

Research Article

การศึกษาแรงยึดเกาะระหว่างสลักยางและพื้นสแลทคอนกรีต

Study of Adhesion Force Between Rubber Pins and Concrete Slats

ศรัทธา ศรีวรรเดชไพศาล ^{a, d, e} นวลนพมล ศรีอุทัย ^bธีระวัฒน์ เพชรดี ^c และ อาทิตย์ สวัสดิ์รักษา ^{f*}Satta Srewaradachpisal ^{a, d, e}, Nuannoppamon Sri-Uthai ^b, Theerawat Petdee ^c and Arthit Sawatdiraksa ^{f*}^a สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110^a Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.^b สาขาวิทยาศาสตร์เกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80110^b Department of Agriculture Science, Faculty of Agriculture, Rajamangala University of Technology Srivijaya Nakhon Si Thammarat Campus, Thungsong, Nakhon Si Thammarat 80110, Thailand.^c สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000^c Department of Mechanical, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Muang, Songkhla 90000, Thailand.^d ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110^d Center of Excellence in Metal and Materials Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.^e ศูนย์วิจัยอุตสาหกรรมอัจฉริยะ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110^e Smart Industry Research Center, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.^f สาขาเกษตรประยุกต์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช 80110^f Department of Applied Agriculture, Faculty of Agriculture, Rajamangala University of Technology Srivijaya Nakhon Si Thammarat Campus, Thungsong, Nakhon Si Thammarat 80110, Thailand.

ABSTRACT

Article history:

Received: 2024-01-23

Revised: 2024-09-30

Accepted: 2024-10-03

Keywords:

rubber pins;
concrete slats;
adhesive force;
friction

This investigation focused on the adhesion between rubber pins and concrete slats by creating a rubber material and testing the adhesion between natural rubber pins and concrete slats. The pin features 15 distinct contact areas and densities. The adhesion of the rubber pin to the slat was then evaluated using both pulling and pressing force. The size of the contact area and the thickness of the rubber pins were found to result in a strong bond between the rubber pins and the slat concrete. The finite element method was used to calculate the reaction force between different types of rubber pins and concrete slats. When calculating the theoretical holding force, it was found that the theoretical holding force tended to correspond with the experimental results. Consequently, the cohesive force between the rubber pin and the concrete slat is a result of the reaction force. The force increases when the contact area, thickness, and mechanical properties of the rubber pin material are enhanced. This study determines the reaction force between the rubber pin and the concrete slat using the finite element method, which can be utilized to predict the adhesion between rubber fasteners and concrete slats in order to design animal pen slabs.

* Corresponding author.

E-mail address: arthit.sa@rmutsv.ac.th

Cite this article as:

Srewaradachpisal, S., Sri-Uthai, N., Petdee, T. and Sawatdiraksa, A. 2025. Study of Adhesion Force Between Rubber Pins and Concrete Slats. **Recent Science and Technology** 17(3): 261936.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแรงยึดเกาะระหว่างสลักยางและพื้นสแลทคอนกรีต ด้วยการขึ้นรูปวัสดุยางและนำไปทดสอบค่าแรงยึดเกาะระหว่างสลักจากยางธรรมชาติและพื้นสแลทคอนกรีต โดยออกแบบสลักให้มีพื้นที่สัมผัสและความหนาที่แตกต่างกันจำนวน 15 รูปแบบ จากนั้นทดสอบแรงยึดเกาะของสลักยางกับสแลททั้งแบบแรงดึงและแรงกด พบว่าขนาดพื้นที่สัมผัสและความหนาของสลักยางจะส่งผลให้เกิดแรงยึดเกาะสูงระหว่างสลักยางกับสแลทคอนกรีต เมื่อใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างสลักยางในรูปแบบต่าง ๆ กับสแลทคอนกรีต จากนั้นคำนวณแรงยึดตามหลักการทางพลศาสตร์พบว่าแรงยึดมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าแรงยึดเกาะระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีตเป็นผลมาจากแรงปฏิกิริยา ซึ่งแรงปฏิกิริยามีค่ามากขึ้นเมื่อพื้นที่สัมผัส ความหนาและสมบัติเชิงกลของวัสดุของสลักยางมีค่ามากขึ้น งานนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีต ซึ่งสามารถนำไปคาดการณ์ให้หาค่าแรงยึดเกาะระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีตเพื่อใช้ในการออกแบบแผ่นปูคอกสัตว์ต่อไป

คำสำคัญ: สลักยาง, สแลทคอนกรีต, แรงยึดเกาะ, แรงเสียดทาน

1. บทนำ

การเลี้ยงสัตว์ในคอกบนสแลทคอนกรีตส่งผลให้เกิดปัญหาการบาดเจ็บและแผลที่เกิดขึ้นในสัตว์ (Kilbride *et al.*, 2009; Mack *et al.*, 2014; Carroll *et al.*, 2016) ซึ่งมีสาเหตุมาจากความแข็งของสแลทคอนกรีต แผลที่เกิดขึ้นในสัตว์ส่งผลในการปัญหาต่อการเลี้ยงสัตว์ทั้งสุขภาพ โรคระบาดและค่าใช้จ่ายในการรักษา (Panivivat *et al.*, 2004; Linden, 2013; Jaborek *et al.*, 2016) ในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาแผ่นปูสแลทจากวัสดุยางธรรมชาติซึ่งมีความยืดหยุ่นสำหรับใช้ปูบนสแลทคอนกรีตเพื่อป้องกันดังกล่าวที่เกิดขึ้นในสัตว์ (Mekbungwan *et al.*, 1994; Samcklong *et al.*, 2004; Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, 2013) แผ่นปูสแลทนั้นต้องสามารถยึดเกาะกับสแลทคอนกรีตเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเลื่อนตำแหน่ง ถ้าเกิดความไม่เสถียรของการยึดติดระหว่างแผ่นปูสแลทกับคอนกรีต ความชื้นและสิ่งสกปรกที่สะสมใต้แผ่นปู การเสื่อมสภาพของวัสดุยึดเกาะ และการออกแบบที่ไม่เหมาะสมในการติดตั้ง เมื่อสัตว์เคลื่อนไหวสามารถทำให้แผ่นปูเลื่อนและหลุดได้ง่ายขึ้น

