

การวิเคราะห์ความเสถียรของโครงสร้างเครื่องจักรกลแบบ Lattice

Structure Stability Analysis of Lattice-Type Machine Structures

ชัชพล ชังชู^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถ. พหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

*ผู้ติดต่อ: E-mail: fengcpc@ku.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-2942-8555, เบอร์โทรสาร 0-2579-4576

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้การผลิตเครื่องจักรกล (โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องจักรกลซีเอ็นซี) ของผู้ผลิตเครื่องจักรกลในโซนสหภาพยุโรปได้เริ่มมีแนวโน้มที่จะทดแทนโครงสร้างเครื่องจักรกลแบบเดิม (ที่ผลิตมาจากเหล็กหล่อ) เป็นโครงสร้างประเภทอื่นที่มีคุณลักษณะด้านความเสถียรของโครงสร้าง (structure stability) ที่ดีกว่าหรืออย่างน้อยเทียบเท่าของเดิม น้ำหนักน้อยกว่า และมีกรรมวิธีการผลิตที่ยุกยักซับซ้อนน้อยกว่า ซึ่งหนึ่งในทางเลือกดังกล่าวคือ การใช้โครงสร้างแบบ lattice ซึ่งจากข้อได้เปรียบของโครงสร้างแบบ lattice ที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงความเป็นไปได้ในการนำโครงสร้างในลักษณะดังกล่าวมาใช้เป็นโครงสร้างเครื่องจักรกล ความละเอียดสูงสำหรับเครื่องจักรกลขนาดเล็กที่ผลิตในประเทศไทย โดยการศึกษาวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่การออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรกลในส่วนฐานเครื่องจักรให้มีลักษณะเป็นแบบ lattice โดยมีเกณฑ์สำคัญในการศึกษาคือ 1) ต้องมีความเสถียรเพียงพอต่อการใช้งาน, 2) มีการใช้ชิ้นส่วนที่เป็น common part มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้, 3) มีกระบวนการผลิตโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และ 4) ต้นทุนการผลิตอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์โดยวิธีคำนวณแบบดั้งเดิมและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า โครงสร้างดังกล่าวที่ได้พัฒนาในงานวิจัยนี้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะนำไปใช้งานได้จริง

คำหลัก: โครงสร้าง, เครื่องจักรกล, ความเสถียร

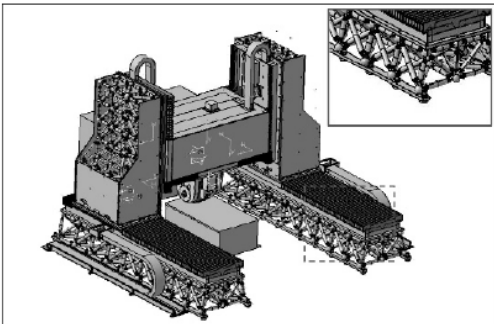
Abstract

Currently, the trend of machine tool manufacturing (especially CNC machines) in Europe has been shown that the conventional structure (made from cast iron) is going to be replaced with new kinds of machine structures. These new structures have a good stability, lower weight and less complication in manufacturing processes. One of these structures is a lattice structure. In this paper, researcher studied the possibility of employing the lattice structure as the structure of small precision machines in Thailand. Major criterion for this study are: 1) the structure having enough stability for its duty, 2) the structure constructing by using the common parts as much as possible, 3) no complication in assembly processes, and 4) acceptable cost. By using both the conventional method and the Finite Element Method, it was found that the strength of the designed lattice structure has enough for using as small precision machine structures.

