรั่วไหลของสารเคมีภายหลังการเกิดอุบัติเหตุ

ในประเทศไทยมีการเลือกใช้ยานพาหนะเพื่อการขนส่งสารเคมีหลากหลายชนิดตั้งแต่ รถกระบะบรรทุก 4 ล้อ รถบรรทุก 6-10 ล้อ รถกึ่งพ่วงมากกว่า 10 ล้อขึ้นไป โดยรถบรรทุกขนส่งสารเคมีที่ผู้ประกอบการนิยมเลือกใช้มากที่สุดคือ รถกึ่งพ่วงแบบถัง (tank semi-trailer) เนื่องจากสามารถขนส่งสารเคมีได้ปริมาณมากต่อการขนส่ง 1 รอบ ด้วยความต้องการการขนส่งที่เพิ่มมากขึ้น งานวิจัยด้านรถกึ่งพ่วงแบบถังจึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต [3-4] และการจัดการเวลาในการขนส่งให้ลดลง [5] ในต่างประเทศยังนิยมพัฒนาโครงสร้างถังให้มีน้ำหนักเบา [6] รวมถึงการออกแบบโครงสร้างและทดสอบถังด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานในลักษณะต่าง ๆ [7]

อุตสาหกรรมปัจจุบันนิยมเลือกใช้รถกึ่งพ่วงแบบถังที่ผลิตจากโรงงานผู้ผลิตภายในประเทศ เนื่องจากการนำเข้ารถกึ่งพ่วงจากต่างประเทศมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก และมีการผูกขาดปริมาณสินค้าที่นำเข้า ส่งผลให้ผู้ประกอบการขนส่งเลือกซื้อจากผู้ผลิตภายในประเทศมากกว่า รถกึ่งพ่วงแบบถังประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญคือ ส่วนที่ 1 ถังสำหรับบรรทุกและจัดเก็บสารเคมี โดยกระบวนการออกแบบผลิต และขั้นตอนการตรวจสอบต้องได้รับการรับรองจากวิศวกรเท่านั้น จึงสามารถขึ้นทะเบียนกับกรมขนส่งทางบกเพื่อนำรถกึ่งพ่วงแบบถังมาใช้งานบนถนนได้ และส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนคือ ส่วนที่ 2 แชสซี (chassis) สำหรับรองรับน้ำหนักโครงสร้างถังและน้ำหนักสารเคมีทั้งหมดที่บรรจุอยู่ภายในถัง แนวทางการพัฒนารถกึ่งพ่วงแบบถังที่ผลิตภายในประเทศ มีจุดมุ่งเน้นให้สามารถบรรทุกสารเคมีได้ปริมาณมาก และต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักรวมของรถหัวลากและรถกึ่งพ่วงที่บรรทุกสารเคมีต้องไม่เกิน 50.5 ton ตามกฎหมายขนส่งประเทศไทย [8] โดยแบ่งเป็นน้ำหนักรถหัวลาก 8 ton น้ำหนักลงสลักพ่วงสำหรับรถกึ่งพ่วงแบบถัง 17 ton และน้ำหนักลงชุดเพลาท้ายสำหรับรถกึ่งพ่วงแบบถัง 25.5 ton จึงส่งผลให้โครงสร้างแชสซีถูกลดปริมาณน้ำหนักลง เพื่อให้สามารถเพิ่มปริมาณสารเคมีที่บรรจุได้มากขึ้น การพัฒนารถกึ่งพ่วงแบบถังในทิศทางนี้ส่งผลให้ความแข็งแรงของแชสซีลดลง ก่อให้เกิดปัญหาความเสียหายของโครงสร้างแชสซี นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุขณะใช้งานขนส่งสารเคมีให้สูงขึ้นอีกด้วย จากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตรถกึ่งพ่วงแบบถัง พบว่าผู้ผลิตรถกึ่งพ่วงแบบถัง มีการออกแบบและมีรูปลักษณ์ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งแชสซีบางรูปแบบนั้น เมื่อนำไปใช้งานขนส่งสารเคมี เกิดการแตกร้าวของชิ้นส่วนคานชานบรรทุก (beam) ที่เป็นส่วนประกอบหลักของโครงสร้างแชสซี

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษารูปแบบคานชานบรรทุกของรถกึ่งพ่วงแบบถังโครงสร้างแชสซีสั้น (short chassis) เพื่อวิเคราะห์ชิ้นส่วนคานชานบรรทุกรูปแบบ H-BEAM และคานชานบรรทุกที่ใช้เหล็กแผ่นเชื่อมประกอบ โดยการจำลองโครงสร้างของคานภายใต้ภาระน้ำหนักบรรทุกสูงสุด ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ [9-10]

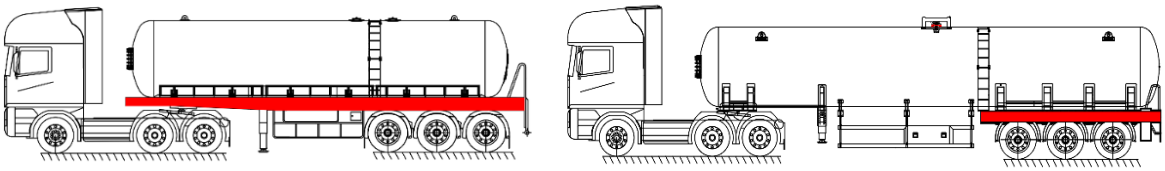
วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษารูปแบบที่เหมาะสมสำหรับคานชานบรรทุกของรถกึ่งพ่วงแบบถังโครงสร้างแชสซีสั้น รูปแบบการติดตั้งขาตั้งถังไม่ตรงกับเต้าแหนบ ภายใต้แรงกระทำจากภาระน้ำหนักบรรทุก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบคานชานบรรทุกได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ ให้สามารถเลือกรูปแบบที่เหมาะสมกับโครงสร้างแชสซีสั้น

วิธีการวิจัย

1. โครงสร้างแชสซีรถกึ่งพ่วงแบบถัง

รถกึ่งพ่วงแบบถัง (tank semi-trailer) เป็นรถบรรทุกลักษณะที่ 4 [11] ตามกฎหมายการขนส่งทางบก มีรูปแบบการใช้งานเพื่อบรรทุกขนส่งวัตถุอันตรายประเภทของเหลวหรือก๊าซ ครอบคลุมถึงน้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซเหลว ก๊าซแรงดันสูง และสารเคมีต่าง ๆ โดยมีโครงสร้างแชสซี 2 ลักษณะดังแสดงในภาพที่ 1



