

**การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน โดย
ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์**

**A Dynamics Response Predicting of Two Axis Rotary Table using Finite Element
Method**

ชัชวาล โรจนประทีป¹, ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ¹, ชนะ รัชศิริ², ชัยยกร จันทร์สุวรรณ¹, สุกันตา อวะภาค³

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

² ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

³ สาขาวิชาไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

E-mail: r.chatchawan@gmail.com * ติดต่อ: โทรศัพท์: 089 078 8322

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างทางกลของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน โดยการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์นี้จะแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง คือ การทดสอบพฤติกรรมทางพลศาสตร์ด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์วัดความเร่ง บนชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน และการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน แล้วทำการทำนายพฤติกรรมทางพลศาสตร์โดยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ภายใต้สภาวะโหลดที่กำหนด ซึ่งทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบผลการศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ทั้งสองแนวทาง แล้วนำผลการทางพลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบมาปรับปรุงแบบจำลอง 3 มิติ ให้ได้มาซึ่งแบบจำลองที่สามารถใช้ในการทำนายผลทางพลศาสตร์ที่ถูกต้องและแม่นยำ เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการศึกษาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างทางกลของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนและปรับปรุงโครงสร้าง ซึ่งการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์มีความผิดพลาด 7.32 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับความเร่งเฉลี่ยที่วัดได้จากการทดสอบ

คำหลัก: ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์,ชุดโต๊ะกัดแบบหมุน 2 แกน,ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์

Abstract

Objective of this paper is a predicting the dynamics response of the mechanical structure of two axis Rotary Table by studying behavior dynamic is divided two way. Testing dynamics response by accelerometer sensor 3 axis and Creating model of two axis Rotary Table to predict dynamics response under load by finite element method. These method are checking by compare result between testing and simulation that get accurate and right for dynamic response. This model is developed instead to predict dynamics response and develop structure. Dynamic Response of finite element method have error 7.32 percent by compare with average acceleration of testing.

Keywords: Dynamics Response ,Two axis Rotary Table ,Finite element Method.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมส่วนใหญ่ในประเทศไทยเป็นอุตสาหกรรมผลิตที่ต้องอาศัยเครื่องจักรซีเอ็นซี แม้ว่าเครื่องจักรซีเอ็นซีจะมีประสิทธิภาพในการผลิตสูง แต่เครื่องจักรซีเอ็นซีในประเทศไทยส่วนใหญ่ยังคงเป็นเครื่องจักรซีเอ็นซีประเภท 3 แกนซึ่งบางครั้งไม่สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนเทียบเท่ากับเครื่องซีเอ็นซีประเภท 5 แกนได้ ดังนั้นจึงนำชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศมาทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ทางโครงสร้างทางกล ซึ่งโครงสร้างทางกลของเครื่องจักรซีเอ็นซีในอุตสาหกรรมนั้น เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องจักรกล บางครั้งยังเป็นชิ้นส่วนสำคัญในการรับภาระโหลดที่มากกระทำ ซึ่งภาระโหลดที่มากกระทำนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น ภาระโหลดที่มากกระทำไม่คงที่ (fluctuating loading) ภาระโหลดที่มากกระทำซ้ำ (repeated loading) ภาระโหลดที่มากกระทำแบบกระแทก (impact loading) ซึ่งภาระโหลดที่มากกระทำนั้น ส่งผลทำให้โครงสร้างทางกลของเครื่องจักรซีเอ็นซีแสดงพฤติกรรมการตอบสนองของมาตามลักษณะของโครงสร้าง เช่น การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การสั่นสะเทือน เป็นต้น ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มเกี่ยวข้องกับปัญหาทางด้านการสั่นสะเทือน เนื่องจากโครงสร้างทางกลนั้นมีคุณสมบัติคล้ายความแข็งตึงสปริง (Stiffness) [4] ฉะนั้นจึงเป็นปัญหาประการหนึ่งในการออกแบบระบบโครงสร้างของเครื่องจักรกล

วิธีการในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์จึงมีความจำเป็นสำหรับการออกแบบโครงสร้างทางกล โดยที่บทความนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สิ่งสำคัญคือการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับปัญหา [4] ซึ่งการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ในแต่ละซอฟต์แวร์ต่าง ๆ มีความแตกต่างกันตามผู้ผลิตซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็มีจุดเด่นแตกต่างกันไป งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ MSC MARC ทำนายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ (Dynamics Response) ทางกลของชุดโต๊ะ

กัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน โดยออกแบบแบบจำลองโครงสร้างทางกลสามมิติของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ซึ่งรับภาระโหลดที่มากกระทำ แล้วทำการวิเคราะห์แบบไดนามิกสถิตินิยม (Dynamic Transient) ซึ่งสามารถหาผลเฉลยได้จากวิธีผลต่าง

วิธีอนุพันธ์โดยตรงแบ่งได้ 2 แบบคือ

1. วิธีแบบปริยาย (Implicit integration method)

1.1 ระเบียบวิธีของฮูลโบ (Houbolt method)

1.2 ระเบียบวิธีของวิลสัน (Wilson method)

1.3 ระเบียบวิธีของนิวมาร์ค (Newmark method)

2. วิธีแบบชัดแจ้ง (Explicit integration method)

2.1 ระเบียบวิธีของรุงเงอ-คุททา (the Runge-Kutta method) [2,4,5]

อย่างไรก็ตามความไม่สมบูรณ์ต่างๆไม่ว่าจะเป็นรูปทรงเรขาคณิตของแบบจำลอง รวมถึงคุณสมบัติทางวัสดุทำให้ค่าภาวะขอบเขต มวลและความแข็งตึงสปริงทางโครงสร้าง ของโครงสร้างจริงมีแนวโน้มแตกต่างไปจากแบบจำลอง จึงต้องทดสอบผลตอบสนองทางพลศาสตร์เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ทางกล สามารถทำได้โดยการกระตุ้นชิ้นงานให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยวิธีการต่างๆ แล้วใช้เซนเซอร์ห้วงวัดความเร่ง วัด ณ ตำแหน่งต่างๆของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน นำผลตอบสนองที่ได้ในระบบ ระหว่างผลตอบสนองที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบ เพื่อนำผลตอบสนองทางพลศาสตร์มาสร้างและปรับปรุงแบบจำลองให้ได้มาซึ่งความถูกต้องและแม่นยำ

อย่างที่ได้อธิบายมาขั้นต้นแล้ว ชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนนั้นมีความจำเป็นอย่างมากในการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงได้ดำเนินการวิจัยกับชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ และ ทดสอบด้วยอุปกรณ์

เซนเซอร์หัววัดความเร่ง เพื่อให้ทราบถึงผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับชุดโต๊ะกักขังงานแบบหมุน 2 แกน ได้โดยง่าย และประหยัดเวลา

2. ทฤษฎี

2.1 สมการการเคลื่อนที่

พิจารณาสมาการการเคลื่อนที่ของระบบทางกล

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{f\} \quad (1)$$

โดยที่ [M],[C] และ [k] คือเมทริกซ์ของมวล(mass), ความหน่วง(damping) และค่าความแข็งตึง(stiffness), $\bar{x}$ คือเวกเตอร์บอกตำแหน่ง, $\dot{x}$ คือเวกเตอร์บอกความเร็ว และ $\ddot{x}$ คือเวกเตอร์บอกความเร่ง [4,5]

2.2 ระเบียบวิธีของฮอยโบ (Houbolt method)

เป็นวิธีที่อยู่บนหลักการที่สำคัญคือ การเปลี่ยนแปลงความเร่งและความเร็วให้อยู่ในรูปแบบของค่าเคลื่อนที่ที่จุดต่อเพื่อสามารถหาค่าเคลื่อนที่ตามเวลาที่เปลี่ยนไปได้ จากเทเลอร์ซีรีส์เอ็กแพนชัน (Taylor's series expansion) แบบย้อนถดถอย (backward) ที่การแบ่งช่วงเวลาเป็น $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$ เพื่อหาผลเฉลยของเวกเตอร์การกระจัดและอัตราเร็ว

