การออกแบบและประเมินสมรรถนะของจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษ

The Design and Evaluation Performance Connection Support of Toll Booth Prototype

ธราดล หงส์อติกุล[1,*] นันทวรรณ พิทักษ์พานิช[2] เทพฤทธิ์ รัตนปัญญากร[3]

[1,2,3] กองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย แขวงเสนานิคม เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร

**Corresponding author; E-mail address: titharadon@gmail.com*

บทคัดย่อ

จากปัญหาการเสื่อมสภาพของตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษเดิมที่ติดตั้งใช้งานบนทางพิเศษจึงเป็นที่มาของการพัฒนาและออกแบบต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ให้มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม แข็งแรงปลอดภัยและทันสมัย โดยการออกแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จะต้องคำนึงถึงการป้องกันกรณีการเกิดอุบัติเหตุต่าง ๆ ให้รอบด้าน จึงเป็นที่มาของการออกแบบจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ในบทความนี้ได้กล่าวถึงกรณีรถบรรทุกขนาด 6 ล้อ (น้ำหนัก 15 ตัน) มีการเฉี่ยวชนในทิศทางที่ 0 องศา และ 45 องศาซึ่งเป็นองศาที่อาจเกิดการเฉี่ยวชนขึ้นจริงกับตู้เก็บค่าผ่านทาง เพื่อคำนวณหาจุดยึดที่มีความสามารถในการต้านทานแรงกระทำต่อการเฉี่ยวชน และหาลักษณะการเสียรูปของจุดยึดในองศาการเฉี่ยวชนดังกล่าวด้วยวิธี Finite Element ผ่านโปรแกรมการวิเคราะห์แบบจำลอง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองแสดงให้เห็นว่า สมรรถนะของจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ สามารถต้านทานแรงกระทำจากการเฉี่ยวชนที่องศาดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และจากการเฉี่ยวชนจะเกิดแรงอัดที่ส่งผลต่อสลักเกลียวกับแผ่นเหล็กซึ่งทำให้เกิดการฉีกขยายของแผ่นเหล็กเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

คำสำคัญ: การเฉี่ยวชน, จุดยึดติดตั้ง, ต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษ

Abstract

A new version of toll booth was established because of the deteriorated of previously toll booth one. A new toll booth was designed for more resistance to the environment, strong, safely and modern. The toll booth design was concern an accident cases which might effected to the toll booth, which is the cause of “connection support” design. In this paper mention about the model to analyse under the collision force of 6-wheels truck (weight = 15 ton) case. Collision force would be found by calculate the collision force in the direction 0 and 45 degree. The direction of 0 and 45 degree are the accident case that possibly occurs. To calculate a support connection capacity and deformation shape by using finite element program to analyse a support connection performance. In this case, we use the program to analyse support connection performance at the base of toll booth. The result shows that support connection performance at the base of toll booth can be resist the collision force effectively with a little damage at the bolt hole failure mode from bearing deformation at the steel plate.

Keywords: Collision, Support Connection, Prototype of Toll Booth

1. บทนำ

จากปัญหาอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากการเฉี่ยวชนตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จากรถบรรทุกขนาดใหญ่ที่ได้สร้างความเสี่ยงที่ชีวิตและทรัพย์สินดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อเป็นการป้องกัน และเพิ่มความปลอดภัยให้แก่พนักงานจัดเก็บค่าผ่านทางฯ จึงจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบสภาพตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ที่ติดตั้งใช้งานบนทางพิเศษเนื่องจาก พบว่าในบางตู้เก็บค่าผ่านทางฯ มีการเสื่อมสภาพลงและต้องดำเนินการบำรุงรักษาในกรณีตรวจพบจุดที่มีความเสียหาย หรือ มีการเสื่อมสภาพของชิ้นส่วนโครงสร้างตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เพื่อปรับปรุงตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ให้มีความมั่นคงแข็งแรง ที่เพียงพอสำหรับรองรับการใช้งาน

รูปที่ 1 อุบัติเหตุการเฉี่ยวชนตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จากรถบรรทุกขนาดใหญ่

ในการติดตั้งต้นแบบตู้ค่าผ่านทางจะต้องคำนึงถึงความแข็งแรง และความปลอดภัยของพนักงานจัดเก็บค่าผ่านทางฯ จึงมุ่งเน้นการออกแบบให้มีความมั่นคงแข็งแรง สามารถรองรับแรงการเฉี่ยวชนในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุบริเวณหน้าด่านได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการจำลองวิเคราะห์สมรรถนะความแข็งแรงของโครงสร้างต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ และจุดยึดติดตั้งบริเวณฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทาง เพื่อประเมินประสิทธิภาพของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ และหาจุดที่อาจจะมีการวิบัติ หรือ บริเวณที่อาจมีความเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เกิดขึ้น เพื่อให้ตู้เก็บค่าผ่านทางฯ สามารถต้านทานแรงปะทะที่เกิดจากการเฉี่ยวชนที่เกิดขึ้นได้โดยปราศจากการสร้างความเสียหายในชีวิตและทรัพย์สินของพนักงานจัดเก็บค่าผ่านทางฯ

งานวิจัยนี้จะศึกษาการเฉี่ยวชนของรถบรรทุกขนาด 6 ล้อที่เฉี่ยวชนตู้เก็บค่าผ่านทางในแต่ละองศา เพื่อนำมาวิเคราะห์และออกแบบจุดยึดติดตั้งที่ฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ที่มีความแข็งแรงและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ยึดติดตั้งที่ฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ใช้งานจริงตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษที่สุด

