



FEAT JOURNAL

FARM ENGINEERING AND AUTOMATION TECHNOLOGY JOURNAL

วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ

การศึกษาวิธีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการทดสอบเสถียรภาพ ของยานยนต์บนพื้นเอียงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Studies of Method for Setup Boundary Conditions for Vehicle Stability Testing on Tilting Platform using Finite Element Analysis

จักรี วิชัยระหัด* ชยารักษ์ ธาณี ตีชะกุล และ ปวีณ เกียรติเกษม

Jakkree Wichairahad*, Chayaruk Thanee Tikakul and Paween Kiangkasem

โครงการจัดตั้งคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000

Faculty of Engineering and Industrial Technology, Chaiyaphum Rajabhat University,

Mueng, Chaiyaphum, Thailand 36000

Received: 17 May 2021

Revised: 9 December 2021

Accepted: 7 August 2023

Available online: 22 December 2023

บทคัดย่อ

เสถียรภาพบนพื้นเอียงหรือความสามารถในการทรงตัวบนพื้นเอียงของโครงสร้างยานยนต์ เป็นองค์ประกอบสำคัญของความปลอดภัย โดยเฉพาะรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร และรถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรม (รย.15) วิธีการทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงสามารถกระทำได้โดยการนำยานยนต์จริงไปทดสอบที่เครื่องทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียง เพื่อเป็นการลดความสูญเสียจากการนำยานยนต์จริงไปทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงแล้วไม่ผ่านการทดสอบตามเกณฑ์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมก่อนทำการผลิตโครงสร้างจริง บทความนี้จึงได้นำเสนอวิธีการในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์หุ้มเอียงที่ทำให้โครงสร้างยานยนต์พลิกคว่ำด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม โดยวิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานการกระทำแบบสถิตศาสตร์และสมบัติวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ผลการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดสอบ

เสถียรภาพบนพื้นเอียงของโครงสร้างจริงที่เป็นโครงสร้างอย่างง่าย เมื่อวิเคราะห์ด้วยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 1 ผลปรากฏว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดถึงร้อยละ 63.63 และปรากฏว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเพียงร้อยละ 2.42 เมื่อทำการปรับปรุงวิธีการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบที่ 2 คณะผู้วิจัยคาดหวังว่าการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้นายยนต์ในด้านของความปลอดภัยของโครงสร้างและเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตรายยนต์ในด้านของการออกแบบและผลิต

คำสำคัญ: เสถียรภาพบนพื้นเอียงของยานยนต์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

Abstract

Vehicle stability or rollover resistance on the tilting platform was an essential component of safety, especially in vehicles that used to transport passengers and agricultural trucks. The method of stability testing on the tilting platform can be performed by taking a real vehicle to the tilting platform tester. In order to reduce the waste when taking real vehicles to the stability test on tilting platform and fail the test. Finite element method was therefore used for analyze structures by computer aided engineering analysis before production of structures. This article presented a method for determining the boundary conditions for rollover angle analysis using computer aided engineering. It was analyzed under the static load assumptions and the linear elastic material properties. The results of the computer aided engineering analyzes were compared with the experimental results of a simple structure. The results showed that the maximum error was 63.63% when analyzing with boundary condition type 1 and the result showed that the maximum error was only 2.42% when adjusting the method for setting the boundary condition to type 2. The researchers hope that this study will be beneficial to automotive users in terms of structural safety and for automotive manufacturers in terms of design and manufacture.

Keywords: Vehicle Stability on Tilting Platform: Finite element analysis: Computer Aided Engineering

1. บทนำ

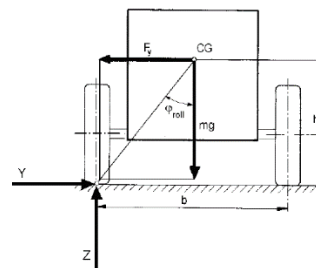
เสถียรภาพบนพื้นเอียง เป็นองค์ประกอบสำคัญของความปลอดภัยในการใช้ยานยนต์ โดยเฉพาะรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร และรถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรม (รย.15) สำหรับรถโดยสารที่มีความสูงเกิน 3.6 เมตร ในปี พ.ศ. 2555 กรมการขนส่งทางบกได้กำหนดให้ ต้องผ่านการทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียง และต้องไม่พลิกคว่ำที่มุมต่ำกว่า 30 องศา โดยการทดสอบรถจริง [1] ตามภาพที่ 1 ในขณะที่มาตรฐาน ECE R107 ได้กำหนดให้รถโดยสารทุกประเภทที่มีจำนวนที่นั่งมากกว่า 22 ที่นั่ง ต้องผ่านการทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียง (รวมน้ำหนักผู้โดยสารและสัมภาระ) และต้องไม่พลิกคว่ำที่มุมต่ำกว่า 28 องศา โดยการทดสอบรถ [2] ซึ่งการทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงนั้น ได้มีการใช้นานแล้ว เช่น เครื่องทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงของ M.A.N. Corporation ซึ่งพัฒนาโดย Isermann เมื่อปี ค.ศ. 1970 [3] เครื่องทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงของ The Swedish National Road and Traffic Research Institute ในปี ค.ศ. 1978 [4] หรือเครื่องทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงของ Australian Road Research Board ในปี ค.ศ. 1984 [5] เป็นต้น ส่วนรถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรมนั้น ตามมาตรฐาน มอก. 1315-2538 หัวข้อที่ 7 เสถียรภาพบนพื้นเอียง ระบุว่ามุมเอียงเมื่อล้อข้างซ้ายหรือข้างขวาเริ่มไม่สัมผัสพื้นทดสอบ ต้องไม่น้อยกว่า 40 องศา และมุมเอียงทั้ง 2 ค่าจะแตกต่างกันได้ไม่เกิน 5 องศา [6]

การทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียงนั้น ตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างยิ่งคือ จุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง (center of gravity, CG.) หากยานยนต์มีจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงสูง ก็มีโอกาที่จะเกิดการพลิกคว่ำได้มากกว่ายานยนต์ที่มีจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงต่ำ และค่ามุมเอียงที่ยานยนต์สามารถทรงตัวได้โดยไม่พลิกคว่ำ (ϕ_{roll}) จะสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง ตามภาพที่ 2 [7] ซึ่งค่า ϕ_{roll} หรือ Static Stability Factor (SSF) คำนวณได้จากสมการที่ 1 โดย ϕ_{roll} คือ มุมที่กำหนดตามมาตรฐานการทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียงของยานยนต์ประเภทนั้น ๆ นั้นเอง



ภาพที่ 1 เครื่องทดสอบการทรงตัวบนพื้นเอียงของกรมการขนส่งทางบกสำหรับทดสอบรถโดยสาร

$$\phi_{roll} = SSF = \frac{b}{2h} \quad (1)$$



ภาพที่ 2 มุมเอียงที่ยานยนต์สามารถทรงตัวอยู่ได้โดยไม่พลิกคว่ำ

การหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงของยานยนต์นั้น สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. วิธี Static wheel payload โดยการชั่งน้ำหนักยานยนต์บนพื้นเอียง ตามภาพที่ 3 แล้วนำน้ำหนักที่ชั่งได้ของแต่ละล้อมาคำนวณตามสมการที่ 2-6 [7]

$$l_1 = \frac{(P_3 + P_4)L_1 + (P_5 + P_6)L_2}{P_{total}} \quad (2)$$

$$t = \left[(P_1 - P_2) \frac{T_1}{2} + (P_3 - P_4) \frac{T_2}{2} + (P_5 - P_6) \frac{T_3}{2} \right] \frac{1}{P_{total}} \quad (3)$$

$$h_0 = r + \left(\frac{1}{\tan \alpha} \right) \left(l_1 - L_1 \frac{F_3 + F_4}{P_{total}} \right) \quad (4)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{H}{L_1} \right) \quad (5)$$

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \quad (6)$$

เมื่อ:

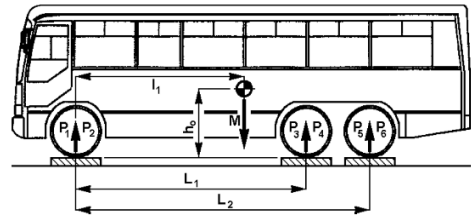
P_1 และ P_2 คือ น้ำหนักที่ล้อหน้าซ้าย ล้อหน้าขวา ตามลำดับ เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ (N)

P_3 และ P_4 คือ น้ำหนักที่ล้อหลังซ้าย และล้อหลังขวา ตามลำดับ ของชุดเพลลาที่สอง เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ (N)

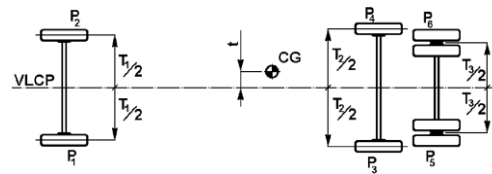
P_5 และ P_6 คือ น้ำหนักที่ล้อหลังซ้าย และล้อหลังขวาตามลำดับ ของชุดเพลลาที่สาม เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ (N)

F_1 และ F_2 คือ น้ำหนักที่ล้อหน้าซ้าย ล้อหน้าขวา ตามลำดับ เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวเอียง (N)