Keywords: Structure, Machine, Stability

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันนี้แนวโน้มการพัฒนาโครงสร้างเครื่องจักรกลซีเอ็นซี หรือโครงสร้างเครื่องจักรกลความละเอียดสูงอื่นๆ นั้นมีแนวโน้มที่ต้องการความเสถียรทั้งทางภาวะแบบสถิตยศาสตร์ ภาวะแบบพลศาสตร์ และการสั่นมากยิ่งขึ้น [1] นอกจากนี้ในปัจจุบันนี้ ยังมีการใช้แนวคิดเรื่อง eco-efficiency ในการออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรกลซึ่งในกลุ่มประเทศ EU มีการใช้แนวคิดดังกล่าวกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยแนวคิดดังกล่าวจะเป็นการสร้างมลพิษในกระบวนการผลิตให้น้อยที่สุดโดยผ่านการใช้ทรัพยากรและพลังงานในกระบวนการผลิตให้น้อยที่สุด ซึ่งตัวอย่างโครงสร้างเครื่องจักรกลแบบใหม่ได้ นำเสนอไว้ในภาพที่ 1 และ 2 ทั้งนี้โครงสร้างดังกล่าวจะมีน้ำหนักที่เบาแต่มี stability สูง โดยหลักการออกแบบของโครงสร้างเครื่องจักรกลดังกล่าว นั้นจะอาศัยโครงถักเป็นหลักแต่ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะมีสมบัติเป็น active damping device [1, 2]



ภาพที่ 1 แนวคิดใหม่ในการออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรแบบโครงถัก [1]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงความเป็นไปได้ในการนำโครงสร้างในลักษณะดังกล่าวมาใช้เป็นโครงสร้างเครื่องจักรกลความละเอียดสูงสำหรับเครื่องจักรกลขนาดเล็กที่ผลิตในประเทศไทย โดยการศึกษาวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นที่การออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรกลในส่วนฐานเครื่องจักรให้มีลักษณะเป็นแบบ lattice โดยมี

เงื่อนไขที่สำคัญในการออกแบบคือ 1) ต้องมีความเสถียรเพียงพอต่อการใช้งาน, 2) มีการใช้ชิ้นส่วนที่เป็น common part มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้, 3) มีกระบวนการผลิตโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนมากนัก และ 4) ต้นทุนการผลิตอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



ภาพที่ 2 เครื่องจักรกลซีเอ็นซีต้นแบบที่ใช้โครงสร้างเครื่องจักรแบบโครงถัก [2]

2. วิธีการ

ในการศึกษาวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

การทดลองที่ 1 การพัฒนาแนวคิดการออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรกล

ในการทดลองนี้จะเป็นการมุ่งเน้นการออกแบบแนวคิดสำหรับโครงสร้างเครื่องจักรกลแบบ lattice ซึ่งการออกแบบดังกล่าวจะคำนึงถึงเงื่อนไขที่สำคัญทั้ง 4 ข้อเป็นหลัก สำหรับเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนต่างๆ นั้นจะใช้ตามมาตรฐาน DIN และ ISO ที่เกี่ยวข้องเป็นหลัก [3-7]

การทดลองที่ 2 การวิเคราะห์ความแข็งแรงภายใต้ภาวะแบบสถิตยศาสตร์แบบ conventional method

สำหรับการทดลองนี้จะมีที่การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องจักรกลแบบ lattice ภายใต้ภาวะแบบสถิตยศาสตร์ ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวจะใช้การวิเคราะห์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นหลัก อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ใน

การทดลองที่ 2 นี้จะเป็นการวิเคราะห์ unit cell (ของโครงสร้างแบบ lattice) ที่รับภาระสูงสุด

การทดลองที่ 3 การวิเคราะห์ความแข็งแรงภายใต้ภาระแบบสถิตยศาสตร์โดยใช้ FEA

ในการทดลองที่ 3 นี้ จะคล้ายคลึงกับการวิเคราะห์ในการทดลองที่ 2 ซึ่งมุ่งเน้นที่การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างเครื่องจักรกลแบบ lattice ภายใต้ภาระแบบสถิตยศาสตร์ โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นหลัก

