



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล	วิศวกรรมเครื่องกล
สาขา	ภาควิชา
เรื่อง	การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะก่ดขึ้นงานแบบหมุน 2 แกน โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์
	A Dynamics Response Predicting of Two Axis Rotary Table using Finite Element Method
นามผู้วิจัย	นายชัชวาล โรจนประทีป
ได้พิจารณาเห็นชอบโดย	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D. )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( อาจารย์ชัยยากร จันทร์สุวรรณ, Ph.D. )
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	( อาจารย์ชนะ รักย์ศิริ, D.Eng. )
หัวหน้าภาควิชา	( รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

( รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกั๊ดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน  
โดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์

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

โดย

นายชัชวาล โจรนประทีป

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2555

ชัชวาล โรจนประทีป 2555: การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนโดยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณัติ (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกสิทธิ รอดขวัญ, Ph.D. 81 หน้า

ชุดไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน เป็นส่วนประกอบหลักของเครื่องจักรซีเอ็นซี 5 แกน โดยชุดไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนจะถูกติดตั้งบนเครื่องจักรซีเอ็นซี 3 แกน ซึ่งในระหว่างที่เครื่องซีเอ็นซีทำงาน ไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนจะเคลื่อนที่ตามคำสั่งจากโปรแกรม NC และแรงตัดเฉือนที่เกิดขึ้นจะกระทำกับโครงสร้างของชุดไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนคือ การตอบสนองเชิงพลศาสตร์ทางโครงสร้าง จึงมีความจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้างทางกลของชุดไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนขึ้น วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์เชิงตัวเลขแบบไม่เชิงเส้นด้วยวิธีฮอยโบ (Houbolt Method) ในทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ การกระจัด ความเร็ว และความเร่งของโหนดของชุดไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน วิธีฮอยโบ ใช้ในการอธิบายถึงผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างชุดไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน โดยสามารถตรวจสอบผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากวิธีฮอยโบโดยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้าง (Hammer) และ เซนเซอร์หัววัดความเร่ง (Accelerometer sensor) ผลการเปรียบเทียบความเร่งสูงสุดที่เกิดจากกราฟของอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้างระหว่างระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และผลการทดสอบโดยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้างพบค่าความผิดพลาด 8.021 เปอร์เซ็นต์ ที่ตำแหน่งความเร่งสูงสุด ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดไ้ตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน

---

ลายมือชื่อนิสิต

---

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Chatchawan Rojanaprateep 2012: A Dynamics Response Predicting of Two Axis Rotary Table using Finite Element Method. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Supasit Rodkwan, Ph.D 81 pages.

The two axis rotary tables are main component of five axis milling machine which are installed to normal three axis milling machine. During machine operate, two axis rotary tables will be moved follow with NC command and cutting force will acted two rotary table structure. The importance behavior of two axis rotary table is dynamics response, which are required for structural design. The objective of this research is two axis rotary table dynamic response, deform distance, velocity and acceleration, predictions by non-linear finite element with Houbolt method model. The proposed model is used to explain the dynamic behavior response of the structure of two axis rotary table. The model verification is applied hammer and accelerometer sensor. The maximum acceleration comparative result between finite element model and hammer test error is 8.021% which is satisfied for prediction the dynamics response of two axis rotary table.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ขอบพระคุณ ผศ.ดร.ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อ.ดร.ชัยยากร จันทร์สุวรรณ และ อ.ดร.ชนะ รัศมีศิริ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอบพระคุณ อ.ดร.คุณยุต เอี่ยมสอาด ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป รวมถึงความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อซอฟต์แวร์โปรแกรมต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อเครื่องมือเซนเซอร์หัวความเร่ง สำหรับใช้ในการงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยครั้งนี้และขอขอบพระคุณสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรมที่เอื้อเฟื้อสถานที่สำหรับทำการวิจัยครั้งนี้

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอขอบแต่คุณพ่อ คุณแม่ คนในครอบครัว ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ชัชวาล โรจนประทีป

มีนาคม 2555

## สารบัญ

หน้า

<b>สารบัญ</b>	<b>(1)</b>
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	57
สรุปและข้อเสนอแนะ	65
สรุป	65
ข้อเสนอแนะ	66
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	67
ภาคผนวก	69
ภาคผนวก ก ตารางแสดงข้อมูลแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์สามมิติ	70
ภาคผนวก ข ตารางแสดงค่ากำหนดเฉพาะของอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบผลตอบสนองเชิง	73
ภาคผนวก ค ตารางแสดงการกำหนดขนาดอีลิเมนต์ในแต่ละกรณีพลศาสตร์	77
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	81

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ	46
2	ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์	53
<b>ตารางผนวกที่</b>		
ก1	รายละเอียดแบบจำลองสามมิติของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	71
ก2	ความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานแบบยึดติดกัน (Glue Contact)	71
ข1	ค่ากำหนดเฉพาะของเซนเซอร์หัววัดความเร็ว	74
ข2	ค่ากำหนดเฉพาะของอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้าง	75
ค1	กำหนดค่า Global Edge Length กรณีความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ 1	78
ค2	กำหนดค่า Global Edge Length กรณีความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ 2	79
ค3	กำหนดค่า Global Edge Length กรณีความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ 3	80

## สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แบบจำลองแบบต่อเนื่องหรือแบบกระจายมวล	5
2	ระบบ โครงสร้างที่มีระดับชั้นความเสรีขึ้นเดียว (ก) ระบบอยู่ในตำแหน่ง สมดุล (ข) ระบบอยู่ในตำแหน่งพลวัต (ค) แผนภาพเสรีพลวัตของมวล	7
3	ขั้นตอนการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์	13
4	อิลิเมนต์ทรงสี่หน้าสี่ โหนดและอิลิเมนต์ทรงสี่หน้าสิบ โหนด	15
5	กราฟวิธีผลต่างไปย้อนหลัง	18
6	ขั้นตอนการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์	18
7	ขั้นตอนและอุปกรณ์สำหรับทดสอบผลตอบสนอง ของชุด โตะกั๊ดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	23
8	ความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน	24
9	อุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น โครงสร้าง	25
10	เซนเซอร์หัววัดความเร่ง	25
11	แบบจำลองการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์: (ก) คอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผล (ข) โตะกั๊ดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน (ค) เซนเซอร์หัววัดความเร่ง (ง) เครื่องสร้างแรงกระตุ้น โครงสร้าง	30
12	การทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น โครงสร้างบนชุด โตะกั๊ดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน และตำแหน่งการติดตั้ง เซนเซอร์หัววัดความเร่งบน โตะกั๊ดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	30
13	ขั้นตอนการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์	31
14	รูปร่างและขนาด Support Bearing ของแบบจำลองชิ้นส่วน ของชุด โตะกั๊ด ชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	33
15	รูปร่างและขนาด Support Bearing ของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ชิ้นส่วน ของชุด โตะกั๊ดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	33
16	รูปร่างและขนาด Shaft Encoder ของแบบจำลองชิ้นส่วนของ ชุด โตะกั๊ดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	34

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	รูปร่างและขนาด Shaft Encoder ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	34
18	รูปร่างและขนาด Main Shaft ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	35
19	รูปร่างและขนาด Main Shaft ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	35
20	รูปร่างและขนาด Cover C-Axis ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	36
21	รูปร่างและขนาด Cover C-Axis ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	36
22	รูปร่างและขนาด Connector Flange ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	37
23	รูปร่างและขนาด Connector Flange ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	37
24	รูปร่างและขนาด Right Support ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	38
25	รูปร่างและขนาด Right Support ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	38
26	รูปร่างและขนาด Left Support ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	39
27	รูปร่างและขนาด Left Support ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	39
28	รูปร่างและขนาด Adapter Shaft A-Axis ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	40
29	รูปร่างและขนาด Adapter Shaft A-Axis ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	40

### สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
30	รูปร่างและขนาด Adapter Shaft ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	41
31	รูปร่างและขนาด Adapter Shaft ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	41
32	รูปร่างและขนาด InterFace ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	42
33	รูปร่างและขนาด Interface ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	42
34	รูปร่างและขนาด Shaft A-Axis ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	43
35	รูปร่างและขนาด Shaft A-Axis ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	43
36	รูปร่างและขนาด Flange A-Axis ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	44
37	รูปร่างและขนาด Flange A-Axis ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	44
38	รูปร่างและขนาด Table ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	45
39	รูปร่างและขนาด Table ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน	45
40	กำหนดคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FC30	46
41	กำหนดคุณสมบัติทางกลของวัสดุ S45C	46
42	เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์	47
43	เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์	48
44	เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์	48
45	การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์	49

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
46	กำหนดเงื่อนไขการเคาะของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์	49
47	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนชุดโต๊ะกัดชิ้นงาน แบบหมุน 2 แกนและ เวลา	50
48	เงื่อนไขขอบเขตในการเคาะของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์	50
49	เงื่อนไขขอบเขตในการยึดของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์	51
50	การวิเคราะห์แบบไดนามิกทรานเซียนด้วยวิธีฮอยโบ	52
51	การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ไดนามิกทรานเซียน	54
52	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิง พลศาสตร์ที่ Global Edge Length 0.6	54
53	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิง พลศาสตร์ ที่ Global Edge Length 0.8	55
54	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิง พลศาสตร์ ที่ Global Edge Length 1.0	55
55	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิง พลศาสตร์ ที่ Global Edge Length 1.2	56
56	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระตุ้น โครงสร้างกับเวลา	58
57	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระตุ้น โครงสร้างกับเวลา	58
58	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสูงสุดกับเวลา	59
59	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสูงสุดกับเวลา	59
60	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์กับ Sampling time	60
61	กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 3500	61
62	กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 4100	62
63	กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 7000	62

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
64	กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 9000	63
65	กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 14000	63
67	กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองจากระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ และการทดสอบโดยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้าง	64

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
[B]	เมทริกซ์พลังงานความเครียดต่อ ฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์	กิโลกรัม/วินาที <sup>2</sup>
[C]	เมทริกซ์ความหน่วง	นิวตัน.วินาที/เมตร
D	พลังงานที่ระบบต้องสูญเสีย	กิโลกรัม.เมตร <sup>2</sup> /วินาที <sup>2</sup>
F	แรงลัพธ์ที่กระทำกับระบบ	นิวตัน
F <sub>s</sub>	แรงต้านของสปริง	นิวตัน
F <sub>d</sub>	แรงต้านความหน่วง	นิวตัน
[K]	เมทริกซ์ความแข็งตริง	นิวตัน/เมตร
L	สมการลากรองจ์	-
M	มวล	กิโลกรัม
[N]	เมทริกซ์ฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์	เมตร
P	แรงกระทำภายนอก	นิวตัน
Q	แรงในพิกัดวางใน	นิวตัน
T	พลังงานจลน์	กิโลกรัม.เมตร <sup>2</sup> /วินาที <sup>2</sup>
V	พลังงานศักย์	กิโลกรัม.เมตร <sup>2</sup> /วินาที <sup>2</sup>
W <sub>p</sub>	งานที่ให้ระบบ	กิโลกรัม.เมตร <sup>2</sup> /วินาที <sup>2</sup>
x	การกระจัด	เมตร
$\dot{x}$	ความเร็ว	เมตร/วินาที
$\ddot{x}$	ความเร่ง	เมตร/วินาที <sup>2</sup>
$\rho$	ความหนาแน่นของมวล	กิโลกรัม/เมตร <sup>3</sup>
$\pi$	พลังงานความเครียด	กิโลกรัม.เมตร <sup>2</sup> /วินาที <sup>2</sup>
$\mu$	สัมประสิทธิ์ความหน่วง	-

## การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนโดย ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์

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

#### คำนำ

ปัจจุบันธุรกิจด้านอุตสาหกรรมการผลิตมีผลต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยอยู่มาก เนื่องจากประเทศไทยเป็นสถานที่ตั้งของโรงงานผลิตชิ้นส่วนต่างๆมากมาย เช่น ชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ฯลฯ ซึ่งปัจจัยหลักของการผลิตในอุตสาหกรรมเหล่านี้คือ เครื่องจักรซีเอ็นซี (CNC Machine) ที่มีประสิทธิภาพการผลิตสูง แม้ว่าเครื่องจักรซีเอ็นซีเหล่านี้จะมีประสิทธิภาพสูง แต่เครื่องจักรซีเอ็นซี ในประเทศไทยส่วนมากยังคงเป็นเครื่องจักรซีเอ็นซี ประเภท 3 แกน ซึ่งบางครั้งไม่สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนได้ ทำให้ในปัจจุบันนั้นได้มีการผลิตชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 1 แกนและ 2 แกน ขึ้น และมีการนำเข้ามาจำหน่ายภายในประเทศเพื่อรองรับเครื่องจักรซีเอ็นซี 3 แกนส่วนใหญ่ภายในประเทศไทย ให้เป็นเครื่องซีเอ็นซี 4 แกน หรือ เครื่องซีเอ็นซี 5 แกนตามลำดับ

จากเหตุผลข้างต้นนั้น จึงนำชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนที่ผลิตขึ้นภายในประเทศไทย มาทำการวิเคราะห์และทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ (Dynamics Response) ทางกลของชุดโต๊ะกัดแบบหมุน 2 แกนนี้ วิธีการในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์จึงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับการออกแบบโครงสร้างทางกลเพื่อให้ได้แบบจำลองที่สมบูรณ์ โดยที่งานวิจัยนี้จะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยที่ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์สิ่งสำคัญคือการสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ให้สอดคล้องกับปัญหา [5] ซึ่งการสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ในแต่ละซอฟต์แวร์ต่างๆมีความแตกต่างกันตามผู้ผลิตซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ก็มีความแตกต่างกันไป งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ MSC MARC 2007r1 ทำนายผลตอบสนองทางพลศาสตร์ (Dynamics Response) ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน โดยได้ออกแบบแบบจำลองโครงสร้างทางกล 3 มิติของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ซึ่งมีภาระมากระทำแล้วทำการวิเคราะห์แบบไดนามิกทรานเซียน (Dynamic Transient) ซึ่งสามารถหาผลเฉลยได้จาก

วิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) หรือวิธีอนุพันธ์โดยตรง (direct integration method) วิธีอนุพันธ์โดยตรงแบ่งได้ 2 แบบคือ วิธีแบบปริยาย (Implicit integration method) และวิธีแบบชัดแจ้ง (Explicit integration method) ในงานวิจัยนี้จะเน้นไปใช้วิธีอนุพันธ์โดยตรงแบบปริยาย อย่างไรก็ตามความไม่สมบูรณ์ต่างๆไม่ว่าจะเป็นรูปทรงเลขาคณิตของแบบจำลอง รวมถึงคุณสมบัติทางวัสดุทำให้ค่าภาวะขอบเขต มวลและความแข็งครึ่งสปริงทางโครงสร้างของโครงสร้างจริงมีแนวโน้มแตกต่างไปจากแบบจำลอง จึงต้องทดสอบผลตอบสนองทางพลศาสตร์เพื่อยืนยันผลที่ได้จากการทำนายด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โดยการศึกษาและวิจัยนี้จึงเน้นให้ความสำคัญเป็น 2 แนวทาง แนวทางแรก คือ สร้างแบบจำลองสามมิติโดยใช้โปรแกรมทางวิศวกรรมในการออกแบบ (Computer Aided Design ,CAD) และนำแบบจำลองไปทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) โดยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering ,CAE) แนวทางที่สอง คือ ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ภายใต้ภาระโหลดที่กำหนด โดยนำชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ด้วยอุปกรณ์เครื่องสร้างแรงกระตุ้นโครงสร้าง (Hammer) และใช้เซนเซอร์หัววัดความเร่ง (Accelerometer Sensor) ในการวัดผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ นำผลตอบสนองจากทั้งสองแนวทางมาเปรียบเทียบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน แล้วจึงนำผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์มาปรับปรุงและแก้ไขแบบจำลองสามมิติเพื่อให้ผลจากแนวทางแรกสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันกับแนวทางที่สอง แล้วจึงนำแบบจำลองสามมิติมาพัฒนาชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน เพื่อให้ได้ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ดี ซึ่งแบบจำลองสามมิตินี้จะสามารถช่วยทำนายการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูด (Amplitude) เชิงพลศาสตร์ได้โดยง่าย และประหยัดเวลา

อย่างที่ได้อธิบายมาข้างต้นแล้ว ชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนนั้นมีความจำเป็นอย่างมากในการผลิตชิ้นส่วนที่มีรูปร่างซับซ้อนเป็นอย่างมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงดำเนินการวิจัยกับชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยโปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม และ ทดสอบด้วยอุปกรณ์ เครื่องสร้างแรงกระตุ้นโครงสร้างร่วมกับเซนเซอร์หัววัดความเร่ง เพื่อให้ทราบถึงผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาให้ได้มาซึ่งแบบจำลองที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์และทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนได้ถูกต้อง

### ขอบเขตงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้จะศึกษาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์บนโตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ที่มีขนาดความกลมรัศมี 150 มิลลิเมตร องศาการบิดแกน A ที่ 0 องศา
2. งานวิจัยนี้จะศึกษาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์บนโตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ขณะยังไม่ได้ติดตั้งบนเครื่องซีเอ็นซี 3 แกน
3. พิจารณาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนเพียงทิศทางเดียว คือ ทิศทางเดียวกับภาระของโหลด
4. แบบจำลองโครงสร้างเครื่องจักรกลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง(Isotropic)

## การตรวจเอกสาร

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

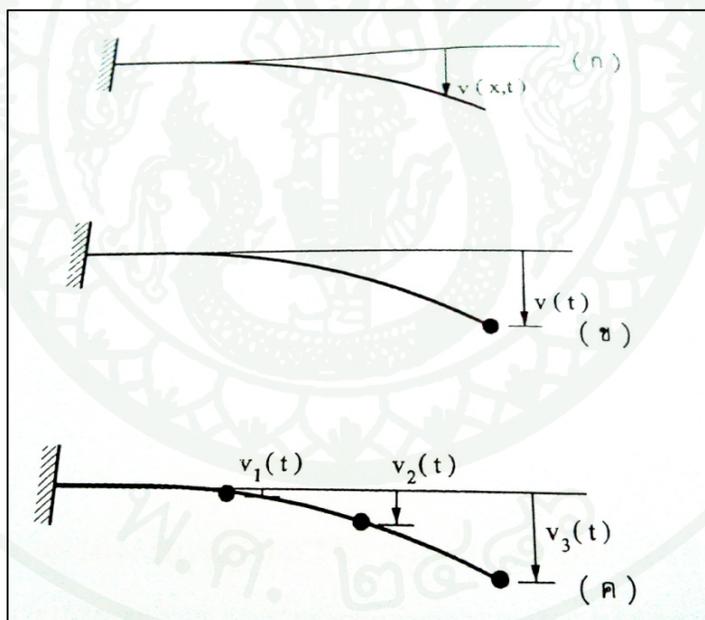
เครื่องจักรกลในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่า ต้องออกแบบรองรับสำหรับภาระโหลดแบบพลวัต (dynamic load) กระทำตลอดเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาวิเคราะห์และทดสอบโครงสร้างทางกลของเครื่องจักรกล เพื่อให้สามารถทนต่อสภาพแปรปรวนของโหลดพลวัตได้อย่างปลอดภัย การวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์โดยทั่วไปเราจะสมมติให้โหลดพลวัตมีรูปร่างลักษณะขนาดและทิศทางที่แน่นอน

โดยทั่วไปปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) หรืออยู่ในรูปของสมการอินทิกรัล (Integral Equation) การแก้ปัญหาอาจใช้วิธีการวิเคราะห์ (Analytical Method) โดยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์นั้น ประกอบกับเงื่อนไขขอบของปัญหานั้น ผลเฉลยที่ได้จากวิธีดังกล่าวจึงเป็นผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) แต่เนื่องจากปัญหาทางวิศวกรรมส่วนใหญ่มีความซับซ้อนจากปัจจัยหลายอย่าง อาทิ อันเนื่องมาจากโครงสร้างเครื่องจักรกล ที่ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นส่วนจำนวนมาก ซึ่งชิ้นส่วนแต่ละชิ้นอาจจะรับแรงชนิดต่าง ๆ กัน เช่น แรงดึง แรงอัด โครงสร้างของเครื่องจักรกลที่ซับซ้อนยังประกอบด้วยระดับขึ้นความถี่หลายชั้น การหาผลเฉลยแม่นยำนั้นจึงทำได้ยาก แต่เราสามารถจะหาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ด้วย วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แทนได้ ซึ่งเป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่ง โดยการใช้การแบ่งขอบเขตของปัญหาที่ต่อเนื่องออกเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่า อิลิเมนต์ (Elements) และเลือกใช้ชนิดของอิลิเมนต์ให้เหมาะสมกับลักษณะรูปร่างของระบบโครงสร้าง โดยแต่ละอิลิเมนต์เชื่อมต่อกันที่จุดต่อที่เรียกว่า โหนด (Nodes) และการกระทำของโหลด เนื่องจากขนาด ทิศทางและตำแหน่งของโหลดทางพลวัตที่กระทำต่อโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับเวลา การตอบสนองของโครงสร้างจึงแปรเปลี่ยนตามเวลาด้วยเช่นกัน เช่นการวิเคราะห์โครงสร้างทางพลศาสตร์โดยทั่วไป

### การวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้าง

การวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์เพื่อตรวจสอบพฤติกรรมของระบบโครงสร้าง (อรุณ ชาญยุทธกร, 2544) นั้นประกอบไปด้วยสามขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 1 คือ

1. แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ ซึ่งแบบจำลองเชิงวิเคราะห์นั้นต้องคำนึงถึงรูปร่างลักษณะจริงของโครงสร้างให้มากที่สุด แบบจำลองเชิงวิเคราะห์ของโครงสร้างจำแนกได้สองประเภทคือแบบจำลองแบบต่อเนื่อง(continuous model) หรือแบบกระจายมวล(distributed mass) จากภาพที่ 1 จำเป็นต้องใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่เป็นสมการอนุพันธ์ย่อยเป็นตัวกำหนดพฤติกรรม ในขณะที่แบบจำลองมวลรวมเป็นก้อน(lumped-mass model) จะใช้สมการอนุพันธ์ธรรมดาและแบบจำลองแยกเป็นส่วน (discrete parameter model) ,สมการอนุพันธ์ย่อยและสมการอนุพันธ์ธรรมดาจะเป็นสมการการเคลื่อนที่ของระบบโครงสร้างซึ่งสามารถหาได้โดยอาศัยกฎทางกายภาพ เช่น กฎของนิวตัน,สมการลากรองจ์,ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด เป็นต้น เราเรียกสมการอนุพันธ์การเคลื่อนที่ของโครงสร้างเหล่านี้ว่า แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ (mathematical model)



ภาพที่ 1 แบบจำลองแบบต่อเนื่องหรือแบบกระจายมวล

ที่มา: เดช (2541)

2. แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ มีหลายวิธีการในการหาแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ต่างๆได้แก่