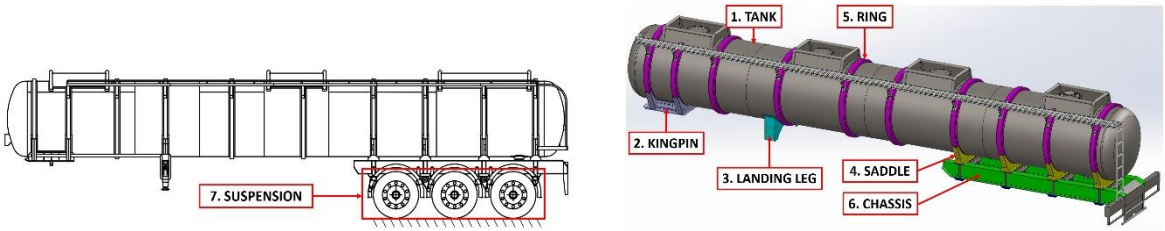
โครงสร้างแชสซียาว โครงสร้างแชสซีสั้น

ภาพที่ 1 รถกึ่งพ่วงแบบถัง โครงสร้างแชสซียาว และโครงสร้างแชสซีสั้น

โครงสร้างแชสซียาว (long chassis) มีลักษณะคือ ความยาวของโครงสร้างแชสซีที่ยาวตลอดความยาวถัง มีข้อดีคือสามารถรองรับน้ำหนักได้มาก นิยมเลือกใช้กับถังบรรจุก๊าซแรงดันสูง (Pressure vessel) ที่มีน้ำหนักสูงจากความหนาของโครงสร้างถัง แต่มีข้อเสียคือมีน้ำหนักโครงสร้างแชสซีที่สูงส่งผลให้บรรทุกสารเคมีได้ปริมาณน้อย

โครงสร้างแชสซีสั้น (short chassis) มีลักษณะเด่นคือ ใช้โครงสร้างถังรับภาระน้ำหนักบรรทุก และมีแชสซีเฉพาะส่วนด้านท้ายเพื่อประกอบชิ้นส่วนระบบช่วงล่างของรถกึ่งพ่วงเท่านั้น ส่งผลให้มีน้ำหนักโครงสร้างแชสซีลดลง จึงสามารถเพิ่มขนาดความโตของถังเพื่อบรรจุสารเคมีได้มากขึ้น

รถกึ่งพ่วงแบบถังสำหรับโครงสร้างแชสซีสั้นที่ใช้งานบนถนนประกอบด้วย 2 ส่วนประกอบหลักคือ รถหัวลากเป็นเครื่องต้นกำลังใช้สำหรับการลากจูง และรถกึ่งพ่วงมีหน้าที่ในการบรรทุกสินค้า โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบรถกึ่งพ่วงแบบถัง โครงสร้างแชสซีสั้น

1. ถัง (tank) มีหน้าที่ในการบรรจุสารเคมีเพื่อใช้ในการขนส่ง โดยลักษณะและรูปแบบของถัง ขึ้นอยู่กับประเภทของสารเคมี หรือก๊าซที่บรรจุอยู่ภายใน

2. สลักพ่วง (king pin) คือจุดต่อระหว่างรถหัวลากกับรถกึ่งพ่วง เป็นอุปกรณ์ที่รับแรงในการลากจูงทั้งหมดขณะวิ่งใช้งานบนถนน

3. ขาค้ำยัน (landing leg) มีหน้าที่ ค้ำยันตัวรถกึ่งพ่วงให้ตั้งอยู่ได้ในขณะที่ปลดรถหัวลากออกไปแล้ว

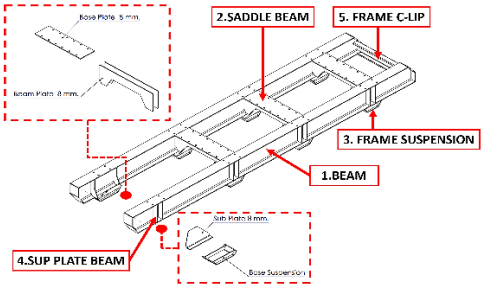
4. ขาตั้งถัง (saddle) มีหน้าที่ จับยึดระหว่างโครงสร้างถังกับโครงสร้างแชสซีโดยเป็นการยึดด้วยสกรูเพื่อให้สามารถถอดประกอบได้

5. แหวนรัดถัง (ring) มีหน้าที่ เพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างถัง โดยระยะห่างระหว่างแหวนรัดถัง ต้องเป็นไปตามข้อกำหนด ADR (ข้อกำหนดการขนส่งสินค้าอันตรายทางถนนของประเทศไทย)

6. แชสซี (chassis) เป็นโครงสร้างหลักสำหรับยึดติดระหว่างโครงสร้างถังกับอุปกรณ์ช่วงล่างเปรียบเสมือนเป็นกระดูกของรถกึ่งพ่วง

7. ระบบช่วงล่าง (suspension) เป็นอุปกรณ์ติดตั้งเพลาล้อและระบบดูดซับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดความสมดุลขณะวิ่งใช้งานบนถนน

โครงสร้างแชสซีสั้น (short chassis) มีหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักในการรับภาระน้ำหนักบรรทุก และเป็นโครงสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ช่วงล่างเพื่อสามารถใช้งานบนถนนได้ โดยทั่วไปมีรูปร่างลักษณะที่แตกต่างกัน ตามที่ผู้ผลิตได้ออกแบบและผลิตขึ้นมา เพื่อเป็นเอกลักษณ์และคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบโครงสร้างแชสซีสั้น

1. คานชานบรรทุก (beam) มีหน้าที่รับน้ำหนักในแนวดิ่งที่ถ่ายมาจากขาตั้งถังและส่งต่อภาระน้ำหนักลงสู่อุปกรณ์ช่วงล่างเป็นชิ้นส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับโครงสร้างแชสซี

2. คานขาตั้งถัง (saddle beam) มีหน้าที่รับน้ำหนักในแนวดิ่งที่ถ่ายมาจากขาตั้งถังและส่งต่อภาระน้ำหนักไปที่คานชานบรรทุกและมีหน้าที่ในการเกาะยึดระหว่างขาตั้งถังกับโครงสร้างแชสซีให้สามารถเคลื่อนที่ไปด้วยกันขณะใช้งาน

3. ฐานเต้าแหนบ (frame suspension) มีหน้าที่สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ช่วงล่างเช่น ระบบกัน สะเทือนแบบเหล็กแหนบหรือระบบกันสะเทือนแบบถุงลม

4. ลูกตั้ง (sup plate beam) มีหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับคานบริเวณจุดต่อคานขาตั้งถังและฐานเต้าแหนบ

5. คานท้าย (frame c-Lip) มีหน้าที่รองรับการติดตั้งอุปกรณ์กันชนท้ายและอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้านท้ายรถ

