

การวิเคราะห์การแอ่นและความเค้นของพาเลทเหล็ก โดยไฟไนต์เอลิเมนต์

วันที่รับ : 1 พฤศจิกายน 2566

วันที่แก้ไข : 19 มกราคม 2567

วันที่ตอบรับ : 11 มีนาคม 2567

กุลทรัพย์ ผ่องศรีสุข¹, นนท์ แสนคำแพ¹,

ประสงค์ อิงสุวรรณ² และ อำนาจ ตงดีบ^{3*}

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

จังหวัดเชียงใหม่

²บริษัท เค.พี. เอ็กซ์เพอท์ เอนจิเนียริง จำกัด จังหวัดเชียงใหม่

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ จังหวัดอุดรดิตถ์

*Corresponding author e-mail: amnad.ton@uru.ac.th.com

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การแอ่นและความเค้นของพาเลทเหล็กในอุตสาหกรรมห้องเย็นและลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็นในพาเลทเหล็ก โดยทำการสร้างแบบจำลองพาเลทเหล็กที่มีขนาด 120x110x150 เซนติเมตร ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ และทวนสอบความถูกต้องของระยะการแอ่นของแบบจำลองพาเลทเหล็กกับการวัดระยะการแอ่นด้วยไดอัลเกจ จากนั้นทำการพิจารณาระยะการแอ่นและความเค้นพอนมิสเซสของพาเลทเหล็ก เพื่อลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็นในพาเลทเหล็ก เมื่อพาเลทเหล็กรับภาระกระจายแบบสม่ำเสมอ 1,200 กิโลกรัม กระทำตั้งฉากกับพื้นที่วางสินค้า ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองพาเลทเหล็กมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบด้วยไดอัลเกจสูงสุดร้อยละ 6.52 และการลดจำนวนชิ้นส่วนที่เป็นพื้นที่วางสินค้าของพาเลทเหล็กจะทำให้ระยะการแอ่นและความเค้นพอนมิสเซสของพาเลทเหล็กมีค่าลดลง ซึ่งทำให้สามารถลดต้นทุนและน้ำหนักของพาเลทเหล็กลงได้ร้อยละ 18.61 และ 18.57 ตามลำดับ ซึ่งผลของงานวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์กับอุตสาหกรรมที่ใช้พาเลทเหล็กในการจัดเก็บสินค้า

คำสำคัญ: พาเลทเหล็ก, ไฟไนต์เอลิเมนต์, การแอ่น, ความเค้นพอนมิสเซส



ANALYSIS OF DEFLECTION AND STRESS OF STEEL PALLET BY FINITE ELEMENT

Received : November 1, 2023

Revised : January 19, 2024

Accepted : March 11, 2024

Kullasup Phongsrisk¹, Non Seankhamphae¹,

Prasong Ingsuwan² and Amnad Tongtib^{3}*

¹Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna,
Chiangmai, Thailand

²KP Expert Engineering Co., Ltd., Chiangmai, Thailand

³Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, Uttaradit, Thailand

**Corresponding author e-mail: amnad.ton@uru.ac.th.com*

Abstract

The objectives of this research were to analyze the deflection and stress of steel pallets in the cold storage industry, and to reduce the number of unnecessary parts of the steel pallet. The steel pallet model with dimensions of 120x110x150 centimeters was created by using finite element software. The accuracy of the deflection of the steel pallet model was verified using the dial gauge test results. Subsequently, the deflection and von Misses stress of the steel pallet were determined to reduce the number of unnecessary components in the steel pallet when the steel pallet was subjected to a uniformly distributed load of 1200 kilograms acting perpendicular to the steel pallet area. The results demonstrated that the steel pallet model had a maximum error of 6.52 percent from the test results using dial gauges. By reducing the number of components in the steel pallet area, the deflection and von Misses stress of the steel pallet could be reduced. This reduction led to a decrease in the cost and weight of the steel pallet by 18.61 and 18.57 percent, respectively. The results of this research could be used to benefit industries that use steel pallets to store products.

Keywords: Steel pallet, Finite element, Deflection, von Misses stress

บทนำ

อุตสาหกรรมอาหารของประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงในการผลิต เพื่อบริโภคในประเทศ และเพื่อการส่งออก ในปี พ.ศ. 2566 (มกราคม – เมษายน) 5 อันดับแรก ของผลผลิตทางการเกษตรและอาหารที่ ประเทศไทยส่งออก ได้แก่ 1) ผักผลไม้สดแช่เย็นแช่แข็ง 2) ผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง 3) ข้าว 4) ไข่สดแช่เย็นแช่แข็ง และแปรรูป 5) อาหารทะเลสดแช่เย็นแช่แข็ง กระป๋องและแปรรูป ซึ่งรวมเป็นมูลค่า 364,398.66 ล้านบาท โดยมี ตลาดส่งออกหลักได้แก่ จีน ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา อินเดียและกัมพูชา (สมาคมแช่เยือกแข็งไทย, 2566) นับได้ว่าการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรและผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปมีบทบาทสำคัญในการสร้างรายได้เข้าประเทศเป็นอย่างมาก แต่ในการส่งออกผลผลิตทางการเกษตรและผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไม่สามารถส่งออกได้ทันที จึงต้องมีการจัดเก็บผลผลิตทางการเกษตรและผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปไว้ภายในห้องเย็นเพื่อยืดอายุขัยก่อนการส่งออก