2. วัตถุประสงค์และประโยชน์ที่จะได้รับ

2.1 วัตถุประสงค์

1) เพื่อศึกษาและออกแบบจุดยึดติดตั้งที่ฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ที่มีความมั่นคงแข็งแรง สามารถรองรับแรงกระแทกจากการเฉี่ยวชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพของจุดยึดติดตั้งที่ฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ และหาจุดที่อาจจะมีการวิบัติ หรือ บริเวณที่อาจมีความเสียหายของชิ้นส่วนของจุดยึดติดตั้งที่ฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เกิดขึ้น

2.2 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1) ได้วิธีการพิจารณาออกแบบจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ให้มีความมั่นคงแข็งแรง สามารถรองรับแรงกระทำจากการเฉี่ยวชนจากรถบรรทุกได้อย่างเพียงพอ

2) ช่วยลดความเสียหายจากการเกิดอุบัติเหตุจากการพลิกคว่ำหลุดออกจากฐานของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เนื่องจากการเฉี่ยวชนตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จากรถบรรทุก

3) รูปแบบของจุดยึดติดตั้งที่ฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ที่มีความมั่นคงแข็งแรง และเหมาะสำหรับนำไปใช้ยึดติดตั้งที่ฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ใช้งานจริง

3. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 การพิจารณาแรงกระทำจากการเฉี่ยวชนสำหรับวิเคราะห์สมรรถนะของชิ้นส่วนโครงสร้าง

จากการศึกษาแนวทางพิจารณาแรงกระทำสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบจุดยึดติดตั้งฐานโครงสร้างตู้จัดเก็บค่าผ่านทางฯ ซึ่งมี 2 วิธีการคิดที่จะเสนอเพื่อพิจารณาแรงกระทำจากการเฉี่ยวชน ดังนี้

วิธีการคิดแบบที่ 1 จะพิจาณาจากแรงกระทำของยานพาหนะที่เคลื่อนที่เข้าชนกับกำแพงกันชน (Concrete Barrier) สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างรับแรงกระแทกจากการเฉี่ยวชนจะพิจารณาอยู่ในรูปแบบของแรงสถิตย์เทียบเท่า (Equivalent Static Design Force) Philip Terry และ Michael Tholen [1] ได้แนะนำให้ใช้สูตรพื้นฐานในการคำนวณแรงกระทำสำหรับออกแบบ (F) ดังสมการที่ (1)

$$F=ma \quad (1)$$

เมื่อ m คือ มวลของยานพาหนะที่พิจารณา (kg)
a คือ ค่าอัตราความหน่วงของยานพาหนะที่พิจารณา (m/s^2)

ในกรณีที่พิจารณาแรงกระทำตามมาตรฐาน AASHTO (1977) [2] ได้แนะนำหลักการคำนวณแรงกระทำจากข้อมูลที่ได้โดยการทดสอบการชนของยานพาหนะกับกำแพงกันชนคอนกรีต (Concrete Barriers) เพื่อพิจารณาหาค่าอัตราความหน่วงความเร็วสูงสุด (Maximum Deceleration) ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการคำนวณหาแรงกระทำสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดการชน ซึ่งค่าอัตราความหน่วงความเร็วสูงสุด (Maximum Deceleration) ที่เหมาะสมสำหรับช่วงที่ปลอดภัยต่อผู้ขับขี่ (Life Safety) คือระหว่าง 17.7 m/s^2 ถึง 135.3 m/s^2 หรือ ที่ช่วงความเร็ว 12.7 km/hr ถึง 97.5 km/hr โดยค่าแนะนำจะอยู่ที่ประมาณ 117.7 m/s^2 (12g) หรือที่ความเร็วประมาณ 23.54 m/s (85 km/hr) ภายในช่วงระยะเวลาที่เกิดการชนที่ 0.2 s

วิธีการคิดแบบที่ 2 มยผ.1321-61 [3] ได้แนะนำให้พิจารณาแรงกระทำสำหรับออกแบบอันเนื่องมาจากการเฉี่ยวชนของยานพาหนะปะทะกับราวกันตก จากการคำนวณตามหลักการของพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) ที่เกิดจากยานพาหนะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังสมการที่ (2)

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (2)$$

เมื่อ m คือ มวลของยานพาหนะที่พิจารณา (ton)
V คือ ความเร็วของยานพาหนะที่พิจารณาในขณะเคลื่อนที่เข้าชน (m/s)

โดยพลังงานจลน์ดังกล่าวจะสลายไปจากการยุบตัวของรถยนต์และจากการยุบตัวของราวกันตก ซึ่งจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน (Energy Conservation Law) จะสามารถคำนวณแรงกระทำต่อกำแพงกันชนในแนวราบที่เป็นแรงกระทำที่สม่ำเสมอ (F) ดังสมการที่ (3)

$$F = \frac{0.5mv^2}{(\delta_c+\delta_b)} \qquad (3)$$

เมื่อ m คือ มวลของยานพาหนะที่พิจารณา (ton)
V คือ ความเร็วของยานพาหนะที่พิจารณาในขณะเคลื่อนที่เข้าชน (m/s)
δ_c คือ ค่าการยุบตัวของรถยนต์ (m)
δ_b คือ ค่าการยุบตัวของราวกันตกเมื่อมีการชนกระแทก (m)

การยุบตัวของยานพาหนะเมื่อเคลื่อนที่เข้าชนปะทะกับราวกันตกจะเกิดขึ้นในช่วงเสี้ยววินาที และจะเกิดการกระแทกย้อนกลับ ส่งผลทำให้ชิ้นส่วนของยานพานหนะเกิดการเสียรูป อาทิเช่น การงอ การบุบเข้าไปเป็นต้น ซึ่งค่าการยุบตัวนี้จะขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการผลิตยานพาหนะรุ่นต่างๆ โดยอ้างอิงตาม National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) ที่ได้ทำการทดสอบรถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 56.32 km/hr กระแทกกับราวกันตก เพื่อวิเคราะห์หาค่าการยุบตัวที่เกิดจากการชนปะทะ ซึ่งจะใช้สมการในการคำนวณค่าประมาณการยุบตัวของรถยนต์(δ_c) ดังสมการที่ (4)

$$\delta_c = \frac{\sqrt{v}}{6.6}\delta_c \qquad (4)$$

เมื่อ V คือ ความเร็วของยานพาหนะในขณะชนปะทะ (m/s)