ระเบียบวิธีของฮอยโบในระบบแบบหลายระดับชั้นเสรีอิสระ(Multidegree of freedom systems) [2,5]

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{6\Delta t} (11\dot{u}_{i+1} - 18\dot{u}_i + 9\dot{u}_{i-1} - 2\dot{u}_{i-2}) \quad (2)$$

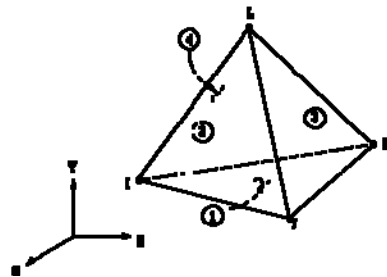
$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{1}{(\Delta t)^2} (2\ddot{u}_{i+1} - 5\ddot{u}_i + 4\ddot{u}_{i-1} - \ddot{u}_{i-2}) \quad (3)$$

แทนสมการ 2,3 ในสมการ 1

$$\begin{aligned} & \left(\frac{2}{(\Delta t)^2} [m] + \frac{11}{6\Delta t} [c] + [k] \right) x \ddot{u}_{i+1} \\ &= \bar{F}_{i+1} + \left(\frac{5}{(\Delta t)^2} [m] + \frac{3[c]}{\Delta t} \right) \ddot{u}_i \\ & - \left(\frac{4}{(\Delta t)^2} [m] + \frac{3[c]}{2\Delta t} \right) \ddot{u}_{i-1} \\ & + \left(\frac{1}{(\Delta t)^2} [m] + \frac{[c]}{3\Delta t} \right) \ddot{u}_{i-2} \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สามมิติ (element interpolation function)

การเลือกลักษณะของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ที่คำนวณได้ซึ่งเอลิเมนต์แบบสามมิติที่นิยมใช้กันมากมีอยู่สองแบบคือ เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (tetrahedral element) และเอลิเมนต์ทรงหกหน้า (hexahedral element) [1,3,4,7]



รูปที่ 1 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าสี่โหนด

ที่มา :Finite Element Analysis:theory and Application with ANSYS third edition, หน้า688

2.3.1 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า(tetrahedral element) มีจุดต่อ 4 โหนดแต่ละโหนดมี 3 ชั้นความอิสระคือ X,Y,Z

$$\begin{aligned} u^e &= c_{11} + c_{12}x + c_{13}y + c_{14}z \\ v^e &= c_{21} + c_{22}x + c_{23}y + c_{24}z \\ w^e &= c_{31} + c_{32}x + c_{33}y + c_{34}z \end{aligned} \quad (5)$$

โดยที่ $c_{11}, c_{12}, \dots, c_{34}$ เป็นค่าคงตัวที่หาได้จากเงื่อนไขของค่าที่จุดต่อทั้ง 4 โหนด แทนค่าคงตัวที่หาได้ในสมการ 5 จะสามารถเขียนลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณให้อยู่ในรูปของค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u^e &= s_1 u_I + s_2 u_J + s_3 u_K + s_4 u_L \\ v^e &= s_1 v_I + s_2 v_J + s_3 v_K + s_4 v_L \\ w^e &= s_1 w_I + s_2 w_J + s_3 w_K + s_4 w_L \end{aligned} \quad (6)$$

โดย $s_i, i=1,2,3,4$ คือฟังก์ชันการประมาณภายใน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$s_i = \frac{1}{6v} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad i = 1,2,3,4$$

$$v = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}$$

$$a_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_3 \end{vmatrix} \quad b_1 = - \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_3 \end{vmatrix}$$

$$c_1 = - \begin{vmatrix} x_2 & 1 & z_1 \\ x_3 & 1 & z_2 \\ x_4 & 1 & z_3 \end{vmatrix} \quad d_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} \quad (7)$$

การสร้างแรงกระตุ้นจากวัตถุสามารถหาได้จากอิมพัลส์ (impulse) ของแรง จากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของระบบโดยที่ถ้าให้ $\dot{x}_1$ และ $\dot{x}_2$ คือความเร็วของมวล (mass) ก่อนและหลังตามลำดับ[5]

