ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก

Relationship between the deflection and the dead weight of steel pallets

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข[1], นนท์ แสนคำแพ[1], ประสงค์ อิงสุวรรณ[2], อำนาจ ตงติ๊บ[3], ชวลิต คณากรสุขสันต์[4*]

Kullasup Phongsrisuk[1], Non Seankhamphae[1], Prasong Ingsuwan[2], Amnad Tongtib[3]

, Chawalit Khanakornsuksan[4*]

[1]สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่ 50300

[1]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangmai 50300

[2]บริษัท เค.พี. เอ็กซ์เพอท เอนจิเนียริ่ง จำกัด เชียงใหม่ 50130

KP Expert Engineering Co., Ltd., Chiangmai 50130

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อุตรดิตถ์ 53000

[3]Department of Energy Management Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit 53000

[4]ภาควิชาเกษตรกลวิธาน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

[4]Department of Farm Mechanics, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140

*Corresponding author, E-mail: chawalit.kh@ku.th Tel. 08 6730 6691

Received: 1-05-2024 ***Revised*:** 10-11-2024 ***Accepted:*** 27-12-2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นกับน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก เพื่อทำนายระยะการแอ่นเมื่อน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีค่าแปรเปลี่ยน โดยจะทำการสร้างแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ที่มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะการแอ่นจากการทดสอบจริงไม่เกินร้อยละ 10 จากนั้นนำผลการคำนวณระยะการแอ่น 5 ตำแหน่ง ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เมื่อแบบจำลองพาเลทเหล็กรับน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม มาสร้างสมการความสัมพันธ์โดยระเบียบวิธีวิเคราะห์แบบถดถอย ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์สามารถทำนายระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กโดยมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยกว่าร้อยละ 7 เมื่อเทียบกับผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากการทดสอบจริง และสมการเชิงเส้นสามารถทำนายระยะการแอ่นกับน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กได้ ทำให้ในทางปฏิบัติสามารถคำนวณระยะการแอ่นเมื่อน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีค่าแปรเปลี่ยนได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์

คำสำคัญ : พาเลทเหล็ก, การแอ่น, น้ำหนักบรรทุก, ไฟไนต์เอลิเมนต์

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

Abstract

This research aimed to discover the relationship between the deflection and the dead weight of the steel pallet to estimate the deflection when the dead weight of the steel pallet varied. The steel pallet model will be created in finite element software with a relative error of deflection from actual test not exceeding 10 percent. The results of the 5-position obtained from the finite element software, which was loaded with 240, 480, 720, 960 and 1200 kg, were used to create the relationship equations using the regression analysis method. The results show that the steel pallet model in finite element software can predict the deflection of steel pallets with a relative error of less than 7% compared with the deflection from actual test, and the linear equation can predict the deflection distance with the load of the steel pallet. Which in practice, the deflection distance when the load of the steel pallet varies can be calculated by using the interpolation.

Keyword: Steel pallet, Deflection, Dead weight, Finite elemen

1. บทนำ

พาเลทเป็นเครื่องมือสำคัญในอุตสาหกรรมโลจิสติกส์ (Logistics) ซึ่งปัจจุบันอุตสาหกรรมโลจิสติกส์มีบทบาทสำคัญในด้านเศรษฐกิจและการพัฒนาประเทศเป็นอย่างมาก ถูกจัดอยู่ในกลุ่มอุตสาหกรรมและบริการแห่งอนาคตตามยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580)[1] โดยพาเลทจะช่วยให้การจัดเก็บสินค้าในคลังสินค้าเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดความเสี่ยงในการสูญเสียหรือทำลายสินค้าระหว่างการขนส่ง[2] ซึ่งการเลือกใช้พาเลทจะคำนึงถึงน้ำหนักของสินค้าและลักษณะของสินค้า เพื่อให้มีความเหมาะสมในการจัดวางสินค้าบนพาเลท การขนย้าย ตลอดจนการบรรจุเข้าสู่ตู้คอนเทนเนอร์[3] วัสดุที่ใช้ในการทำพาเลทมีอยู่หลายชนิด เช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก คอมโพสิต อลูมิเนียม สแตนเลส เหล็ก[4] พาเลทเหล็กเป็นหนึ่งในพาเลทที่ได้รับความนิยมสูง เนื่องจากเป็นพาเลทที่มีความคงทนแข็งแรง ทนต่ออุณหภูมิและสารเคมี สามารถรับน้ำหนักได้มาก ทำให้พาเลทเหล็กเป็นพาเลทที่มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน[5] นอกจากนี้ยังเป็นพาเลทที่มีมูลค่าซากสูงและสามารถรีไซเคิลได้ 100%[6]