สินค้าที่ถูกจัดเก็บภายในห้องเย็นจะถูกวางอยู่บนพาเลท (ภาพ 1) เพื่อช่วยให้เกิดความสะดวกและรวดเร็ว ในการเคลื่อนย้ายสินค้า รวบรวมสินค้าอย่างเป็นระบบและประหยัดเวลาในการขนถ่าย (ภคพร ผงทอง, 2561, น.93) นอกจากนี้พาเลทยังมีขนาดมาตรฐานสากลที่ถูกยอมรับทั่วโลก เช่น ISO6780 หรือ GMA (Grocery Manufacturers Association) ทำให้สามารถใช้งานร่วมกันได้ระหว่างอุตสาหกรรมและระหว่างประเทศ ในท้องตลาดมีพาเลทหลากหลายประเภท ได้แก่ พาเลทไม้ (Wooden pallet) พาเลทโฟม (Foam pallet) พาเลทพลาสติก (Plastic pallet) พาเลทกระดาษ (Paper pallet) พาเลทคอมโพสิต (Composite pallet) พาเลทเหล็ก (Steel pallet) เป็นต้น ซึ่งในการเลือกใช้พาเลทนั้นจะขึ้นอยู่กับต้นทุน ความทนทาน ความสามารถในการรับ น้ำหนักและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม



ภาพ 1 พาเลทเหล็กในห้องเย็นสำหรับรับน้ำหนักลำไยในอุตสาหกรรมอาหาร

พาเลทเหล็กเป็นพาเลทที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในห้องเย็น เนื่องจากทนอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -40 ถึง 200 องศาเซลเซียส มีความแข็งแรงและทนทาน เหมาะสำหรับการจัดเก็บสินค้าที่มีน้ำหนักมาก การใช้วัสดุสแตนเลส แทนเหล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานที่ออกแบบ (อำนาจ ตงต๊ิบ และพงษ์ธร วิจิตรกุล, 2565, น.51) แต่พาเลทเหล็กมีข้อเสียในเรื่องของราคาและน้ำหนักที่มาก (Saman et al., 2018, p.154) จึงได้มีการนำระเบียบวิธี

ไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method: FEM) มาวิเคราะห์การเสียรูปและความเค้นของพลาเหล็ก เมื่อมีการใช้ไม้อัด (Plywood) แผ่นลูกฟูก (Corrugated sheet) วัสดุคอมโพสิตที่ทำจากแผ่นลูกฟูกและไม้อัด ทดแทนเหล็กกล่องที่ทำหน้าที่เป็นคานของพลาเหล็ก (Masood & Haider, 2004, p.3.4.2; Masood & Haider, 2006, p.1) การใช้แผ่นลูกฟูกทดแทนเหล็กแผ่นรีดเย็น (CRCA) ที่ทำหน้าที่เป็นพื้นที่วางสินค้าของพลาเหล็ก (Kodape & Wasankar, 2018, p.1106) การพัฒนาพลาเหล็กแบบโมดูลาร์ที่ผสมผสานบล็อก (Blocks) และแผ่นกระดาน (Deck boards) เข้าด้วยกัน (Zacchei et al., 2022, p.2) ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้วัสดุทดแทนเหล็กในบางชิ้นส่วนเพื่อลดต้นทุนและน้ำหนักของพลาเหล็ก

พลาเหล็กเมื่อรับภาระเนื่องจากน้ำหนักสินค้าแล้ว อาจมีบางชิ้นส่วนในพลาเหล็กที่ไม่ได้รับภาระหรือรับภาระที่น้อย งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การแอ่นและความเค้นของพลาเหล็กและลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็นสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมห้องเย็นที่อยู่ในอำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งจะเป็นผลให้ต้นทุนและน้ำหนักของพลาเหล็กลดลง โดยผลของงานวิจัยสามารถนำไปใช้กับบริษัทที่ใช้พลาเหล็กในการจัดเก็บสินค้าในพื้นที่อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่ เช่น อุตสาหกรรมหรือบริษัทที่ผลิตกระดาษอัด กระดาษสา และเครื่องปั้นดินเผาประเภทสุสานหินในท้องถิ่น ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำกันมากในพื้นที่อำเภอสันกำแพง จังหวัดเชียงใหม่

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อวิเคราะห์การแอ่นและความเค้นของพลาเหล็กและลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็นสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมห้องเย็น

วิธีดำเนินการวิจัย

การทำวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนของการใช้ทฤษฎีในการวิเคราะห์การแอ่นและความเค้นของพลาเหล็กโดยในการวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการดำเนินงาน และส่วนที่สองเป็นการสร้างแบบจำลองในการทดสอบเพื่อที่จะทำการลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็น

1. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของปัญหาในงานทางด้านวิศวกรรมจะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equation: ODE) หรือสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation: PDE) ในการหาผลเฉลยสมการเชิงอนุพันธ์ที่รูปทรงทางเรขาคณิต (Geometry) และเงื่อนไขขอบ (Boundary condition) ของปัญหามีความซับซ้อน จำเป็นต้องใช้กระบวนการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate solution) ซึ่งระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหนึ่งในระเบียบวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยโดยประมาณ โดยมีหลักการพื้นฐานดังนี้

1.1 การแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ จะเป็นการแยกโดเมนหรือโครงสร้าง (ภาพ 2) ที่ต่อเนื่องกันออกเป็นโดเมนย่อยหรือองค์ประกอบขนาดเล็กจำนวนจำกัดที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) โดยสามารถแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์ได้ 3 ประเภท ตามมิติ คือเอลิเมนต์หนึ่งมิติ เอลิเมนต์สองมิติและเอลิเมนต์สามมิติ ขึ้นอยู่กับปัญหา ในกรณีของพลาเหล็กเนื่องจากเป็นปัญหาสามมิติ จะทำการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์สามมิติ



ภาพ 2 การแบ่งแบบจำลองพลาเทหลักออกเป็นเอลิเมนต์สามมิติ

1.2 การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นการสร้างฟังก์ชันประมาณ (Approximate function) สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการกำกับ (Governing equation) ของแต่ละปัญหา เพื่อประมาณพฤติกรรมของตัวไม่ทราบค่าของแต่ละเอลิเมนต์ เช่น การกระจัด ความเค้น เป็นต้น ปัญหาทางสถิติศาสตร์สามารถสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เป็น

$$[k]\{d\} = \{f\} \quad (1)$$

โดย $[k]$ คือ เมทริกซ์สติฟเนสของเอลิเมนต์ (N/m)
 $\{d\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัดของเอลิเมนต์ (m)
 $\{f\}$ คือ เวกเตอร์แรงของเอลิเมนต์ (N)

1.3 การสร้างสมการรวม เป็นการรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกันผ่านจุดต่อ (Node) ที่ใช้ร่วมกันของแต่ละเอลิเมนต์ เพื่อประมาณพฤติกรรมของโดเมน ซึ่งเขียนสมการได้เป็น

$$[K]\{D\} = \{F\} \quad (2)$$

โดย $[K]$ คือ เมทริกซ์สติฟเนสของโดเมน (N/m)
 $\{D\}$ คือ เวกเตอร์การกระจัดของโดเมน (m)
 $\{F\}$ คือ เวกเตอร์แรงของโดเมน (N)

1.4 การแทนเงื่อนไขขอบเขต จะเป็นการกำหนดข้อจำกัดหรือภาระที่กระทำต่อโดเมน เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจากการกำหนดภาระและจุดรองรับ (Constraint) ที่ถูกต้องจะทำให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้น ในกรณีของพลาเทหลักภาระที่กระทำจะเป็นการกระจายแบบสม่ำเสมอกระทำตั้งฉากกับพื้นที่วางสินค้า ส่วนจุดรองรับจะเป็นการรองรับแบบยึดแน่นในตำแหน่งที่สัมผัสกับพื้น

1.5 การแก้สมการรวม จะเป็นการแก้สมการที่ได้จากการรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของทุกเอลิเมนต์เข้าด้วยกัน ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) เพื่อหาตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อทั่วทั้งโดเมน

1.6 การแสดงผลภาพ (Visualization) จะเป็นการแสดงผลลัพธ์ของตัวไม่ทราบค่าที่จุดต่อทั่วทั้งโดเมนในรูปแบบของชั้นสี โดยสีแดงหมายถึงผลลัพธ์ที่มีค่ามาก ส่วนสีน้ำเงินหมายถึงผลลัพธ์ที่มีค่าน้อย ในกรณีของพลาสม่าผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นการเสียรูป (Deformation) และความเค้นพอนมิสเสส (Von Mises stress) ซึ่งความเค้นพอนมิสเสส (Budynas & Nisbett, 2011, p.223) สามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

โดย $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ คือ ความเค้นหลัก (Principal stress) N/m^2

2. การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์

การศึกษากการเสียรูปและความเค้นของพลาสม่าจะทำการสร้างแบบจำลองพลาสม่าในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ จากนั้นทดสอบแบบจำลองพลาสม่าโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์กับผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากการทดสอบจริง โดยกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative error) น้อยกว่าร้อยละ 10 แบบจำลองพลาสม่าที่ผ่านการทดสอบแล้วจะถูกนำมาพิจารณาเพื่อลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็น โดยจะคำนึงถึงระยะการแอ่น ความเค้นพอนมิสเสสและเสถียรภาพของพลาสม่า