การพิจารณาการเสียรูปของโครงสร้างราวกันตกจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ 1) การเสียรูปของโครงสร้างราวกันตกแบบชนิดแข็งเกร็ง ที่สามารถรับแรงชนปะทะที่รุนแรงสูงได้ โดยไม่เกิดการเสียรูป จึงไม่พิจารณาค่าการยุบตัวของราวกันตก (δ_b) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 และ 2) การเสียรูปของโครงสร้างราวกันตกแบบชนิดยืดหยุ่น จะเกิดการเสียรูปหรือมีค่าการยุบตัวมาก ซึ่งสามารถพิจารณาค่าการเสียรูปของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้าง (δ_b) ดังสมการที่ (5)

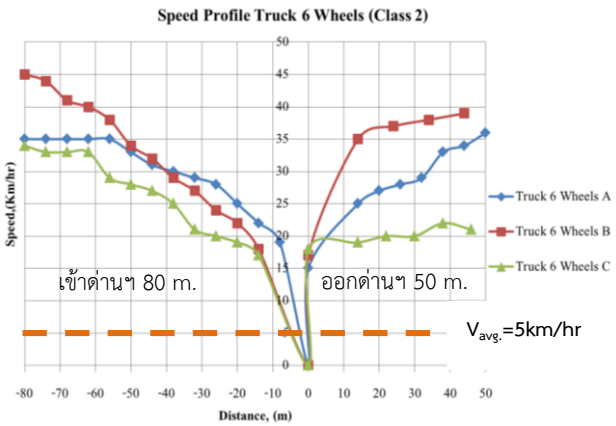
$$\delta_b = \frac{F}{k_b} \qquad (5)$$

เมื่อ k_b คือ สติฟเนส (Stiffness) ของราวกันตก (N/m)
F คือ แรงกระแทกที่กระทำกับราวกันตกในแนวนอน (N)

3.2 ความเร็วที่ใช้ในการพิจาณาแรงกระทำจากการเฉี่ยวชนเพื่อวิเคราะห์ออกแบบจุดยึดติดตั้งที่ฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ

ในการวิเคราะห์หาแรงการเฉี่ยวชนเพื่อออกแบบยึดติดตั้งที่ฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ที่เหมาะสม จะต้องมาจากการเก็บข้อมูลความเร็วของรถบรรทุกที่เข้า – ออกจากหน้าด่านเก็บค่าผ่านทางฯ โดยการเก็บข้อมูลความเร็วแบบจุด (Spot Speed) ซึ่งเป็นการวัดความเร็วโดยตรงจากปืนตรวจจับความเร็ว (Speed Gun) หรือ ปืนเรดาร์ (Radar Gun) ณ บริเวณด่านฯ บางแก้ว 1 แสดงดังรูปที่ 2 เนื่องจากด่านฯ บางแก้ว 1 เป็นด่านฯ ที่มีปริมาณรถบรรทุกขนาดใหญ่มากที่สุดจึงเลือกที่จะเก็บข้อมูลความเร็วจากด่านฯ นี้ โดยเก็บข้อมูลความเร็วของรถบรรทุกในขณะเข้าด่านฯ (ที่ระยะ 80 เมตรจากตู้เก็บค่าผ่านทางฯ) และออกด่านฯ (ที่ระยะ 50 เมตรจากตู้เก็บค่าผ่านทางฯ) ทั้งหมด 3 ตัวอย่างที่แต่ละช่วงเวลาแสดงดังรูปที่ 3

รูปที่ 2 การเก็บข้อมูลความเร็วตัวอย่างรถบรรทุกขนาด 6 ล้อ



รูปที่ 3 ข้อมูลความเร็วตัวอย่างรถบรรทุกขนาด 6 ล้อ

ในการประเมินอัตราเร่งและอัตราหน่วงของความเร็วจะพิจารณาจากข้อมูลความเร็วของรถบรรทุกขนาด 6 ล้อ ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที คำนวณหาความเร่งของความเร็วบนพื้นฐานของสมการอย่างง่ายด้วยวิธี Linear Regression ดังสมการที่ 6

$$V = U + at \quad (6)$$

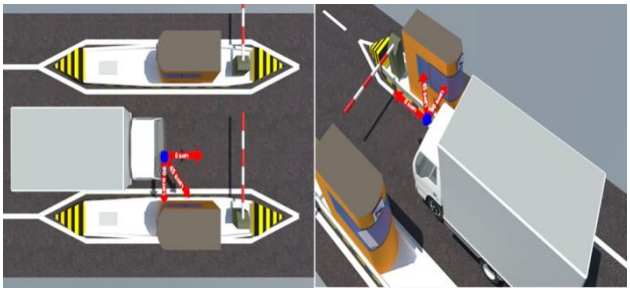
เมื่อ U คือ ความเร็วต้น (m/s)
V คือ ความเร็วปลาย (m/s)
a คือ ค่าอัตราความเร่ง (m/s^2)
t คือ ระยะเวลา (s)