อย่างไรก็ตามการทดลองที่ 3 นี้ ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ

- การทดลองที่ 3.1: เป็นการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการคำนวณแบบ conventional method (การทดลองที่ 2) กับการคำนวณโดยใช้ FEA
- การทดลองที่ 3.2: เป็นการประยุกต์ใช้ FEA ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงทั้งโครงสร้างแบบ lattice

3. ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการทดลองที่ 1

ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการการออกแบบโครงสร้างเครื่องจักรเป็นแบบโครงถัก ทั้งนี้โครงถักที่เหมาะสมควรมีโครงสร้างเป็นแบบ Mero Space Truss (ดังภาพที่ 3) ทั้งนี้เนื่องมาจาก Mero Space Truss นั้นสร้างขึ้นมาจากการประกอบท่อ (tube) เข้ากับตัวยึด (connection part) ทำให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นโครงสร้างเครื่องจักรขนาดใหญ่ได้ นอกจากนี้ Mero Space Truss ยังมีข้อได้เปรียบอื่นๆ อีกเช่น

1. Mero space truss สามารถเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างได้สะดวกโดยการเพิ่มขนาด \varnothing ของท่อ
2. การบำรุงรักษาสามารถทำการถอดเปลี่ยนเฉพาะส่วนที่ชำรุดเสียหายได้
3. สามารถเพิ่มความสูงของโครงสร้างโดยการเพิ่มจำนวนชั้นได้ง่าย

4. สามารถนำไปใช้ในโรงงานโครงสร้างประเภทอื่นๆได้

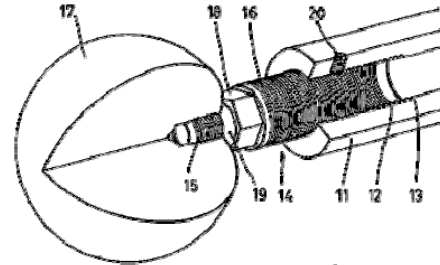


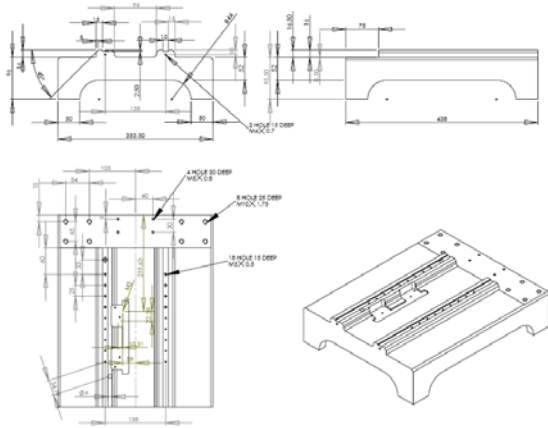
Fig. 2

ภาพที่ 3 Celosia para estructura de maquina [8]

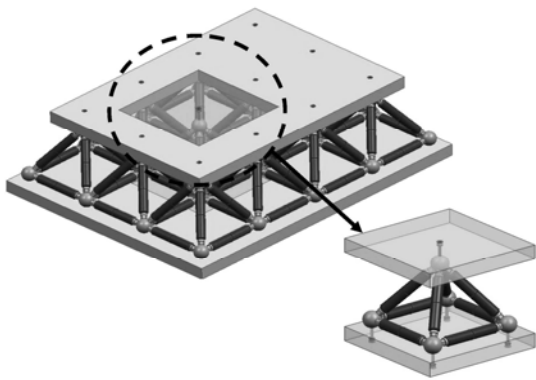
อนึ่งหากพิจารณาบานเครื่องจักรกลที่จะนำมาใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นฐานของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี 5 แกนขนาดเล็กของบริษัท 3D Scanner (Thailand) จำกัด (ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 4 และ 5) แล้ว ฐานเครื่องจักรกลที่เป็นแบบ lattice จะมีมิติและรูปร่างดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 4 โครงสร้างของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีกรณีศึกษา (bed และ column)