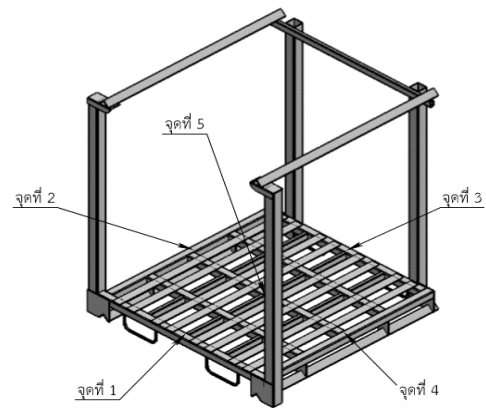
แบบจำลองพลาสม่าที่มีขนาด $120 \times 110 \times 150$ เซนติเมตรทำจากเหล็ก SS400 จะถูกสร้างในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (โปรแกรม SolidWorks) โดยใช้วัสดุไอโซทรอปิก (Isotropic material) ที่มีค่ามอดุลัสยืดหยุ่น 210 GPa อัตราส่วนปัวซองส์ 0.30 และความหนาแน่น 7850 kg/m^3 (ข้อมูลจาก บริษัท เค.พี. เอ็กซ์เพอเทอเนจเนียริง จำกัด) จากนั้นแบบจำลองจะถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามมิติ และถูกกำหนดจุดรองรับและภาระที่กระทำ ไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จะคำนวณระยะการแอ่นและความเค้นพอนมิสเสสของแบบจำลองพลาสม่าโดยใช้วิธีการหาผลเฉลยแบบอัตโนมัติ (Automatic solver)

ในการทดสอบแบบจำลองพลาสม่าโดยการทดสอบจริงจะนำพลาสม่าที่มีขนาด $120 \times 110 \times 150$ เซนติเมตร มาวางบนพื้น จากนั้นนำกล่องทรายที่มีน้ำหนัก 20 กิโลกรัม จำนวน 12 กล่อง มาวางบนพลาสม่า (ภาพ 3ก) ทำให้พลาสม่ารับน้ำหนักบรรทุก 240 กิโลกรัม ทำการวัดระยะการแอ่นของพลาสม่าด้วยไดอัลเกจยี่ห้อ Mitotuyo ความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร โดยจะทำการวัดทั้งหมด 5 ตำแหน่ง (ภาพ 3ข) จากนั้นทำการแปรผันน้ำหนักที่กระทำต่อพลาสม่าเป็น 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักบรรทุกทุกหน่วยในห้องเย็น โดยผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (y_F) และผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากการทดสอบจริง (y_E) สามารถหาความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ได้ดังสมการ (4)

$$Relative\ error = \frac{y_F - y_E}{y_E} \times 100 \quad (4)$$



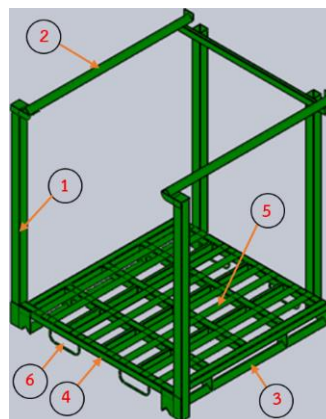
(ก) การทดสอบระยะการแอ่นของพาเลทเหล็ก



(ข) การติดตั้งไดอัลเกจในแต่ละตำแหน่ง

ภาพ 3 การทดสอบระยะการแอ่นของพาเลทเหล็กและการติดตั้งไดอัลเกจในแต่ละตำแหน่ง

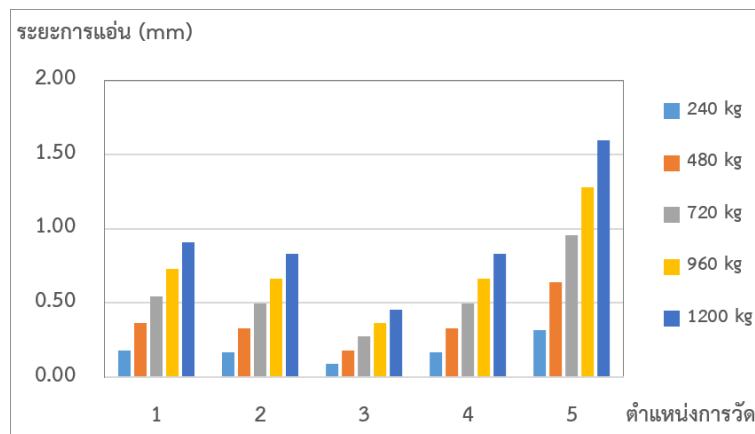
ในการพิจารณาเพื่อลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็นในแบบจำลองพาเลทเหล็ก จะพิจารณาชิ้นส่วนทั้งหมด 6 ชิ้นส่วน (ภาพ 4) โดยชิ้นส่วนที่ 1 เป็นเสาของพาเลทเหล็กใช้สำหรับรองรับน้ำหนักพาเลทเหล็กที่นำมาวางซ้อนกัน ชิ้นส่วนที่ 2 และ 3 เป็นรางด้านบนและด้านล่างของพาเลทเหล็ก ตามลำดับ ใช้สำหรับเป็นแนวในการนำพาเลทเหล็กมาวางซ้อนกัน ชิ้นส่วนที่ 4 เป็นคานของพาเลทเหล็กใช้สำหรับรองรับน้ำหนักสินค้าบนพาเลทเหล็ก ชิ้นส่วนที่ 5 เป็นพื้นที่วางสินค้าของพาเลทเหล็กใช้สำหรับกันสินค้าไม่ให้หลุดลงไปในช่วงว่าง ชิ้นส่วนที่ 6 เป็นช่องเปิดของพาเลทเหล็กใช้สำหรับให้รถยก (Forklifts) เข้าตัดพาเลทเหล็ก ซึ่งชิ้นส่วนที่ 1, 2, 3 และ 6 ถึงแม้จะมีระยะการแอ่นและความเค้นพอนมีขนาดเล็ก แต่เป็นชิ้นส่วนที่ไม่สามารถลดจำนวนได้ เนื่องจากชิ้นส่วนที่ 1 มีผลต่อเสถียรภาพของพาเลทเหล็ก ส่วนชิ้นส่วนที่ 2, 3, และ 6 มีผลต่อความสะดวกในการนำพาเลทเหล็กมาวางซ้อนกัน จึงพิจารณาชิ้นส่วนที่ 4 และ 5 ในการลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็น จากนั้นจึงนำจำนวนชิ้นส่วนที่ลดได้คิดเป็นการลดต้นทุนโดยใช้การคำนวณจากนำจำนวนชิ้นที่ได้คูณกับความยาวของแต่ละชิ้น และคูณราคาเฉลี่ยของเหล็กแบนที่นำมาใช้สร้างพาเลทเหล็ก ผลที่ได้คือการลดต้นทุนที่มีหน่วยเป็นบาทซึ่งถูกนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับต้นทุนเดิมที่ใช้เหล็กแบนสร้างพาเลทเหล็กก่อนการลดจำนวนชิ้นส่วนจากการทำวิจัย