การหาอัตราความเร่งและความหน่วงความเร็วได้จากการเก็บข้อมูลความเร็วตัวอย่างรถบรรทุกขนาด 6 ล้อ ทั้ง 3 ตัวอย่าง ขณะเข้าด่านฯ และออกด่านฯ พบว่าความเร็วเฉลี่ยของรถบรรทุกอยู่ที่ประมาณ 5 km/hr (1.38 m/s) เมื่อพิจารณาจำลองการเฉี่ยวชนของรถบรรทุกเกิดขึ้นภายในช่วงระยะเวลา 0.2 s จะมีค่าอัตราเร่งและอัตราหน่วงความเร็วประมาณ 6.9 m/s^2 (0.70g)

4. การวิเคราะห์และออกแบบจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษ

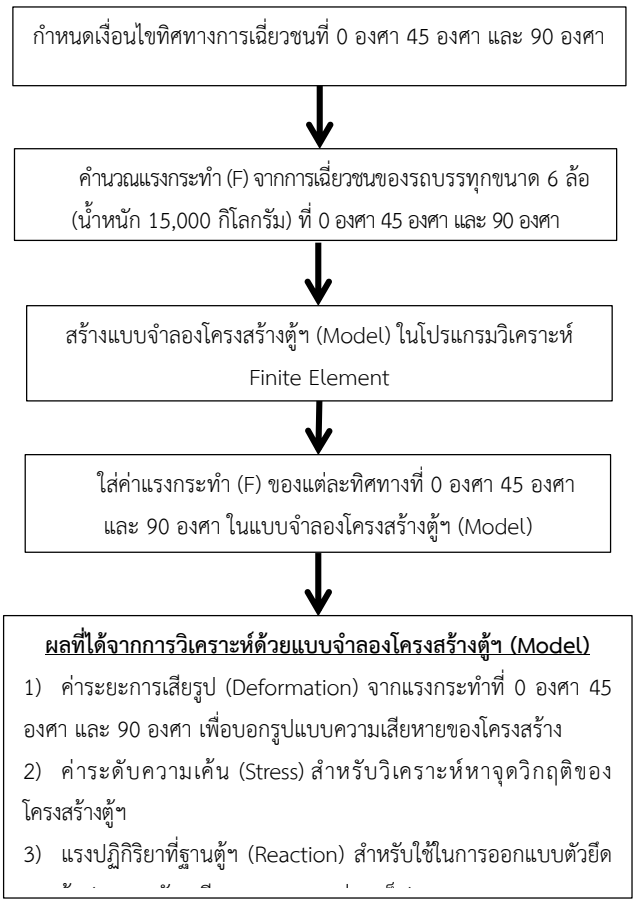
4.1 การวิเคราะห์แรงกระทำจากการเฉี่ยวชนต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ

เพื่อออกแบบหาขนาดตัวยึดต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จะคำนวณออกแบบจากการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธี Finite Element Analysis โดยจำลองแรงกระทำจากรถบรรทุกขนาด 6 ล้อ น้ำหนัก 15 ตัน วิ่งชนด้วยความเร็ว 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (1.38 เมตรต่อวินาที) โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน BS EN 1317-3 [4] (Road Restraint Systems) จากการชนใน 3 ทิศทาง คือ 0 องศา 45 องศา และ 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การจำลองการเฉี่ยวชนของโครงสร้างต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (Model) สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (Model) สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element

<u>กรณีที่ 1</u> แรงเฉี่ยวชนจากรถบรรทุกในทิศทาง 0 องศา ที่จะเป็นการเฉี่ยวชนจากรถบรรทุกที่มีการบรรทุกเกินขนาด โดยมีการบรรทุกสินค้ายื่นล้ำออกจากรถบรรทุกส่งผลทำให้เกิดการเฉี่ยวชนเข้ากับตู้เก็บค่าผ่านทางขึ้นในทิศทางดังกล่าวในขณะที่รถบรรทุกเคลื่อนที่ เข้า-ออก จากด่านฯ ซึ่งมีค่าแรงกระทำ F = 5 ตัน โดยกำหนดให้ระยะปลอดภัยการเสียรูปของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เท่ากับ 0.70 เมตร จะพิจารณาแรงจากการเฉี่ยวชนและการเคลื่อนที่เสียรูปของโครงสร้างต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ดังแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7

จาก พลังงานจลน์ (Dynamic Kinetic Energy) $E = \frac{1}{2}mv^2$

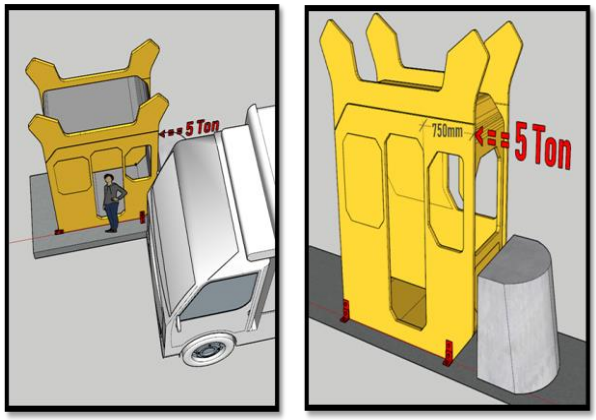
งาน (Work Done by Impact Force) $W = \frac{1}{2}Fs$

$E = W$

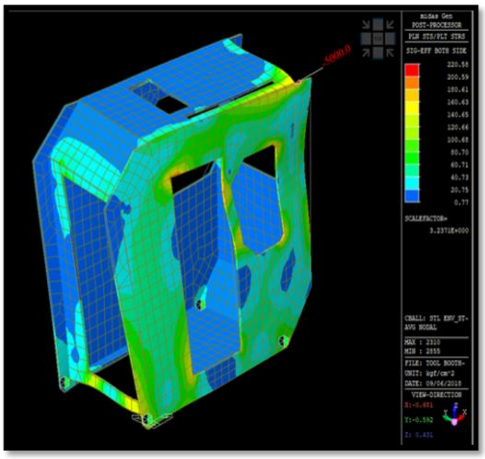
$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}Fs$$