2. การติดตั้งถังกับโครงสร้างแชสซี

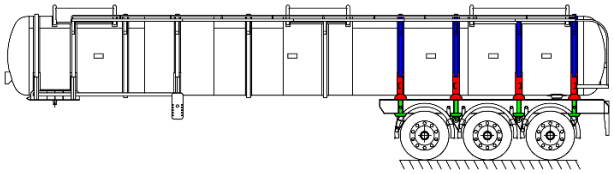
ในอดีตรถกึ่งพ่วงแบบถังมีรูปแบบการติดตั้งรูปแบบเดียวคือ รูปแบบโครงสร้างแชสซียาวที่มีลักษณะยาวตั้งแต่สลักพ่วงไปจนถึงท้ายรถกึ่งพ่วง แต่เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างที่สูงมาก จึงส่งผลให้บรรทุกสารเคมีได้น้อยลง เพราะการใช้งานรถกึ่งพ่วงบรรทุกสารเคมีต้องมีน้ำหนักรถและสารเคมีรวมกันไม่เกิน 50.5 ton เพื่อที่จะสามารถขึ้นทะเบียนและนำมาใช้งานบนถนนได้ จากปัญหาดังกล่าว นำไปสู่การพัฒนารูปแบบการติดตั้งแชสซีสั้น ที่ใช้โครงสร้างถังช่วยรับภาระน้ำหนัก โดยส่วนโครงสร้างถังต้องถูกคำนวณและออกแบบตามมาตรฐาน ADR (ข้อกำหนดการขนส่งสินค้าอันตรายทาง

ถนนของประเทศไทย) หรือ ASME SEC VIII (American society for mechanical engineering) จึงสามารถผลิตและติดตั้งเพื่อนำมาใช้งานบนถนน

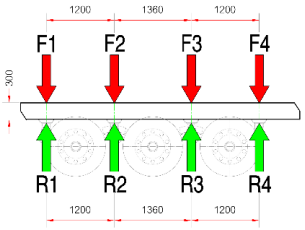
จากการคำนวณและออกแบบโครงสร้างถังตามมาตรฐานดังกล่าว ทำให้ผู้ใช้งานรถกึ่งพ่วงเกิดความมั่นใจในตัวโครงสร้างถัง นำไปสู่การลดขนาดของโครงสร้างแชสซี จากเดิมที่แชสซีมีรูปแบบยาวตลอดความยาวถังประมาณ 7-8 เมตร ลดเหลือเพียง 3-4 เมตร โดยเป็นระยะความยาวที่ใช้สำหรับประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ช่วงล่างของรถกึ่งพ่วงเท่านั้น

การลดขนาดความยาวของแชสซีช่วยให้น้ำหนักของรถกึ่งพ่วงลดลงอย่างมาก จึงสามารถเพิ่มขนาดความโตของถัง เพื่อสามารถบรรจุสารเคมีในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นได้ ดังนั้นโครงสร้างแชสซีแบบสั้น จึงเริ่มเป็นที่นิยมและมีผู้ประกอบการเลือกใช้งานกันมากขึ้น โดยในช่วงแรกของการพัฒนาโครงสร้างแชสซีสั้นนั้น มีชิ้นส่วนประกอบหลักคือ ชิ้นส่วนคานชานบรรทุก ที่นิยมเลือกใช้เหล็กโครงสร้างรูปพรรณหน้าตัด H-BEAMS หรือ WIDE FLANGE ขนาด 300x150x6.5 mm นำมาประกอบขึ้นรูปเป็นโครงสร้างแชสซีแต่เนื่องจากชิ้นส่วนคานชานบรรทุกดังกล่าว มีปริมาณน้ำหนักที่สูง ส่งผลให้เกิดการพัฒนาชิ้นส่วนคานชานบรรทุกเกิดขึ้นอีกหนึ่งรูปแบบคือ การเลือกใช้เหล็กแผ่นที่มีขนาดความหนา 3-6 mm พับขึ้นรูป และนำมาเชื่อมประกอบเป็นลักษณะหน้าตัดต่าง ๆ ตามที่ได้ออกแบบโครงสร้างแชสซี เพื่อมุ่งเน้นให้น้ำหนักของโครงสร้างแชสซีลดลงให้ได้มากที่สุด การพัฒนาในลักษณะนี้ส่งผลโดยตรงกับความแข็งแรงของชิ้นส่วนคานชานบรรทุกที่ลดลงจากการลดขนาดความหนาของวัสดุที่นำมาผลิต และอีกปัจจัยในการออกแบบที่มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง คือรูปแบบการติดตั้งขาตั้งถัง (saddle) อุปกรณ์ยึดติดโครงสร้างถังกับโครงสร้างแชสซีโดยรูปแบบการติดตั้งมี 2 รูปแบบคือ

รูปแบบการติดตั้งขาตั้งถังตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบดังภาพที่ 4 การติดตั้งถังรูปแบบนี้มีลักษณะคือ ส่วนประกอบของขาตั้งถังตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบ โดยมีจำนวนทั้งหมด 4 จุด เนื่องจากตำแหน่งขาตั้งถังดังกล่าว ถูกบังคับตามจำนวนตำแหน่งของเต้าแหนบ ดังนั้นรถกึ่งพ่วงแบบถังรูปแบบนี้ จึงมีความแข็งแรงจากตัวโครงสร้างการจับยึด



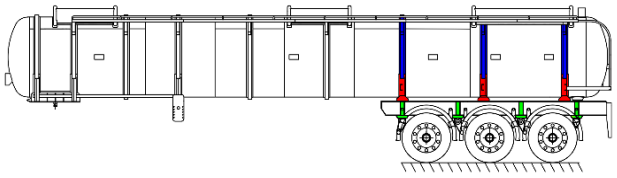
รถกึ่งพ่วงแบบถังขาตั้งถังตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบ



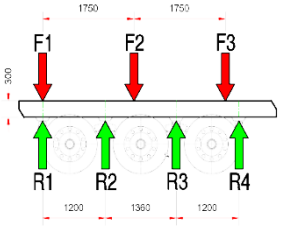
Free body diagram คานชานบรรทุก

ภาพที่ 4 ตำแหน่งขาตั้งถังตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบ

ในช่วงแรกของการพัฒนารถกึ่งพ่วงแบบถังสำหรับโครงสร้างแชสซีสั้นนั้น รูปแบบการติดตั้งขาตั้งถังตรงตำแหน่งเต้าแหนบเป็นที่นิยมและทำให้ผู้ใช้งานมีความมั่นใจในความแข็งแรงของโครงสร้าง ต่อมามีความพยายามในการลดน้ำหนักของรถกึ่งพ่วง ส่งผลให้เกิดการลดจำนวนขาตั้งถังและแหวนรัดถัง เพื่อให้น้ำหนักโครงสร้างถังลดน้อยลงรวมถึงการลดต้นทุนในการผลิตด้วยดังภาพที่ 5 และอีกกรณีที่ทำให้เกิดรูปแบบการติดตั้งขาตั้งถังไม่ตรงเต้าแหนบคือ ความผิดพลาดในกระบวนการผลิต โดยปัญหาดังกล่าวอาจเกิดขึ้นจากกระบวนการออกแบบ เช่น การวัดระยะที่ผิดพลาดหรือการติดตั้งขาตั้งถังเพื่อหลบแนวเชื่อมรอบตัวโครงสร้างถัง ส่งผลให้เกิดระยะเยื้องระหว่างตำแหน่งขาตั้งถังกับตำแหน่งเต้าแหนบดังแสดงในภาพที่ 6

