

อุปกรณ์ตรวจจู้แรงสามแกนชนิดสเตรนเกจสำหรับเครื่องกัด



นางสาวพรพรม บุญพรม

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2219-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A THREE-COMPONENT STRAIN GAGE TYPED FORCE SENSOR FOR MILLING MACHINES



Miss Pornporm Boonporm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2219-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์ตรวจรู้แรงสามแกนชนิดสเตรโนเกจ สำหรับเครื่องกัด
โดย	นางสาวพรพรม บุญพรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ)

พรพรม บุญพรม : อุปกรณ์ตรวจรู้แรงสามแกนชนิดสเตรนเกจสำหรับเครื่องกัด. (A THREE-COMPONENT STRAIN GAGE TYPED FORCE SENSOR FOR MILLING MACHINES) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทรเจริญ , 101 หน้า. ISBN 974-17-2219-2.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรงสามแกนชนิดสเตรนเกจสำหรับวัดแรงกัด 3 ทิศทาง ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้ได้พิจารณาแยกออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนโครงสร้างและหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณสเตรนเกจ ส่วนปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ และส่วนรูปแบบของการแสดงผล ในส่วนของการออกแบบโครงสร้างนั้นได้ทำการออกแบบโครงสร้างที่รับแรง โดยมีลักษณะพิเศษเพื่อให้แรงหลักที่มากระทำกับตัวสเตรนเกจเป็นเฉพาะแรงตัดของคาน การออกแบบโครงสร้างได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสม โดยคำนึงค่าความถี่ธรรมชาติ การเสียรูป และความแข็งแรงของโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง พร้อมทั้งหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการติดตั้งตัวสเตรนเกจสำหรับส่วนปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณในส่วนที่สองนั้นได้ใช้เครื่องเฮซพี 3852A ในการเก็บข้อมูลความเครียดในรูปแบบของความต่างศักย์ไฟฟ้าจากวงจรฮาล์ฟบริดจ์ ผ่านทางโวลต์มิเตอร์ความเร็วสูงและไดนามิกสเตรนเกจเพดัลติเพิลิกเซอร์ ค่าที่อ่านได้จะส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ โดยใช้โปรแกรมเฮซพีวี ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ช่วยในการปรับปรุงสัญญาณ การแสดงผล และการเก็บข้อมูลในรูปแบบที่สามารถนำไปวิเคราะห์ทางด้านอื่นต่อไป

งานวิจัยยังไม่ได้สร้างอุปกรณ์ทดสอบมาตรฐานที่ใช้สำหรับการสอบเทียบซึ่งจะเป็นระยะถัดไป ดังนั้นในขั้นตอนแรกหรือระยะแรกนี้จะใช้การเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิสท์เลอร์ รุ่น 9255B เพื่อดูแนวโน้มของแรงตัดที่เกิดขึ้น และแสดงวิธีการหาเมตริกซ์สอบเทียบ โดยพยายามวัดแรงจากการกัดที่อยู่ในสถานะอยู่ตัวหรือความเร็วในการกัดคงที่ วัดอุปสงค์ของการเปรียบเทียบเพื่อดูแนวโน้มของสัญญาณการกัดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงคิสท์เลอร์และอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่พัฒนาขึ้น ซึ่งสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงทั้งสองนั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกัน ในขั้นตอนต่อไปจะได้ทำการสร้างอุปกรณ์ทดสอบมาตรฐานที่ใช้สำหรับการสอบเทียบเพื่อให้ค่าที่อ่านได้ถูกต้องยิ่งขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4270443121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: FORCE SENSOR / STRAIN GAGE / CUTTING FORCE / FINITE ELEMENT ANALYSIS

PORNPORN BOONPORN : A THREE-COMPONENT STRAIN GAGE TYPED FORCE SENSOR FOR MILLING MACHINES . THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, THESIS COADVISOR : ASST. PROF. RACHATIN CHANCHAREON, Ph.D., 101 pp. ISBN 974-17 -2219 -2.

The design procedure and construction of a 3-axis strain gage typed force sensor for milling application is presented in this thesis. There are 3 stages of sensor process that must be taken into account: detecting stage, signal conditioning stage and terminating readout stage. The deflection structure of this sensor, which subjected to bending moment, is the main consideration in the first stage, by using the finite element method for analyzing. The objective of the finite element analysis is to evaluate the structure deformation, and natural frequencies which will be used as the criteria for optimizing the structure of the sensor. The second stage is implemented by applying HP 3852A data acquisition and control unit to collect strain data in form of voltage from half bridge circuit via the high speed voltmeter and dynamic strain gage FET multiplexer. The reading data is sent to the computer for signal processing. The HP VEE (Hewlett Packard's Visual Engineering Environment) is used as the processing tool, this include signal processing, display and data store and retrieval.

Due to the lack of a suitable sensor test base, at this phase, the commercial force sensor, the Kistler dynamometer 9255B, is used as the comparison unit. The steady-state cutting condition by maintaining the constant feed-rate is used for the measurement. The objective of comparison is to observe the trend of the real cutting data recorded from both Kistler and the sensor developed in this research. From the experiment, both instruments behave similarly. Next phase, the sensor test based will be constructed for calibration to obtain more accurate reading data.

Department.....Mechanical Engineering..... Student's signature.....

Field of study.....Mechanical Engineering..... Advisor's signature.....

Academic year.....2002..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทรเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านได้เสียสละเวลาอันมีค่าของท่าน ให้คำแนะนำปรึกษาและให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาทุนและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย และบริษัท NSS จำกัด ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณคุณฐิตนัย ตันตวิรุฬห์ คุณพรชัย เพชรฤกษ์กุล ที่ได้ให้ความช่วยเหลือทางด้านฮาร์ดแวร์ และขอขอบคุณเพื่อนนิสิต รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งปริญญาเอก และปริญญาโท ที่ได้ร่วมเสนอข้อคิดเห็นต่างๆ และให้กำลังใจตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งท่านได้สนับสนุนการทำวิจัยในทุกๆ ด้าน ทั้งทางด้านทุนทรัพย์ และกำลังใจที่ให้แก่ผู้เขียนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. การวัดแรงและอุปกรณ์ตรวจวัดแรง.....	4
2.1 แรงตัด (Cutting force).....	4
2.2 การศึกษาเรื่องการวัดแรง.....	4
2.2.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์แรงตัดโดยใช้วิธีสร้างตัวจำลองเชิงเลข (Math model).....	5
2.2.2 การหาแรงตัดโดยใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์.....	11
2.2.3 การหาแรงตัดโดยใช้เครื่องมือวัด.....	12
2.3 การตัดเฉือนโลหะด้วยเครื่องจักรกลซีเอ็นซี.....	18
2.3.1 อิทธิพลที่มีผลต่อการตัดเฉือนโลหะ.....	18
2.3.2 ข้อมูลการตัดเฉือนโลหะสำหรับงานกัด.....	22
2.4. อุปกรณ์ตรวจรู้แรงคิสท์เลอร์ รุ่น 9255B.....	26
3. การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	31
3.1 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	31
3.1.1 ส่วนตรวจจับและเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงาน (Detection stage).....	31
3.1.3 ส่วนรูปแบบของการแสดงผล (Terminating readout stage).....	31
3.2.2 แนวแกนของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3 การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเพื่อให้รับแรงดัด	34
3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	34
3.3.1 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	34
3.3.2 การประยุกต์ใช้งานกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์.....	35
3.3.3 การวิเคราะห์แบบลิเนียร์สแตติก (Linear static analysis)	36
3.3.4 การวิเคราะห์แบบนอร์มอลโหมด (normal modes analysis)	36
3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	37
3.4.1 การเลือกชนิดของเอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์	37
3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบที่ 1.....	38
3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบที่ 2.....	40
3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบที่ 3.....	43
3.4.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างแบบต่างๆ	46
3.5 โครงสร้างจริงที่ใช้ทำอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	46
4. สเตรนเกจและวงจรวัด	49
4.1 สเตรนเกจ	49
4.2 วงจรวัด.....	51
4.2.1 แบบควอเตอร์บริดจ์ (quarter bridge).....	51
4.2.2 แบบฮาล์ฟบริดจ์ (half bridge)	52
4.2.3 แบบฟูลบริดจ์ (full bridge).....	53
4.3 การวัดความเครียดโดยใช้สเตรนเกจ	54
5. อุปกรณ์การทดลอง.....	56
5.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	56
5.2 สเตรนเกจ	56
5.3 อุปกรณ์รับข้อมูล (Data acquisition).....	56
5.3.1 อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณ เซพพี 3852A	56
5.3.2 อุปกรณ์ประกอบเครื่องเซพพี 3852A.....	57
5.3.3 การต่อเชื่อมวงจรมองจากตัวอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและอุปกรณ์รับข้อมูล	60
5.4 การโปรแกรม	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6. การโปรแกรม	62
6.1 การเขียนโปรแกรมด้วย HP VEE.....	62
6.1.1 สภาพแวดล้อมของการเขียนโปรแกรม HP VEE (HP VEE development environment)	63
6.1.2 ออปเจกต์.....	64
6.2 การโปรแกรมสำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	66
6.2.1 การใช้งานร่วมกับเครื่อง เซซพี 3852A	66
6.2.2 การออกแบบโปรแกรมสำหรับวัดค่าแรง F_x F_y และ F_z	68
6.2.3 การแสดงผลของโปรแกรม	70
7. การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	71
7.1 วิธีการสอบเทียบ	71
7.2 การเปรียบเทียบค่าในแนวแกน x y และ z.....	74
7.4 วิธีการเปรียบเทียบ	76
8. ผลการทดลอง	81
8.1 การทดลองหาแรงตัดที่เกิดจากการเจาะ	81
8.1.1 การทดลองที่ 1	81
8.1.2 การทดลองที่ 2	82
8.1.3 การทดลองที่ 3	84
8.2 การทดลองหาแรงตัดที่เกิดจากการกัด.....	85
8.2.1 การทดลองที่ 4	85
8.2.3 การทดลองที่ 6	88
8.2.4 การทดลองที่ 7	90
8.2.6 การทดลองที่ 8	91
8.3 การทดลองหาค่าคุณสมบัติทางด้านสถิติของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน z	94
8.3.1. ค่าความถูกต้อง (accuracy).....	94
8.3.2. ค่ารีพีทอะบิลิตี้ (repeatability)	95
9. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	98
9.1 สรุปผล.....	98

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
9.2 ข้อเสนอแนะ	99
รายการอ้างอิง.....	100
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	101



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 วิวัฒนาการของการวิจัยเพื่อหาตัวแบบของแรงตัด	4
ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการตัด	9
ตารางที่ 2.3 แรงกัดโดยเฉลี่ยที่ความเร็วตัด 3000 3750 และ 4500 sfm	12
ตารางที่ 2.4 ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ตรวจจูลู่วิ่งแรงคิสท์เลอร์.....	26
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ ในหน่วย SI	38
ตารางที่ 3.2 แสดงผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างที่ 1 ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	40
ตารางที่ 3.3 แสดงผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างที่ 2 ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	43
ตารางที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างที่ 3 ที่ได้จากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	45
ตารางที่ 7.1 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจจูลู่วิ่งแรง	79
ตารางที่ 8.1 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 1.....	81
ตารางที่ 8.2 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 2.....	82
ตารางที่ 8.3 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 3.....	84
ตารางที่ 8.4 เงื่อนไขการกัดในการทดลองที่ 4.....	85
ตารางที่ 8.5 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 5.....	87
ตารางที่ 8.6 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 6.....	88
ตารางที่ 8.7 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 7.....	90
ตารางที่ 8.8 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 8.....	91
ตารางที่ 8.9 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 9.....	93
ตารางที่ 8.10 ค่าความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจจูลู่วิ่งแรงในแนวแกน z	96
ตารางที่ 8.11 ค่ารีพีทอะบิลิตีของอุปกรณ์ตรวจจูลู่วิ่งแรงในแนวแกน z.....	97

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แรงตัดที่เกิดในแต่ละอินเส้นรีท.....	6
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบแรงกัดในแนวแกน x ระหว่าง (ก) การวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (ข) คำนวณโดยใช้แบบจำลองสแตติก (ค) คำนวณโดยใช้แบบจำลองทางไดนามิก.....	9
รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบแรงกัดในแนวแกน y ระหว่าง (ก) การวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (ข) คำนวณโดยใช้แบบจำลองสแตติก (ค) คำนวณโดยใช้แบบจำลองทางไดนามิก.....	10
รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบแรงกัดในแนวแกน z ระหว่าง (ก) การวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (ข) คำนวณโดยใช้แบบจำลองสแตติก (ค) คำนวณโดยใช้แบบจำลองทางไดนามิก.....	10
รูปที่ 2.5 ข้อมูลอินพุทและเอาต์พุทของโปรแกรม Third Wave AdvantEdge™	11
รูปที่ 2.6 แรงกัดที่ความเร็วตัดต่างๆกัน ที่ 3000 3750 และ 4500 sfm	12
รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงคริสเลอร์ชนิดที่วางบนโต๊ะของเครื่องกัด.....	13
รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงคริสเลอร์ชนิดติดกับบริเวณเพลงานหลัก (Spindle).....	14
รูปที่ 2.9 Double ended shear beam load ของ Omega Engineering Inc.....	14
รูปที่ 2.10 อุปกรณ์วัดแรงแบบรับแรงโดยตรง ของ Megatron Elektronik AG.....	15
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของอุปกรณ์วัดแรงแบบรับแรงโดยตรง ตามแบบที่แสดงในรูป 2.10	15
รูปที่ 2.12 อุปกรณ์วัดแรงแบบรูปตัว S ของ Megatron Elektronik AG	16
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของอุปกรณ์วัดแรงแบบรูปตัว S ตามแบบที่แสดงในรูป 2.12.....	16
รูปที่ 2.14 อุปกรณ์วัดแรง 3 แกนของ Sensor Development Inc.....	17
รูปที่ 2.15 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงยี่ห้อ ATI 6 แกน	17
รูปที่ 2.16 ขนาดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงยี่ห้อ ATI ในหน่วยนิ้ว (มิลลิเมตร)	18
รูปที่ 2.17 องค์ประกอบของการตัดเฉือนโลหะ.....	19
รูปที่ 2.18 รูปเรขาคณิตของการตัดเฉือน.....	20
รูปที่ 2.19 ความเร็วรอบ ความเร็วตัด และอัตราป้อน.....	23
รูปที่ 2.20 การกัดตาม.....	24
รูปที่ 2.21 การกัดทวน.....	24
รูปที่ 2.22 ความลึกของรอยกัด	25
รูปที่ 2.23 ความกว้างของรอยตัด.....	25
รูปที่ 2.24 อุปกรณ์ตรวจรู้แรง Kistler รุ่น 9255B.....	27
รูปที่ 2.25 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงคิสท์เลอร์ รุ่น 9255B ที่โต๊ะของเครื่องกัดซีเอ็นซี.....	28

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.26 ขนาดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามไฟฟ้าแรงดันสูงรุ่น 9255B ในหน่วยมิลลิเมตร.....	29
รูปที่ 2.27 ชาร์จแอมป์ไฟฟ้าแรงดันสูงรุ่น 2825A1-1.....	28
รูปที่ 2.28 ชาร์จแอมป์ไฟฟ้าแรงดันสูง และการต่อเชื่อมสาย.....	29
รูปที่ 2.29 ตัวอย่างแรงกักที่ได้จากการเจาะ ตามเงื่อนไขการตัดข้างบน.....	30
รูปที่ 2.30 ตัวอย่างแรงกักแบบเซาะร่อง ตามเงื่อนไขการกักข้างบน	30
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ตรวจจับสนาม.....	32
รูปที่ 3.2 ระบบพิกัดฉาก (ก) กฎมือขวา (ข) ระบบพิกัดฉากของเครื่องกัก (ค) ระบบพิกัดฉากของ อุปกรณ์ตรวจจับสนาม	33
รูปที่ 3.3 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 โหนด	37
รูปที่ 3.4 โครงสร้างแบบที่ 1.....	38
รูปที่ 3.5 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน y เมื่อใส่แรงในแนวแกน x.....	39
รูปที่ 3.6 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน z เมื่อใส่แรงในแนวแกน z.....	39
รูปที่ 3.7 ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 2330 Hz ของโครงสร้างที่ 1.....	40
รูปที่ 3.8 โครงสร้างแบบที่ 2.....	41
รูปที่ 3.9 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน y เมื่อใส่แรงในแนวแกน x.....	42
รูปที่ 3.10 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน z เมื่อใส่แรงในแนวแกน z.....	42
รูปที่ 3.11 ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 2935 Hz ของโครงสร้างที่ 2.....	43
รูปที่ 3.12 โครงสร้างแบบที่ 3.....	44
รูปที่ 3.13 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน x เมื่อใส่แรงในแนวแกน y.....	45
รูปที่ 3.14 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน z เมื่อใส่แรงในแนวแกน z.....	45
รูปที่ 3.15 ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 2800 Hz ของโครงสร้างที่ 3.....	46
รูปที่ 3.16 ภาพตัดแสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับสนาม	47
รูปที่ 3.17 ขนาดของอุปกรณ์ตรวจจับสนาม	47
รูปที่ 3.18 การวางอุปกรณ์ตรวจจับสนามบนเครื่องกักซีเอ็นซี.....	48
รูปที่ 4.1 ความเครียดในแนวแกนและความเครียดด้านข้าง.....	50
รูปที่ 4.2 (ก) การจัดวางสเตรนเกจแบบควอเตอร์บริดจ์ (ข) วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์ บริดจ์	51

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.3 (ก) การจัดวางสเตรนเกจแบบควอเตอร์บริดจ์และมีดัมมีเกจ (ข) วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์และมีดัมมีเกจ	52
รูปที่ 4.4 (ก) การจัดวางสเตรนเกจแบบฮาล์ฟบริดจ์ (ข) วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฮาล์ฟบริดจ์...	52
รูปที่ 4.5 (ก) การจัดวางสเตรนเกจแบบฟูลบริดจ์ (ข) วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์.....	53
รูปที่ 4.6 (ก) การติดสเตรนเกจบนโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (ข) วงจรฮาล์ฟบริดจ์ที่ต่อในแต่ละวงจร	54
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง.....	56
รูปที่ 5.2 เครื่องเลขพี 3852A	57
รูปที่ 5.3 เลขพี 44730A ไฮสปีดโวลมิเตอร์.....	58
รูปที่ 5.4 เลขพี 44732A วงจรบริดจ์.....	58
รูปที่ 5.5 วงจรบริดจ์ภายในเลขพี 44732A	59
รูปที่ 5.6 แผนภาพการต่อเชื่อมสายในเลขพี 44732A ในแต่ละวงจร	59
รูปที่ 5.7 การวัดศักย์ไฟฟ้าโดยเลขพี 44732A.....	60
รูปที่ 5.7 การรับข้อมูลของเครื่องเลขพี 3852A และอุปกรณ์ประกอบและส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์.....	61
รูปที่ 6.1 การโปรแกรมแบบเทกซ์ด้วยภาษาซี	63
รูป 6.2 การโปรแกรมแบบวิซวล โดยโปรแกรม HP VEE.....	63
รูปที่ 6.3 สภาวะแวดล้อมของการเขียนโปรแกรม HP VEE	64
รูปที่ 6.4 (ก) ตัวอย่างการเรียกใช้ออปเจกต์ (ข) ออปเจกต์ (ค) ไอคอน	65
รูปที่ 6.5 ชนิดของพินในออปเจกต์.....	66
รูปที่ 6.6 หน้าจอของโปรแกรมอ่านค่าแรง	67
รูปที่ 6.7 หน้าจอสำหรับตั้งค่าของแต่ละช่องสัญญาณ.....	68
รูปที่ 6.8 การทำงานของโปรแกรมวัดค่าแรง	69
รูปที่ 6.9 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมการวัดค่าแรง	70
รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณ 1-4.....	73
รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณ 5-8.....	73
รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณ 9-12.....	74
รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณ 13-16... ..	74

สารบัญญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7.5 ขั้นตอนการเปรียบเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรง	78
รูปที่ 8.1 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 1 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ที่สร้างขึ้น.....	81
รูปที่ 8.2 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 1 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ของคิสท์เลอร์	82
รูปที่ 8.3 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 2 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ที่สร้างขึ้น.....	83
รูปที่ 8.4 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 2 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ของคิสท์เลอร์	83
รูปที่ 8.5 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 3 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ที่สร้างขึ้น.....	84
รูปที่ 8.6 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 3 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ของคิสท์เลอร์	85
รูปที่ 8.7 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 4 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ สร้างขึ้น.....	86
รูปที่ 8.8 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 4 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ของคิสท์เลอร์	86
รูปที่ 8.9 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 5 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ สร้างขึ้น.....	87
รูปที่ 8.10 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 5 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ของคิสท์เลอร์	88
รูปที่ 8.11 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 6 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ที่สร้างขึ้น.....	89
รูปที่ 8.12 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 6 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ของคิสท์เลอร์	89
รูปที่ 8.13 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 7 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรง ที่สร้างขึ้น.....	90

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 8.14 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกักในการทดลองที่ 7 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิส์ท์เลอร์.....	91
รูปที่ 8.15 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 8 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้น.....	92
รูปที่ 8.16 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกักในการทดลองที่ 8 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิส์ท์เลอร์.....	92
รูปที่ 8.17 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 9 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้น.....	93
รูปที่ 8.18 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกักในการทดลองที่ 9 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิส์ท์เลอร์.....	94



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการแข่งขันกันในการผลิตผลิตภัณฑ์ของภาคอุตสาหกรรม ทำให้ความต้องการกระบวนการผลิตอัตโนมัติเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะกระบวนการผลิตที่ใช้เทคโนโลยีสมัยใหม่ซึ่งจะต้องมีความสามารถในการผลิตสูง มีความน่าเชื่อถือและมีความยืดหยุ่นในกระบวนการ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องมีเครื่องมือที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานได้ เช่นการพัฒนากระบวนการตัดโดยเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

การกัดเป็นหนึ่งในกระบวนการตัดนำเนื้อวัสดุออก ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การทำแม่พิมพ์ เป็นต้น การศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับแรงตัด (Cutting force) ในการกัดเป็นสิ่งสำคัญ เพราะแรงตัดสามารถนำไปสัมพันธ์กับการเกิดการสึกกร่อนของเครื่องมือกัด การสั่นสะเทือน ความถูกต้อง (Accuracy) ของชิ้นงาน ความสามารถในการตัดเฉือน (Machinability) และกำลังของเครื่องจักรที่จำเป็นต้องใช้ นอกจากนี้แรงตัดยังเป็นข้อมูลสำคัญในการออกแบบเครื่องมือกัด การตรวจสอบการสึกหรอและการแตกเสียหายของเครื่องมือกัด รวมถึงการทำนายลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน

ในปัจจุบันมีบริษัทต่างๆ ได้ผลิตอุปกรณ์วัดแรงเพื่อจำหน่าย แต่มีราคาแพง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการและประดิษฐ์ตัวตรวจวัดแรง (Force sensor) ชนิดสเตรนเกจขึ้นมา โดยอาศัยหลักการยืดหดตัวหรือความเครียด (Strain) ของตัวสเตรนเกจที่ยึดกับโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ที่จะใช้รับแรง โดยตัวสเตรนเกจจะต่อเป็นวงจรบริดจ์เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงความเครียด และแปลงให้อยู่ในรูปของค่าสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าในขณะที่มีแรงกระทำ การออกแบบจะออกแบบให้วัดแรงตัดในแนวแกน x,y,z ของการกัด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแรงชนิดสเตรนเกจขึ้นมา ใช้ระเบียบวิธีทางด้านไฟไนต์อีลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแรง สำหรับวัดแรงกัดบนเครื่องกัดในแนวแกน x, y และ z นำผลการทดลองที่วัดได้เปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดแรงยี่ห้อคิสท์เลอร์ (Kistler) รุ่น 9255B

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

นำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรงชนิดสเตรนเกจ สำหรับวัดแรงในแนวแกน x,y และ z โดยมีพิสัย (Range) ในแกน x y และ z -1 kN ถึง 1 kN ใช้เครื่อง เอชพี 3852A เป็นตัวปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ(Signal conditioning) และใช้งานร่วมกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ HP VEE เพื่อทำการแสดงผลที่ได้จากการวัด

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและรวบรวมผลการวิจัยและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงจากรายงานการวิจัย วารสาร หนังสือ และเว็บที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาและทำความเข้าใจระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และโปรแกรมประยุกต์สำเร็จรูปเพื่อนำมาช่วยในการวิจัย
3. สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ของโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง แล้วทำการวิเคราะห์หาความเครียดเมื่อมีแรงมากระทำบนแบบจำลอง
4. ศึกษาเรื่องคุณสมบัติของสเตรนเกจ
5. สร้างอุปกรณ์ตรวจรู้ตามที่ได้ออกแบบขึ้น
6. ศึกษาถึงวิธีการที่จะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการทดลองวัดค่าสัญญาณ และคำนวณหาค่าแรง
7. เขียนโปรแกรมเพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำงานเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรง
8. ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการทดลอง เช่นลักษณะของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งหาวิธีควบคุมให้ปัจจัยเหล่านี้มีค่าน้อยที่สุด
9. สอบเทียบ
10. ทดลองวัดแรงที่เกิดขึ้น และเทียบสัญญาณกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงคิส์ท์เลอร์

11. นำข้อมูลที่ได้มาสรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง
12. เขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อุปกรณ์ตรวจจู้แรงสำหรับการวัดแรงบนเครื่องกัดซีเอ็นซี สำหรับงานกัดแบบ เซาะร่อง
2. อุปกรณ์ตรวจจู้แรงนี้สามารถใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการหาสภาพการตัดที่เหมาะสม (Optimal cutting condition)
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจู้แรงเพื่อไปใช้ในการหาแรงตัดของเครื่องจักรกลซีเอ็นซี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

การวัดแรงและอุปกรณ์ตรวจวัดแรง

2.1 แรงตัด (Cutting force)

แรงตัดเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมากในทางปฏิบัติ เพราะข้อมูลแรงตัดสามารถบอกถึงการใช้พลังงานของเครื่องจักรและโหลดที่แท้จริง การสึกกร่อนของเครื่องมือตัด การสั่นสะเทือน เป็นต้น แรงตัดที่วัดได้สามารถนำไปเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเฉือนของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของการทดลองหาอายุการใช้งานของเครื่องมือตัด ซึ่งไม่สามารถทำได้เนื่องจากข้อจำกัดของเวลา และวัสดุ ดังนั้นรูปแบบต่างๆ ของการตัดได้ถูกศึกษาและพัฒนาขึ้นมากมาย ซึ่งโดยมากเป็นฟังก์ชันของอัตราการตัด อัตราป้อน ความลึกของการกัด รูปเรขาคณิตของเครื่องมือตัด เครื่องมือตัดและชิ้นงาน คุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น รวมไปถึงการหาตัวแบบของแรงตัดโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จนถึงในปัจจุบันได้มีการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแรงขึ้น

2.2 การศึกษาเรื่องการวัดแรง

ประวัติความเป็นมาของการศึกษาเรื่องการหาแรงตัด ได้เริ่มมีบันทึกงานวิจัยไว้ประมาณปี ค.ศ. 1940 จนถึงปัจจุบัน ได้มีวิวัฒนาการมาเป็นลำดับ โดยนักวิจัยได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการทำนายแรงตัด ด้วยตัวแบบต่างๆ จนไปถึงการหาแรงตัดโดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังตัวอย่างที่ได้แสดงในตารางที่ 2.1

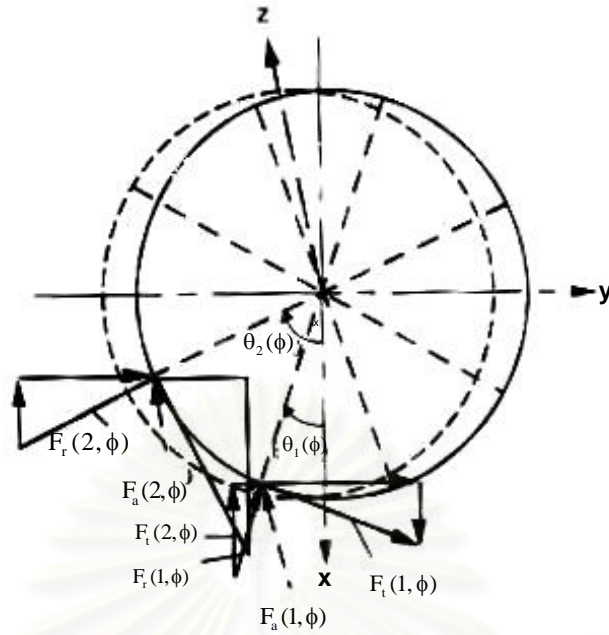
ตารางที่ 2.1 วิวัฒนาการของการวิจัยเพื่อหาตัวแบบของแรงตัด

ปีที่วิจัย	ผู้วิจัย	สิ่งที่วิจัยได้
1941	Martellotti	ได้เริ่มพัฒนาตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการกัด
1961	Koenigsberger และ Sabberwal	ได้ทำการหาแรงตัดสำหรับการกัดปาดหน้า (Face milling) โดยใช้ dynamometers วัด
1978	Usui และ Hirota Lin	พัฒนาตัวแบบการหาแรงตัดในสามมิติโดยใช้วิธีพลังงาน (Energy method) และ วิธีการหาคุณสมบัติการไหลของความเค้น (Flow stress properties)

ปีที่วิจัย	ผู้วิจัย	สิ่งที่วิจัยได้
1983	Kline และ DeVor Fu et al.	สร้างโมเดลของการหาแรงตัดที่มีความซับซ้อน โดยนำพารามิเตอร์ของรูปร่างของเครื่องมือตัด และรูปร่างของชิ้นงาน เข้ามาคิดด้วย
1967	Das และ Tobias	ได้หาสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแบบสแตติก และไดนามิก ในการกลึง แล้วนำมาประยุกต์ใช้กับการกัด
1976	Doolan et al.	สร้างตัวแบบมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงของแรงภายใต้สภาพการตัดจริง
1986	Cho	วิเคราะห์การตัดในแนวแกนสามแนวแบบไดนามิก แล้วนำไปประยุกต์ใช้กับงานกัด
1991	Montgomery และ Altintas	ศึกษาถึงกลไกของแรงตัด และผิวหน้างานกัด แบบไดนามิก
1997	Stephonson	การจำลองเพื่อหาลักษณะเฉพาะของแรงตัดที่ไม่ขึ้นกับกระบวนการของการตัดเฉือน

2.2.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์แรงตัดโดยใช้วิธีสร้างตัวจำลองเชิงเลข (Math model) (Kim and Ehmann, 1993)

ในการวิเคราะห์การกัดแบบควอไซสแตติก การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ของเศษ (Chip area) เมื่อมีดกัดหมุนประมาณได้เป็นฟังก์ชันไซน์ และแรงกัดก็จะประมาณได้เป็นพื้นที่ของส่วนที่ไม่มีการตัดเฉือน (Uncut chip area) คูณกับความดันตัดเฉือน แรงจะถูกคำนวณสำหรับแต่ละอินเสิร์ต ของมีดกัด โดยเป็นฟังก์ชันของมุมการหมุนของมีดกัด แรงตัดรวมจะได้ออกมาจากการบวกกันของแรงที่เกิดขึ้นในแต่ละอินเสิร์ตที่มีการตัดเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แรงในแนวสัมผัส แนวรัศมี และแนวแกนที่กระทำกับตัวอินเสิร์ต i เมื่อมีดกัดหมุนไปเป็นมุม ϕ คือ



รูปที่ 2.1 แรงตัดที่เกิดขึ้นในแต่ละอินเสิร์ท

$$\begin{Bmatrix} F_t(i, \phi) \\ F_r(i, \phi) \\ F_a(i, \phi) \end{Bmatrix} = K_t C_1(i, \phi) \cdot d_e(i, \phi) \begin{bmatrix} 1 + K_r \cdot \frac{\cos \eta_{Le} \cdot \tan \alpha_r}{\cos \alpha_a} \\ -\tan \alpha_r + K_r \cdot \frac{\cos \eta_{Le}}{\cos \alpha_a} \\ -\frac{\tan \alpha_a + K_r \cdot \frac{\sin \eta_{Le}}{\cos \alpha_a \cdot \cos \alpha_r}}{\cos \alpha_r} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เมื่อ K_t และ K_r เป็นความดันตัดเฉือนซึ่งได้จากการทดลองในแนวสัมผัสและแนวรัศมีตามลำดับ

η_{Le} เป็นมุมลีด

α_a และ α_r เป็นมุมคายของมีดกัดในแนวแกน และแนวรัศมี ตามลำดับ

$d_e(i, \phi)$ คือความลึกของการกัด ได้จาก

$$d_e(i, \phi) = d - R \cdot \sin \eta_t + R \cdot \sin \eta_t \cdot \sin \theta_i(\phi) \quad (2.2)$$

เมื่อ η_t เป็นมุมเอียงของเพลงานหลัก

$\theta_i(\phi)$ เป็นตำแหน่งเชิงมุมของอินเสิร์ทตัวที่ i ที่มุมที่เครื่องมือตัดหมุนไปเป็นมุม ϕ หาได้จาก

$$\theta_i(\phi) = \phi + \theta_i(0) \quad (2.3)$$

เมื่อ $\theta_i(0)$ คือมุมเริ่มต้นของอินเสิร์ท i

แรงตัดรวมสามารถคำนวณได้จากแรงรวมของแต่ละอินเสิร์ทในเวลาใดๆ

$$\begin{Bmatrix} F_x(\phi) \\ F_y(\phi) \\ F_z(\phi) \end{Bmatrix} = \sum_1^{n_i} \delta(i, \phi) \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_i(\phi) & -\sin \theta_i(\phi) & 0 \\ \sin \theta_i(\phi) & \cos \theta_i(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_i(i, \phi) \\ F_r(i, \phi) \\ F_a(i, \phi) \end{Bmatrix} \quad (2.4)$$

ในสมการ (2.4) $\delta(i, \phi)$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่ออินลิเรทนั้นตัดเฉือนชิ้นงาน และเป็นศูนย์เมื่อไม่ได้ตัด

การสร้างตัวแบบการก่ดแบบไดนามิก จะพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความหนาของเศษ U ในแต่ละอินลิเรท สามารถแตกออกเป็น 3 ส่วนย่อยคือ U_x , U_y และ U_z ซึ่งแต่ละส่วนย่อยเกิดจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ในแกน x y z จะได้แรงก่ดแบบไดนามิก DF_x , DF_y และ DF_z ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน คุณสมบัติทางไดนามิกของจุดที่เกิดการตัดเฉือนเป็นไปตามสมการที่ (2.5)

$$G_{pq}(i, \omega) = \frac{U_p(i, \omega)}{DF_q(i, \omega)}, \quad p, q = x, y, z \quad (2.5)$$

จากสมการที่ (2.5) การกระจัดสัมพัทธ์ของอินลิเรทที่ $U_x(i, \omega)$, $U_y(i, \omega)$ และ $U_z(i, \omega)$ ในทิศทาง x y และ z บนโดเมนความถี่แสดงในสมการที่ (2.6)

$$\begin{Bmatrix} U_x(i, \omega) \\ U_y(i, \omega) \\ U_z(i, \omega) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx}(i, \omega) & G_{xy}(i, \omega) & G_{xz}(i, \omega) \\ G_{yx}(i, \omega) & G_{yy}(i, \omega) & G_{yz}(i, \omega) \\ G_{zx}(i, \omega) & G_{zy}(i, \omega) & G_{zz}(i, \omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DF_x(i, \omega) \\ DF_y(i, \omega) \\ DF_z(i, \omega) \end{Bmatrix} \quad (2.6)$$

การประมาณค่าผลการตอบสนองในสมการที่ 2.6 หาได้โดยใช้วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลขตามสมการที่ 2.7

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{x}}(t)\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} + \mathbf{K}\{\mathbf{x}(t)\} = \{\mathbf{DF}(t)\} \quad (2.7)$$

หรือ

$$\mathbf{M} \begin{Bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \\ \ddot{z}(t) \end{Bmatrix} + \mathbf{C} \begin{Bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{z}(t) \end{Bmatrix} + \mathbf{K} \begin{Bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} DF_x(t) \\ DF_y(t) \\ DF_z(t) \end{Bmatrix}$$

แรงก่ดแบบไดนามิกในช่วงขณะของอินลิเรทที่ $dF_T(i, \Phi)$, $dF_R(i, \Phi)$ และ $dF_A(i, \Phi)$ ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนารวมของเศษ $U(i, \Phi)$ สามารถหาได้โดย

$$\begin{aligned}
dF_T(i, \Phi) &= K_C U(i, \Phi) \\
dF_R(i, \Phi) &= K_R dF_T(i, \Phi) \\
dF_A(i, \Phi) &= K_A dF_T(i, \Phi)
\end{aligned} \tag{2.8}$$