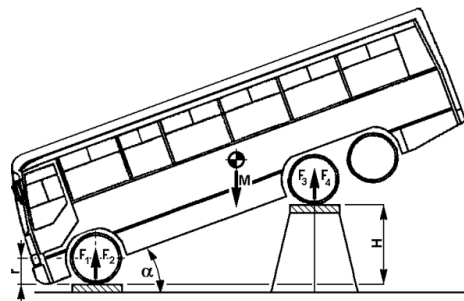
F_3 และ F_4 น้ำหนักที่ล้อหลังซ้าย และล้อหลังขวา ตามลำดับ ของชุดเพลลาที่สอง เมื่อชั่งน้ำหนักในแนวเอียง (N)



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 3 วิธีการชั่งน้ำหนักเพื่อหาจุดศูนย์กลาง

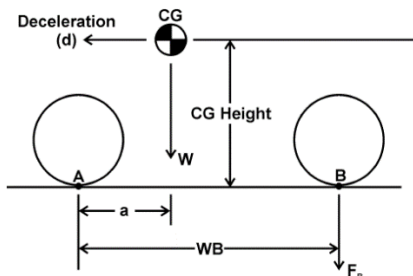
ความโน้มถ่วงด้วยวิธี Static wheel payload

- (ก) มุมมองด้านบน แสดงระยะต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง ขณะชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ
- (ข) มุมมองด้านบน แสดงระยะต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง ขณะชั่งน้ำหนักในแนวระนาบ
- (ค) มุมมองด้านข้าง แสดงระยะต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง ขณะชั่งน้ำหนักในแนวเอียง

2. วิธี Dynamic wheel payload จะหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงได้โดยการวัดค่าแรงปฏิกิริยาที่ล้อยานยนต์ในขณะที่ยานยนต์กำลังเบรก ตามภาพที่ 4 แล้วทำการคำนวณตามสมการที่ 7 และ 8 [8] จะสามารถหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 การหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วงด้วยวิธี Dynamic wheel payload (ก) แสดงภาพจำลองอุปกรณ์ทดสอบ (ข) แสดงระยะต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาจุดศูนย์กลางความโน้มถ่วง

$$CG. Height = \left(\frac{g}{d}\right) \left(\frac{WB}{W}\right) (W_B - F_B) \quad (7)$$

$$a = WB \left(\frac{W_B}{W}\right) \quad (8)$$

เมื่อ:

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (N/m^2)

d คือ ค่าความหน่วงจากการเบรก (N/m^2)

WB ระยะห่างระหว่างเพลาน้ำกับเพลาลัง (m)

W คือ น้ำหนักรวมของยานยนต์ขณะหยุดนิ่ง (N)

W_B คือ น้ำหนักรวมของเพลาลังขณะหยุดนิ่ง (N)

F_B คือ น้ำหนักรวมของเพลาลังขณะกำลังเบรกด้วย

ความหน่วง d (N)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายทั้งในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างยานยนต์ เช่น การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงฐาน (Chassis) รถใช้งานเกษตรกรรม [9, 10] ที่ได้วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงฐาน ทั้งแบบจุดเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็งและแบบจุดเชื่อมต่อแบบยืดหยุ่น ซึ่งผลการวิเคราะห์แตกต่างกันมีนัยสำคัญคือการวิเคราะห์แบบจุดเชื่อมต่อแบบยืดหยุ่นจะให้ค่าการเสียรูปของโครงสร้างใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองมากกว่าแบบจุดเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็ง เป็นต้น และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของยานยนต์ และได้รับการยอมรับว่ามีความถูกต้องเชื่อถือได้ โดยเฉพาะการวิเคราะห์การเสียรูปของโครงสร้างเมื่อเกิดการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE R66 Annex 9 ของสหภาพยุโรป [11] และมาตรฐาน FMVSS220 ของสหรัฐอเมริกา [12] ในส่วนของการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้สำหรับการทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงนั้น งานวิจัยของ L. Prochowski et al. (2012) [13] ได้ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของรถโดยสารขณะขับเลี้ยวโค้งว่าจะสามารถขับด้วยความเร็วเท่าใด