### การหาสมการเชิงอนุพันธ์โดยอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน

กฎนิวตันข้อที่สองกล่าวว่า ผลรวมของแรงที่กระทำต่อมวลย่อยเท่ากับผลคูณของมวลและความเร่งในทิศทางเดียวกับแรงลัพธ์ จากภาพที่ 2 ถ้าให้  $x$  เป็นการกระจัดในแนวดิ่งของมวล  $m$  จากกฎข้อที่สองของนิวตัน (เดซ, 2541)

$$\sum F = m\ddot{x} \quad (1)$$

จากแผนภาพเสรีพลวัต (dynamic free body diagram) ภาพที่ 3 สามารถหาผลรวมของแรงของสมการที่ (1) คือ

$$F(t) - F_s - F_d = m\ddot{x} \quad (2)$$

$F_s$  คือแรงต้านของสปริง

$F_d$  คือ แรงต้านความหน่วง

$$F_s = kx$$

$$F_d = c\dot{x}$$

สมการ(2) เขียนใหม่ได้เป็น

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (3)$$

พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ทางกลขึ้นกับเวลา

$$[M]\{\ddot{q}\}(t) + [C]\{\dot{q}\}(t) + [k]\{q\}(t) = \{\bar{f}\}(t) \quad (4)$$

โดยที่  $[M]$  คือเมทริกซ์ของมวล(mass)

$[C]$  คือเมทริกซ์ความหน่วง(damping)

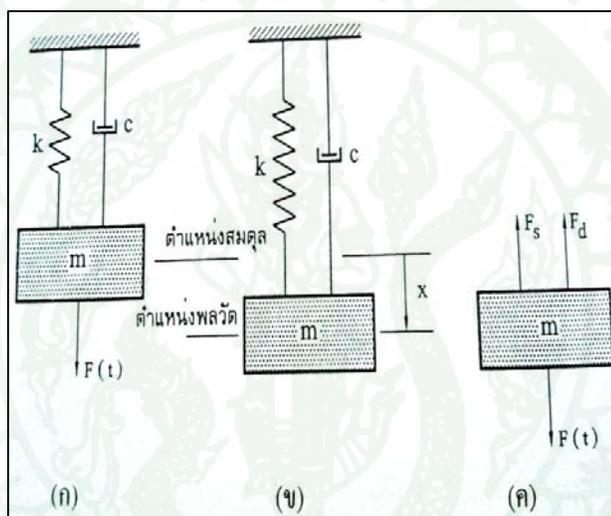
$[K]$  คือเมทริกซ์ค่าความแข็งตึง(stiffness)

$\vec{x}$  คือเวกเตอร์บอกตำแหน่ง

$\dot{\vec{x}}$  คือเวกเตอร์บอกความเร็ว

$\ddot{\vec{x}}$  คือเวกเตอร์บอกความเร่ง

ซึ่งเป็นแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ธรรมดาอันดับสองที่มีค่าสัมประสิทธิ์คงตัว



ภาพที่ 2 ระบบโครงสร้างที่มีระดับขึ้นความถี่ขึ้นเดียว (ก) ระบบอยู่ในตำแหน่งสมดุล (ข) ระบบอยู่ในตำแหน่งพลวัต (ค) แผนภาพเสรีพลวัตของมวล

ที่มา: เดช (2541)

### การหาสมการเชิงอนุพันธ์โดยวิธีของลากรองจ์

วิธีแบบลากรองจ์ (Lagrangian) เหมาะกับการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนที่ทางกลศาสตร์ของแข็ง โดยพิจารณาจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งแบบติดตามไปกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคหนึ่งๆ โดยกำหนดเฉพาะเวลาเพื่อดูค่าคุณสมบัติต่างๆในช่วงเวลาที่เปลี่ยนไป การหาสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการการเคลื่อนที่ของระบบ โดยเฉพาะระบบที่ซับซ้อนมากและระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถใช้วิเคราะห์หาโดยวิธีของลากรองจ์ ซึ่งต้องกำหนดคัพิกควางในทั่วไป

(generalized coordinate) , แรงวางในทั่วไป (generalized force) และความสัมพันธ์ของพลังงานของระบบโดยที่พลังงานศักย์ (V) จะเป็นฟังก์ชันกับพิกัดวางใน ( $q_i$ ) และพลังงานจลน์ (T) จะเป็นฟังก์ชันกับความเร็ว ( $\dot{q}_i$ )

$$V = V(q_i)$$

$$T = T(\dot{q}_i)$$

ซึ่ง ( $q_i$ ) คือ พิกัดวางในทั่วไป

โดยอาศัยกฎข้อที่สองของนิวตัน, หลักการพลังงานและงานเสมือน (virtual work) เราสามารถหาสมการลากรองจ์ได้คือ

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

ซึ่ง  $Q_i$  คือแรงวางในทั่วไป ในกรณีที่ไม่มีแรงภายนอกกระทำ  $Q_i = 0$  ดังนั้น

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = 0 \quad (6)$$

ถ้า  $i$  มีค่าจาก 1 ถึง  $n$  เราจะได้สมการการเคลื่อนที่ของระบบ  $n$  สมการ โดยวิธีนี้ก็สามารถจะหาสมการการเคลื่อนที่ของระบบการสั่นสะเทือนได้โดยง่าย โดยทั่วไปพลังงานศักย์จะไม่ขึ้นกับ  $\dot{q}_i$  ดังนั้นถ้าให้ลากรองเจียน (L) ซึ่งเท่ากับ T-V

$$L = T - V \quad (7)$$

สมการที่ 7 เขียนในเทอมของลากรองจ์ได้ดังสมการที่ 8

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

ถ้าระบบการสั่นสะเทือนมีตัวหน่วงชนิดของเหลวอยู่ด้วย แรงต้านของตัวหน่วงจะเป็นฟังก์ชันกับความเร็วและพลังงานที่ระบบต้องสูญเสีย (D) จะเท่ากับ

$$D = D(\dot{q}_i) = \frac{1}{2} c \dot{q}_i^2 \quad (9)$$

และสมการลากรางจ์ของระบบสั่นสะเทือน ที่ประกอบด้วยตัวหน่วงด้วยคือ

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (10)$$

โดยที่ T คือ พลังงานจลน์

$$T = \frac{1}{2} \iiint_{V^{(e)}} \rho \dot{U}^T \dot{U} dV \quad (11)$$

$$T = \sum_{e=1}^E T^{(e)} = \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}^T \left[ \sum_{e=1}^E \iiint_{V^{(e)}} \rho [N]^T [N] dV \right] \dot{\bar{q}} \quad (12)$$

และ V คือพลังงานศักย์ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานความเครียด (Strain Energy) กับงานที่ให้กับระบบ (Work done)

$$V = \pi - W_p \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \pi_p = & \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}^T \left[ \sum_{e=1}^E \iiint_{V^{(e)}} [B]^T [D] [B] dV \right] \dot{\bar{q}} \\ & - \dot{\bar{q}}^T \left( \sum_{e=1}^E \iint_{s_1^{(e)}} [N]^T \bar{\Phi}(t) dS_1 + \iiint_{V^{(e)}} [N]^T \bar{\phi}(t) dV \right) - \dot{\bar{q}}^T \bar{P}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

เมื่อนำสมการที่ 12 และสมการที่ 14 แทนลงในสมการที่ 8 จะได้สมการการเคลื่อนที่ดังสมการที่

$$[M]\ddot{q}(t) + [C]\dot{q}(t) + [K]q(t) = \bar{p}(t) \quad (15)$$

โดยที่

$$[M^{(e)}] = \iiint_{V^{(e)}} \rho [N]^T [N] dV$$

$$[K^{(e)}] = \iiint_{V^{(e)}} [B]^T [N] [B] dV$$

$$[C^{(e)}] = \iiint_{V^{(e)}} \mu [N]^T [N] dV$$

3. การหาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ เราสามารถวิเคราะห์สมการอนุพันธ์ของโครงสร้างเชิงพลศาสตร์ได้โดยการแก้สมการอนุพันธ์ เพื่อหาผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของระบบซึ่งสามารถแบ่งได้สองประเภทคือ การหาผลตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแบบเสรี (free vibration) และ ผลตอบสนองต่อการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (forced vibration) การแก้สมการจำเป็นต้องอาศัยขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) และเงื่อนไขบังคับ (force condition) จากภายนอกถ้าระบบเป็นแบบการสั่นสะเทือนแบบเสรีหรือแบบบังคับ ผลเฉลยที่ได้รับจะเป็นการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของระบบโครงสร้าง ซึ่งเรียกว่า การตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของระบบ (เดช, 2541)

#### หลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับโครงสร้างพลศาสตร์ที่ซับซ้อนประกอบด้วยหลายระดับความเสรีเราสามารถจะหาการตอบสนองเชิงพลวัตได้โดยวิธีต่างๆ เช่น วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นอีกวิธีที่สามารถวิเคราะห์การตอบสนองโดยประมาณของระบบพลวัต กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างพลศาสตร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ต้องใช้เวลาในการหาคำตอบมาก อันนั้นมาจากการคำนวณค่าของเงื่อนไขขอบเขตของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบขึ้นเป็นระบบ เช่น ค่าสทิฟเนสเมทริกซ์ (stiffness spring) มวลเมทริกซ์ ภาวะไหลคเมทริกซ์ เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาวิเคราะห์และทดสอบเพื่อให้สามารถทนต่อสภาพแปรปรวนของแรงทางพลศาสตร์ได้ ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (เดช, 2541; ปราโมทย์, 2550) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

## ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับการแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์และเป็นที่ยอมรับใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีลักษณะรูปร่างและพฤติกรรมที่ซับซ้อน ไม่ว่าวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์จะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (Elastic) หรือสภาพยืดตัว (Plastic) ปัญหาที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น โดยสามารถแบ่งขั้นตอนการแก้ปัญหาวางออกได้เป็น 3 ขั้นตอน

### 1. ขั้นตอนก่อนการประมวลผล (Pre Processing)

ขั้นตอนการเตรียมการประมวลผลเป็นขั้นตอนการจำลองปัญหาทางกายภาพ (Modeling) เช่น การกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและภาระโหลดที่กระทำ (Boundary Conditions) การกำหนดลักษณะเงื่อนไขการสัมผัสกันของชิ้นงาน (Contact - Condition) การเลือกสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายปรากฏการณ์ ให้สอดคล้องกับปัญหาที่วิเคราะห์ การกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ และกระบวนการเมช (Meshing)

การแบ่งเอลิเมนต์และกำหนดเอลิเมนต์ เป็นขั้นตอนแบ่งขอบเขตรูปร่างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ขอบเขตของปัญหาอาจเป็นขอบเขตปัญหาชนิดต่างๆ เช่น ปัญหาความยืดหยุ่นของแข็ง (Elasticity Problem) ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ (Dynamic Problem) หรือบางครั้งอาจเป็นปัญหาในหลายรูปแบบรวมกัน เพื่อให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีรูปร่างที่สอดคล้องกับขอบเขตรูปร่างเดิมมากที่สุด โดยเฉพาะบริเวณขอบเขตที่เป็นส่วนโค้ง ต้องใช้เอลิเมนต์ที่มีรูปร่างสอดคล้องกับขอบเขตรูปร่างเดิมมากที่สุด โดยใช้เอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กกว่าบริเวณอื่น นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาวะมาก เช่น การเปลี่ยนแปลงของความเค้น ความเครียด เป็นต้น เอลิเมนต์แบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ

### ลักษณะของเอลิเมนต์ประเภทต่าง

ก. เอลิเมนต์มิติแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetric Elements) เป็นเอลิเมนต์ที่มีด้านสมมาตรกัน เอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถนำด้านที่สมมาตรเพียงชิ้นเดียวมาวิเคราะห์ได้ ทำให้สามารถประหยัดเวลาในการวิเคราะห์

ข. อีลิเมนต์มิติเดียว (One dimensional elements) เป็นอีลิเมนต์ที่ประกอบด้วยอย่างน้อยสองจุดต่อ เช่น  $i$  และ  $j$

ค. อีลิเมนต์มิติสองมิติ (Two dimensional elements) เป็นอีลิเมนต์มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยด้านที่เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

ง. อีลิเมนต์มิติสามมิติ มีลักษณะเป็นปริซึมสี่เหลี่ยมหรือปริซึมสามเหลี่ยม ใช้แทนระบบโครงสร้างที่มีระดับชั้นเสริทั้งสามทิศทาง การจำลองโครงสร้างทางพลศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์จะใช้วิธีสมมติโหมดฟังก์ชันรูปร่าง ซึ่งเป็นฟังก์ชันโดยประมาณที่สามารถแทนลักษณะการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของระบบโครงสร้างรวมได้ดังสมการที่ 16

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^N \phi_i(x) u_i(t) \quad (16)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, N$

$N$  คือ จำนวนระดับความเสริของระบบ

$\phi_i$  คือ ฟังก์ชันรูปร่างของระบบรวม

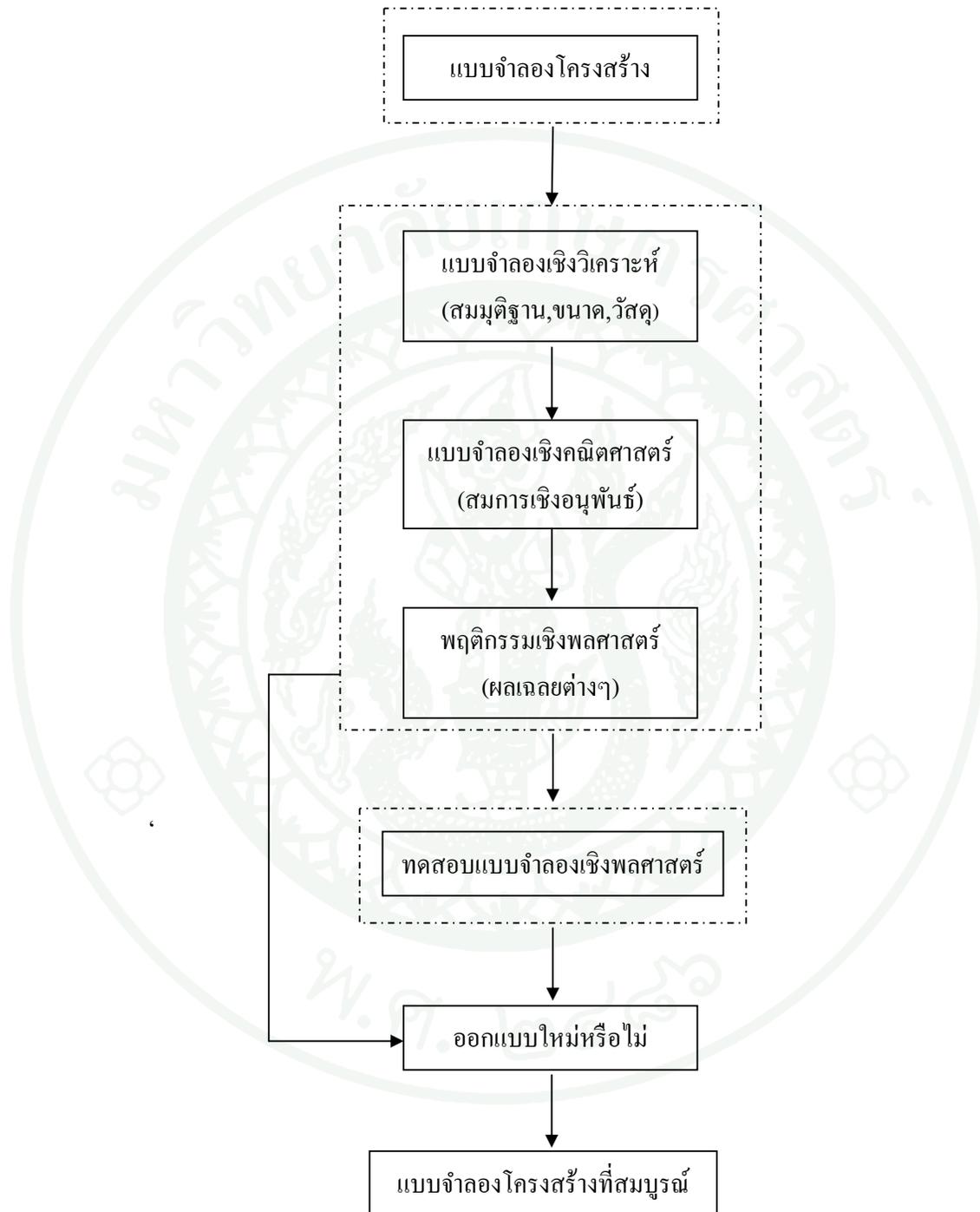
การเลือกฟังก์ชันภายในอีลิเมนต์ (Element Interpolation Functions)

เป็นการกำหนดฟังก์ชันของค่าที่ไม่รู้ที่โหนดของอีลิเมนต์ (Nodal Unknowns) ค่าที่โหนดนี้อาจเป็นค่าของการกระจัด, ความเร็วหรือความเร่ง เป็นต้น ขึ้นกับลักษณะของปัญหา การเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในอีลิเมนต์จะต้องสอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของอีลิเมนต์และทำให้ผลเฉลยมีความต่อเนื่องทั้งภายในอีลิเมนต์และแบบจำลองของระบบรวม ฟังก์ชันภายในอีลิเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น (อรุณ, 2544)

ก. อีลิเมนต์อันดับหนึ่ง ( First Order Element) ในที่นี้จะกล่าวถึงอีลิเมนต์สามมิติซึ่งที่นิยม

ใช้จะมีอยู่สองชนิดคือ อีลิเมนต์ทรงสี่หน้าและอีลิเมนต์สี่เหลี่ยมลูกบาศก์

อีลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุด ( The Four-Node Tetrahedral Element) สำหรับฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์สามมิติทรงสี่หน้า 4 จุด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์

$$u(x, y, z, t)^e = N_i u_i + N_j u_j + N_k u_k + N_l u_l \quad (17)$$

$$v(x, y, z, t)^e = N_i v_i + N_j v_j + N_k v_k + N_l v_l \quad (18)$$

$$w(x, y, z, t)^e = N_i w_i + N_j w_j + N_k w_k + N_l w_l \quad (19)$$

สมการที่ 17 ถึงสมการที่ 19 สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ 20

$$\vec{U}_{3 \times 1} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) \end{Bmatrix} = [N(x, y, z)]_{3 \times 12} \{q^{(e)}(t)\}_{12 \times 1} \quad (20)$$

โดยที่ฟังก์ชันประมาณภายในอีลิเมนต์คือ  $N_i$  ดังสมการที่ 21 ถึงสมการที่ 24

$$N_1 = \frac{1}{6V} (a_1 + b_1 X + c_1 Y + d_1 Z) = S_1 \quad (21)$$

$$N_2 = \frac{1}{6V} (a_2 + b_2 X + c_2 Y + d_2 Z) = S_2 \quad (22)$$

$$N_3 = \frac{1}{6V} (a_3 + b_3 X + c_3 Y + d_3 Z) = S_3 \quad (23)$$

$$N_4 = \frac{1}{6V} (a_4 + b_4 X + c_4 Y + d_4 Z) = S_4 \quad (24)$$

สามารถเขียนเป็นเมทริกซ์รวมได้ดังสมการที่ 25

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & \dots & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & \dots & 0 & 0 & N_4 \end{bmatrix} \quad (25)$$

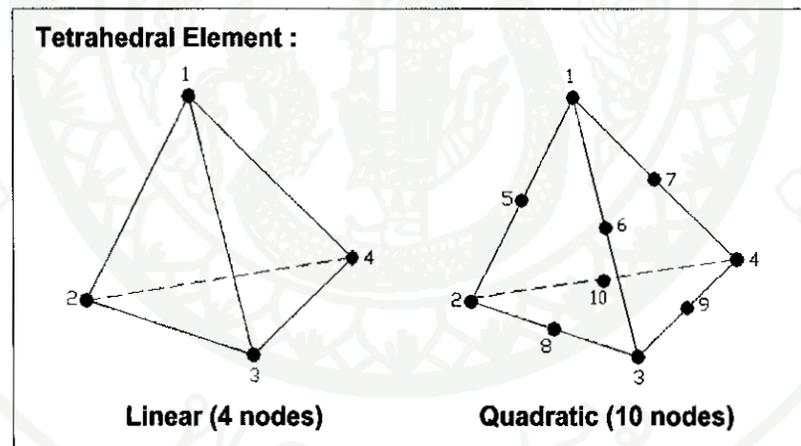
โดย  $[N]$  คือ เมทริกซ์ฟังก์ชันรูปร่างของอีลิเมนต์

$N_1, N_2, N_3, N_4$  คือ ฟังก์ชันรูปร่างของการสันตะเทียนที่จุดขั้วทั้ง 4 จุด

S คือ พิกัดร่วมเชิงปริมาตร

โดยที่  $a, b, c, d$  และ  $6V$  หาได้จากสมการที่ 26

$$\begin{aligned}
 a_i &= \det \begin{vmatrix} x_i & y_i & z_i \\ x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \end{vmatrix} & b_i &= \det \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{vmatrix} \\
 c_i &= \det \begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_l & 1 & z_l \end{vmatrix} & d_i &= \det \begin{vmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_l & y_l & 1 \end{vmatrix} \\
 6V &= \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix}
 \end{aligned} \tag{26}$$



ภาพที่ 4 อิลิเมนต์ทรงสี่หน้าสี่โหนดและอิลิเมนต์ทรงสี่หน้าสิบโหนด

ที่มา: อรุณ (2544)

ข. อิลิเมนต์อันดับสอง (Second Order Element) ในที่นี้จะกล่าวถึงอิลิเมนต์สามมิติซึ่งที่นิยมใช้จะมีอยู่สองชนิดคือ อิลิเมนต์ทรงสี่หน้าและอิลิเมนต์สี่เหลี่ยมลูกบาศก์ การเลือกใช้อิลิเมนต์ที่มีอันดับสูง ซึ่งอิลิเมนต์ที่มีอันดับมากกว่าจะมีจุดต่อหรือโหนดมากกว่าอิลิเมนต์อันดับต่ำกว่า จึง

ให้ความแม่นยำมากกว่า เหมาะกับงานที่มีผิวโค้งมากและบริเวณที่มีความเข้มข้นของความเค้น แต่ก็ต้องใช้หน่วยความจำและเวลาสำหรับในการคำนวณเพิ่มขึ้นด้วย สำหรับการประมาณค่าภายในอิเลเมนต์สามมิติที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์สี่สิบจุด และทรงสี่หน้าสิบจุดอิเลเมนต์ทรงสี่หน้า 10 จุด จากภาพที่ 4

#### การสร้างสมการของอิเลเมนต์ (Element Equation)

เป็นขั้นตอนการหาสมการของอิเลเมนต์ สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

- ก. วิธีโดยตรง (Direct approach) ใช้หลักการสมดุลของระบบ โดยตรง เช่น หลักการสมดุลของแรง
- ข. วิธีแปรผัน (Variation method) ใช้หลักการของงานและพลังงาน เช่น หลักการสมดุลของพลังงานศักย์ต่ำสุดสำหรับปัญหาในช่วงยึดหยุ่น
- ค. วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) ใช้สร้างสมการของอิเลเมนต์โดยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างจากผลเฉลยให้เท่ากับศูนย์ด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ โดยการจัดตำแหน่งจุด (Point Collocation) การจัดโดเมนย่อย (Subdomain Collocation) วิธีการเลอว์คิน (Galerkin) และวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Squares)

#### การหาสมการรวมของระบบ (Global Equations)

เป็นการนำสมการของแต่ละอิเลเมนต์มาประกอบกันทำให้เกิดระบบสมการของปัญหาทั้งระบบขึ้น

#### การกำหนดเงื่อนไขขอบ (Boundary Conditions)

เป็นการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่อยู่ภายในขอบเขตของปัญหาซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของวัสดุที่เกิดขึ้นจริงภายใต้สภาวะของปัญหานั้นๆ เช่น ถ้าเป็นวัสดุอยู่ในช่วงยึดหยุ่น ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจะเป็นตามกฎของฮุก (Hook's Law) ถ้าวัสดุอยู่ในช่วงพลาสติกความสัมพันธ์จะอยู่ในช่วงที่เกินค่ายังโมดูลัส (Young's Modulus) และเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาต่างๆลงในระบบสมการ