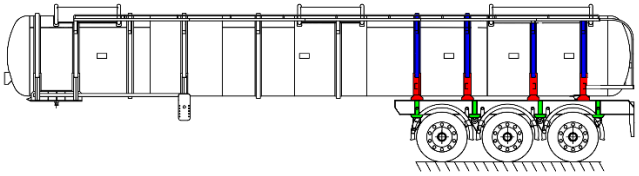


รถกึ่งพ่วงแบบถังขาตั้งถังไม่ตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบ 3 ขาตั้ง

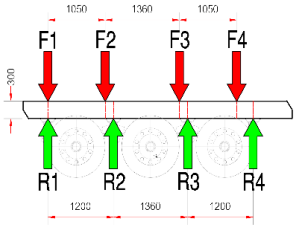


Free body diagram คานชานบรรทุก

ภาพที่ 5 ตำแหน่งขาตั้งถังไม่ตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบ 3 ขาตั้ง



รถกึ่งพ่วงแบบถังขาตั้งถังไม่ตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบ 4 ขาตั้ง



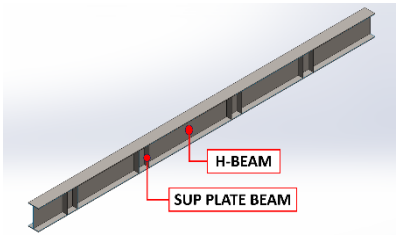
Free body diagram คานชานบรรทุก

ภาพที่ 6 ตำแหน่งขาตั้งถังไม่ตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบ 4 ขาตั้ง

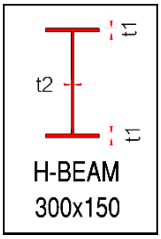
3. คานชานบรรทุก

ในปัจจุบันคานชานบรรทุก ถูกออกแบบให้มีหลากหลายรูปแบบตามประเภทรถกึ่งพ่วง และตามความเหมาะสมของลักษณะการใช้งาน ดังนั้นหากการออกแบบคานชานบรรทุกที่ไม่เหมาะสมเช่น การเลือกใช้วัสดุในการผลิตที่บางมากเกินไป เพื่อให้ได้น้ำหนักโครงสร้างที่เบาลง ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับคานชานบรรทุก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาคานชานบรรทุกที่นิยมนำมาใช้งานสำหรับรถกึ่งพ่วงแบบถังมีทั้งหมด 2 ประเภทคือ

คานชานบรรทุกเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัว H (H-Beam) มีลักษณะคือ ใช้เหล็กรูปพรรณ H-Beam หรือเหล็กรูปพรรณ Wide Flange ขนาด 300x150x6.5 mm ดังภาพที่ 7 นำมาผลิตเป็นคานชานบรรทุก โดยในช่วงแรกของการพัฒนาโครงสร้างแชสซีนิยมเลือกใช้เหล็กรูปพรรณชนิดนี้ เพราะมีความแข็งแรงที่สูง สามารถนำมาผลิตขึ้นรูปเป็นโครงสร้างแชสซีได้ง่าย แต่เนื่องจากคานชานบรรทุกชนิดนี้มีปริมาณน้ำหนักมาก ส่งผลให้มีการพัฒนาเพื่อลดน้ำหนัก จึงเกิดเป็นคานชานบรรทุกรูปแบบอื่น ๆ ตามมา



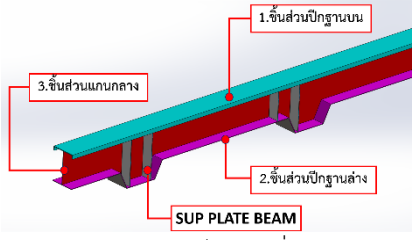
คานชานบรรทุก H-Beam



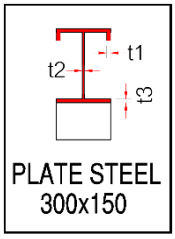
พื้นที่หน้าตัดคานชานบรรทุกหน้าตัดรูปตัว H

ภาพที่ 7 คานชานบรรทุกเหล็กรูปพรรณหน้าตัดรูปตัว H ขนาด 300x150x6.5 mm

คานชานบรรทุกเหล็กแผ่นเชื่อมประกอบ (plate steel beam) มีลักษณะคือ ใช้เหล็กแผ่นขนาดความหนา 3.2-8 mm นำมาตัดเป็นชิ้นส่วนทั้งหมด 3 ส่วนคือ ชิ้นส่วนปีกฐานบน ชิ้นส่วนปีกฐานล่าง และชิ้นส่วนแกนกลาง โดยนำส่วนประกอบทั้งหมดมาเชื่อมประกอบกัน เพื่อให้เป็นคานชานบรรทุกและนำไปประกอบขึ้นรูปโครงสร้างแชสซีดังภาพที่ 8



คานชานบรรทุกเหล็กแผ่นเชื่อมประกอบ



พื้นที่หน้าตัดคานชานบรรทุกเหล็กแผ่นเชื่อมประกอบ

ภาพที่ 8 คานชานบรรทุกเหล็กแผ่นเชื่อมประกอบขนาด 300x150 mm

การวิเคราะห์คานชานบรรทุกสำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกการวิเคราะห์ลักษณะการติดตั้งขาตั้งถังไม่ตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบจำนวน 3 ขาตั้ง และจำนวน 4 ขาตั้ง เนื่องจากลักษณะการติดตั้งดังกล่าว ทำให้เกิดแรงเฉือน (shear force) ขึ้นกับคานชานบรรทุกดังภาพที่ 5 และ 6 จึงมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายมากกว่าลักษณะการติดตั้งขาตั้งถังตรงกับตำแหน่งเต้าแหนบดังภาพที่ 4 โดยได้แบ่งประเภทคานชานบรรทุกไว้ทั้งหมด 4 ประเภท ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ประเภทคานชานบรรทุก

ลำดับ	ประเภทคานชานบรรทุก (beam)	จำนวนขาตั้งถัง (saddle)
H1	คานชานบรรทุก H-BEAM 300x150x6.5 mm	3 ชุด
H2	คานชานบรรทุก H-BEAM 300x150x6.5 mm	4 ชุด
S3	คานชานบรรทุกเหล็กแผ่นเชื่อมประกอบ 300x150 mm 18 รูปแบบ	3 ชุด
S4	คานชานบรรทุกเหล็กแผ่นเชื่อมประกอบ 300x150 mm 18 รูปแบบ	4 ชุด