โดยไม่เกิดการพลิกคว่ำ ซึ่งหลักในการพิจารณาว่ารถโดยสารจะพลิกคว่ำหรือไม่ จะสังเกตจากแรงปฏิกิริยาที่ล้อฝั่งที่อยู่ใกล้จุดศูนย์กลางความโค้ง ถ้าน้อยกว่าหรือเท่ากับศูนย์จะถือว่ารถโดยสารเกิดการพลิกคว่ำ ซึ่งในงานวิจัยของ D. Croccolo et al เมื่อปี ค.ศ. 2011 ก็ได้กล่าวเช่นเดียวกัน [14] ค่าพารามิเตอร์หนึ่งที่สำคัญสำหรับการพิจารณาว่ายานยนต์เกิดการพลิกคว่ำหรือไม่ คือ lateral-load transfer ratio (LTR) [15] ซึ่งคือค่าเดียวกันกับ Rollover Index [16] แสดงได้ดังสมการที่ 9 เมื่อ F_r คือ แรงปฏิกิริยาที่ล้อด้านขวา F_l คือ แรงปฏิกิริยาที่ล้อด้านซ้าย ซึ่งยานยนต์จะเกิดการพลิกคว่ำเมื่อ LTR หรือ Rollover Index มีค่าเท่ากับศูนย์ หรือแรงปฏิกิริยาที่ล้อด้านใดด้านหนึ่งเป็นศูนย์นั่นเอง

$$LTR = \text{Rollover Index} = \frac{F_l - F_r}{F_l + F_r} \quad (9)$$

งานวิจัยที่มีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้สำหรับปัญหาเสถียรภาพของยานยนต์นั้น บางส่วนจะมุ่งเน้นในการหาวิธีการหรืออัลกอริทึมในการวัดค่า LTR แบบเรียลไทม์ [15, 17] และบางส่วนจะมุ่งเน้นศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพหรือความสามารถในการต้านทานต่อการพลิกคว่ำบนพื้นเอียง [16, 18] ซึ่งล้วนแต่ใช้ซอฟต์แวร์ขั้นสูง

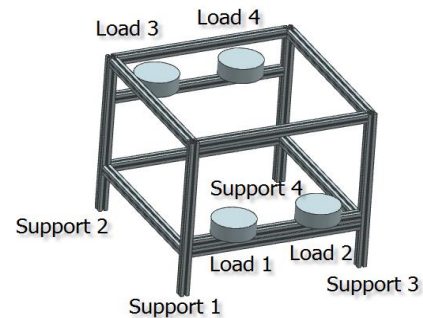
งานวิจัยนี้จึงมีความสนใจมุ่งเป้าไปที่การหาวิธีการกำหนดค่าขอบเขตในการวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงและค่ามุมเอียงที่ยานยนต์สามารถทรงตัวได้โดยไม่พลิกคว่ำ (ϕ_{roll}) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ปัจจุบันการใช้ซอฟต์แวร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

สำหรับปัญหาเสถียรภาพหรือมุมเอียงของยานยนต์จะนิยมใช้ซอฟต์แวร์ขั้นสูงที่ต้องติดตั้งเพิ่มเติมจากซอฟต์แวร์หลัก เช่น LS-DYNA [19, 20] MSC ADAM/Car [18] TruckSim [17] เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งใช้ซอฟต์แวร์หลักพื้นฐานในเชิงพาณิชย์ที่ไม่ได้มีการติดตั้งโมดูลหรือเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม การวิเคราะห์จะเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่ไม่ได้มีการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม กับผลการทดลองโครงสร้างจริงซึ่งเป็นโครงสร้างอย่างง่าย ผลการศึกษานี้จะทำให้ได้มาซึ่งวิธีการในการกำหนดค่าขอบเขตของคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงของโครงสร้างยานยนต์ เช่น รถโดยสาร รถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรม สำหรับการออกแบบโครงสร้างยานยนต์ก่อนนำไปผลิตเป็นโครงสร้างจริงสำหรับผู้บริโภคต่อไป โดยคณะผู้วิจัยคาดหวังว่าการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้เขี่ยานยนต์ในด้านของความปลอดภัยของโครงสร้างและเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตรายานยนต์ในด้านของการออกแบบและผลิต

2. วัสดุและวิธีการวิจัย

การศึกษาเพื่อหาวิธีการกำหนดค่าขอบเขตของการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ในการวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงของโครงสร้างยานยนต์ได้ทำขึ้นโดยการสร้างโครงสร้างอย่างง่ายขนาด 800 x 800 x 800 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 5 โครงสร้างทำจากวัสดุอลูมิเนียมโปรไฟล์ หน้าตัด 40 x 40 มิลลิเมตร