จากสมการ (2.1) และ (2.8) แรงตัดแบบไดนามิกในช่วงขณะในแกน x, y และ z $dF_x(i, \Phi)$, $dF_y(i, \Phi)$ และ $dF_z(i, \Phi)$ หาได้จาก

$$\begin{Bmatrix} dF_x(\Phi) \\ dF_y(\Phi) \\ dF_z(\Phi) \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^{z_c} K_C \begin{bmatrix} R_{ixx} & R_{ixy} & R_{ixz} \\ R_{iyx} & R_{iyy} & R_{iyz} \\ R_{izx} & R_{izy} & R_{izz} \end{bmatrix} U(i, \Phi) \tag{2.9}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
R_{ixx} &= \alpha_1 \sin \theta_i(\Phi) - \alpha_2 \cos \theta_i(\Phi) \\
R_{ixy} &= K_R [\beta_1 \sin \theta_i(\Phi) - \beta_2 \cos \theta_i(\Phi)] \\
R_{ixz} &= K_A [\gamma_1 \sin \theta_i(\Phi) - \gamma_2 \cos \theta_i(\Phi)] \\
R_{iyx} &= \alpha_1 \cos \theta_i(\Phi) + \alpha_2 \sin \theta_i(\Phi) \\
R_{iyy} &= K_R [\beta_1 \cos \theta_i(\Phi) + \beta_2 \sin \theta_i(\Phi)] \\
R_{iyz} &= K_A [\gamma_1 \cos \theta_i(\Phi) + \gamma_2 \sin \theta_i(\Phi)] \\
R_{izx} &= \alpha_3 \\
R_{izy} &= K_R \beta_3 \\
R_{izz} &= K_A \gamma_3
\end{aligned}$$

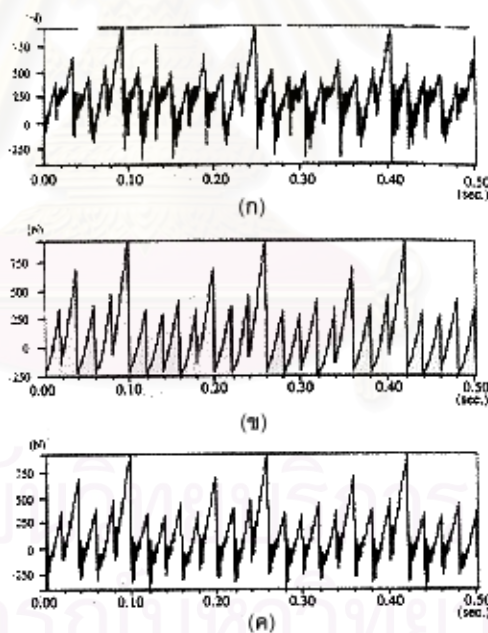
แรงตัดรวมในช่วงขณะของเครื่องมือตัด $DF_x(\Phi)$, $DF_y(\Phi)$ และ $DF_z(\Phi)$ ขณะที่หมุนไปเป็นมุม Φ ได้โดยผลรวมของแรงตัดแบบสถิต $F_x(\Phi)$, $F_y(\Phi)$ และ $F_z(\Phi)$ และแรงตัดแบบไดนามิก $dF_x(\Phi)$, $dF_y(\Phi)$ และ $dF_z(\Phi)$ หาได้จากสมการ (2.10)

$$\begin{Bmatrix} DF_x(\Phi) \\ DF_y(\Phi) \\ DF_z(\Phi) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x(\Phi) \\ F_y(\Phi) \\ F_z(\Phi) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} dF_x(\Phi) \\ dF_y(\Phi) \\ dF_z(\Phi) \end{Bmatrix} \tag{2.10}$$

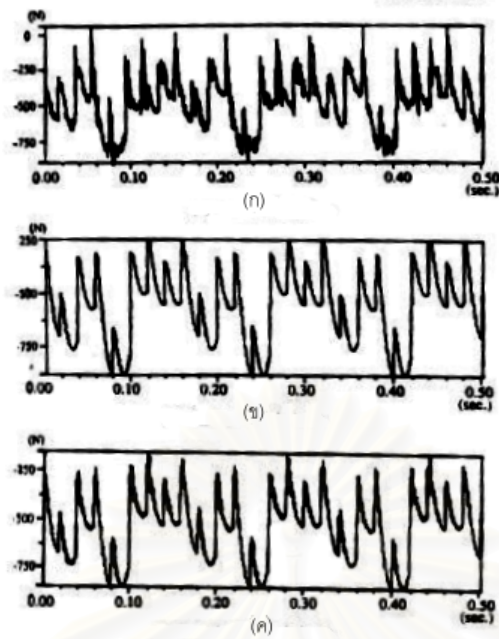
ผลการหาแรงตัดโดยใช้แบบจำลองข้างต้น เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในแนวแกน x, y และ z โดยใช้เงื่อนไขการตัด (Cutting conditions) ตามตารางที่ 2.2 และได้แรงตัดแสดงในรูปที่ 2.2-2.4

ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการตัด

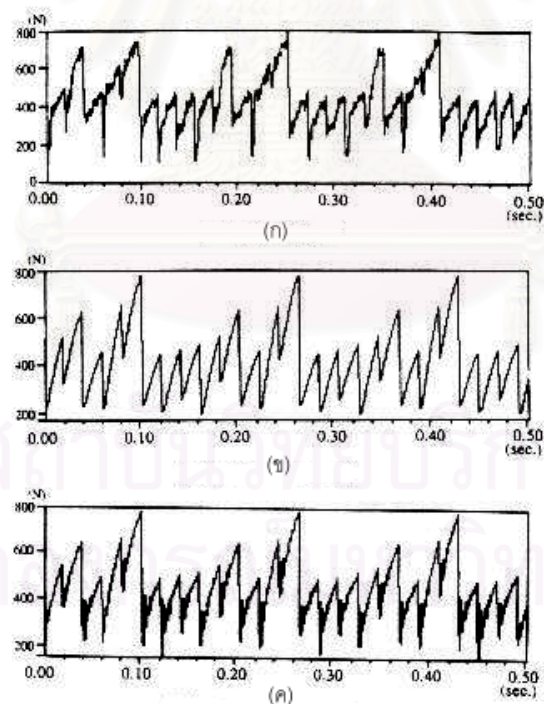
ชนิดของเครื่องกัดซีเอ็นซี	แบบกัดตามแนวตั้ง (Vertical)
อุปกรณ์ตรวจรู้แรง	คริสเลอร์ รุ่น 9257A
วัสดุของชิ้นงาน	เหล็กกล้าคาร์บอน 1095
ความเร็วรอบของเพลงานหลัก	356 rpm
รูปแบบการกัด	แบบกัดตาม (Up milling)
ความลึกการกัด	1 มิลลิเมตร
อัตราป้อนต่อฟัน	0.22 มิลลิเมตร
เส้นผ่าศูนย์กลางของมีดกัด	101.6 มิลลิเมตร
รูปทรงเรขาคณิตของอินเสิร์ต ($\alpha_r, \alpha_a, \gamma_{Le}$)	14, 8, 20
K_t, K_r, K_a	2500, 0.67, 0.375



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบแรงกัดในแนวแกน x ระหว่าง (ก) การวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (ข) คำนวณโดยใช้แบบจำลองสถิติก (ค) คำนวณโดยใช้แบบจำลองทางไดนามิก



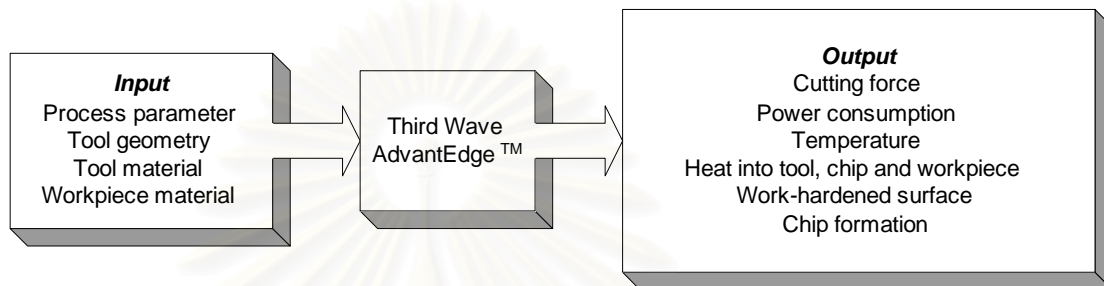
รูปที่ 2.3 การเปรียบเทียบแรงกักในแนวแกน y ระหว่าง (ก) การวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจจู้แรง
(ข) คำนวณโดยใช้แบบจำลองสถิติก (ค) คำนวณโดยใช้แบบจำลองทางไดนามิก



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบแรงกักในแนวแกน z ระหว่าง (ก) การวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจจู้แรง
(ข) คำนวณโดยใช้แบบจำลองสถิติก (ค) คำนวณโดยใช้แบบจำลองทางไดนามิก

2.2.2 การหาแรงตัดโดยใช้โปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์

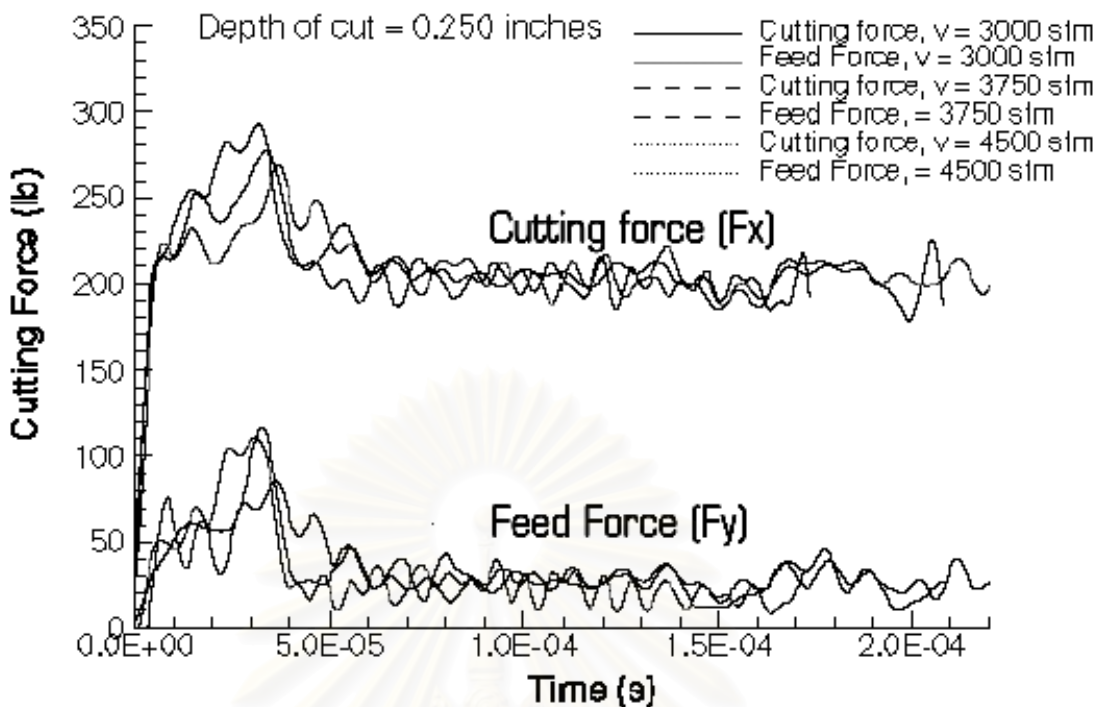
ตัวอย่างการใช้โปรแกรม Third Wave AdvantEdge™ เป็นโปรแกรมทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ใช้สำหรับจำลองการแมชชีนเพื่อหาแรงตัด อุณหภูมิ การกระจายของความร้อนในเครื่องมือตัด เศษ และชิ้นงาน และการก่อตัวของเศษ เป็นต้น โดยคำนวณจากพารามิเตอร์ที่ใส่เข้าไป อาทิเช่น รูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัด วัสดุของชิ้นงาน วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือกัด พารามิเตอร์ของการกัด เช่น ความเร็วรอบของเพลงานหลัก ความลึกการกัด เป็นต้น ดังได้แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของโปรแกรม Third Wave AdvantEdge™

ผลการทดลองรูปที่ 2.6 เป็นการจำลองกระบวนการกัดหยาบของวัสดุ AL6061-T6 เพื่อหาอัตราการกำจัดเศษ (Material removal rate) ที่เหมาะสมที่สุด โดยกำหนดให้อุณหภูมิที่ปลายเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้นไม่เกิน 50 °C และแรงตัดเพิ่มขึ้นไม่เกิน 50 lbs ผลการใช้โปรแกรมวิเคราะห์หาแรงตัดเป็นดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 แรงกัดที่ความเร็วตัดต่างๆกัน ที่ 3000 3750 และ 4500 sfm

หมายเหตุ sfm เป็นหน่วยของความเร็วตัด ย่อมาจาก Surface feet per minute

$$sfm = \frac{r.p.m. \times Tool\ dia.}{3.82}$$

จากกราฟรูปที่ 2.6 หาค่าเฉลี่ยของแรงที่วัดได้ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แรงกัดโดยเฉลี่ยที่ความเร็วตัด 3000 3750 และ 4500 sfm

ความเร็วตัด (sfm)	3000	3750	4500
F _x (lbs)	210	210	215
F _y (lbs)	30	35	40

จากตารางที่ 2.3 สรุปได้ว่าการเพิ่มความเร็วตัดจาก 3000 sfm เป็น 4500 sfm ทำให้แรงตัดเพิ่มเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในขณะที่อัตราการกำจัดเศษเพิ่มขึ้นอีก 50 เปอร์เซ็นต์

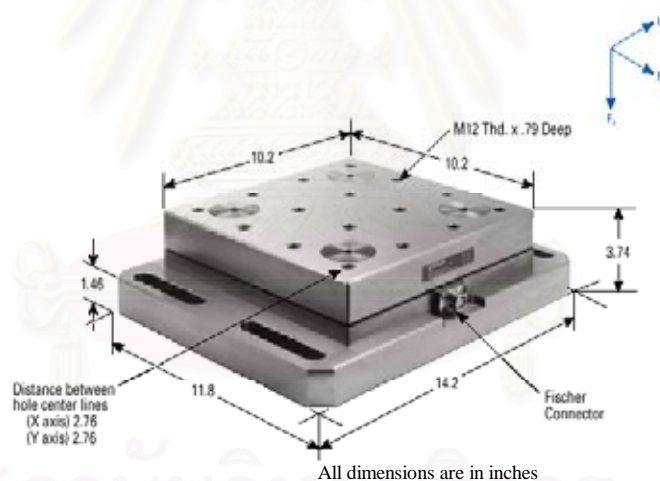
2.2.3 การหาแรงตัดโดยใช้เครื่องมือวัด

อุปกรณ์ตรวจรู้แรงได้มีการออกแบบและประดิษฐ์จากบริษัทต่างๆ ภายใต้ชื่อของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (Force sensor), โหลดเซลล์ (Load cell) และไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) เป็นต้น ซึ่งจะได้ยกตัวอย่างอุปกรณ์บางรุ่นดังนี้

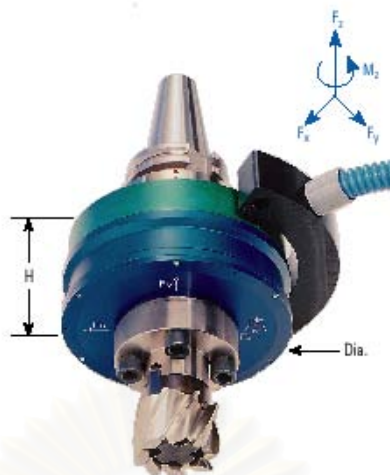
2.2.3.1 อุปกรณ์ตรวจจู้แรงคริสเลอร์ (Kistler dynamometer)

บริษัท Kistler Instrument. ได้ประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจจู้แรงในชื่อของ Kistler Dynamometers สำหรับวัดแรงกักในแนว x,y, z และ/หรือ โมเมนต์ในแนวแกน z สำหรับเครื่องจักรกลซีเอ็นซี โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรับ (Sensing element) เป็นควออร์ตซ์ การทำงานของควออร์ตซ์อาศัยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก (Piezoelectric effect) ลักษณะของปรากฏการณ์นี้คือ เมื่อควออร์ตซ์ได้รับแรงกักเป็นช่วงๆ แล้วจะปล่อยพลังงานไฟฟ้าออกมา (แต่จะไม่ปล่อยพลังงานออกมาเมื่อเป็นแรงหรือความดันแบบสถิต) จึงสามารถนำมาใช้วัดแรงหรือความดันที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ข้อดีของตัววัดแบบนี้คือ มีความไวสูง ให้สัญญาณออกที่มีสภาพเชิงเส้นดี (ความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความต่างศักย์ไฟฟ้าขาออก) และให้ผลตอบสนองที่มีความถี่สูง (High frequency response) ได้ดีกว่าตัววัดแบบอื่นๆ

ตัวอย่างของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงสำหรับวัดแนวในแกน x, y และ z สำหรับเครื่องกัดมีหลายชนิดต่างๆกันดังแสดงในรูป 2.7 เป็นอุปกรณ์ตรวจจู้แรงแบบที่ใช้วางบนโต๊ะของเครื่องกัด ส่วนรูปที่ 2.8 เป็นอุปกรณ์ตรวจจู้แรงแบบที่ติดบริเวณเพลงานหลัก (Spindle) ของเครื่องกัด



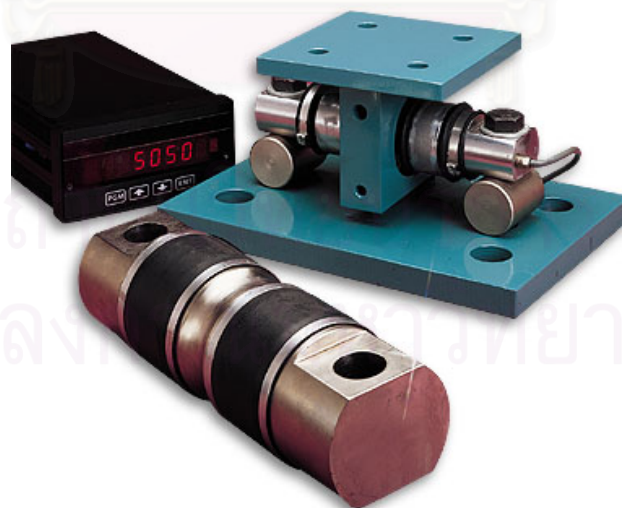
รูปที่ 2.7 อุปกรณ์ตรวจจู้แรงคริสเลอร์ชนิดที่วางบนโต๊ะของเครื่องกัด



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์ตรวจวัดแรงคริสเลอร์ชนิดติดกับบริเวณเพลางานหลัก (Spindle)

2.2.3.2 Omega load cell

อุปกรณ์วัดแรงของ Omega Engineering Inc. ภายใต้ชื่อของ โอเมกาโหลดเซลล์ (Omega Load Cell) สามารถวัดแรงได้ในทิศทางเดียว แสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งมีแผ่น (Plate) ที่ติดตั้งสำหรับรับแรง โครงสร้างของโหลดเซลล์เป็นแบบคานเฉือนสองด้าน (Double ended shear beam load cell) ใช้ในการวัดแรงขนาดหลายๆ ขนาดของแรงไม่เกิน 68 kN ขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดแรง

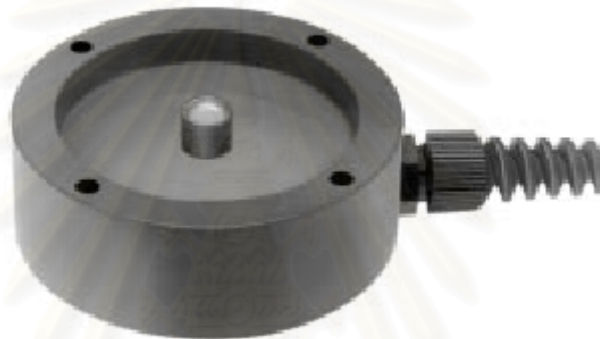


รูปที่ 2.9 Double ended shear beam load ของ Omega Engineering Inc.

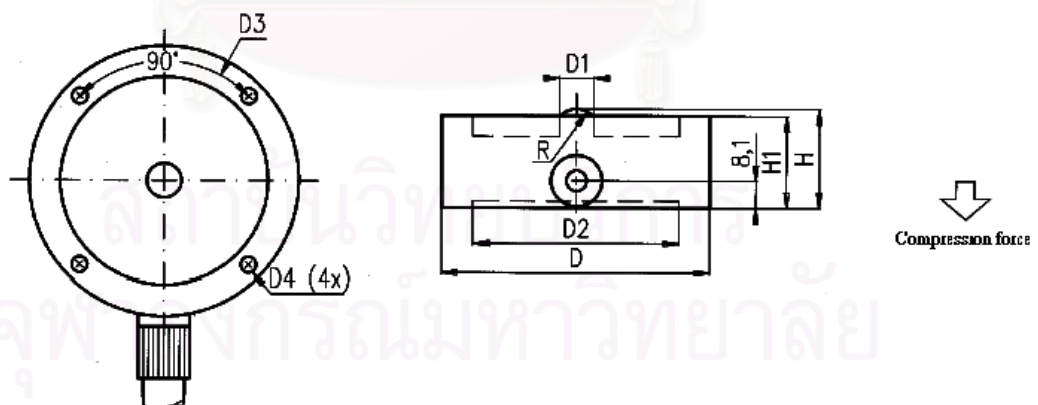
2.2.3.3 Megatron force sensor

อุปกรณ์วัดแรงของ Megatron Elektronik AG. มีการออกแบบหลายลักษณะ แต่ที่นำมาในตัวอย่างของการออกแบบในลักษณะการรับแรงโดยตรง และการรับแรงโดยอาศัยหลักการของโมเมนต์ดัด ซึ่งนิยมออกแบบเป็นแบบตัว S (S type)

อุปกรณ์แบบรับแรงกดโดยตรง แสดงในรูปที่ 2.10 และ 2.11 สามารถรับแรงได้สูงสุด 100 kN วัสดุที่ใช้ในการทำจะเป็นเหล็ก หรืออลูมิเนียม ขึ้นกับความสามารถในการวัดแรง และเลือกตัวตรวจวัด (Sensing element) เป็นสเตรนเกจ

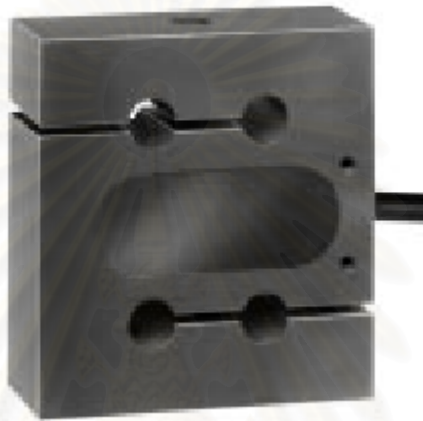


รูปที่ 2.10 อุปกรณ์วัดแรงแบบรับแรงโดยตรง ของ Megatron Elektronik AG

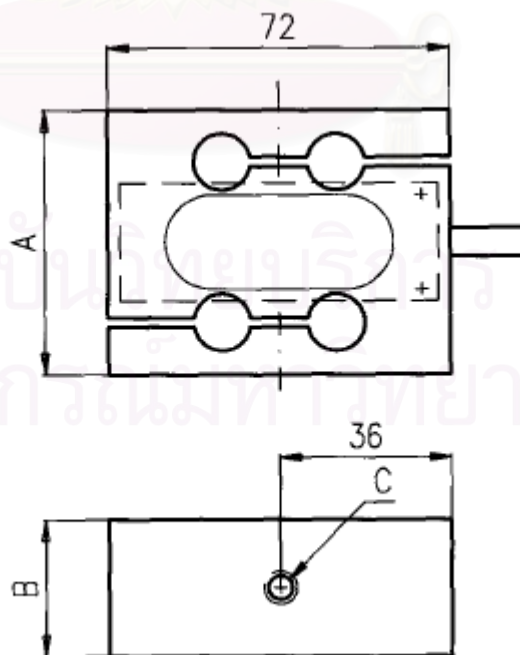


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของอุปกรณ์วัดแรงแบบรับแรงโดยตรง ตามแบบที่แสดงในรูป 2.10

อุปกรณ์วัดแรงแบบรูปตัว S ทำงานโดยอาศัยหลักการของโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำ สามารถวัดได้ทั้งแรงกดและแรงดึง ช่วงการวัดอยู่ที่ 20 N ถึง 10 kN วัสดุที่ใช้ในการทำจะเป็นเหล็ก หรืออลูมิเนียม ขึ้นกับความความสามารถในการวัดแรง และเลือกตัวตรวจวัด (Sensing element) เป็นสเตรนเกจ และทำการต่อวงจรแบบฟูลบริดจ์ (Full bridge) แสดงในรูป 2.12 และ 2.13



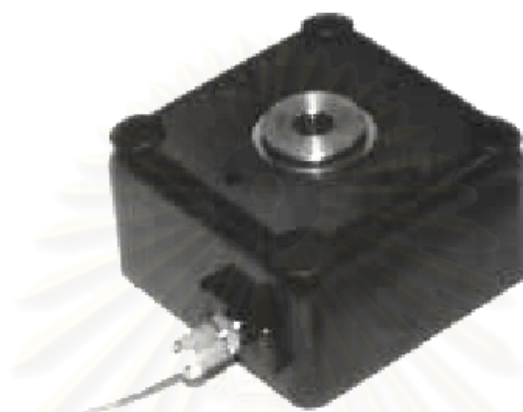
รูปที่ 2.12 อุปกรณ์วัดแรงแบบรูปตัว S ของ Megatron Elektronik AG



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของอุปกรณ์วัดแรงแบบรูปตัว S ตามแบบที่แสดงในรูป 2.12

2.2.3.3 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงแบบ 3 แกน

ผลิตโดย Sensor Development Inc. อุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้สามารถวัดแรงได้ 3 แกนคือ x, y และ z โดยแต่ละแกนวัดได้ในช่วงประมาณ -20 kN ถึง 20 kN .ใช้หลักการของการของโมเมนต์ดัดในการวัดแรงที่เกิดขึ้น ตัวโครงสร้างใช้วัสดุเป็นอัลลอยด์สตีล (Alloy steel) และมีตัวตรวจวัดเป็นสเตรนเกจ



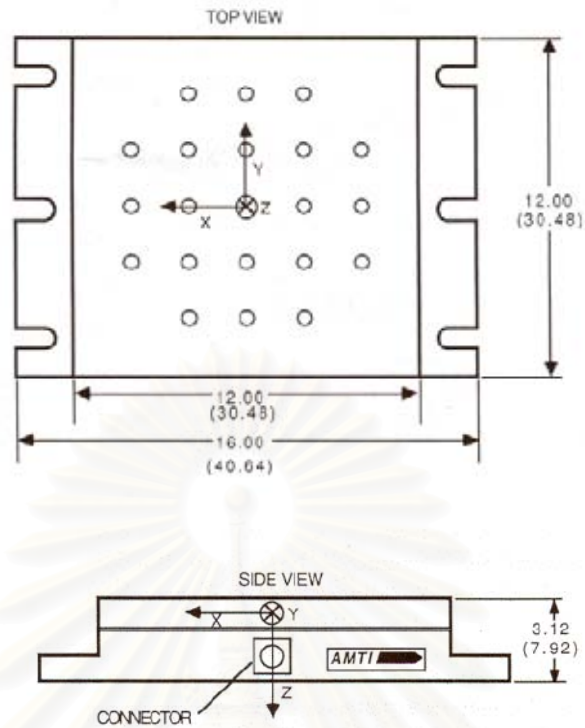
รูปที่ 2.14 อุปกรณ์วัดแรง 3 แกนของ Sensor Development Inc.

2.2.3.4 ATI Multi-component force/torque transducer MC12 series

ผลิตโดย Advanced mechanical technology Inc. (AMTI) สำหรับวัดแรง 3 แนวแกนและโมเมนต์ 3 แกน มีตัวตรวจวัดเป็นสเตรนเกจ รูปร่างและขนาดแสดงในรูปที่ 2.15 และ 2.16



รูปที่ 2.15 อุปกรณ์ตรวจรู้แรงยี่ห้อ ATI 6 แกน



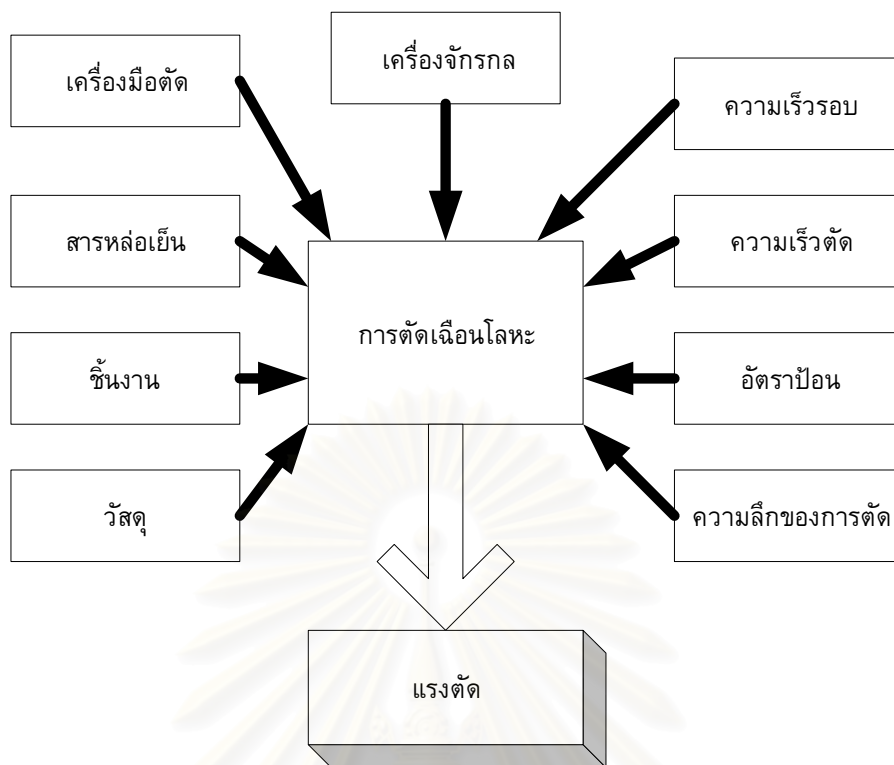
รูปที่ 2.16 ขนาดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ATI ในหน่วยนิ้ว (มิลลิเมตร)

2.3 การตัดเฉือนโลหะด้วยเครื่องจักรกลซีเอ็นซี (ชาลี ตระการกุล, 2542)

2.3.1 อิทธิพลที่มีผลต่อการตัดเฉือนโลหะ

รูปที่ 2.17 แสดงองค์ประกอบที่มีผลต่อการเกิดแรงตัดด้วยเครื่องจักรกลซีเอ็นซี ทำให้เกิดแรงตัดมากน้อยต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 องค์ประกอบของการตัดเฉือนโลหะ

2.3.1.1 เครื่องจักรกล

เครื่องจักรกลที่เลือกใช้จะต้องสามารถปฏิบัติงานตามขั้นตอนการตัดเฉือนที่ต้องการได้ และมีความเที่ยงตรง (accuracy) ที่ต้องการ

- หลักการเบื้องต้นในการออกแบบสำหรับโครงสร้างทางกลของเครื่องจักร ได้แก่ ความแข็งแรง (Rigidity) ความมั่นคง (Stability) และคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal characteristics)
- ความแข็งแรง เป็นความสามารถของเครื่องจักรในการต้านทานต่อความเค้นภายนอก (External mechanical stresses) โดยที่จะไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อการตัดเฉือนชิ้นงาน แพคเตอร์สำคัญที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงได้แก่ ฐานราก (Foundation) และโครงเครื่องจักรกล (Machine frame)

ความมั่นคง คือความสามารถในการคงไว้ซึ่งความเที่ยงตรงเมื่อเกิดแรงกระทำขึ้นภายในเครื่องจักร สิ่งที่มีอิทธิพลต่อความมั่นคง ได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุ ระบบแบริ่งที่ใช้ ความสัมพันธ์ของขนาดชิ้นส่วนย่อยที่นำมาประกอบกัน และความยาวของชิ้นส่วนที่เกิดความเค้น

คุณสมบัติทางความร้อน เป็นตัวกำหนดความเที่ยงตรงภายใต้อิทธิพลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในช่วงเวลาเริ่มต้นการทำงาน

อัตราการตัดเฉือนเนื้อโลหะออกจริง ขึ้นอยู่กับกำลังขับที่ติดมาพร้อมเครื่องจักรและกำลังขับที่ได้จากเพลางาน

2.3.1.2 เครื่องมือตัด

ข้อพิจารณาในการเลือกใช้เครื่องมือตัดสำหรับขั้นตอนการตัดเฉือนด้วยเครื่องจักรที่เน้นขึ้นอยู่กั

- ชนิดของวัสดุขี้ดเครื่องมือตัดในอุปกรณ์ลำเลียงเครื่องมือ (Tool Carrier)

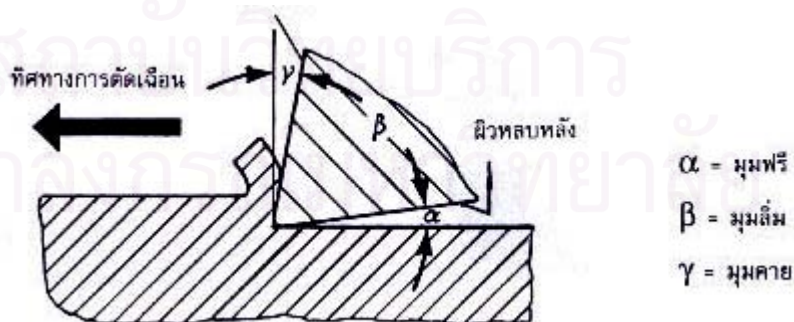
- รูปแบบของขอบรูป (Contour) ที่ต้องการตัดเฉือน

เนื่องจากอุปกรณ์ลำเลียงเครื่องมือตัด และด้ามยึดเครื่องมือ จะถูกกระทำด้วยแรงจำนวนมาก และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นอุปกรณ์ลำเลียงเครื่องมือ และด้ามยึดเครื่องมือควรมีคุณสมบัติดังนี้

- มีความแข็งแรงสูง

- มีคุณสมบัติด้านการสั่นสะเทือนที่ยอมรับได้

รูปร่างาคณิตของเครื่องมือตัด (รูป 2.18) มีผลกระทบต่ออัตราการตัดเฉือนเนื้อโลหะออก คมตัดมีคุณลักษณะที่สำคัญคือ มุมคายและมุมลิ้ม เครื่องมือตัดเมื่อถูกใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการสึกหรอขึ้นระหว่างชิ้นงานกับเครื่องมือตัด ถ้ามีความเค้นเกิดขึ้นมากเกินไปก็จะทำให้เครื่องมือตัดแตกหักได้ ปัจจุบันความต้านทานต่อความเค้นที่เกิดขึ้นของเครื่องมือตัดสามารถเลือกได้หลายระดับ โดยการใช้วัสดุเครื่องมือตัดชนิดต่างๆกัน เช่นเหล็กอบสูงจะมีความเหนียวมาก แต่ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอไม่ดี ทำให้ต้องใช้ความเร็วตัดต่ำ ในขณะที่คาร์ไบด์จะมีความเหนียวน้อยกว่า แต่ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอดี และในการกัดสามารถใช้ความเร็วตัดที่สูงขึ้น



รูปที่ 2.18 รูปร่างาคณิตของการตัดเฉือน

เครื่องมือตัดเมื่อใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการสึกหรอและทำให้เครื่องมือตัดที่อระยะเวลาดังกล่าวเรียกว่าอายุขีด (Tool life) :ซึ่งได้รับผลกระทบจาก ความเร็วตัด วัสดุ

เครื่องมือ วัสดุชิ้นงาน พื้นที่ภาคตัดของเศษก่อนที่จะเปลี่ยนรูปไป ส่วนมากผู้ผลิตเครื่องมือตัดจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับอายุคมมีดสำหรับงานตัดเฉือนทั่วไป

2.3.1.3 สารหล่อเย็น

เพื่อให้ได้สภาวะการตัดเฉือนที่ดีขึ้น จะต้องพิจารณาเลือกใช้สารหล่อเย็นที่เหมาะสม เป้าหมายหลักของการใช้สารหล่อเย็นก็คือ

- เพื่อระบายความร้อนที่เกิดขึ้นที่จุดปลายเครื่องมือตัดและรักษาอุณหภูมิของชิ้นงานให้ต่ำลง
- ช่วยหล่อลื่นเพื่อลดความฝืดและการสึกหรอของเครื่องมือตัด
- ช่วยไล่เศษออกจากบริเวณตัดเฉือน

การใช้สารหล่อเย็นชนิดผสมน้ำ จะให้ผลของการระบายความร้อนที่ดี แต่คุณสมบัติด้านการหล่อลื่นจะไม่ดี ในทางกลับกัน การใช้สารหล่อเย็นชนิดที่เป็นน้ำมันตัด จะให้ผลในด้านการหล่อลื่นดี แต่การระบายความร้อนไม่ดี การใช้สารหล่อเย็นขณะทำงานตัดเฉือน จะทำให้สามารถใช้ความเร็วตัดสูงขึ้นได้

2.3.1.4 ชิ้นงาน

ในด้านชิ้นงาน จะต้องพิจารณา

- รูปทรงและขนาดของวัสดุงาน :ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อการเลือกใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงานและขนาดของแรงในการจับยึด การเลือกใช้เครื่องมือตัด และรูปทรงของเครื่องมือตัด เช่น ชิ้นงานมีรูปขอบภายนอกหรือภายใน ขอบรูปของชิ้นงานที่มีลักษณะพิเศษเป็นต้น
- ความแข็งแรงของชิ้นงาน ชิ้นงานที่มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ เช่น ชิ้นงานที่มีลักษณะเล็กและยาวเป็นต้น อาจต้องจัดหาอุปกรณ์ช่วยงานอื่นๆ เพื่อป้องกันการสั่นสะท้าน (Vibration) หรือการโก่งงอ (Deflections) ของชิ้นงาน
- ผิวสำเร็จของชิ้นงาน เพื่อให้ได้ผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ดีจะต้องใช้เครื่องมือตัดให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุงาน
- พิกัดความเผื่อ (Tolerance) ของชิ้นงานสำเร็จ จะเป็นตัวชี้ถึงระดับความเที่ยงของขนาด และวิธีการตัดเฉือนที่ต้องใช้ เช่น ช่วงระยะเวลาการตรวจสอบขนาดของชิ้นงาน และการเปลี่ยนแปลงคมตัดเป็นต้น