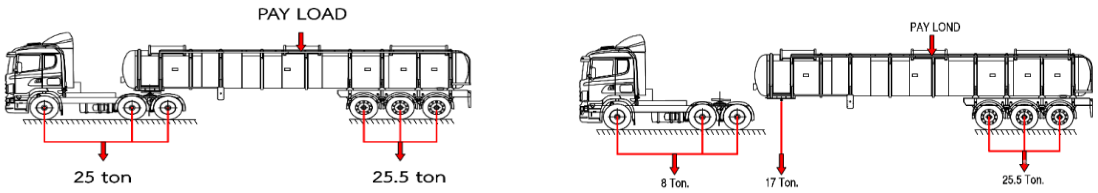
คานประเภท H1 และ H2 ที่มีรูปแบบการผลิตโดยใช้เหล็กรูปพรรณ H-beam ขนาด 300x150 mm โดยมีขนาดความหนาส่วนแกนกลาง (t2) เท่ากับ 6.5 mm ขนาดเดียว ส่งผลให้คานทั้งสองประเภทมีรูปแบบเดียว ซึ่งต่างจากคานประเภท S3 และ S4 ที่มีรูปแบบการผลิตโดยใช้เหล็กแผ่นขนาดความหนาต่าง ๆ มาเชื่อมประกอบ ดังนั้นคานประเภท S3 และ S4 จึงมีรูปแบบแตกต่างกันออกไปตามที่ผู้ผลิตได้ออกแบบไว้ สำหรับงานวิจัยนี้ขนาดความหนาชิ้นส่วนปีกฐานบน (t1) มีความหนาน้อยสุดเท่ากับ 4.5 mm เนื่องจากชิ้นส่วนดังกล่าวต้องติดตั้งกับขาตั้งถังด้วยสกรู ส่งผลให้ไม่สามารถเลือกความหนาที่น้อยกว่านี้ได้ และการเลือกใช้ขนาดความหนาที่มากกว่า 6 mm กับชิ้นส่วนต่าง ๆ ของคาน จะส่งผลให้มีน้ำหนักเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งไม่แตกต่างจากคานประเภท H1 และ H2 ดังนั้นจากปัจจัยดังกล่าว จึงสามารถออกแบบรูปแบบของคานประเภท S3 และ S4 ได้เป็น 18 รูปแบบ โดยมีขนาดความหนาที่สามารถเลือกนำมาประกอบได้คือ 3-6 mm ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รูปแบบคานชานบรรทุกเหล็กแผ่นเชื่อมประกอบ S3 และ S4

ลำดับ		ความหนาเหล็กแผ่น (มม.)			ลำดับ		ความหนาเหล็กแผ่น (มม.)		
		t1	t2	t3			t1	t2	t3
S3-1	S4-1	4.5	3.2	3	S3-10	S4-10	6	3.2	3
S3-2	S4-2	4.5	3.2	4.5	S3-11	S4-11	6	3.2	4.5
S3-3	S4-3	4.5	3.2	6	S3-12	S4-12	6	3.2	6
S3-4	S4-4	4.5	4.5	3	S3-13	S4-13	6	4.5	3
S3-5	S4-5	4.5	4.5	4.5	S3-14	S4-14	6	4.5	4.5
S3-6	S4-6	4.5	4.5	6	S3-15	S4-15	6	4.5	6
S3-7	S4-7	4.5	6	3	S3-16	S4-16	6	6	3
S3-8	S4-8	4.5	6	4.5	S3-17	S4-17	6	6	4.5
S3-9	S4-9	4.5	6	6	S3-18	S4-18	6	6	6

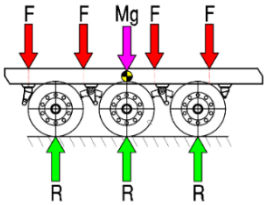
4. แบบจำลองคานชานบรรทุก

เมื่อพิจารณารถกึ่งพ่วงแบบถัง พบว่ามีภาระน้ำหนัก 2 ส่วนหลัก คือส่วนของรถหัวลาก และส่วนรถกึ่งพ่วงแบบถัง โดยภาระน้ำหนักที่ส่งผลกระทบกับโครงสร้างแชสซีคือ ส่วนเพลาท้ายของรถกึ่งพ่วงแบบถังที่มีภาระน้ำหนักมากสุดที่ 25.5 ton (ตามที่กฎหมายทางหลวงกำหนด) ดังภาพที่ 9

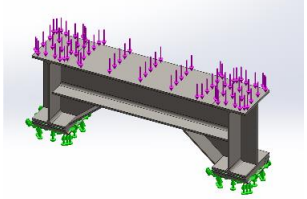


ภาพที่ 9 น้ำหนักทั้งหมดสำหรับรถหัวลากและรถกึ่งพ่วง

พิจารณาภาพที่ 10 โดยน้ำหนักโครงสร้างแชสซีและอุปกรณ์ช่วงล่างรถทั้งหมด (Mg) มีน้ำหนักเท่ากับ 4 ton ดังนั้นคงเหลือแรงจากภาระน้ำหนัก 21.5 ton เป็นแรงที่กระทำกับโครงสร้างแชสซี และเมื่อพิจารณาเฉพาะจุดที่แรงกระทำกับโครงสร้างแชสซีจากชิ้นส่วนขาตั้งถังดังภาพที่ 11 พบว่าแรงที่กระทำกับคานชานบรรทุกประเภท 3 ขาตั้งถัง มีค่าเท่ากับ 3.6 ton และสำหรับคานชานบรรทุกประเภท 4 ขาตั้งถัง มีค่าเท่ากับ 2.7 ton โดยแรงดังกล่าวเป็นแรงที่กระทำต่อจุดบนคานชานบรรทุก จะเห็นได้ว่าเมื่อมีจำนวนขาตั้งถังที่น้อยลง จะส่งผลให้ขนาดของแรงมีค่ามากขึ้น



ภาพที่ 10 Free body diagram สำหรับโครงสร้างแชสซี



ภาพที่ 11 แรงที่กระทำกับชิ้นส่วนคานขาตั้งถัง

กระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโปรแกรม Solidworks simulation [12] ประกอบด้วยการเลือกรูปแบบการวิเคราะห์ การใส่ข้อมูล Material, Connection, Fixture, Load และส่วนสำคัญคือ การเลือกใช้ประเภทของ Mesh ให้เหมาะสมกับชิ้นงาน สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ Mesh ประเภท Shell mesh เนื่องจากคานชานบรรทุกประเภทเหล็กแผ่นเชื่อมประกอบ S3 และ S4 มีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดคาน ทำให้พื้นที่หน้าตัดคานไม่คงที่ ดังนั้นการเลือกใช้ Shell mesh จึงเหมาะกับการวิเคราะห์ชิ้นงานประกอบจากเหล็กแผ่นที่มีขนาดหน้าตัดต่างกัน