การยึดแผ่นปูสแลทกับสแลทคอนกรีต สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้กาว การเจาะยึดด้วยสกรูแบบต่าง ๆ ซึ่งมีขั้นตอนการติดตั้งยากและค่าใช้จ่ายสูง การใช้สกรูยังมีโอกาสทำให้เกิดบาดแผลเพิ่มเติมได้จากความแข็งและความคมของสกรู เมื่อศึกษาข้อมูลผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ (EASYFIX Equine Persse Business Park Perssepark Ballinasloe Co, 2021) พบว่ามักมีการใช้สลักยางในการยึดติดกับสแลทคอนกรีต ซึ่งมีข้อดีเนื่องจากเป็นวัสดุเดียวกันกับผลิตภัณฑ์แผ่นปูสแลทสามารถขึ้นรูปเป็นชิ้นเดียวกันได้ และยังมีความอ่อนตัวไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายของสุกร จากการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาพบว่า (EASYFIX Equine Persse Business Park Perssepark Ballinasloe Co, 2021; Industrial Standards Institute, Ministry of Industry, 2013) สุกรหรือสัตว์เลี้ยงที่อาศัยบนพื้นที่ที่มีความอ่อนนุ่ม มีโอกาสเกิดแผลน้อยกว่า มีค่าใช้จ่ายในการดูแลน้อยกว่า ส่งผลทั้งสัตว์เลี้ยงและผู้เลี้ยงสัตว์ นอกจากนี้การศึกษากการยึดเกาะระหว่างแผ่นยางกับ

สแลทคอนกรีต มีตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ แรงยึดเกาะและความเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสที่ส่งผลต่อความคงทนของสแลท พบว่าแรงเสียดทานที่มีค่าสูงจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของแผ่นสแลทนานขึ้น (Penev, 2013) อีกทั้งยังมีการวิเคราะห์หาค่าแรงเสียดทานระหว่างแผ่นยางกับสแลทคอนกรีต ที่ส่งผลต่อแรงดันภายในบริเวณก้นเท้าของสัตว์ โดยได้นำระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์โมเดลพื้นยางที่เป็นวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) สำหรับการออกแบบร่วมด้วย (Telezhenko *et al.*, 2008) เพื่อลดต้นทุนและประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ออกแบบ

อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมา ส่วนใหญ่ได้ศึกษาอิทธิพลของแรงเสียดทานระหว่างแผ่นยางกับพื้นคอนกรีต ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้งานของแผ่นพื้นปูคอกสัตว์เท่านั้น แต่ยังไม่พบการศึกษาพื้นที่ผิว รูปแบบของสลักยางต่อการยึดเกาะระหว่างแผ่นยางกับสแลทคอนกรีต ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญสำหรับการพัฒนาแผ่นยางกับสแลทคอนกรีตเพื่อลดการบาดเจ็บซึ่งส่งผลต่อสุขภาพที่ดีของสัตว์

ดังนั้นในงานนี้จึงได้ทำการศึกษาแบบสลักยางสำหรับป้องกันไม่ให้แผ่นปูสแลทเกิดการเลื่อนตำแหน่งจากสแลทคอนกรีต การยึดเกาะของสแลทยางกับสแลทคอนกรีตจะเป็นในลักษณะของแรงเสียดทานระหว่างวัสดุ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานและแรงปฏิกิริยาระหว่างผิวทั้ง 2 ของวัสดุ ปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงปฏิกิริยาประกอบด้วยรูปร่างของสลักยาง (ความหนา ความยาวและความสูง) และสูตรยาง (สมบัติเชิงกลของวัสดุ) โดยจากงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุยาง (Suso, 2011; Kaewsakul *et al.*, 2016; Chookate, 2019; Kaewpa *et al.*, 2019) ซึ่งเป็นวัสดุยางมีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในการหาค่าแรงปฏิกิริยาต้องใช้วิธีการทางกลศาสตร์วัสดุร่วมกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เนื่องจากช่วยลดต้นทุนในการออกแบบ

โดยในงานนี้เริ่มจากการออกแบบสลักยาง 15 รูปแบบ แล้วขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงยึดเกาะของสลักยางเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อแรงยึดเกาะระหว่างแผ่นปูสแลทกับสแลทคอนกรีตและใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาขนาดแรงปฏิกิริยาเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าแรงยึดเกาะ

หรือแรงเสียดทานตามทฤษฎีทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่ เพื่อเป็นวิธีการที่ใช้ในการออกแบบสลักยางสำหรับยึดเกาะแผ่นปูสแลทคอนกรีตต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบสลักยาง

การออกแบบสลักยางสำหรับศึกษาแรงยึดเกาะป้องกันการลื่นไถลของแผ่นปูสแลท เริ่มจากการศึกษาขนาดของร่องระหว่างสแลทคอนกรีตซึ่งมีลักษณะร่องเอียงแบบเทเปอร์โดยมีขนาดด้านแคบและด้านกว้างเท่า 10 มม. และ 15 มม. ตามลำดับ แล้วจึงทำการออกแบบสลักยางทั้งหมด 3 รูปแบบ ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2021 ดังแสดงในภาพที่ 1a) โดยมีแนวคิดที่ว่าสลักจะมี

แรงยึดมากขึ้นเมื่อมีแรงเสียดทานระหว่างสลักและผิวคอนกรีตมากขึ้น ซึ่ง Model A และ Model B จะใช้ในการเปรียบเทียบความแตกต่างของพื้นที่ผิวสัมผัสของสลักยางกับสแลทคอนกรีต ในส่วนของ Model C ออกแบบมาเพื่อให้สามารถติดตั้งในสแลทคอนกรีตได้ง่ายขึ้นโดยการเจาะรูขนาด 5 มม. ที่บริเวณปลายสลักยางเพื่อให้สามารถใส่ลงในร่องสแลทคอนกรีตได้ง่ายขึ้น โดยรูปแบบที่แตกต่างกันทั้ง 3 รูปแบบส่งผลต่อความแตกต่างของแรงเสียดทาน เมื่อติดตั้งสลักยางกับสแลทคอนกรีตจะแสดงดังภาพที่ 1b) โดยแต่ละรูปแบบจะมีการศึกษาขนาดที่แตกต่างกัน 5 ขนาด โดยขนาดของรูปแบบที่แตกต่างกันแสดงในตารางที่ 1 โดยที่สัญลักษณ์ a, b และ c หมายถึงความยาวของชิ้นตัวอย่าง (ขนาดของ Z ในรูปที่ 1) ที่ขนาด 10, 20 และ 30 มม. ตามลำดับ

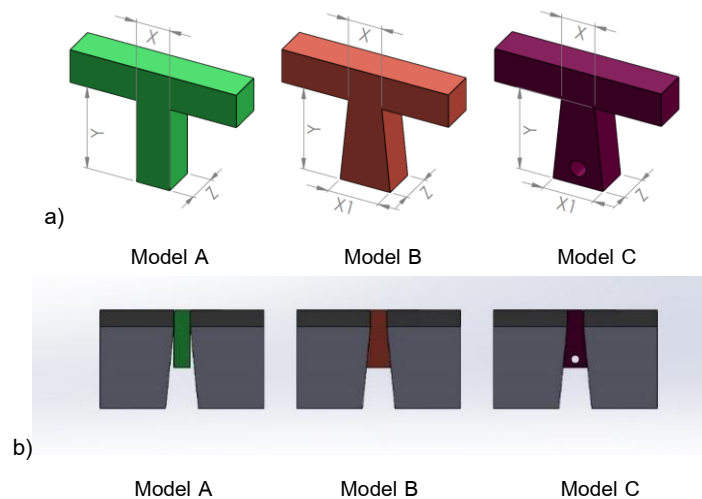


Figure 1 a) Various formats of rubber latch. b) Installation of rubber bolts to concrete slats.