2.3.1.5 วัสดุ

สิ่งที่ควรคำนึงถึงเกี่ยวกับวัสดุคือ ความแข็งแรง (Strength) และความสามารถในการตัดเฉือน (Machinability) ของวัสดุ ตลอดจนลักษณะของเศษ (Chip) ที่เกิดขึ้นขณะทำการตัดเฉือน

ความแข็งแรงของวัสดุ เป็นปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้อุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน และการปรับตั้งความดันในการจับยึด

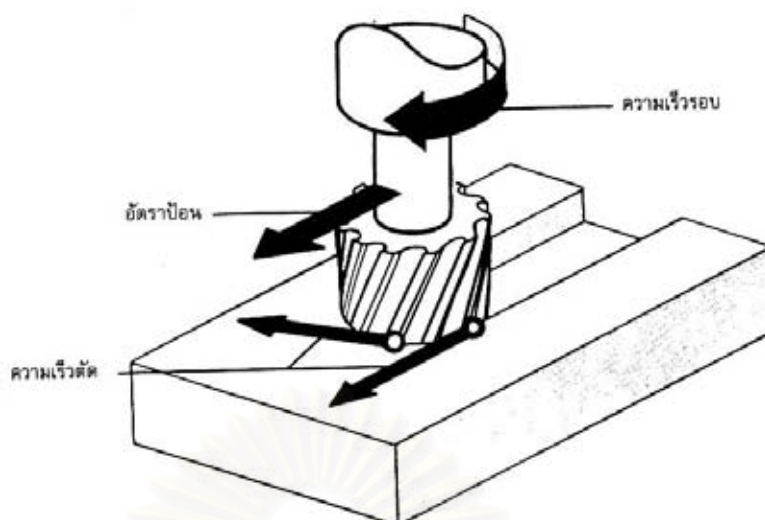
ความสามารถในการตัดเฉือนของวัสดุ มีผลกระทบต่อการใช้ปลายคมตัดเฉือนและแรงตัดที่ต้องใช้ ลักษณะความสามารถในการตัดเฉือนของวัสดุชิ้นงานที่ดี ที่สามารถสังเกตเห็นได้ คือ ลักษณะการเกิดเศษที่มีประสิทธิภาพขณะทำการตัดเฉือนด้วยความเร็วตัดสูง โดยมีการสึกหรอของเครื่องมือตัดน้อยและได้ผิวสำเร็จของชิ้นงานที่ดี เศษที่เกิดขึ้นจะต้องนำออกจากบริเวณพื้นที่การตัดเฉือนได้สะดวก ลักษณะเช่นนี้จะเกิดได้ในกรณีที่เป็นเศษหัก (Broken chips) ที่มีรูปร่างสม่ำเสมอ

2.3.2 ข้อมูลการตัดเฉือนโลหะสำหรับงานกัด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแนะนำอธิบายถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำงานกัด ได้แก่ ความเร็วรอบของมีดกัด ความลึกหรือความกว้างของรอยกัด และหน้าสัมผัสของมีดกัด เป็นต้น

2.3.2.1 ความเร็วรอบ (Spindle speed)

เป็นค่าการหมุนของเพลางานหลัก (Spindle) มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที ค่าความเร็วรอบที่เลือกใช้จะเป็นตัวกำหนดค่าความเร็วตัด (Cutting speed) ในงานกัดด้วย ดังแสดงความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.19 ความเร็วตัดจะมีค่าเท่ากับความเร็วที่ขอบของมีดกัด และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด กล่าวคือ ถ้าความเร็วรอบมีค่าสูง และมีดกัดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโต จะทำให้ความเร็วตัดมีค่าสูงด้วย



รูปที่ 2.19 ความเร็วรอบ ความเร็วตัด และอัตราป้อน

2.2.3.2 อัตราป้อน

เป็นการเคลื่อนที่ของมีดกัดในทิศทางทำงานตัดเฉือน (ดูรูปที่ 3.6) โดยทั่วไปอัตราป้อนจะกำหนดเป็นระยะทางการเคลื่อนที่ต่อนาที นอกจากนี้อาจกำหนดอัตราป้อนเป็นระยะทางการเคลื่อนที่ต่อรอบการหมุนของมีดกัด หรือต่อฟันของมีดกัดก็ได้ ตัวอย่างเช่น

100 mm/min หมายถึง ระยะทางการเคลื่อนที่ของมีดกัด 100 mm. ในเวลา 1 นาที

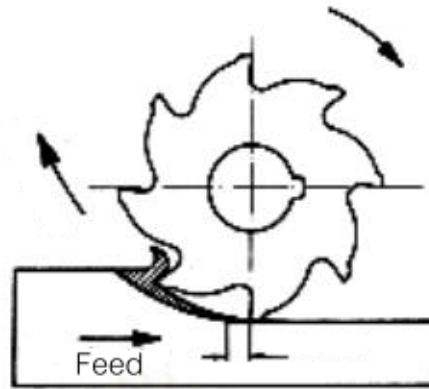
0.1 mm/rev หมายถึง ระยะทางการเคลื่อนที่ของมีดกัด 0.1 mm. เมื่อมีดกัดหมุนครบ 1 รอบ

0.02 mm/teeth หมายถึง ระยะทางการเคลื่อนที่ของมีดกัด 0.02 mm. ต่อ 1 ฟันมีดกัด

เมื่อกำหนดให้ความเร็วรอบของมีดกัดมีค่าคงที่ การเลือกใช้อัตราป้อนจะมีผลต่อความหนาของเศษ และผิวสำเร็จของชิ้นงาน

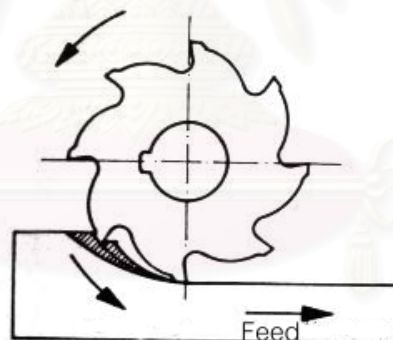
การเลือกใช้ลักษณะการกัดระหว่างการกัดตามกับการกัดทวน จะมีผลกระทบต่อ การเปลี่ยนรูปของเศษ (Chip formation) และความดันตัดเฉือน (Cutting pressure) ดังนี้

- (1) การกัดตาม (Conventional milling หรือ Up milling) ในงานกัดตาม ความหนาของเศษ และความดันในการตัดเฉือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ฟันมีดกัด และจะมีค่าสูงสุดก่อนที่ฟันมีดกัดจะเลื่อนพ้นวัสดุงานเพียงเล็กน้อย เมื่อฟันมีดกัดเลื่อนพ้นวัสดุงานแล้ว จะเกิดสภาวะที่ติดตามมาคือ ความดันตัดเฉือนจะหมดไปทันที ทำให้มีดกัดเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยเร็ว และฟันมีดกัดถัดไปจะเลื่อนเข้ากัดชิ้นงานในลักษณะการกระตุก (Jerking) เป็นผลให้เกิดเป็นรอยสัน (Chatter marks) ที่ผิวงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การกัดตาม

- (2) การกัดทวน (Climb milling หรือ Down milling) ในการกัดทวน ลักษณะการเกิดเศษจะกลับกันกับการกัดตาม กล่าวคือ เมื่อฟันมีดกัดเริ่มเข้าตัดเฉือนชิ้นงาน เศษจะมีขนาดบางที่สุดและความดันตัดเฉือนมีค่าน้อยที่สุด ดังนั้นจะทำให้เกิดรอยล้นสะเก็ดน้อย และชิ้นงานมีผิวสำเร็จที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานกัดตาม งานกัดทวนจะใช้เครื่องกัดที่มีกำลังน้อยกว่าได้ แต่ต้องการความแข็งแรงของเครื่องกัดมากกว่า

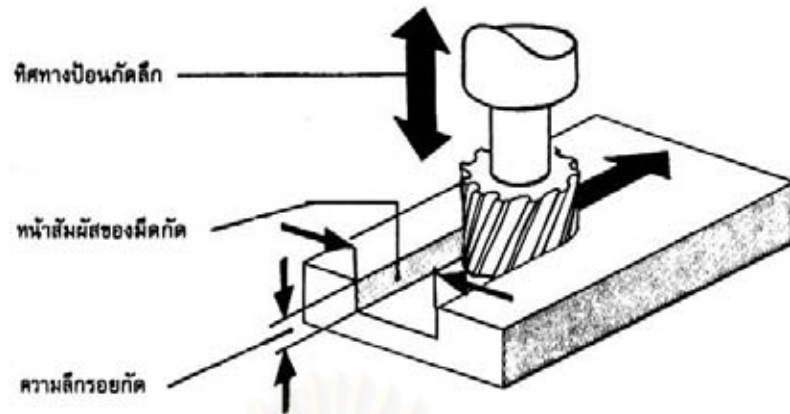


รูปที่ 2.21 การกัดทวน

2.2.3.3 ความลึกหรือความกว้างของรอยตัดและหน้าสัมผัสของมีดกัด

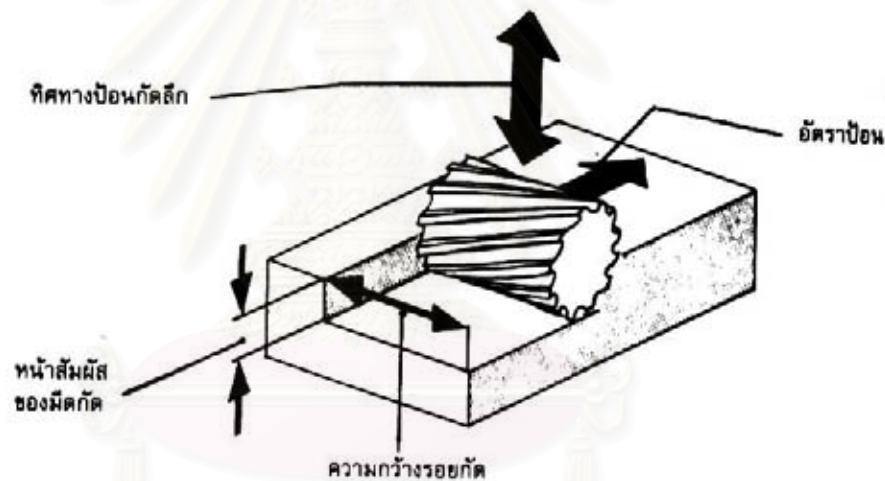
ความลึกหรือความกว้างของรอยตัด หมายถึง ระยะทางที่มีดกัดจมลึกเข้าไปในผิวงานในทิศทางป้อนกัด (Infeed direction)

ความลึกของรอยกัด (Depth of cut) จะใช้สำหรับงานกัดด้วยเครื่องกัดเพลตตั้ง แสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ความลึกขรอยกัด

ความกว้างขรอยกัด (Width of cut) ใช้กับงานกัดด้วยเครื่องกัดเพลาอน แสดงในรูปที่ 2.23 เช่นงานกัดราบ (Peripheral milling)



รูปที่ 2.23 ความกว้างขรอยกัด

หน้าสัมผัสของมีดกัด (Cutter engagement) คือ ความกว้างขรอยกัดที่สัมผัสอยู่กับชิ้นงาน โดยวัดในระนาบการทำงาน ในทิศทางที่ตั้งฉากกับอัตราป้อน ตามรูปที่ 2.22 และ 2.23 ความลึกหรือความกว้างขรอยกัด และหน้าสัมผัสของมีดกัด เป็นผลมาจาก

มีดกัดที่เลือกใช้จะต้องมีขนาดไม่ยาวเกินความจำเป็นในการทำงานกัดนั้นๆ มีดกัดที่ยังมีขนาดยาว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดชิ้นงานมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการโก่งของด้ามมีดกัด

ในการเลือกใช้งานต้องพิจารณาถึงข้อมูลอื่นๆ ที่สัมพันธ์กัน ได้แก่ ความเร็วตัดเฉือนของมีดกัดที่ใช้ที่เป็นไปได้กับวัสดุชิ้นงานที่กัด และขนาดผิวสำเร็จที่ต้องการ

2.4. อุปกรณ์ตรวจจู้แรงคิสท์เลอร์ รุ่น 9255B

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้อุปกรณ์ตรวจจู้แรง ของ คิสท์เลอร์ ในการเป็นมาตรฐานสำหรับวัดแรงกัด รายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงคิสท์เลอร์ รุ่น 9255B มีดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงคิสท์เลอร์

ช่วงการวัด	F_x และ F_y	-20...20	kN
	F_z	-10...40	kN
การรับภาระเกิน	F_x และ F_y	-24/24	kN
	F_z	-12/48	kN
ความไว	F_x และ F_y	≈ -8	pC/N
	F_z	≈ -3.7	pC/N
ความเป็นเชิงเส้น		$\leq \pm 1$	%FSO
ความถี่ธรรมชาติ	$f_o(x, y, z)$	3	KHz
อุณหภูมิการทำงาน		0...70	$^{\circ}C$
น้ำหนัก		52	kg

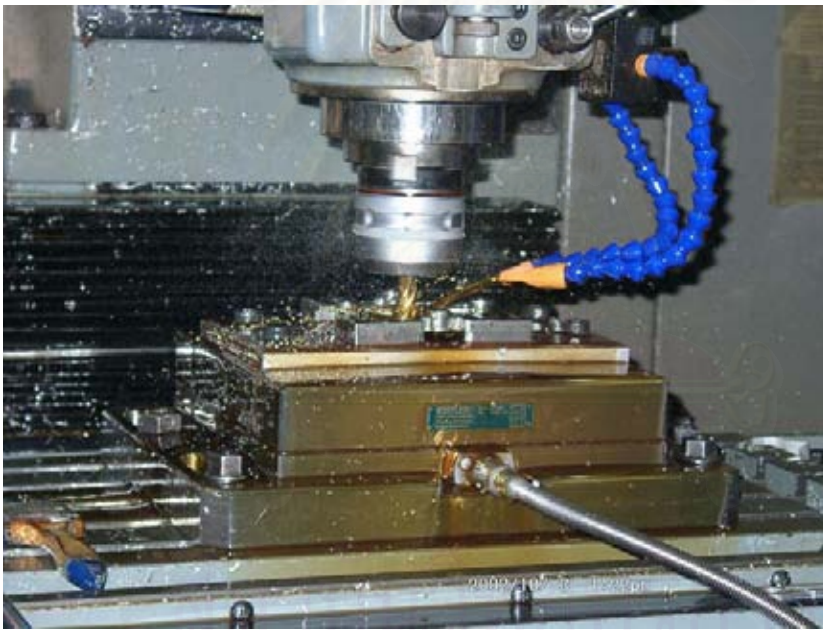
รูปที่ 2.24 แสดงอุปกรณ์ตรวจจู้แรงคิสท์เลอร์ และรูปที่ 2.25 จะแสดงมิติ เวลาใช้งานจะนำมาวางติดบนโต๊ะของเครื่องกัด CNC ตามรูปที่ 2.26 ในการวัดสัญญาณจะต้องใช้งานร่วมกับชาร์จแอมพลิฟายเออร์ (Charge amplifier) รุ่น 2825A1-1 (ตามรูป 2.27) และต่อเข้ากับการ์ด ADC เพื่อให้แสดงผล เก็บข้อมูล และประมวลผลผ่านทางโปรแกรม DynoWare™

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

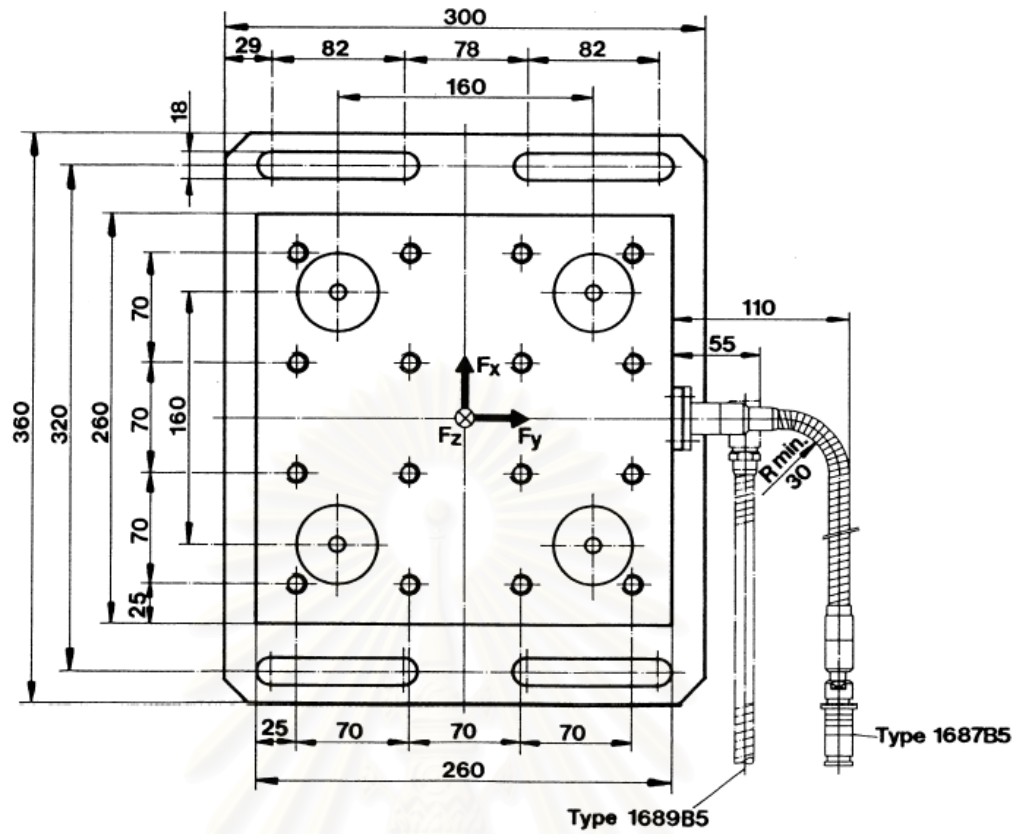


Type 9255B

รูปที่ 2.24 อุปกรณ์ตรวจจู้แรง Kistler รุ่น 9255B



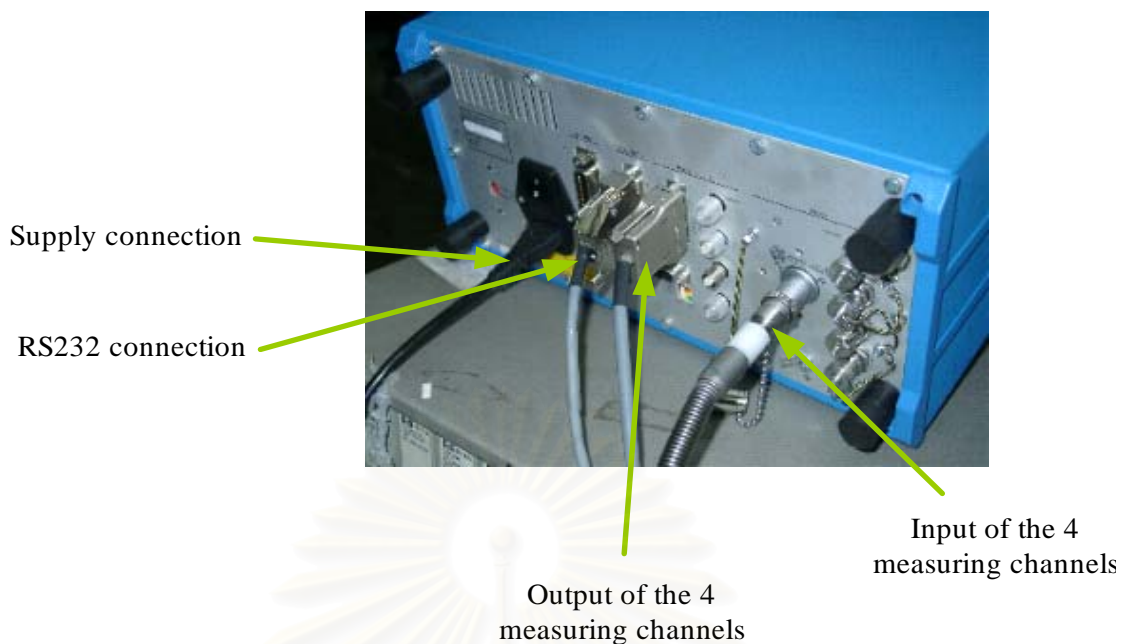
รูปที่ 2.25 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจู้แรงคิสท์เลอร์ รุ่น 9255B ที่โต๊ะของเครื่องกัดซีเอ็นซี



รูปที่ 2.26 ขนาดของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงคิส์ทีเลอร์ รุ่น 9255B ในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 2.27 ชาร์จแอมพลิฟายเออร์ รุ่น 2825A1-1

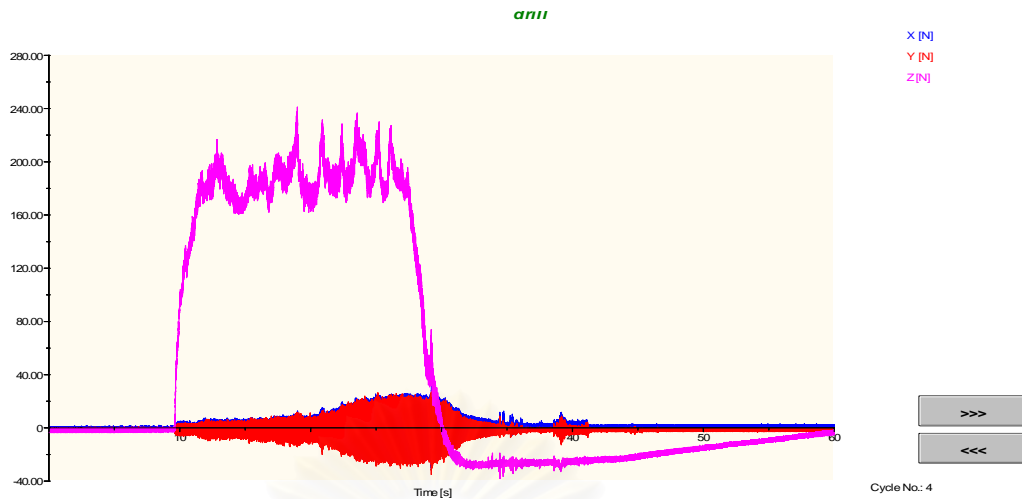


รูปที่ 2.28 ชาร์จแอมป์ไฟเซอร์ และการต่อเชื่อมสาย

จากรูปที่ 2.28 จะเห็นการเชื่อมต่อสายระหว่างตัวอุปกรณ์วัดแรงจะต่อสายซิลด์เข้ามาเป็น อินพุท 4 ช่องสัญญาณ และเอาท์พุทจะออกไปต่อเข้ากับการ์ด ADC เพื่อประมวลผลสัญญาณทาง คอมพิวเตอร์

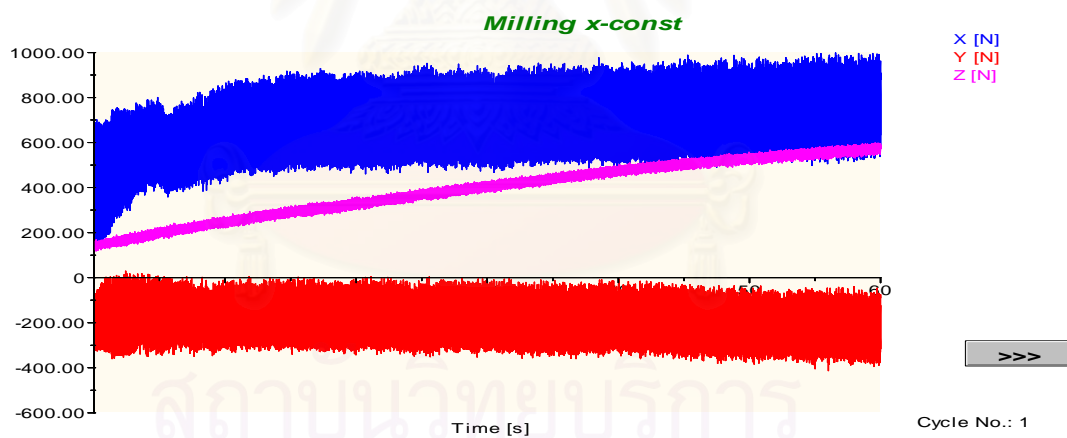
รูปที่ 2.29 และ 2.30 เป็นตัวอย่างของแรงตัดที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้ โดยผ่านทาง โปรแกรมสำเร็จรูป DynoWare™ ซึ่งมาพร้อมกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรง โดยรูปที่ 2.29 เป็นการวัดแรง ตัดในการเจาะ โดยใช้ดอกสว่านเป็นเหล็กอบสูง (HSS) เส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ความเร็ว รอบของเพลาเม็ดกัด 1200 rpm และอัตราป้อน 40 mm/min วัสดุชิ้นงานคืออลูมิเนียม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างแรงกัตที่ได้จากการเจาะ ตามเงื่อนไขการตัดข้างบน

รูปที่ 2.30 เป็นการวัดแรงตัดในการกัด โดยใช้เฟลตเอนมิล (Flat end mill) เป็นเหล็กขอบสูง (HSS) เส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของเพลา มีดกัต 1000 rpm และอัตราป้อน 25 mm/min ความลึกการกัด 6 มิลลิเมตร และวัสดุชิ้นงานเป็นอลูมิเนียม



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างแรงกัตแบบเซาะร่อง ตามเงื่อนไขการกัดข้างบน

บทที่ 3

การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

3.1 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

การออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนตามหลักการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้ทั่วไป (พรจิต ประทุมสุวรรณ, 2537) คือ

3.1.1 ส่วนตรวจจับและเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงาน (Detection stage)

ส่วนนี้เป็นส่วนแรกของระบบการวัดโดยทั่วไป มีหน้าที่ในการวัดคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งที่ต้องการตรวจวัด แล้วเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเหล่านั้นให้อยู่ในรูปของพลังงาน หรือสัญญาณที่ส่งไปส่วนต่อไป

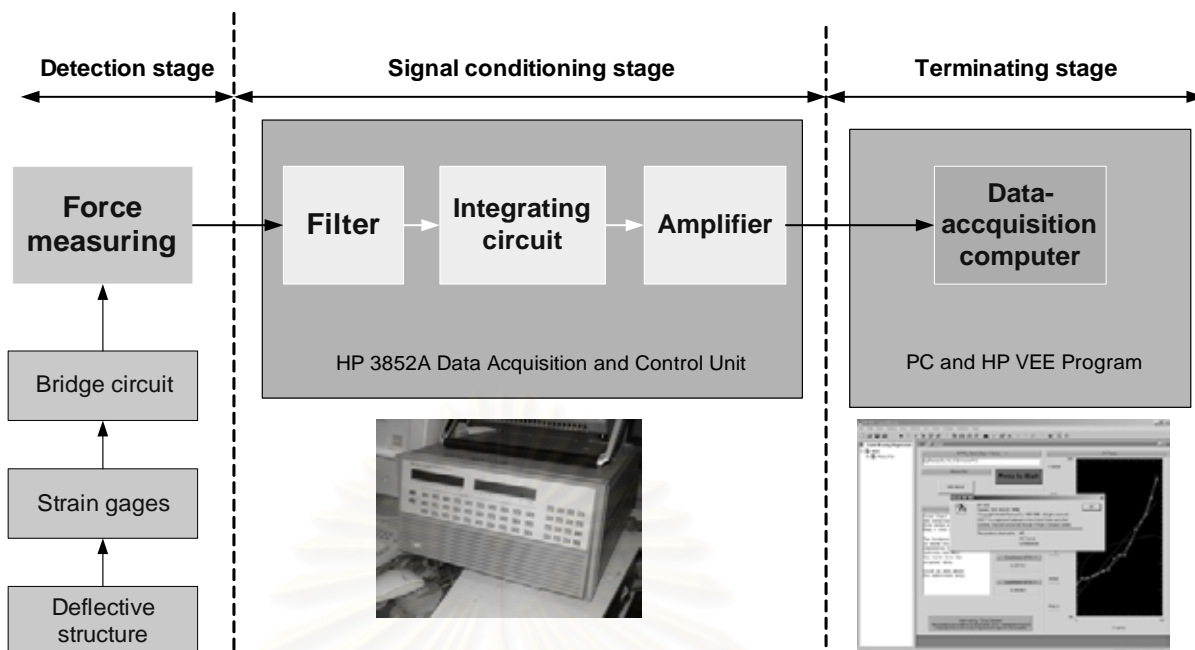
3.1.2 ส่วนปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณ (Signal conditioning stage)

ข้อมูลหรือสัญญาณจากส่วนแรกจะส่งมาส่วนนี้ เพื่อทำการปรับปรุงและกำหนดเงื่อนไขของสัญญาณก่อนนี้จะส่งให้ส่วนต่อไป ตัวอย่างการปรับปรุงเช่น การขยายสัญญาณ เมื่อสัญญาณมีขนาดต่ำเกินไป การลดสัญญาณรบกวน เป็นต้น

3.1.3 ส่วนรูปแบบของการแสดงผล (Terminating readout stage)

เป็นส่วนที่ทำให้การวัดบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่เราต้องการ จะต่อเข้ากับอุปกรณ์แสดงผล เช่น เข็มชี้ เครื่องวัด เครื่องบันทึกค่า คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ประมวลผล (Processor) อุปกรณ์ควบคุม (Controller) เป็นต้น

ในอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในส่วนแรกจะเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างที่รับแรงมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยใช้สเตรนเกจเป็นตัวตรวจวัด และเนื่องจากสัญญาณไฟฟ้ามีค่าน้อยเกินกว่าที่จะอ่านได้โดยตรงจึงได้ใช้วงจรบริดจ์ในการอ่านค่า การออกแบบในส่วนนี้กล่าวต่อไปในหัวข้อ 3.2 .ในส่วนปรับปรุงคุณภาพของสัญญาณใช้ HP 3852 A data acquisition and control unit รายละเอียดจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5 และใช้โปรแกรม HP VEE สำหรับการเชื่อมต่อข้อมูล และแสดงผล



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

3.2 การออกแบบโครงสร้าง

3.2.1 หลักการพิจารณาการออกแบบโครงสร้าง

3.2.1.1 การเลือกรูปของโครงสร้าง ต้องให้อยู่ในช่วงอิลาสติก เพื่อไม่ให้โครงสร้างเสียรูปถาวร

3.2.1.2 ความถี่ธรรมชาติ ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างที่ใช้ ซึ่งโดยทั่วไปควรมีค่ามากกว่า 10 เท่าของความถี่ที่ใช้งาน เพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้โครงสร้างเกิดการไหวอันเนื่องจากการเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) ขึ้น

3.2.1.3 ขนาดของสเตรนในบริเวณที่ติดสเตรนเกจ ต้องไม่มากเกินไปจนอาจทำให้โครงสร้างเสียรูปถาวร และไม่น้อยจนทำให้ไม่สามารถวัดสัญญาณได้

3.2.1.4 การกระจายของสเตรนมีขนาดสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ที่ติดสเตรนเกจ เพื่อให้ได้สัญญาณสูงสุด และเพิ่มอายุการใช้งานเพราะลดความล้าที่เกิดในสเตรนเกจ

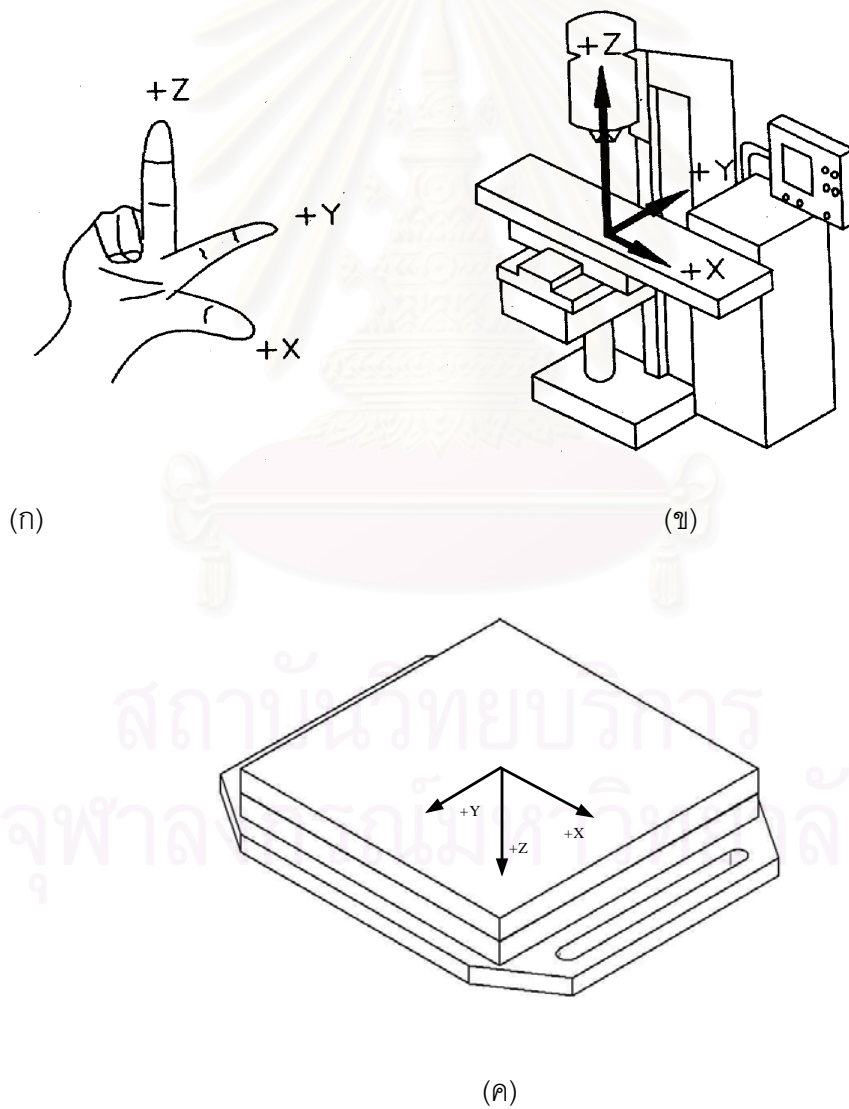
3.2.1.5 ออกแบบให้ง่ายต่อการสร้าง และง่ายต่อการติดสเตรนเกจ ในการออกแบบโครงสร้างต้องพิจารณาถึงรูปร่างที่เป็นไปได้ในการสร้าง เพราะบางรูปร่างอาจจะทำได้ยากหรืออาจทำไม่ได้เลยเนื่องจากไม่มีเครื่องมือหนักที่จะใช้ทำ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงความยากง่ายของการติดตั้งสเตรนเกจเนื่องจากเป็นส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเช่นกัน

3.2.1.6 การรับภาระเกิน ในการออกแบบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเพื่อการใช้งานนั้น บางครั้งอิทธิพลจากสภาพแวดล้อม หรือ เหตุการณ์ที่ไม่ได้คาดฝันอาจทำให้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงทำงานผิดปกติ ชำรุด หรือเสียหายได้ จึงจำเป็นต้องมีการเผื่อช่วงใช้งานให้มากกว่าปกติ

3.2.1.7 ความต้องการด้านความปลอดภัย ต้องป้องกันฝุ่นละออง ไอน้ำ หรือน้ำได้ เป็นต้น

3.2.1.8 ปัจจัยทางเศรษฐศาสตร์ ปัจจัยที่พิจารณาประกอบด้วย อายุการใช้งานและความคงทน ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและบำรุงรักษา และวัสดุ อุปกรณ์ ที่จัดซื้อต้องหาได้ง่าย

3.2.2 แนวแกนของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง



รูปที่ 3.2 ระบบพิกัดฉาก (ก) กฎมือขวา (ข) ระบบพิกัดฉากของเครื่องกัด (ค) ระบบพิกัดฉากของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

แนวแกนของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงที่สร้างขึ้นได้เป็นไปตามกฎมือขวา และสอดคล้องกับเครื่องจักร และกำหนดให้ไปในทิศทางเดียวกับอุปกรณ์ตรวจจู้แรงคิสท์เลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2

3.3.3 การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงเพื่อให้อรับแรงดัด

ในการออกแบบได้พิจารณาถึงลักษณะการรับแรงของคาน (Beam-like configuration) ซึ่งจะมารับโมเมนต์ดัด ด้วยเหตุว่าโดยธรรมชาติของคานนั้นคานจะเกิดความเครียดมากในขณะที่ใส่แรงเข้าไปน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกรกดด้วยแรงกดลงบนเสา (Column) และที่สำคัญก็คือคานที่สมมาตรนั้นจะมีพื้นผิวสองด้านที่จะเกิดความเครียดเท่ากัน เมื่อรับแรง แต่จะมีเครื่องหมายต่างกัน ทำให้สามารถต่อวงจรบริดจ์แบบฮาล์ฟบริดจ์ได้ และเนื่องจากคานเป็นผิวเรียบทำให้ง่ายต่อการติดสเตรนเกจได้