ผลลัพธ์แสดงออกมาในรูปของค่า Von mises stress คือ Stress ที่ได้จากการรวมค่า Stress ทั้ง 6 แบบด้วยสมการดังภาพที่ 12 เพื่อบอกตำแหน่งความเสียหายของชิ้นงาน โดยนำไปเปรียบเทียบกับค่า Yield stress ของวัสดุที่ใช้ผลิต

$$\sqrt{\mathbf{0.5}\,[(\mathbf{SX}-\mathbf{SY})^2+(\mathbf{SY}-\mathbf{SZ})^2+(\mathbf{SZ}-\mathbf{SX})^2]+\mathbf{3}[\mathbf{TXY}^2+\mathbf{TYZ}^2+\mathbf{TZX}^2]}$$

ค่า SX, SY, SZ หมายถึง Normal Stress ในแนวแกน X, Y, Z ตามลำดับ
ค่า TXY, TYZ, TZX หมายถึง Shear Stress ในระนาบ XY, YZ, XZ ตามลำดับ

ภาพที่ 12 สมการ Von mises stress

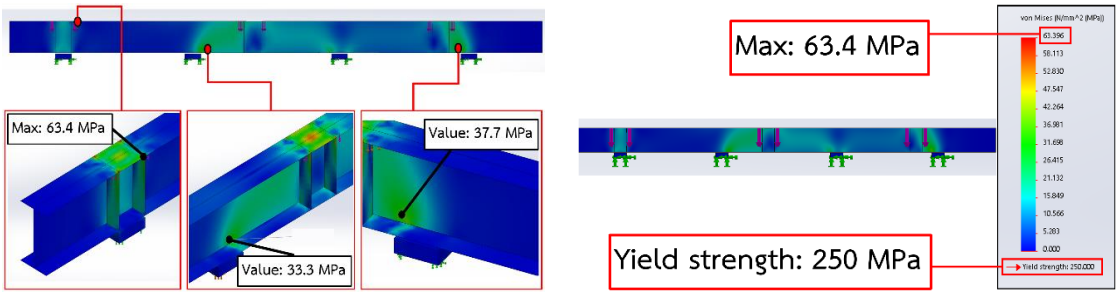
งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์โครงสร้างแบบสถิตยศาสตร์ (static structural analysis) กำหนดเงื่อนไขของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับคานชานบรรทุก โดยเลือกใช้คุณสมบัติวัสดุเหล็กกล้าโลหะเหนียวเกรด SS400 ซึ่งเป็นวัสดุหลักที่ผู้ผลิตเลือกใช้ประกอบคานชานบรรทุก สำหรับในโปรแกรม Solidworks ได้กำหนดชื่อไว้คือ ASTM A36 STEEL ส่วนการแสดงผลลัพธ์ค่าความปลอดภัย (factor of safety) สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้แรงกระทำอยู่นิ่ง เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาหาตำแหน่งที่จะเกิดความเสียหายจากการรับน้ำหนักบรรทุก แต่เนื่องจากการใช้งานจริงบนท้องถนนย่อมเกิดแรงมากกว่า 1 ทิศทาง ดังนั้นการออกแบบคานชานบรรทุกจึงควรพิจารณาเพิ่มเติมถึงลักษณะเฉพาะของการใช้งานในแต่ละพื้นที่เพื่อที่จะเพิ่มค่าความปลอดภัยให้เหมาะสมกับแรงที่เกิดขึ้นจริง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความปลอดภัย (factor of safety) ตามชนิดแรง [13]

ชนิดของแรงที่กระทำ	เหล็กกล้าโลหะเหนียว		เหล็กกล้าโลหะเปราะ
	N_y	N_μ	N_μ
แรงกระทำอยู่นิ่ง	1.5 – 2	3 – 4	5 – 6
แรงกระทำซ้ำทิศทางเดียว	3	6	7 – 8
แรงกระทำซ้ำสองทิศทาง	4	8	10 – 12
แรงกระแทกอย่างหนัก	10 – 15	5 – 7	15 – 20

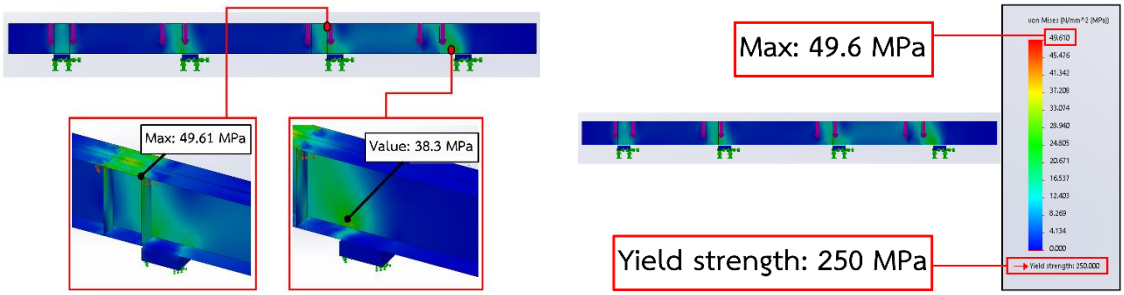
ผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์คานชานบรรทุกประเภท H1 H-BEAM จำนวนขาตั้งถัง 3 ชุด จุดที่มีค่า Von mises stress สูงที่สุดสำหรับคานชานบรรทุกประเภทนี้มีค่าเท่ากับ 63.4 MPa. ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณปีกฐานบนของคาน และค่า Factor of safety มีค่าเท่ากับ 3 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย แต่ต้องแลกมากับปริมาณน้ำหนักคานที่สูงถึง 181.5 kg.



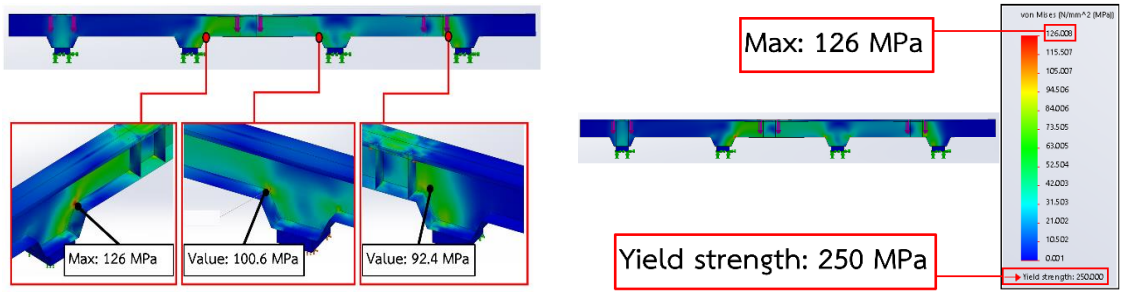
ภาพที่ 13 ผลการวิเคราะห์คานชานบรรทุกประเภท H1 H-BEAM