$F = mv^2/s = (15{,}000)x(1.38^2)/0.7 = 40.8$ kN

F= 5 ton



รูปที่ 6 ลักษณะการเฉี่ยวชนของโครงสร้างต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ในทิศทาง 0 องศา



รูปที่ 7 แสดงการเสียรูปและตำแหน่งจุดวิกฤติของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จากการเฉี่ยวชนในทิศทาง 0 องศา

<u>กรณีที่ 2</u> แรงเฉี่ยวชนจากรถบรรทุกในทิศทาง 45 องศา มีค่าแรงกระทำ F = 3.54 ตัน โดยกำหนดให้ระยะปลอดภัยการเสียรูปของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เท่ากับ 0.76 เมตร จะพิจารณาแรงจากการเฉี่ยวชนและการคลี่นที่เสียรูปของโครงสร้างต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ดังแสดงในรูปที่ 8 และรูปที่ 9

จาก พลังงานจลน์ (Dynamic Kinetic Energy) $E = \frac{1}{2}mv^2$

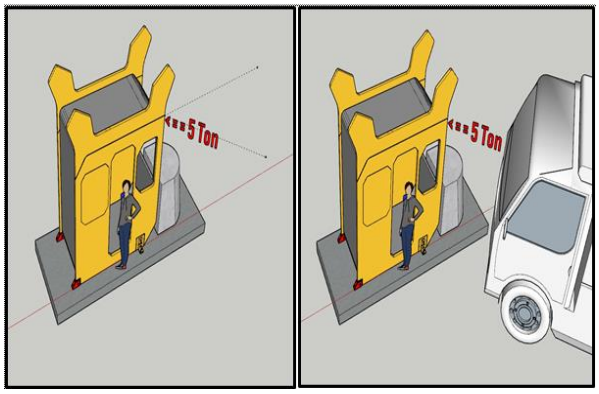
งาน (Work Done by Impact Force) $W = \frac{1}{2}Fs$

$E = W$

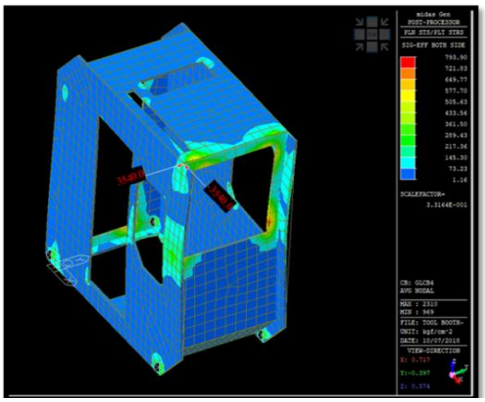
$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}Fs$$

$F = mv^2/s = [(15{,}000)x(1.38^2)/0.7]xCos(45°) = 28.86$ kN

F= 3.54 ton



รูปที่ 8 ลักษณะการเฉี่ยวชนของโครงสร้างต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ในทิศทาง 45 องศา



รูปที่ 9 แสดงการเสียรูปและตำแหน่งจุดวิกฤติของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จากการเฉี่ยวชนในทิศทาง 45 องศา

<u>กรณีที่ 3</u> แรงเฉี่ยวชนจากรถบรรทุกในทิศทาง 90 องศา มีค่าแรงกระทำ F = 10 ตัน โดยกำหนดให้ระยะปลอดภัยการเสียรูปของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เท่ากับ 0.30 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 10

จาก พลังงานจลน์ (Dynamic Kinetic Energy) $E = \frac{1}{2}mv^2$

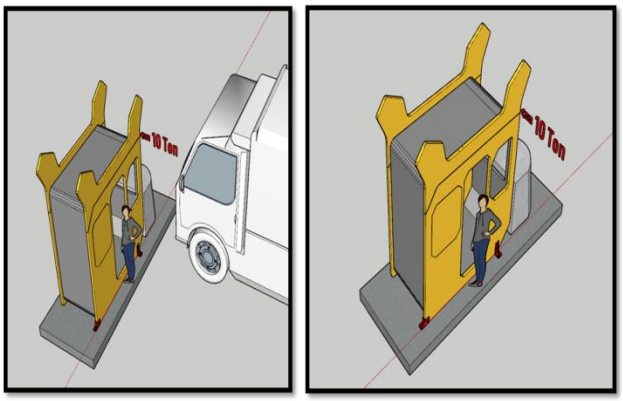
งาน (Work Done by Impact Force) $W = \frac{1}{2}Fs$

$E = W$

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}Fs$$

$F = mv^2/s = (15{,}000)x(1.38^2)/0.3 = 95.3$ kN

F= 10 ton



รูปที่ 10 ลักษณะการเฉี่ยวชนของโครงสร้างต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ในทิศทาง 90 องศา

ผลจากการวิเคราะห์แรงการเฉี่ยวชน และการเคลื่อนที่เสียรูปของโครงสร้างต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ที่เกิดขึ้นจากการจำลองทิศทางการเฉี่ยวชนสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์แรงเฉี่ยวชนสำหรับออกแบบ และระยะการเคลื่อนที่เสียรูปของโครงสร้างต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ

กำหนดทิศทางการเฉี่ยวชน (องศา)	แรงเฉี่ยวชน (F) สำหรับวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างตู้ฯ (ตัน)	กำหนดระยะปลอดภัยของการเสียรูปสูงสุดที่ยอมให้ (เซนติเมตร)	ระยะการเสียรูปวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element (เซนติเมตร)	ค่าระดับความเค้นของตู้วิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)	ค่าแรงปฏิกิริยาที่ฐานตู้วิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element (ตัน)
0	5	70	7	0.77 - 220.58	3
45	3.54	76	46	1.16 – 793.90	3
90	10	30	30	ไม่มีการจำลองเนื่องจากมีโอกาสเกิดขึ้นน้อย	ไม่มีการจำลองเนื่องจากมีโอกาสเกิดขึ้นน้อย