ในการออกแบบพาเลทเหล็กสามารถทำได้ 3 วิธีคือ การสร้างพาเลทเหล็กเพื่อทดสอบ การวิเคราะห์ทางกลศาสตร์และการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (Finite element software) ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์เป็นการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์ความแข็งแรงของพาเลทเหล็ก โดยการสร้างแบบจำลองพาเลทเหล็กในคอมพิวเตอร์ ผลการคำนวณโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จะแสดงออกมาเป็นภาพสามมิติ ทำให้เข้าใจการเสียรูปและความเค้นที่เกิดขึ้นกับพาเลทเหล็กได้ง่าย นอกจากนี้หากต้องการปรับเปลี่ยนค่าคุณสมบัติเชิงกล ขนาด หรือจำนวนชิ้นส่วนของพาเลทเหล็ก ก็สามารถจำลองเพื่อดูการเสียรูป (Deformation) และความเค้นที่เกิดขึ้น ก่อนที่จะทำการสร้างพาเลทเหล็กจริง

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

จึงทำให้การออกแบบพาเลทเหล็กด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายลงได้

การทดสอบแบบสถิตย์ (Static test) เป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบพาเลท เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพพาเลทที่มีการออกแบบและการสร้างที่ต่างกัน โดยจะทำการวัดระยะการแอ่นที่เกิดขึ้นเมื่อพาเลทรับน้ำหนักบรรทุก (Dead weight)[7] ในการออกแบบพาเลทไม้[8-9] พาเลทกระดาษ[8-10] พาเลทคอมโพสิต[8-9, 11] พาเลทเหล็ก[12] และพาเลทเหล็กแบบโมดูลาร์ที่ผสมผสานบล็อก (Blocks) และแผ่นกระดาน (Deck boards) เข้าด้วยกัน[13] โดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ จึงต้องมีการวิเคราะห์ระยะการแอ่น (Deflection) เมื่อพาเลทรับน้ำหนักบรรทุกค่าหนึ่ง ซึ่งในทางปฏิบัติพาเลทจะถูกนำมาใช้รับน้ำหนักบรรทุกหลายค่า การหาระยะการแอ่นใหม่ทุกครั้ง ไม่ว่าจะโดยการทดสอบหรือการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ ทำให้ไม่สะดวกในทางปฏิบัติ

ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงต้องการสร้างแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ ที่มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะการแอ่นจากการทดสอบจริงไม่เกินร้อยละ 10 จากนั้นทำการแปรผันน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กโดยทดสอบน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัมซึ่งเป็นช่วงน้ำหนักบรรทุกลำไยแต่ละกล่อง โดย 1 ชั้น สามารถวางลำไยได้ทั้งหมด 12 กล่อง ซึ่งเท่ากับ 240 กิโลกรัมโดยในสถานประกอบการใช้พาเลทในการบรรทุกสูงสุด 5 ชั้น จากข้อมูลดังกล่าวผู้วิจัยจึงนำไปใช้เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก โดยระเบียบวิธีวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis method) ทำให้สามารถทำนายระยะการแอ่นเมื่อน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีค่าแปรเปลี่ยน อันจะเป็นแนวทางในการนำพาเลทเหล็กไปใช้ในทางปฏิบัติ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