3.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือหนึ่งที่ใช้ในการหาผลเฉลยเชิงตัวเลขซึ่งจะนำมาใช้แทนวิธีการหาผลเฉลยแบบแม่นยำ เพราะเหตุว่าการหาผลเฉลยแบบแม่นยำในลักษณะสมการที่ซับซ้อนทำได้ยาก

งานทางด้านวิศวกรรมศาสตร์นั้นเกี่ยวข้องกับการคำนวณต่าง ๆ เป็นจำนวนมากซึ่งจะต้องเกี่ยวข้องกับการแก้ระบบสมการต่าง ๆ ทั้งในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) หรือในรูปสมการอินทิกรัล (Integral equation) ซึ่งก็มีหลายรูปแบบแล้วแต่ลักษณะปัญหาหรืองานแต่ละงาน การที่จะแก้ระบบสมการเหล่านี้เพื่อให้ได้ผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution) นั้นทำได้ยากมากหรืออาจไม่สามารถหาได้ จึงได้มีการนำเอาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหานี้ ซึ่งจะช่วยให้สามารถประหยัดเวลาในการคำนวณ ช่วยในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ให้เป็นไปอย่างรวดเร็ว ประหยัดค่าใช้จ่าย และเมื่อเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว ทำให้มีแนวโน้มว่าจะมีการนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มากขึ้น

3.3.1 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 2537)

ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีดังนี้ คือ แบ่งลักษณะของปัญหาที่จะคำนวณออกเป็นชิ้นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (Elements) โดยในแต่ละเอลิเมนต์ก็จะมีทางเลือกฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation function) เพื่อใช้แสดงถึงปริมาณที่ต่อเนื่องกัน (Continuous quantity) ต่อมาก็ทำการประยุกต์สมการเชิงอนุพันธ์ (Differential equation) ที่

เกี่ยวข้องกับปัญหาลงไปในแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งเอลิเมนต์เหล่านี้จะมีจุดที่เชื่อมต่อกันที่เรียกว่า จุดต่อ (Nodes) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะใช้คำนวณหาค่าตัวแปรตาม (Dependent variables) ที่ต้องการ จากนั้นนำระบบสมการของแต่ละเอลิเมนต์มารวมกันให้เป็นระบบสมการชุดใหญ่ และเมื่อใส่เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ของปัญหาลงไป ก็จะทำให้สามารถแก้ระบบสมการรวมทำให้รู้ค่าตัวแปรตามที่จุดต่อต่าง ๆ ตามที่ต้องการ ส่วนตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดต่อนั้นสามารถหาได้โดยการใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่เลือกให้ต่อไป

จะเห็นว่าวิธีการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า คำตอบที่ได้ของแต่ละเอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องสอดคล้องไปกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งหมายความว่าหลักการของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะเริ่มต้นจากการพิจารณาที่แต่ละเอลิเมนต์ โดยสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาจะต้องสอดคล้องไปกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ก่อนที่จะนำมารวมกันเป็นระบบสมการรวมแล้วจึงค่อยไปแก้ระบบสมการดังกล่าวต่อไป จึงเห็นได้ว่าความแม่นยำของคำตอบที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของ เอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้น และการสมมุติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation functions) ว่ามีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ส่วนสำคัญก็คือ การใส่ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขตและแรงภายนอกที่มากกระทำมีความถูกต้องหรือไม่

3.3.2 การประยุกต์ใช้งานกับโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันมีโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่หลายตัวด้วยกัน ซึ่งแต่ละตัวก็จะมีลักษณะของการติดต่อกับผู้ใช้ (User interface) ที่แตกต่างกัน ทำให้มีความยากง่ายในการใช้งานต่างกันด้วย แต่ก็จะมีหลักการพื้นฐานในการคำนวณที่คล้ายคลึงกัน โดยก่อนที่จะสามารถนำโปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ปัญหาได้จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นมาเสียก่อน โดยอาจแบ่งขั้นตอนในการทำแบบจำลองนี้ออกเป็น 4 ขั้นตอนด้วยกัน

1. สร้างแบบจำลองชิ้นงาน โดยหากแบบจำลองชิ้นงานมีความซับซ้อนเราอาจจะสร้างแบบจำลองนี้จากโปรแกรม CAD แล้วจึงอิมพอร์ตเข้ามายังโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ก็ได้
2. กำหนดคุณสมบัติของเอลิเมนต์และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้
3. ทำการใส่เอลิเมนต์และจุดต่อลงไปบนแบบจำลองชิ้นงาน
4. ใส่ค่าเงื่อนไขขอบเขตและแรงภายนอกที่มากกระทำ

หลังจากสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสร็จแล้วก็พร้อมที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไปโดยจะต้องเลือกวิธีวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับปัญหา

3.3.3 การวิเคราะห์แบบลิเนียร์สแตติก (Linear static analysis)

ในโปรแกรมสำเร็จรูปก็จะมีอยู่หลายวิธีด้วยกันแต่ในการวิเคราะห์โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้จะเป็นการวิเคราะห์แบบลิเนียร์สแตติก ซึ่งก็เป็นการวิเคราะห์แบบพื้นฐานที่สุด โดยคำว่า ลิเนียร์ (Linear) ก็หมายถึงว่า ค่าที่ได้จากการคำนวณเช่น ค่าระยะเคลื่อนที่หรือค่าความเค้น จะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแรงภายนอกที่มากระทำ ส่วนคำว่า สแตติก (Static) ก็หมายถึงแรงภายนอกที่กระทำนั้นไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาหรือว่าการแปรผันไปตามเวลามีผลน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถละทิ้งได้ โดยการวิเคราะห์แบบสแตติกนี้จะมีสมการดังนี้

$$[K]\{u\} = \{f\} \quad (3.1)$$

โดยที่ K คือ สติฟเนสเมตริกซ์ (stiffness matrix) ของระบบซึ่งจะมีค่าขึ้นกับรูปร่างและคุณสมบัติต่าง ๆ

u คือ เวกเตอร์ของระยะเคลื่อนที่ซึ่งโปรแกรมจะทำการคำนวณออกมา

f คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอกซึ่งเราจะเป็นผู้กำหนด

หลังจากที่ทำการคำนวณระยะเคลื่อนที่ได้แล้ว โปรแกรมก็จะใช้ค่าที่ได้นำไปคำนวณเป็นค่าอื่น ๆ เช่น ความเค้น ความเครียด แรงปฏิกิริยา ได้ต่อไป ซึ่งในการวิเคราะห์แบบนี้จะตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าโครงสร้างจะอยู่ในสภาวะสมดุล หมายถึงว่า ในกรณีที่เอาแรงภายนอกที่มากระทำออก ก็จะทำให้โครงสร้างกลับไปสู่ตำแหน่งเดิมเหมือนเมื่อตอนยังไม่เสียรูป

3.3.4 การวิเคราะห์แบบนอร์มอลโหมด (normal modes analysis)

การวิเคราะห์แบบนี้เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และโหมดเซพ (Mode shape) ของโครงสร้าง โดยความถี่ธรรมชาติก็คือ ค่าความถี่ที่ทำให้โครงสร้างมีแนวโน้มที่จะเกิดการสั่นได้ง่ายถ้าได้มีการรบกวนเกิดขึ้น และลักษณะการเสียรูปของโครงสร้างที่ความถี่ธรรมชาตินั้นก็คือ โหมดเซพ ของโครงสร้างนั่นเอง โดยอาจเรียกการวิเคราะห์แบบนอร์มอลโหมดได้อีกแบบว่า การวิเคราะห์แบบเรียลไอเกนแวลู (Real eigenvalue analysis) โดยเราจะหาค่าไอเกนแวลู (Eigenvalue) และไอเกนเวกเตอร์ (eigenvector) เพื่อทำการแก้สมการการสั่นแบบไม่มีความหน่วง (Undamped free vibration) ตามสมการที่ 3.2

$$[K - \lambda_i M]\{\phi_i\} = 0 \quad (3.2)$$

โดยที่ K คือ สติฟเนสเมตริกซ์ (stiffness matrix) ของระบบ

M คือ แมสเมตริกซ์ (mass matrix) ของระบบ

λ_i คือ ไอเกนเวลลูย์

ϕ_i คือ ไอเกนเวกเตอร์

และค่าไอเกนเวลลูย์กับความถี่ธรรมชาติจะมีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 3.3

$$f_i = \sqrt{\lambda_i} / 2\pi \quad (3.3)$$

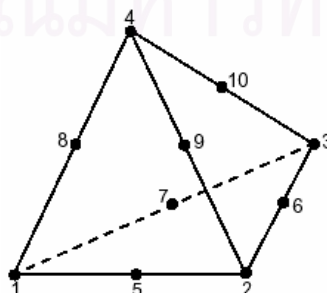
โดยที่ f_i คือ ความถี่ธรรมชาติของระบบ

3.4 การวิเคราะห์โครงสร้างโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

3.4.1 การเลือกชนิดของเอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์นี้เลือกใช้โซลิดเอลิเมนต์ เนื่องจากรูปร่างที่ออกแบบมีความซับซ้อน จึงยากที่จะทำการสมมุติเพื่อทำการวิเคราะห์ปัญหาใน 2 มิติ เช่น ลักษณะปัญหาความเค้นในระนาบ (Plane stress) ความเครียดในระนาบ (Plane strain) หรือแบบสมมาตรรอบแกน (Axisymmetry) ได้ การใช้โซลิดเอลิเมนต์ยังมีข้อดีที่สามารถนำรูปร่างจริงที่ออกแบบ โดยรวมฟิลเลต (Filletts) การลบมุม (Chamfers) มาวิเคราะห์ และนอกจากนั้นผลที่ได้ยังสามารถตีความได้ง่าย

ชนิดของเอลิเมนต์ที่เลือกใช้จะเป็นเอลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า 10 จุดต่อ (Nodes) ดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 โดยในแต่ละจุดต่อจะมีองศาอิสระของการเคลื่อนที่อยู่ที่ 3 ซึ่งจะมีจุดต่อที่มุม 4 จุด และจุดต่อตรงกลางอีก 6 จุด ทำให้ฟังก์ชันการประมาณภายในเป็นแบบพาราโบลิก ผลที่ได้แม่นยำขึ้นอยู่ในระดับเดียวกับเอลิเมนต์ทรงหกหน้า 8 จุดต่อ (V. Adams and A Askenazi, 1998) ในขณะที่การตีเมชของเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 10 โหนด ง่ายและประหยัดเวลากว่า



รูปที่ 3.3 เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าแบบ 10 โหนด

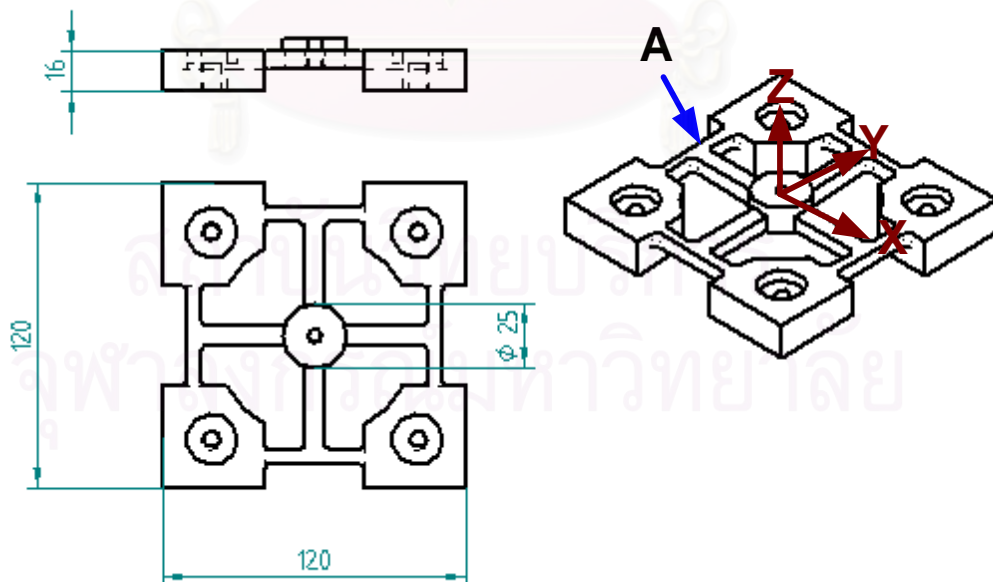
วัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล้าคาร์บอน เนื่องจากมีความแข็งแรงพอที่จะรับแรงที่เกิดจากการกัดได้ และหาได้ง่าย คุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของเหล็กกล้าคาร์บอนที่ใช้ ในหน่วย SI

โมดูลัสของยังก์	$1.9995E+11 \text{ N/mm}^2$
โมดูลัสเฉือน	$7.5842E + 10 \text{ N/mm}^2$
อัตราส่วนปัวซอง	0.32

3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบที่ 1

โครงสร้างนี้มีลักษณะดังรูปที่ 3.4 มีลักษณะเป็นก้าน 4 ก้าน สำหรับรับแรงที่มากระทำในทิศทางต่างๆ โดยที่มีบริเวณ A ทั้ง 4 ด้านในรูปนั้นช่วยลดผลของการรับแรงกดในทิศทางตามแกน x เพื่อลดการเกิดความเครียดเนื่องจากแรงกดซึ่งจะมีผลต่อการรับแรงดัดของโครงสร้าง



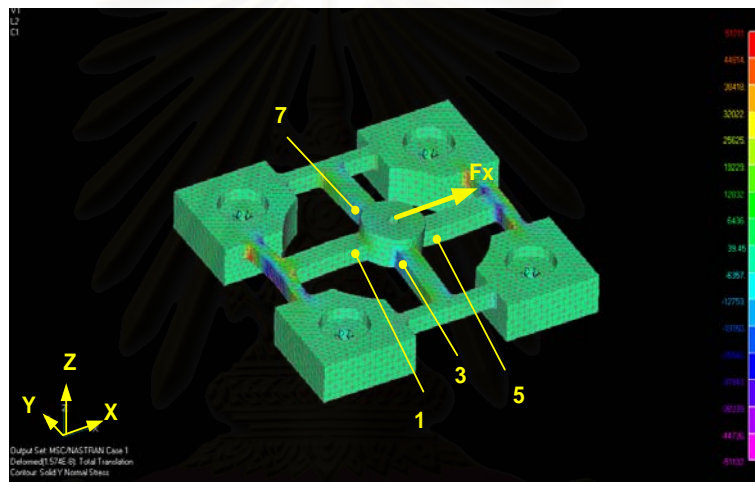
รูปที่ 3.4 โครงสร้างแบบที่ 1

ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต

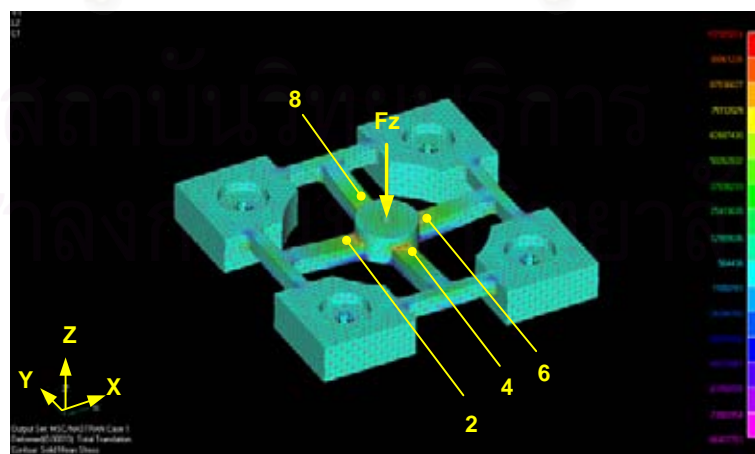
รูป 4 รูปบริเวณมุมทั้งสี่ของโครงสร้างมีไว้สำหรับยึดนอตเข้ากับส่วนฐานของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง ดังนั้นผิวด้านในรูปนั้นจะถูกจำกัดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ในทุกๆแนว

ลักษณะของโหลดที่มากกระทำกับอุปกรณ์ตรวจจู้แรงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

โหลดที่มากกระทำกับอุปกรณ์ตรวจจู้แรงนี้จะกระทำที่พื้นผิวด้านบนของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง ทั้งนี้จะใส่โหลดทั้งหมด 3 ลักษณะอันเป็นแรงที่ต้องการวัดคือ ใส่แรงในแนวแกน x y และ z ตามลำดับ ทั้งนี้การใส่แรงในแนวแกน x และ y จะมีลักษณะเหมือนกัน โดยการใส่โหลดบนโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 และ 3.6



รูปที่ 3.5 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน y เมื่อใส่แรงในแนวแกน x



รูปที่ 3.6 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน z เมื่อใส่แรงในแนวแกน z

ตารางที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างที่ 1 ที่ได้จากรีไฟไนต์เอลิเมนต์

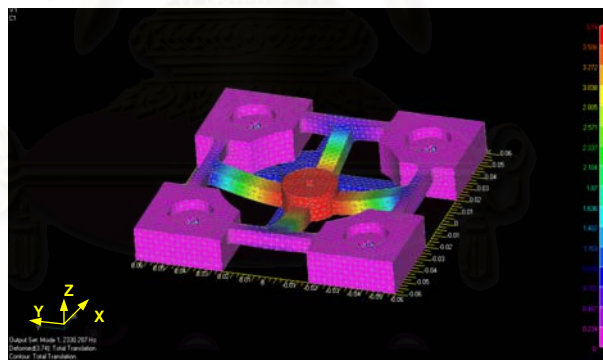
ชนิดโหลด	ตำแหน่ง	ระยะเคลื่อนที่ (Micron/N)	ความเค้นมากที่สุด (Mpa/N)	ความเครียด (μ strain/N)
F_x	3,7	0.050	0.009	0.005
F_y	1,5	0.050	0.009	0.005
F_z	2,4,6,8	0.065	0.085	0.177

โดยที่ความเค้นมากที่สุดคือ Von Mises stress ซึ่งสามารถหาได้ตามสมการที่ (3.1) ดังนี้

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2}{2}} \quad (3.1)$$

ความถี่ธรรมชาติ

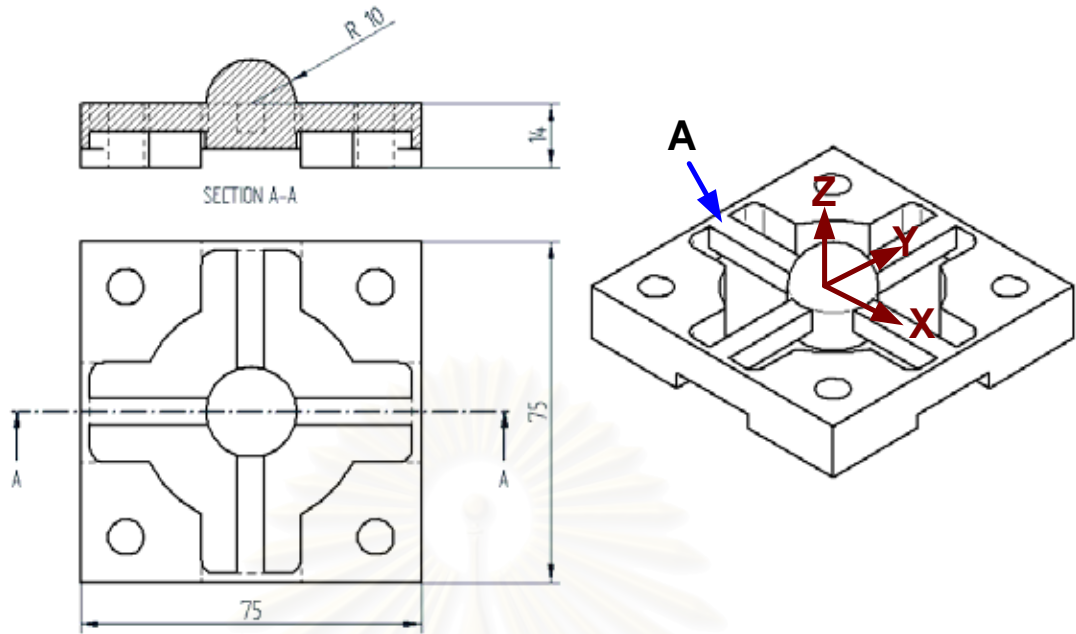
ความถี่ธรรมชาติและโหมดเซพโหมดที่ 1 ที่ความถี่ 2330 Hz โหมดที่สอง 5602 Hz และโหมดที่ 3 5604 Hz



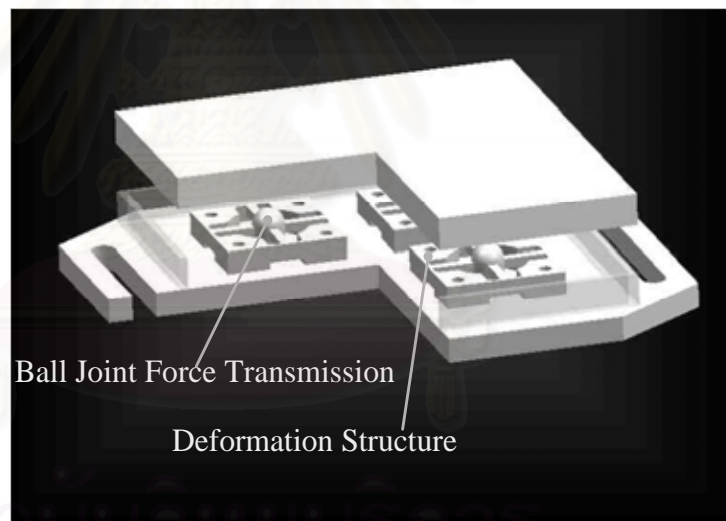
รูปที่ 3.7 ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 2330 Hz ของโครงสร้างที่ 1

3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบที่ 2

ลักษณะโครงสร้างนี้คล้ายแบบที่หนึ่ง แต่มีขนาดเล็กกว่า เพื่อทำให้ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างสูงขึ้น และความไวของการวัดสูงขึ้น ลักษณะการรับแรงจะใช้โครงสร้างนี้ 4 ตัว วางไว้ที่มุมแต่ละด้าน ดังแสดงในรูป 3.8 (ข)



(ก)



(ข)

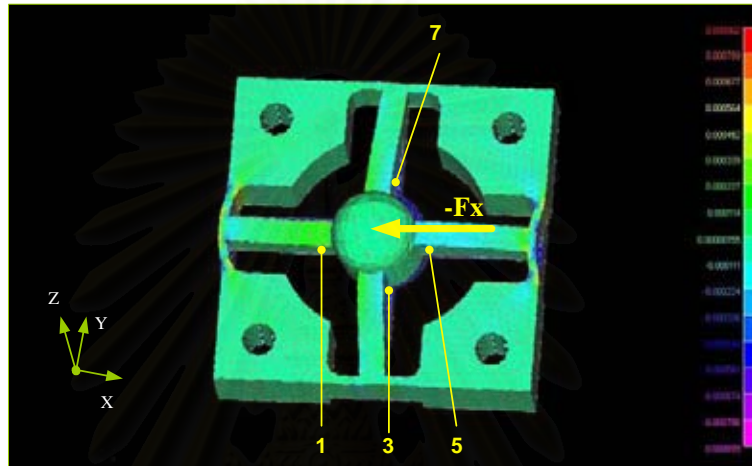
รูปที่ 3.8 โครงสร้างแบบที่ 2

ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต

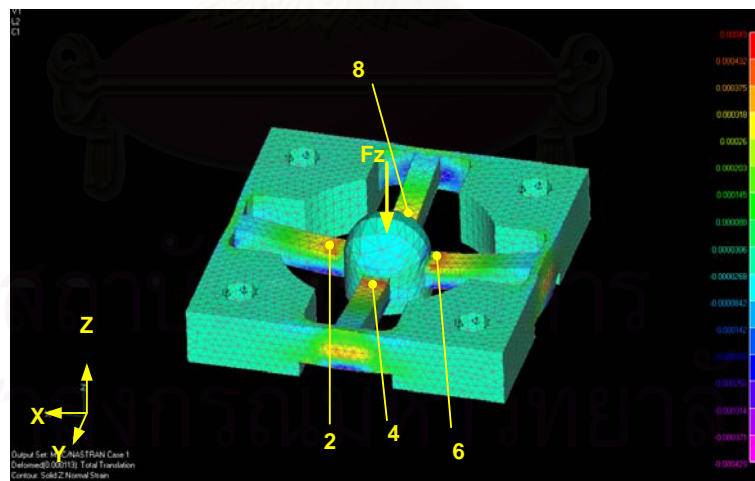
ลักษณะเงื่อนไขขอบเขต เป็นเช่นเดียวกับโครงสร้างแรกคือ รูป 4 รูปบริเวณมุมทั้งสี่ของโครงสร้างมีไว้สำหรับยึดแน่นเข้ากับส่วนฐานของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง ดังนั้นผิวด้านในรูนั้นจะถูกจำกัดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ในทุกๆแนว

ลักษณะของโหลดที่มากกระทำกับอุปกรณ์ตรวจจู้แรงในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

โหลดที่มากกระทำกับอุปกรณ์ตรวจจู้แรงนี้จะกระทำที่บริเวณทรงกลมด้านบนของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง เพื่อลดผลกระทบของการเกิดโมเมนต์ โหลดที่ใส่ทั้งหมดมี 3 ลักษณะคือแรงในแนวแกน x y และ z ตามลำดับ ทั้งนี้การใส่แรงในแนวแกน x และ y จะมีลักษณะเหมือนกัน โดยการใส่โหลดบนโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง และการเสียรูปของโครงสร้าง มีลักษณะดังรูปที่ 3.9 และ 3.10



รูปที่ 3.9 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน y เมื่อใส่แรงในแนวแกน x



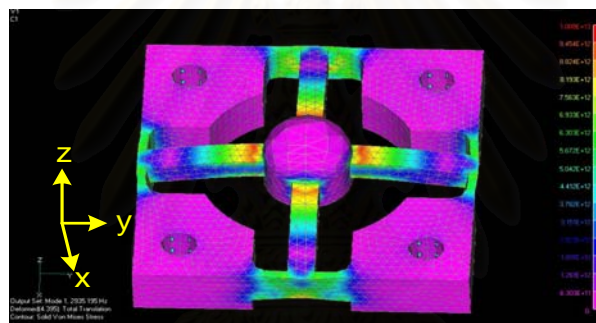
รูปที่ 3.10 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดในแนวแกน z เมื่อใส่แรงในแนวแกน z

ตารางที่ 3.2 แสดงผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างที่ 2 ที่ได้จากรีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชนิดโหลด	ตำแหน่ง	ระยะเคลื่อนที่ (Micron/N)	ความเค้น (Mpa/N)	ความเครียด (μ strain/N)
F_x	3,7	0.028	0.101	0.200
F_y	1,5	0.028	0.101	0.200
F_z	2,4,6,8	0.106	0.253	0.432

ความถี่ธรรมชาติ

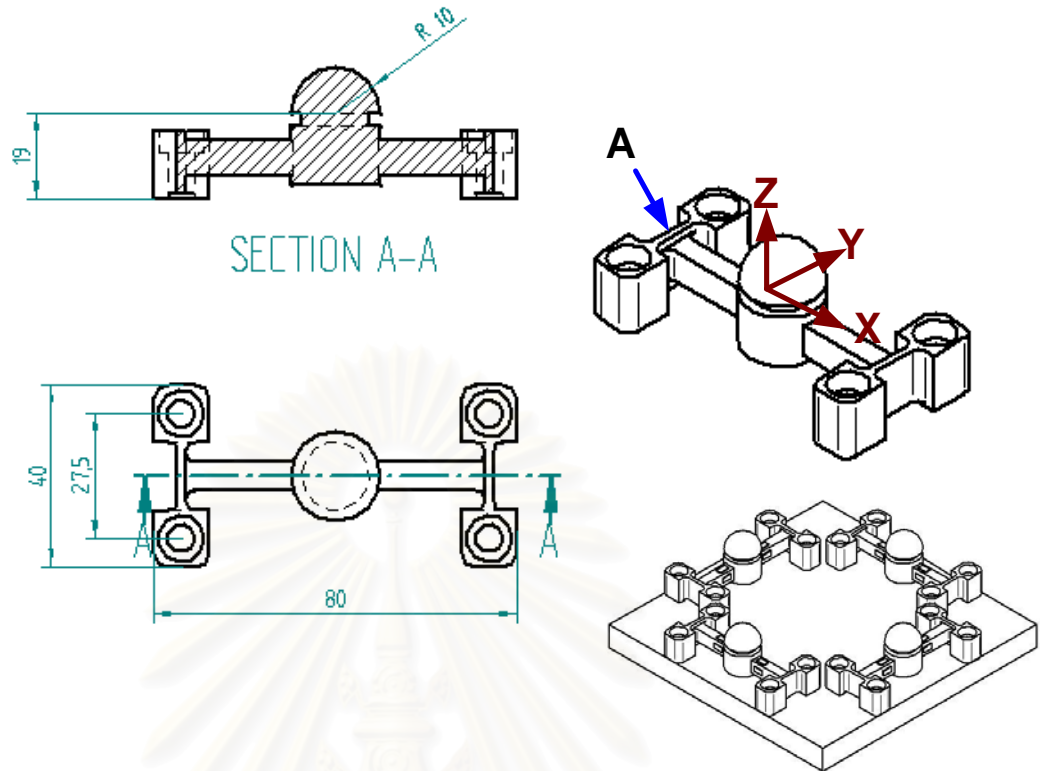
ความถี่ธรรมชาติที่ได้โหมดที่ 1 ที่ความถี่ 2935 Hz โหมดที่สอง 6051 Hz และโหมดที่ 3 6058 Hz



รูปที่ 3.11 ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 2935 Hz ของโครงสร้างที่ 2

3.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างแบบที่ 3

โครงสร้างแบบที่ 3 จะมีขนาดใกล้เคียงกับแบบที่ 2 แต่จะลดจำนวนก้านลงให้เหลือเพียง 2 ก้าน ตามรูปที่ 3.12 โดยบริเวณ A มีไว้ลดผลของการเกิดสเตรนเนื่องจากแรงกดเช่นกัน



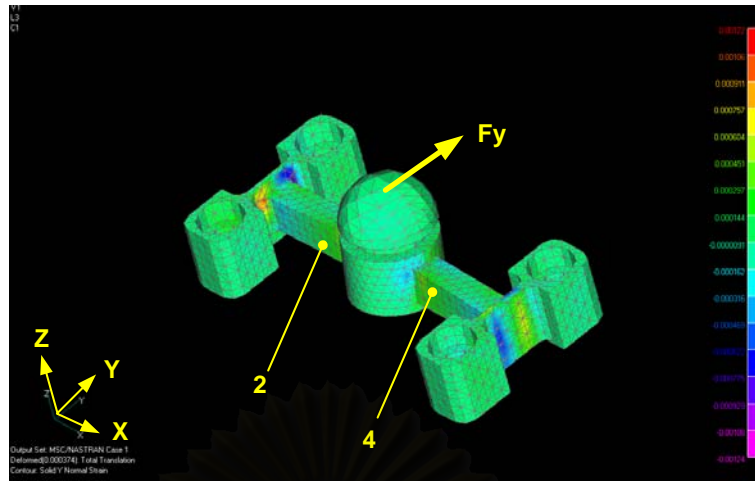
รูปที่ 3.12 โครงสร้างแบบที่ 3

ลักษณะของเงื่อนไขขอบเขต

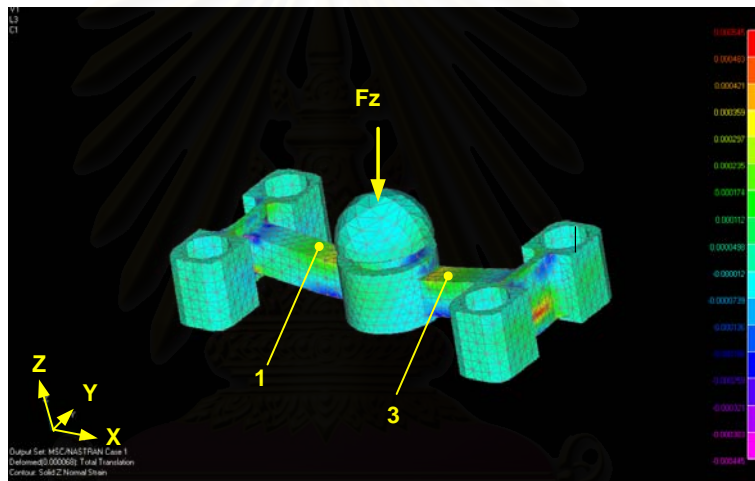
รูปทั้ง 4 บริเวณด้านข้างของโครงสร้างได้ยึดแน่นเข้ากับส่วนฐานของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็ก ดังนั้นผิวด้านในรูปจะถูกลำกวดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ในทุกๆแนว

ลักษณะของโหลดที่มากกระทำกับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

โหลดที่มากกระทำกับอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กนี้จะกระทำที่พื้นผิวด้านบนที่เป็นทรงกลม โหลดที่ใส่มี 3 ลักษณะคือ ใส่แรงในแนวแกน x y และ z ตามลำดับ ทั้งนี้การใส่แรงในแนวแกน x และ y จะมีลักษณะเหมือนกัน การใส่โหลดบนโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.13 และ 3.14



รูปที่ 3.13 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดขึ้นในแนวแกน x เมื่อใส่แรงในแนวแกน y



รูปที่ 3.14 การเสียรูปและสเตรนที่เกิดขึ้นในแนวแกน z เมื่อใส่แรงในแนวแกน z

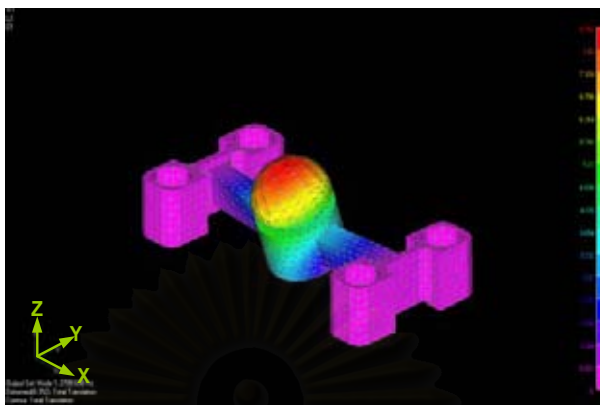
ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ของโครงสร้างที่ 3 ที่ได้จากรีไฟไนต์เอลิเมนต์

ชนิดโหลด	ตำแหน่ง	ระยะเคลื่อนที่ (Micron/N)	ความเค้น (Mpa/N)	ความเครียด (μ strain/N)
F_x	2,4*	0.063	0.263	0.297
F_y	2,4*	0.063	0.263	0.297
F_z	1,3	0.067	0.275	0.421

* ขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางตัวของโครงสร้าง ตามรูปที่ 3.12

ความถี่ธรรมชาติ

ความถี่ธรรมชาติใน 3 โหมดแรก มีความถี่ดังนี้ 2800 Hz 3780 Hz และ 4974 Hz



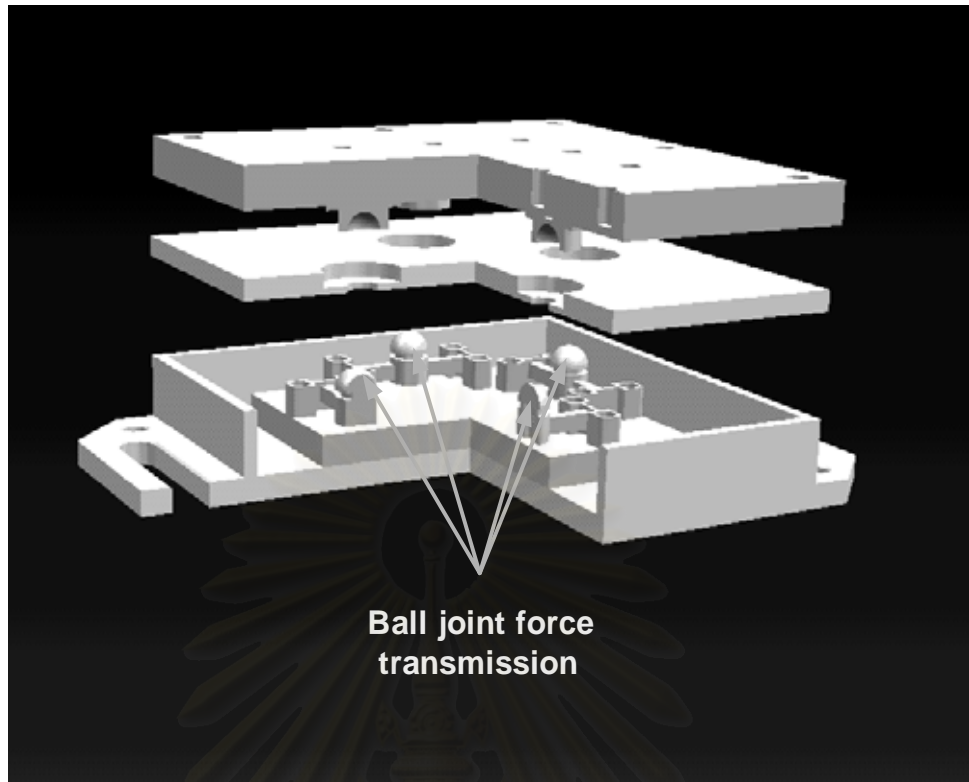
รูปที่ 3.15 ความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 2800 Hz ของโครงสร้างที่ 3