Table 1 Various sizes of various formats of rubber latch.

Designs	X (mm)	X1 (mm)	Y (mm)	Z (mm)
Model A 10mm-a	10.35	-	25	10
Model A 10mm-b	10.70	-	25	10
Model A 10mm-c	11.05	-	25	10
Model A 20mm-a	10.35	-	25	20
Model A 30mm-a	10.35	-	25	30
Model B 10mm-a	10.35	15.35	25	10
Model B 10mm-b	10.70	15.70	25	10
Model B 10mm-c	11.05	16.05	25	10
Model B 20mm-a	10.35	15.35	25	20
Model B 30mm-a	10.35	15.35	25	30
Model C 10mm-a	10.35	15.35	25	10
Model C 10mm-b	10.70	15.70	25	10
Model C 10mm-c	11.05	16.05	25	10
Model C 20mm-a	10.35	15.35	25	20
Model C 30mm-a	10.35	15.35	25	30

2.2 การเตรียมชิ้นงาน

ในการศึกษาสัณฐานวิทยาเลือกใช้วัสดุยางธรรมชาติ ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับแผ่นปูลาต สำหรับสูตรยางเบื้องต้นในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 2 โดยประยุกต์มาจากเทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์ (Plastics Institute of Thailand, 2014) ประกอบด้วยยาง NR (STR5L) ใช้คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black:CB) เกรด N-330 (N-330 ขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร) เป็นสารเสริมแรงและมีการใช้น้ำมันพาราฟิน (PO เกรด A เบอร์ 15) เป็นพลาสติกไซเซอร์เพื่อช่วยในการกระจายตัวของฟิลเลอร์ สำหรับซิงค์ออกไซด์ กรดสเตียริก วังสเตย์ แอล 2-เมอร์แคปโตเบนโซไทอาโซล (MBT) และซัลเฟอร์ ซึ่งยางในสูตรนี้มีการใช้สารตัวเติมแบบเสริมแรงที่ 30 phr เพื่อให้ได้ที่มีความแข็งแรงและสมบัติที่ดีต่อความคงทนต่อสภาพแวดล้อม

Table 2 Quantity of chemicals used in rubber compound.

The ingredients	Quantity (phr)
Natural rubber (STR 5L)	100
Carbon Black (CB)	30
stearic acid	1
ZnO	5
wingstay L	1
MBT	0.5
sulphur	1.5
spindle oil	3

การเตรียมยางคอมพาวด์มีวิธีการดังนี้ เริ่มจากการนำยางธรรมชาติบดในเครื่องผสมแบบปิด (internal mixer) ที่อุณหภูมิ 90 °C ที่ความเร็วลูกกลิ้ง 30 รอบต่อนาที จากนั้นจึงเติมพลาสติกไซเซอร์และสารตัวเติมตามสูตร เพื่อผสมภายในเวลา 30 นาที หลังจากนั้น

จึงนำคอมพาวด์มาผสมกับ ซิงค์ออกไซด์, กรดสเตียริก และ วังสเตย์แอล ด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two mill machine) ให้เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากนั้นจะนำคอมพาวด์ที่ผสมแล้วออกจากเครื่องผสมเพื่อให้อุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำไปผสมกับ MBT และกำมะถัน และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในการขึ้นรูปใช้วิธีการอัดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์และเครื่องอัดร้อนที่อุณหภูมิ 150 °C ที่เวลา 15 นาที เพื่อเป็นชิ้นงานสำหรับทดสอบแรงยึดของสัณฐานและการทดสอบสมบัติเชิงกล

2.3 การทดสอบแรงยึดของสัณฐาน

สัณฐานวิทยาชิ้นงานนี้ทำหน้าที่ในการยึดเกาะแผ่นปูลาตจากยางธรรมชาติกับสแลทคอนกรีตเพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นปูลาตเกิดการเลื่อนตำแหน่ง ดังนั้นจะเป็นการวัดเพื่อหาค่าแรงสูงที่สุดที่ทำให้แผ่นสแลทเกิดการเลื่อนไถล โดยทำการทดสอบ 2 วิธี ประกอบด้วย

- 1) วิธีทดสอบแรงดันด้วยเครื่องทดสอบสมบัติวัสดุมาตรฐาน (Universal testing machine) Instron รุ่น 8872 ดังแสดงในภาพที่ 2a) โดยติดตั้งสัณฐานบนแผ่นปูลาตและสแลทคอนกรีตให้เครื่องทดสอบออกแรงดันที่แผ่นปูลาตบันทึกค่าแรงจากโหลดเซลล์เมื่อแผ่นปูลาตเกิดการเลื่อนไถล
- 2) วิธีทดสอบด้วยการดึงชิ้นงาน โดยติดตั้งสัณฐานยึดติดกับแผ่นปูลาตและสแลทคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 2b) ทำการออกแรงดึงที่แผ่นปูลาตออกแรงดึงบันทึกค่าแรงสูงสุดเมื่อแผ่นปูลาตเกิดการเลื่อนไถล โดยใช้เครื่องวัดแรงดึง รุ่น Leo310 SF-50 โดยในแต่ละการทดสอบแรงยึดจะใช้สัณฐานแบบละ 1 ตัว และดำเนินการทดสอบจำนวน 3 ครั้งเพื่อมาคำนวณหาค่าของแรงยึด

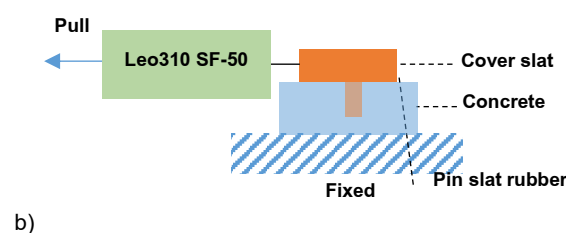
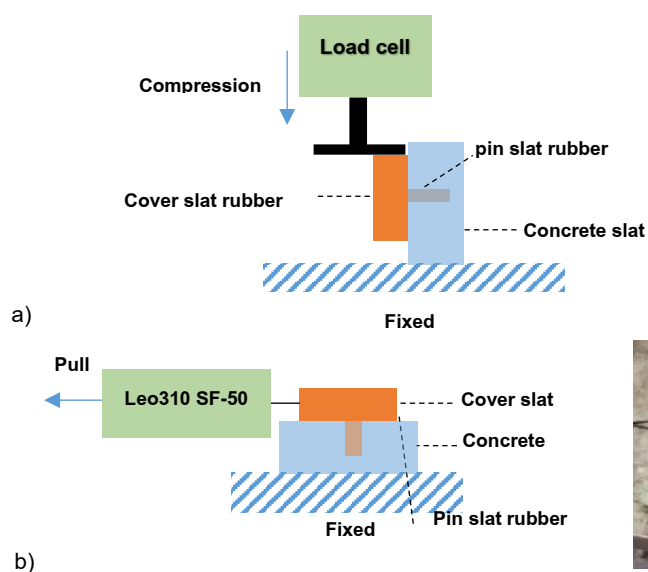