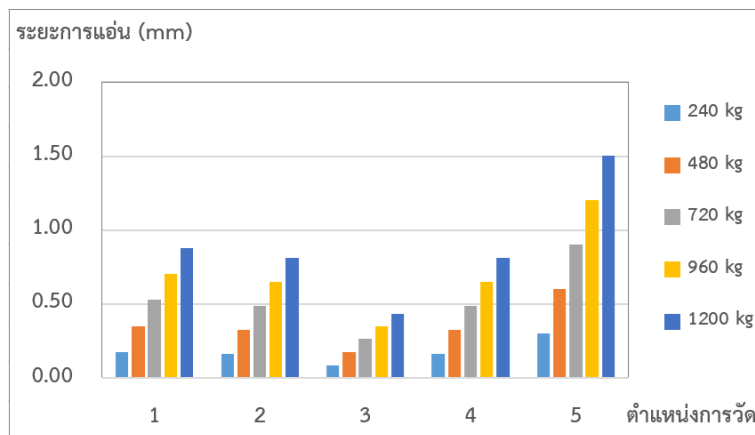
ภาพ 4 ชิ้นส่วนในพาเลทเหล็ก

ผลการวิจัย

จากผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (ภาพ 5ก) และผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากไดอัลเกจ (ภาพ 5ข) เมื่อพาล์พเหล็กรับภาระ 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม พบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยระยะการแอ่นจะแปรผันตรงกับภาระที่กระทำบนพาล์พเหล็ก และตำแหน่งกึ่งกลางของพาล์พเหล็ก (ตำแหน่งการวัดที่ 5) จะมีระยะการแอ่นมากที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ห่างจากจุดรองรับมากที่สุด ค่าสทิฟเนส (K) ของพาล์พเหล็กจึงมีค่าน้อยกว่าตำแหน่งการวัดอื่น



(ก) ระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์



(ข) ระยะการแอ่นที่ได้จากไดอัลเกจ

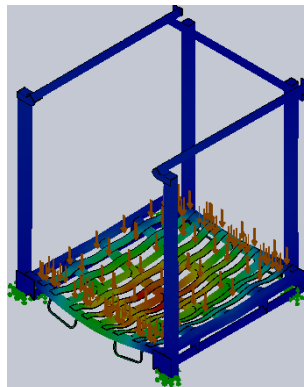
ภาพ 5 ระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์และไดอัลเกจ

ในส่วนของการทดสอบผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์กับผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากไดอัลเกจ (ตาราง 1) พบว่าผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มีค่ามากกว่าผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากไดอัลเกจ โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 6.525 ที่ภาระ 1200 กิโลกรัม ในตำแหน่งการวัดที่ 5 โดยความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากความแตกต่างของขนาดชิ้นงานและค่าคุณสมบัติเชิงกล อันได้แก่ ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น อัตราส่วนปัวซองส์และความหนาแน่น (Jalammanavar et al., 2018, p.345)