ภาพที่ 5 แบบวาด (drawing) ที่มีมิติของเครื่องจักรกล
ซีเอ็นซีกรณีศึกษา

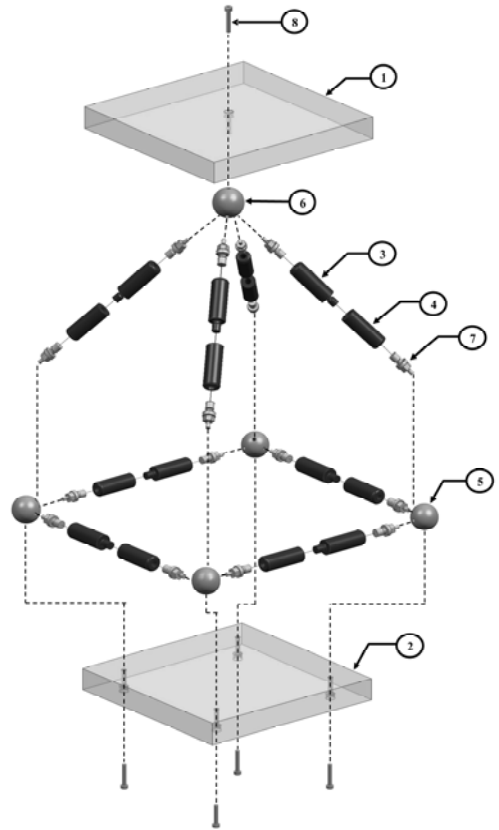


ภาพที่ 6 โครงสร้างเครื่องจักร (ฐาน) แบบ lattice

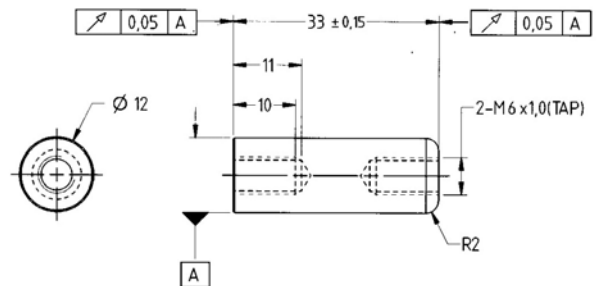
โดยโครงสร้างดังกล่าวจะมีขนาด กว้าง 340 มม. 440 มม. สูง 124.71 มม. และจะประกอบไปด้วย โครงสร้างแบบ pyramidal core จำนวน 12 หน่วย ซึ่งมีจำนวนชิ้นส่วนและขนาดที่เหมือนกัน ซึ่งแต่ละหน่วย มีขนาดกว้าง 140 มม. ยาว 140 มม. สูง 124.71 มม. และเมื่อทำการแยกส่วนแต่ละหน่วยจะได้ดังภาพที่ 7

ทั้งนี้แผ่น plate บน-ล่างทำจาก Medium Carbon Steel - AISI 1045 หนา 10 mm สำหรับ tube ทำจากวัสดุชนิดเดียวกันมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm

โดยการควบคุมเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทาง เรขาคณิตในชิ้นส่วนต่างๆ ได้นำเสนอไว้ในตารางที่ 1 และสำหรับตัวอย่างแบบวาดของชิ้นส่วนต่างๆ นั้น ผู้วิจัยได้นำเสนอไว้ในภาพที่ 8



ภาพที่ 7 แบบวาดการประกอบ (assembly drawing) ของโครงสร้างเครื่องจักรแบบ lattice ลักษณะ pyramidal core