การหาคำตอบของระบบสมการ

เป็นการแก้ระบบสมการที่ได้เพื่อหาค่าตัวแปรที่โหนดแต่ละโหนดของฟังก์ชันรูปร่างอิลิเมนต์ที่กำหนด

## 2. ขั้นตอนการประมวลผล (Processing)

เป็นขั้นตอนการสร้างสมการไฟไนต์อิลิเมนต์ของปัญหาซึ่งสร้างได้หลายวิธี เช่น วิธีการโดยตรง, วิธีการแปรผันและวิธีการถ่วงน้ำหนัก โดยอาศัยข้อมูลและข้อกำหนดจากขั้นตอนก่อนการประมวลผล

อินทิเกรชัน โดยตรงแบบปริยาย (Implicit direct integration method)

วิธีอินทิเกรชัน โดยตรงถูกนำมาใช้แก้ปัญหาทางพลศาสตร์แบบไม่เชิงเส้น ซึ่งวิธีอินทิเกรชัน โดยตรงแบ่งได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกคือวิธีอินทิเกรตโดยตรงแบบชัดเจน (Explicit method) และวิธีที่สองคือ วิธีอินทิเกรตแบบปริยาย (Implicit method) โดยที่วิธีอินทิเกรตแบบปริยายจะถูกจัดรูปให้อยู่ในเทอมของสมการอนุพันธ์การเคลื่อนที่ โดยใช้ระเบียบวิธีฮอยโบ

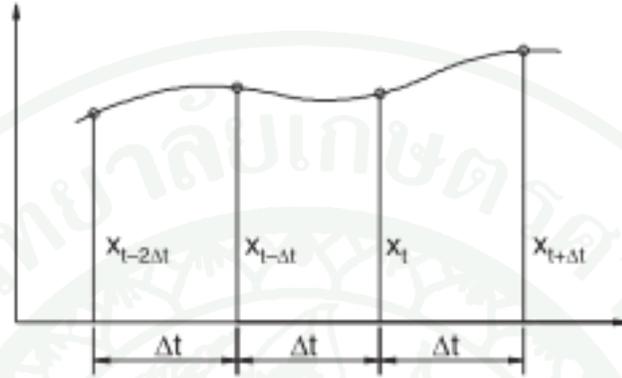
ระเบียบวิธีฮอยโบ (Houbolt method)

วิธีฮอยโบเป็นหนึ่งในวิธีอินทิเกรชันโดยตรงแบบปริยาย ใช้หลักการอินเตอร์โพรเซชันอันดับสาม (third-order Interpolation) ของเทอมการกระจัดที่เวลา  $t$  ( $X_t$ ) ในการหาความเร็วที่เวลา  $t$  ( $V_t$ ) และ ความเร่งที่เวลา  $t$  ( $a_t$ ) ในเทอมของ  $X_t$  โดยใช้วิธีผลต่างไปย้อนหลัง (backward differences)

$$q_t = q_{t-\Delta t} - \Delta t \dot{q}_{t+\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{q}_{t+\Delta t} - \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{q}_{t+\Delta t} \quad (27)$$

$$q_{t-\Delta t} = q_{t+\Delta t} - (2\Delta t) \dot{q}_{t+\Delta t} + \frac{(2\Delta t)^2}{2} \ddot{q}_{t+\Delta t} - \frac{(2\Delta t)^3}{6} \dddot{q}_{t+\Delta t} \quad (28)$$

$$q_{t-2\Delta t} = q_{t+\Delta t} - (3\Delta t)\dot{q}_{t+\Delta t} + \frac{(3\Delta t)^2}{2}\ddot{q}_{t+\Delta t} - \frac{(3\Delta t)^3}{6}\dddot{q}_{t+\Delta t} \quad (29)$$



ภาพที่ 5 กราฟวิธีผลต่างไปย้อนหลัง

หา  $\ddot{q}_{t+\Delta t}$  และ  $\dot{q}_{t+\Delta t}$  จากสมการที่ 27 ถึงสมการที่ 29 จะได้สมการที่ 30 และสมการที่ 31

$$\dot{q}_{t+\Delta t} = \frac{1}{6\Delta t} (11\dot{q}_{t+\Delta t} - 18q_t + 9q_{t-\Delta t} - 2q_{t-2\Delta t}) \quad (30)$$

$$\ddot{q}_{t+\Delta t} = \frac{1}{(\Delta t)^2} (2q_{t+\Delta t} - 5q_t + 4q_{t-\Delta t} - q_{t-2\Delta t}) \quad (31)$$

นำสมการที่ 30 และสมการที่ 31 แทนลงในสมการที่ 15 จะได้สมการที่ 32

$$[\bar{M}]\{q_{t+\Delta t}\} = \{\bar{f}_{t+\Delta t}\} \quad (32)$$

โดยที่

$$[\bar{M}] = \frac{2}{\Delta t^2} [M] + \frac{11}{6\Delta t} [C] + [K] \quad (33)$$

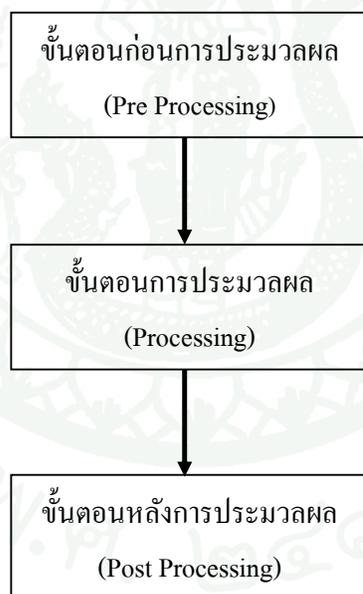
$$\{\bar{f}_{t+\Delta t}\} = \{F_{t+\Delta t}\} + \left( \frac{5}{\Delta t^2} [M] + \frac{3}{\Delta t} [C] \right) \{q\}$$

$$-\left(\frac{4}{\Delta t^2}[M]+\frac{3}{2\Delta t}[C]\right)\{q_{t-\Delta t}\}+\left(\frac{1}{\Delta t^2}[M]+\frac{1}{3\Delta t}[C]\right)\{q_{t-2\Delta t}\} \quad (34)$$

สมการการสมดุล ที่เวลา  $t + \Delta t$  ของสมการที่ 32 นำไปใช้หาการกระจัดที่เวลา  $t + \Delta t$  วิธีนี้จึงถูกเรียกว่า การอินทิเกรตแบบปริยาย (Implicit integration method) โดยสามารถหาค่าความเร็วและความเร่งที่เวลา  $t + \Delta t$  ได้โดยแทนในสมการที่ 30 และสมการที่ 31 ตามลำดับ

### 3. ขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post Processing)

เป็นขั้นตอนของการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ โดยอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟฟิกหรือเป็นข้อมูลที่เป็นตัวเลข



#### ภาพที่ 6 ขั้นตอนการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีข้อดีเหนือกว่าการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีระเบียบเชิงตัวเลขดังนี้ (เดช, 2541)

1. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำไปวิเคราะห์ปัญหาได้หลายแขนง เช่น การ

วิเคราะห์ความเค้น ผลการตอบสนองเชิงพลศาสตร์เป็นต้น

2. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่มีข้อจำกัดทางด้านรูปร่างของปัญหา นั่นคือ สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้โดยง่าย
3. สามารถจำลองการกระทำของโหลดในสภาพต่างๆ เช่น โหลดที่กระจายไม่สม่ำเสมอ ได้ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง
4. ใช้วิเคราะห์ปัญหาที่ประกอบไปด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยไม่มีความยุ่งยากไม่มีข้อจำกัดในด้านคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ทำการวิเคราะห์ เป็นต้น

#### การทดสอบเชิงพลศาสตร์

วัตถุประสงค์ของการทดสอบระบบโครงสร้างทางกลเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ให้ผลการคำนวณสอดคล้องกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงของระบบโครงสร้าง ถ้าระบบโครงสร้างมีขนาดไม่ใหญ่ การทดสอบจะใช้เท่าขนาดจริง แต่ถ้าระบบโครงสร้างมีขนาดใหญ่มาก ต้องมีการจำลองระบบโครงสร้างให้เล็กและเหมาะสม เรียกแบบจำลองนี้ว่า แบบจำลองเชิงกายภาพ (Physical Model) พลศาสตร์ของเครื่องจักร

เหตุผลสำคัญที่ทำให้รูปแบบการสั่นของเครื่องจักรมีความหลากหลายแตกต่างกันนั้นมีสาเหตุมาจากการเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ของเครื่องจักร (Machine Dynamics) นั่นเอง โดยการเคลื่อนที่นี้จะขึ้นอยู่กับมวล (Mass) ความแข็งตึงของวัสดุ (Stiffness) ความหน่วง (Damping) และองศาอิสระของการเคลื่อนที่ (Degree of Freedom) อย่างไรก็ตามยังจำเป็นต้องใช้ความระมัดระวังในการวิเคราะห์ เพราะรูปแบบการสั่นสะเทือนและระดับพลังงานที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยเครื่องจักรนั้นอาจจะแปรผันไปตามปัจจัยของตำแหน่งหรือปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ในการวัดอีกด้วย

มวล ความแข็งตึงของวัสดุ ความหน่วง ทั้งสามปัจจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงระดับพลังงานการสั่นโดยปกติทั่วไป และผลของรูปแบบลักษณะการสั่น ดังนั้นจะพบว่าเครื่องจักรใหญ่ได้ถูกออกแบบให้มีระบบรองรับการเคลื่อนไหวแบบพลศาสตร์ ที่ขึ้นอยู่กับมวลของชิ้นส่วนที่

เคลื่อนไหว ความแข็งตรงของวัสดุและความหน่วง มวล เป็นคุณสมบัติของวัตถุในการอธิบายว่ามีปริมาณเนื้อวัสดุมากเพียงใด ณ เวลานั้น แต่สำหรับหลักการทางพลศาสตร์แล้ว มวลจะอธิบายถึงความสามารถของวัตถุในการต้านแรงภายนอกที่มากระทำ ได้มากน้อยเพียงใด หรืออาจกล่าวได้ว่า ยิ่งวัตถุมีมวลมาก ก็ต้องใช้แรงปริมาณมากในการกระทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งระดับหนึ่ง ความแข็งตรงของวัสดุ เป็นคุณสมบัติของวัตถุที่คล้ายคุณสมบัติสปริง ก็จะบอกถึงระดับความสามารถของวัตถุในการต้านแรงที่มากระทำ ซึ่งส่งผลให้ตัววัตถุเกิดการเปลี่ยนแปลงในมิติของรูปร่าง เครื่องจักรส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติความแข็งตรงของวัสดุที่ต้องพิจารณามากกว่า 1 แบบ ได้แก่ ความแข็งตรงในแกนของเพลลา ความแข็งตรงในแนวแกนตั้ง ความแข็งตรงในแนวแกนนอน ซึ่งพบว่าค่าความแข็งตรงมีค่าน้อยลงเพียงใดค่าการสั่นสะเทือนจะยิ่งมากขึ้น ความหน่วงเป็นคุณสมบัติที่แสดงถึงสภาพการต้านการเคลื่อนที่ที่มีผลทำให้ความเร็วของการสั่นสะเทือนลดลง โดยทั่วไปจะหมายถึงแรงต้านการเคลื่อนที่ การเสียดสีสัมผัสกับวัตถุอื่น ชนิดของการสั่นสะเทือนแบ่งเป็น 4 แบบคือ

1. การสั่นแบบอิสระ โดยไม่มีความหน่วง (Free Vibration – Undamped)
2. การสั่นแบบอิสระ โดยมีความหน่วง (Free Vibration – Damped)
3. การสั่นสะเทือนแบบมีแรงภายนอกมากระทำ โดยไม่มีความหน่วง (Force Vibration – Undamped)
4. การสั่นสะเทือนแบบมีแรงภายนอกมากระทำ โดยมีความหน่วง (Forced Vibration – Damped)

### อุปกรณ์การวัดและการวิเคราะห์

#### หัววัดการสั่นสะเทือน (Accelerometer Sensor)

การสั่นสะเทือนทางกลอันเนื่องมาจากผลตอบสนองทางพลศาสตร์ เป็นการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมาของวัตถุ โดยสามารถเทียบเป็นแบบระยะการเคลื่อนที่ ความเร็วของการเคลื่อนที่ หรือความเร่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยมีหลักการทำงานโดยเปลี่ยนการเปลี่ยนแปลงทางกล ให้เป็นการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า เพื่อที่จะส่งสัญญาณทางไฟฟ้านั้น ไปสู่เครื่องมือบันทึกและเก็บค่าและแปลงกลับมาแสดงผลในทางกลต่อไป หัววัดการสั่นสะเทือนสามารถแยกตามหลักการทำงานได้ 3 ประเภทดังนี้

1. หัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง (Acceleration Transducer)
2. หัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร็ว (Velocity Transducer)
3. หัววัดการสั่นสะเทือนแบบระยะทาง (Displacement Transducer)

ปัจจุบันหัววัดการสั่นสะเทือนที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือหัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่งเนื่องจากมีขนาดเล็ก อีกทั้งยังสามารถวัดค่าความเร็วและระยะทางได้โดยวงจรอินทิกรัล หัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่งจะมีลักษณะการทำงานคือเป็นหัววัดสำหรับวัดการเคลื่อนที่เทียบกับเวลาสำหรับชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนไหวหรือการสั่นสะเทือน ซึ่งสามารถวัดในรูปแบบของความเร่ง โดยการแปลงการเคลื่อนที่ทางกลมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งอาศัยหลักการของผลึกเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Crystal) และก้อนน้ำหนักรวมอยู่ในหัววัดการสั่นสะเทือน พร้อมทั้งวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายใน หลักการทำงานของหัววัดการสั่นสะเทือนชนิดนี้จะอาศัยคุณสมบัติของผลึกเพียโซ ซึ่งผลึกเพียโซจะมีคุณสมบัติไวต่อการเปลี่ยนแปลงมาก เมื่อผลึกชนิดนี้ถูกแรงกระทำที่มีลักษณะเป็นแรงกดหรือแรงเฉือนแล้ว ผลึกนี้จะสามารถจ่ายเป็นพลังงานในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าออกมา แรงดันไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแรงที่กระทำกับผลึกเพียโซนั้น

#### การติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่ง

เนื่องจากการติดตั้งหัววัดการสั่นสะเทือนแบบความเร่งจะทำการติดตั้งแบบสัมผัส ซึ่งจุดที่สำคัญที่สุดของการติดตั้งหัววัดชนิดนี้คือ การเกิดเรโซแนนซ์ของตัวหัววัดเอง วิธีการติดตั้งหัววัดแบบความเร่งโดยให้แนบกับผิวของชิ้นส่วนเครื่องจักรทำได้หลายวิธี

1. การยึดหัววัดด้วยสลักเกลียว การติดตั้งหัววัดโดยวิธีนี้เป็นการยึดหัววัดที่แน่นหนาที่สุด

ความถี่ตอบสนองของการใช้งานจึงมีย่านความถี่ใช้งานสูง การยึดด้วยวิธีนี้จึงเหมาะสำหรับวัดการสั่นสะเทือนบนเครื่องจักรที่มีความถี่สูงได้ วิธีนี้ส่วนมากจะเป็นการติดตั้งหัววัดแบบถาวร

2. การยึดหัววัดด้วยซีเมนต์ วิธีการติดตั้งจะต้องทำการปรับแต่งผิวหน้าของชิ้นส่วนเครื่องจักรให้เรียบเสียก่อนและทำการเช็ดผิวให้แห้งและสะอาดด้วย เพื่อที่จะทำให้ซีเมนต์ประสานระหว่างหัววัดความเร่งกับผิวของเครื่องจักรได้ดี ส่วนมากการยึดหัววัดด้วยวิธีนี้จะเหมาะสมกับหัววัดที่มีขนาดเล็ก ซึ่งการตอบสนองต่อความถี่การใช้งานจะใกล้เคียงกับการยึดหัววัดด้วยสลักเกลียว แต่การยึดด้วยวิธีนี้ไม่สามารถใช้ในที่มีอุณหภูมิสูงได้ เนื่องจากจะทำให้ซีเมนต์เกิดการละลายได้

3. การยึดหัววัดด้วยการอีพอกซี วิธีการติดตั้งจะต้องทำการปรับแต่งผิวหน้าของชิ้นส่วนเครื่องจักรให้เรียบเสียก่อนและทำการเช็ดผิวให้แห้งและสะอาดด้วยการยึดหัววัดด้วยวิธีนี้จะสามารถทนต่ออุณหภูมิได้ดีกว่าซีเมนต์เล็กน้อย

4. การยึดหัววัดด้วยเทปกาวสองหน้า วิธีการติดตั้งจะต้องทำการปรับแต่งผิวหน้าของชิ้นส่วนเครื่องจักรให้เรียบเสียก่อนและทำการเช็ดผิวให้แห้งและสะอาดด้วย วิธีนี้จะเป็นฉนวนไฟฟ้าได้ดีกว่าการใช้ซีเมนต์และอีพอกซี

5. การยึดหัววัดด้วยแม่เหล็ก วิธีนี้เป็นการยึดหัววัดด้วยแม่เหล็กถาวรที่ขันแน่นกับหัววัด ความแรง แล้วนำไปยึดติดกับชิ้นส่วนของเครื่องจักรวิธีนี้เหมาะสำหรับการตรวจวัดค่าการสั่นสะเทือนเป็นครั้งคราวเนื่องจากทำได้สะดวกและรวดเร็ว

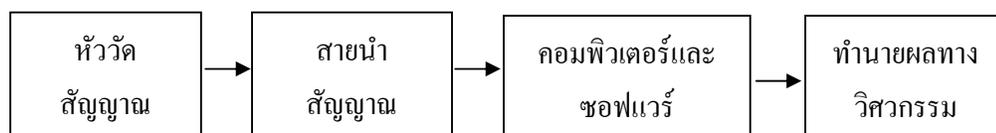
6. การยึดหัววัดด้วยการใช้มือกด เป็นการยึดหัววัดการกดหัววัดด้วยมือลงบนเครื่องในกรณีที่เครื่องจักรบางชนิดที่ไม่สามารถใช้การยึดแบบแม่เหล็กได้ เนื่องจากตัวเครื่องไม่ได้ทำจากเหล็ก

#### สายนำสัญญาณ

สายนำสัญญาณการสั่นสะเทือนเป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่เชื่อมระหว่างหัววัดสัญญาณการสั่นสะเทือนกับเครื่องมือวัดการสั่นสะเทือน โดยจะทำหน้าที่นำสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าไปสู่เครื่องมือวัดและบันทึกผล

#### คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์

คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเครื่องมือวัดและบันทึกผล ส่วนชุดซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์สามารถแสดงผลออกมาในรูปของกราฟแบบต่างๆหรือรูปแบบตารางแล้วแต่ความสามารถของซอฟต์แวร์



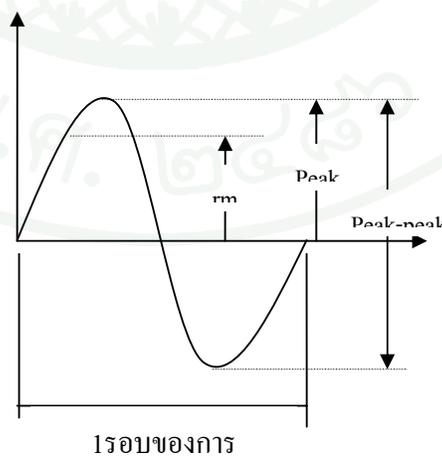
ภาพที่ 7 ขั้นตอนและอุปกรณ์สำหรับทดสอบผลตอบสนองของชุดโต๊ะกักสั่นงานแบบหมุน 2

แกน

## หน่วยวัดขนาดการสั่นสะเทือน

เมื่อพิจารณาสัญญาณของการสั่นสะเทือน ไม่ว่าจะเป็นการกระจัด, ความเร็ว หรือความเร่ง สัญญาณทั้ง 3 แบบนี้จะอยู่ในรูปของคลื่นไซน์ (sine wave) ซึ่งจะมีทั้งค่าบวกและค่าลบ และมีค่าแปรเปลี่ยนตามเวลา การบอกขนาดของการสั่นสะเทือนจะบอกในลักษณะการสั่นสะเทือนแบบรวม (Overall Vibration) ที่ใช้กันทั่วไปจะประกอบไปด้วย

1. ค่ายอดสูงสุด (Peak) จะบอกค่าระดับสูงสุดของการสั่นสะเทือนที่เบี่ยงเบนไปจากระดับอ้างอิง โดยไม่ได้คำนึงถึงลักษณะของการสั่นสะเทือนอย่างอื่น ซึ่งค่านี้ส่วนมากจะใช้วัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการกระแทกในช่วงเวลาสั้นๆ เช่น การเคาะเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของวัตถุ (Bump Test) เป็นต้น
2. ค่ายอดสูงสุดถึงยอดสูงสุดด้านตรงข้าม (Peak to Peak) เป็นค่าของขนาดการสั่นสะเทือนที่วัดจากจุดสูงสุดของคลื่นไซน์กับจุดต่ำสุดของคลื่นไซน์
3. ค่าเฉลี่ย (Average) เป็นค่าเฉลี่ยของขนาดการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งๆ ซึ่งการสั่นสะเทือนนั้นจะมีทั้งค่าที่เป็นบวกและลบเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง
4. ค่า rms (Root Mean Square) เป็นค่าของขนาดการสั่นสะเทือนที่ได้จากการนำค่าที่วัดได้ในโดเมนเวลา (Time Domain) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งๆ มายกกำลังสอง แล้วทำการเฉลี่ยตลอดคาบและถอดรากที่สองออกมา



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ของหน่วยสัญญาณการสั่นสะเทือน



ภาพที่ 9 อุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้าง



ภาพที่ 10 เซนเซอร์หัววัดความเร่ง

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อรุณ (2544) ได้ทำการวิเคราะห์เครื่องจักรที่ทำงานภายใต้ภาวะพลวัตที่มีการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยการศึกษาและตรวจสอบการออกแบบ โครงสร้างเครื่องจักรกลความเร็วสูงต่อการสั่นสะเทือนแบบเสรี โดยการหาลักษณะเฉพาะทางพลวัตและแบบบังคับต่อภาวะแบบฮาร์มอนิก โดยเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองเดิม และแบบจำลองที่ได้ปรับปรุงแล้ว โดยการวิเคราะห์เชิงสถิติ โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ลักษณะเฉพาะทางพลวัตที่คำนวณได้อยู่ในรูปของค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นสะเทือนจากผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า แบบจำลองที่ได้ทำการปรับปรุงใหม่มีช่วงความถี่ใช้งานที่ปลอดภัยในช่วง 500-600 Hz ดังนั้นในกรณีพื้นของหัวกัดเป็นพื้นกัดแบบ 2 พื้น ความเร็วรอบที่ปลอดภัยต่อการใช้งานอยู่ในช่วง 15,000-18,000 rpm ซึ่งเป็นช่วงที่ขยับสูงขึ้นจากเดิม โดยมีระยะการกระจัดน้อยกว่าค่ากำหนด  $10 \times 10^{-6}$  m ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์การออกแบบที่เหมาะสม