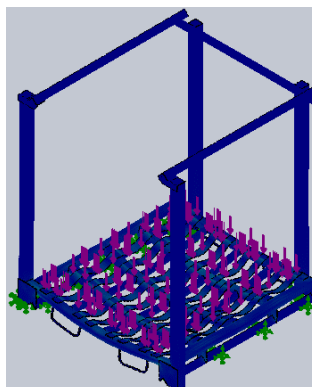
ตาราง 1 การทดสอบระยะการแอ่น

ตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อน				
	240 kg	480 kg	720 kg	960 kg	1200 kg
1	3.41	3.70	3.41	3.41	3.29
2	2.47	2.47	2.05	2.63	2.47
3	4.60	4.60	4.20	4.60	4.36
4	1.84	2.15	1.84	2.47	2.34
5	6.31	6.14	6.43	6.40	6.52

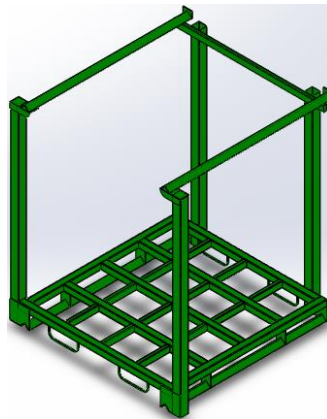
ผลการคำนวณระยะการแอ่น (ภาพ 6) และความเค้นพอนมัสเซส (ภาพ 7) ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ เมื่อพาเลทเหล็กรับภาระ 1200 กิโลกรัม พบว่าชั้นส่วนที่ 5 มีระยะการแอ่นและความเค้นพอนมัสเซส มากกว่าชั้นส่วนที่ 4 เนื่องจากมีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัด (Area moment of inertia) น้อยกว่า โดยชั้นส่วนที่ 5 ใช้สำหรับ วางสินค้าและกันสินค้าไม่ให้หลุดลงไปในช่องว่าง ซึ่งหากกล่องสินค้ามีขนาดใหญ่กว่าช่องว่าง ชั้นส่วนที่ 5 จะเป็น ชั้นส่วนที่ไม่จำเป็น จึงพิจารณาลดจำนวนชั้นส่วนที่ 5 ทำให้พาเลทเหล็กมีลักษณะดังภาพ 8 ซึ่งพบว่าผลการคำนวณ ระยะการแอ่น (ภาพ 9ก) และความเค้นพอนมัสเซส (ภาพ 9ข) ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์จะมีค่าลดลง



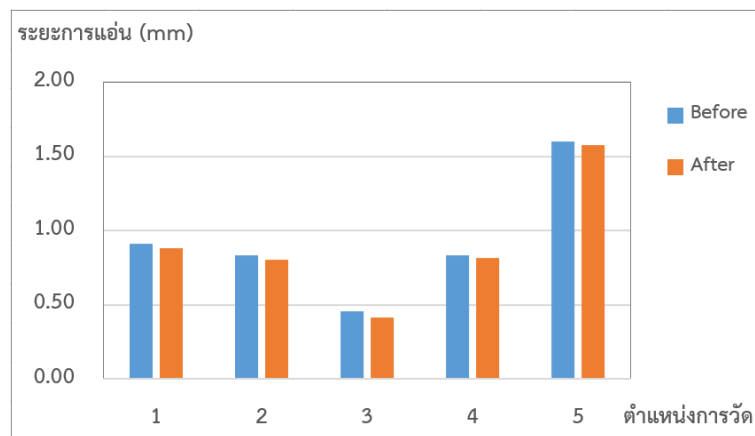
ภาพ 6 ระยะการแอ่นก่อนลดจำนวนชั้นส่วน



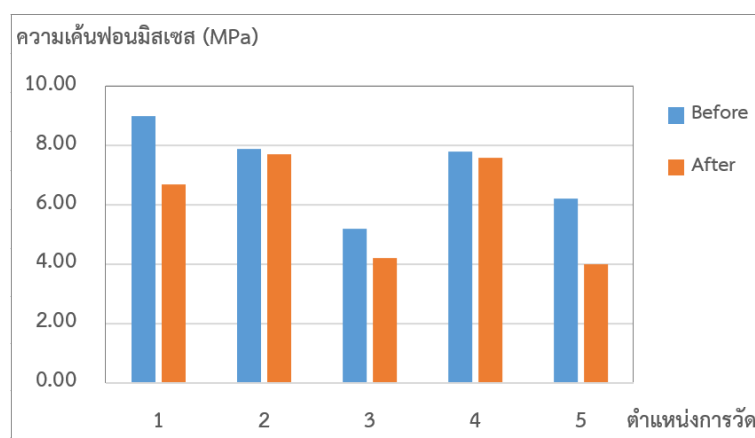
ภาพ 7 ความเค้นพอนมัสเซสก่อนลดจำนวนชั้นส่วน