ผลการวิเคราะห์คานชานบรรทุกประเภท H2 H-BEAM จำนวนขาตั้งถัง 4 ชุด ค่า Von mises stress มากสุดบริเวณใต้ท้องคานมีค่าเท่ากับ 38.3 MPa และจุดที่มีค่า Von mises stress สูงที่สุดสำหรับคานชานบรรทุกประเภทนี้มีค่าเท่ากับ 49.61 MPa. ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณปีกฐานบนของคาน ค่า Factor of safety มีค่าเท่ากับ 4.1 อยู่ในเกณฑ์ที่ปลอดภัย แต่มีน้ำหนักคานที่สูงถึง 183.4 kg. ดังนั้นคานชานบรรทุกประเภท H1 และ H2 มีความแข็งแรงมากกว่าคานทุกประเภท แต่เนื่องจากมีน้ำหนักที่สูงจึงไม่นิยมนำมาใช้งานกับการพัฒนาโครงสร้างแชสซีที่มีน้ำหนักเบา



ภาพที่ 14 ผลการวิเคราะห์คานชานบรรทุกประเภท H2 H-BEAM

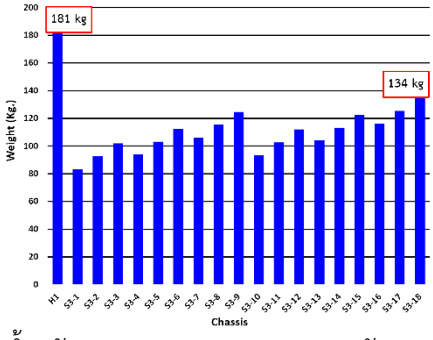
ผลการวิเคราะห์คานชานบรรทุกประเภท S3 Plate steel ทั้งหมด 18 รูปแบบ จำนวนขาตั้งถัง 3 ชุด พบจุดที่เกิดค่า Von mises stress มากสุดบริเวณใต้ท้องคาน ซึ่งเป็นจุดลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดในคานรูปแบบ S3-1 โดยมีค่า Von mises stress เท่ากับ 126 MPa. แม้ว่าค่า Von mises stress ดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าค่า Yield strength 250 MPa. สำหรับคุณสมบัติเหล็กเกรด SS400 แต่ค่า Factor of safety เท่ากับ 1.9 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 2 จึงไม่เหมาะสำหรับการเลือกนำมาใช้งาน เนื่องจากในสภาวะการใช้งานจริงบนถนน เกิดชนิดของแรงที่กระทำกับคานชานบรรทุกมากกว่าแรงชนิดที่อยู่นิ่ง เช่น แรงสั่นสะเทือน และแรงกระแทก เป็นต้น



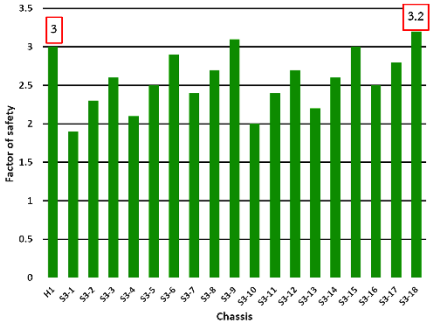
ภาพที่ 15 ผลการวิเคราะห์คานชานบรรทุกประเภท S3-1 Plate steel ขนาด 4.5x3.2x3 mm

เมื่อได้ Simulation ครบทั้ง 18 รูปแบบ พบว่าค่า Von mises stress ลดลงตามการเพิ่มความหนา t1 ,t2 ,t3 โดยเฉพาะความหนา t3 ชิ้นส่วนฐานปีกล่างของคาน ที่ส่งผลเมื่อลดความหนา t3 ทำให้เกิดค่า Von mises stress สูงขึ้นบริเวณ

ใต้ท้องคาน และปัจจัยที่เป็นส่วนสำคัญอีกส่วนคือ น้ำหนักของคานประเภทนี้ โดยมีน้ำหนักน้อยที่สุดคือ 83.29 kg สำหรับคานรูปแบบที่ S3-1 ซึ่งมีน้ำหนักน้อยกว่าคานชานบรรทุกประเภท H1 ถึง 45.9 % ดังนั้นคานชานบรรทุกประเภทนี้ค่อนข้างนิยมนำมาใช้งาน แต่ต้องพิจารณาค่า Factor of safety ควบคู่กับการตัดสินใจเลือกรูปแบบเพื่อนำมาใช้งาน



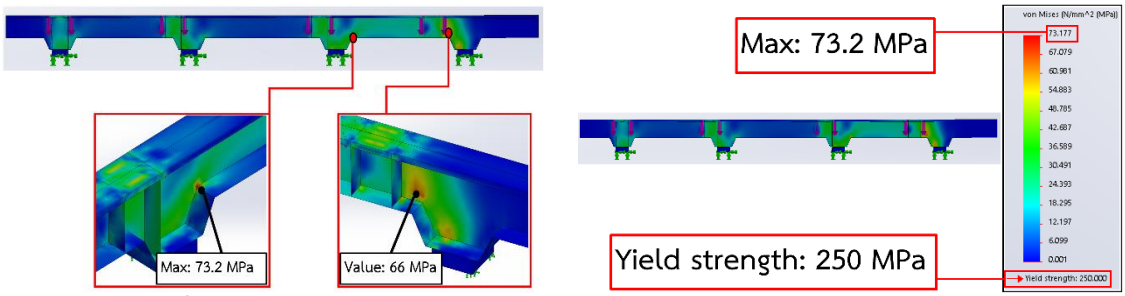
น้ำหนักคานชานบรรทุกประเภท H1 กับ S3



Factor of safety คานชานบรรทุกประเภท H1 กับ S3

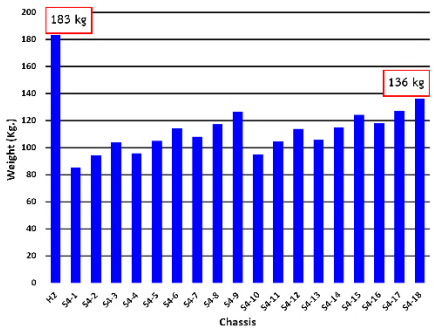
ภาพที่ 16 เปรียบเทียบค่า น้ำหนักและ Factor of safety สำหรับคานชานบรรทุกประเภท H1 กับ S3

ผลการวิเคราะห์คานชานบรรทุกประเภท S4 Plate steel ทั้งหมด 18 รูปแบบ จำนวนขาตั้งถัง 4 ชุด พบจุดที่เกิดค่า Von mises stress มากสุดบริเวณใต้ท้องคาน ซึ่งเป็นจุดลดขนาดของพื้นที่หน้าตัดในคานรูปแบบ S4-1 โดยมีค่า Von mises stress เท่ากับ 73.2 MPa