มีค่ามอดุลัสของยัง 71 จิกะพาสคัล อัตราส่วนของปัวซอง 0.33 และค่าความเค้นคราก 280 เมกะพาสคัล โครงสร้างมี 4 ขา (4 support) แทนล้อของยานยนต์ทั้ง 4 ล้อ คือ support 1 support 2 support 3 และ support 4 การวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงทำได้โดยการวางมวลทรงกระบอก (Load) มวล 13 กิโลกรัม มีค่ามอดุลัสของยัง 199 จิกะพาสคัล อัตราส่วนของปัวซอง 0.30 และค่าความเค้นคราก 245 เมกะพาสคัล มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 200 มิลลิเมตร สูง 75 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น วางสลับตำแหน่ง ดังตารางที่ 1 โดยจุดศูนย์กลางมวลของ Load 1 อยู่สูงจากพื้น 300 มิลลิเมตร วางห่างจากจุดศูนย์กลางของเสา Support 1 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางมวลของ Load 2 อยู่สูงจากพื้น 300 มิลลิเมตร วางห่างจากจุดศูนย์กลางของเสา Support 3 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางมวลของ Load 3 อยู่สูงจากพื้น 650 มิลลิเมตร วางห่างจากจุดศูนย์กลางของเสา Support 2 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร และจุดศูนย์กลางมวลของ Load 4 อยู่สูงจากพื้น 650 มิลลิเมตร วางห่างจากจุดศูนย์กลางของเสา Support 4 เป็นระยะ 200 มิลลิเมตร จากนั้นจึงใช้เครื่องยกแบบไฮดรอลิคค่อย ๆ ยกจนกว่าโครงสร้างอย่างง่ายจะเริ่มพลิกคว่ำโดยสังเกตจากขา Support ด้านที่ถูกยกเริ่มลอยพ้นจากพื้นทั้ง 2 ข้าง แล้วบันทึกค่ามุมองศาที่เกิดการพลิกคว่ำ และทำซ้ำโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของมวลทรงกระบอก 4 กรณี วิธีการวัดมุมเอียงของโครงสร้างอย่างง่ายทำได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมแบบเข็มตามภาพที่ 1 จากนั้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม



ภาพที่ 5 แบบจำลองโครงสร้างอย่างง่าย

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนตำแหน่งของมวลทรงกระบอกทั้ง 4 กรณี

กรณีที่	ตำแหน่งของมวลทรงกระบอก			
	Load 1	Load 2	Load 3	Load 4
1	/	x	/	x
2	/	x	x	/
3	x	/	/	x
4	x	/	x	/

ในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมจะพิจารณาภายใต้สมมติฐานการกระทำแบบสถิตศาสตร์และสมบัติวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น วิเคราะห์โดยกำหนดให้เอเลเมนต์เป็นแบบคาน 3 มิติ น้ำหนักของมวลกำหนดให้เป็นแบบจุด วิธีการวัดมุมเอียงของโครงสร้างอย่างง่ายในการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์จะกระทำได้โดยการป้อนค่าน้ำหนักของมวลทรงกระบอกให้ทำมุมเอียงจากแกนตั้งฉากจากพื้น แทนที่ในการตัดสินใจว่าโครงสร้างอย่างง่ายเกิดการพลิกคว่ำจะพิจารณาจากแรงปฏิกิริยาของขา (Support) ฝั่งตรงข้ามกับจุดหมุน หากแรงปฏิกิริยาเริ่มน้อยกว่าศูนย์ แสดงว่าโครงสร้างอย่างง่ายเริ่มพลิกคว่ำ

เช่น หากจุดหมุนของโครงสร้างอยู่ที่ขา support 1 และ support 2 ก็จะพิจารณาแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 เป็นต้น

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียงของ โครงสร้างอย่างง่าย โดยเปลี่ยนตำแหน่งของมวล ทรงกระบอ 4 กรณี ดังภาพที่ 6 ผลการทดลองมุมที่ โครงสร้างเกิดการพลิกคว่ำของแต่ละกรณีแสดงได้ดัง ตารางที่ 2



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 6 การทดสอบการพลิกคว่ำของโครงสร้าง

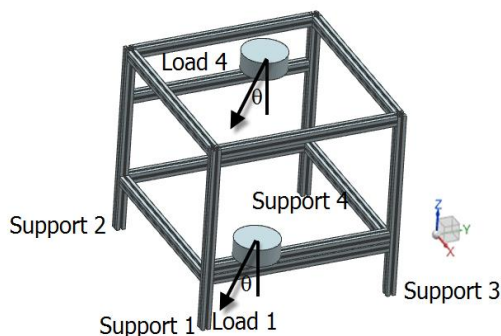
(ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2

(ค) กรณีที่ 3 และ (ง) กรณีที่ 4

ตารางที่ 2 มุมเอียงที่ทำให้โครงสร้างพลิกคว่ำเมื่อ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเป็นแบบที่ 1

กรณี ที่	ตำแหน่ง ของมวล	มุมเอียงที่ทำให้โครงสร้าง พลิกคว่ำ (องศา)		ค่าความ คลาดเคลื่อน สัมบูรณ์ (%)
		ทรง กระบอ	คอมพิวเตอร် ช่วย วิเคราะห์ ทาง วิศวกรรม	
1	load1/ load3	33	54	63.63
2	load1/ load4	43	53	23.25
3	load2/ load3	43	62	44.18
4	load2/ load4	53	62	16.98

ในการจำลองโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม จะกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 1 คือ ให้ขาทั้งสี่เป็นแบบจุดรองรับอย่างง่าย (Simply support) จุดหมุนเป็นขา support 1 และ support 2 แล้วใส่แรงกระทำในตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 4 กรณีนี โดยให้แรงกระทำจากมวลทรงกระบอกทำมุมเอียงตามภาพที่ 7 พิจารณาแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 หากแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 มีค่ามากกว่าศูนย์ก็ให้เพิ่มมุมเอียงไปเรื่อย ๆ จนกว่าแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 ทั้งสองขาจะเป็นศูนย์ เช่น ในกรณีที่ 2 ตำแหน่งของมวลทรงกระบอกจะอยู่ที่ load1 และ load4 เมื่อเพิ่มมุมเอียงไปเรื่อย ๆ จะพบว่าที่ขา support 3 แรงปฏิกิริยามีค่าเป็นบวก แต่แรงปฏิกิริยาที่ขา support 4 มีค่าเป็นลบ จึงเพิ่มมุมเอียงไปอีกจนแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 มีค่าเป็นศูนย์



ภาพที่ 7 แสดงการใส่ภาระเป็นมุมเอียงเสมือน การทดสอบเสถียรภาพบนพื้นเอียง

Applied load 1 and 4 with rollover angle θ

Z-axis reaction force result:
- Support 3 was positive value
- Support 4 was negative value

Increase θ until reaction force of support 3 converse to zero, thus θ = rollover angle

(ก)

Applied load 1 and 4 with rollover angle θ

Z-axis reaction force result:
- Support 3 was positive value
- Support 4 was negative value

Suppress support that has negative reaction force (support 4)

Re-FEA.

Increase θ until reaction force of support 3 converse to zero, thus θ = rollover angle

(ข)

ภาพที่ 8 แผนผังการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (ก) แบบที่ 1 (ข) แบบที่ 2 สำหรับตำแหน่งของมวลทรงกระบอกกรณี 2

ผลจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเมื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 1 พบว่ามุมที่ทำให้โครงสร้างพลิกคว่ำมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดสอบโครงสร้างจริงมาก สาเหตุเนื่องจากเมื่อใส่แรงกระทำเป็นมุมเอียงทำให้แรงปฏิกิริยาที่ขา support 4 มีค่าลบ แต่แรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 ยังมีค่าบวกอยู่ แล้วเพิ่มมุมเอียงไปเรื่อย ๆ

จนกว่าแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 มีค่าเป็นศูนย์นั้น เปรียบเสมือนแรงปฏิกิริยาที่ขา support 4 ที่มีค่าลบ นั้นได้ดึงโครงสร้างไว้ไม่ให้พลิกคว่ำ จึงทำให้ผลการ จำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมได้ มุมที่ทำให้โครงสร้างพลิกคว่ำมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จาก การทดสอบโครงสร้างจริง ดังนั้นจึงได้มีการกำหนด เงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 2 ตามภาพที่ 8(ข) ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกให้กำหนดค่าเงื่อนไขของเขต ตามเดิมคือแบบที่ 1 แล้วพิจารณาแรงปฏิกิริยาที่ขา support 3 และ support 4 เมื่อทราบค่าแรงปฏิกิริยา ที่ขา support ข้างใดมีค่าเป็นลบก่อน ก็ให้กำหนด ค่าเงื่อนไขขอบเขตใหม่ ขั้นตอนที่ 2 คือการกำหนด ค่าเงื่อนไขขอบเขตใหม่ โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ให้ขา support ข้างที่มีแรงปฏิกิริยาเป็นลบก่อนนั้นให้เป็น อิสระ คงเหลือค่าเงื่อนไขขอบเขตแบบจุดรองรับอย่าง ง่าย (Simply support) เฉพาะขา support อีกข้างหนึ่ง ที่มีแรงปฏิกิริยาเป็นค่าบวกอยู่เท่านั้น เช่น ในกรณีที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 8(ข) ตำแหน่งของมวลทรงกระบอก จะอยู่ที่ load1 และ load4 ขั้นตอนแรกจะกำหนดค่า เงื่อนไขของเขตตามเดิมคือแบบที่ 1 เมื่อเพิ่มมุมเอียง ไปเรื่อย ๆ จะพบว่าที่ขา support 3 แรงปฏิกิริยามีค่า เป็นบวก แต่แรงปฏิกิริยาที่ขา support 4 มีค่าเป็นลบ จึงดำเนินการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตใหม่ในขั้นตอนที่ 2 คือ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้ขา support 4 ที่มีแรง ปฏิกิริยาเป็นลบก่อนให้เป็นอิสระ คงเหลือค่าเงื่อนไข ขอบเขตแบบจุดรองรับอย่างง่าย (Simply support) เฉพาะขา support 3 แล้วเพิ่มมุมเอียงไปจนกว่าแรง ปฏิกิริยาที่ขา support 3 จะมีค่าเป็นศูนย์ โดยมุม ดังกล่าวถือว่าเป็นมุมที่ทำให้โครงสร้างเกิดการพลิก