Bathe and Noh (2012) ได้เสนอหลักการของอินทริเกชัน โดยตรงแบบปริยาย (Implicit time integration) สำหรับปัญหาระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นในพลศาสตร์โครงสร้าง โดยบทความนี้จะใช้การอินทริเกชัน โดยตรงแบบปริยายในหาผลตอบสนองของโครงสร้างแบบทรานเซียน โดยในบทความนี้จะมุ่งเน้นไปทางด้านคุณลักษณะของวิธีการนี้ โดยเฉพาะประสิทธิภาพในการวิเคราะห์แบบเชิงเส้น โดยอ้างอิงบทความสองบทความดังนี้ On a composite implicit time integration procedure for nonlinear dynamics โดยบทความนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์แบบทรานเซียนของปัญหาไม่เชิงเส้นทางโครงสร้างและปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็ง แต่ไม่เหมาะกับปัญหาที่มีการเสีรูปมากและเวลาในการตอบสนองนาน และ Conserving energy and momentum in nonlinear dynamics: a simple implicit time integration scheme โดยที่บทความนี้จะเน้นเอาวิธีอินทริเกชัน โดยตรงแบบปริยายไปใช้กับระบบโครงสร้างที่มีผลตอบสนองแบบทรานเซียน โดยที่มีช่วงการเสีรูปมากและช่วงระยะเวลาในการตอบสนองนาน

Behera and Mishra (2007) ได้ศึกษาเพื่อนำเสนอความเป็นไปได้ในการเทียบเคียงลักษณะการสั่นสะเทือนของ Tumbling mills ขณะเคลื่อนที่และภาวะ grinding โดยที่สัญญาณของการสั่นสะเทือนที่ทดสอบได้มาจากการติดตั้งอุปกรณ์หัววัดความเร่ง (Accelerometer) ที่ mill shaft ขนาดรัศมี 180 เซนติเมตร ซึ่งสัญญาณจะแสดงผลออกมาในรูปแบบของช่วงเวลา และใช้ FFT (fast Fourier transform) ในการแปลงข้อมูลในรูปแบบความถี่ สเปกตรัมฟูริเยร์ในรูปแบบความถี่

เป็นวิธีที่อธิบายถึงความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ภายใต้เงื่อนไขการทำงานใดๆ พฤติกรรม grinding ภายใต้เงื่อนไขสภาวะแห้งและเปียกจะถูกนำมาวิเคราะห์ในรูปแบบของตัวแปรการสั่นสะเทือนที่อยู่ในรูปของฟังก์ชัน ความเร็วของ mill , ปริมาตร , ภาระโหลดและเวลาของการ grinding ผลการทดลอง แสดงชัดเจนว่าจุดสูงสุดของสเปกตรัมฟูริเยร์ ก่อนข้างไว้ต่อการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของภาวะการทำงาน คุณลักษณะนี้ใช้ในการตรวจสอบสภาวะการทำงานที่ไม่พึงประสงค์ เช่น surging, mill over-load เป็นต้น สุดท้ายจะเห็นได้ว่าปรับค่าจากการสั่นสะเทือนของ mill ที่เหมาะสม สามารถทำนายภาวะพลศาสตร์และกำหนดภาวะของการ grinding ได้

Chung and Hulbert (1994) นำเสนอวิธีใหม่ของวิธีหาปริพันธ์แบบปริยาย (Implicit) คือ Single-step time integration ซึ่งเป็นวิธีสำหรับปัญหาพลศาสตร์ทางโครงสร้าง ซึ่งใช้วิธีฮอยโบ (Houbolt method) อัลกอริทึมการทำนายแบบชัดเจนถูกนำเสนอตามวิธีแบบปริยายใหม่ อัลกอริทึมของวิธีการหาปริพันธ์แบบชัดเจน (Explicit) คือวิธีผลต่างกลาง (Central Difference) นำทั้งสองวิธีมารวมกันเรียกว่า Implicit-Explicit method ซึ่งจะปรับปรุงอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาพลศาสตร์ทางโครงสร้างใหม่ ที่ประกอบด้วยสองขอบเขตคือ the critical time step size ขนาดเล็ก (soft) และ relatively large time step size (stiff) ผลของวิธีเชิงตัวเลขแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นจากวิธีใหม่เมื่อเทียบกับวิธีเดิมสำหรับปัญหาพลศาสตร์ทางโครงสร้าง

Guzelbey, Erklig and Kanber (2005) ได้ทำการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพปัญหาทางด้าน อิมแพค (Impact) โดยวิธีการหาปริพันธ์โดยตรง (direct integration method) ได้แก่วิธี นิวมาร์ค (Newmark method), วิลสัน-เซต้า (Wilson- $\theta$  method), ฮอยโบ (Houbolt method) และ วิธีผลต่างกลาง (Central Difference) การวิเคราะห์ปัญหาอิมแพครวมถึงสภาวะยึดหยุ่นและการเสียรูปมาก (large deformation) วิธีอัปเดตลากราง (updated Lagrangian) ผลของวิธีการหาปริพันธ์โดยตรงจะให้ผลที่ต่างกัน ในกรณีที่มีการสัมผัสแบบกระแทกแตกต่างกัน

Park, Choi and Min (2011) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของ Heunginjimun ซึ่งเป็นสถานที่สำคัญของประเทศเกาหลีมีโครงสร้างทำจากไม้ โดยได้ศึกษาสองกรณีคือกรณีที่เกิดเกิดจากการสั่นสะเทือนของบรรยากาศ (ambient vibration) และกรณีที่มาจากการทดสอบด้วยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น (Hammer test) โดยอ้างอิงจากบทความของ Ahn, S. J. et al. 2003 ผลจากกรณีที่สองทำให้รู้ค่าความถี่ธรรมชาติคือ, 1.5 Hz และ 4.2 Hz ในแนวแกน X และ, 1.1 Hz, 3.2 Hz และ 4.2 Hz ในแนวแกน Y และเฟสของ Heunginjimun

Payen and Bathe (2011) ได้ทำการศึกษาโดยเอาเทคนิค NPF (nodal point force based stress calculation method) ของ Payen และ Bathe 2011 มาปรับปรุงการคำนวณหาความเค้นของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติแบบสามเหลี่ยมทรงสี่หน้าสี่โหนดซึ่งใช้กันอย่างมากในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม โดยเริ่มจากปัญหาสองมิติอย่างง่าย และปัญหาสามมิติตามลำดับและผลการทำนายความเค้นโดยใช้เทคนิค NPF และ แบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติแบบสามเหลี่ยมทรงสี่หน้าสี่โหนดให้ค่าความเค้นแม่นยำขึ้นทุกกรณี

Tillerson and Stricklin (1970) ได้ทดลองใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขหลายวิธีในการหาคำตอบของสมการการเคลื่อนไม่เชิงเส้นโดยวิธี matrix displacement ของ aircraft ซึ่งสามารถวิเคราะห์แบบ shells ได้ ได้ข้อสรุปว่าวิธีของฮอยโบ (Houbolt method) มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยที่เริ่มแรกแต่ละเทคนิคที่นำมาใช้จะใช้กับการวิเคราะห์คานแบบไม่เชิงเส้นเพื่อหาวิธีการที่มีแนวโน้มมากที่สุดสำหรับใช้วิเคราะห์ shell ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้ โดยแต่ละวิธีการจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลการตอบสนองที่ได้รับสำหรับ Lower mode ของการสั่นสะเทือน การเปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นความเหนือกว่าของวิธีการ Houbolt ดังนั้นการทดสอบที่สำคัญของเทคนิคนี้จะใช้กับปัญหาไม่เชิงเส้น สำหรับความถี่สูงเทคนิคการตอบสนองเชิงตัวเลขอื่นๆอาจจะได้เปรียบกว่าวิธีฮอยโบ

## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

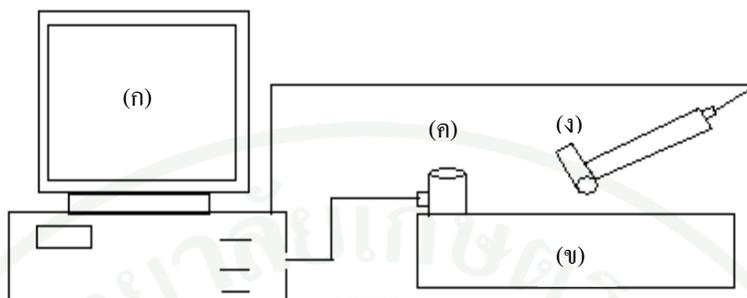
1. เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับออกแบบและทำนายผล
2. ชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน
3. เครื่องสร้างแรงกระตุ้น โครงสร้าง Hammer
4. เซนเซอร์หัววัดความเร่ง (Accelerometer)
5. อุปกรณ์แปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล A2D
6. โปรแกรมช่วยออกแบบทางวิศวกรรม Solidworks
7. โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม Marc Mentat 2007r1

### วิธีการ

งานวิจัยนี้แบ่งวิธีการวิจัยเป็นสองแนวทางคือ

#### 1. การทดสอบผลตอบแทนเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุนสองแกน

ทดสอบโดยใช้อุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น โครงสร้างเคาะลงที่บริเวณผิวของโต๊ะชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ที่พิกัด  $x = 114$  มิลลิเมตร  $y = 0$  มิลลิเมตร และ  $z = 59.5$  มิลลิเมตร และติดตั้งเซนเซอร์หัววัดความเร่งสำหรับวัดผลตอบแทนที่เกิดขึ้นกับชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ที่พิกัด  $x = 55.5$  มิลลิเมตร  $y = 0$  มิลลิเมตร และ  $z = -100$  มิลลิเมตร ของโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ดังภาพที่ 11 และ ภาพที่ 12 เมื่อใช้อุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น โครงสร้างเคาะตำแหน่งพิกัดที่กำหนดไว้บนโต๊ะชุดกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนแล้ว ภาพกราฟของแรงที่ใช้ในการทดสอบจะถูกแสดงผลผ่านซอฟต์แวร์ในคอมพิวเตอร์ดังภาพที่ 56 และภาพที่ 57 หลังจากนั้นเซนเซอร์หัววัดความเร่งจะรับข้อมูลที่มีการเคลื่อนที่ไปและกลับอย่างต่อเนื่องมาเป็นข้อมูลความเร่งแบบอนาล็อก ขั้นตอนต่อไปจึงนำเอาผลข้อมูลที่เป็นอนาล็อกมาแปลงเป็นข้อมูลดิจิทัลโดยผ่าน การ์ดแปลงข้อมูลอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital) เพื่อทำการแสดงข้อมูลผ่านซอฟต์แวร์ในคอมพิวเตอร์ ดังภาพที่ 58 และภาพที่ 59 ซึ่งสามารถแสดงผลได้ทั้ง การกระจัด, ความเร็วและความเร่ง ซึ่งขั้นตอนการทดสอบแสดงดังในภาพที่ 13



ภาพที่ 11 แบบจำลองการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์: (ก) คอมพิวเตอร์สำหรับแสดงผล, (ข) โต๊ะกัจฉ์งานแบบหมุน 2 แกน, (ค) เซนเซอร์หัววัดความเร่ง, (ง) เครื่องสร้างแรงกระตุ้น โครงสร้าง



ภาพที่ 12 การทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้างบนชุดโต๊ะกัจฉ์งานแบบหมุน 2 แกน และตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์หัววัดความเร่งบนโต๊ะกัจฉ์งานแบบหมุน 2 แกน



ภาพที่ 13 ขั้นตอนการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์

## 2. การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.1 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดโต๊ะกักขังงานแบบหมุน 2 แกน

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งขั้นตอนการแก้ปัญหาออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนหนึ่งขั้นตอนก่อนการคำนวณผล (Pre-Processing) ประกอบไปด้วยลักษณะรูปร่างของแบบจำลอง การเลือกแบบจำลองวัสดุ เงื่อนไขขอบเขต การเลือกใช้อิเล็กเมนต์ และภาระที่กระทำ ขั้นตอนที่สองขั้นตอนการวิเคราะห์และคำนวณผล (Analysis) เป็นขั้นตอนการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหา โดยอาศัยข้อมูลและข้อกำหนดจากขั้นตอนการประมวลผล จากนั้นทำการแก้ระบบสมการเพื่อหาคำตอบที่ต้องการ ขั้นตอนที่สามขั้นตอนการประมวลผลและแสดงผล (Post-Processing) เป็นขั้นตอนของการแสดงผลที่นำมาจากค่าคำนวณผล โดยอาจจะแสดงในรูปแบบของกราฟหรือข้อมูลที่เป็นตัวเลข จากนั้นจึงนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ต่อ

## 2.2 ลักษณะรูปร่างและขนาดของแบบจำลอง

ขั้นตอนการสร้างลักษณะรูปร่างและขนาดของแบบจำลองชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมูน 2 แกน ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างชิ้นส่วนแบบจำลองสามมิติของชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมูน 2 แกนแต่ละชั้น และนำชิ้นส่วนแต่ละชั้นมาประกอบเป็นชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมูน 2 แกนด้วยโปรแกรมออกแบบทางวิศวกรรม เพื่อเตรียมสำหรับนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์ดังแสดงในภาพที่ 14,16,18,20,22,24,26,28,30,32,34,36 และดังแสดงในภาพที่ 38 ตามลำดับ

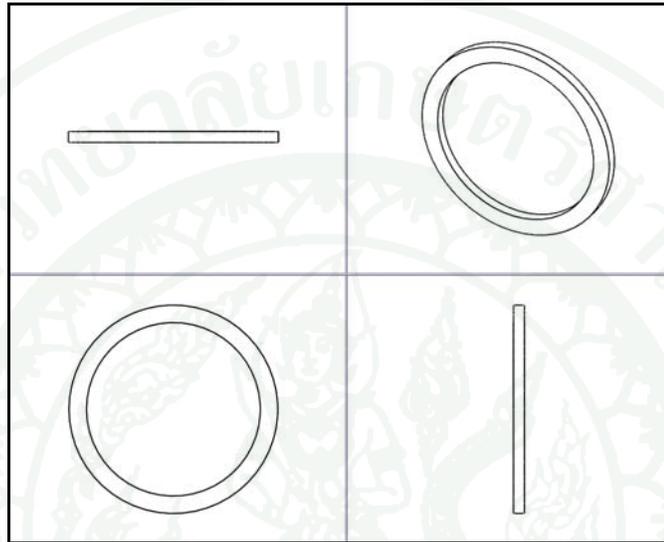
## 2.3 การเลือกชนิดของอิลิเมนต์ในแบบจำลอง

การเลือกชนิดของอิลิเมนต์ที่เหมาะสมกับปัญหานั้น ในการวิเคราะห์นี้เลือกใช้โซลิดอิลิเมนต์ (Solid Element) ซึ่งเหมือนกับการแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆ หลายๆส่วน โดยแต่ละอิลิเมนต์ต่อกันด้วยหน้าของอิลิเมนต์ เหมาะกับการวิเคราะห์ปัญหาแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น เนื่องจากปัญหาที่วิเคราะห์เป็นปัญหาแบบสามมิติ จึงเลือกชนิดหรือฟังก์ชันประมาณภายในอิลิเมนต์เป็นแบบอิลิเมนต์อันดับหนึ่งเรียกว่า อิลิเมนต์สามเหลี่ยมทรงสี่หน้าสี่ โหนด (Tetrahedral Element) ดังแสดงในภาพที่ 4 ขั้นตอนนี้จะทำการสร้างแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ของชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมูน 2 แกน เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ เพื่อสมมุติให้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น โดยแบบจำลองชิ้นงาน 3 มิติแต่ละชั้นที่ได้กำหนดฟังก์ชันประมาณภายในอิลิเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 15,17,19,21,23,25,27,29,31,33,35,37 และภาพที่ 39

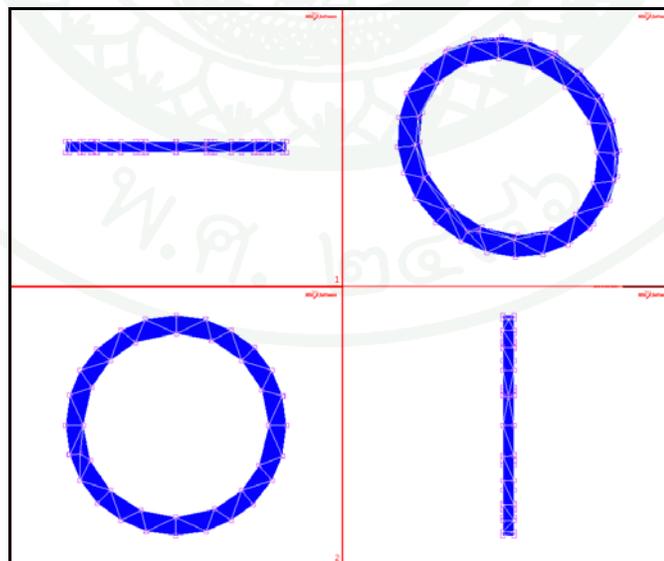
## 2.4 การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์

การกำหนดค่าวัสดุของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ที่เหมาะสม โดยกำหนดให้ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมูน 2 แกนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติแบบไอโซโทรปิก ซึ่งแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์สามมิติจะเลือกใช้วัสดุสองประเภทคือ ประเภทแรกเป็นวัสดุที่ทำจากเหล็กกล้าเกรด

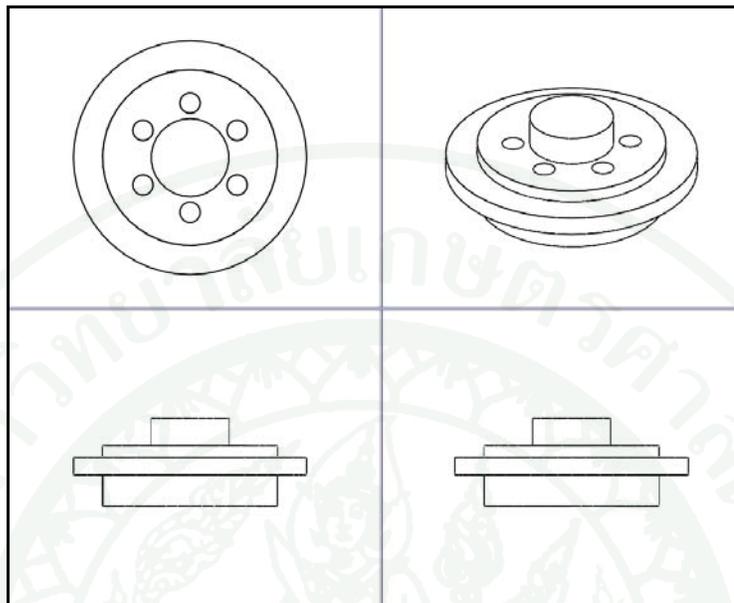
S45C ดังแสดงในภาพที่ 41 ประเภทที่สองเป็นวัสดุที่ทำจากเหล็กหล่อเกรด FC30 ดังแสดงในภาพที่ 40 ซึ่งแต่ละประเภทมีคุณสมบัติทางกลของวัสดุตามตารางที่ 1



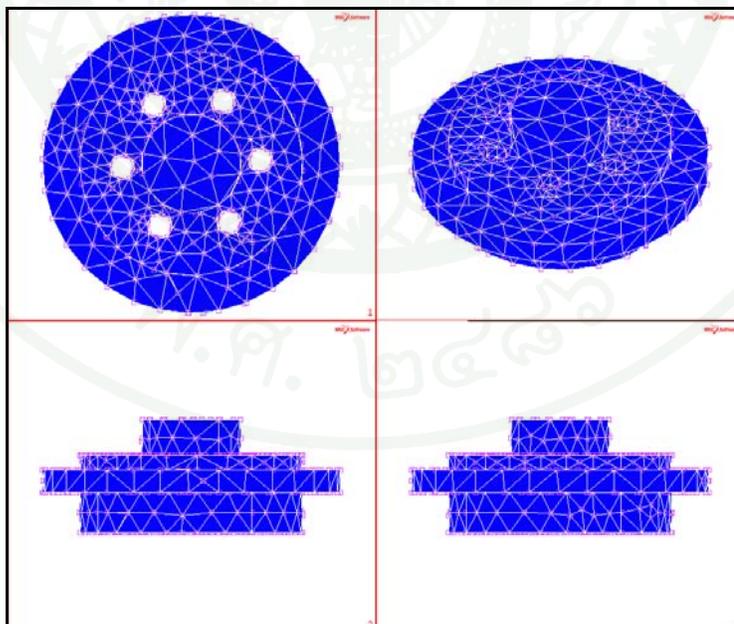
ภาพที่ 14 รูปร่างและขนาด Support Bearing ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบ หมุน 2 แกน



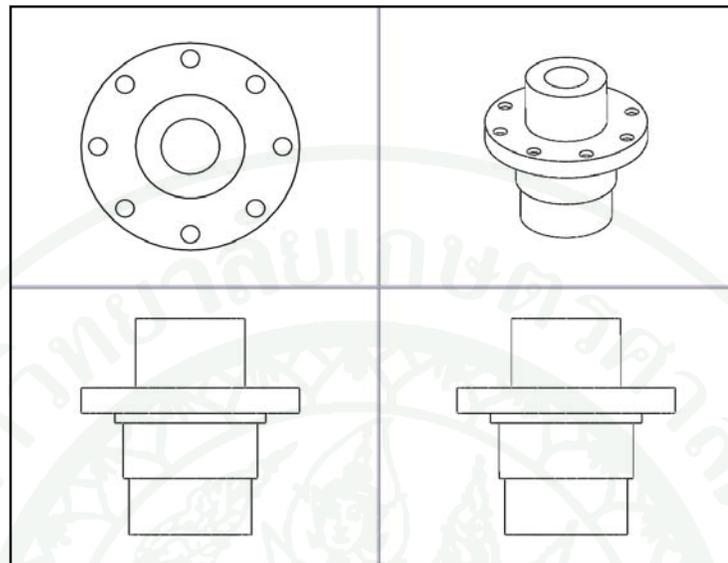
ภาพที่ 15 รูปร่างและขนาด Support Bearing ของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



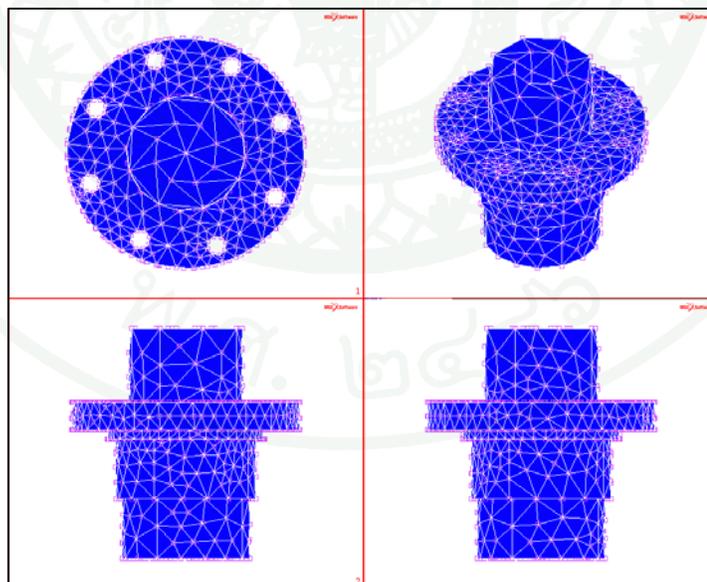
ภาพที่ 16 รูปร่างและขนาด Shaft Encoder ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกีดชิ้นงานแบบ  
หมุน 2 แกน