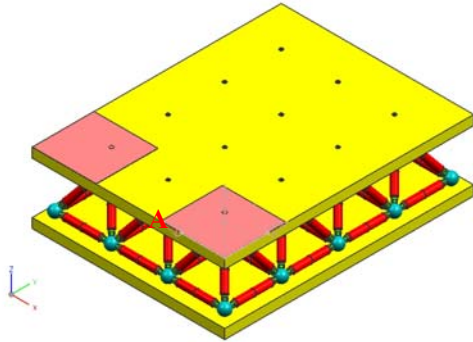


ภาพที่ 8 ตัวอย่างแบบวาดพร้อมมิติของชิ้นส่วน
หมายเลข 4 (tube no. 2)

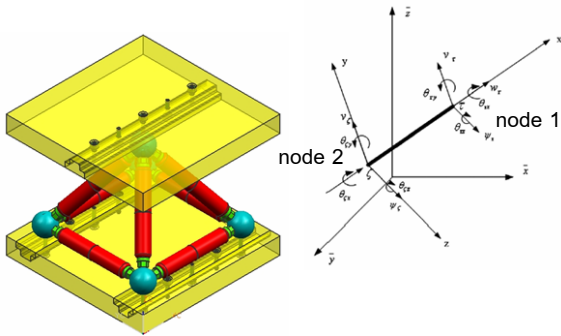
3.2 ผลการทดลองที่ 2

สำหรับการทดลองในส่วนนี้จะเน้นหนักที่การ วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างแบบ lattice ซึ่ง ในการวิเคราะห์นี้ ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์เฉพาะ pyramidal core ที่รับภาระสูงสุดเท่านั้น (ซึ่งในที่นี้คือ บริเวณจุดรองรับ column ดังแสดงในภาพที่ 9) อย่างไรก็ตามเนื่องจากโครงสร้างแบบ pyramidal

core เป็นโครงสร้างที่มีลักษณะที่สมมาตร ดังนั้นการวิเคราะห์จะทำเพียง tube เดียวดังแสดงในภาพที่ 10 สำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจะกระทำตามวิธีของ Liu et. al. [9]



ภาพที่ 9 บริเวณจุดรองรับของ column



ภาพที่ 10 การวิเคราะห์โครงสร้างตามวิธีของ Liu et. al. [9]

ซึ่งเมื่อนำมาเขียนเป็นสมการ global stiffness matrix แล้วจะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{Bmatrix} P_{x1} \\ P_{y1} \\ P_{z1} \\ M_{x1} \\ M_{y1} \\ M_{z1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2} & 0 & \frac{4EI_y}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_z}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_z}{l} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \\ \theta_{x1} \\ \theta_{y1} \\ \theta_{z1} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

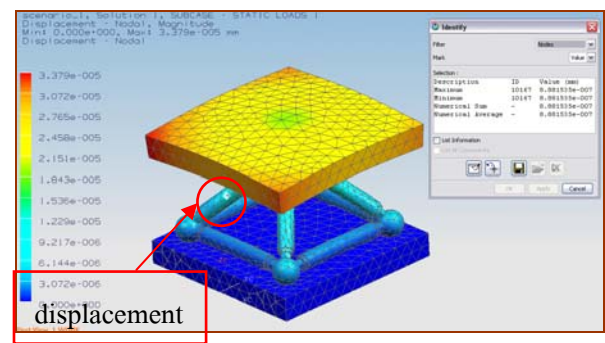
และเมื่อทำการใส่ค่าตัวเลขต่างๆ เข้าไปในสมการที่ (1) แล้วจะได้ผลการคำนวณดังนี้คือ ค่า

deflection (w_1) = 9.7450×10^{-4} μm และ slope at $\theta_{y1} = 1.8280 \times 10^{-3}$ rad. ซึ่งจากผลข้างต้นจะพบว่า tube ของโครงสร้างแบบ lattice ที่ได้ออกแบบไว้ใน การทดลองที่ 1 นั้นมีความแข็งแรงเพียงพอที่ใช้เป็นฐานเครื่องจักรกลกรณีศึกษาได้