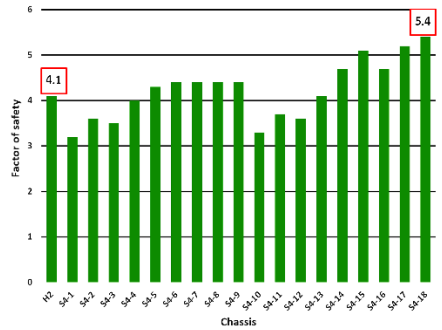


ภาพที่ 17 ผลการวิเคราะห์คานชานบรรทุกประเภท S4-1 Plate steel ขนาด 4.5x3.2x3 mm

เมื่อได้ Simulation ครบทั้ง 18 รูปแบบ พบว่าค่า Von mises stress ไม่สูงมาก เนื่องจากมีจำนวนขาตั้งถังที่มากกว่าคานประเภท S3 ซึ่งช่วยในการรับแรงและกระจายแรงได้ดีกว่า ส่วนน้ำหนักของคานประเภทนี้ มีน้ำหนักน้อยที่สุดคือ 85.19 kg สำหรับคานรูปแบบที่ S4-1 และมีค่า Factor of safety เท่ากับ 3.2 ดังนั้นคานชานบรรทุกประเภทนี้จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้งานเช่นกัน แต่การตัดสินใจเลือกรูปแบบเพื่อนำมาใช้งาน ต้องพิจารณาค่า Factor of safety รูปแบบนั้นด้วย



น้ำหนักคานชานบรรทุกประเภท H2 กับ S4



Factor of safety คานชานบรรทุกประเภท H2 กับ S4

ภาพที่ 18 เปรียบเทียบค่า น้ำหนักและ Factor of safety สำหรับคานชานบรรทุกประเภท H2 กับ S4

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากผล Simulation พบว่าจุดที่เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อการใช้งานสำหรับคานชานบรรทุกคือบริเวณใต้ท้องคาน โดยเฉพาะคานชานบรรทุก S3 และ S4 ที่มีการลดขนาดพื้นที่หน้าตัดบริเวณใต้ท้องคานเพื่อลดน้ำหนักคาน ซึ่งตรงกับรูปแบบความเสียหายที่พบได้บ่อยในหน้างานจริง ดังนั้นหากกระบวนการเชื่อมประกอบบริเวณใต้ท้องคานไม่ดี เมื่อนำไปใช้งานจริงจะส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้น เนื่องจากภาวะการนำไปใช้งานจริงอาจเกินแรงกระทำกับคานชานบรรทุกมากกว่า 1 แรง จึงควรพิจารณาตารางค่าความปลอดภัยตามชนิดแรง (ตารางที่ 3) ประกอบการออกแบบด้วย

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักพบว่าคานชานบรรทุก H1 และ H2 มีน้ำหนักมากที่สุดคือ 181.5 kg และ 183.4 kg ตามลำดับ แต่คานชานบรรทุก S3 และ S4 ที่มีน้ำหนักมากที่สุดคือ 134.58 และ 136.37 kg เห็นได้ว่าคานชานบรรทุกรูปแบบเหล็กแผ่นเชื่อมประกอบสามารถลดน้ำหนักได้ดีจึงเป็นที่นิยม เพราะมีค่า Factor of safety ใกล้เคียงกับคานชานบรรทุก H1 และ H2

สำหรับงานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลและผลไฟไนต์เอลิเมนต์ที่แสดงค่าน้ำหนัก ค่า Von mises stress และค่า Factor of safety เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบปรับปรุงแก้ไขคานชานบรรทุกสำหรับโครงสร้างแชสซีรถกึ่งพ่วงแบบถัง สำหรับคาน S3 และ S4 ควรต้องควบคุมกระบวนการผลิตให้มีคุณภาพด้วย เช่น กระบวนการเชื่อมประกอบคานชานบรรทุกจะต้องควบคุมคุณภาพของแนวเชื่อม และการบิดรูปของคานชานบรรทุกขณะเชื่อมด้วยความร้อนสูง เนื่องจากหากกระบวนการผลิตไม่สามารถผลิตคานชานบรรทุกออกมาให้มีคุณภาพสมบูรณ์ได้ ประสิทธิภาพการรับน้ำหนักของโครงสร้างและ Factor of safety ที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นแนวทางในการเลือกใช้รูปแบบคานชานบรรทุกจึงควรคำนึงถึงจุดที่เกิดความเสียหายเป็นหลัก โดยสามารถเพิ่มชิ้นส่วนลูกตั้ง (sup plate beam) เพื่อช่วยเสริมความแข็งแรงของคานได้

เอกสารอ้างอิง

1. Pollution Control Department Ministry of Natural Resources and Environment. Chemical Emergency Disaster Management. Dangerous Goods Transport and Emergency Disaster Management. 2020. Available from: http://pcd.go.th/info_serv/haz_response.htm
2. Phatrabuddha N, Yingratanasuk T, Rotwannasin P, Jaidee W. Development of work-rest model for reducing fatigue among hazardous chemical transportation drivers, Chonburi. Government research project 2016. Burapha University. Thai
3. Sharpe B, Rodríguez F. Market analysis of heavy-duty commercial trailers in Europe. ICCT the international council on clean transportation. 2018.
4. Kongthong T, Chamnanlor C. Simulation Modeling to Increasing the Efficiency Semi-trailer Production. KKU Research Journal (Graduate Studies). 2021; 21(3): 13-26. Thai.
5. Feng M, Cheng Y, Wu X. Optimization of truck- and- trailer transportation scheduling for hazardous chemicals with empty trailer task. Chemical Engineering Transactions. 2018; 71: 97-102.
6. Ala L, Hijazi. Design of a Light-Weight Aluminum Fuel Semi trailer Tanker in accordance with ADR-2011 Specifications [PhD Thesis]. German Jordanian University; 2012.
7. Dimitrios V, Koulocheris, Clio G. Vossou. Alternative design for a Semi-Trailer tank vehicle. Mobility & Vehicle Mechanics. 2018; 44(2): 51-69.

8. Determination Truck weight. Office of Highways Traffic Weight Control. 2016. Available from: http://www.highwayweigh.go.th/
9. Dechaumphai P, Sucharitpwatskul S. Finite Element Analysis with Solidworks. 2017; Thai
10. Phasinam K, Julyusen P, Watakij K, Sompong J. Strength Analysis of the Track Frame of a Thai-Made Rice Combine Harvester Using the Finite Element Method and the Loading Tests. Thai Society of Agricultural Engineering Journal. 2016; 22(2): 24-29. Thai.
11. Automotive Engineering Bureau. Summary of size details of buses and trucks B.E. 2552 (2009). Available from: https://www.thaitruckcenter.com
12. Pripaisankij P. Simulation so easy. 2014; Available from: http://thai-solidworks-simulation.com
13. Saringkansiri C. Production planning and control. 2002; 10: 213-249. Thai.