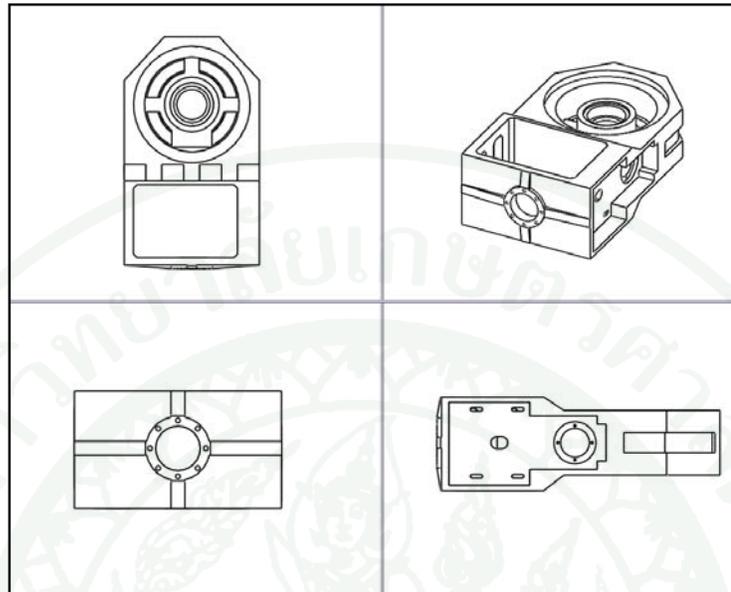
ภาพที่ 17 รูปร่างและขนาด Shaft Encoder ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกีด  
ชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



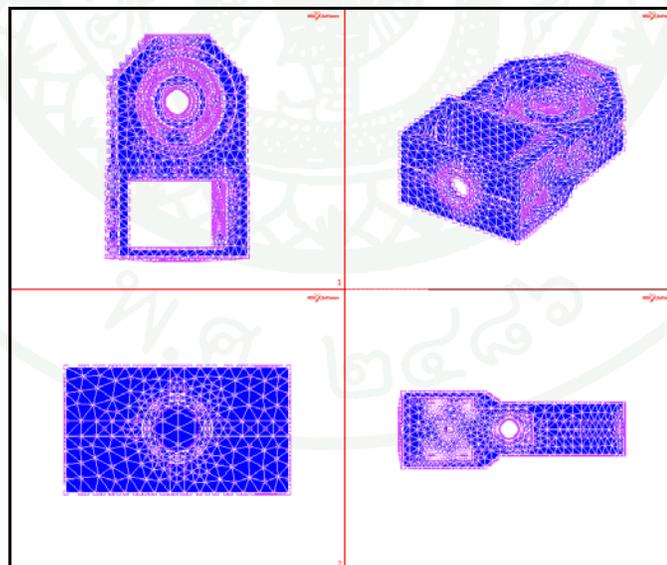
ภาพที่ 18 รูปร่างและขนาด Main Shaft ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



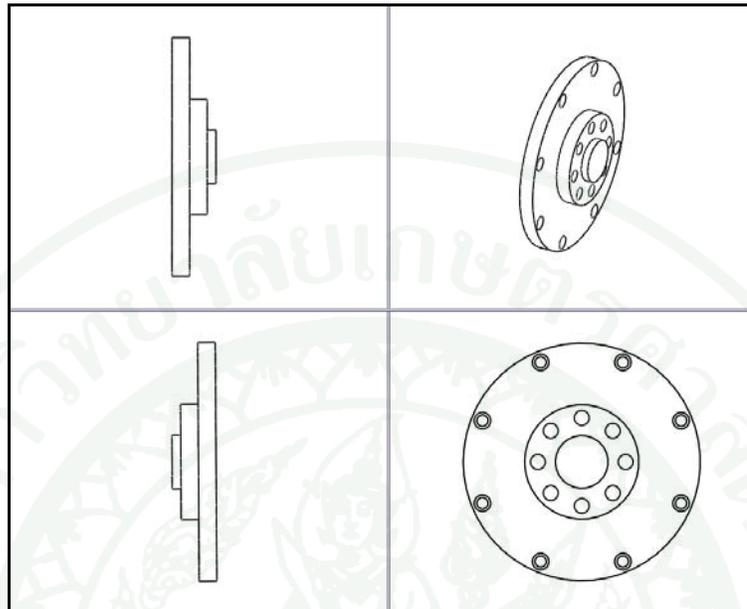
ภาพที่ 19 รูปร่างและขนาด Main Shaft ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



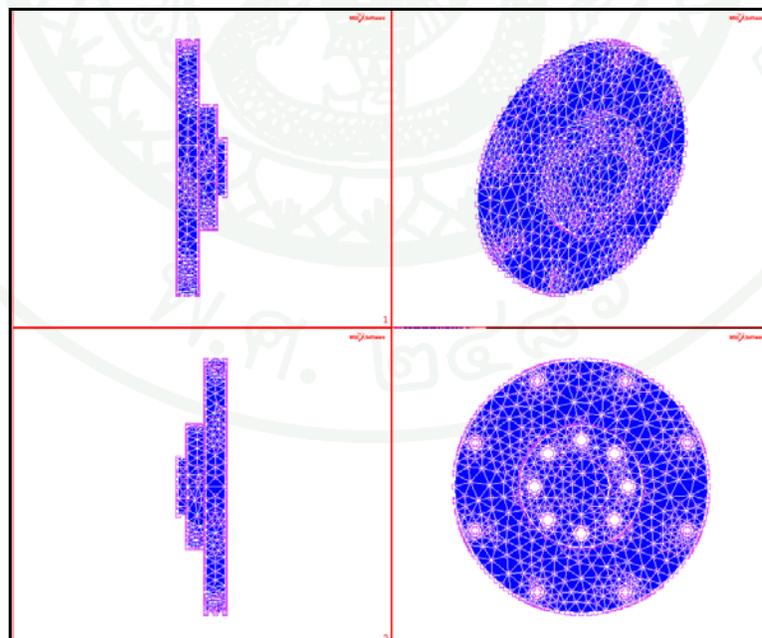
ภาพที่ 20 รูปร่างและขนาด Cover C-Axis ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



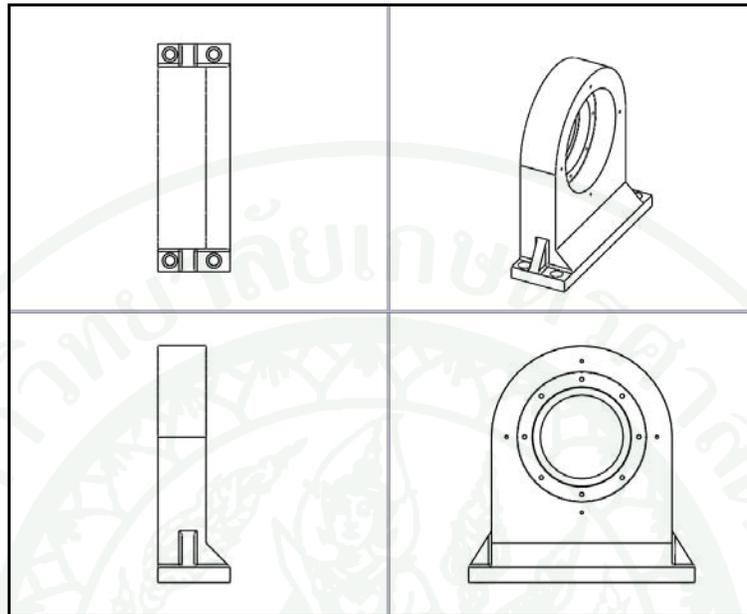
ภาพที่ 21 รูปร่างและขนาด Cover C-Axis ของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



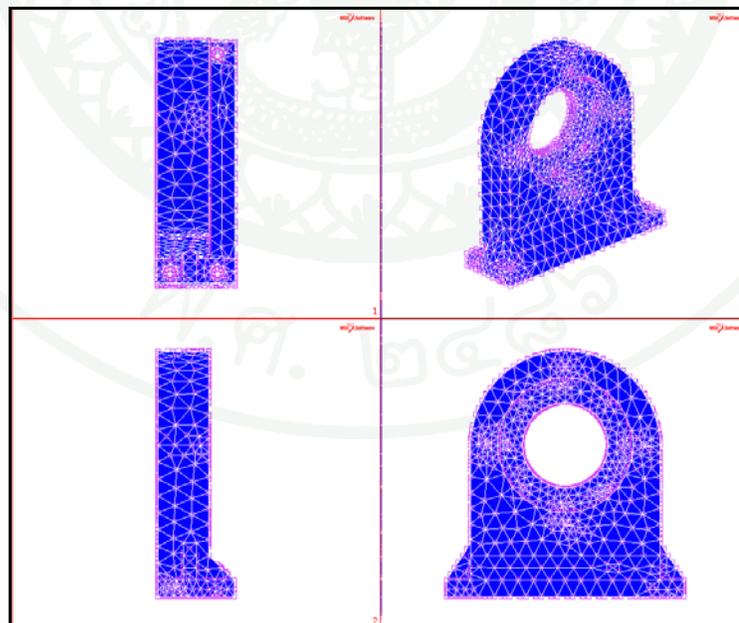
ภาพที่ 22 รูปร่างและขนาด Connector Flange ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบ หมุน 2 แกน



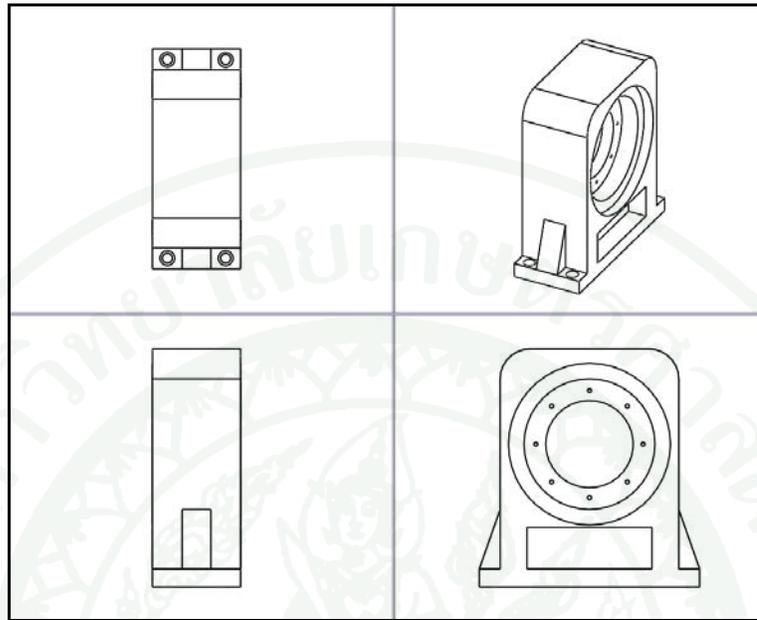
ภาพที่ 23 รูปร่างและขนาด Connector Flange ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



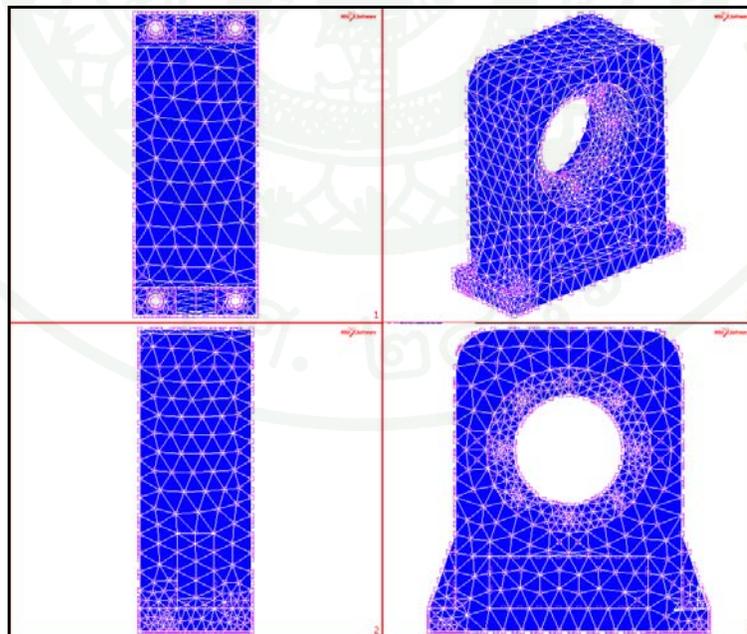
ภาพที่ 24 รูปร่างและขนาด Right Support ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



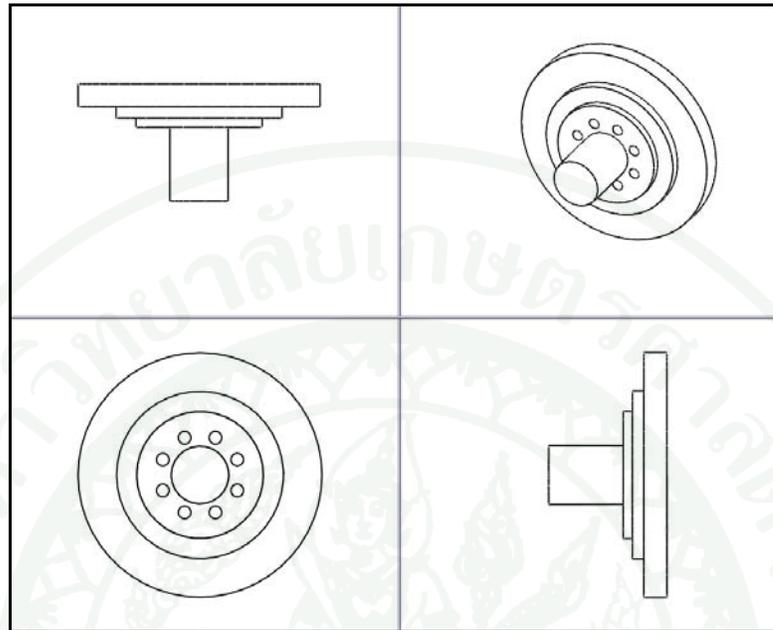
ภาพที่ 25 รูปร่างและขนาด Right Support ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



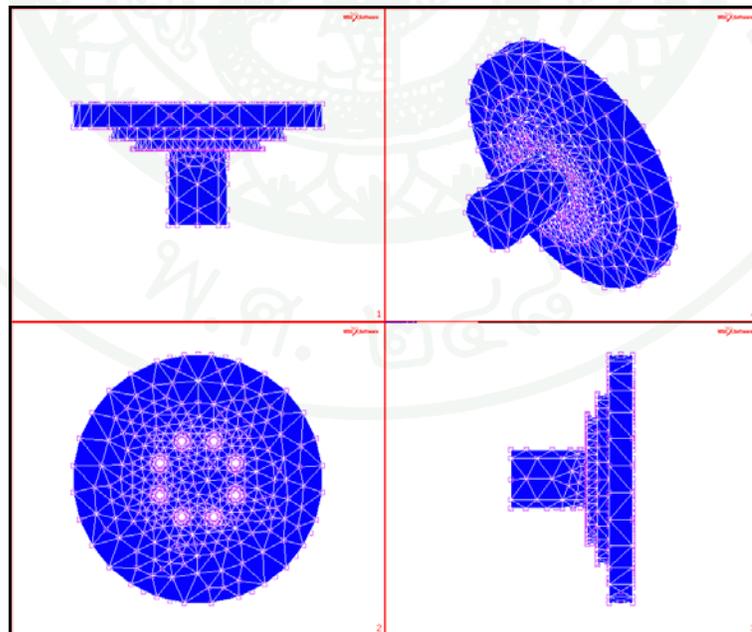
ภาพที่ 26 รูปร่างและขนาด Left Support ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



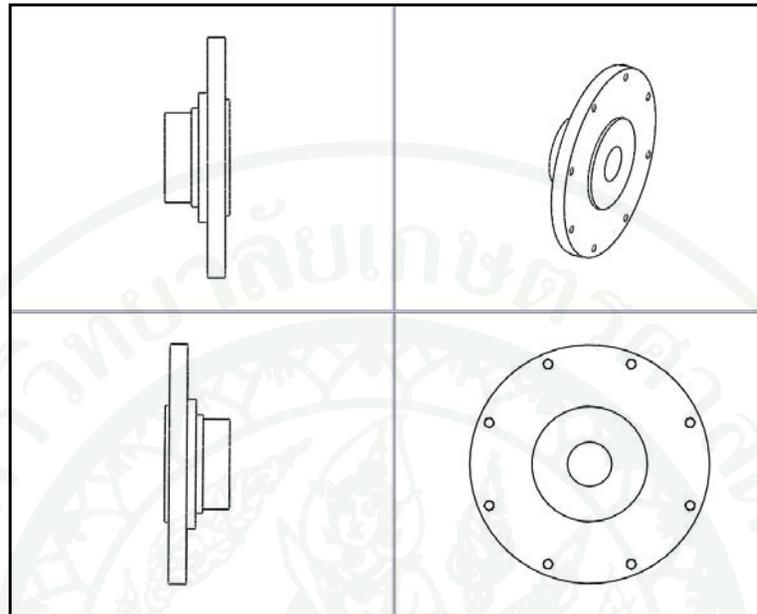
ภาพที่ 27 รูปร่างและขนาด Left Support ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



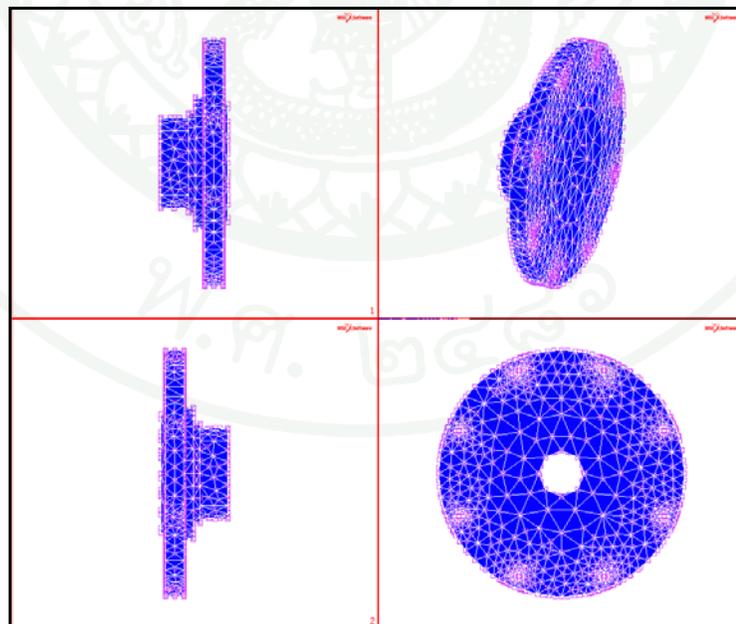
ภาพที่ 28 รูปร่างและขนาด Adapter Shaft A-Axis ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



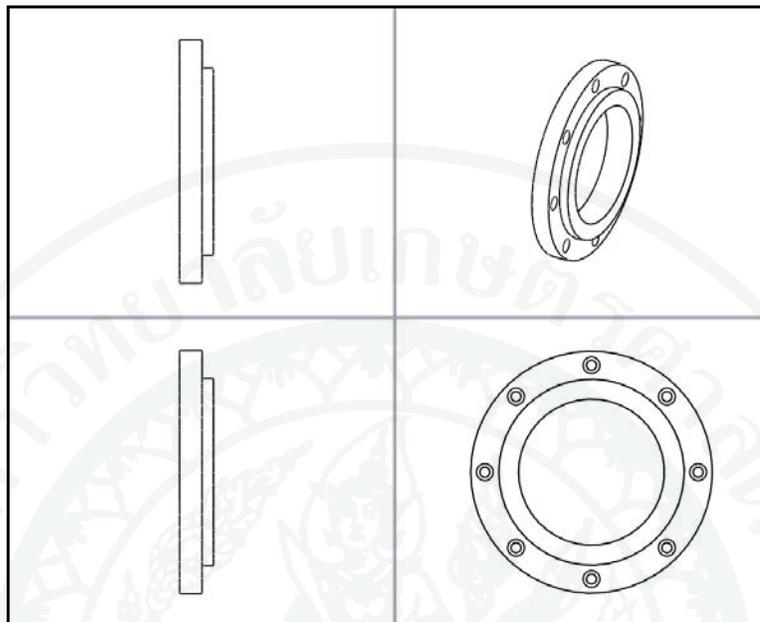
ภาพที่ 29 รูปร่างและขนาด Adapter Shaft A-Axis ของแบบจำลองไฟไนต์อิเลเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



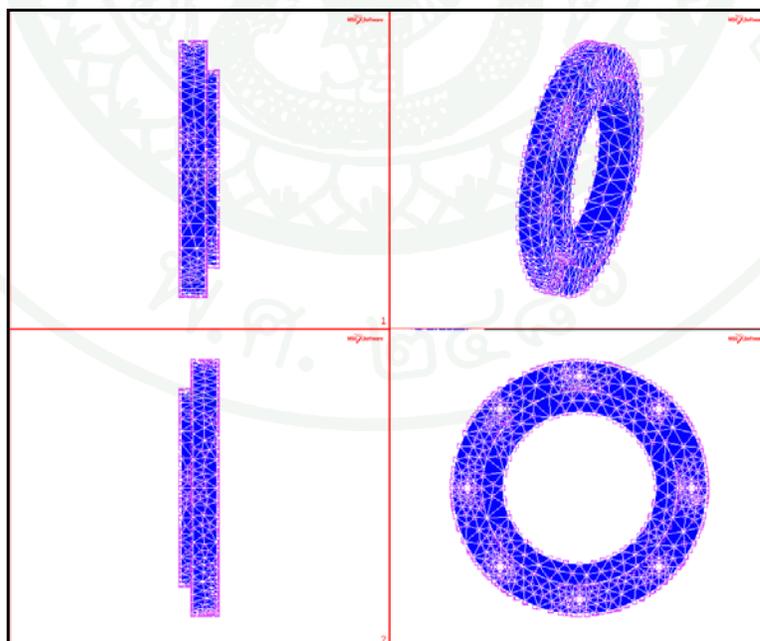
ภาพที่ 30 รูปร่างและขนาด Adapter Shaft ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



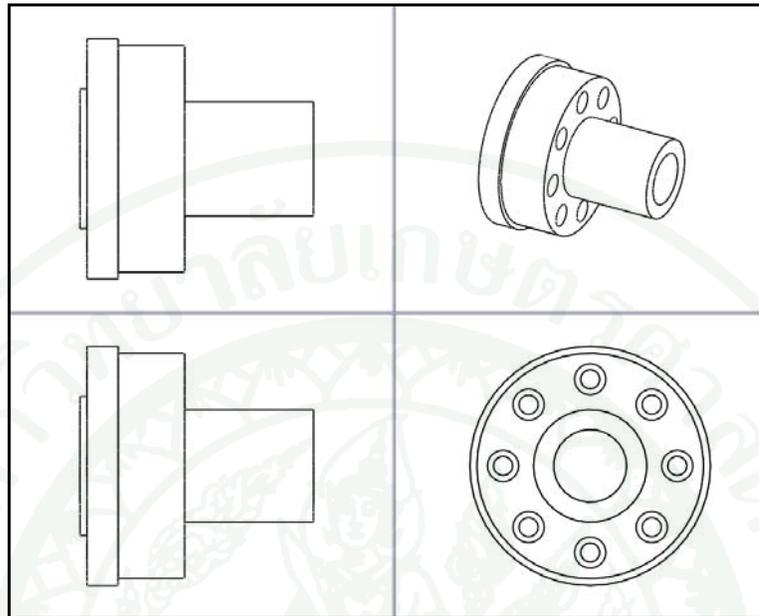
ภาพที่ 31 รูปร่างและขนาด Adapter Shaft ของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