Figure 2 a) Pressure testing with Universal testing machine, b) Tensile testing with a tensile force meter (Leo310-SF-50)

2.4 การทดสอบสมบัติเชิงกลตามมาตรฐาน

การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุอย่างเพื่อใช้ในการคำนวณค่าแรงยึดติดของยางกับสแลทคอนกรีต ดำเนินการด้วยวิธีมาตรฐานตาม ASTM 575-91 โดยเตรียมชิ้นวัสดุ สำหรับทดสอบที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28.5 มม. หนา 12.5 มม. จำนวน 3 ชิ้น สำหรับใช้ในการทดสอบแรงกดเพื่อให้ได้ค่าตัวแทนสมบัติของวัสดุ โดยการกดชิ้นวัสดุตัวอย่างที่ 50 เปอร์เซ็นต์ของความหนาของชิ้นวัสดุตัวอย่าง ที่ความเร็ว 10 มม.ต่อนาที ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติวัสดุมาตรฐาน (Universal testing machine) ยี่ห้อ Zwick/Roell รุ่น Z010 ด้วย Load cell ขนาด 1 kN เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

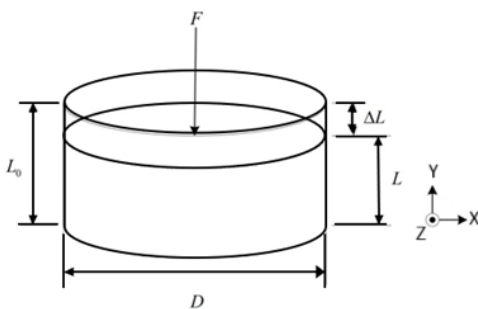


Figure 3 The relationship between stress and contraction rate under uniaxial compression.

$$\text{ความเค้น (stress)} \quad \sigma = \frac{F}{A_0}, A_0 = \pi \frac{D^2}{4} \quad (1)$$

$$\text{ความเครียด (strain)} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (2)$$

สมบัติการรับแรงอัด (compression) ของวัสดุอย่างรูปทรงกระบอกจะแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้น (stress, σ) และความเครียด (strain, ε) ตามสมการ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยสัญลักษณ์ของตัวแปรต่าง ๆ ประกอบด้วย D คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, L_0 คือความสูงของชิ้นงาน, L คือความสูงของชิ้นงานเมื่อเกิดการยุบตัว, ΔL คือผลต่างของความสูงของชิ้นงานเมื่อรับแรงกด, A_0 คือพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน และ F คือแรงกดที่กระทำต่อชิ้นงาน สำหรับการศึกษาการทดสอบสมบัติการรับแรงกดแสดงดังภาพที่ 3 อย่างไรก็ตามในระหว่างการทดสอบพื้นที่หน้าตัดของยางจะมีค่าไม่คงที่ กล่าวคือพื้นที่หน้าตัดของยางจะเพิ่มขึ้นในแนวข้างตามระยะที่ยางยุบตัว แต่การทดสอบส่วนใหญ่กำหนดให้พื้นที่หน้าตัดของยางมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าเดิม

2.5 การคำนวณแรงยึดติดของสลักยาง

การคำนวณแรงยึดติดของสลักยางกับสแลทคอนกรีตสามารถพิจารณาตามแผนภาพอิสระการรับแรงของสลักยางดังแสดงในภาพที่ 4 พบว่าแรงเสียดทาน (frictional force, f) จะเกิดขึ้นที่ผิวทั้ง 2 ด้านของสลักยาง ดังนั้น แรงยึด (Adhesive force, F) จะเป็น 2 เท่าของแรงเสียดทาน

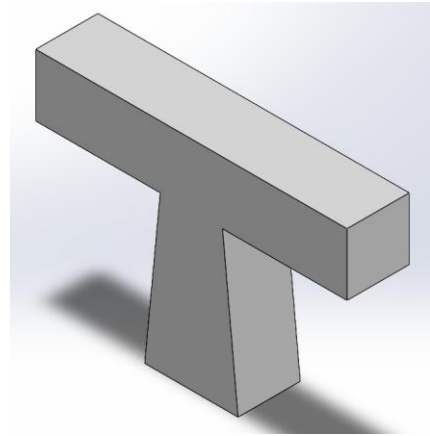


Figure 4 Free body diagram of friction.

ค่าแรงเสียดทานสามารถคำนวณหาโดยใช้สมการ 3 ซึ่งประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ_k) คูณอยู่กับค่าแรงตั้งฉากระหว่างพื้นผิวทั้งสอง ($N_{\text{ในแนวตั้งฉาก}}$)

$$F_{\text{friction}} = \mu_k \times N_{\text{ในแนวตั้งฉาก}} \quad (3)$$

โดยจากการศึกษาของมูลของงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางและคอนกรีต (μ_k) มีค่าที่เท่ากับ 0.75 สำหรับค่าแรงตั้งฉากระหว่างระหว่างสลักยางกับสแลทคอนกรีตในงานนี้จะใช้โปรแกรม SolidWorks 2021 ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าแรงยึดเกาะหรือแรงเสียดทานต่อไป

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 แรงยึดระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีต

เมื่อขึ้นรูปสลักยางเพื่อทำการทดสอบแรงยึดเกาะ โดยการติดตั้งสลักยางยึดแผ่นยางปูลสแลทติดกับสแลทคอนกรีตแล้วดำเนินการทดสอบโดยการออกแรงดันด้วยเครื่องทดสอบวัสดุมาตรฐาน (Instron-8872) ทำการบันทึกค่าแรงด้วยโหลดเซลล์ ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 5a) การทดสอบแบบแรงดึง โดยการออกแรงดึงผ่านเครื่องวัดแรงดึงรุ่น Leo310 SF-50 ทำการอ่านและบันทึกค่าแรงสูงสุดเมื่อสลักยางเกิดการเลื่อนตัว ผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 5b)