3.4.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างแบบต่างๆ

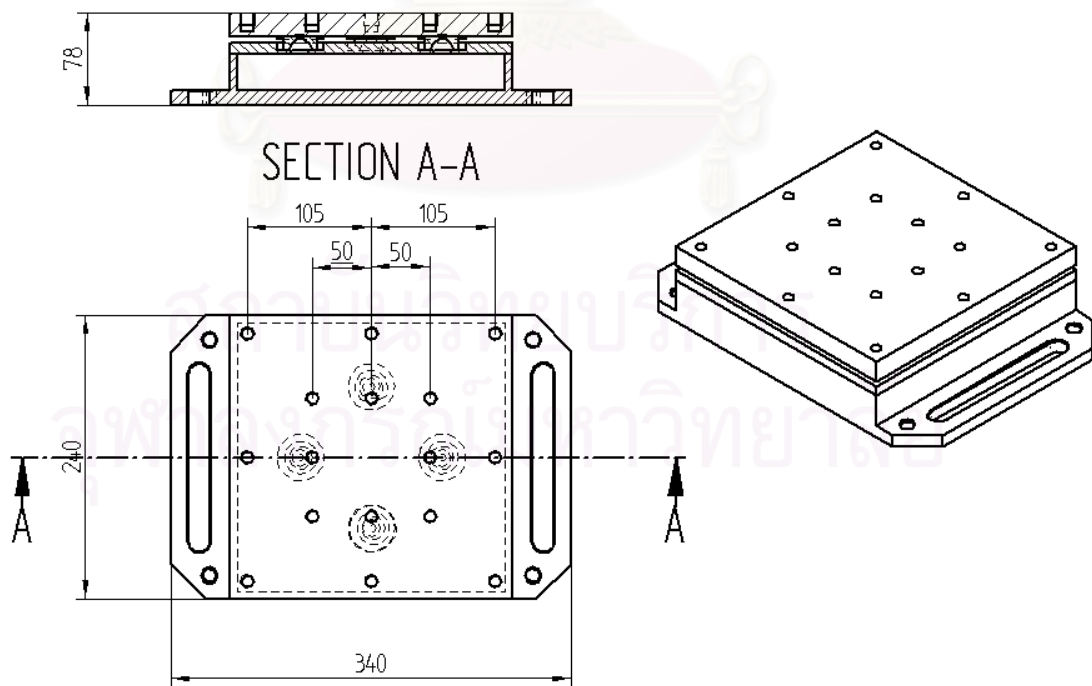
โครงสร้างแบบที่ 1 นั้นเป็นโครงสร้างที่เกิดสเตรนเมื่อได้รับแรงดัดได้ดีพอสมควรในแนวแกน z แต่ไม่ดีในแนวแกน x และ y ทำให้ไม่สามารถวัดแรงที่มีขนาดน้อยๆ ได้ อีกทั้งความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างมีค่าต่ำ อยู่ที่ 2330 Hz ดังนั้นจึงมีการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นแบบที่ 2 โดยมีขนาดเล็กลง ดังรูปที่ 3.8 (ก) แต่ใช้โครงสร้างทั้งหมด 4 ตัวสำหรับรับแรงโดยจะจัดวางดังรูป 3.8 (ข) ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างนี้มีค่า 2935 Hz ซึ่งจะมากกว่าแบบที่ 1 และจากตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าความเครียดที่เกิดขึ้นเมื่อรับแรงดัดมีค่าสูงชันกว่าแบบที่ 1 มากทั้งแนวแกน x, y และ z แต่แบบนี้มีข้อจำกัดคือจำนวนสเตรนเกจที่ใช้ซึ่งมีทั้งหมด 32 คู่ ซึ่งมีมากกว่าจำนวนช่องรับข้อมูลของอุปกรณ์รับสัญญาณที่มีอยู่ ทำให้ต้องเปลี่ยนเป็นโครงสร้างแบบที่ 3 ดังแสดงในรูป 3.12 ซึ่งโครงสร้างนี้ก็เช่นเดียวกับโครงสร้างที่ 2 คือใช้โครงสร้างรับแรงทั้งหมด 4 ตัว ทำให้ใช้สเตรนเกจทั้งหมด 16 คู่ และในโครงสร้างนี้ได้ปรับปรุงให้มีความเครียดต่อแรงที่มากกว่าเพิ่มขึ้น แต่ความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างจะลดลงจากโครงสร้างที่ 2 เล็กน้อย ส่วนการพิจารณาในด้านอื่นๆ เช่นการกระจายของความเครียด ความง่ายต่อการสร้างนั้นทุกโครงสร้างใกล้เคียงกัน

3.5 โครงสร้างจริงที่ใช้ทำอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

โครงสร้างที่ได้สร้างขึ้นในอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้ เป็นโครงสร้างแบบที่ 3 ซึ่งจะวางจัดเรียงกันดังรูป โดยจะสร้างเคสขึ้นมาครอบ เพื่อป้องกันสิ่งสกปรก ฝุ่นละออง รวมไปถึงน้ำหรือน้ำมันหล่อเย็นที่ใช้กับเครื่องกัด โดยตัวเคสก็ได้ทำจากเหล็กกล้าคาร์บอนเช่นเดียวกัน ดังได้แสดงรูปวาดจากแคด และอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจริง ดังรูปที่ 3.16-3.18



รูปที่ 3.16 ภาพตัดแสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง



รูปที่ 3.17 ขนาดของอุปกรณ์ตรวจจู้แรง



รูปที่ 3.18 การวางอุปกรณ์ตรวจรับแรงบนเครื่องกัดซีเอ็นซี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

สเตรนเกจและวงจรวัด

4.1 สเตรนเกจ

สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งทางด้านวิศวกรรม ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดความเค้นและความเครียด โดยจะทำการแปลงค่าความเครียดที่เกิดขึ้นออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งก็คือ ความต่างศักย์นั่นเอง การจะนำสเตรนเกจไปใช้วัดความเครียดนั้นก็จะต้องนำสเตรนเกจไปติดบริเวณที่จะวัดความเครียด เพื่อที่จะให้สเตรนเกจมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามโครงสร้างที่มันติดอยู่ เมื่อสเตรนเกจมีการยืดหรือหดตัวเกิดขึ้นก็จะทำให้ความต้านทานของตัวมันเองเปลี่ยนไป

สเตรนเกจแบบที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบความต้านทานไฟฟ้า (Electrical resistance strain gage) เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูกเมื่อเทียบกับแบบอื่นๆ โดยที่สเตรนเกจแบบความต้านทานไฟฟ้า มีหลักการทำงานคือ อาศัยหลักการเปลี่ยนค่าความต้านทานของตัวนำเมื่อขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดตัวนำเปลี่ยนไป หรือก็คือการยืดหรือหดตัวนั่นเอง ซึ่งจะเป็นไปดังสมการที่ (4.1)

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{\rho L}{CD^2} \quad (4.1)$$

โดยที่ ρ คือสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานจำเพาะของตัวนำนั้นๆ

L คือความยาวของตัวนำ

A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวนำ $A = CD^2$

C คือค่าคงที่ ในกรณีหน้าตัดวงกลม $C = \frac{\pi}{4}$

และ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของวงกลม

เมื่อมีแรงกระทำต่อโลหะตัวนำจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกลขึ้นกับโลหะตัวนำนั้น โดยจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานตามไปด้วย การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานดังกล่าวสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการดิฟเฟอเรนเชียลของสมการที่ (4.1) ได้ว่า

$$dR = \frac{CD^2(Ldp + pdL) - 2CpLDdD}{(CD^2)^2}$$
$$dR = \frac{1}{CD^2} \left[(Ldp + pdL) - 2\rho L \frac{dD}{D} \right]$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - 2 \frac{dD/D}{D} + \frac{dp}{\rho}$$

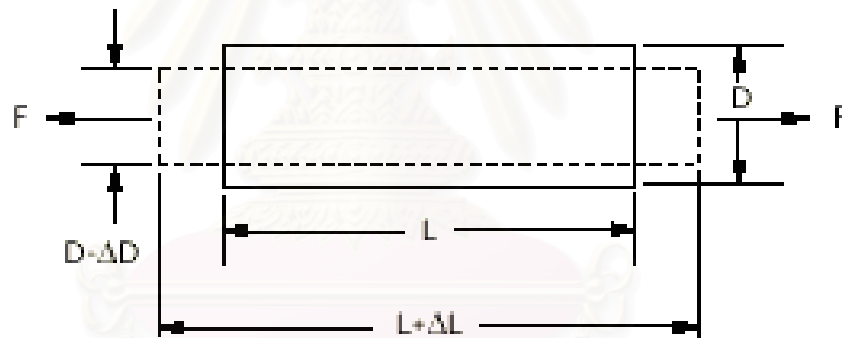
หรืออาจเขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{dR/R}{dL/L} = 1 - 2 \frac{dD/D}{dL/L} + \frac{dp/\rho}{dL/L} \quad (4.2)$$

เมื่อ dL/L คือความเครียดในแนวแกน ($\epsilon_a =$ Axial strain)

dD/D คือความเครียดด้านข้าง ($\epsilon_l =$ Lateral strain)

ความเครียดในแนวแกนเป็นความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความยาวที่เกิดขึ้นในแนวแรง มีความสัมพันธ์กับความเครียดด้านข้างที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางดังแสดงในรูปที่ 4.1 อัตราส่วนระหว่างความเครียดด้านข้างและความเครียดในแนวแกนเรียกว่าอัตราส่วนของปัวส์ซอง (Poisson's ratio) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าเป็นลบเพราะว่าเส้นผ่านศูนย์กลางจะเล็กลงเมื่อมีแรงดึง หรือเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้นเมื่อมีแรงกด



รูปที่ 4.1 ความเครียดในแนวแกนและความเครียดด้านข้าง

$$\text{Poisson's ratio } (\nu) = - \frac{dD/D}{dL/L} = - \frac{\epsilon_l}{\epsilon_a} \quad (4.3)$$

นำสมการที่ (4.3) แทนใน (4.2) จะได้ว่า

$$\frac{dR/R}{dL/L} = 1 + 2\nu + \frac{dp/\rho}{dL/L} \quad (4.4)$$

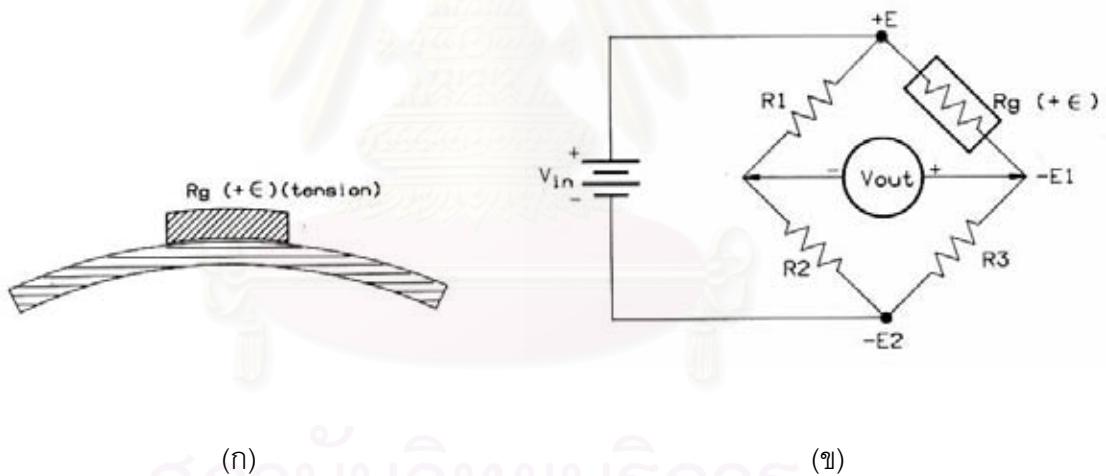
$\frac{dR/R}{dL/L}$ หรือ $\frac{dR/R}{\epsilon}$ คือเกจแฟคเตอร์ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของสเตรนเกจ ซึ่งตัวแปรนี้มักจะระบุมาให้จากโรงงานผู้ผลิต ค่าเกจแฟคเตอร์เป็นตัวบอกความไวของสเตรนเกจ กล่าวคือเกจแฟคเตอร์ที่มีค่าสูงหมายถึงเกจนั้นมีความไวในการเปลี่ยนแปลงสูง

4.2 วงจรวัด

การอ่านค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของสเตรนเกจในรูปของศักย์ไฟฟ้านั้นมีค่าน้อย ทำให้ไม่สามารถใช้การวัดโดยตรง วิธีการที่นิยมใช้และทำให้สามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานนี้ได้จะต้องทำการติดตั้งสเตรนเกจให้เป็นส่วนหนึ่งของวงจรวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge circuit) ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลง (ซึ่งมีค่าน้อย) ไปเป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้าซึ่งสามารถที่จะทำการขยายสัญญาณได้ จากความต่างศักย์ขาออกที่วัดได้นี้และความต่างศักย์ขาเข้าที่รู้ค่า ก็จะสามารถนำไปคำนวณหาค่าความเครียดดังสมการ โดยวงจรวิทสโตนบริดจ์นั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ดังนี้

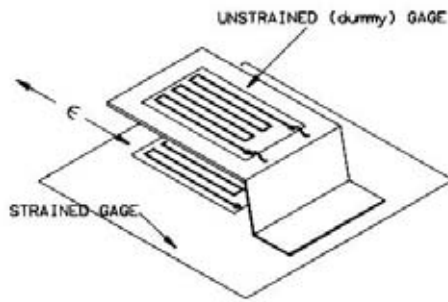
4.2.1 แบบควอเตอร์บริดจ์ (quarter bridge)

เป็นแบบที่ใช้สเตรนเกจหนึ่งตัวสำหรับวัดความเครียด แต่อาจจะมีอีกหนึ่งตัวสำหรับบริการชดเชยอุณหภูมิ แต่ว่าจะไม่ได้รับความเค้น เรียกว่าดัมมีเมจ จะแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

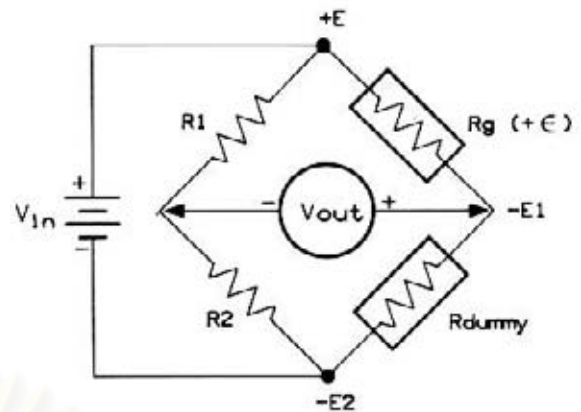


รูปที่ 4.2 (ก) การจัดวางสเตรนเกจแบบควอเตอร์บริดจ์ (ข) วงจรวิทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์ บริดจ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

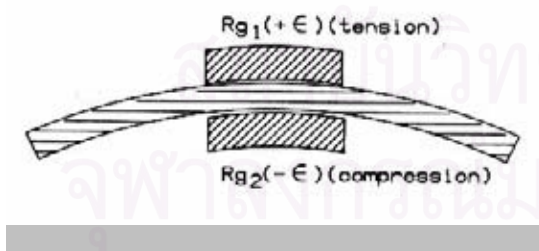


(ข)

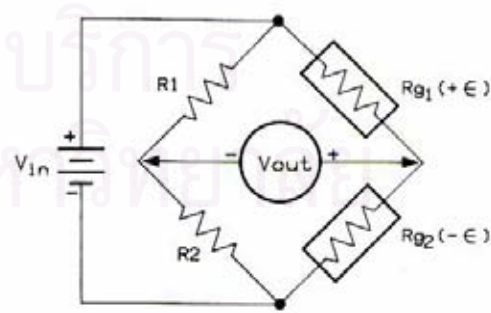
รูปที่ 4.3 (ก) การจัดวางสเตรนเกจแบบควอเตอร์บริดจ์และมีดัมมี่เกจ (ข) วงจรวิทสโตนบริดจ์แบบควอเตอร์บริดจ์และมีดัมมี่เกจ

4.2.2 แบบฮาล์ฟบริดจ์ (half bridge)

ใช้สเตรนเกจ 2 ตัว สำหรับวัดความเครียด ข้อดีของการติดสเตรนเกจแบบนี้คือความไวจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากแบบควอเตอร์บริดจ์ และชดเชยอุณหภูมิ การติดสเตรนเกจแบบฮาล์ฟบริดจ์นี้มีอยู่ 2 วิธี คือแบบรับโมเมนต์ดัด (แสดงในรูปที่ 4.4) กับแบบบ่วงง ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งการวางสเตรนเกจบนผิวงาน



(ก)

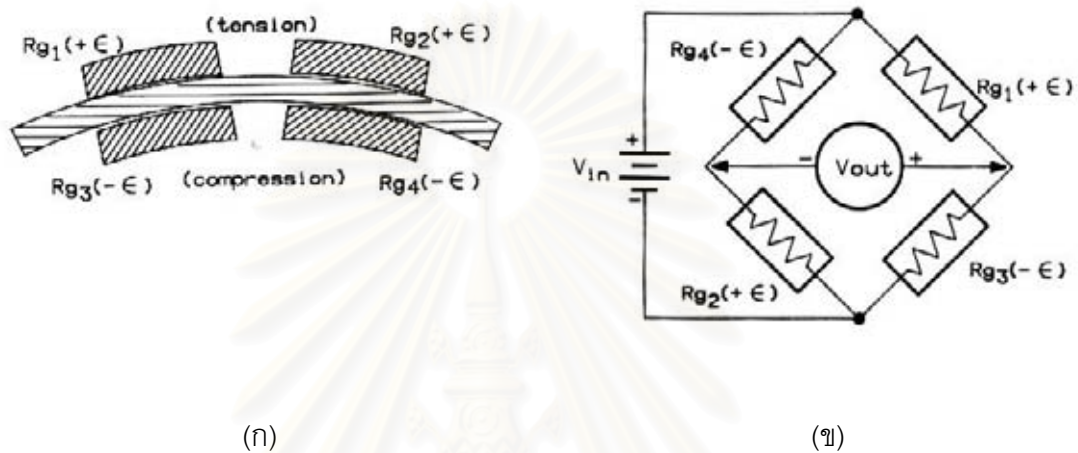


(ข)

รูปที่ 4.4 (ก) การจัดวางสเตรนเกจแบบฮาล์ฟบริดจ์ (ข) วงจรวิทสโตนบริดจ์แบบฮาล์ฟบริดจ์

4.2.3 แบบฟูลบริดจ์ (full bridge)

ใช้เสตเรนเกจ 4 ตัวสำหรับวัดความเครียด และมีความไวสูงสุด แบ่งออกเป็น 3 แบบคือ แบบรับเฉพาะการดัด แบบผสม และแบบปัวซง ตัวอย่างการวางเสตเรนเกจแบบฟูลบริดจ์ แบบรับเฉพาะการดัดแสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 (ก) การจัดวางเสตเรนเกจแบบฟูลบริดจ์ (ข) วงจรวิทสโตนบริดจ์แบบฟูลบริดจ์

การนำไปใช้เพื่อวัดค่าความเครียดในอุปกรณ์ตรวจจู้แรงนี้ ใช้วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์แบบที่ใช้วัดแรงดัด เนื่องจากลักษณะการออกแบบของโครงสร้างเป็นแบบให้โครงสร้างรับแรงดัด โดยลักษณะวงจรวิทสโตนบริดจ์แบบฮาล์ฟบริดจ์ที่ใช้วัดความเครียดที่เกิดจากแรงดัดและลักษณะการติดเสตเรนเกจจะแสดงดังรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเสตเรนเกจตัวหนึ่งจะยึดตัวในขณะที่เสตเรนเกจอีกตัวหนึ่งจะหลุดตัวก็หมายถึงเสตเรนเกจตัวหนึ่งจะมีความต้านทานเพิ่มขึ้นในขณะที่อีกตัวหนึ่งจะมีความต้านทานลดลง จึงทำให้วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์นี้มีค่าความต่างศักย์ขาออกเป็น 2 เท่าของเมื่อใช้วงจรเป็นแบบควอเตอร์บริดจ์ นอกจากนี้ยังมีผลดีในเรื่องช่วยชดเชยความผิดพลาดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ โดยวงจรแบบนี้จะใช้วัดความเครียดที่เกิดเมื่อโครงสร้างดัดเท่านั้น ไม่สามารถใช้วัดความเครียดเมื่อโครงสร้างเกิดการยืดหรือหดตัวในแนวแกนได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดที่เกิดขึ้นกับความต่างศักย์ขาออก แสดงดังสมการที่ 4.5

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{2} (GF)\epsilon \quad (4.5)$$

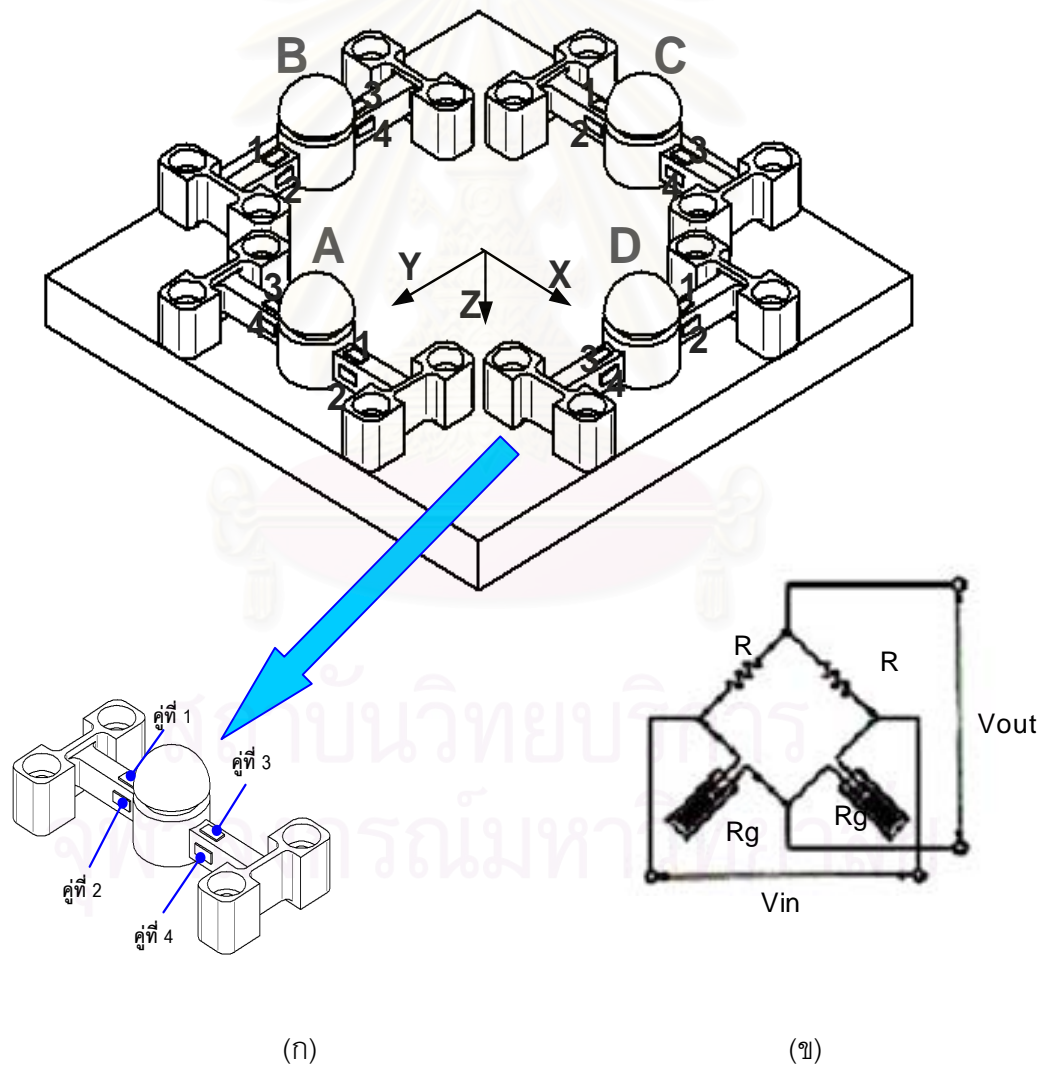
เมื่อ V_{out} คือ ความต่างศักย์ขาออกที่วัดได้

V_{in} คือ ความต่างศักย์ที่ป้อนเข้า

GF คือ เกจแฟคเตอร์

ε คือ ความเครียดที่เกิดขึ้น

4.3 การวัดความเครียดโดยใช้สเตรนเกจ



รูปที่ 4.6 (ก) การติดสเตรนเกจบนโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (ข) วงจรฮาล์ฟบริดจ์ที่ต่อในแต่ละวงจร

ลักษณะการติดสเตรนเกจบนโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเป็นดังรูปที่ 4.6 และใช้วงจรวีทสโตนบริดจ์แบบรูปที่ 4.6 (ข) ซึ่งเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ที่ใช้วัดความเครียดเมื่อโครงสร้างดัดหรือโก่งตัวเท่านั้น ก็จะสามารถบอกชุดสเตรนเกจที่เป็นชุดสเตรนเกจหลักที่จะใช้วัดแรงในแนวต่างๆ ได้ดังนี้

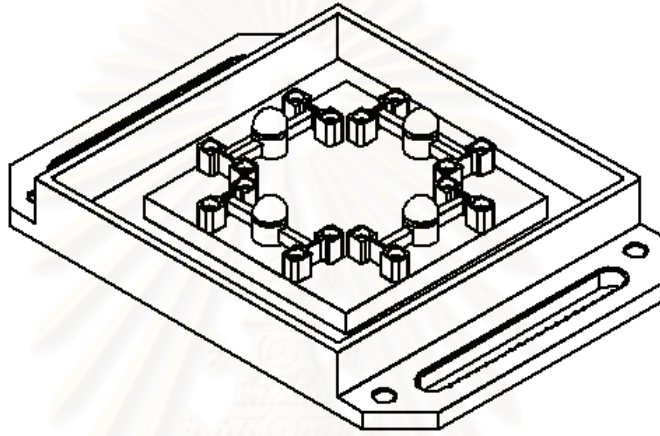
- แรงในแนวแกน x ใช้สเตรนเกจชุดที่ B2, B4, D2 และ D4 เป็นหลักในการวัด เพราะว่าการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าวเมื่อมีแรงในแนวแกน x มากจะทำให้โครงสร้างเกิดการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าว
- แรงในแนวแกน y ใช้สเตรนเกจชุดที่ A2, A4, D2 และ D4 เป็นหลักในการวัด เพราะว่าการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าวเมื่อมีแรงในแนวแกน y มากจะทำให้โครงสร้างเกิดการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าว
- แรงในแนวแกน z ใช้สเตรนเกจชุดที่ A1, A3, B1, B3, C1, C3, D1 และ D3 เป็นหลักในการวัด เพราะว่าการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าวเมื่อมีแรงในแนวแกน z มากจะทำให้โครงสร้างเกิดการดัดหรือโก่งบริเวณดังกล่าว

ในรูปที่ 4.6 จะใช้สเตรนเกจทั้งหมด 16 คู่ ต่อเป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์โดยชุดที่ A1, A3, B1, B3, C1, C3, D1 และ D3 จะติดที่ผิวบนและล่างของแกน ส่วนสเตรนเกจชุดที่ A2, A4, B2, B4, C2, C4, D2 และ D4 จะติดที่ผิวด้านข้างของแกน

บทที่ 5 อุปกรณ์การทดลอง

5.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

โครงสร้างอุปกรณ์ตรวจรู้แรงตามแบบที่แสดงในรูป 3.12 ทำจากเหล็ก ทั้งหมด 4 ตัว จัดเรียงตามรูปที่ 5.1. วางอยู่ในกล่องหุ้มที่ทำด้วยเหล็ก สำหรับวางที่โต๊ะของเครื่องกัด



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

5.2 สเตรนเกจ

ใช้สเตรนเกจยี่ห้อ Kyowa รหัส KFG-5-120-C1-11L1M2R จำนวน 32 ตัว ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. เป็นแบบชดเชยอุณหภูมิสำหรับเหล็ก
2. ความยาวเกจ 5 มิลลิเมตร
3. ความต้านทาน 120.4 ± 0.4 โอห์ม
4. เกจแพคเตอร์ 2.10 ± 1.0 %

กาที่ใช้สำหรับติดสเตรนเกจเป็นชนิดไฮยาโนอะคริเลท ยี่ห้อ Kyowa รหัส CC-33A

5.3 อุปกรณ์รับข้อมูล (Data acquisition)

5.3.1 อุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณ เลขที่ 3852A

เครื่องเลขที่ 3852A นี้เป็นอุปกรณ์กำหนดสำหรับรับข้อมูลศักย์ไฟฟ้าเข้ามา และส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลผ่านทาง HP-IB โดยต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์ปลั๊กอิน (Plug-in

accessories) ในการวัดศักย์ไฟฟ้าจากวงจรบริดจ์นี้ ได้ใช้อุปกรณ์ดังกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 5.3.2 อุปกรณ์นี้ประกอบด้วยหน้าจอ และปุ่มกดในส่วนหน้า สามารถสั่งงานได้โดยตรงที่เครื่อง และด้านหลังจะมีช่องปลั๊กอิน สำหรับอุปกรณ์ต่อเชื่อม 8 ช่อง ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 เครื่องเลขพี 3852A

5.3.2 อุปกรณ์ประกอบเครื่องเลขพี 3852A

เลขพี 44730A (รูปที่ 5.3) เป็นอุปกรณ์ปลั๊กอินที่ต่อเข้าเครื่องเลขพี 3852A เพื่อให้เครื่องสามารถวัดศักย์ไฟฟ้า กระแส ความต้านทาน ออณหภูมิ ในที่นี้จะวัดผ่าน เลขพี 44732A สเตรณเกจ เฟตมัลติเพลกเซอร์ เพื่อวัดศักย์ไฟฟ้าขาออกเมื่อสเตรณเกจมีความต้านทานที่เปลี่ยนไป โดยอุปกรณ์ทั้งสองจะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันผ่านทางสายริบบิ้น (Ribbon cable) ด้านในเครื่อง ความต่างศักย์ไฟฟ้าขาเข้าของเครื่องมีค่าเท่ากับ 10.24 โวลต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

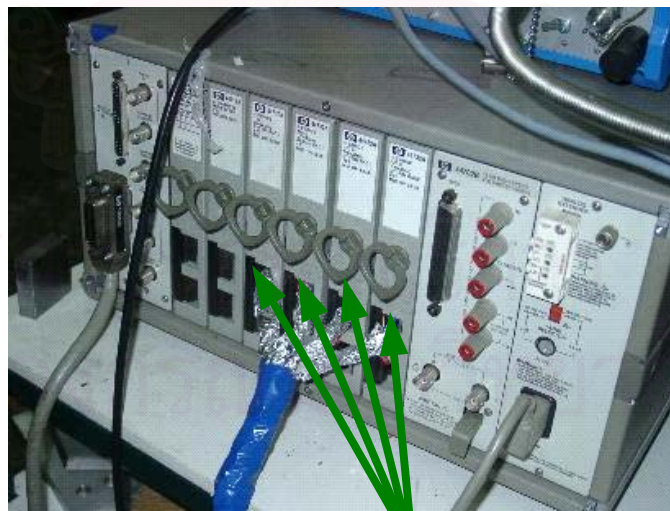


HP 44730A

High speed voltmeter

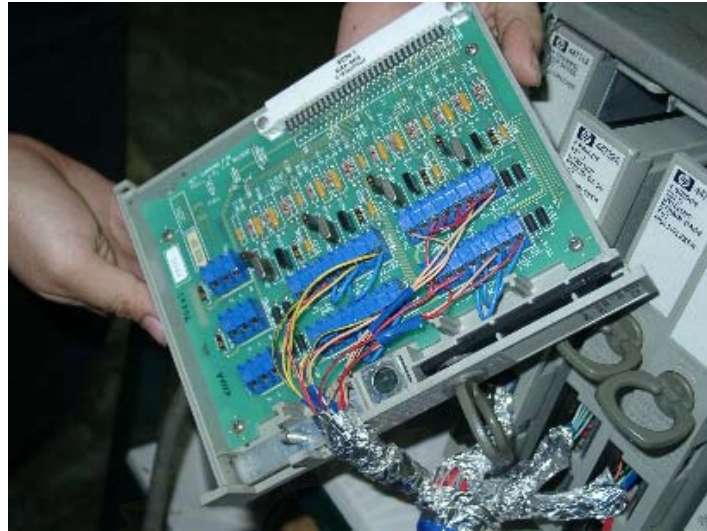
รูปที่ 5.3 เอชพี 44730A ไฮสปีดโวลติเมตร

เอชพี 44732A เป็นอุปกรณ์ปลั๊กอิน ที่ต่อเข้าด้านหลังเครื่องเอชพี 3852A ที่สล็อต 2-5 ตามรูปที่ 5.4 ภายในอุปกรณ์เอชพี 44732A แต่ละตัวประกอบไปด้วยวงจรบริดจ์ 4 วงจร สำหรับต่อสายมาจากสเตรนเกจดังรูปที่ 5.5 และมีวิธีการเชื่อมสายสำหรับวงจรฮาร์ดฟบริดจ์ตามรูปที่ 5.6

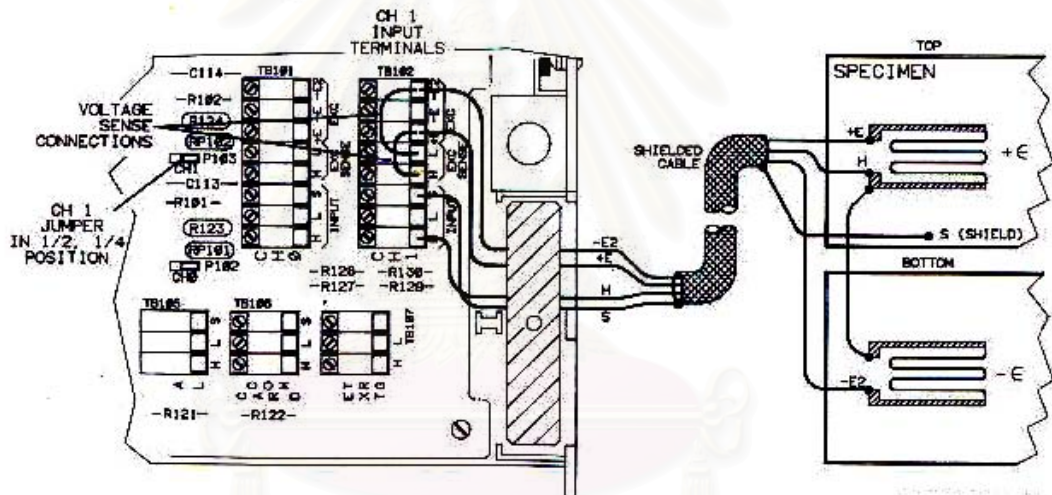


HP 44732A

รูปที่ 5.4 เอชพี 44732A วงจรบริดจ์

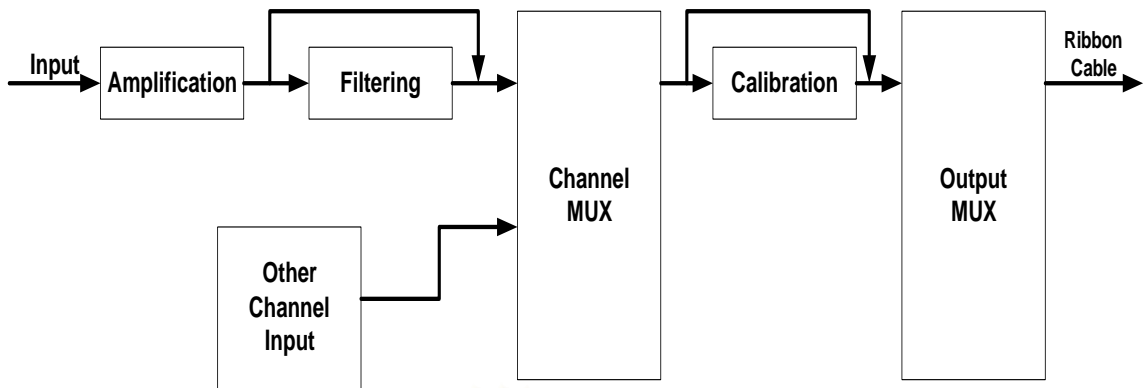


รูปที่ 5.5 วงจรบริดจ์ภายในเอชพี 44732A



รูปที่ 5.6 แผนภาพการต่อเชื่อมสายในเอชพี 44732A ในแต่ละวงจร

ในแต่ละวงจรบริดจ์จะมีฟังก์ชันสำหรับขยายสัญญาณ โดยมีค่าเกนที่ 1 10 และ 100 และมีฟิลเตอร์สำหรับความถี่ต่ำผ่านชนิดเบสเซล 4 โพล โดยที่โรงงานได้กำหนดค่าความถี่คัตออฟที่ 10 kHz การวัดสัญญาณแต่ละค่าของเอชพี 44732A นั้นจะทำโดยวิธีแทรกและโฮลด์ ต่อจำนวนช่องสัญญาณทั้งหมด รูปที่ 5.7 แสดงการทำงานของเอชพี 44732 A ในแต่ละวงจร