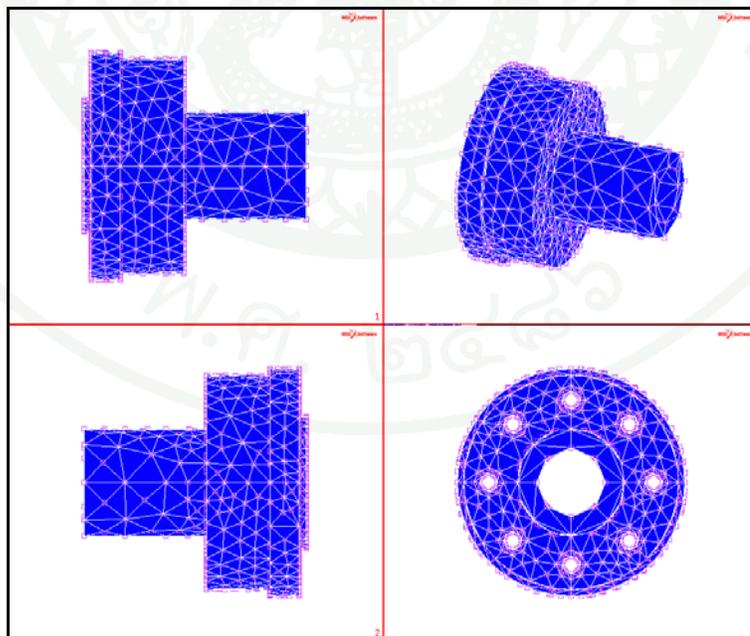
ภาพที่ 32 รูปร่างและขนาด Interface ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุด โต้ะกั้ดซึ้่นงานแบบหมุน 2 แกน



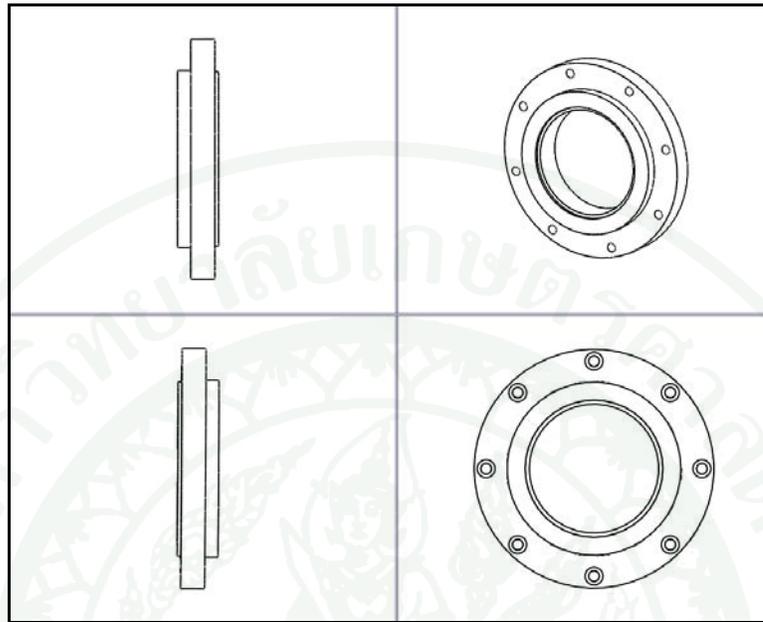
ภาพที่ 33 รูปร่างและขนาด Interface ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุด โต้ะกั้ดซึ้่นงานแบบหมุน 2 แกน



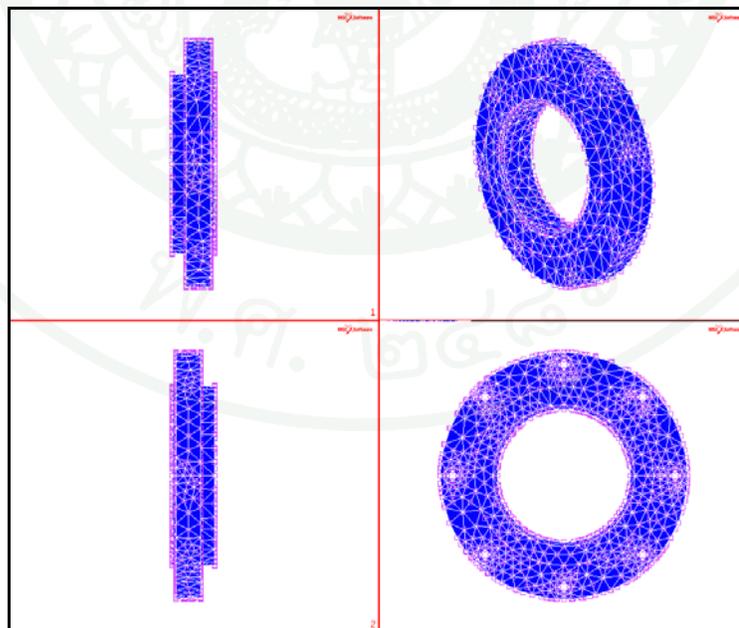
ภาพที่ 34 รูปร่างและขนาด Shaft A-Axis ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



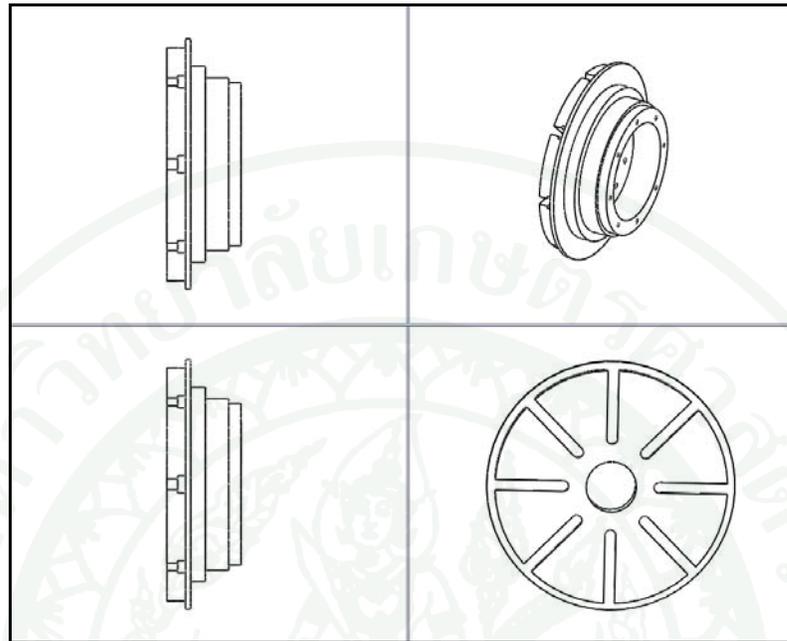
ภาพที่ 35 รูปร่างและขนาด Shaft A-Axis ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



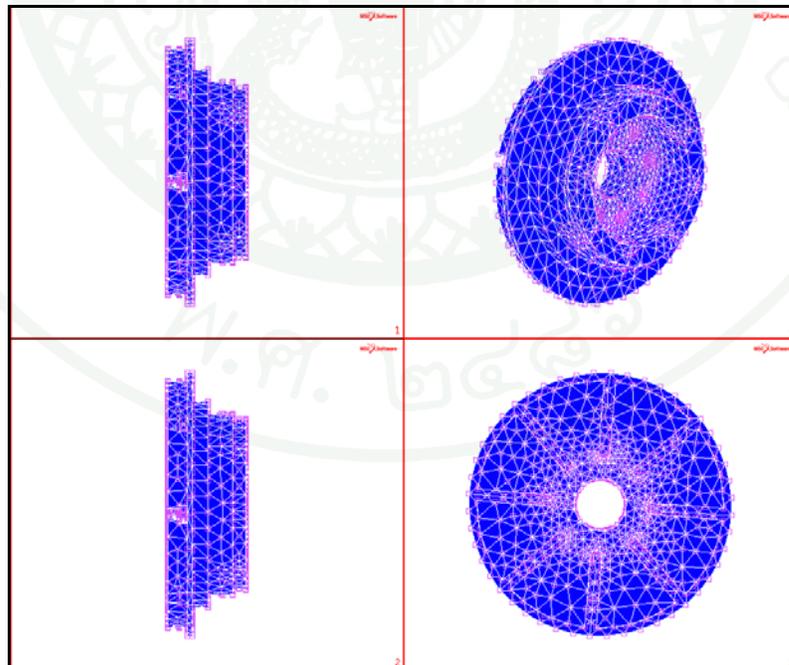
ภาพที่ 36 รูปร่างและขนาด Flange A-Axis ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโตะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แขน



ภาพที่ 37 รูปร่างและขนาด Flange A-Axis ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโตะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แขน



ภาพที่ 38 รูปร่างและขนาด Table ของแบบจำลองชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน



ภาพที่ 39 รูปร่างและขนาด Table ของแบบจำลองไฟไนต์อิเลเมนต์ชิ้นส่วนของชุดโต๊ะกักชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ

ประเภทวัสดุ ของ	คุณสมบัติทางกลของวัสดุ		
	ความหนาแน่น	โมดูลัสความยืดหยุ่น	อัตราส่วนปัว
	(Density) $\rho$ (lb/in <sup>3</sup> )	(Modulus of Elasticity) E(ksi)	$\nu$
S45C	0.284	29700	0.29
FC30	0.0520	1200	0.28

ที่มา: Harvey American Society for Metals (1982)

ISOTROPIC PROPERTIES		
YOUNG'S MODULUS	1.2e+006	TABLE
POISSON'S RATIO	0.28	TABLE
MASS DENSITY	0.052	

ภาพที่ 40 กำหนดคุณสมบัติทางกลของวัสดุ FC30

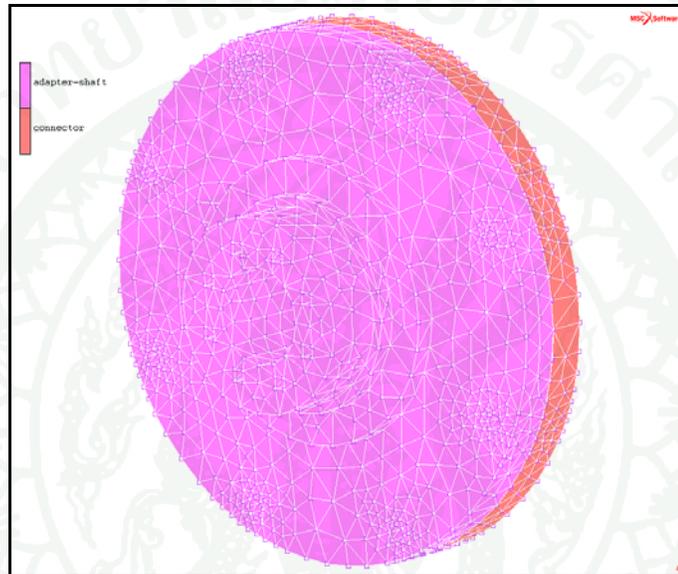
ISOTROPIC PROPERTIES		
YOUNG'S MODULUS	2.97e+007	TABLE
POISSON'S RATIO	0.29	TABLE
MASS DENSITY	0.284	

ภาพที่ 41 กำหนดคุณสมบัติทางกลของวัสดุ S45C

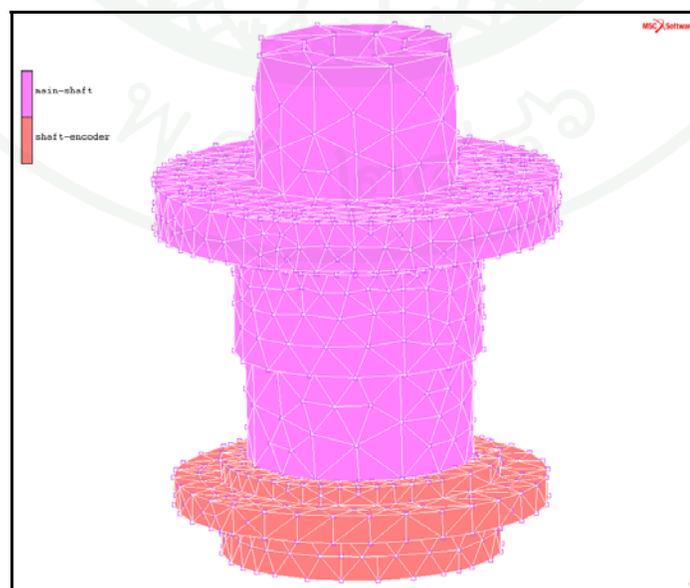
## 2.5 การกำหนดค่าสัมพัทธ์ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

การกำหนดค่าการสัมผัสให้กับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความจำเป็น เนื่องจากชุดโตะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนเกิดการประกอประกอขึ้นของชิ้นส่วนทางกลหลายชิ้นประกอประกอ

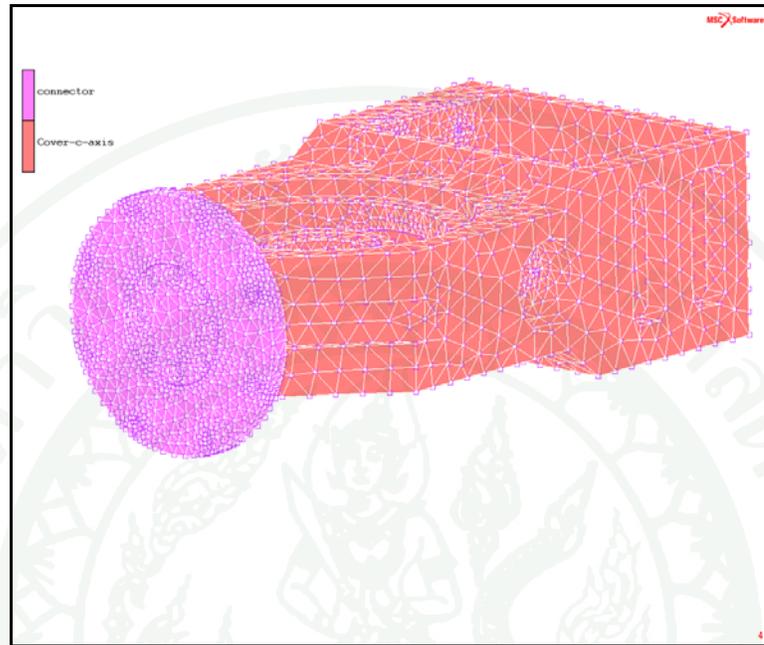
ดังนั้นจึงต้องกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสให้กับชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ให้สอดคล้องกับแบบจำลองความเป็นจริงที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งชิ้นงานแต่ละชิ้นที่สัมผัสกันแบบยึดติดกันด้วยสกรู ดังแสดงในภาพที่ 42-44 และภาคผนวก ก จะกำหนดให้มีการสัมผัสแบบยึดติดกัน (Glued Contact) ซึ่งเป็นฟังก์ชันภายในจากโปรแกรม Marc Mentat ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 42 เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 43 เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์



ภาพที่ 44 เงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

Marc Mentat Contact Table Properties

CONTACT TABLE PROPERTIES				SECOND														
				1-15					16-30									
FIRST		BODY NAME	BODY TYPE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		table0.8	deformable															
1-15	2	right_support	deformable															
16-30	3	left_support	deformable															
	4	adapter-shaft-a-axis	deformable															
	5	adapter-shaft	deformable															
	6	interface	deformable															
	7	shaft-a-axis	deformable															
	8	flange-a-axis	deformable															
	9	connector	deformable															
	10	Cover-c-axis	deformable															
	11	main-shaft	deformable															
	12	shaft-encoder	deformable															
	13	supportbearing	deformable															
	14	k13713024	deformable															
	15	90120-2	deformable															

ALL ENTRIES CONTACT TYPE NO CONTACT TOUCHING GLUE  
 DETECTION METHOD DEFAULT AUTOMATIC FIRST->SECOND SECOND->FIRST DOUBLE-SIDED  
 OK

### ภาพที่ 45 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

#### 2.6 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ต้องสอดคล้องกับความเป็นจริงของการทดลอง โดยพิจารณาที่โต๊ะชุดกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน จะต้องมีการเนื่องมาจากการเกาะมากระทำที่พิกัด  $x = 114$  มิลลิเมตร  $y = 0$  มิลลิเมตร และ  $z = 59.5$  มิลลิเมตร ของชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 46-48 โดยที่กราฟในภาพที่ 47 เป็นกราฟที่นำมาจากผลการทดสอบการเกาะบนชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน แล้วจึงกำหนดค่าจากกราฟลงในโปรแกรม MSC Marc ในทิศแกน Y ซึ่งเป็นทิศตั้งฉากกับผิวของโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 1 แกน ในส่วนของฐานที่รองรับภาระโหลดทั้งสองด้านจะถูกยึดไม่ให้เคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z ดังแสดงในภาพที่ 49

POINT LOAD

METHOD

◆ ENTERED VALUES

◆ USER SUB. FORCDT

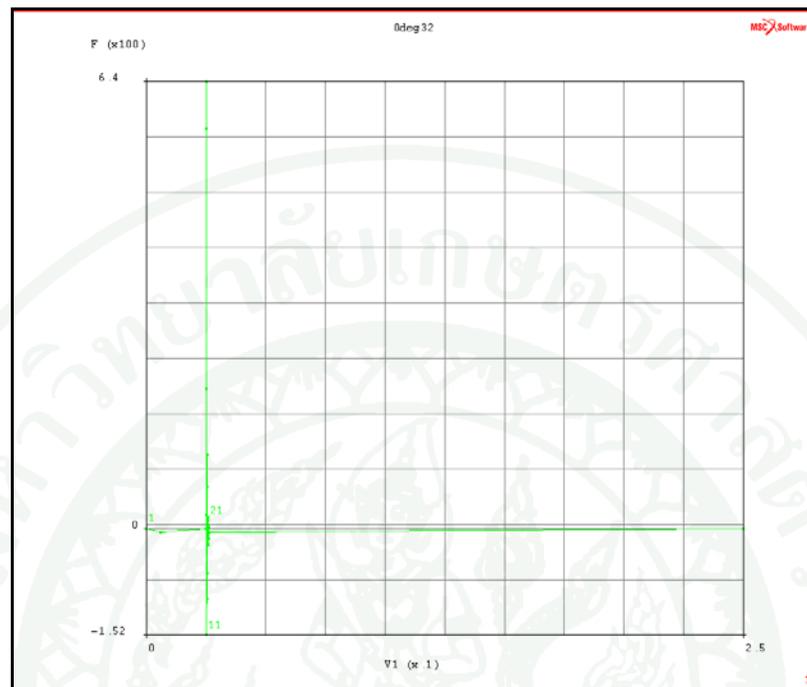
☐ FOLLOWER FORCE

☐ FORCE X			
◆ FORCE Y	-0.224	TABLE	0deg32
☐ FORCE Z			
☐ MOMENT X			
☐ MOMENT Y			
☐ MOMENT Z			

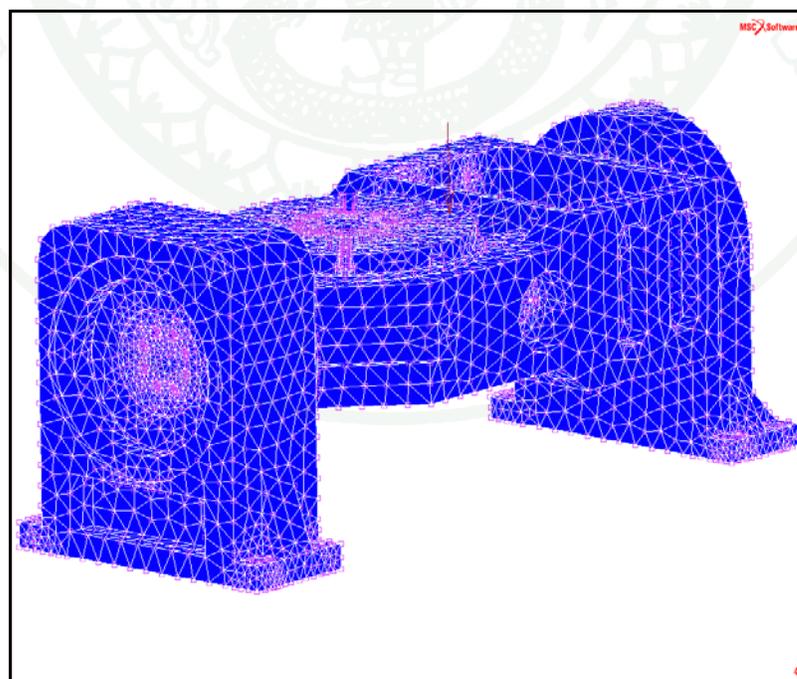
CLEAR

OK

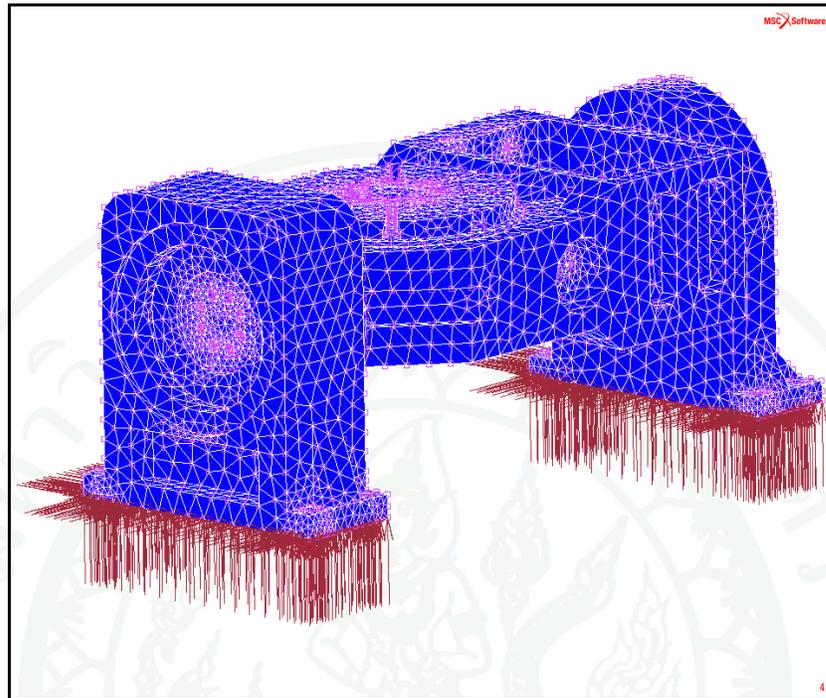
### ภาพที่ 46 กำหนดเงื่อนไขการเกาะของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์



ภาพที่ 47 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำบนชุดโต๊ะกัดขึ้นงานแบบหมุน 2 แกน และเวลา



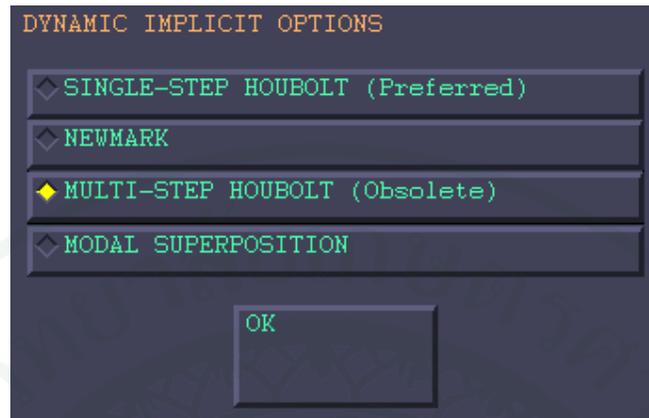
ภาพที่ 48 เส้นใยขอบเขตในการเคาะของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์