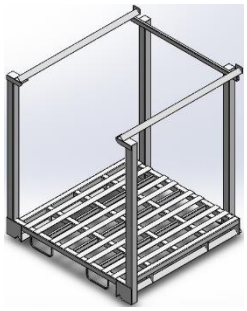
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นกระบวนการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) โดยการแบ่งแบบจำลองพาเลทเหล็กออกเป็นเอลิเมนต์เล็ก ๆ แต่ละเอลิเมนต์จะต่อเชื่อมกันที่จุดต่อ (Node) อันเป็นตำแหน่งที่จะคำนวณตัวแปรไม่ทราบค่า โดยการสร้างฟังก์ชันการประมาณ (Approximate function) ภายในเอลิเมนต์ให้มีความสอดคล้องกับสมการควบคุม (Governing equation) ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์นั้น ๆ เมื่อนำสมการไฟไนต์เอลิเมนต์มาประกอบเข้าด้วยกันจะได้สมการรวม (Global Equation) จากนั้นแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เพื่อหาตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อ ภายใต้สภาวะสมดุลของแรงภายนอกและเงื่อนไขขอบของแบบจำลอง จากหลักการดังกล่าวจึงสามารถทำเป็นไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ โดยกระบวนการของไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จะประกอบด้วยกระบวนการขั้นต้น (Pre-Processing) กระบวนการวิเคราะห์ (Processing) และกระบวนการขั้นท้าย (Post-Processing) โดยในกระบวนการขั้นต้นเป็น

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

การเตรียมข้อมูลก่อนส่งให้กระบวนการวิเคราะห์คำนวณหาผลลัพธ์ ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) การสร้างแบบจำลอง (CAD) เป็นการสร้างรูปร่างจำลองของชิ้นงานในคอมพิวเตอร์เพื่อทดแทนรูปร่างของชิ้นงานจริง ในกรณีของพาเลทเหล็กจะทำการสร้างแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 1



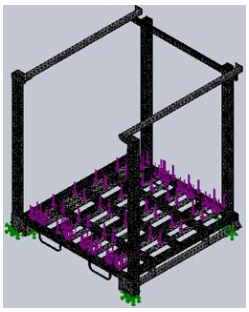
ภาพที่ 1 แบบจำลองพาเลทเหล็ก

2)การกำหนดคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ (Mechanical material property) ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์จะต้องกำหนดค่ามอดุลัสยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) และอัตราส่วนปัวซองส์ (Poisson ratio) ให้กับซอฟต์แวร์

3) การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ (Mesh) ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์สามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ได้ 3 ประเภท ตามมิติ คือ เอลิเมนต์หนึ่งมิติ เอลิเมนต์สองมิติและเอลิเมนต์สามมิติ ในกรณีของพาเลทเหล็กเนื่องจากเป็นปัญหาสามมิติ จะทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์สามมิติ ดังแสดงในภาพที่ 2

4) การกำหนดภาระที่กระทำ (Load) และจุดรองรับ (Constraint) เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากการกำหนดภาระและจุดรองรับที่ถูกต้องจะทำให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้น ในกรณีของพาเลทเหล็กภาระที่กระทำจะเป็นภาระกระจายแบบสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับพื้นที่วางสินค้า (ลูกศรสีม่วง) ส่วนจุดรองรับจะเป็นการรองรับแบบยึดแน่นบนพื้นที่ที่สัมผัสกับพื้น (ลูกศรสีเขียว) ดังแสดงในภาพที่ 3