3.อุปกรณ์และวิธีการ

การวิจัยแบ่งเป็นสองส่วนคือ

- 3.1. การทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์
- 3.2. การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากแบบจำลองสามมิติ

3.1 การทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์

การทดสอบทำโดยสร้างแรงกระตุ้นจากมวลทรงกลมน้ำหนัก 800 กรัม ขนาดรัศมี 36 มิลลิเมตร ณ ตำแหน่งสูงจากตำแหน่งทดสอบ 236 มิลลิเมตร โดยทำการทดสอบบนโต๊ะของชุดโต๊ะกักขังงานแบบหมุน 2 แกน แล้ววัดผลตอบสนองที่เกิดขึ้น จากเซนเซอร์หัววัดความเร่ง (Accelerometer) ในรูปที่ 3 ผลตอบสนองที่ได้จากหัววัดเซนเซอร์ถูกส่งไปยังอุปกรณ์แปลงสัญญาณ จากสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล(analog to digital) ข้อมูลที่ถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอลจะถูกแสดงผลโดยคอมพิวเตอร์ ซึ่งประมวลผลเป็นหน่วยโวลต์ ลักษณะการทดสอบดูจากรูปที่ 4

3.2 การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากแบบจำลองสามมิติ

การทำนายผลตอบสนองโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องมีแบบจำลองสำหรับการทำนายผลตอบสนอง ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองสามมิติของโต๊ะกักขังงานแบบหมุน 2 แกนและแบ่งเอลิเมนต์ที่เหมาะสมโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีขั้นตอนดังนี้

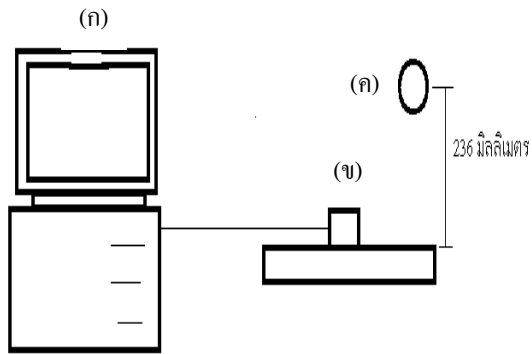
- 1.ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลก่อนการทำนายผลตอบสนอง (pre processing) โดยแบ่งเอลิเมนต์เป็นแบบทรงสี่หน้าสี่เหลี่ยมรูปที่ 6 กำหนดคุณสมบัติทางวัสดุให้เอลิเมนต์และ กำหนดเงื่อนไขในการทำนายผลตอบสนอง จากรูปที่ 2
 - 2.การทำนายผลตอบสนอง(postprocessing) ด้วยโปรแกรมเอ็มเอสซี มาร์ค (Msc Marc)
 - 3.แสดงผลตอบสนอง(post processing)
- จากนั้นทำขั้นตอนที่ 1-3 ซ้ำอีกแต่เปลี่ยนขนาดเอลิเมนต์ในการทำนายผลตอบสนองเพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำนายผลตอบสนอง



รูปที่ 2 ตำแหน่งเอลิเมนต์การวัดผลและรับภาระโหลด



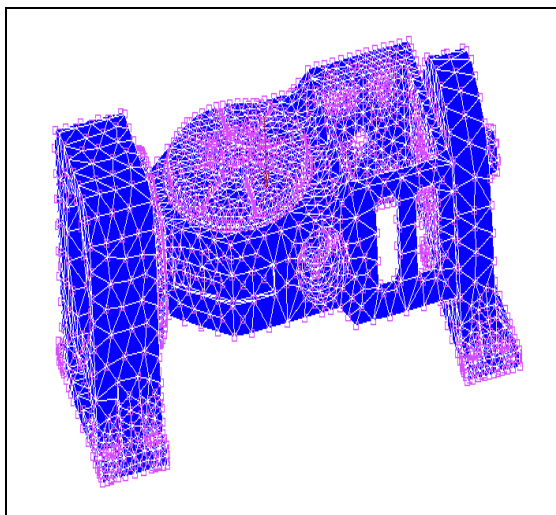
รูปที่ 3 หัววัดเซนเซอร์บนโต๊ะชุดโต๊ะกักขังงานแบบหมุน 2 แกน