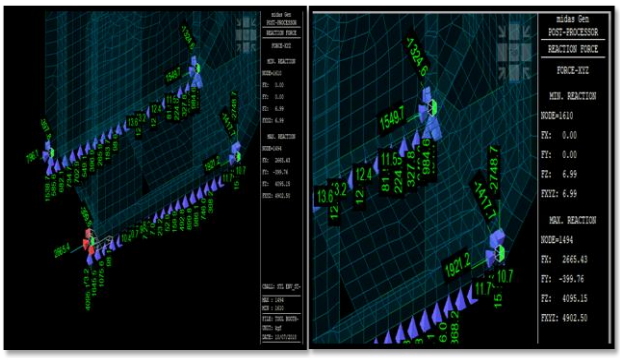
จากตารางแสดงทิศทางการเฉี่ยวชนทั้ง 3 ทิศทาง คือ 0 องศา 45 องศา และ 90 องศา โดยตั้งสมมติฐานว่าใช้รถบรรทุกขนาด 6 ล้อ (น้ำหนัก 15 ตัน) การเฉี่ยวชนในทิศทาง 0 องศา เป็นการจำลองการเฉี่ยวชนที่รุนแรงน้อยที่สุดที่เกิดจากกรณีที่รถบรรทุกเกินขนาด โดยมีการบรรทุกสินค้ายื่นล้ำออกจากรถบรรทุกส่งผลทำให้เกิดการเฉี่ยวชนเข้ากับตู้เก็บค่าผ่านทาง พิเศษในขณะเข้า-ออก จากด่านฯ และมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากที่สุด ด้วยแรงกระทำ (F) ขนาด 5 ตัน พบว่าจะมีระยะการเสียรูป (Deformation) ของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เท่ากับ 7 เซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าค่าระยะปลอดภัยที่ยอมให้

การเฉี่ยวชนในทิศทาง 45 องศา ระยะการเสียรูป (Deformation) ของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เท่ากับ 46 เซนติเมตร ซึ่งน้อยกว่าค่าระยะปลอดภัยที่ยอมให้ แสดงว่าหากเกิดการเฉี่ยวชนที่ 0 และ 45 องศา พนักงานจัดเก็บค่าผ่านทางฯ ที่ปฏิบัติงานภายในต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษจะไม่ได้รับอันตรายจากการเฉี่ยวชนจากรถบรรทุก

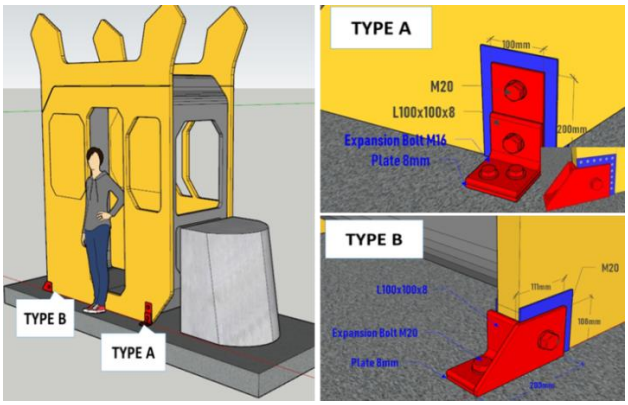
ในขณะที่ทิศทางการชนที่ 90 องศา เป็นการจำลองการชนที่รุนแรงที่สุดด้วยแรงกระทำ (F) ขนาด 10 ตัน ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยที่สุด พบว่ามีระยะการเสียรูป (Deformation) ของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เท่ากับ 30 เซนติเมตร ซึ่งอยู่ในค่าระยะปลอดภัยที่ยอมให้ โดยการชนที่ 90 องศานี้จะเหลือระยะปลอดภัยก่อนถึงตัวพนักงานจัดเก็บค่าผ่านทางฯ ที่ปฏิบัติงานภายในต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษ 30 เซนติเมตร ซึ่งจะไม่ได้รับอันตรายจากการเฉี่ยวชนจากรถบรรทุก

4.2 การวิเคราะห์ออกแบบจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษ

ในการพิจารณาออกแบบขนาดของแผ่นเหล็กยึดติดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จะพิจารณาจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Finite Element Analysis ที่จำลองให้แรงกระทำจากการเฉี่ยวชนในแต่ละทิศทางกระทำต่อต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ พบว่าแรงปฏิกิริยาสูงสุดที่เกิดขึ้นที่ฐานของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จะมีค่าประมาณ 3 ตัน โดยจากการพิจารณาออกแบบการเจาะยึดติดตั้งของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จะทำการยึด 2 จุด คือ จุดที่ 1 ยึดส่วนหน้า (Type A) และจุดที่ 2 ยึดส่วนหลัง (Type B) โดยการยึดส่วนหน้าและส่วนหลังออกแบบใช้เหล็กฉาก L ขนาด 100x100x8 มิลลิเมตร และแผ่นเหล็ก (Steel Plate) ขนาดหนา 8 มิลลิเมตร เหล็กเกรด SS 400 มีหน่วยแรงคราก (fy) เท่ากับ 2,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะเจาะยึดด้วยสลักเกลียว (Expansion Bolt) 2 ขนาดในการเจาะยึดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ คือ ขนาด M16 และ M20 ที่เป็นสลักเกลียวชนิด A325 มีหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ (Ft) เท่ากับ 3,100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 11 และ รูปที่ 12