3.3 ผลการทดลองที่ 3

3.3.1 ผลการทดลองที่ 3.1

เมื่อนำ unit cell (pyramidal core) ในภาพที่ 10 มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี FEA แล้วจะพบว่า ณ column (node 1 - 2) จะมีการโก่งตัวสูงสุด 8.815×10^{-4} μm ดังแสดงในภาพที่ 11 และหากเปรียบเทียบกับผลการโก่งตัวที่ได้จากการทดลองที่ 2 (conventional method) แล้วจะพบว่ามีความแตกต่างเกิดขึ้นเท่ากับ 8.86% ซึ่งตัวเลขดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลการคำนวณการเสีรูป (โก่งตัวของ unit cell) ที่คำนวณจากวิธีการ FEA มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยวิธี conventional method ดังนั้นจึงเป็นการยอมรับได้หากจะมีการวิเคราะห์การเสีรูปของทั้งโครงสร้างฐานเครื่องจักรกลแบบ lattice โดยการใช้วิธี FEA

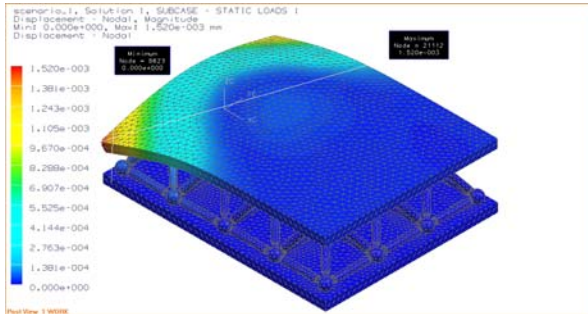


ภาพที่ 11 ผลการวิเคราะห์ displacement ของ pyramidal core ด้วย FEA

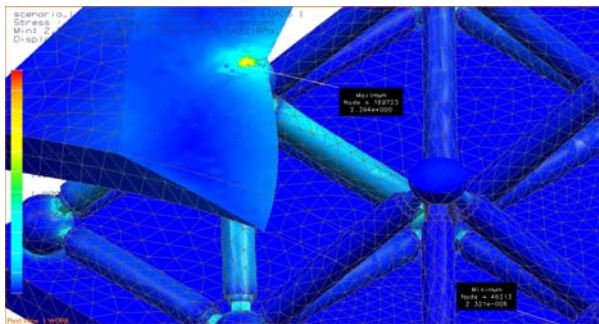
3.3.2 ผลการทดลองที่ 3.2

เมื่อนำโครงสร้างฐานเครื่องจักรกลแบบ lattice ที่ได้ทำการออกแบบไว้ใน การทดลองที่ 1 มาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ FEA (ภายใต้โปรแกรม NX-5 และใช้ solver เป็น NX-Nastran) ผลการวิเคราะห์

ปรากฏว่า ค่า displacement สูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 1.520 μm และค่า stress (Von Mises) สูงสุดเท่ากับ 2.394 MPa ดังแสดงในภาพที่ 12 – 13



ภาพที่ 12 ผลการวิเคราะห์ displacement ของโครงสร้างฐานเครื่องจักรกลแบบ lattice ด้วย FEA



ภาพที่ 13 ผลการวิเคราะห์ stress ของโครงสร้างฐานเครื่องจักรกลแบบ lattice ด้วย FEA

เมื่อพิจารณาค่า displacement สูงสุดที่เกิดขึ้นคือ 1.520 μm เทียบกับค่า GD&T ของโครงสร้างที่ควบคุมไว้ที่ 10 μm แล้วจะพบว่าค่าการเสียรูปดังกล่าวต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้มาก ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า โครงสร้างฐานเครื่องจักรกลแบบ lattice ที่ได้ออกแบบไว้มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาใช้เป็นฐานเครื่องจักรกลแทนฐานเครื่องจักรกลแบบดั้งเดิม