รูปที่ 4 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ (ก) คอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล (ข) หัววัดเซนเซอร์ความเร่ง (ค) วัตถุทรงกลม



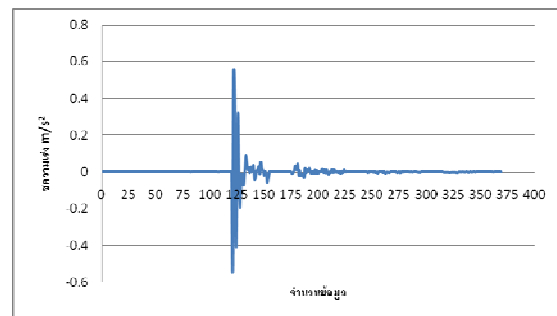
รูปที่ 5 ลักษณะของการทดสอบ



รูปที่ 6 แบบจำลองสามมิติของชุดโต๊ะกักตื้นงานแบบหมูน 2 แกน

4.ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองจากการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์บนโต๊ะกักตื้นงานแบบหมูน 2 แกน โดยใช้เซนเซอร์หัววัดความเร่ง สามารถวัดผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 7 และตารางที่ 1



รูปที่ 7 การทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกักตื้นงานแบบหมูน 2 แกนครั้งที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์

จำนวนการทดสอบ	ความเร่ง (m/s^2)
1	0.561
2	0.575
3	0.597
4	0.566
5	0.608
6	0.552
7	0.593
8	0.606

ซึ่งผลจากการวัดผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์คิดเป็นค่าเฉลี่ยคือ $0.582 m/s^2$

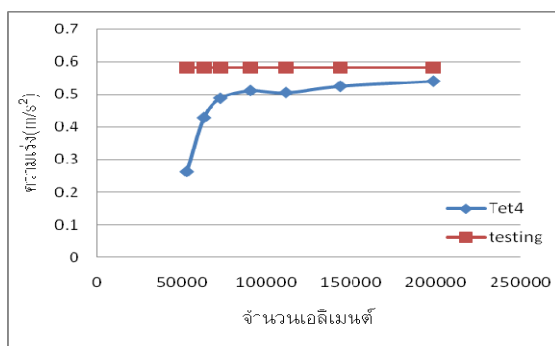
4.2 ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนชุดโต๊ะกักตื้นงานแบบหมูน 2 แกน

ผลที่ได้ออกมาจากรูปที่ 8 ทำให้สามารถเลือกขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการผลการทำนายผลตอบสนองที่แม่นยำและใช้เวลาในการทำนายที่เหมาะสม คือ Global Edge Length 0.8 มิลลิเมตร มี

จำนวน 198631 เอลิเมนต์ โดยกำหนดคุณสมบัติทาง
กลของวัสดุจากตารางที่ 3

ตารางที่ 2 เอลิเมนต์ขนาดต่างๆกับความเร่ง

Global Edge Length	Tet4 Nodes	Tet4 Elements	Accelerate (m/s ²)
0.8 mm	45837	198631	0.5394
1.0mm	34358	143645	0.5242
1.2mm	27316	111645	0.5047
1.4mm	22628	90529	0.5107
1.6mm	18894	73105	0.4879
1.8mm	16441	63079	0.4285
2.0mm	14063	53098	0.2643