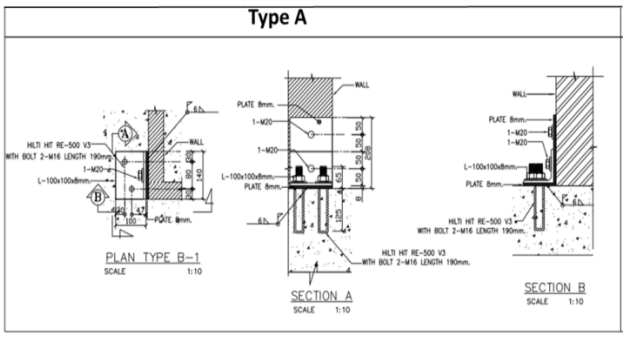


รูปที่ 11 แรงปฏิกิริยาที่ฐานตู้ฯ จากการวิเคราะห์แบบจำลองการเฉี่ยวชนสำหรับใช้ออกแบบขนาดเหล็กยึดฐานตู้เก็บค่าผ่านทางฯ

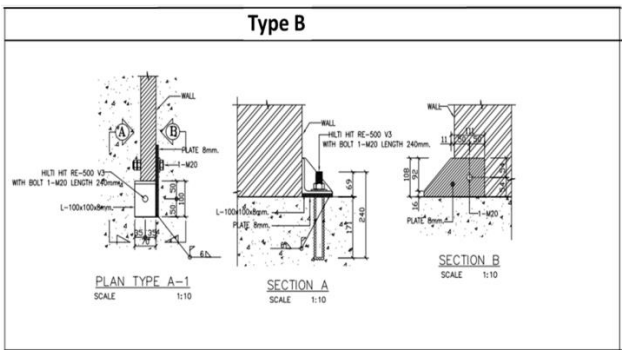


รูปที่ 12 ลักษณะการยึดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ของรูปแบบ Type A และรูปแบบ Type B

โดยมีรูปแบบรายละเอียดของชุดแผ่นเหล็กยึดติดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ และสลักเกลียว สำหรับใช้ในการยึดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ดังแสดงในรูปที่ 13 และรูปที่ 14



รูปที่ 13 ลักษณะและขนาดของเหล็กยึดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ รูปแบบ Type A



รูปที่ 14 ลักษณะและขนาดของเหล็กยึดติดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ รูปแบบ Type B

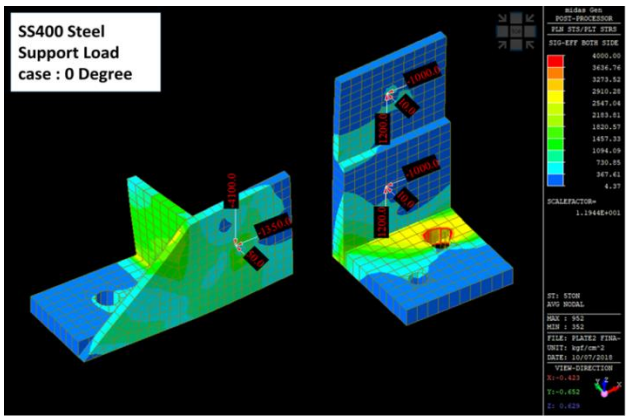
ในการเจาะยึดติดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เข้ากับพื้นปูนที่มีความลึกประมาณ 12.50 เซนติเมตร กรณียึดติดตั้งในรูปแบบ A และ 17 เซนติเมตร สำหรับกรณียึดติดตั้งในรูปแบบ B เพื่อใส่สลักเกลียวยึดติดเข้ากับฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ โดยใส่น้ำยาเจาะเสียบเหล็กอีพ็อกซี่ (HILTI HIT RE-500 V3) เพื่อช่วยยึดประสานระหว่างสลักเกลียวกับเนื้อปูนให้มีความยึดแน่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 15 และรูปที่ 16

รูปที่ 15 การเจาะรูแผ่นพื้นคอนกรีตเพื่อใส่สลักเกลียวยึดติดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ (รูปแบบ A)

รูปที่ 16 การเจาะรูแผ่นพื้นคอนกรีตเพื่อใส่สลักเกลียวยึดติดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ (รูปแบบ B)

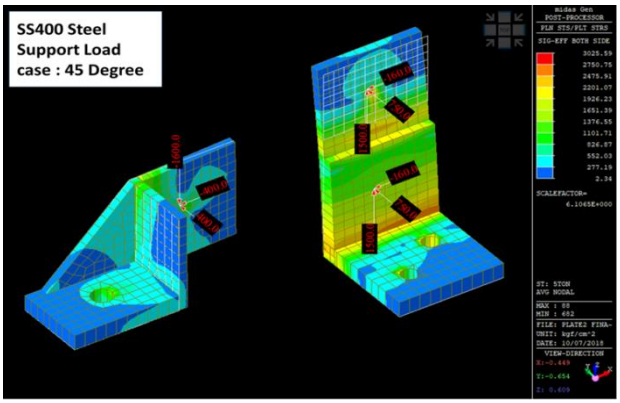
4.3 การประเมินสมรรถนะของจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษที่ออกแบบใช้งาน

ในการวิเคราะห์ออกแบบเหล็กยึดติดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ เกรด SS400 เพื่อพิจารณาค่าระดับความเค้น (Stress) สำหรับพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณเหล็กยึดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จากการวิเคราะห์จำลองแรงจากการเฉี่ยวชนของรถบรรทุก 6 ล้อ ขนาด 15 ตันที่กระทำในแต่ละทิศทาง ได้แก่ 0 องศา 45 องศา และ 90 องศา ด้วยวิธี Finite Element Analysis ดังแสดงในรูปที่ 17 ถึง รูปที่ 19