ภาพที่ 49 เงื่อนไขขอบเขตในการยึดของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

## 2.7 การวิเคราะห์แบบไดนามิกทรานเซียน ( Dynamic Transient Analysis)

การวิเคราะห์แบบไดนามิกทรานเซียนเป็นวิธีใช้หาคำตอบของสมการการเคลื่อนที่ของระบบทางโครงสร้างซึ่งภายในโปรแกรม MSC MARC 2007r1 กำหนดให้ใช้วิธี Direct Integration Methodซึ่งมีอยู่สามทฤษฎี ในการวิเคราะห์นี้จะใช้ทฤษฎีของฮอยโบ (Houbolt method) ดังแสดงในภาพที่ 50ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับปัญหาไม่เชิงเส้น ผลกระทบที่มีผลต่อการวิเคราะห์ได้แก่ เงื่อนไขไม่เชิงเส้น (Nonlinearity Boundary) ,คุณสมบัติทางวัสดุไม่เชิงเส้น (Nonlinearity material) และรูปร่างไม่เชิงเส้น (Nonlinearity Geometric) ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างภายใต้ภาระโหลดใดๆที่ขึ้นกับเวลา สามารถแสดงผลในรูปของการเคลื่อนที่ (Displacement), ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) ที่เวลาใดๆ



ภาพที่ 50 การวิเคราะห์แบบไดนามิกทรานเซียนด้วยวิธีฮอยโบ

#### 2.8 การตรวจสอบหาตัวแทนแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์

ในการตรวจสอบแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ว่าสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมของชุดโต๊ะกักคลื่นงานแบบหมุน 2 แกน ได้อย่างแม่นยำหรือไม่ ทำโดยตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอีลิเมนต์และผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ให้มีค่าผู้เข้าสู่ผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 51 ในขั้นตอนนี้จะเลือกใช้จำนวนอีลิเมนต์ที่ให้ค่าความเร่งสูงสุดในการเข้าสู่ผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบโดยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น โครงสร้าง

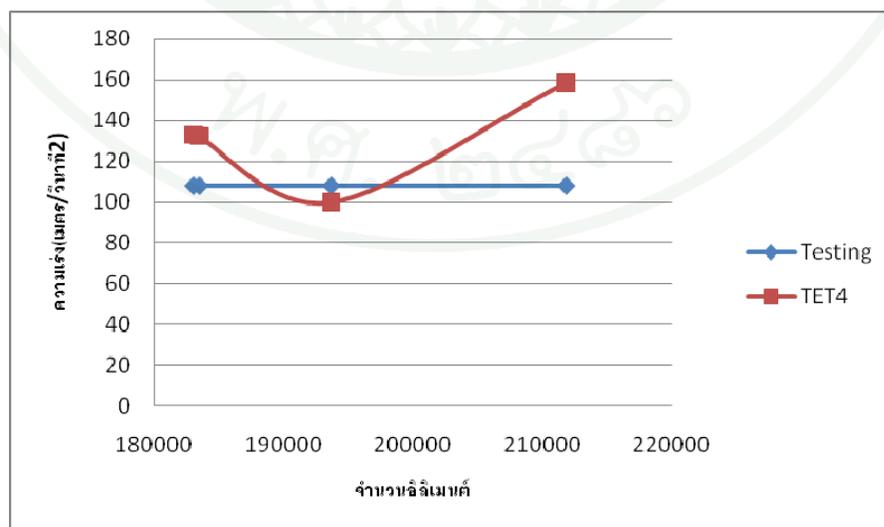
วิธีการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอีลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ทำโดยกำหนดค่า Global Edge length ของแบบจำลองตามสัญลักษณ์ชิ้นงาน A1-A13 (ภาคผนวก ก) ตามตารางที่ 2 โดยใช้รูปร่าง, ชนิดและขนาดอีลิเมนต์ในแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทุกกรณี แต่ทำการเปลี่ยนขนาดอีลิเมนต์ของโต๊ะกักคลื่นงานแบบหมุน 2 แกน จำนวนสี่กรณี ซึ่งมีขนาดรัศมี 150 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดเท่ากับชิ้นงานจริง ได้แก่ กรณีที่หนึ่งจำนวนอีลิเมนต์ของชุดโต๊ะกักคลื่นงานแบบหมุน 2 แกน 211846 อีลิเมนต์ 49107 โหนด กรณีที่สองจำนวนอีลิเมนต์ของชุดโต๊ะกักคลื่นงานแบบหมุน 2 แกน 193692 อีลิเมนต์ 45387 โหนด กรณีที่สามจำนวนอีลิ

เมนต์ ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน 183506 อติเมนต์ 43397 โหนด กรณีที่สี่  
จำนวนอติเมนต์ ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน 183036 อติเมนต์ 43259 โหนด  
จนได้ค่าที่ลู่เข้าสู่ค่าที่ได้จากการทดสอบ โดยจะพิจารณาจากค่าความเร่งเฉพาะช่วง  
ความเร่งสูงสุดเท่านั้น ขนาดอติเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์อติเมนต์กับผลตอบสนอง  
เชิงพลศาสตร์ แสดงในตารางที่ 2 จะตรงกับกรณีที่ 2

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอติเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์

กรณี	Global Edge Length	จำนวนอติเมนต์	จำนวนโหนด	ผลตอบสนองเชิง พลศาสตร์ (in/in <sup>2</sup> )
1	0.6	211846	49107	158.557
2	0.8	193692	45387	99.715
3	1.0	183506	43297	132.1765
4	1.2	183036	43259	132.8166

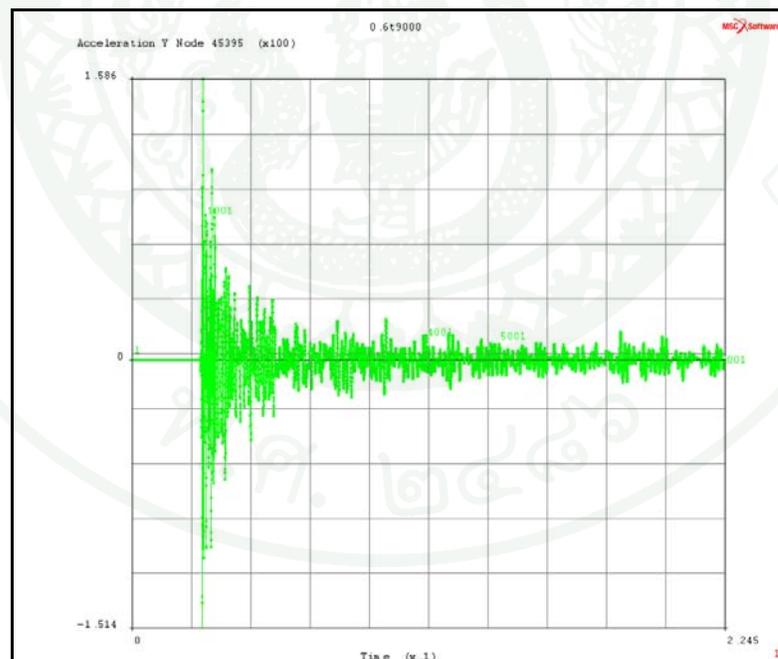
สามารถดูการกำหนดอติเมนต์ในแต่ละกรณีได้จากภาคผนวก ค



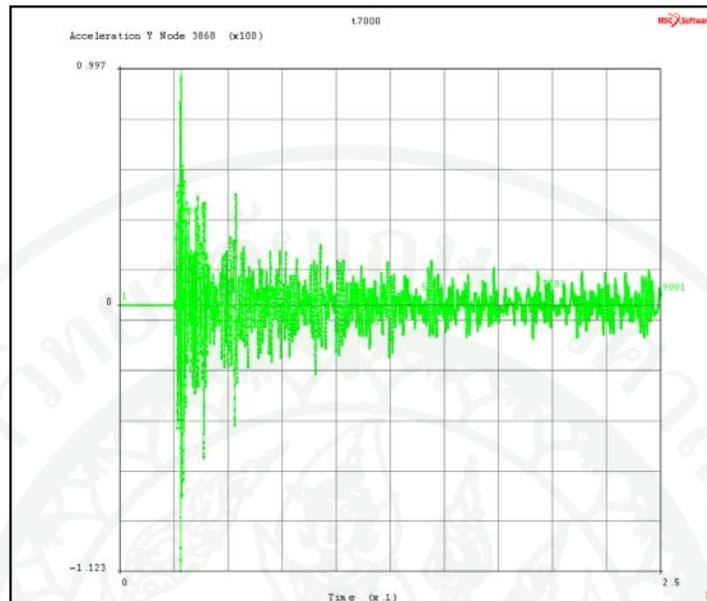
**ภาพที่ 51** การตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอีลิเมนต์ในการวิเคราะห์ไดนามิกทรานเซียนกับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์และผลการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์

## 2.9 ขั้นตอนการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์

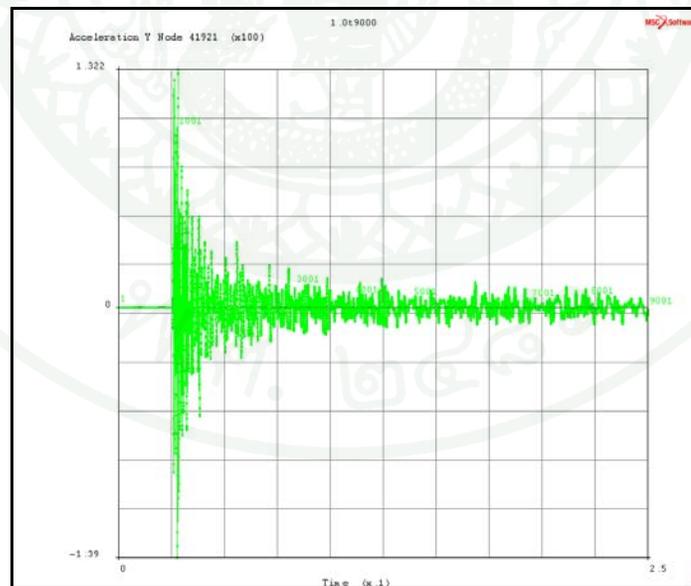
เมื่อทราบจำนวนอีลิเมนต์ของแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ที่เหมาะสมในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์แล้ว สามารถหาผลตอบสนองได้ด้วยวิธีอินทิเกรชันโดยตรง (Direct Integration method) ซึ่งในโปรแกรม MSC Marc 2007r1 ใช้วิธีของฮอยโบ (Houbolt Method) ดังภาพที่ 50 เหมือนขั้นตอนก่อนหน้า ซึ่งเหมาะสำหรับปัญหาแบบไม่เชิงเส้น โดยการแบ่งค่า Sampling time ซึ่งจะแบ่งเป็น 4 ค่า ได้แก่ sampling time ที่ 3500 ,7000,9000 และ 14000 ตามลำดับ



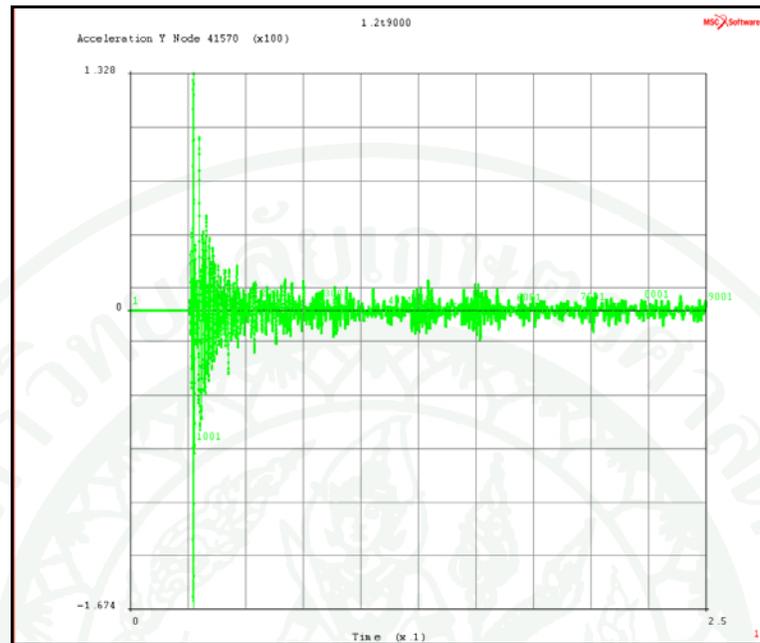
**ภาพที่ 52** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอีลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ Global Edge Length 0.6



ภาพที่ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอีลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่  
Global Edge Length 0.8



ภาพที่ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอีลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่  
Global Edge Length 1.0



ภาพที่ 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอีลิเมนต์กับผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่  
Global Edge Length 1.2

## ผลและวิจารณ์

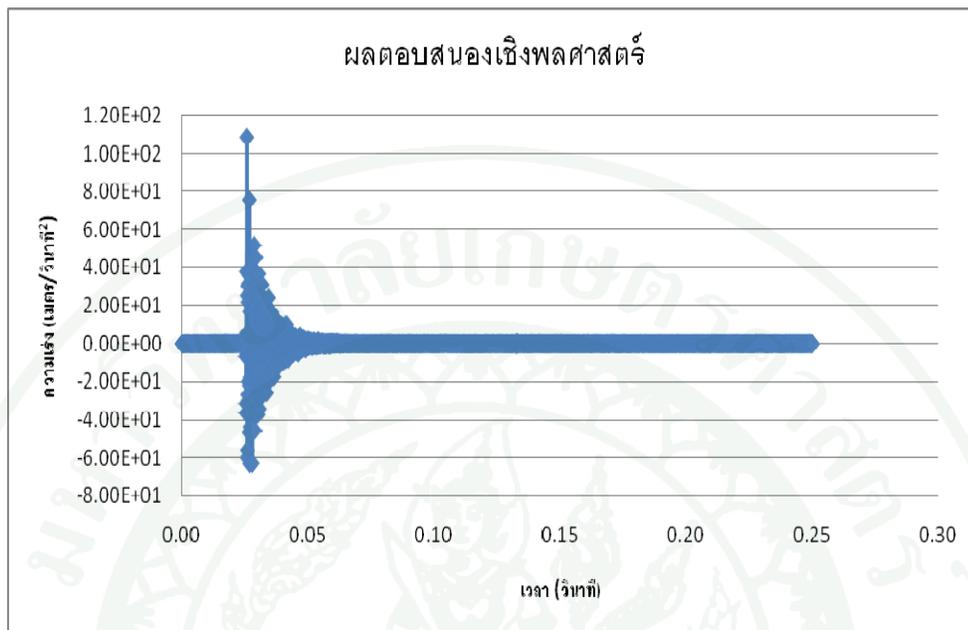
ในส่วนนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัยที่เกี่ยวกับผลการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยใช้เครื่องสร้างแรงกระตุ้น โครงสร้างกับ ไต้อะกัตของชุดไต้อะกัตชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนและการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดไต้อะกัตชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน และทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลที่ได้จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพิจารณาจากผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์สูงสุดรวมทั้งผลการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดไต้อะกัตชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ที่ทำการพิจารณาตามหลักการการออกแบบการทดลอง และผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เพื่อสรุปผลว่าแบบจำลองที่ออกแบบสามารถใช้เป็นต้นแบบในการวิเคราะห์ปัญหาด้านอื่นๆทางวิศวกรรม

### การทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ด้วยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้าง

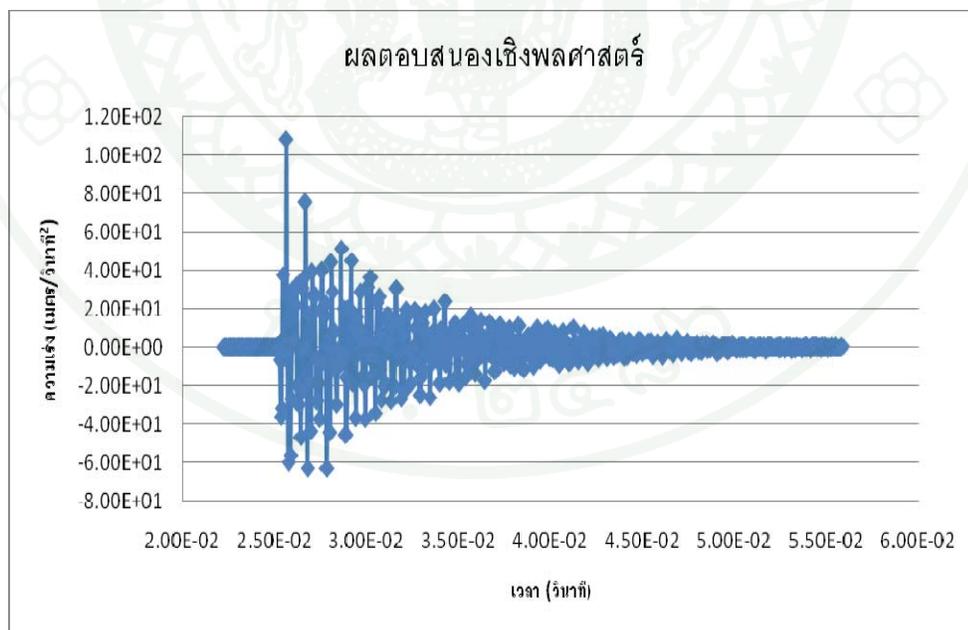
โดยการทดสอบด้วยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น โดยทำการเคาะบริเวณผิวของไต้อะกัตชิ้นงาน ซึ่งผลการเคาะจะเห็นได้ว่าแรงกระตุ้นโครงสร้างจะมีค่ามากที่สุด ณ เวลาที่อุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นกระทบกับ ไต้อะกัตชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ส่งผลให้เกิดแรงแบบอิมพัลส์ต่อโครงสร้างตำแหน่งที่เคาะสูงสุดคือ 640.139 นิวตัน ที่เวลา 0.025207 วินาที และต่ำสุดคือ 152.484 นิวตัน ที่เวลา 0.025329 วินาที และค่อยๆเข้าสู่ภาวะสมดุลดั้งเดิม ดังแสดงในภาพที่ 56 และ 57 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระตุ้นโครงสร้างบน ไต้อะกัตชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน กับ เวลา

ผลการเคาะด้วยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น โครงสร้างส่งผลให้เกิดผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์สูงสุดคือ 108.411 เมตร/วินาที<sup>2</sup> ที่เวลา 0.025634 วินาที และค่าผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ต่ำสุดคือ 63.0499 เมตร/วินาที<sup>2</sup> ที่เวลา 0.0267944 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 58 และ 59





ภาพที่ 58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสูงสุดกับเวลา

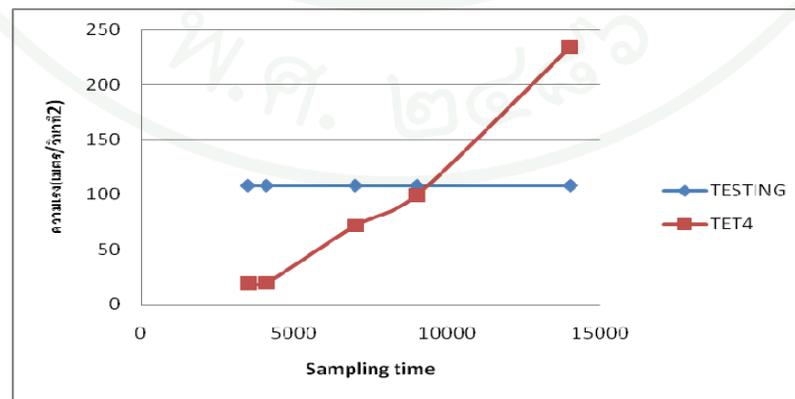


ภาพที่ 59 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งสูงสุดกับเวลา

## การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

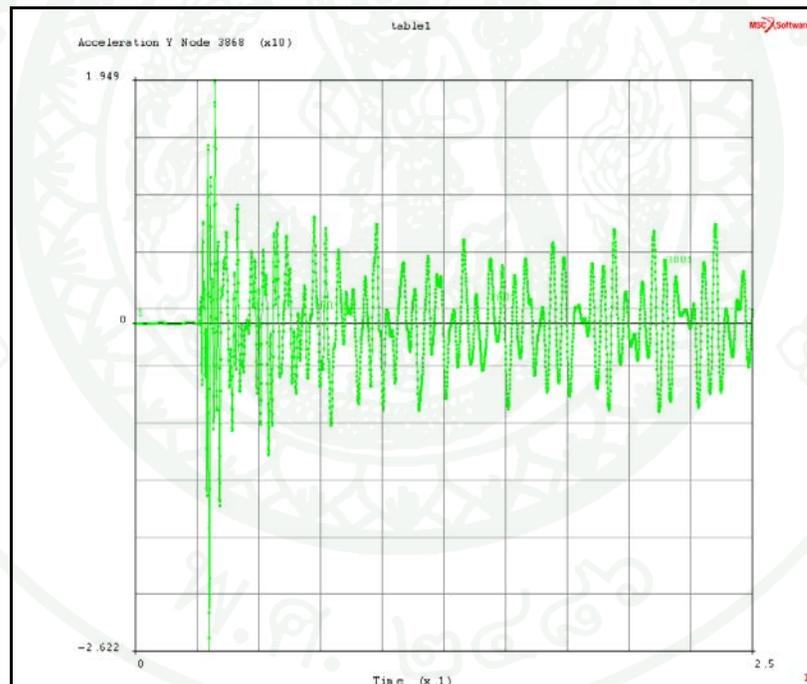
การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ผลที่ได้นั้นต้องมีความแม่นยำ ถูกต้องและใช้ทรัพยากร ในการคำนวณน้อยที่สุด เพื่อให้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์มีความแม่นยำถูกต้องและใช้ทรัพยากรในการคำนวณน้อยที่สุด จำเป็นต้องตรวจสอบจำนวนของเอลิเมนต์เพื่อให้ได้จำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการทำนายผล ซึ่งผลการวิเคราะห์หาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์แสดงในตารางที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 51 จากกราฟจะเห็นว่าผลตอบสนองจะแปรผันตามกับแรงกระตุ้น โครงสร้างคือผลตอบสนองจะค่อยๆ เข้าสู่ผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบเมื่อจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้น จนถึงจำนวนเอลิเมนต์ที่ 193692 เอลิเมนต์ จะได้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงที่สุดเมื่อเทียบกับผลตอบสนองจากการทดสอบ นั่นคือ 99.715 เมตร/วินาที<sup>2</sup> และเมื่อเพิ่มจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองเริ่มลู่ออกจากผลตอบสนองจากการทดสอบ เพราะฉะนั้นจึงใช้จำนวนเอลิเมนต์ที่ 193692 เอลิเมนต์ 45387 โหนด เป็นตัวแทนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชุดโต๊ะกักขังงานแบบหมุน 2 แกน ในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์

เมื่อได้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์แล้ว ทำการแบ่งค่า Sampling time เป็น 5 ค่า ได้แก่ sampling time ที่ 3500,4100 ,7000,9000 และ 14000 ดังแสดงในภาพที่ 60