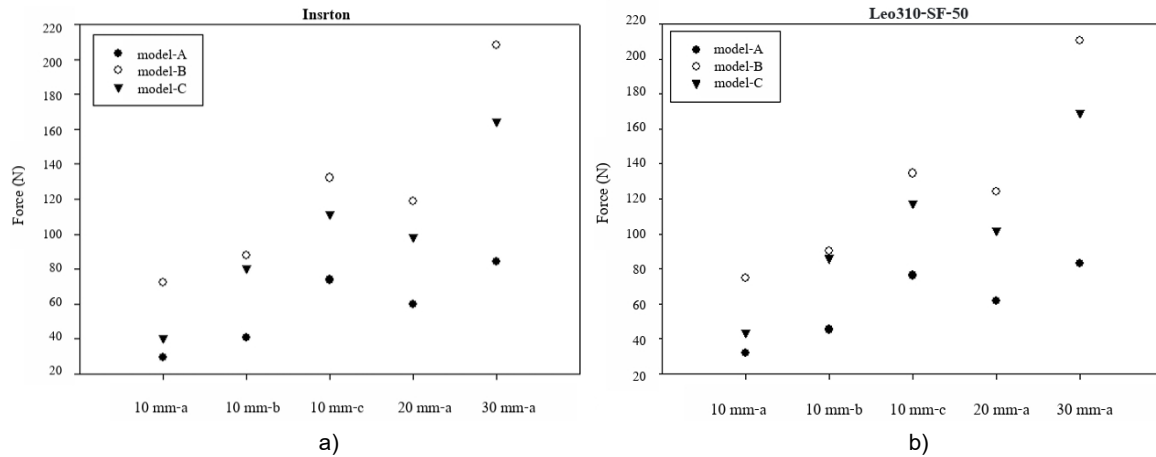


Figure 5 Adhesion test results. a) From Universal testing machine. b) From Tensile force meter. (Leo310-SF-50)

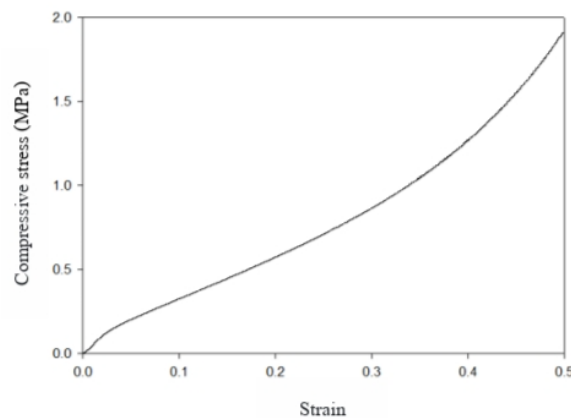


Figure 6 Compressive stress and strain of rubber materials.

จากผลการทดสอบทั้ง 2 วิธีมีค่าแรงยึดเกาะสอดคล้องกัน และมีความใกล้เคียงกันมาก โดยพบว่า Model B มีค่าแรงยึดเกาะสูงสุดในทุกรูปแบบทั้งการออกแรงดึงและแรงกดในแนวราบ รองลงมาคือ Model C และ Model A ตามลำดับ และพบว่าเมื่อสลักยางที่มีความหนา (ค่า x และ $x1$) และความยาว (ระยะ z) มากขึ้น ส่งผลให้แรงยึดเพิ่มมากขึ้นสอดคล้องตามหลักการกลศาสตร์ของวัสดุและหลักการตามพลศาสตร์การเคลื่อนที่ (Russell, 2010; Ferdinand *et al.*, 2017) โดยพบว่าสลักยางใน Model B (รูปแบบ 30 mm-a) ที่มีความยาว 30 มม. มีค่าแรงยึดมากที่สุด และ Model A (รูปแบบ 10 mm-a) มีค่าแรงยึดน้อยที่สุด สำหรับรูปแบบ 10 mm-c มีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบ 20 mm-a และเมื่อเปรียบเทียบกันเฉพาะใน Model A จะพบว่ารูปแบบ 10 mm-c มีค่าสูงกว่ารูปแบบ 10 mm-b และ รูปแบบ 10 mm-a ตามลำดับ

3.2 ผลการทดสอบสอบบการรับแรงกด

เมื่อขึ้นรูปวัสดุยางเป็นชิ้นตัวอย่างและนำไปทดสอบสมบัติการรับแรงกดตามมาตรฐาน ASTM D575-91 พบว่าสมบัติเชิงกลภายใต้รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุแสดงพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังภาพที่ 6

3.3 การคำนวณแรงปฏิกริยาระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีต

แรงปฏิกริยาระหว่างสลักยางและผนังสแลทคอนกรีตจะขึ้นกับสูตรยาง ระยะอัดตัว และขนาดพื้นที่สัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสอง ซึ่งในวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบเป็นเชิงเส้นจะสามารถหาค่าแรงปฏิกริยาได้ตามกฎของฮุก (Hooke's law) แต่สำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบไม่เป็นเชิงเส้นหรือวัสดุแบบ hyper elastic จะต้องทำการวิเคราะห์การยึดตัวหรือยุบตัวแบบ large strain ซึ่งเหมาะสำหรับนำมาใช้วิเคราะห์วัสดุยางเพื่อให้มีค่าความแม่นยำเพิ่มขึ้น และนิยามค่าแรงดังกล่าวโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในงานนี้ใช้โปรแกรม SolidWorks 2021 ในการวิเคราะห์หาค่าแรงปฏิกริยาที่สลักยางในรูปแบบต่าง ๆ โดยใช้สมบัติการรับแรงกดในการจำลองพฤติกรรมการรับแรงของวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear elastic) ดังแสดงในภาพที่ 7a) จำลองกดให้สลักยางเกิดการยุบตัวตามระยะอัดตัว (Compression stroke (mm)) เมื่อติดตั้งกับสแลทคอนกรีตของแต่ละรูปแบบ ดังแสดงในภาพที่ 7b) โดยรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เพื่อหาค่าแรงปฏิกริยาที่สลักยางดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเป็นการแบ่งเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้าแบบ 16 โหนด ดังแสดงในภาพที่ 7c) และทำการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น