ภาพที่ 2 แบบจำลองพาเลทเหล็ก

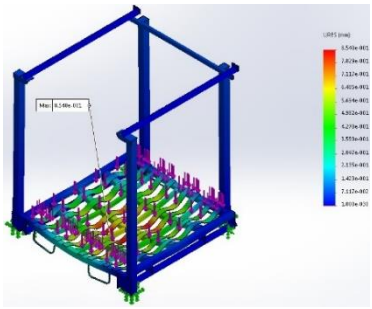


ภาพที่ 3 การกำหนดภาระและจุดรองรับ

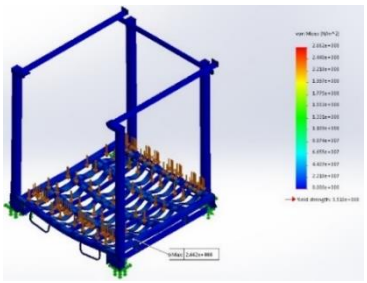
ขั้นตอนถัดมาเป็นกระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์โดยจะสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับทุกเอลิเมนต์ จากนั้นประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกันทำให้ได้สมการรวมและทำการแก้สมการรวม โดยเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะขึ้นอยู่กับจำนวนเอลิเมนต์และจุดต่อ และกระบวนการสุดท้าย คือ ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการวิเคราะห์ ซึ่งในกรณีของพาเลทเหล็กผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นความเค้นวอนมิสเซส (Von Misses stress) และการเสียรูป ดังแสดงในภาพที่ 4 และ ภาพที่ 5 ตามลำดับ โดยสีแดงหมายถึงผลลัพธ์ที่มีค่ามาก ส่วนสีน้ำเงินหมายถึงผลลัพธ์ที่มีค่าน้อย ซึ่ง

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

การแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของชั้นสีจะช่วยทำให้เข้าใจลักษณะความเค้นและการแอ่นที่เกิดขึ้นกับพาเลทเหล็กได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการเสียรูปของพาเลทเหล็ก



ภาพที่ 5 ตัวอย่างความเค้นฟอนมิสเซสของพาเลทเหล็ก

การวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุนามดีกรี n

การวิเคราะห์การถดถอยจะทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีความสัมพันธ์กันมากน้อยเพียงใด ถ้าตัวแปร x และตัวแปร y มีความสัมพันธ์กันมาก เมื่อตัวแปร x มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่อตัวแปร y เป็นอย่างมาก ในกรณีของพาเลทเหล็กตัวแปร x จะหมายถึงน้ำหนักบรรทุก (kg) ส่วนตัวแปร y จะหมายถึงระยะการแอ่น (m) ถ้าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่น มีรูปแบบความสัมพันธ์เป็นพหุนามดีกรี n จะกำหนดฟังก์ชันประมาณให้อยู่ในรูป

$$P_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (1)$$

โดย $a_0, a_1, a_2, \ldots, a_n$ เป็นค่าคงตัว ซึ่งฟังก์ชันประมาณจะทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อน S เป็น

$$S = \sum_{i=1}^{n}[y_i - P_n(x_i)]^2 \quad (2)$$

เพื่อให้ฟังก์ชันประมาณมีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันแม่นตรงและใช้แทนฟังก์ชันแม่นตรงได้ดีนั้น จะใช้ระเบียบวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method) ซึ่งมีหลักการว่า พยายามทำให้ผลรวมของค่าคลาดเคลื่อนยกกำลังสองแล้วมีค่าน้อยที่สุด[14] จึงทำให้ได้ว่า

$$\frac{\partial S}{\partial a_i} = 0 \quad (3)$$

ทำให้เขียนระบบสมการเชิงเส้น ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n}x_i & \sum_{i=1}^{n}x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^{n}x_i^n \\ \sum_{i=1}^{n}x_i & \sum_{i=1}^{n}x_i^2 & \sum_{i=1}^{n}x_i^3 & \cdots & \sum_{i=1}^{n}x_i^{n+1} \\ \vdots & & & & \vdots \\ \sum_{i=1}^{n}x_i^n & \sum_{i=1}^{n}x_i^{n+1} & \sum_{i+1}^{n}x_i^{n+2} & \cdots & \sum_{i=1}^{n}x_i^{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n}y_i \\ \sum_{i=1}^{n}x_iy_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{n}x_i^ny_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

จากนั้นแก้ระบบสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าคงตัว $a_0, a_1, a_2, \ldots, a_n$ ซึ่งจะทำให้ได้ฟังก์ชันประมาณพหุนามดีกรี n ที่อยู่ในรูป

$$f(x) \approx P_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_nx^n \quad (5)$$