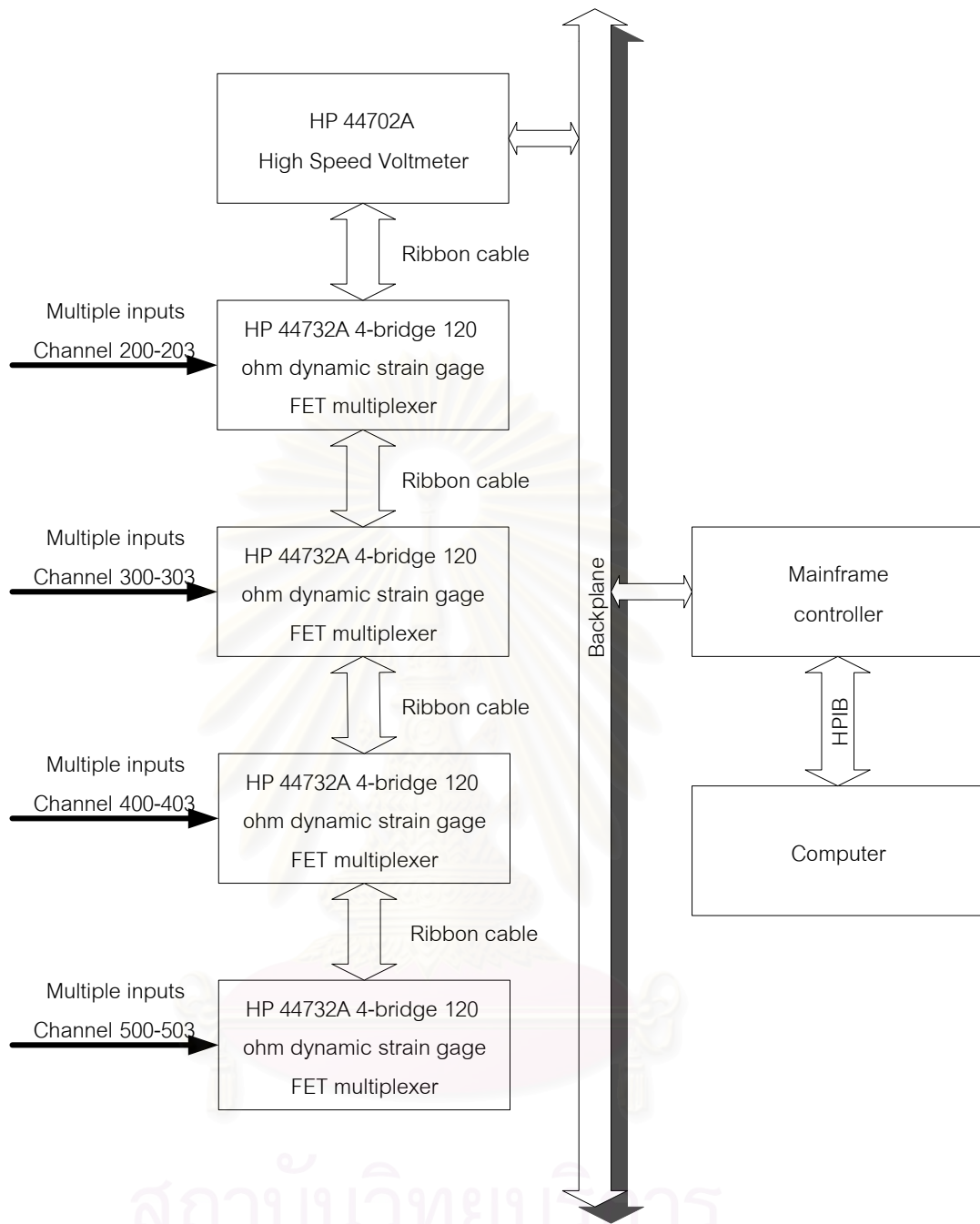


รูปที่ 5.7 การวัดศักย์ไฟฟ้าโดยเซพพี 44732A

5.3.3 การต่อเชื่อมวงจรจากตัวอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและอุปกรณ์รับข้อมูล

การเชื่อมต่อระหว่างเซพพี 44732A วงจรบริดจ์ เซพพี 44702A ไฮสปีดโวลมิเตอร์และเครื่องเซพพี 3852A ดังแสดงในรูปที่ 5.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.7 การรับข้อมูลของเครื่องเลขพี 3852A และอุปกรณ์ประกอบและส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์

5.4 การโปรแกรม

โปรแกรมควบคุมอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม HPVEE ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบกราฟฟิกที่เป็นระบบที่เชื่อมต่อกันได้กับเครื่องเลขพี 3852A เพื่อให้ง่ายต่อการโปรแกรม รายละเอียดเรื่องโปรแกรมจะกล่าวถึงในบทที่ 6

บทที่ 6 การโปรแกรม

6.1 การเขียนโปรแกรมด้วย HP VEE

โปรแกรม HP VEE มีชื่อเต็มว่า Hewlett-Packard's Visual Engineering Environment มีลักษณะการเขียนโปรแกรมแบบวิซวล คือการสร้างโปรแกรมประกอบด้วยการนำไอคอนต่างๆ มาต่อรวมกันโดยการใส่เมาส์โยงเส้นต่อกันเพื่อให้มีการส่งถ่ายข้อมูล ซึ่งแตกต่างจากการเขียนโปรแกรมแบบเท็กซ์ ข้อดีคือลดเวลาสำหรับการทำโปรแกรมในการทดลอง เหมาะสำหรับระบบการวัดและทดสอบ รวมถึงการมีอินเทอร์เฟซที่ทำให้ผู้ปฏิบัติการใช้และเข้าใจง่าย

รูปที่ 6.1 และ 6.2 แสดงการเปรียบเทียบการโปรแกรมระหว่างโปรแกรมแบบเท็กซ์และโปรแกรมแบบวิซวล โดยรูปที่ 6.1 จะแสดงโปรแกรมแบบเท็กซ์ โปรแกรมโดยใช้ภาษาซี ส่วนรูปที่ 6.2 เป็นการโปรแกรมแบบวิซวลด้วยโปรแกรม HP VEE ทั้งสองแบบเป็นโปรแกรมที่สั่งให้สร้างตัวเลขแบบสุ่มมาเก็บไว้ในตัวแปรอะเรย์ 1 มิติ พร้อมกับหาค่าสูงสุดของโปรแกรม

```
/*Program to find maximum element in array*/
#include<stdio.h>
#include<math.h>
main()
{
    double num[10],max;
    int i;

    for(i=0;i<10;i++){
        num[i]=rand()
        printf("%f\n"num(i);
    }

    max=num[0];
    for(i=1;i<10;i++){
        if(num[i]>max)
```



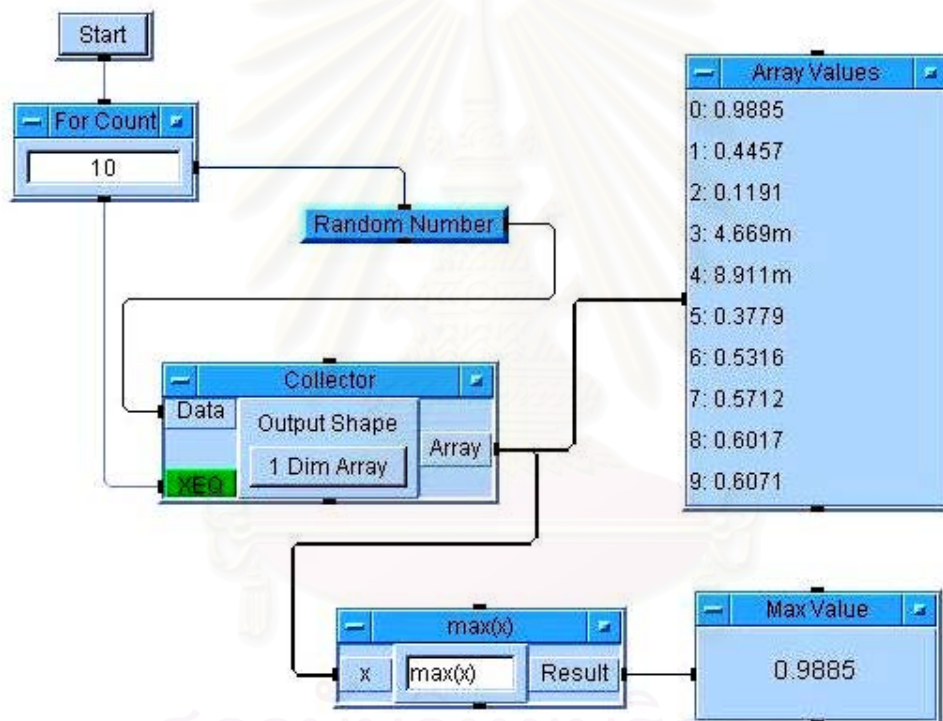
```

    max=num[i];
}

printf("\nMax Value:%f\n",max);
}

```

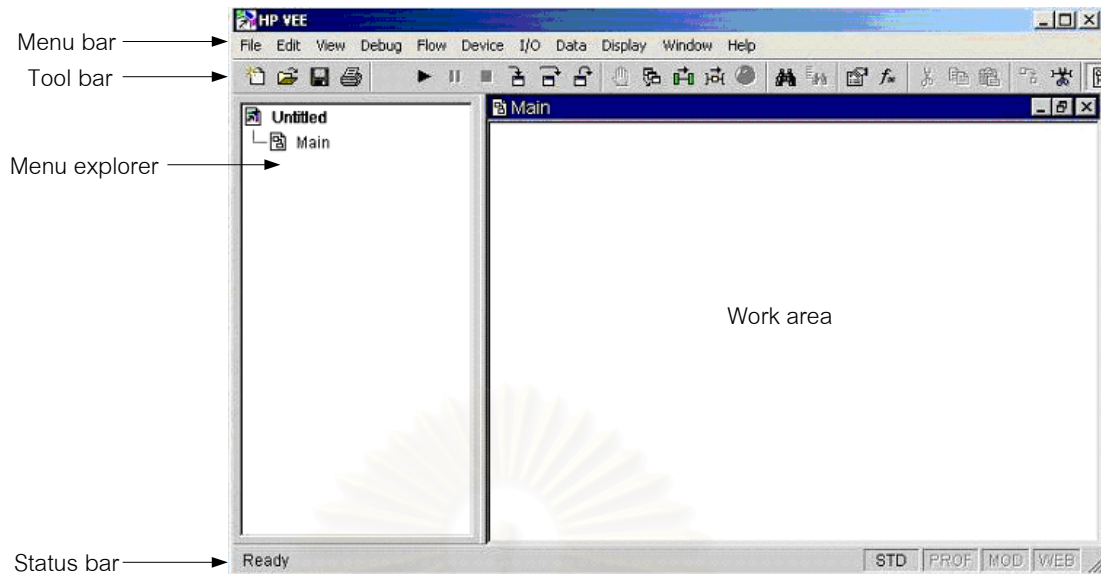
รูปที่ 6.1 การโปรแกรมแบบเทกซ์ด้วยภาษาซี



รูป 6.2 การโปรแกรมแบบวิซวล โดยโปรแกรม HP VEE

6.1.1 สภาวะแวดล้อมของการเขียนโปรแกรม HP VEE (HP VEE development environment)

แสดงดังในรูปที่ 6.3 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้



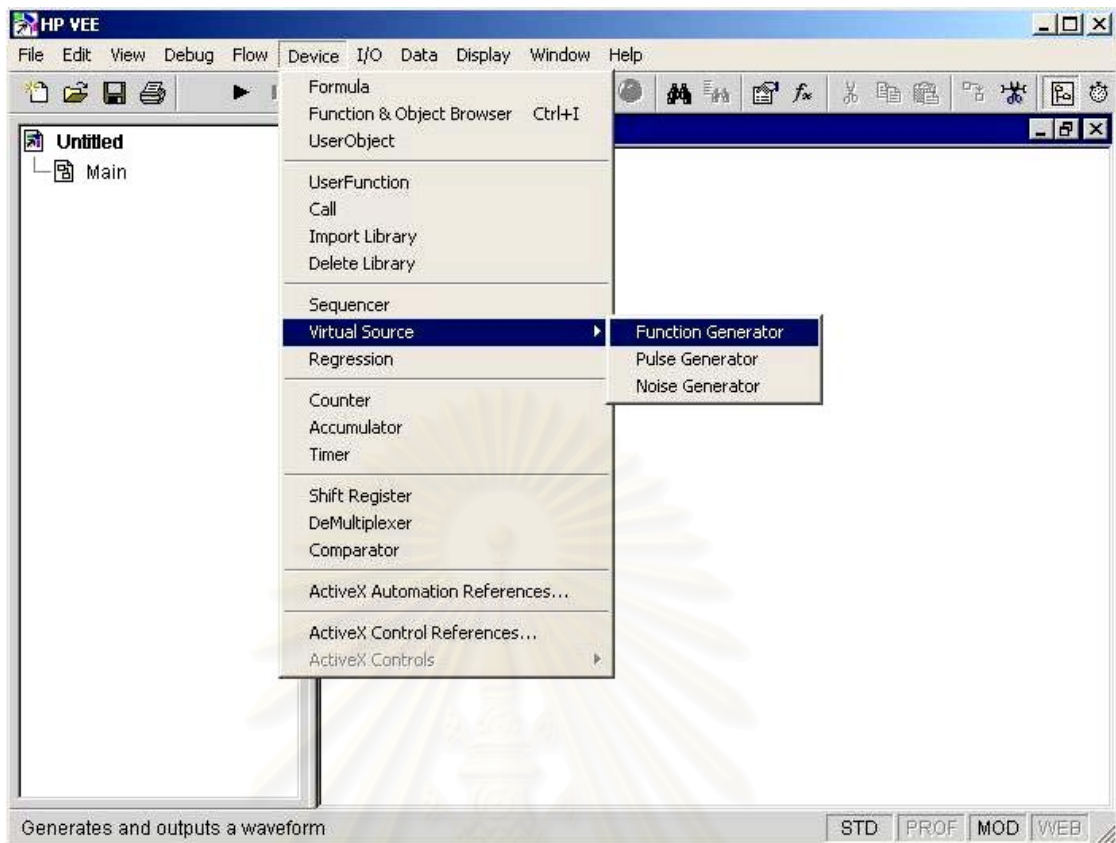
รูปที่ 6.3 สภาวะแวดล้อมของการเขียนโปรแกรม HP VEE

- แถบเมนู (Menu Bar) ประกอบด้วยเมนูคำสั่งและไอคอนสำหรับสร้างโปรแกรม
- แถบเครื่องมือ (Tool Bar) แสดงปุ่มและชอทคัทสำหรับงานทั่วไปในโปรแกรม
- พื้นที่แสดงโปรแกรม (Program Explorer) แสดงฟังก์ชันและออบเจกต์ย่อยตามลำดับชั้น
- พื้นที่ใช้งาน (Work Area) เป็นพื้นที่สำหรับใช้สร้างโปรแกรม สามารถสร้างได้หลายหน้าต่าง ในโปรแกรมเดียวกัน
- แถบสถานะ (Status Bar) แสดงสถานะของออบเจกต์หรือเมนู

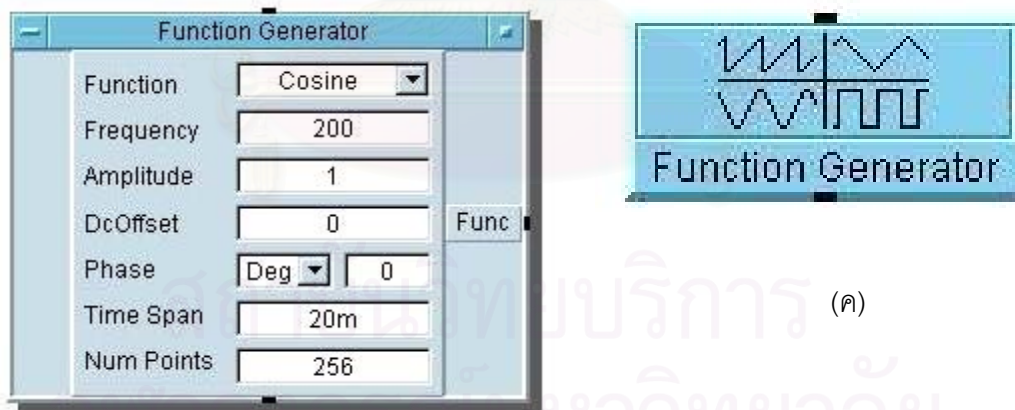
6.1.2 ออบเจกต์

ออบเจกต์ในโปรแกรม HP VEE สามารถเลือกได้จากแถบเมนู ซึ่งมีแยกเป็นประเภทเช่น ประเภทอินพุท/เอาต์พุท การสั่งให้โปรแกรมทำงานวนลูป เครื่องมือการทำงาน และการแสดงผลของข้อมูล เป็นต้น

รูปที่ 6.4 (ก) แสดงตัวการกรเรียกออบเจกต์ฟังก์ชัน เจนเนอเรเตอร์ โดยเรียกจากแถบเมนู จะได้ออบเจกต์ดังแสดงในรูปที่ 6.4 (ข) อยู่บนพื้นที่สร้างโปรแกรม และสามารถย่อให้เหลือไอคอนได้ตามรูปที่ 6.4 (ค)



(ก)

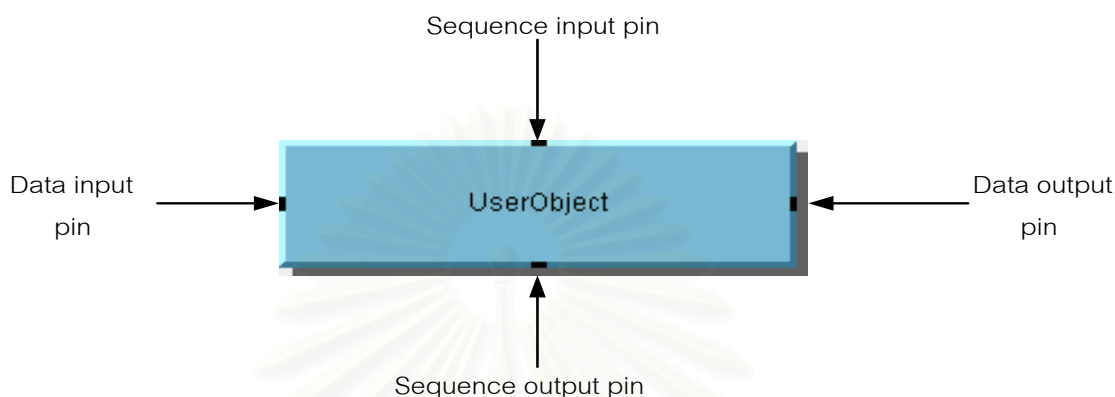


(ข)

(ค)

รูปที่ 6.4 (ก) ตัวอย่างการเรียกใช้ออปเจกต์ (ข) ออปเจกต์ (ค) ไอคอน

ในแต่ละอะปเจกต์จะมีพินสำหรับให้เชื่อมต่อทางเดินของข้อมูล (Data input/output pin) และลำดับการทำงาน (Sequence input/output pin) ดังแสดงในรูปที่ 6.5 พินข้อมูลจำเป็นที่จะต้องเชื่อมต่อ และพินลำดับการทำงาน อาจจะเชื่อมต่อหรือไม่ก็ได้



รูปที่ 6.5 ชนิดของพินในอะปเจกต์

หลักการการทำงานของโปรแกรม HP VEE

โปรแกรม HP VEE ทำงานโดยมีการไหลของข้อมูลตามที่ได้ต่อเชื่อมตามอินพุทและเอาต์พุทพิน และกำหนดลำดับการทำงานโดยการเชื่อมต่อที่ซีควีนพิน

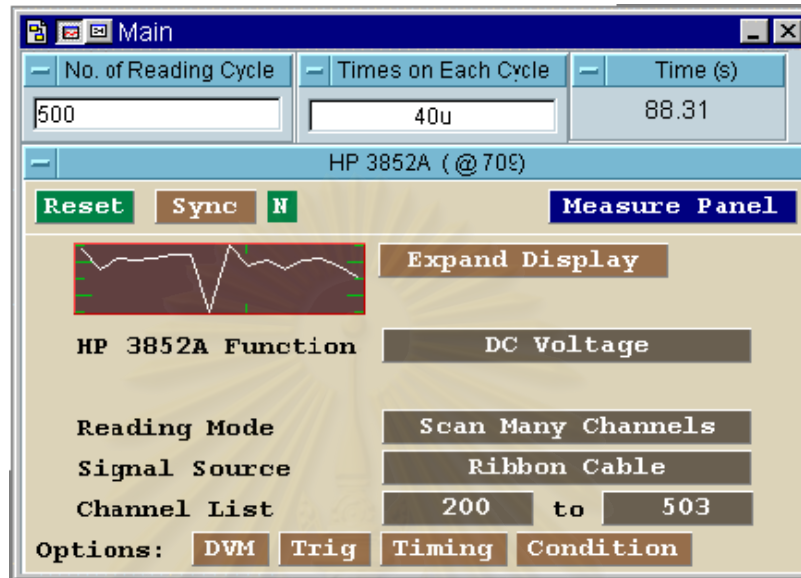
กฎการไหลของข้อมูล

- ข้อมูลไหลจากซ้ายไปขวาผ่านอะปเจกต์ หมายความว่าในทุกๆอะปเจกต์ที่มีพิน พินทางด้านซ้ายจะเป็นอินพุทพิน และพินทางด้านขวาจะเป็นเอาต์พุทพิน
- ทุกอินพุทพินในแต่ละอะปเจกต์ต้องถูกเชื่อมต่อ เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาด (error) ในการทำงานของโปรแกรม
- แต่ละอะปเจกต์จะไม่ทำงานจนกว่าจะมีข้อมูลไหลเข้าที่อินพุทพิน
- แต่ละอะปเจกต์จะสิ้นสุดการทำงานเมื่อเอาต์พุทพินได้รับข้อมูลแล้วถูกกระตุ้นเสร็จเรียบร้อยแล้ว

6.2 การโปรแกรมสำหรับอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

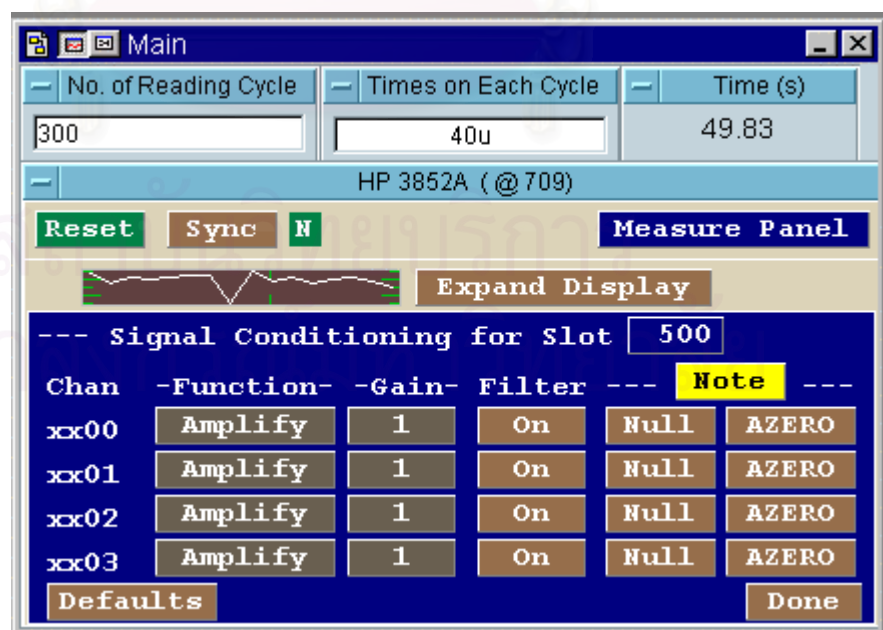
6.2.1 การใช้งานร่วมกับเครื่อง เซชพี 3852A

การเขียนโปรแกรมเชื่อมโยงเครื่องเลขพี 3852A กับคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมเช็ควีมีหลายวิธี แต่ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ Instrument Panel เพราะว่าง่ายต่อการสั่งการไปยังเครื่องเลขพี 3852A การโปรแกรมไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยที่หน้าจอจะแสดงดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 หน้าจอของโปรแกรมอ่านค่าแรง

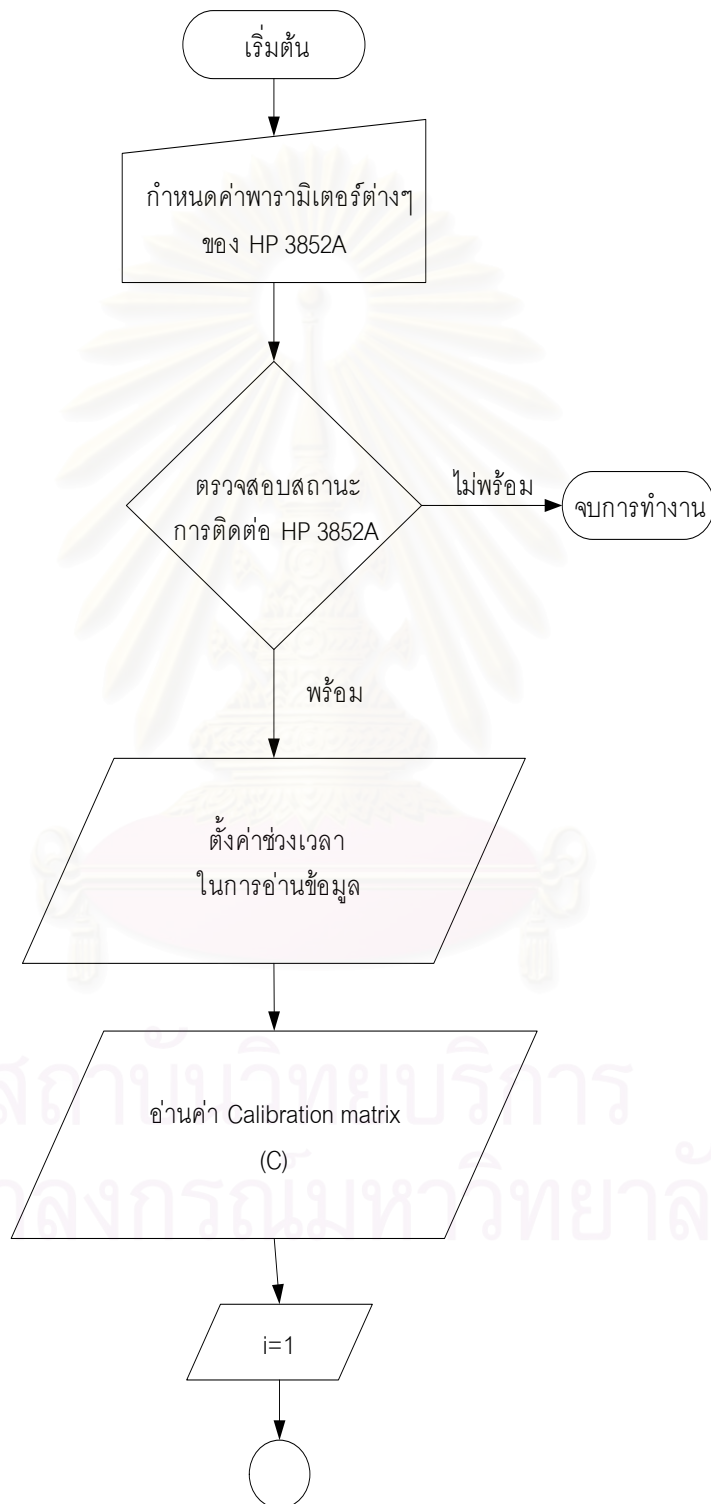
การตั้งค่าต่างๆของแต่ละวงจรถ เช่นใส่ค่าอัตราขยาย ใส่ฟิลเตอร์ หรือการออฟเซตสัญญาณ สามารถทำได้โดยผ่านทางหน้าจอตั้งค่าของโปรแกรม ดังในรูปที่ 6.7

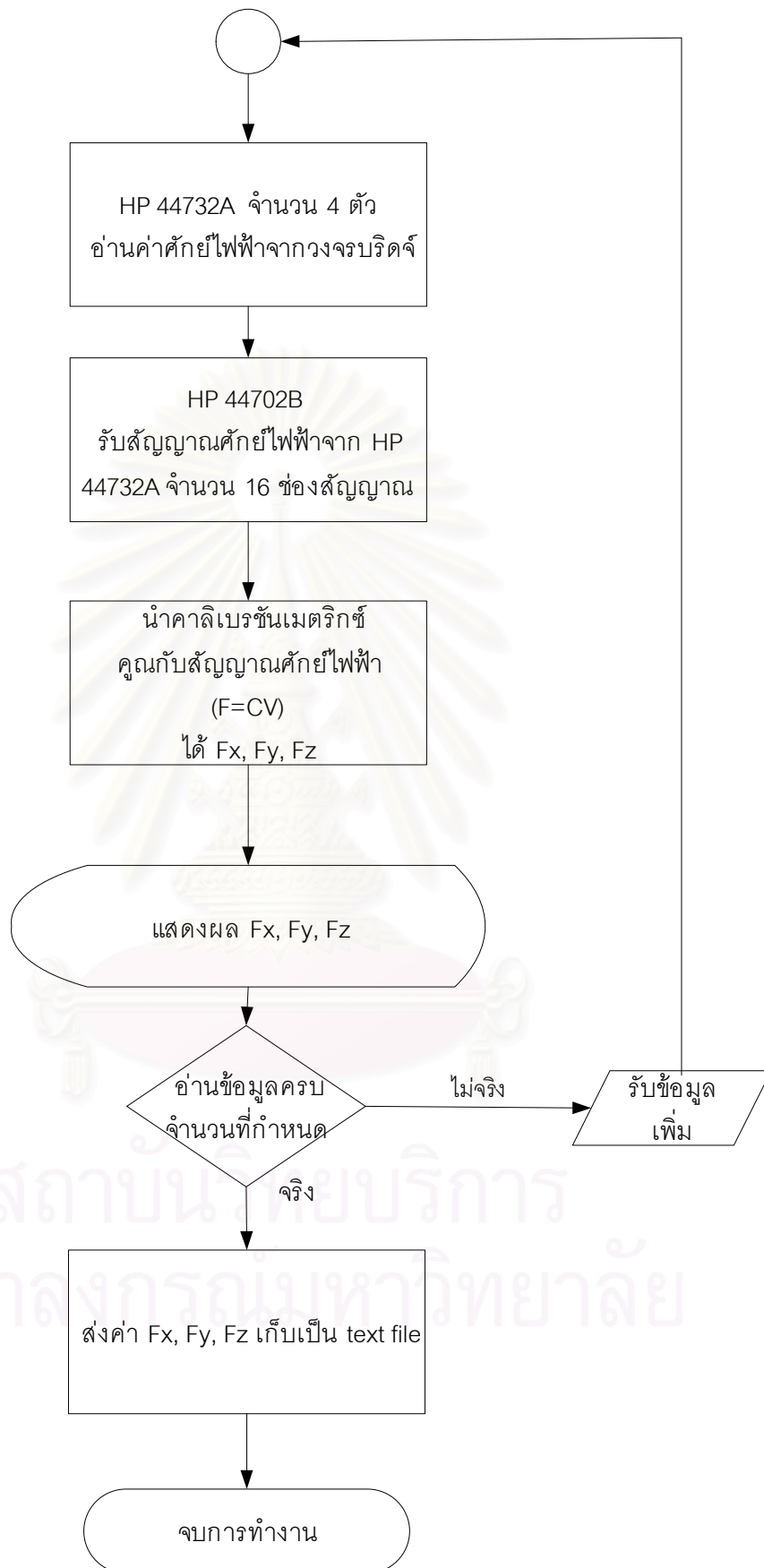


รูปที่ 6.7 หน้าจอสำหรับตั้งค่าของแต่ละช่องสัญญาณ

6.2.2 การออกแบบโปรแกรมสำหรับวัดค่าแรง F_x F_y และ F_z

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมอ่านค่าแรงที่เขียนบนโปรแกรมเอชพีวี มีขั้นตอนแสดงในรูปที่ 6.8

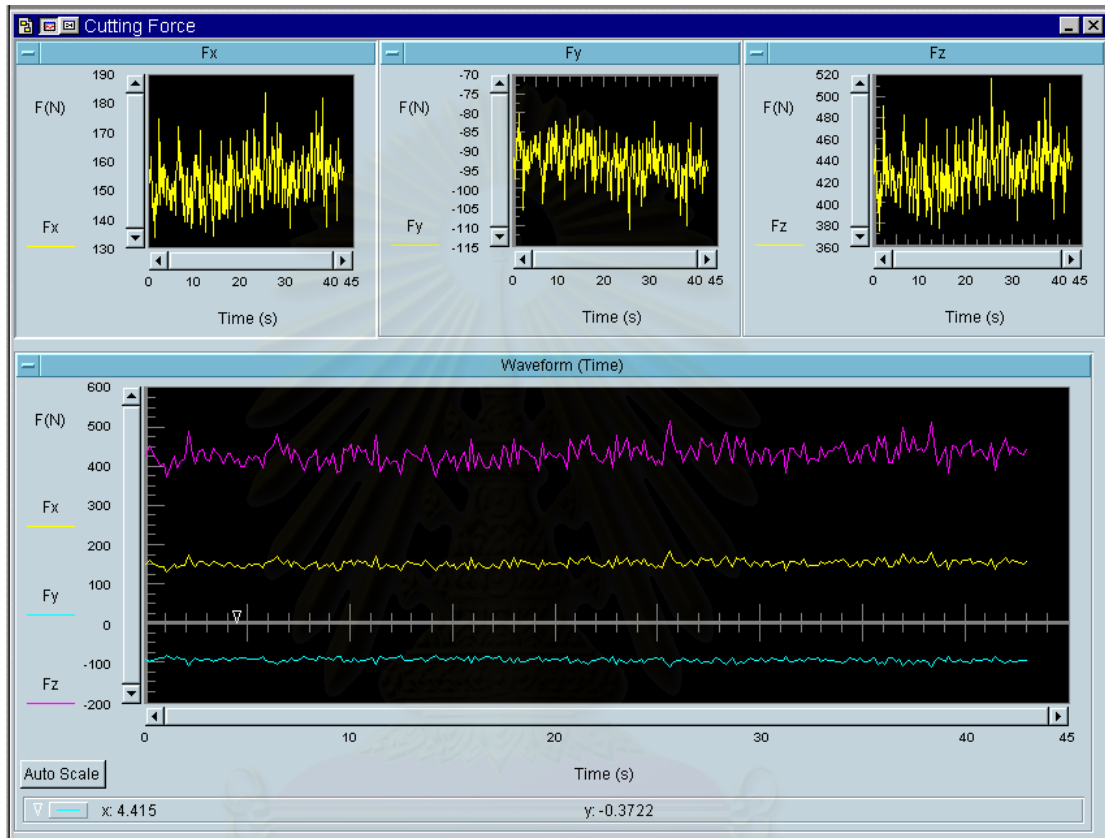




รูปที่ 6.8 การทำงานของโปรแกรมวัดค่าแรง

6.2.3 การแสดงผลของโปรแกรม

การแสดงผลของโปรแกรมสามารถทำได้โดยผ่านทางหน้าจอของโปรแกรมเอชพีวีวี ดังรูปที่ 6.9 แต่ไม่สามารถบันทึกไว้เป็นไฟล์กราฟดังที่แสดงในรูปได้ ดังนั้นจำเป็นต้องบันทึกค่าข้อมูลของแรงที่อ่านได้ในรูปเท็กซ์ (*.dat)



รูปที่ 6.9 หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมการวัดค่าแรง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

การสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจจับสนาม

แรงที่กระทำกับตัวอุปกรณ์ตรวจจับสนามนั้น สามารถหาได้จากการคำนวณผ่านการวัดค่าความต่างศักย์ที่ตำแหน่งที่เรากำหนดบนตัวโครงสร้างของอุปกรณ์ตรวจจับสนาม โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานว่าแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ตรวจจับสนามนั้นทำให้เกิดการเสียรูปที่ยังอยู่ในช่วงที่ยืดหยุ่นได้ (elastic range) ดังนั้นความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเครียดกับแรงภายนอกที่กระทำกับอุปกรณ์ตรวจจับสนามจะเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$F = CV \quad (7.1)$$

เมื่อ F คือ แรงที่ต้องการวัด (นิวตัน) ขนาด $n \times 1$ มีหน่วยเป็นนิวตัน $F = [F_x \quad F_y \quad F_z]^T$
 C คือ เมตริกซ์สอบเทียบค่า (calibration matrix) ขนาด $n \times m$
 m คือ จำนวนตำแหน่งที่วัดค่าจากสเตอรนเกจ
 V คือ ค่าความต่างศักย์ขาออกที่อ่านได้จากอุปกรณ์ตรวจจับสนาม