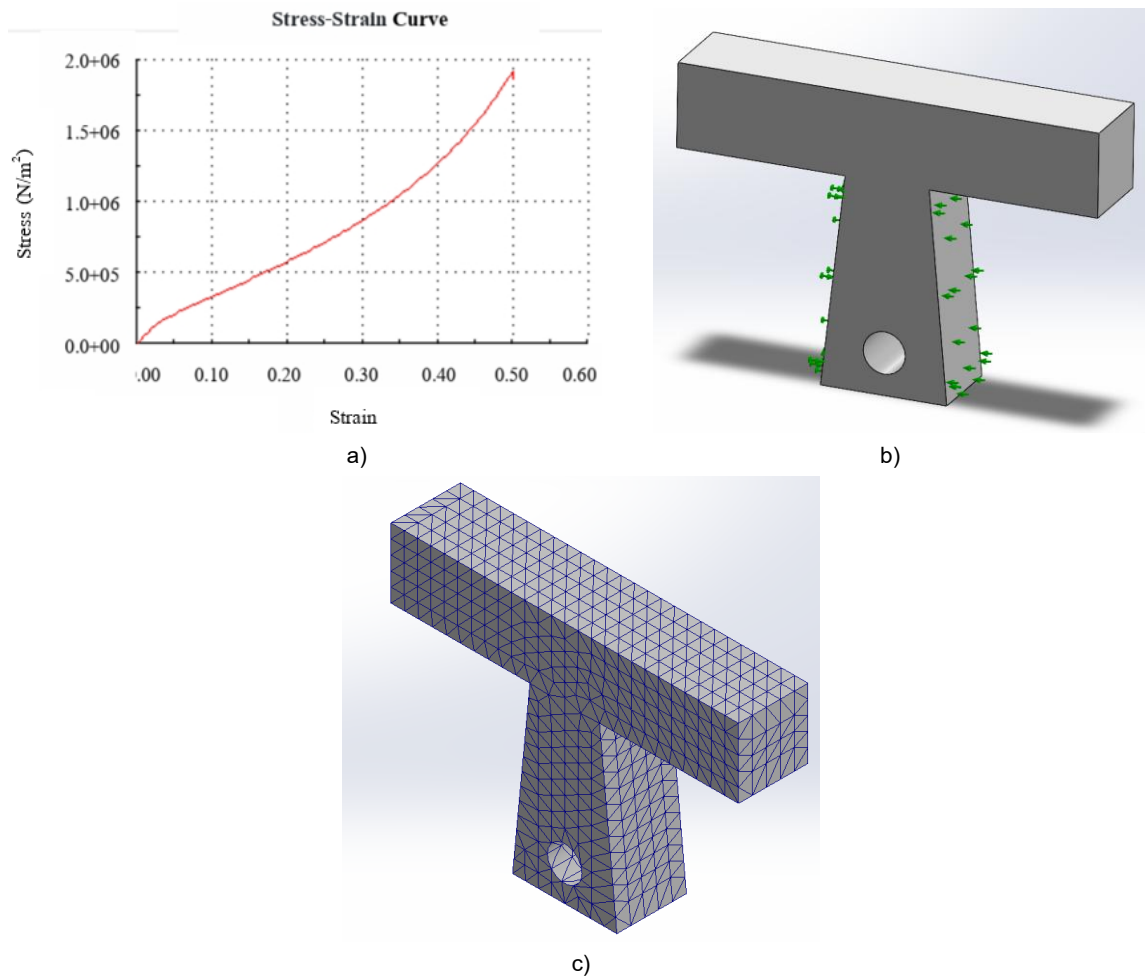


Figure 7 a) Determination of mechanical properties tests for use in finite element analysis. b) Boundary conditions used to analyze the reaction force of rubber latch. c) Finite element nodes

Table 3 Different pattern size of rubber latch.

Designs	Area (mm ²)	Compression stroke (mm)	Total nodes	Total elements	Reaction force (N) Result of FEM
A 10mm-a	100	0.350	8595	5446	20.6
A 10mm-b	100	0.700	8595	5446	35.5
A 10mm-c	100	1.050	8595	5446	51.9
A 20mm-a	200	0.350	16342	10698	45.3
A 30mm-a	300	0.350	22497	14846	69.8
B 10mm-a	250	0.350	11833	7536	40.1
B 10mm-b	250	0.700	11833	7536	64.8
B 10mm-c	250	1.050	11833	7536	92.8
B 20mm-a	500	0.350	21689	14260	78.4
B 30mm-a	750	0.350	30369	20167	120.8
C 10mm-a	200	0.350	11860	7506	34.0
C 10mm-b	200	0.700	11860	7506	58.0
C 10mm-c	200	1.050	11860	7506	82.5
C 20mm-a	400	0.350	21704	14157	70.1
C 30mm-a	600	0.350	30896	20399	107.8

โดยจากผลการวิเคราะห์เมื่อกดยางที่ระยะยวบตัวที่ระยะต่าง ๆ พบว่าค่าแรงปฏิกิริยามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดความหนาและพื้นที่สัมผัส โดย Model B มีค่าแรงปฏิกิริยาสูงสุด รองลงมาคือ Model C และ Model A ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบในส่วนของความยาวของสลักยาง (พื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้น) ในแต่ละรูปแบบ พบว่าที่ความยาว 30 มม. มีแรงปฏิกิริยาสูงสุด รองลงมาคือที่ความยาว 20 มม. และที่ความยาว 10 มม. ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบขนาดระยะอัดตัวที่มากขึ้น (ความหนาที่มากขึ้น) ในแต่ละรูปแบบ พบว่าที่ระยะอัดตัว 1.05 มม. มีแรงปฏิกิริยาสูงสุด รองลงมาคือที่ระยะอัดตัว 0.70 มม. และ 0.35 มม. ตามลำดับเมื่อพิจารณาที่พื้นที่ (Area) เท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างความยาว (ขนาด Z) และระยะอัดตัว พบว่าที่ยาว 10 มม. ระยะอัดตัว 1.05 มม. มีค่าแรงปฏิกิริยาสูงกว่าสลักยางที่ โดยที่ระยะอัดตัว 0.35 มม. ยาว 20 มม. ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่สัมผัสและความหนาที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงปฏิกิริยามีค่ามากขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน

3.4 การเปรียบเทียบแรงยึดระหว่างสลักยางและสแลทคอนกรีต

แรงปฏิกิริยาซึ่งได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลของยาง พื้นที่สัมผัสและความหนา ซึ่งการจำลองในงานนี้เป็นการลดความซับซ้อนของปัญหาให้ง่ายขึ้น โดยการลดความซับซ้อนของรูปแบบ (simplified model) ด้วยการวิเคราะห์เฉพาะส่วนของสลักเท่านั้น (ไม่ได้ทำการวิเคราะห์แผ่นปูลาดทั้งแผ่น) แม้ว่าความสามารถของโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ประมวลผลในปัจจุบันสามารถวิเคราะห์ชิ้นงานทั้งชิ้นได้ แต่ก็ให้เวลาในการประมวลผลที่นานและใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพสูงมากกว่า

ภาพที่ 8 แสดงค่าแรงยึดเกาะของสลักยางในแต่ละรูปแบบประกอบด้วยทางทฤษฎี (Theory) ได้จากค่าแรงปฏิกิริยา (ซึ่งได้จากการใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์) เปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (สมการ 3) เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงยึดของสลักยางจากเครื่องทดสอบวัสดุมาตรฐาน (Instron-8872) และเครื่องวัดแรงดึงรุ่น Leo310 SF-50 ใน Model A-C พบว่ามีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจริง

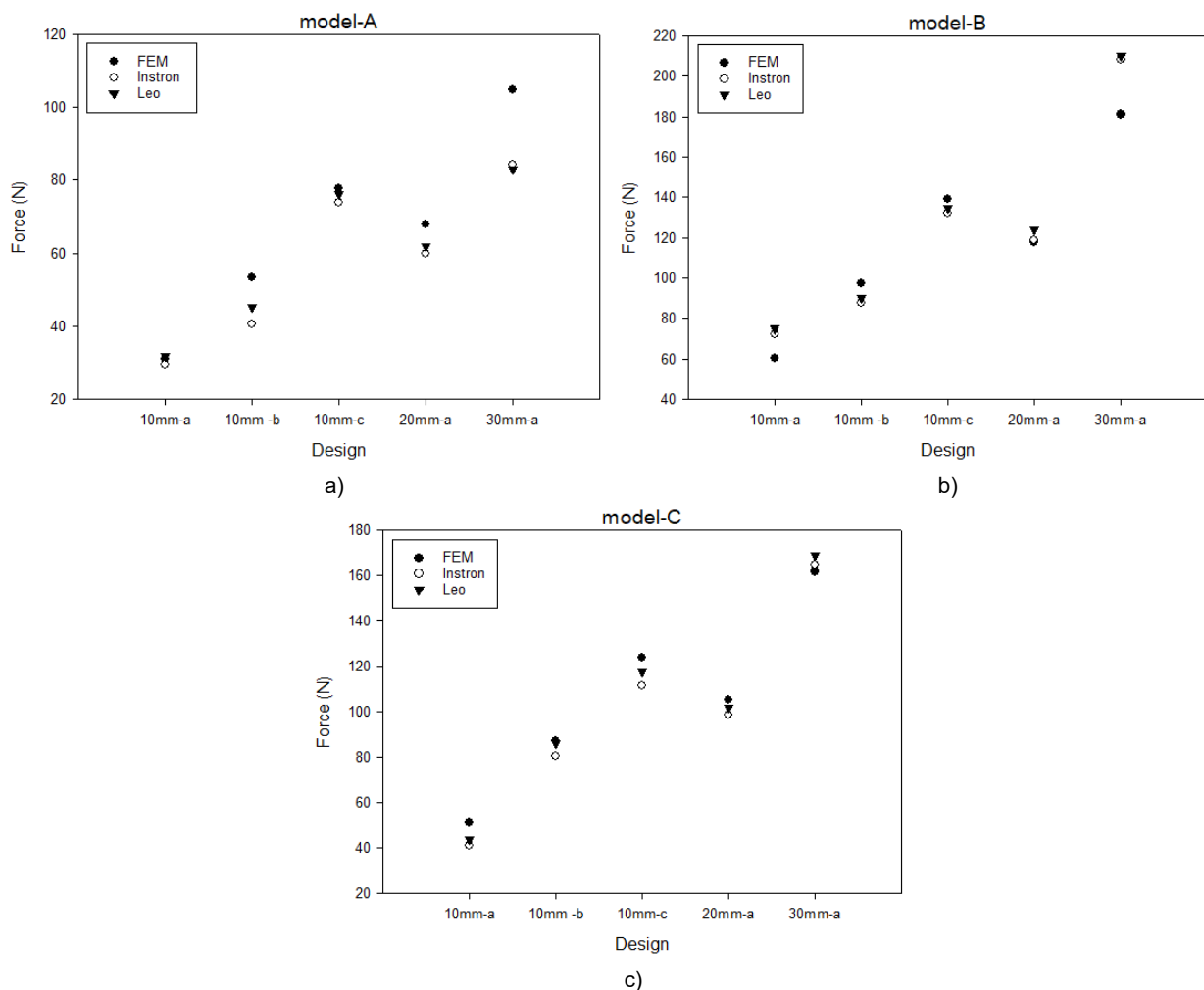


Figure 8 The calculation results are compared with the experimental results. a) Model A, b) Model B and c) Model C

เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดสอบ สามารถหาได้จากสมการที่ 4 ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%error) เฉลี่ยอยู่ที่ 6 เปอร์เซ็นต์ เช่น รูปแบบ Model-C 20mm-a แต่ในบางกรณีมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง เช่น Model-A 30mm-a ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 19 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการตรวจพบว่าเกิดขึ้นตัวอย่างมีทดสอบมีค่าแตกต่างจากแบบจำลองในไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีขนาดเล็กกว่าแบบจำลองจึงมีค่าแรงยึดเกาะน้อยกว่า ทำให้เกิดค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง ซึ่งสามารถปรับได้โดยการปรับแบบจำลองในไฟไนต์เอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับการทดสอบจริง

$$\%error = \frac{FEM-Exp}{FEM} \times 100 \quad (4)$$

ผลการคำนวณให้ค่าสูงกว่าผลการทดสอบในเกือบทุกโมเดล โดย Model B ให้ค่าแรงยึดสูงสุด รองลงมาคือ Model C และ Model A ตามลำดับ ซึ่งให้ผลสอดคล้องตามค่าแรงปฏิกิริยาและขึ้นอยู่กับรูปแบบ ความหนา ความยาวและสมบัติเชิงกลของวัสดุของสลักยาง โดยเมื่อค่าแรงปฏิกิริยามีค่าสูงมากขึ้นจะส่งผลให้แรงยึดเกาะมีค่าสูงมากขึ้นและให้ผลสอดคล้องกับการทดลองด้วย

4. สรุป

จากการศึกษาในงานนี้ทำการศึกษาระงัดเกาะระหว่างสลักยางกับสแลทคอนกรีต เพื่อใช้ในการป้องกันไม่ให้แผ่นปูสแลทเกิดการเลื่อนตำแหน่ง พบว่าค่าแรงยึดเกาะจะเพิ่มขึ้นตามค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างสแลทกับสลักยาง ในงานนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์หาค่าแรงปฏิกิริยาของสแลทและสลักยางเพื่อใช้ในการคำนวณค่าแรงยึดเกาะ ซึ่งให้ผลการคำนวณสอดคล้องการทดลองเป็นอย่างดี โดยค่าที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าสูงมากกว่าการทดลองจริงเล็กน้อย เนื่องจากปัจจัยของการขึ้นรูปต่อคุณภาพของชิ้นงานและความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบต่าง ๆ นอกจากนั้นในงานนี้ไม่ได้ทดสอบเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดระหว่างวัสดุยางและคอนกรีต ซึ่งอาจไม่สอดคล้องกับค่าที่ได้มาจากการศึกษาข้อมูลย้อนหลัง อย่างไรก็ตาม ในงานนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นถึงวิธีการหาค่าแรงปฏิกิริยาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับสลักยางซึ่งมีพฤติกรรมของวัสดุแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบสลักยางใหม่ (เมื่อมีการปรับปรุงร่างและสูตรยาง) สำหรับหาค่าแรงยึดเกาะเพื่อป้องกันการเลื่อนตำแหน่งของแผ่นปูสแลทรองคอกสัตว์ หรืองานอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับแรงเสียดทานได้ต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

ตามหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ผลลัพธ์หรือคำตอบจะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เมื่อแบบจำลองมี

ความถูกต้อง ใกล้เคียงกับปัญหาจริง อย่างไรก็ตามในงานนี้เป็นการจำลองโดยการลดความซับซ้อนของปัญหาให้ง่ายขึ้นด้วยการลดความซับซ้อนของรูปแบบ (simplified model) แม้ความสามารถของโปรแกรมและคอมพิวเตอร์ประมวลผลในปัจจุบันสามารถวิเคราะห์แรงยึดระหว่างสลักยางและสลักคอนกรีตได้ แต่ก็ให้เวลาในการประมวลผลที่นานและใช้ทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีศักยภาพสูงมากกว่า ดังนั้นการลดรูปแบบของปัญหาให้ง่าย และให้ผลใกล้เคียงและสอดคล้องกับการทดลองถือว่าเป็นวิธีการหนึ่งที่จะช่วยในการคำนวณและวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ ศูนย์ถ่ายทอดเทคโนโลยีการยาง วิทยาลัยนานาชาติยางพาราไทย-จีน ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศด้านโลหะและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับสถานที่อุปกรณ์ในการดำเนินงาน และทุนวิจัยจากการยางแห่งประเทศไทย (กยท.) ขอบคุณทีมวิจัยทุกท่านที่ช่วยที่ร่วมมือกันจนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- Carroll, G.A., Boyle, L.A., Teixeira, D.L., Van Staaveren, N., Hanlon, A. and O'Connell, N.E. 2016. Effects of Scalding and Dehairing of Pig Carcasses at Abattoirs on The Visibility of Welfare-Related Lesions. **Animal** 10(3): 460-467.
- Chookate, A. 2019. Properties Improvement and Cost Reduction of Artificial Slatted Woods from Reclaimed Natural Rubber/ Ethylene-Vinyl Acetate Blends. Master degree of Science (Polymer Science and Technology), Faculty of Science, Department of Polymer Science and Technology, Prince of Songkla University. (in Thai)
- EASYFIX Equine Persse Business Park Perssepark Ballinasloe Co. 2021. Galway, Ireland. **SR Slat Rubber**. Available Source: <https://easyfix.com/product/sr-slat-rubber/>, March 12, 2021.
- Ferdinand, P.B., Elwood, R.J.Jr., John, T.D., David, F.M. and Sanjeev, S. 2017. **Mechanics of materials** (5thed). McGraw-Hill Publishers, New York.
- Industrial Standards Institute, Ministry of Industry. 2013. **Industrial product standards for animal pen floor mats**. TIS 2041 - 2013. Government Gazette

- page10, vol. 130, special part 52 d. (date April 26, 2013). (in Thai)
- Jaborek, J.R., Lowe, G.D. and Fluharty, F.L. 2016. Effects of Pen Flooring Type and Bedding on Lamb Growth and Carcass Characteristics. **Small Ruminant Research** 144: 28-34.
- Kaewpa, P., Tepvisut, R. and Pechurai, W. 2019. Effect of Carbon Black/CaCO₃ Ratio on Mechanical Properties of Nature Rubber Stall Mat, pp. 989-997. *In The 13th Research Administration Network of Conference*. Chiangmai University, Chiangmai Grandview Convention Center. (in Thai)
- Kaewsakul, W., Jandam, N., Kalkornsurapranee, E., Saiwari, S. and Thitithammawong, A. 2016. High Modulus Rubber Vulcanizates from Natural Rubber/EVA Blends Filled with Reinforcing Fillers. **Advanced Materials Research** 1134: 171-177.
- KilBride, A., Gillman, C., Ossent, P. and Green, L. 2009. Impact of Flooring on The Health and Welfare of Pigs. **In Practice** 31(8): 390-395.
- Linden, J. 2013. **Advice on Floor Types and Maintenance to Reduce Leg Problems and Improve Health and Hygiene in no. 37 in the 'Action for Productivity' series from BPEX**. Available Source: <https://www.thepigsite.com/articles/flooring>, March 12, 2021.
- Mack, L.A., Lay Jr, D.C., Eicher, S.D., Johnson, A.K., Richert, B.T. and Pajor, E.A. 2014. Group Space Allowance has Little Effect on Sow Health, Productivity, or Welfare in A Free-Access Stall System. **Journal of Animal Science** 92(6): 2554-2567.
- Mekbungwan, A., Yothinsirikul, W. and Khanthaprab, S. 1994. **Research Report on Effects of Floors Types on The Growth Performance in Growing Pigs. (weight 10-30 kg.)**. Maejo Institute of Agricultural Technology, Maejo University. (in Thai)
- Panivivat, R., Kegley, E.B., Pennington, J.A., Kellogg, D.W. and Krumpelman, S.L. 2004. Growth Performance and Health of Dairy Calves Bedded with Different Types of Materials. **Journal of Dairy Science** 87(11): 3736-3745.
- Penev, T., Miteva, C., Dimova, V., Roydev, R., Mitev, J. and Manolov, Z. 2013. Assessing frictional properties of rubber floors in free housing systems for dairy cows. **Trakia Journal of Sciences** 2: 197-204.
- Plastics Institute of Thailand. 2014. **Rubber Intelligence Unit**. Office of Industrial Economics. Available Source: <http://www.oie.go.th>, March 16, 2022.
- Russell, C.H. 2010. **Engineering Mechanics Dynamics** (12thed). Pearson Prentice Hall Publishers, New Jersey.
- Samklong, C., Puangchomphu, O., Wasupen, K. and Witthayakun, S. 2004. Effect of Bedding Types on Milk Yield, Milk Quality and Health in Dairy Cows. **Journal of Veterinary Medicine** 14(1): 70-80. (in Thai)
- Suso, P. 2011. Mechanical Properties of Plastic Tertiary Blends High Density Polyethylene, Low Density Polyethylene and Polypropylene. Master degree of Engineering (Manufacturing Engineering), Faculty of Engineering, Department of Industrial Engineering. Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Telezhenko, E., Bergsten, C., Magnusson, M., Ventorp, M. and Nilsson, C. 2008. Effect of different flooring systems on weight and pressure distribution on claws of dairy cows. **Journal of Dairy Science** 91(5): 1874-1884.