ภาพ 8 แบบจำลองพาเลทเหล็กหลังลดจำนวนชิ้นส่วน



(ก) การเปรียบเทียบระยะการแอ่นหลังลดจำนวนชิ้นส่วน



(ข) การเปรียบเทียบความเค้นฟอนมิสเชสหลังลดจำนวนชิ้นส่วน

ภาพ 9 การเปรียบเทียบระยะการแอ่นและความเค้นฟอนมิสเชสหลังลดจำนวนชิ้นส่วน

จากการลดจำนวนชิ้นส่วนที่ใช้สำหรับวางสินค้าและกันสินค้าไม่ให้หลุดลงไปในช่องว่าง (ชิ้นส่วนที่ 5) สามารถลดการใช้เหล็กแบนที่มีขนาด 52x1192x5 มิลลิเมตร ได้จำนวน 8 ชิ้น ซึ่งเหล็กแบนขนาดดังกล่าวมีราคาเฉลี่ย 55.37 บาท/เมตร และน้ำหนัก 1.96 กิโลกรัม/เมตร ทำให้สามารถลดต้นทุนและน้ำหนักพาเลทเหล็กลงได้ 527.98 บาท และ 18.73 กิโลกรัม ตามลำดับ หรือร้อยละ 18.61 และ 18.57 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 การลดต้นทุนและน้ำหนักของพาเลทเหล็ก

ประเภท	ต้นทุน (บาท)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)
พาเลทเดิม	2837.12	100.86
พาเลทใหม่	2309.14	82.13
ประหยัด	527.98	18.73
ร้อยละ	18.61	18.57

อภิปรายผลการวิจัย

สำหรับการวิเคราะห์การแอ่นและความเค้นด้วยวิธีการสร้างแบบจำลองและทวนสอบด้วยการใช้ไดอัลเกจ วัดระยะการแอ่นที่ตำแหน่งต่างๆ พบว่าการแอ่นเกิดสูงสุดบริเวณกึ่งกลางของพาเลทเหล็ก (ภาพ 6) ซึ่งเป็นไปอย่างสมเหตุสมผล โดยพบว่ามีความคลาดเคลื่อนของการแอ่นสูงสุดร้อยละ 6.52 ที่ภาระ 1200 กิโลกรัม ในตำแหน่งการวัดที่ 5 ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากความแตกต่างของขนาดชิ้นงานและค่าคุณสมบัติเชิงกลจึงสามารถใช้แบบจำลองในการวิเคราะห์การลดชิ้นส่วนของพาเลทเหล็ก จากนั้นในการพิจารณาลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็นในแบบจำลองพาเลทเหล็กนั้นผู้วิจัยได้คำนึงถึงลักษณะการใช้งานและลักษณะการรับแรงของพาเลทเหล็กเป็นหลัก โดยได้ทำการลดจำนวนชิ้นส่วนในพาเลทเหล็กในแบบจำลองในส่วนที่ 4 และ 5 (ภาพ 4) ผลที่ได้ถูกแสดงด้วยการเปรียบเทียบการแอ่นและความเค้นพอนมิสเชสกอนและหลังการลดจำนวนชิ้นส่วนโดยลดได้จำนวน 8 ชิ้น จากผลดังกล่าวทำให้น้ำหนักลดลงทั้งหมด 18.73 กิโลกรัม คิดเป็นเงิน 527.98 บาท และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่มีการใช้วัสดุทดแทนเหล็กในบางชิ้นส่วนพบว่าสามารถลดต้นทุนและน้ำหนักของพาเลทเหล็กลงได้ร้อยละ 11 และร้อยละ 43-50 (Masood & Haider, 2004, p.3.4.12; Masood & Haider, 2006, p.8; Kodape & Wasankar, 2018, p.1110; Zacchei et al., 2022, p.13) ตามลำดับ ซึ่งสามารถลดน้ำหนักของพาเลทเหล็กได้มากกว่างานวิจัยนี้ แต่สามารถลดต้นทุนของพาเลทเหล็กได้น้อยกว่า นอกจากนี้วัสดุทดแทนเหล็กยังมีอายุการใช้งานที่น้อยกว่าพาเลทเหล็กที่สามารถใช้งานได้ถึง 20 ปี (Zacchei et al., 2022, p.13) จึงทำให้การออกแบบและพัฒนาพาเลทเหล็กยังคงมีความจำเป็น