โดยฟังก์ชันประมาณพหุนามดีกรี n จะมีความใกล้เคียงกับฟังก์ชันแม่นตรงเพียงใดนั้น สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (6)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^{n}(P_n(x_i) - \bar{y})^2 \quad (7)$$

$$SST = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \quad (8)$$

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

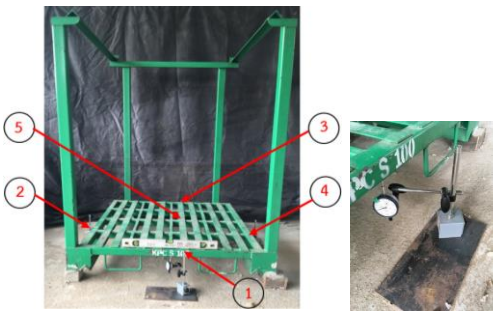
โดย SSR คือ ความแปรปรวนของระยะการแอ่นที่อธิบายได้โดยน้ำหนักบรรทุก และ SST คือ ความแปรปรวนของระยะการแอ่นทั้งหมด โดยถ้า R^2 มีค่ามาก แสดงว่าน้ำหนักบรรทุกและระยะการแอ่นมีความสัมพันธ์กันมาก หรือน้ำหนักบรรทุกสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของระยะการแอ่นได้มาก โดย R^2 จะไม่มีหน่วย และ $0 \leq R^2 \leq 1$

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กสามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1) การหาระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กโดยการทดสอบจริง เป็นการนำพาเลทเหล็กวางบนพื้นที่ใช้ปูนซีเมนต์ก่อที่โคนเสาแต่ละต้นของพาเลทเหล็กและใช้ระดับน้ำในการตั้งระดับเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากความลาดเอียงของพื้น ไดอัลเกจยี่ห้อ Mitotuyo ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตรซึ่งผ่านการสอบเทียบจากผู้ผลิตไดอัลเกจ จะถูกนำมาติดตั้ง 5 ตำแหน่ง เพื่อวัดระยะการแอ่น (เก็บข้อมูล 5 ครั้งและนำมาเฉลี่ย) โดยฐานไดอัลเกจจะวางบนแผ่นเหล็กที่ยึดกับพื้น เพื่อไม่ให้ฐานไดอัลเกจขยับขณะการทดสอบ (ภาพที่ 6) นำทรายบรรจุในกล่องขนาด 250x325 มิลลิเมตร จะทำให้ได้กล่องทรายที่มีน้ำหนัก 20 กิโลกรัม (ภาพที่ 7) จากนั้นนำกล่องทราย 12 กล่อง มาวางบนพาเลทเหล็ก ซึ่งจะทำให้เกิดน้ำหนักบรรทุกกระทำบนพาเลทเหล็ก 240 กิโลกรัม

2) การหาระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กโดยไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟท์แวร์คือการสร้างแบบจำลองพาเลทเหล็กที่มีขนาดเท่ากับขนาดชิ้นงานจริงในคอมพิวเตอร์ จากนั้นกำหนดค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองส์ให้กับซอฟต์แวร์ โดยค่ามอดุลัสยืดหยุ่นคือ 200 GPa และอัตราส่วนปัวซองส์คือ 0.26 แล้วทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ Tetrahedral และ Hexahedral ขนาด 5 มิลลิเมตร โดยผ่านการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมจากการพิจารณาลู่เข้าของผลการคำนวนค่าความเค้นและการแอ่นที่ได้จากซอฟต์แวร์ด้วยเอลิเมนต์ขนาด 20, 18, 16, 14, 12, 10, 8, 6, 4 และ 2 มิลลิเมตร เนื่องจากผลการคำนวณระยะการแอ่นและความเค้นฟอนมิสเซสที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มีการลู่เข้า ทำให้ได้แบบจำลองที่มีจุดต่อจำนวน 4,794,604 จุดต่อ และเอลิเมนต์จำนวน 2,506,678 เอลิเมนต์ น้ำหนักบรรทุกกระจายแบบสม่ำเสมอกระทำบนพาเลทเหล็กและการรองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) ที่โคนเสาแต่ละต้นของพาเลทเหล็กจะถูกกำหนด เพื่อใช้ในการคำนวณระยะการแอ่นและความเค้นฟอนมิสเซส