การสอบเทียบในบทนี้เราจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การสอบเทียบเฉพาะแรงสแตติกในแนวแกน z และการเปรียบเทียบแรงกักกับอุปกรณ์มาตรฐาน ซึ่งเราจะใช้อุปกรณ์ตรวจจับสนามคิสท์เลอร์ รุ่น 9255B (รายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจจับสนามคิสท์เลอร์ ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4) เป็นตัวมาตรฐานในการเปรียบเทียบ การหาเมตริกซ์สอบเทียบในการวิจัยนี้เราจะแสดงให้เห็นโดยใช้ข้อมูลจากการกักจริงโดยการกักนั้นจะกักที่ความเร็วคงที่ หรือพยายามให้อยู่ในสถานะอยู่ตัว (steady-state) เพื่อพยายามให้เข้าใกล้การสอบเทียบมาตรฐานซึ่งจะใช้สอบเทียบจากการวัดที่สแตติก ผลลัพธ์ที่ต้องการแสดงการเปรียบเทียบแรงกักกับอุปกรณ์มาตรฐานคือเพื่อต้องการแสดงให้เห็นว่าแนวโน้มของแรงที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดแรงที่พัฒนาขึ้นมากับอุปกรณ์วัดแรงที่ทำขายในท้องตลาดซึ่งใช้เทคโนโลยีการวัดที่แตกต่างกัน แต่แนวโน้มของแรงที่วัดได้นั้นเหมือนกัน ค่าแรงที่วัดจะอาจจะมีผลผิดพลาดแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากเมตริกซ์สอบเทียบที่เราใช้นั้นเราได้มาจากกักจริง ถ้าจะให้ตัวเลขถูกต้องมากยิ่งขึ้นเราจะต้องหาเมตริกซ์สอบเทียบจากการวัดที่เสถียร (Static condition) ในระยะที่สองของการพัฒนาเราจะทำการสร้างอุปกรณ์สอบเทียบมาตรฐานที่สามารถรับแรงได้มากกว่า 1000 นิวตัน เพื่อสำหรับใช้กับอุปกรณ์วัดแรงที่พัฒนาขึ้นนี้

7.1 วิธีการสอบเทียบ

ในวิธีการปรับเทียบค่าโดยทั่วไปจะทำโดยกำหนดให้ทุก ๆ อินพุตมีค่าคงที่เว้นแต่อินพุตหนึ่งที่เราสนใจ โดยจะทำการเปลี่ยนค่าอินพุตตัวนี้ไปหลาย ๆ ค่า ซึ่งก็จะมีผลทำให้เกิดเอาต์พุตที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปหลายค่าด้วย ซึ่งเราจะบันทึกค่าเอาต์พุตที่ได้นี้ไว้ โดยเอาต์พุตนี้อาจจะมีหลาย ๆ ตัวก็ได้ โดยขั้นตอนเหล่านี้จะกระทำซ้ำกันจนกระทั่งครบทุกอินพุตที่มี เราก็จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตครบทั้งหมด

ซึ่งจากสมการ (7.1) จะสามารถเขียนใหม่สำหรับการปรับเทียบค่าได้ว่า

$$\mathbf{V} = \mathbf{C}^{-1}\mathbf{F} = \mathbf{C}_s\mathbf{F} \quad (7.2)$$

เมื่อ \mathbf{C}_s คือ สเตรนคอมไพแลนซ์เมตริกซ์ (strain compliance matrix) ขนาด $m \times n$

ความสัมพันธ์ระหว่างเมตริกซ์ปรับเทียบค่ากับสเตรน คอมไพแลนซ์เมตริกซ์อาศัยหลักการหาอินเวอร์สของมัวร์ เพนโรส (Moore-Penrose Inverse) เมื่อ $m \geq n$ และ $\text{rank } \mathbf{C}_s = n$ คือ

$$\mathbf{C} = (\mathbf{C}_s^T \mathbf{C}_s)^{-1} \mathbf{C}_s^T \quad (7.3)$$

วิธีการปรับเทียบค่า

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีนี้ในการสอบเทียบอุปกรณ์ตรวจจับสนามในแนวแกน z ส่วนในแนวแกน x และ y เนื่องจากไม่สามารถหาชุดทดลองที่เหมาะสมได้ จึงได้ทำโดยวิธีอื่น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 7.2

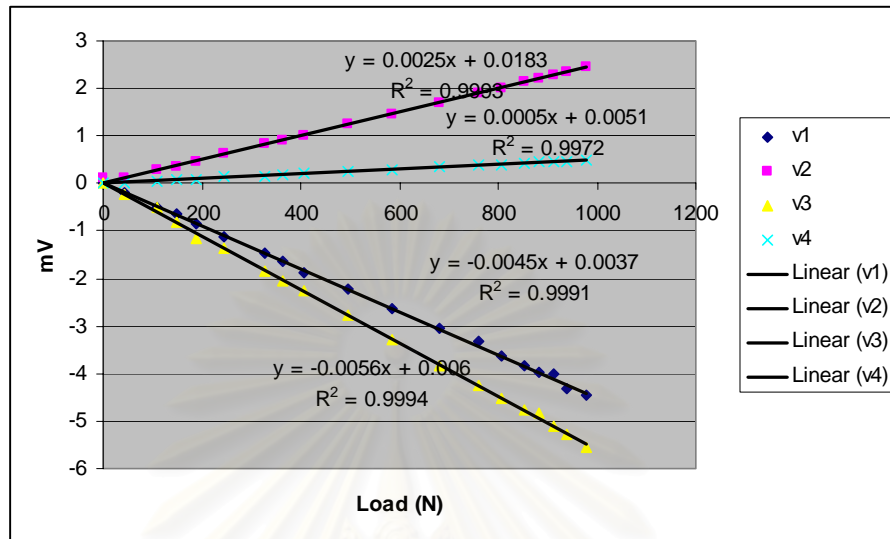
การปรับเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจจับสนามนี้อินพุตคือแรงในแนวแกน z ส่วนเอาต์พุตก็คือ ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ 16 ค่า แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่าง F_z ที่รู้ค่าซึ่งเป็นอินพุตกับค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ซึ่งเป็นเอาต์พุต ตามสมการที่ (7.4) โดยที่ F_x และ $F_y = 0$ ในการทดลองจะทำการเพิ่มและลดแรง F_z ไปหลาย ๆ ค่า จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่รู้ค่ากับค่าความเครียดที่วัดได้ ซึ่งจะนำความสัมพันธ์ที่ได้มาหาค่าสเตรนคอมไพแลนซ์เมตริกซ์ (\mathbf{C}_s) ต่อไป

$$\mathbf{V}_{16 \times 1} = \mathbf{C}_s \mathbf{F}_z \quad (7.4)$$

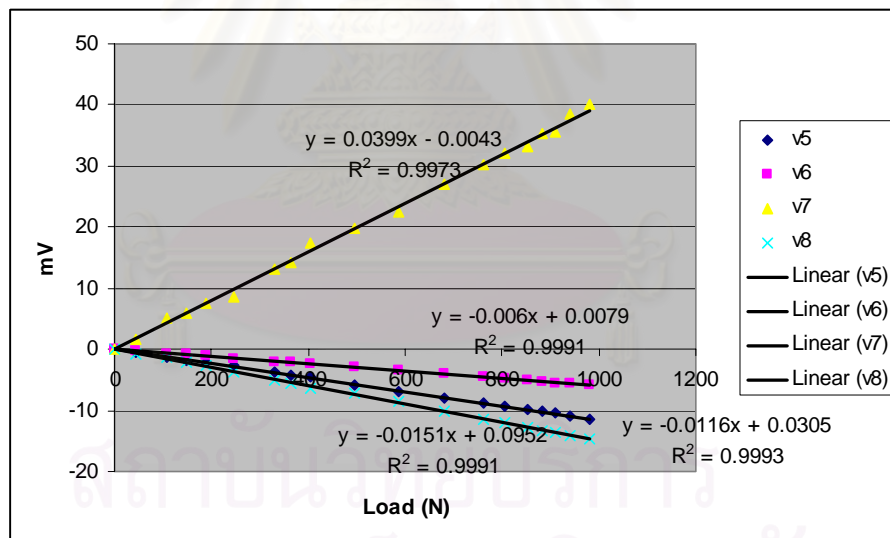
หรือกระจายออกมาได้เป็น

$$\begin{aligned} v_1 &= c_{s1} F_z \\ v_2 &= c_{s2} F_z \\ &\vdots \\ v_{16} &= c_{s16} F_z \end{aligned} \quad (7.5)$$

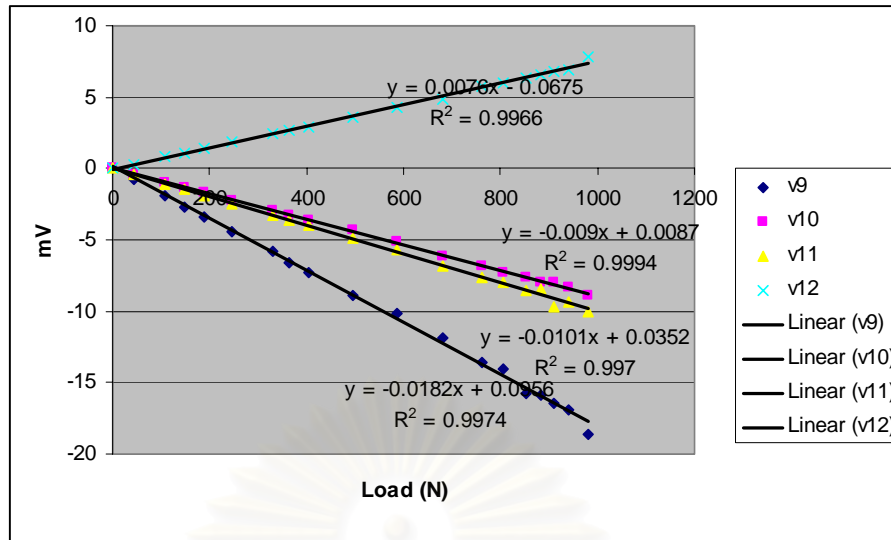
ซึ่งจะได้ว่า $c_{s1}, c_{s2}, \Lambda, c_{s16}$ คือความชันของกราฟนั่นเอง จะได้ความชันของกราฟดังแสดงในรูปที่ 7.1-7.4



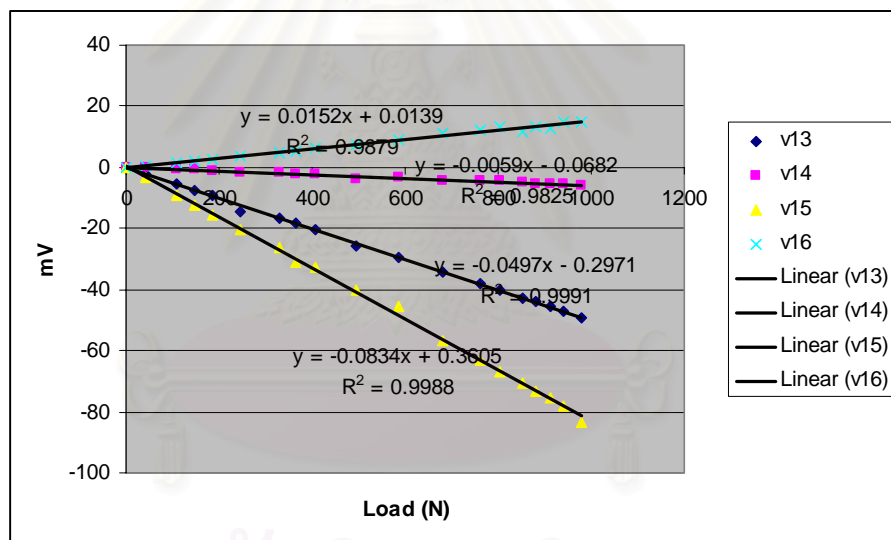
รูปที่ 7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณ 1-4



รูปที่ 7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณ 5-8



รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณ 9-12



รูปที่ 7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดที่และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ที่ช่องสัญญาณ 13-16

จากความสัมพันธ์ของกราฟในรูปที่ 7.1 -7.4 ได้

$$C_s = [-0.0045 \ 0.0025 \ -0.0056 \ 0.0005 \ -0.0116 \ -0.006 \ 0.04 \ -0.015 \ -0.0182 \ -0.009 \ -0.01 \ 0.0078 \ -0.05 \ -0.06 \ -0.0834 \ 0.0152]$$

และหาค่าลิเบรชันเมตริกซ์ในแนวแกน z ได้ดังนี้

$$C_s = [-6.6483 \ 36.93 \ -8.27 \ 0.73 \ -29.02 \ -15.01 \ 10 \ -36.52 \ -32.16 \ -16.08 \ -17.86 \ 13.22 \ -5.18 \ -0.63 \ -8.60 \ 1.55]$$

7.2 การเปรียบเทียบค่าในแนวแกน x y และ z

การเปรียบเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจจู้แรงนี้อื่นพุทคือแรงทั้งหมด 3 ค่าคือ $[F_x \ F_y \ F_z]$ ค่าเอาท์พุทคือ ค่าความศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จาก HP 3852A ซึ่งจะมีด้วยกันโครงสร้างละ 4 ค่าตามชุด สเตรณเกจ 4 คู่ที่ติด รวมทั้งหมดเป็น 16 ค่า แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่าง F_x , F_y และ F_z ที่รู้ค่าซึ่งเป็นอินพุทกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ซึ่งเป็นเอาท์พุท ในการทดลองจะวัดแรงกดเทียบกับอุปกรณ์ตรวจจู้แรงคิสท์เลอร์ รุ่น 9255B (รายละเอียดของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงคิสท์เลอร์ ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4) โดยกำหนดพารามิเตอร์ของการกดให้เหมือนกัน และเปลี่ยนเงื่อนไขไปเรื่อยๆ บันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากชุดสเตรณเกจทั้ง 16 ชุดข้างต้น จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง F_x , F_y และ F_z กับค่าคามต่างศักย์ที่วัดได้ จะได้คาลิเบรชันเมตริกซ์ ดังแสดงในสมการที่ (7.6)

$$\mathbf{F} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{V} \quad (7.6)$$

(3x1) (3x16) (16x1)

$$\mathbf{F} = [F_x \ F_y \ F_z]^T$$

$$\mathbf{V} = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5 \ v_6 \ v_7 \ v_8 \ v_9 \ v_{10} \ v_{11} \ v_{12} \ v_{13} \ v_{14} \ v_{15} \ v_{16}]^T$$

หรือเมื่อกระจายออกมาจะได้

$$F_x = \sum_{j=1}^{16} c_{1j} \cdot v_j$$

$$F_y = \sum_{j=1}^{16} c_{2j} \cdot v_j$$

$$F_z = \sum_{j=1}^{16} c_{3j} \cdot v_j$$

ในการสอบเทียบมีจำนวนข้อมูลหลายชุดสำหรับการหาคาลิเบรชันเมตริกซ์ จำเป็นต้องพิตข้อมูลโดยการวิเคราะห์ความถดถอยโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด สำหรับหลายตัวแปรดังที่จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

7.3 การวิเคราะห์ความถดถอยและสหสัมพันธ์เชิงซ้อน (Multiple Regression) (กัลยา วาณิชย์บัญชา, 2539)

เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม Y กับตัวแปรอิสระ X หลายตัว โดยรูปแบบของสมการ เมื่อมีตัวแปรอิสระ k ตัว (X_1, X_2, \dots, X_k) เป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + e \quad (7.7)$$

เมื่อ β_0 คือ ส่วนตัดแกน y เมื่อกำหนดให้ $X_1 = X_2 = \dots = X_k = 0$

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ เป็นสัมประสิทธิ์ความถดถอยเชิงส่วน (Partial regression Coefficient) โดยที่ค่า β_i เป็นค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม Y เมื่อตัวแปร X_i เปลี่ยนไป 1 หน่วย โดยที่ตัวแปรอิสระตัวอื่นมีค่าคงที่

สมมติฐานของการวิเคราะห์ความถดถอยเชิงซ้อน

1. ความคลาดเคลื่อน e เป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
2. ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ ($E(e) = 0$)
3. ค่าแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนเป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า $V(e) = \sigma_e^2$
4. e_i และ e_j เป็นอิสระต่อกัน; $i \neq j$

การประมาณค่าพารามิเตอร์ของสมการความถดถอยเชิงซ้อน

จากสมการความถดถอยเชิงซ้อน ซึ่งมีพารามิเตอร์ $k+1$ ตัวคือ $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ การประมาณค่า $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ จะต้องใช้ข้อมูลตัวอย่างของตัวแปร Y, X_1, X_2, \dots, X_k โดยใช้ตัวอย่างขนาด n จากสมการความถดถอยเชิงซ้อน

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + e_i \quad (7.8)$$

จะประมาณค่า Y หรือสมการที่ (7.8) ด้วยสมการที่ (7.9)

$$\hat{Y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_{1i} + \hat{\beta}_2 X_{2i} + \dots + \hat{\beta}_k X_{ki} \quad (7.9)$$

หรือ

$$\hat{Y}_i = a + b_1 X_{1i} + b_2 X_{2i} + \dots + b_k X_{ki} \quad (7.10)$$

โดยที่

$$\hat{\beta}_0 = a, \hat{\beta}_1 = b_1, \hat{\beta}_2 = b_2, \dots, \hat{\beta}_k = b_k$$

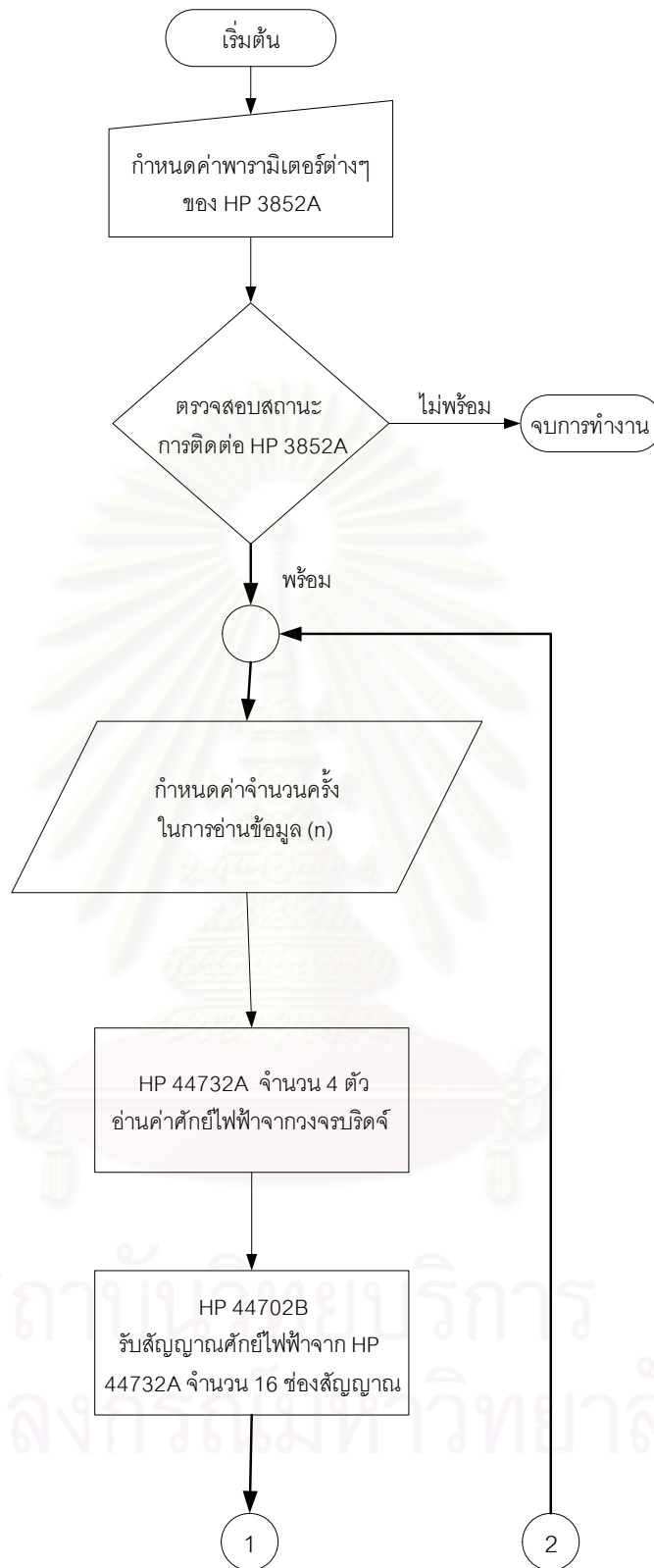
ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณค่า Y_i ด้วย \hat{Y}_i คือ $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$ (สมการที่ (7.8)-(7.9))

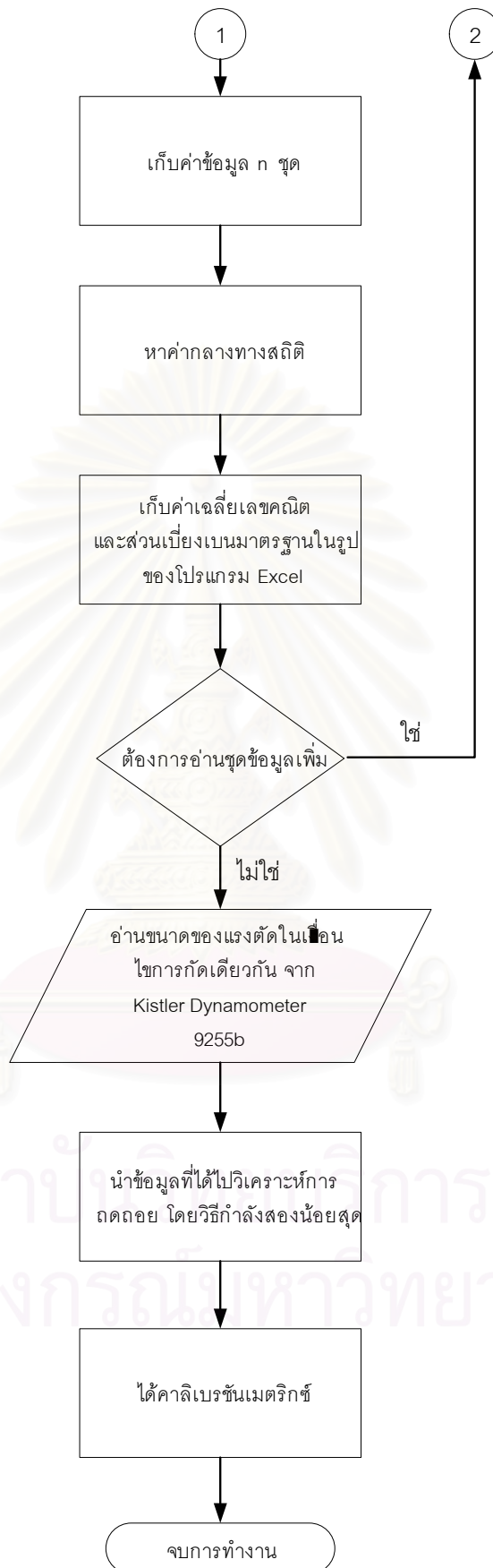
การประมาณค่า $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ ด้วย a, b_1, b_2, \dots, b_k มีเป้าหมายคือเพื่อทำให้ผลบวกของค่าความคลาดเคลื่อนยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด นั่นคือหาค่า

$$a, b_1, b_2, \dots, b_k \text{ ที่ทำให้ } \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \text{ มีค่าต่ำสุด}$$

7.4 วิธีการเปรียบเทียบ

การเปรียบเทียบอุปกรณ์ตรวจรู้แรงมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 7.5 ดังนี้





รูปที่ 7.5 ขั้นตอนการเปรียบเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจจู้แรง

การเปรียบเทียบทำโดยวัดค่าศักย์ไฟฟ้าจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้น เทียบกับแรงกัตที่รู้ค่าจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงคิสท์เลอร์ ภายใต้เงื่อนไขการกัตที่คล้ายคลึงกัน แล้วเปลี่ยนเงื่อนไขการกัตไปเรื่อยๆ วิธีการคำนวณทำตามแผนภาพรูปที่ 7.1 ตารางที่ 7.1 เป็นตัวอย่างของค่าแรงที่วัดได้ในหน่วยนิวตัน และค่า v ทั้ง 16 ตัว เป็นศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์

ตารางที่ 7.1 ตัวอย่างข้อมูลสำหรับการเปรียบเทียบค่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรง

ครั้งที่ / ค่าที่อ่าน	1	2	3	4	5	6
F_x	98	20	250	5	264	22
F_y	-59	-130	-450	5	-423	-20
F_z	274	5	55	210	30	-10
v_1	12.750	-2.242	-4.610	12.070	-2.467	-1.146
v_2	0.866	-2.127	10.613	1.421	8.818	-1.370
v_3	21.643	3.065	-5.104	12.948	-0.003	4.847
v_4	11.426	5.624	-14.547	0.396	-11.167	-8.473
v_5	-2.259	-10.368	-32.048	10.105	-5.536	-1.808
v_6	-0.098	-11.005	-14.941	0.980	12.422	1.084
v_7	3.234	-4.038	-83.652	10.646	0.913	-3.831
v_8	1.719	-10.671	-0.675	-0.213	11.550	-0.575
v_9	-12.625	-5.175	2.775	-11.925	0.654	-0.458
v_{10}	-7.220	-16.655	11.037	-0.276	-15.090	1.590
v_{11}	10.088	-12.162	10.133	10.753	17.307	-0.240
v_{12}	8.014	22.545	-19.252	-3.117	-21.664	-0.219
v_{13}	-14.918	-1.754	1.292	11.037	0.263	0.881
v_{14}	7.998	34.474	3.691	-1.288	-11.511	-7.644
v_{15}	-10.577	-0.649	3.255	12.337	-0.380	-2.146
v_{16}	-4.375	-58.713	-3.342	2.625	10.642	2.371

เมื่อทำการคำนวณจะได้ค่าลิเบรชันเมตริกซ์ดังนี้

$$C^T = \begin{bmatrix} 8.906 & -27.107 & -6.055 \\ -24.977 & 44.203 & 35.156 \\ -4.291 & 12.687 & -7.599 \\ 0.635 & -1.543 & 0.711 \\ 99.895 & -255.630 & -28.878 \\ 84.337 & -169.071 & -15.669 \\ -56.956 & 131.942 & 9.465 \\ -12.048 & 15.657 & -36.631 \\ 14.754 & -64.551 & -39.936 \\ -13.327 & 30.403 & -18.068 \\ -1.314 & -1.083 & -1.686 \\ -11.372 & 19.642 & 16.107 \\ -62.187 & 147.55 & -0.367 \\ -8.522 & 20.367 & -10.939 \\ 29.791 & -70.372 & 8.105 \\ -31.657 & 76.600 & 20.468 \end{bmatrix}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

ผลการทดลอง

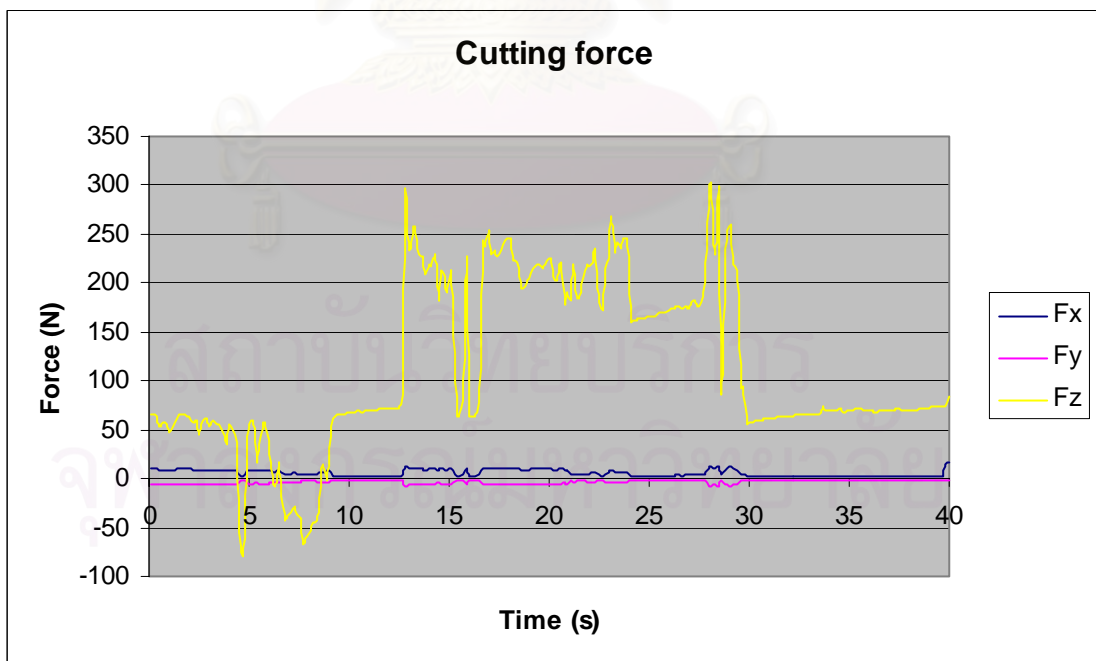
8.1 การทดลองหาแรงตัดที่เกิดจากการเจาะ

การทดลองที่ 1-3 เป็นการทดลองหาแรงตัดที่เกิดจากการเจาะ โดยใช้ดอกสว่าน ซึ่งเงื่อนไขต่างๆ ของการเจาะ แสดงไว้ในตารางที่ 8.1-8.3

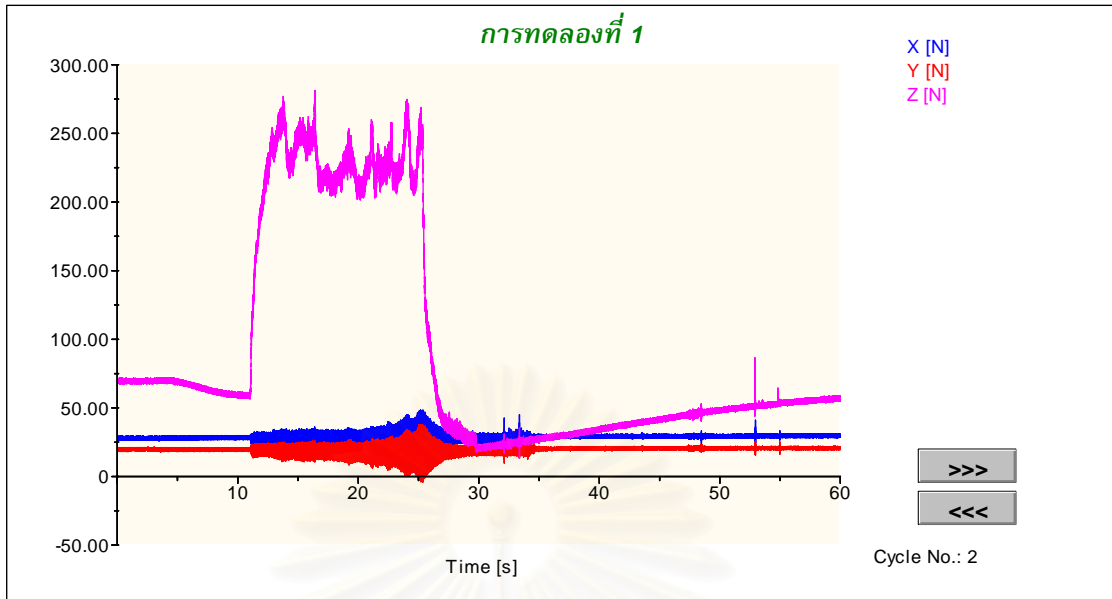
8.1.1 การทดลองที่ 1

ตารางที่ 8.1 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 1

ตำแหน่งการเจาะ	$x=-20, y=0$.
วัสดุชิ้นงาน	อลูมิเนียม
ดอกสว่าน	HSS $\phi 8$ mm.
ความเร็วรอบเพลางานหลัก	1000 rpm.
อัตราป้อน	40 mm./min
ความลึกการกัด	15 mm.



รูปที่ 8.1 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 1 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจู้แรงที่สร้างขึ้น

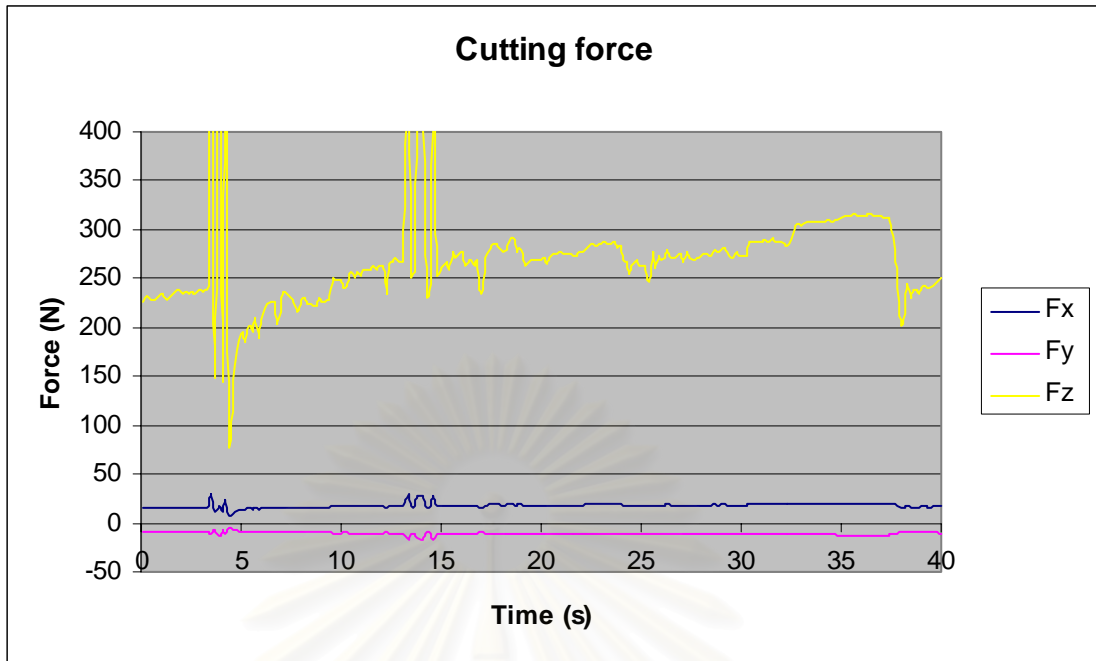


รูปที่ 8.2 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 1 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิส์ท์เลอร์

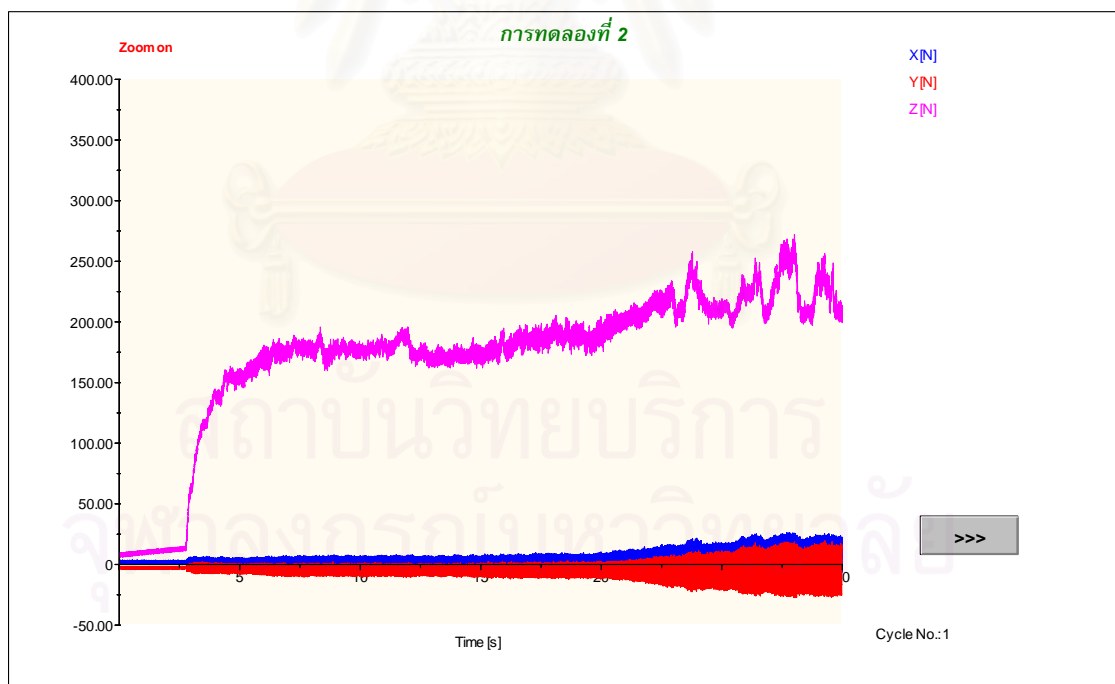
8.1.2 การทดลองที่ 2

ตารางที่ 8.2 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 2

ตำแหน่งการเจาะ	$x=0, y=0$.
วัสดุชิ้นงาน	อลูมิเนียม
ดอกสว่าน	HSS $\phi 5$ mm.
ความเร็วรอบเพลางานหลัก	1200 rpm.
อัตราป้อน	25 mm./min
ความลึกการเจาะ	15 mm.