คว่ำ เป็นต้น ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ช่วย วิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อหามุมองศาที่โครงสร้างเริ่ม พลิกคว่ำแสดงในตารางที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับผล จากการทดสอบโครงสร้างจริง พบว่าวิธีการกำหนดค่า เงื่อนไขขอบเขตแบบที่ 2 เกิดค่าความคลาดเคลื่อน น้อย โดยกรณีที่ 1 มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด เพียงร้อยละ 2.42 และกรณีที่ 3 มีค่าความคลาดเคลื่อน น้อยสุดเพียงร้อยละ 1.62 ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิธีการ กำหนดค่าของเขตแบบที่ 2 มีความน่าเชื่อถือและ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพ บนพื้นเอียงของโครงสร้างยานยนต์ เช่น รถโดยสาร รถบรรทุกใช้งานเกษตรกรรม สำหรับการออกแบบ โครงสร้างยานยนต์ก่อนนำไปผลิตเป็นโครงสร้างจริง สำหรับผู้บริโภคต่อไป ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภค ในด้านของความปลอดภัยของโครงสร้างยานยนต์ และ ผู้ผลิตรายอื่นในด้านของการออกแบบและผลิต

4. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการหาวิธีการกำหนดค่า ขอบเขตในการวิเคราะห์เสถียรภาพบนพื้นเอียงและค่า มุมเอียงที่ยานยนต์สามารถทรงตัวได้โดยไม่พลิกคว่ำ (Φ_{roll}) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดย คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม พิจารณา ภายใต้อสมมติฐานภาระกระทำแบบสถิตศาสตร์และ สมบัติวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น การวิเคราะห์จะ เปรียบเทียบกับผลการทดลองโครงสร้างจริงซึ่งเป็น โครงสร้างอย่างง่ายขนาด 800 x 800 x 800 มิลลิเมตร โครงสร้างทำจากวัสดุอลูมิเนียมโปรไฟล์ หน้าตัด 40 x 40 มิลลิเมตร โครงสร้างมี 4 ขา แทนล้อของยานยนต์

ทั้ง 4 ล้อ โดยทดลองสลับตำแหน่งของมวลทรงกระบอก เป็น 4 กรณี การทดสอบโครงสร้างจริงทำได้โดยใช้ เครื่องยกแบบไฮดรอลิคค่อย ๆ ยกจนกว่าโครงสร้าง อย่างง่ายจะเริ่มพลิกคว่ำ ผลการทดลองพบว่า เมื่อ กำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของการวิเคราะห์โดยใช้ คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมด้วยวิธีที่ 1 คือ กำหนดให้หาทั้งสี่ของโครงสร้างอย่างง่ายเป็นแบบจุด รองรับอย่างง่าย ทำการใส่ภาระเป็นแรงกระทำในมุม เอียงแล้วสังเกตแรงปฏิกิริยาที่หาทั้งสองข้างของฝั่งที่ ถูกยก หากแรงปฏิกิริยาที่หาข้างหนึ่งมีค่าเป็นบวกแต่ อีกข้างหนึ่งมีค่าเป็นลบ ให้เพิ่มมุมเอียงอีกจนกว่าแรง ปฏิกิริยาของขาด้านที่เป็นบวกจะเป็นศูนย์ และให้ถือว่า มุมดังกล่าวคือมุมที่ทำให้โครงสร้างเริ่มพลิกคว่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบโครงสร้างจริงแล้ว พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 4 กรณี มีค่ามากที่สุด ถึงร้อยละ 63.63 และน้อยที่สุดถึงร้อยละ 16.98 จึงได้ ทำการวิเคราะห์ใหม่โดยกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตของ การวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทาง วิศวกรรมด้วยวิธีที่ 2 โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเหมือนวิธีที่ 1 เมื่อ พบว่าแรงปฏิกิริยาที่หาข้างหนึ่งมีค่าเป็นบวกแต่อีกข้าง หนึ่งมีค่าเป็นลบ ให้กำหนดเงื่อนไขขอบเขตขั้นตอนที่ 2 คือกำหนดให้หาข้างที่มีแรงปฏิกิริยามีค่าเป็นลบจาก ขั้นตอนแรกให้เป็นอิสระ และกำหนดค่าเงื่อนไข ขอบเขตของอีกสามขาเป็นแบบจุดรองรับอย่างง่าย แล้วสังเกตแรงปฏิกิริยาและให้ถือว่ามุมที่ทำให้แรง ปฏิกิริยาเป็นศูนย์คือมุมที่ทำให้โครงสร้างเริ่มพลิกคว่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบโครงสร้างจริงแล้ว

พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนทั้ง 4 กรณี มีค่ามากที่สุด เพียงร้อยละ 2.42 และน้อยที่สุดเพียงร้อยละ 1.62

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการจัดตั้งคณะ วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ที่สนับสนุนเครื่องมือและ อุปกรณ์ในการวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ประกาศกรมการขนส่งทางบก. กำหนด เกณฑ์การทรงตัวของรถที่ใช้ในการขนส่ง ผู้โดยสาร. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 129 ตอน พิเศษ 81 ง หน้า 27: กรุงเทพมหานคร; 2555.
- [2] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Addendum 106: Regulation No. 107 Uniform provisions concerning the approval of category M2 or M3 vehicles with regard to their general construction. Revision3: 2011.
- [3] Isermann H. Overturning Limits of Articulated Vehicles with Solid and Liquid Loads. Motor Industry Research Association. 1970; Translation No. 58/70.

- [4] Norstrom O and Nordmark S. Test Procedure for the Evaluation of the Lateral Dynamics of Commercial Vehicle Combination. Automobile Industry. 1978; 23(2): 63-9.
- [5] Mai L and Sweatman P. Articulated Vehicle Stability – Phase II Tilt Test and Computer Model. Australian Road Research Board. 1984; AIR 323-2.
- [6] ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่ 2093 (พ.ศ. 2538) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2511 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม รถใช้งานเกษตรกรรม รถขนส่งเกษตร. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 112 ตอนที่ 103ง. หน้า 63-80; กรุงเทพมหานคร; 2538.
- [7] Transit Office Florida Department of Transportation. Crash and Safety Testing Standard for Paratransit Buses. 2nd ed. Acquired by the State of Florida; 2007.
- [8] Davis M and Marting P. Predicting Vehicle Rollover Propensity. International Truck and Bus Meeting and Exhibition Detroit; 2002 November 18-20; Michigan, United States of America: 2002.
- [9] Wichairahad J, Kaewsarn P, Nisapai W, Tan-Intara-Art S and Chanwiang W. The strength analysis of an agriculture truck chassis using finite element method. Engineering and Applied Science Research. 2016; 43(S2): 267-70.
- [10] Wichairahad J, Nisapai W, Kangkham K, Chanwiang W and Sutthi R. The Strength and Stiffness Analysis of Agricultural Truck Chassis using Finite Element Analysis by Flexible Joint Beam Element. Farm Engineering and Automation Technology. 2019; 5(1): 35-48.
- [11] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Addendum 65: Regulation No. 66 Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure. 1st ed; 2006.
- [12] National Highway Traffic Safety Administration (NHTS. U.S. Department of Transportation. FMVSS220 Standard School Bus Rollover Protection. Washington DC, United States of America: 1991.

- [13] Prochowski L, Zielonka K and Muszynski A. Analysis of the process of double-deck bus rollover at the avoidance of an obstacle having suddenly sprung up. *Journal of KONES*. 2012; 19: 371-80.
- [14] Croccolo D, Agostinis MD and Vincenzi N. Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis via FEM: a Methodology Applied to a case study. *Journal of Mechanical Engineering* 2011; 57(11): 799-809.
- [15] Zhilin J, Jingxuan L, Yanjun H and Amir K. Study on Rollover Index and Stability for a Triaxle Bus. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2019; 32: 1-15.
- [16] Zulkipli ZH, Mohd Faudzi SA and Abdul Manap AR. Factors Affecting Bus Rollover. *Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia*. 2019; 3(4): 2-7.
- [17] Shun T, Lang W, Chris S, WenCai Z, Yuan J and YanQin C. An Earlier Predictive Rollover Index Designed for Bus Rollover Detection and Prevention. *Journal of Advanced Transportation*. 2018; 1-10.
- [18] Thanaporn T and Supakit R. Influence of suspension parameters on a tilt angle of passenger bus for the stability test. *Science, Engineering and Health Studies*. 2020; 14(2): 101-108.
- [19] Liang CC and Le GN. Analysis of Bus Rollover Protection under Legislated Standard using LS-DYNA Software Simulation Techniques. *International Journal of Automotive Technology*. 2010; 11(4): 194-506.
- [20] Jiantao B, Guangwei M and Wenjie Z. Rollover crashworthiness analysis and optimization of bus frame for conceptual design. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2019; 33(7): 3363-73.