ภาพที่ 6 ตำแหน่งการวัดระยะการแอ่นด้วยไดอัลเกจ

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ภาพที่ 7 การบรรจุทรายลงกล่อง

3) การเปรียบเทียบระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์และการทดสอบจริง จะทำการเปรียบเทียบระยะการแอ่น 5 ตำแหน่ง เมื่อพาเลทเหล็กรับน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม โดยร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะการแอ่นสามารถหาได้จากสมการ (9)

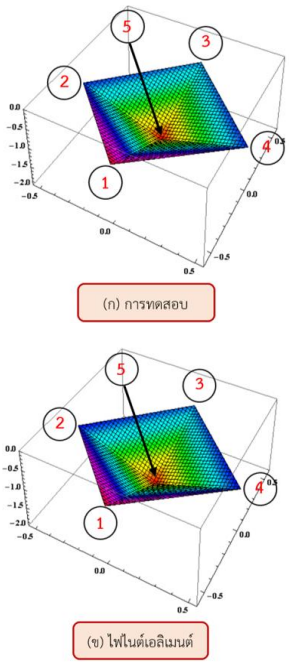
$$E = \left|\frac{y_F - y_E}{y_E}\right| \times 100 \qquad (9)$$

โดย E คือ ร้อยละความคลาดเคลื่อน, y_F คือ ระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟท์แวร์ (m) ,y_E คือ ระยะการแอ่นที่ได้จากการทดสอบจริง (m)

4) การสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กจะนำระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกมาสร้างแผนภาพการกระจาย (Scatter diagram) เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุก โดยพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจในการเลือกสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากไดอัลเกจพบว่ามีความสอดคล้องกับผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (ภาพที่ 8) โดยพาเลทเหล็กจะมีลักษณะรูปร่างการแอ่นเป็นกระทะ ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 2 และ 4 จะมีค่าใกล้เคียงกัน

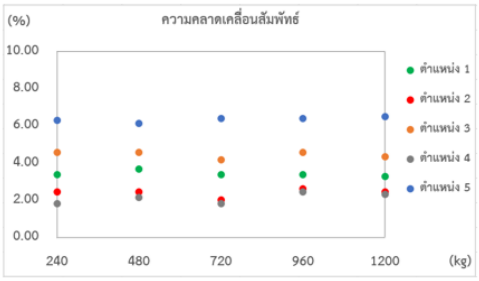


ภาพท 8 ระยะการแอนของพาเลทเหล็ก

เนื่องจากเป็นคานที่มีความยาวเท่ากันและมีการรองรับแบบเดียวกัน ส่วนตำแหน่งการวัดที่ 1 และ 3 แม้จะเป็นคานที่มีความยาวเท่ากันแต่มีการรองรับที่ต่างกัน โดยตำแหน่งการวัดที่ 3 จะเป็นคานช่วงเดียวปลายยื่น (Overhanging beam) จึงทำให้ตำแหน่งการวัดที่ 3 มีระยะการแอ่นน้อยกว่าตำแหน่งการวัดที่ 1 ส่วนตำแหน่งการวัดที่ 5 จะมีระยะการแอ่นมากสุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งกึ่งกลางของพาเลทเหล็กซึ่งอยู่ห่างจากจุดรองรับมากสุด และจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์กับผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากไดอัลเกจ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยกว่าร้อยละ 7 โดยเกิดขึ้นที่ตำแหน่งการวัดที่ 5

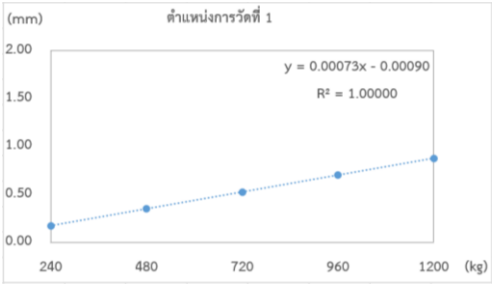
ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

(ภาพที่ 9) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ สามารถทำนายระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้ โดยความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์อาจเกิดจากขนาดของแบบจำลองพาเลทเหล็กที่สร้างในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ หรือการกำหนดค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและอัตราส่วนปัวซองส์ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มีความแตกต่างกับพาเลทเหล็กจริง[15]