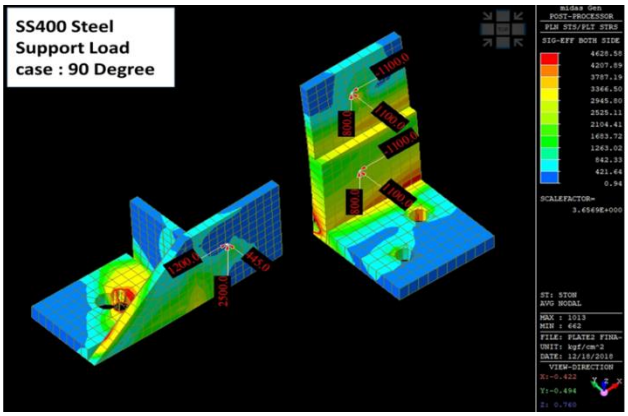


รูปที่ 17 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับความเค้นสำหรับพิจารณาความเสียหายที่

เกิดขึ้นบริเวณแผ่นเหล็กยึดฐานตู้เก็บค่าผ่านทางฯ แรงกระทำในทิศทางการเฉี่ยวชน 0 องศา



รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับความเค้นสำหรับพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นเหล็กยึดฐานตู้เก็บค่าผ่านทางฯ แรงกระทำในทิศทางการเฉี่ยวชน 45 องศา



รูปที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าระดับความเค้นสำหรับพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณแผ่นเหล็กยึดฐานตู้เก็บค่าผ่านทางฯ แรงกระทำในทิศทางการเฉี่ยวชน 90 องศา

ผลจากการวิเคราะห์แผ่นเหล็กยึดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ โดยแบบจำลองแรงจากการเฉี่ยวชนของรถบรรทุกที่กระทำในแต่ละทิศทาง ได้แก่ 0 องศา 45 องศา และ 90 องศา ด้วยวิธี Finite Element Analysis ชุดแผ่นเหล็กยึดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ที่ออกแบบมีความแข็งแรงเพียงพอสามารถรองรับแรงกระทำจากการเฉี่ยวชนที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแผ่นเหล็กยึดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จะมีความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการฉีกขาดของรูเจาะยึดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งหมายความว่าหากมีการเฉี่ยวชนจากรถบรรทุกเกิดขึ้นพนักงานจัดเก็บค่าผ่านทางฯ ที่ปฏิบัติงานภายในต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษจะไม่ได้รับอันตรายจากการเฉี่ยวชนจากรถบรรทุก โดยที่ต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษจะไม่เกิดการพลิกคว่ำของตู้หลุดออกจากฐาน

5. บทสรุป

จากการออกแบบจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ โดยจำลองออกแบบจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ภายใต้แรงกระทำจากการเฉี่ยวชนจากรถบรรทุกขนาด 6 ล้อ (น้ำหนัก 15 ตัน) กระทำที่ฐานยึดต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ด้วยแรง 3 ตัน ในทิศทางการเฉี่ยวชนที่ 0 องศา 45 องศา และ 90 องศา แบ่งการออกแบบเป็น 2 รูปแบบ ประกอบด้วย 1) ชุดเหล็กแบบ Type A สำหรับยึดติดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ในส่วนหน้าด้วยสลักเกลียวขนาด M16 และชุดเหล็กแบบ 2) ชุดเหล็กแบบ Type B สำหรับยึดติดฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ส่วนหลังด้วยสลักเกลียวขนาด M20 ซึ่งทั้ง 2 รูปแบบจะออกแบบใช้เหล็กฉากขนาด L-100x100x8 mm. เมื่อประเมินสมรรถนะของจุดยึดติดตั้งฐานต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ที่ได้ออกแบบโดยประเมินผ่านแบบจำลอง ภายใต้การวิเคราะห์ทาง Finite Element พบว่าจุดยึดติดตั้งนี้จะสามารถต้านทานแรงกระทำสูงสุดจากการเฉี่ยวชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการฉีกขาดของรูเจาะยึดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นั่นคือหากเกิดเหตุการณ์รถบรรทุกเฉี่ยวชนต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ จะปราศจากความเสียหายเนื่องจากการพลิกคว่ำหลุดออกจากฐานของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางฯ ในขณะที่ความเสียหายของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษภายใต้จุดยึดติดตั้งฐานตู้ฯ ที่ได้พิจารณาออกแบบจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษ กล่าวคือ มีค่าระยะการเสียรูป (Deformation) ของต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษไม่เกินค่าระยะปลอดภัยที่ยอมให้เมื่อมีการเฉี่ยวชนจากรถบรรทุก โดยพนักงานจัดเก็บค่าผ่านทางฯ ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษจะไม่ได้รับอันตราย และต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษจะไม่เกิดการพลิกคว่ำของตู้หลุดออกจากฐาน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด ที่ได้ให้ความร่วมมือในด้านการวิจัยและพัฒนาต้นแบบตู้เก็บค่าผ่านทางพิเศษ และเจ้าหน้าที่พนักงานกองวิจัยและพัฒนา การทางพิเศษแห่งประเทศไทย และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้คำปรึกษา เสียสละเวลาอันมีค่าช่วยเหลือให้การศึกษาวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

เอกสารอ้างอิง

[1] Terry, P., and Tholen, M. (2006). Security barrier design. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 11(2), pp. 105-111.

[2] AASHTO, (1997). Guide for Selecting, Locating, and Designing Traffic Barriers, GTB-1. American Association of Highway Officials. Washington, D.C.

[3] กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย (2561). มาตรฐานการออกแบบราวกันตกในอาคารจอดรถยนต์, มยผ.1321-61, ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ, หน้า 3-15

[4] BS EN 1317-3, (2010). Road restraint systems - Part3 : Performance Classes, impact test acceptance criteria and test methods for crash cushions, British standard. UK.