4. สรุป

การวิเคราะห์ความเสถียรของโครงสร้างเครื่องจักรกลแบบ lattice ที่ได้กระทำในการวิจัยนี้เป็น การวิเคราะห์ภายใต้ภาวะแบบสถิตยศาสตร์ ซึ่งผลการ

วิเคราะห์โดยการใช้วิธี FEA พบว่าโครงสร้างกรณีศึกษาซึ่งเป็นโครงสร้างฐานเครื่องจักรกลซีเอ็นซีมีการเสียรูปไปเพียงเล็กน้อย (ต่ำกว่าค่า GD&T ที่ระบุไว้) ดังนั้นในเบื้องต้นจึงอาจกล่าวได้ว่า โครงสร้างฐานเครื่องจักรกลแบบ lattice ที่ได้ออกแบบในการวิจัยนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นฐานเครื่องจักรกลซีเอ็นซีแทนฐานเครื่องจักรกลแบบเดิมที่ได้จากระบวนการหล่อได้

5. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้ยังมีได้ทำการวิเคราะห์ความเสถียรของโครงสร้างแบบ lattice ภายใต้ภาวะแบบพลศาสตร์และภายใต้การสั่นทางกล ดังนั้นจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาโครงสร้างดังกล่าว หากการวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างภายใต้ภาวะทั้ง 2 ได้มีการศึกษาวิจัยขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัท 3D Scanner (Thailand) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องต่างๆ สำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในการสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ (งปม. ปี 2553)

7. เอกสารอ้างอิง

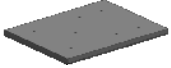





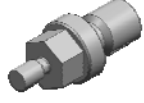
- [1] L. N. Lo'pez de Lacalle and A. Lamikiz (Editors), *Machine Tools for High Performance Machining*, Springer, Printed in Spain, 2009.
- [2] www.fatronik.com (2009)
- [3] DIN 3141.
- [4] DIN 7168.1991.
- [5] ISO 1101.2004.
- [6] DIN EN ISO 4287.1998.
- [7] DIN EN ISO 4288.1998.
- [8] Saenz Fernandez, Agustin J. 2003. Celosia para estructura de maquina. Numero de

publication 2195680. Oficina española de patentes y marcas. España.

Homogenization, International Journal of Solids and Structures, No. 43, pp. 7891 – 7918, 2006.

[9] T. Liu, Z. C. Deng and T. J. Liu, Design Optimization of Truss-Cored Sandwiches with

ตารางที่ 1 ตำแหน่งและชนิดของการกำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตในชิ้นส่วนต่างๆ

ชื่อชิ้นส่วน	รูปภาพชิ้นส่วน	ตำแหน่งที่ต้องควบคุม	ชนิดการควบคุม
Upper plate		ผิวด้านบนและผิวด้านล่างของ plate	ความขนานของผิว
Lower plate		ตำแหน่งรูเจาะร้อยสกรู ความหนาของ plate ความเรียบของผิวด้านบนและด้านล่างของ plate	ตำแหน่งของรู dimension tolerance ความเรียบของผิว
Connector ball No.1		ตำแหน่งระหว่างรูเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	ตำแหน่งของรู dimension tolerance
Connector ball No.2		ตำแหน่งระหว่างรูเกลียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	ตำแหน่งของรู dimension tolerance
Tube No.1		หน้าแปลนที่ใช้ในการประกอบ ความยาวที่ใช้งานของ tube	เบี่ยงเบนเมื่อหมุน แต่ละระนาบ dimension tolerance
Tube No. 2		หน้าแปลนที่ใช้ในการประกอบ ความยาวที่ใช้งานของ tube	เบี่ยงเบนเมื่อหมุน แต่ละระนาบ dimension tolerance
Connector bolt		หน้าแปลนที่ใช้ในการประกอบ ความยาวที่ใช้งานของ connector bolt	เบี่ยงเบนเมื่อหมุน แต่ละระนาบ dimension tolerance