รูปที่ 8 แสดงผลการเลือกขนาดเอลิเมนต์สำหรับการ
ทำนายผล

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

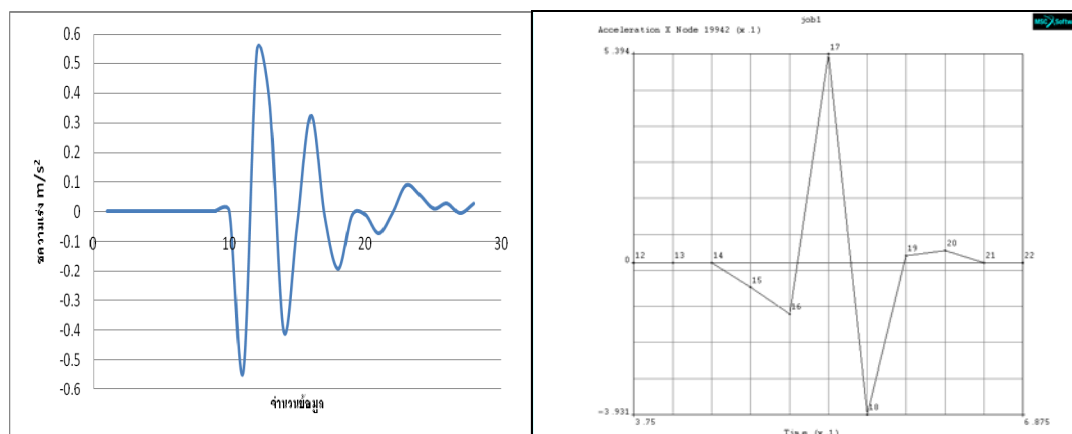
Modulus of Elasticity	205e ⁴ N/mm ²
Poissons Ratio	0.29
Mass Density	7.85e ⁻⁶ N/mm ³

จากตารางที่ 2 เลือก Global Edge Length ที่
0.8 มิลลิเมตร มาทำการวิเคราะห์โดยการแบ่งเวลา
(Δt) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ โดยการทำนาย
ผลตอบสนองของช่วงเวลา Δt ต่างๆอยู่ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทำนายผลตอบสนอง ณ การแบ่ง
ช่วงเวลาต่างๆ

Δt (วินาที)	ความเร่ง(m/s ²)
0.05	0.2857
0.033	0.5394
0.025	0.6286
0.02	0.7144

จากตารางที่ 4 ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับ
การทำนายผลตอบสนองคือ 0.025-0.033 วินาที และ
ถ้าช่วงเวลาที่น้อยและมากไปจากช่วงเวลานี้จะทำ
ให้ผลการทำนายมีความคลาดเคลื่อนไปมากเมื่อเทียบ
กับการทดสอบตารางที่ 1



รูปที่ 9 กราฟแสดงผลเปรียบเทียบผลตอบสนองการทดสอบและระหว่างระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

5. สรุป

ผลการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยใช้เซนเซอร์หัววัดความเร่งเมื่อเทียบกับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ผลใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าความผิดพลาด 7.32 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้นั้นจะมีค่าผิดพลาดน้อยลงเมื่อกำหนดค่าช่วงเวลาและการแบ่งเอลิเมนต์เหมาะสมโดยอยู่ในเงื่อนไขเดียวกันคือแบบจำลองสามมิติมีภาระโหลดมากกระทำแบบกระแทก

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม ที่ได้เอื้อเฟื้อเอกสารและข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานการจัดประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 25

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] A.Entrekin ,*Accuracy of MSC/NAStran First- and Second –Order Tetrahedral Elements in SolidModeling for stress Analysis*.Engineering, Product Airframe Structures
- [2] Jintai Chung, Fregory M. Hulbert*(1994). *A family of single-step Houbolt time integration algorithms for structural dynamics* ,Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics
- [3] Sara E.Mccaslin,Panos S.shiakolas,Brian H.Dennis,Kent I.Lawrence,*Closed-form Closed-form stiffness matrices for higher order tetrahedral finite elements*,^aUniversity of Texas at Tyler, Tyler , TXUSA,^bUniversity of Texas at Arlington, TX, USA

7.2 หนังสือ

- [4] ปราโมทย์ เดชะอำไพ 2537 ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์วิทยาลัย

- [5] Singiresu S.Rao (2005).*Mechanical Vibrations*, 4st edition,
- [6] Guido Dhondt *The finite element method for three- dimensional thermomechanical applications*
- [7] Sased Moaveni, *Finite Element Analysis: Theory and Application with Ansys third edition*