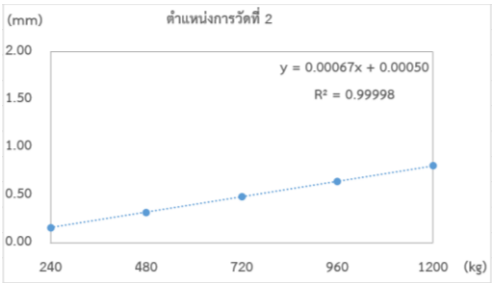


ภาพที่ 9 ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของระยะ

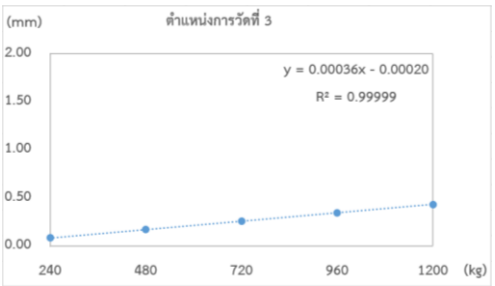
จากผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เมื่อพาเลทเหล็กรับน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม พบว่าระยะการแอ่นทั้ง 5 ตำแหน่งแปรผันตรงกับน้ำหนักบรรทุก โดยระยะการแอ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักบรรทุกมีค่าเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 10-14) ซึ่งสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กได้เป็นสมการเชิงเส้นที่มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจอยู่ในช่วง 0.99998-1.00000 ซึ่งหมายความว่าระยะการแอ่นมีการเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำหนักบรรทุก จึงทำให้ในทางปฏิบัติการนำพาเลทเหล็กไปใช้ เมื่อน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีค่าแปรเปลี่ยนสามารถคำนวณระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์ในตำแหน่งการวัดที่ 5 เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีระยะการแอ่นมากสุด



ภาพที่ 10 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 1

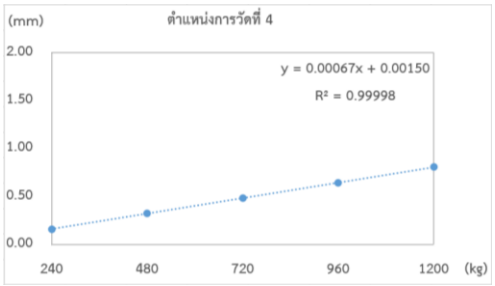


ภาพที่ 11 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 2

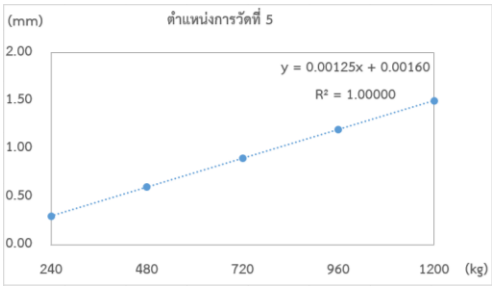


ภาพที่ 12 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 3

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)



ภาพที่ 13 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 4



ภาพที่ 14 ระยะการแอ่นในตำแหน่งการวัดที่ 5

จากงานวิจัยที่มีการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ในการวิเคราะห์ระยะการแอ่นของพาเลท [8-13] พบว่าไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ เนื่องจากพาเลทจะถูกนำมาใช้รับน้ำหนักบรรทุกหลายค่า การที่งานวิจัยนี้ค้นพบว่าสามารถคำนวณระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์นั้น จะทำให้การนำพาเลทเหล็กไปใช้ในงานจริงมีความสะดวกมากขึ้น

4. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์เพื่อทำนายระยะการแอ่นเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็ก โดยเปรียบเทียบผลที่ได้ด้วยการทดสอบวัดระยะการแอ่นจริง ซึ่งทดสอบโดยการให้พาเลทเหล็กรับน้ำหนักบรรทุก 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม ตามลำดับ ผลที่ได้พบว่าพาเลทเหล็กจะมีลักษณะรูปร่างการแอ่นเป็นกระทะเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกแบบกระจายสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับพาเลท โดยจะมีระยะการแอ่นมากสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางพาเลทเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ห่างจากจุดรองรับมากสุดซึ่งแบบจำลองพาเลทเหล็กในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ สามารถทำนายระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้ โดยมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยกว่าร้อยละ 7 เมื่อเทียบกับผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากการทดสอบจริง และเมื่อนำระยะการแอ่นกับน้ำหนักบรรทุกที่ใช้ทดสอบมาสร้างกราฟพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะการแอ่นและน้ำหนักบรรทุกของพาเลทเหล็กมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นโดยมีสมการเป็น y=mx+c ภายใต้ขอบเขตของการทดสอบอยู่ในช่วงที่วัสดุไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวรทำให้สามารถคำนวณระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กได้โดยการเทียบบัญญัติไตรยางค์

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท เค.พี. เอ็กซ์เพอท เอนจิเนียริ่ง จำกัด ที่ให้การสนับสนุนพาเลทเหล็กเพื่อใช้ในการทดสอบ

6. เอกสารอ้างอิง

[1] สำนักงานเลขานุการของคณะกรรมการยุทธศาสตร์ชาติ. สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2561. ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561-2580. ราชกิจจานุเบกษา, 135(82ก), 1-61.

[2] ภคพร ผงทอง. การจัดการโลจิสติกส์เพื่อสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันในธุรกิจพาเลท

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

ให้เช่า.วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์. 2561; 4(1): 91-100.

[3] Almasarwah N, Abdelall E, Suerl G, Egilmez G, et al. Pallet Loading Optimization Considering Storage Time and Relative Humidity. Journal of Industrial Engineering and Management. 2023;16(2): 453-471.

[4] Amin SH, Hairong W and Karaphillis G. A perspective on the reverse logistics of plastic pallets in Canada. Journal of Remanufacturing. 2018; 8: 153–174.

[5] John Clarke. Pallets 101: Industry Overview and Wood, Plastic, Paper & Metal Options. Grate Pallet Inc; 2004.

[6] World Steel Pallet. พาเลทเหล็ก (Steel Pallet) คืออะไร และทำไมถึงต้องเลือกใช้พเลทเหล็ก.2566 - วันที่สืบค้น 27 ตุลาคม 2566. จาก : https://wsp.co.th/

[7] ASTM International. ASTM D1185-98a: Standard Test Methods for Pallets and Related Structures Employed in Materials Handing and Shipping. ASTM International United States, PA 19428-2959; 2017

[8] Masood SH and Haider Rizvi S. Design optimization for pallets in material handling. Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2004. 2004; 3.4.1-3.4.12.

[9] Masood SH and Haider Rizvi S. An investigation of pallet design using alternative materials for cold room applications. Int J Adv Manuf Technol, 2006; 29: 1-8.

[10] Kodape CD and Wasankar KS. Weight reduction of standard steel pallet by using corrugated sheet instead of CRCA sheet & evaluating its strength through finite element analysis. International Research Journal of Engineering and Technology. 2018; 5(7):1105-1111.

[11] Sing KT. An experiment and finite element analysis of the static deformation wood sawdust-polyporpylene composite pallet. Universiti Sains Malaysia; 2006.

[12] Manoj P. and Ashok JK. Design optimization and Simulation Study of the Engine Transportation Metal Pallet for Stationary and Movable Condition. International Journal of u- and e-Service, Science and Technology. 2015; 8(5):219-230.

[13] Enrico Z, António T, Almeida J, Miguel Esteves, et al. Design of new modular metal pallets: Experimental validation and life cycle analysis. Materials & Design. 2022;214:1-18.

[14] Dukkipati RV. Numerical Method. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers; 2010.

ISSN 1906 – 0874, ISSN 2651-2130 (Online)

[15] Jalammanavar K, Pujar N and Raj VR. Finite element study on mesh discretization error estimation for Ansys workbench .International Conference on Computational Techniques, Electronics and Mechanical Systems (CTEMS); 2018. 344-350.