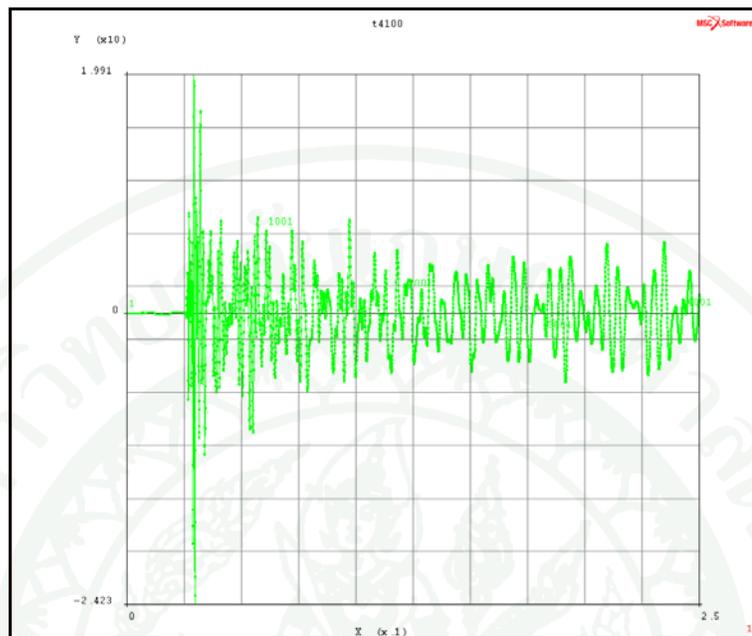


ภาพที่ 60 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์กับ Sampling time

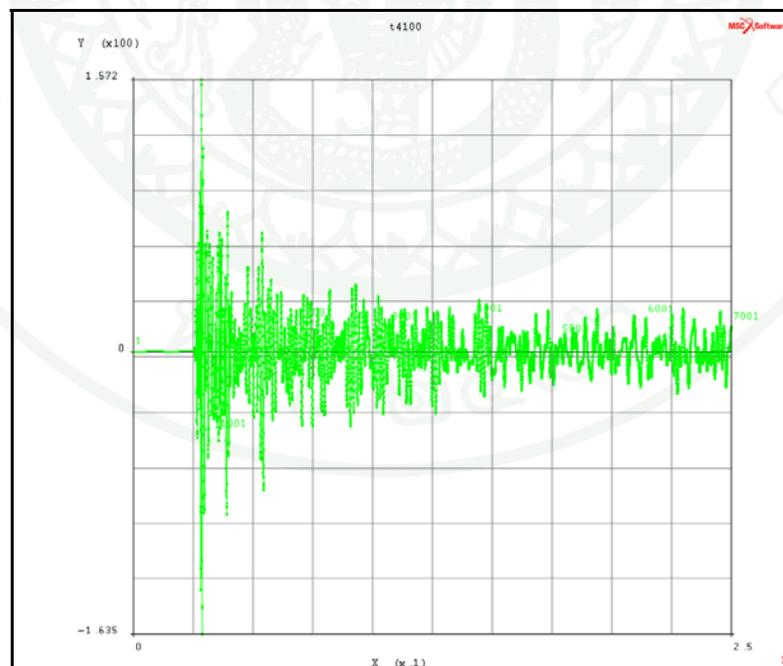
จากภาพที่ 60 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกักคลื่นงานแบบหมุน 2 แกน มีแนวโน้มเข้าสู่ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบตั้งแต่ค่า Sampling time ที่ 3500, 4100, 7000 และ 9000 โดยเมื่อถึงค่า sampling time ที่ 14000 ผลตอบสนองได้ลู่ออกห่างจากค่าผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบ โดยค่า Sampling time ที่ 9000 ให้ค่าผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์สูงสุดที่ 99.715 เมตร/วินาที<sup>2</sup> และต่ำสุดที่ 112.3 เมตร/วินาที<sup>2</sup> ซึ่งใกล้เคียงกับผลการตอบสนองที่ได้จากการทดสอบมากที่สุด โดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ 8.021 เปอร์เซ็นต์ ณ ค่าความเร่งมีค่าสูงสุด และมีค่าความผิดพลาดอยู่ 43.855 เปอร์เซ็นต์ ณ ค่าความเร่งมีค่าต่ำสุด เมื่อเทียบกับการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ด้วยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้าง ดังแสดงในภาพที่ 58 และภาพที่ 64



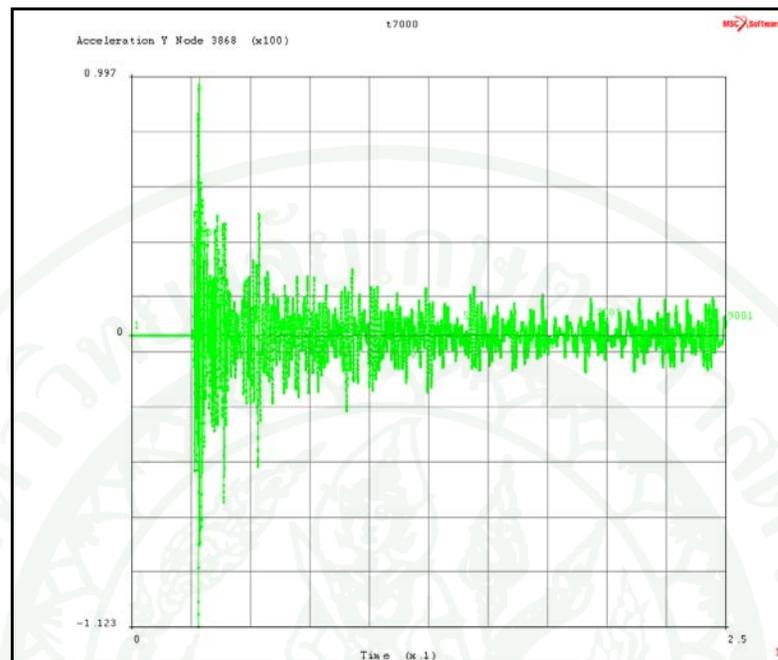
ภาพที่ 61 กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 3500



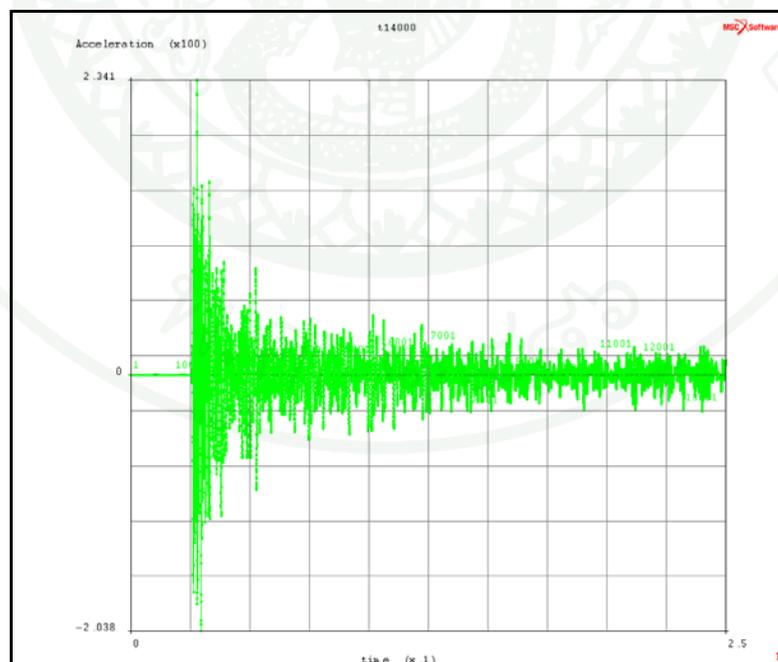
ภาพที่ 62 กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 4100



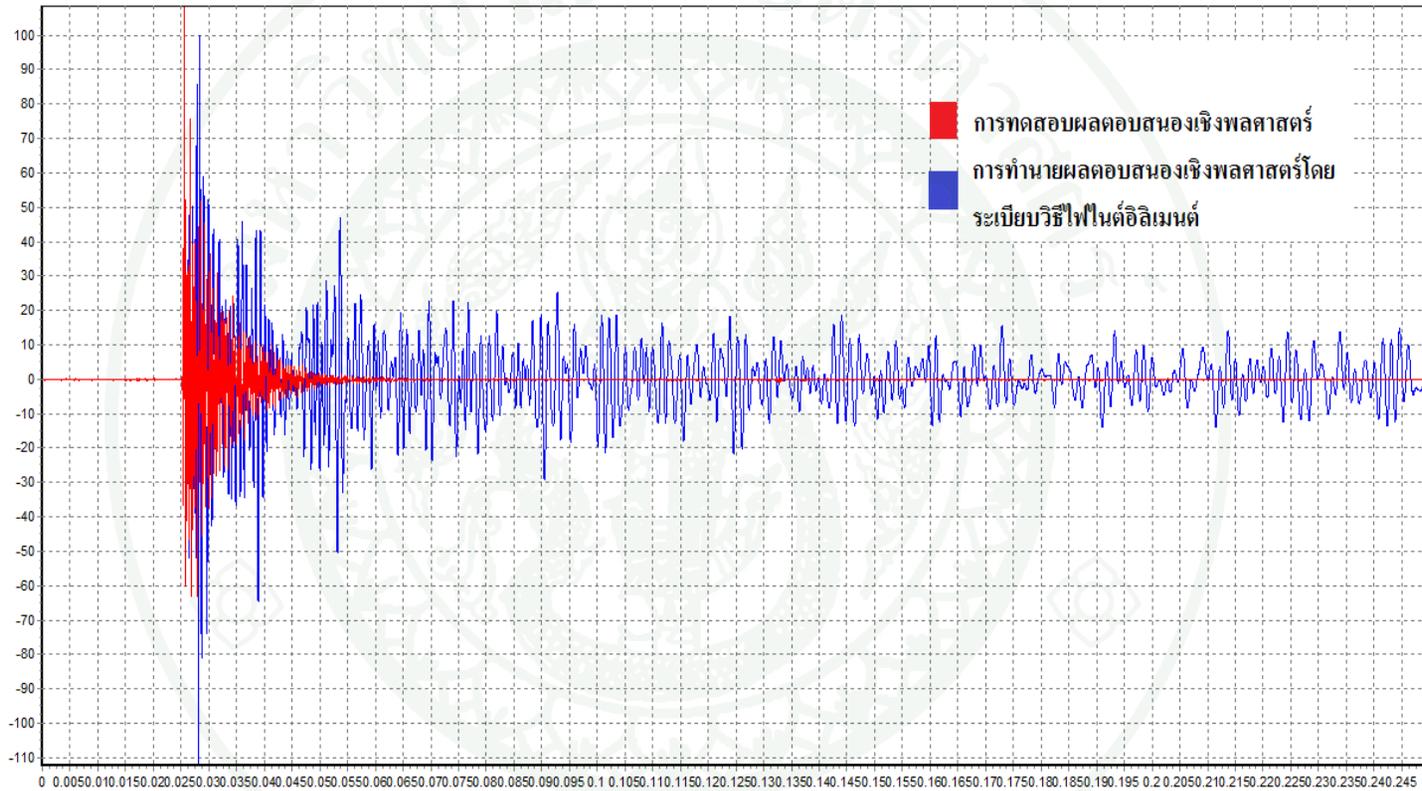
ภาพที่ 63 กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 7000



ภาพที่ 64 กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 9000



ภาพที่ 65 กราฟผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ ค่า Sampling time ที่ 14000



ภาพที่ 66 กราฟแสดงการเปรียบเทียบผลตอบสนองจากระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์และการทดสอบโดยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น โครงสร้าง

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์อิลิเมนต์ทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน เพื่อหาตัวแทนของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนที่มีความถูกต้อง ในการวิเคราะห์ปัญหาวิศวกรรมด้านอื่นๆ ของชุดโต๊ะกัดแบบหมุน 2 แกน โดยงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 แนวทาง

แนวทางแรกคือการทดสอบผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน โดยใช้อุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้น โครงสร้างร่วมกับ เซนเซอร์หัววัดความเร่งในการทดสอบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน โดยให้ค่าผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์สูงสุด 108.411 เมตร/วินาที<sup>2</sup> ที่เวลา 0.025634 วินาที และค่าผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ต่ำสุดคือ 63.0499 เมตร/วินาที<sup>2</sup> ที่เวลา 0.0267944 วินาที

แนวทางที่สองคือ การทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ โดยใช้ฟังก์ชันประมาณภายในเป็นแบบสามเหลี่ยมทรงสี่หน้าสี่เหลี่ยม โดยมีภาระโหลดมากกระทำ ณ พิกัด  $x = 114$  มิลลิเมตร  $y = 0$  มิลลิเมตร และ  $z = 59.5$  มิลลิเมตรของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ A13 ที่จำนวนอิลิเมนต์ 193692 อิลิเมนต์ และ Sampling time 9000 ให้ค่าผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์สูงสุดที่ 99.715 เมตร/วินาที<sup>2</sup> โดยมีค่าความผิดพลาด 8.021 เปอร์เซ็นต์ และผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ต่ำสุดที่ 112.3 เมตร/วินาที<sup>2</sup> มีค่าความผิดพลาดอยู่ 43.855 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับผลทดสอบด้วยอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้าง (Hammer)

### ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน มีส่วนประกอบทางกลจำนวนมากซึ่งส่งผลให้เกิดความซับซ้อนทางโครงสร้างขึ้น ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนขนาดอิลิเมนต์ส่วนประกอบทุกชิ้นได้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิลิเมนต์และผลตอบสนองทางพลศาสตร์ จึงทำการเปลี่ยนขนาดอิลิเมนต์เฉพาะ โต๊ะกัดของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ซึ่งได้รับการะโหลดโดยตรง ทำให้เกิดความผิดพลาดของแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ขึ้น
2. ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกนมีแนวโน้มความถูกต้องเพิ่มขึ้น ถ้าเลือกใช้ฟังก์ชันประมาณภายใน ที่มีอันดับสูงขึ้น แต่เวลาในการทำนายผลตอบสนองและหน่วยความจำที่ใช้เก็บข้อมูลจะมากขึ้นด้วย
3. จำนวนอิลิเมนต์ที่ให้ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์มีค่าสูงเข้าสู่ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ได้จากการทดสอบอาจมีหลายค่า ถ้าทำการเปลี่ยนค่า Sampling time ที่มากขึ้น แต่ทำให้เสียเวลาและหน่วยความจำในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่มากขึ้น
4. ผลการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ใช้ได้กับแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่านั้น ไม่สามารถเข้าร่วมกับแบบจำลองไฟไนต์อิลิเมนต์ของชุดโต๊ะกัดชิ้นงานอื่นได้ เนื่องจากปัญหาทางด้าน รูปร่าง คุณสมบัติทางวัสดุ และขอบเขตเงื่อนไขในการทำนายผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ต่างกัน

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กนต์ธร ชำนิประศาสน์. 2545. การสั่นสะเทือนทางกล. เพียร์สัน เอ็ดดูเคชัน อินโดไชน่า, กรุงเทพฯ. แปลจาก Singiresu, S.R. **Mechanical vibrations**. Pearson Education Indochaina.
- เดช พุทธเจริญทอง. 2541. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.
- ธนู นุชฉาย. 2541. การสั่นสะเทือนเชิงกล. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2550. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- อรุณ ชาญยุทธกร. 2544. การวิเคราะห์และตรวจสอบการออกแบบโครงสร้างเครื่องกลที่อยู่ภายใต้ภาระพลวัตโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- Saeed Moaveni. 2008. **Finite Element Analysis: Theory and Application with Ansys**. 3<sup>rd</sup> edition. Minnesota State University, Mankato.
- Brian Barkley Graham. 2000. **Using an Accelerometer Sensor to Measure Human Hand Motion**. Electrical Engineering and Computer Science Thesis, Massachusetts Institute of Technology
- Bathe, K. J. and G. Noh. 2012. Insight into an implicit time integration scheme for structural dynamics. **Computers & Structures** 98–99(0): 1-6.
- Bathe, K. J. and M. M. I. Baig. 2005. On a composite implicit time integration procedure for

- nonlinear dynamics. **Computers & Structures** 83(31–32): 2513-2524.
- Bathe, K. J. and S. Mijailovich. 1988. Finite Element Analysis of Frictional Contact Problems. **Theoretical and Applied Mechanics** 7( 33-45): 31-45
- Chung, J. and G. M. Hulbert. 1994. A family of single-step Houbolt time integration algorithms for structural dynamics. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering** 118(1–2): 1-11.
- Experimental Basic Finite Element Analysis.** 2007. MSC. Software Corporation, n. p.
- Experimental Implicit Nonlinear Analysis.** 2008. Software Corporation, n. p.
- Ibrahim, H. G and A. Erklig. 2005. The efficiency of direct integration methods in elastic Contact impact Problem. **Acta Mech Sinica** 21: 395–401
- Joe, R. T. and J. A. Stricklin. 1979. **Numerical method of integration in the nonlineardynamic analysis of shell or revolution.** Research Associate, Texas A&M University.
- Park, S. A. and J. S. Choi. 2011. Dynamic Characteristics for Traditional Wooden Structure in Korea by Using Impact Hammer Test. **Procedia Engineering** 14(0): 477-484.
- Payen, D. J. and K.-J. Bathe. 2011. Improved stresses for the 4-node tetrahedral element. **Computers & Structures** 89(13–14): 1265-1273.
- Singiresu, S. R. 1990. **Mechanical Vibrations.** 2<sup>st</sup> edition. Addison-Wesley, USA.



ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 รายละเอียดแบบจำลองสามมิติของชุด โต้ะกั๊ดชิ้นงานแบบหมุน 2 แกน

ชื่อ	สัญลักษณ์
Support bearing	A1
Shaft Encoder	A2
Main Shaft	A3
Cover C-axis	A4
Connector Flange	A5
Right Support	A6
Left Support	A7
Adapter Shaft A-axis	A8
Adapter Shaft	A9
Interface	A10
Shaft A-axis	A11
Flange A-axis	A12
Table	A13
Needle bearing k13713024	A14
Thrust bearing 90120	A15
Roller bearing 7325	A16
Roller bearing 4914	A17
Thrust bearing 110145	A18
Needle bearing k10010830	A19

ตารางผนวกที่ ก2 ความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงานแบบยึดติดกัน (Glue Contact)

สัญลักษณ์ชิ้นงาน	ชื่อชิ้นงาน	ความสัมพันธ์แบบยึดติดกัน ระหว่างชิ้นงาน
A1	Support bearing	A4,A15,A16

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สัญลักษณ์ชิ้นงาน	ชื่อชิ้นงาน	ความสัมพันธ์แบบยึดติดกัน ระหว่างชิ้นงาน
A2	Shaft Encoder	A3,A15
A3	Main Shaft	A2,A13, A15,A16,A17
A4	Cover C-axis	A5,A11,A16,A17
A5	Connector Flange	A4,A9
A6	Right Support	A10,A14
A7	Left Support	A12
A8	Adapter Shaft A-axis	A9,A18
A9	Adapter Shaft	A5,A8,A18,A19
A10	Interface	A6
A11	Shaft A-axis	A4A,14
A12	Flange A-axis	A7,A18,A19
A13	Table	A3
A14	Needle bearing k13713024	A7,A11
A15	Thrust bearing 90120	A1,A2,A3,A4,
A16	Roller bearing 7325	A1,A3,A4
A17	Roller bearing 4914	A3,A4
A18	Thrust bearing 110145	A8,A9,A12
A19	Needle bearing k10010830	A8,A12



ตารางผนวกที่ ข1 ค่ากำหนดเฉพาะของเซนเซอร์หัววัดความเร่ง

หน่วย		
Dynamic Characteristics		
Voltage Sensitivity (@160Hz)	mV/ms <sup>-2</sup>	10+12/-8%
	(mV/g)	(100±10%)
Measuring Range (±pk)	mV/ms <sup>-2</sup>	490(50)
Frequency Response	See typical amplitude response	
Mounted Resonance Frequency	kHz	32
Amplitude Response ±10%(typical)	Hz	1 to 10000
Residual Noise	mg	0.2
Transverse Sensitivity	หน่วย %	<5
Electrical Characteristics		
Output Impedance (typical)	□	100
DC Output :at room temperature	V	12±1
Bias Voltage In specified temp range	V	8 to 16
Power Supply	mA	2 to 20
Start-up Time	s	1
Grounding	Insulated base	
Environmental Characteristics		
Temperature Range	°C	-51 to +121
	°F	-60 to +250
Humidity	Hermetically	
Max. Operational Shock (peak)	g pk	5000
Base Strain Sensitivity	Equiv. g/μ strain	0.003

### ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Environmental Characteristics		
Thermal Sensitivity	Equiv. %/°C(%/°F)	0.35(0.19)
Thermal Shock Sensitivity	g/°C	0.04
Physical Characteristics		
Dimensions		See outline drawing
Weight		0.87(0.3)
Case Material	gram(oz.)	Titanium
Connector		10-32 UNF
Mounting		10-32 UNF threaded hole
Mounting Torque	Nm(lb.in.)	1.7(15)

### ตารางผนวกที่ ข2 ค่ากำหนดเฉพาะของอุปกรณ์สร้างแรงกระตุ้นโครงสร้าง

โมเดล 2302	หน่วย	
Range,full scale	lbf(N)	50(220)
Sensitivity,typical	mV/lbf(mV/N)	100(22.7)
Maximum Force,typical	lf(N)	1000(4448)
Resonance Frequency	kHz	50
Frequency Range,max	kHz	8
Head Mass	grams	100
Head Diameter	inches(mm)	0.75(19)
โมเดล 2302	หน่วย	
Impact tip Diameter	inches(mm)	0.25(6.4)
DC output Bias	Vdc	9 to 10
Output Impedance	Ohms	<100
Full Scale output	V	±5
Supply Voltage	Vdc	18 to 24
Supply Current	mA	2 to 10

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

โมเดล 2302	หน่วย	
Temperature Range	°F(°C)	-67 to 257 (-55 to 125)
Overall Length	in(mm)	8.76 (223)
Sensor Material		17-4 PH Stainless Steel
Handle Material		Fiberglass with rubber grip
Connector		BNC



**ภาคผนวก ค**

ตารางแสดงการกำหนดขนาดอิเลเมนต์ในแต่ละกรณี

ตารางผนวกที่ ค1 กำหนดค่า Global Edge Length กรณีความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอติเมนต์กับ  
ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ 1

สัญลักษณ์แบบจำลอง	Global Edge Length	0.6	1.0
A1			o
A2			o
A3			o
A4			o
A5			o
A6			o
A7			o
A8			o
A9			o
A10			o
A11			o
A12			o
A13		o	

ตารางผนวกที่ ค2 กำหนดค่า Global Edge Length กรณีความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิติเมนต์กับ  
ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ 2

	Global Edge Length	
สัญลักษณ์แบบจำลอง	0.8	1.0
A1		o
A2		o
A3		o
A4		o
A5		o
A6		o
A7		o
A8		o
A9		o
A10		o
A11		o
A12		o
A13	o	

ตารางผนวกที่ ๓ กำหนดค่า Global Edge Length กรณีความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิติเมนต์กับ  
ผลตอบสนองเชิงพลศาสตร์ที่ 3

Global Edge Length	
สัญลักษณ์แบบจำลอง	
A1	o
A2	o
A3	o
A4	o
A5	o
A6	o
A7	o
A8	o
A9	o
A10	o
A11	o
A12	o
A13	o

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นายชัชวาล โรจนประทีป
วัน เดือน ปี ที่เกิด	21 มกราคม 2529
สถานที่เกิด	จังหวัด กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ.(วิศวกรรมเครื่องกล) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-