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์การแอ่นและความเค้นของพลาเหล็ก โดยทำการสร้างแบบจำลองพลาเหล็กที่มีขนาด 120x110x150 เซนติเมตร ในไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์และทวนสอบความถูกต้องของระยะการแอ่นของแบบจำลองพลาเหล็กกับผลการทดสอบด้วยไดอัลเกจโดยพลาเหล็กรับภาระ 240, 480, 720, 960 และ 1200 กิโลกรัม ผลที่ได้พบว่าระยะการแอ่นจะแปรผันตรงกับภาระที่กระทำบนพลาเหล็ก และตำแหน่งกึ่งกลางของพลาเหล็ก (ตำแหน่งการวัดที่ 5) จะมีระยะการแอ่นมากที่สุด เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ห่างจากจุดรองรับมากที่สุดและผลการคำนวณระยะการแอ่นที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์มีความสอดคล้องกับผลการวัดระยะการแอ่นที่ได้จากไดอัลเกจ โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดร้อยละ 6.52 ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของพลาเหล็กเมื่อพลาเหล็กรับภาระ 1200 กิโลกรัม จากนั้นจึงทำการลดจำนวนชิ้นส่วนที่ใช้สำหรับวางสินค้าและกันสินค้าไม่ให้หลุดลงไปในช่องว่างเมื่อกล่องสินค้ามีขนาดใหญ่มากกว่าช่องว่างโดยได้ทำการลดจำนวนชิ้นส่วนในพลาเหล็กในแบบจำลองในส่วนที่ 4 และ 5 (ภาพ 4) ซึ่งลดการใช้เหล็กแบนที่มีขนาด 52x1192x5 มิลลิเมตร ได้จำนวน 8 ชิ้น ผลที่ได้ถูกนำเสนอด้วยการเปรียบเทียบระยะการแอ่นความเค้นพอนมิสเชกก่อนและหลังลดจำนวนชิ้นส่วนโดยความเค้นพอนมิสเชกและระยะการแอ่นหลังการลดชิ้นส่วนมีค่าลดลงเนื่องจากได้ทำการลดชิ้นส่วนที่มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดน้อยออกจำนวนชิ้นส่วนในการรับแรงลดลงซึ่งเป็นไปอย่างสมเหตุสมผล และจากการลดจำนวนชิ้นส่วนของพลาเหล็กดังกล่าวทำให้สามารถลดต้นทุนและน้ำหนักพลาเหล็กลงได้ 527.98 บาท และ 18.73 กิโลกรัม ตามลำดับ หรือร้อยละ 18.61 และ 18.57 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

จากผลการวิจัยจะเห็นได้ว่าการลดจำนวนชิ้นส่วนที่ไม่จำเป็นออกทำให้ลดต้นทุนในการผลิตพลาเหล็กและลดน้ำหนักได้แต่อาจจะส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขการใช้งาน เช่น สินค้าที่จะนำมาวางบนชั้นพลาเหล็กจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าช่องพื้นของตัวพลาเหล็กจึงทำให้ในการนำพลาเหล็กที่ได้จากงานวิจัยไปใช้งานต้องระบุเงื่อนไขของขนาดสินค้าให้ชัดเจน รวมไปถึงการผสมผสานวัสดุที่เป็นธรรมชาติ เช่น กระจาดขัด เพื่อใช้เป็นพื้นที่วางสินค้าของพลาเหล็กซึ่งจะช่วยลดน้ำหนักให้กับพลาเหล็ก

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองและทดสอบด้วยการใช้เหล็กเป็นวัสดุเพียงอย่างเดียวซึ่งทำให้ชิ้นส่วนมีน้ำหนักมากซึ่งในการออกแบบนั้นสามารถใช้วัสดุอื่นที่มีคุณสมบัติที่ดีด้านอื่นๆ ช่วยในการออกแบบได้ เช่น การใช้วัสดุสแตนเลสแทนเหล็กเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงานที่ออกแบบ วัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยลงแต่น้ำหนักเบา หรือ วัสดุผสมที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้เดิมแต่น้ำหนักเบา เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณ ขอขอบคุณ บริษัท เค.พี. เอ็กซ์เพอท์ เอนจิเนียริง จำกัด ที่ให้การสนับสนุนพลาเหล็กเพื่อใช้ในการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- ภคพร ผงทอง. (2561). การจัดการโลจิสติกส์เพื่อสร้างความได้เปรียบทางการแข่งขันในธุรกิจพาเลทให้เข้า. *วารสารมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์*, 4(1), 91-100.
- สมาคมแช่เยือกแข็งไทย. (2566, 21 มิถุนายน). *ประชุมสถานการณ์และแนวทางการส่งเสริมการส่งออกสินค้าเกษตรอาหารและเครื่องดื่ม ครั้งที่ 3/2566*. <https://www.thai-frozen.or.th/TH/Event/Detail/96b7e052-8754-4d5b-a710-9ddae0c649c4>
- อำนาจ ตงดีบ และพงษ์ธร วิจิตรกุล. (2565). การออกแบบและทดสอบเครื่องผสมข้าวแฉนวนอนที่มีใบกวนแบบบริบบอน. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์*, 17(2), 37-54.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2011). *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill.
- Jalammanavar, K., Pujar, N., & Raj, R. V. (2018, December 21-22). *Finite element study on mesh discretization error estimation for Ansys workbench* [Oral presentation]. International Conference on Computational Techniques, Electronics and Mechanical Systems (CTEMS), Belgaum, India.
- Kodape, C. D., & Wasankar, K. S. (2018). 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 (IRJET)*, 5(7), 1105-1111.
- Masood, S. H., & Haider, R. S. (2004, December 6-9). *Design optimization for pallets in material handling*. The 5th Asia-Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference" (APIEMS2004), Gold Coast, Australia.
- _____. (2006). An investigation of pallet design using alternative materials for cold room applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29,1-8.
- Saman, H. A., Hairong, W., & George, K. (2018). A perspective on the reverse logistics of plastic pallets in Canada. *Journal of Remanufacturing*, 8, 153-174.
- Zacchei, Enrico., Tadeu, António., Almeida, João., Esteves, Miguel., Santos, Maria Inês., & Silva, Samuel. (2022). Design of new modular metal pallets: Experimental validation and life cycle analysis. *Materials & Design*, 214, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110425>