รูปที่ 8.3 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 2 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจู้แรงที่สร้างขึ้น

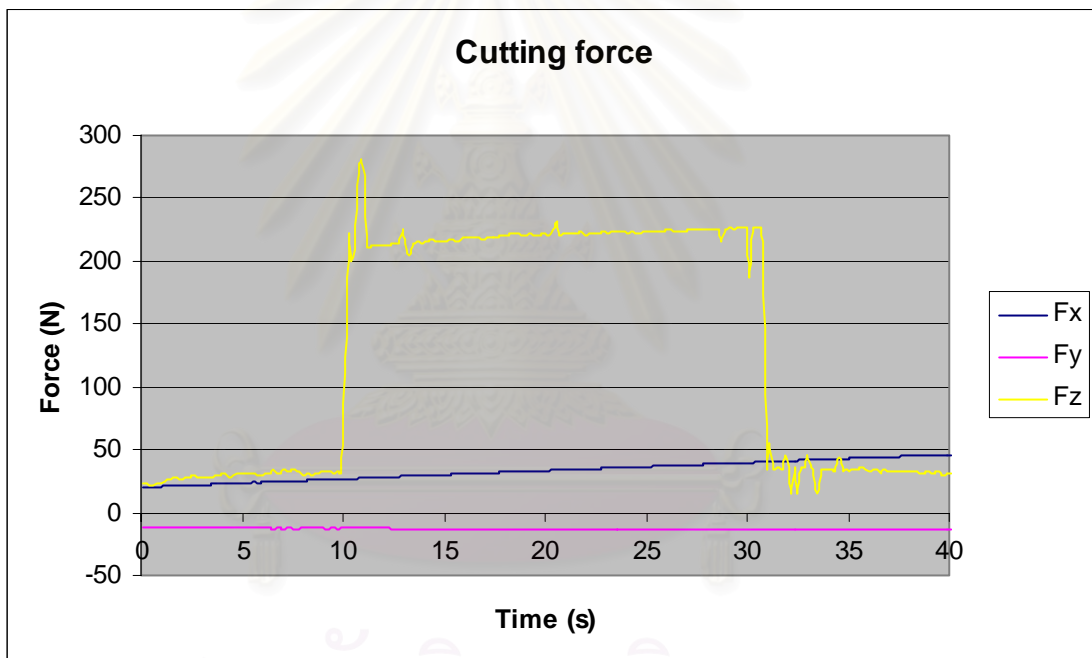


รูปที่ 8.4 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 2 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจู้แรงของคิสท์เลอร์

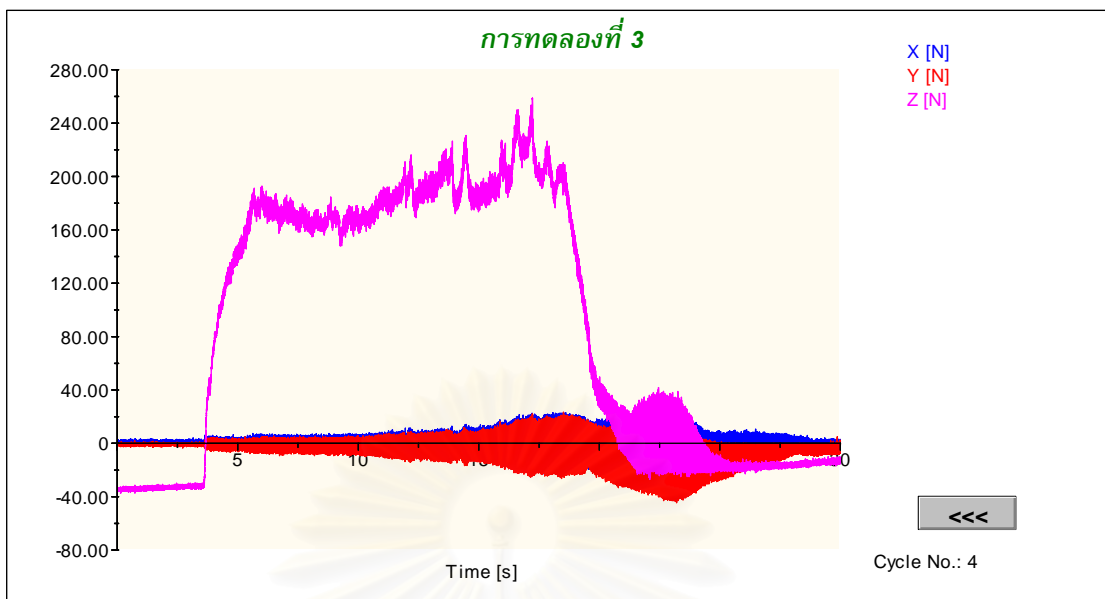
8.1.3 การทดลองที่ 3

ตารางที่ 8.3 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 3

ตำแหน่งการเจาะ	$x=0, y=0$
วัสดุชิ้นงาน	อลูมิเนียม
ดอกสว่าน	HSS $\phi 5$ mm.
ความเร็วรอบเพลางานหลัก	1200 rpm.
อัตราป้อน	40 mm./min
ความลึกการเจาะ	20 mm.



รูปที่ 8.5 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 3 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่สร้างขึ้น



รูปที่ 8.6 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 3 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิส์ท์เลอร์

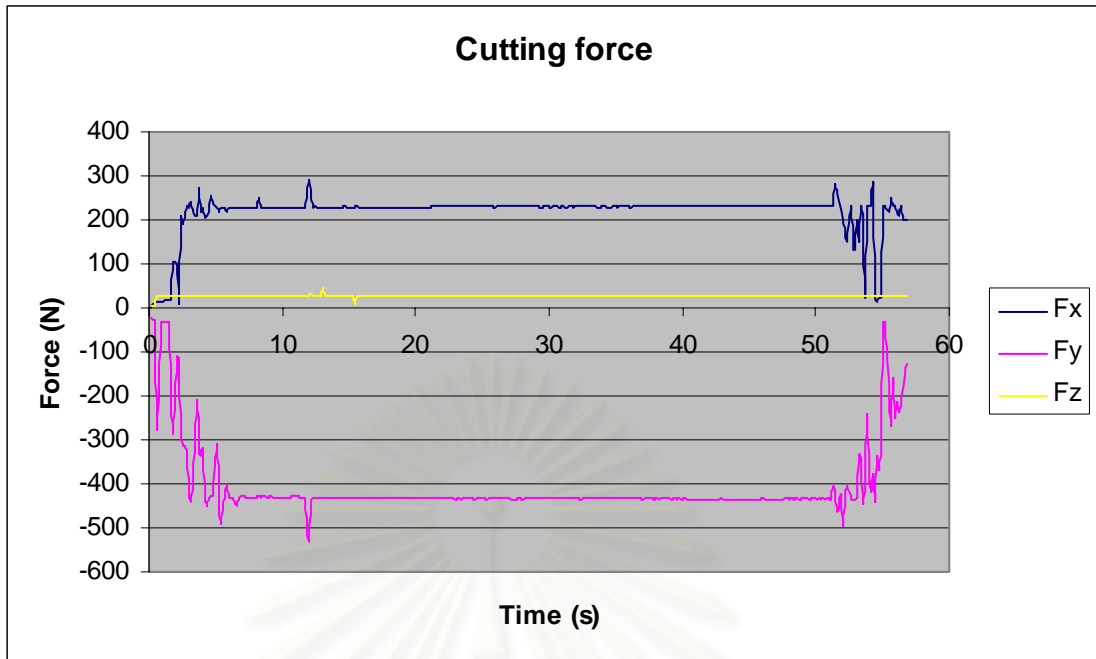
8.2 การทดลองหาแรงตัดที่เกิดจากการกัด

การทดลองที่ 4-9 วัดแรงตัดที่ได้จากการกัด โดยมีเงื่อนไขการตัดต่างๆ กัน ดังแสดงไว้ในตาราง ในแต่ละการทดลอง

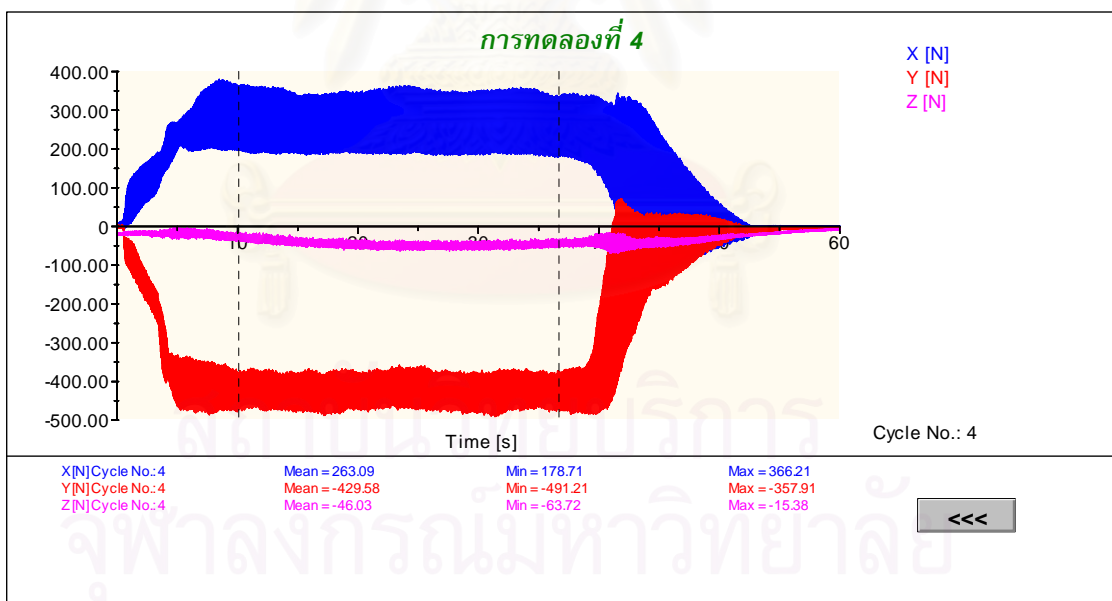
8.2.1 การทดลองที่ 4

ตารางที่ 8.4 เงื่อนไขการกัดในการทดลองที่ 4

กระบวนการ	กัดแบบเซาะร่อง
รายละเอียดการกัด	กัดตามแนวแกน +x เป็นระยะทาง 20 mm. โดยที่ y คงที่ที่ 0 mm.
วัสดุชิ้นงาน	อลูมิเนียม
เครื่องมือตัด	HSS ϕ 8 mm.
ความเร็วรอบเพลางานหลัก	1200 rpm.
อัตราป้อน	20 mm./min
ความลึกการกัด	3 mm.
ความกว้างของหน้าสัมผัส	8 mm.



รูปที่ 8.7 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 4 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจู้แรงที่สร้างขึ้น

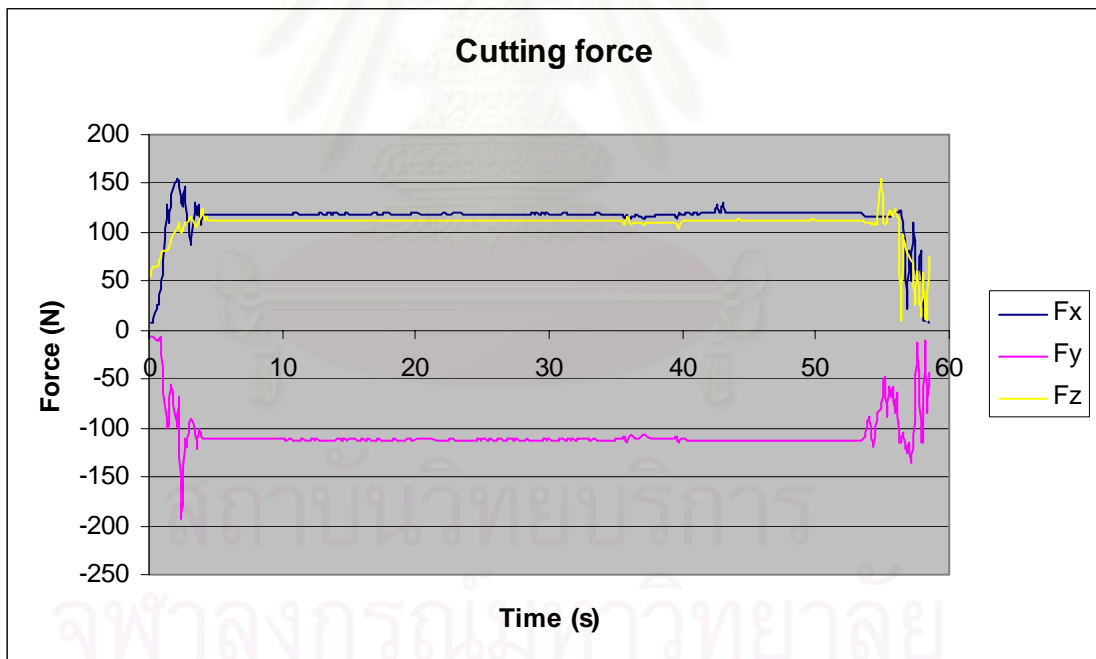


รูปที่ 8.8 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 4 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจู้แรงของคิส์เลอร์

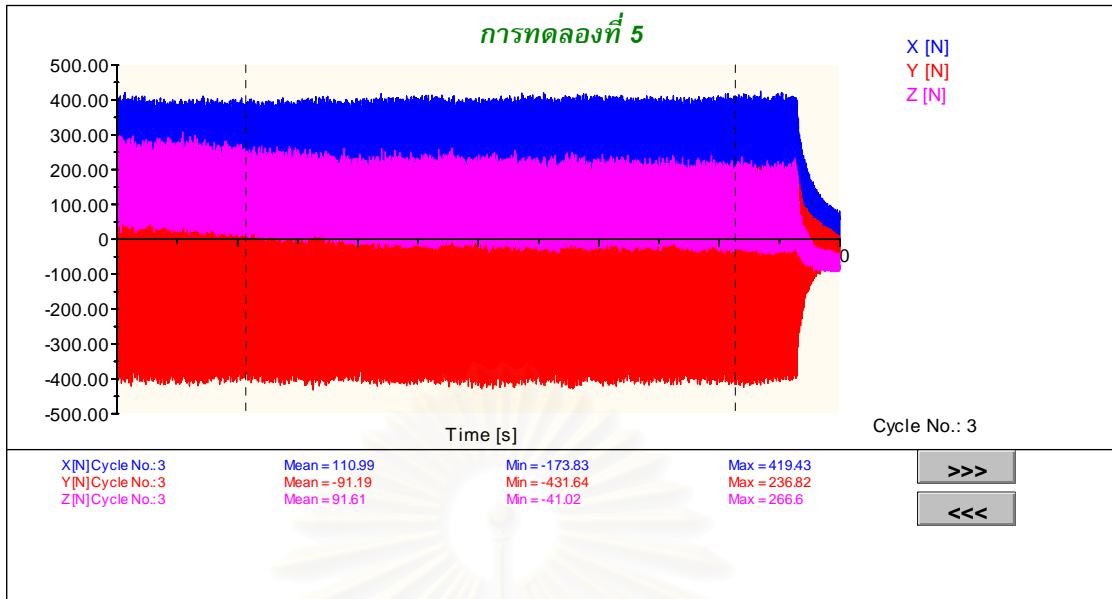
8.2.2 การทดลองที่ 5

ตารางที่ 8.5 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 5

กระบวนการ	กัดแบบเซาะร่อง
รายละเอียดการกัด	กัดตามแนวแกน +x เป็นระยะทาง 20 mm. โดยที่ y คงที่ ที่ 0 mm.
วัสดุชิ้นงาน	อลูมิเนียม
เครื่องมือตัด	HSS ϕ 25 mm.
ความเร็วรอบเพลางานหลัก	600 rpm.
อัตราป้อน	20 mm./min
ความลึกการกัด	3 mm.
ความกว้างของหน้าสัมผัส	25 mm.



รูปที่ 8.9 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 5 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้น

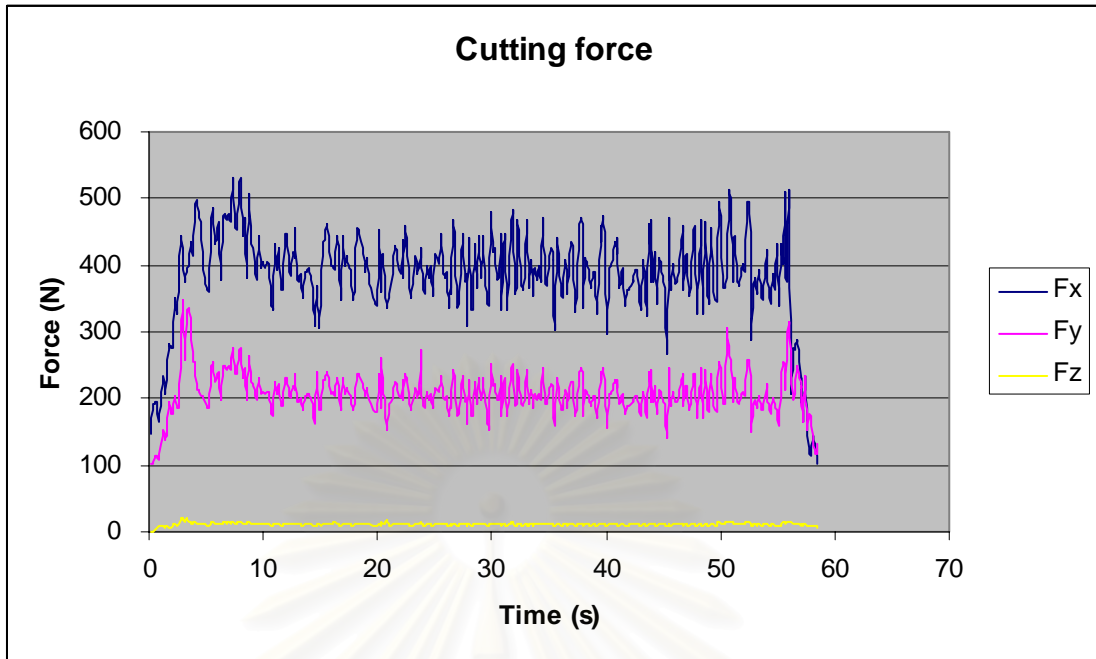


รูปที่ 8.10 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 5 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิส์ท์เลอร์

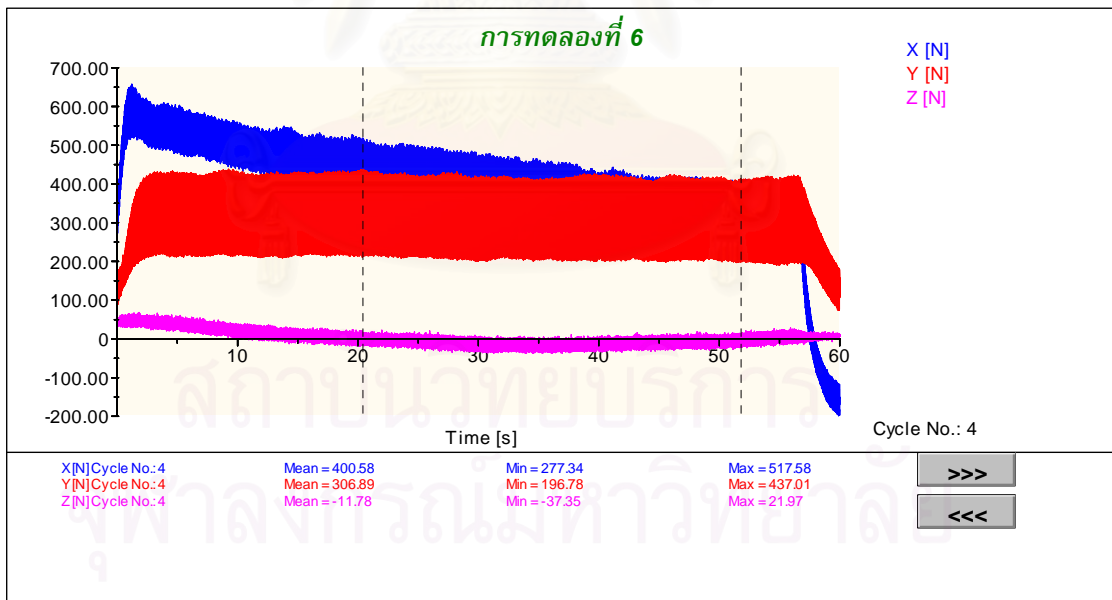
8.2.3 การทดลองที่ 6

ตารางที่ 8.6 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 6

กระบวนการ	กัดแบบเจาะร่อง
รายละเอียดการกัด	กัดตามแนวแกน +x เป็นระยะทาง 20 mm. โดยที่ y คงที่ ที่ -15 mm.
วัสดุชิ้นงาน	อลูมิเนียม
เครื่องมือตัด	HSS ϕ 8 mm.
ความเร็วรอบเพลางานหลัก	1200 rpm.
อัตราป้อน	20 mm./min
ความลึกการกัด	5 mm.
ความกว้างของหน้าสัมผัส	8 mm.



รูปที่ 8.11 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 6 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้น



รูปที่ 8.12 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 6 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิษฐ์เลอร์

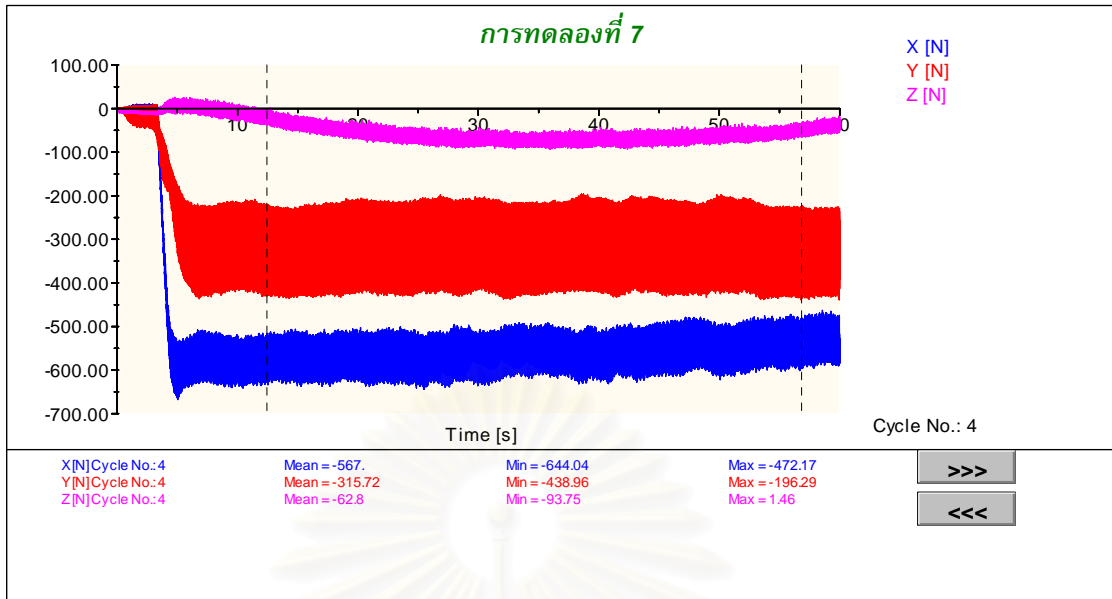
8.2.4 การทดลองที่ 7

ตารางที่ 8.7 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 7

กระบวนการ	กัดแบบเซาะร่อง
รายละเอียดการกัด	กัดตามแนวแกน -x เป็นระยะทาง 20 mm. โดยที่ y คงที่ ที่ 15 mm.
วัสดุชิ้นงาน	อลูมิเนียม
เครื่องมือตัด	HSS ϕ 8 mm.
ความเร็วรอบเพลางานหลัก	1200 rpm.
อัตราป้อน	20 mm./min
ความลึกการกัด	5 mm.
ความกว้างของหน้าสัมผัส	8 mm.



รูปที่ 8.13 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 7 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้น

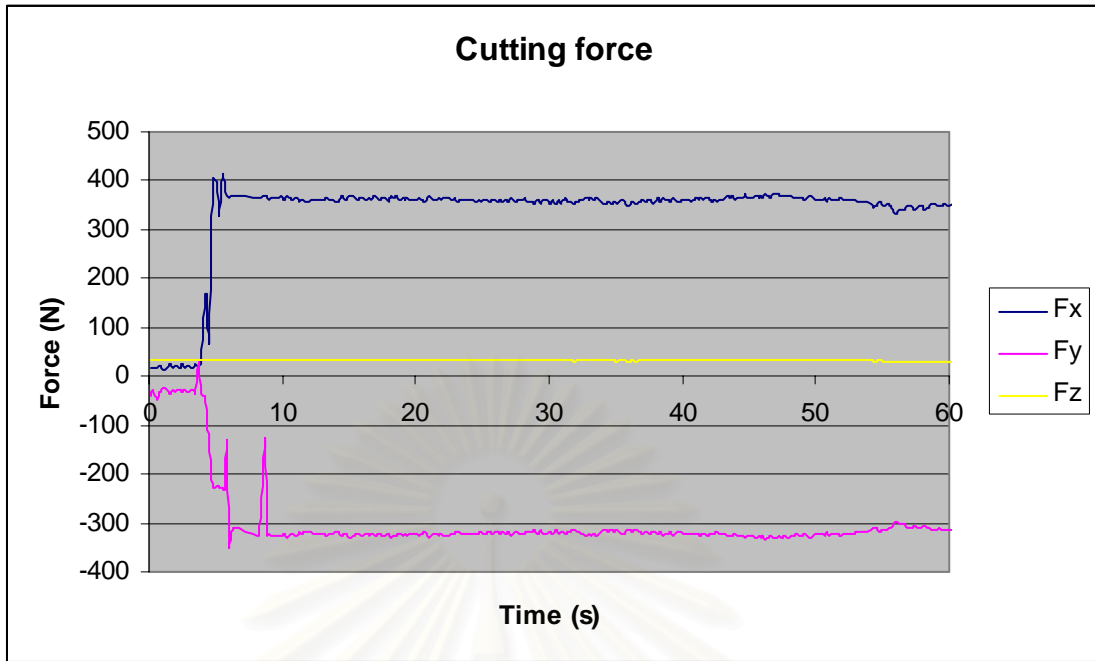


รูปที่ 8.14 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 7 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิส์ท์เลอร์

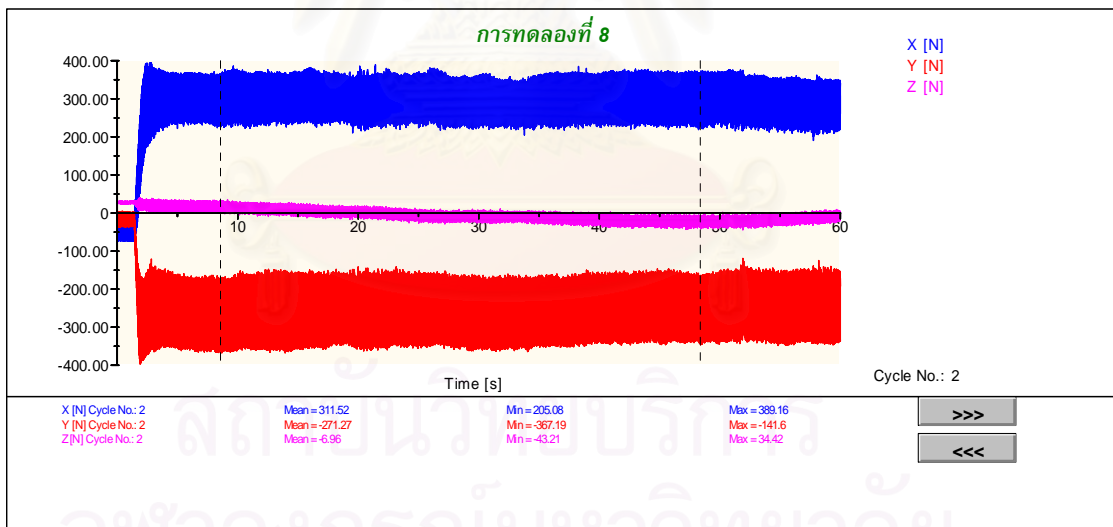
8.2.6 การทดลองที่ 8

ตารางที่ 8.8 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 8

กระบวนการ	กัดแบบทวน (Down milling)
รายละเอียดการกัด	กัดตามแนวแกน +y เป็นระยะทาง 25 mm. โดยที่ x คงที่ ที่ -65 mm.
วัสดุชิ้นงาน	อลูมิเนียม
เครื่องมือตัด	HSS ϕ 8 mm.
ความเร็วรอบเพลางานหลัก	1200 rpm.
อัตราป้อน	25 mm./min
ความลึกการกัด	5 mm.
ความกว้างของหน้าสัมผัส	6 mm.



รูปที่ 8.15 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 8 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้น

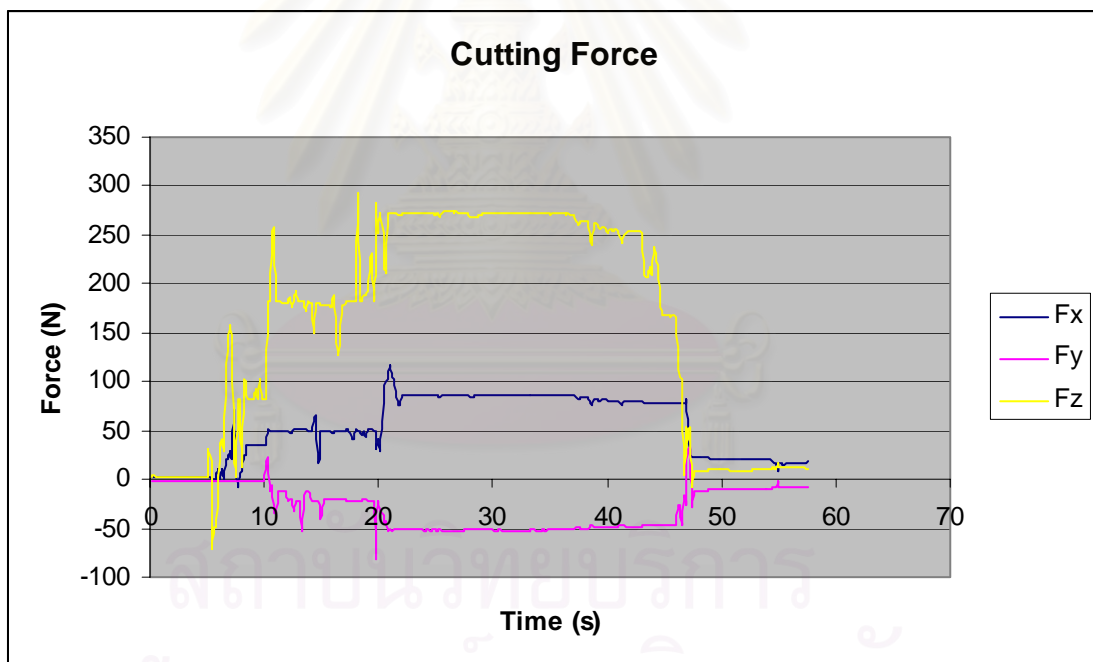


รูปที่ 8.16 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 8 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิสท์เลอร์

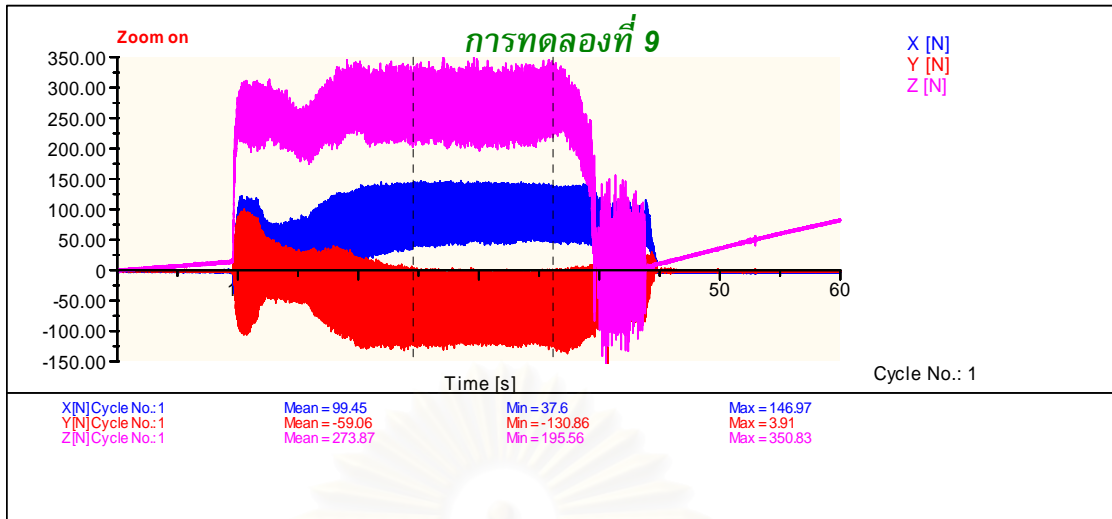
8.2.8 การทดลองที่ 9

ตารางที่ 8.9 เงื่อนไขการตัดของการทดลองที่ 9

กระบวนการ	เจาะโดยใช้เฟลตเฮนมิลล์
รายละเอียดการกัด	เจาะตามแนวแกน -z เป็นระยะทาง 15 mm. ที่ตำแหน่ง $x=0$ และ $y=0$ เจาะนำ $\phi 5$ mm.
วัสดุชิ้นงาน	อลูมิเนียม
เครื่องมือตัด	HSS $\phi 12$ mm.
ความเร็วรอบเพลางานหลัก	1000 rpm.
อัตราป้อน	20 mm./min
ความลึกการกัด	10 mm.



รูปที่ 8.17 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการเจาะในการทดลองที่ 9 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้น



รูปที่ 8.18 แรงตัด F_x , F_y และ F_z ที่วัดได้จากการกัดในการทดลองที่ 9 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิสท์เลอร์

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 7 ว่าผลของการวิจัยนี้ในส่วนการของหาเมตริกซ์สอปเทียบหรือคาลิเบรชันเมตริกซ์นั้นจุดมุ่งหมายก็คือต้องการแสดงแนวโน้มของแรงกัดที่วัดได้จากอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับแรงที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดแรงกัดที่มีขายอยู่ที่ท้องตลาดถึงแม้จะใช้เทคโนโลยีในการวัดแตกต่างกัน จากกราฟเปรียบเทียบผลการวัดแรงที่เกิดจากการเจาะและกัดในการทดลองที่ 1-9 จากรูปที่ 8.1-8.18 พบว่าอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดแรงได้โดยมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงของคิสท์เลอร์ซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์วัดแรงเพื่อเปรียบเทียบ แต่ขนาดของแรงที่วัดได้ยังคงมีความคลาดเคลื่อนไปบ้างอันเนื่องมาจากวิธีการหาคาลิเบรชันเมตริกซ์ที่ยังไม่แม่นยำพอ ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าเงื่อนไขของการกัดถึงแม้ว่าจะพยายามวัดแรงกัดในขณะที่การกัดคงอยู่ในสถานะอยู่ตัว (steady-stead condition) โดยพยายามให้ความเร็วในการกัด (feed-rate) นั้นมีความเร็วคงที่ แต่ก็เป็นไปได้ยากในการคงในสถานะอยู่ตัวดังกล่าว ดังนั้นการจะหาคาลิเบรชันเมตริกซ์ให้ได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นจำเป็นต้องการสร้างอุปกรณ์สอปเทียบมาตรฐานซึ่งสามารถใส่ภาระสูง ๆ ได้เช่น แรง 1000 นิวตัน ในทิศทางทั้ง 3 ทิศทาง เพื่อใช้ในการสอปเทียบ ซึ่งงานวิจัยในระยะต่อไปจะทำการออกแบบอุปกรณ์มาตรฐานที่สามารถใช้สอปเทียบอุปกรณ์วัดแรงกัดทั่วไปได้

8.3 การทดลองหาค่าคุณสมบัติทางด้านสถิติของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน z

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการสอบเทียบในกรณีของสแตติก เฉพาะในแนวแกน z เท่านั้นที่มีการทดสอบแบบสแตติก เนื่องจากทำได้เลยโดยไม่ต้องสร้างเครื่องมือมาตรฐานเพื่อสอบเทียบ เราจะแสดงขั้นตอนมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำ ซึ่งจะใช้ในการทำงานเดียวกันกับแกน x และ แกน y

8.3.1. ค่าความถูกต้อง (accuracy)

เป็นค่าที่บอกถึงความแม่นยำในการวัด ซึ่งจะมีวิธีบอกเป็นค่าความผิดพลาดในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่าที่วัดได้กับค่าจริง ซึ่งอาจบอกได้ในรูปของ เปอร์เซ็นต์ของค่าพูลสเกล (percent of the full-scale reading) ซึ่งมีวิธีหาดังสมการที่ (8.1)

$$\text{เปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล} = \text{ค่าผิดพลาด} / \text{ค่าเต็มสเกล} * 100\% \quad (8.1)$$

ตารางที่ 8.10 ค่าความถูกต้องของอุปกรณ์ตรวจจับสนิ่งแรงในแนวแกน z

โหลดที่ใส่ (N)	แรงที่ย่านได้ (N)			ค่าความผิดพลาด (N)		ค่าผิดพลาดมาก ที่สุด	% ของค่า เต็มสเกล
	ค่าเฉลี่ย (Av.)	ค่ามากที่สุด (Max.)	ค่าน้อยสุด (Min.)	Max.-Av.	Av.-Min.		
0.000	1.149	1.470	0.534	0.321	0.614	1.229	0.125
42.183	46.066	47.671	44.318	1.605	1.748	3.495	0.357
108.401	110.759	111.159	110.179	0.400	0.580	1.161	0.118
148.131	156.753	166.447	152.243	9.694	4.510	19.388	1.978
187.567	194.209	201.112	191.431	6.903	2.779	13.806	1.409
245.446	258.306	262.928	252.040	4.622	6.266	12.531	1.279
328.733	327.753	331.867	323.984	4.115	3.769	8.229	0.840
364.147	357.069	362.997	352.368	5.928	4.701	11.856	1.210
405.349	413.936	416.489	412.492	2.553	1.444	5.106	0.521
496.288	501.510	503.507	499.768	1.996	1.743	3.992	0.407
586.148	585.811	586.525	584.140	0.714	1.672	3.343	0.341
682.384	673.610	674.660	672.352	1.050	1.258	2.515	0.257
761.060	758.823	767.654	755.516	8.831	3.307	17.663	1.802
805.205	799.631	806.217	789.006	6.586	10.624	21.249	2.168
852.783	851.234	851.543	851.100	0.308	0.135	0.617	0.063
882.410	880.071	881.995	879.020	1.925	1.051	3.849	0.393
911.545	901.819	906.214	897.248	4.395	4.570	9.141	0.933
939.994	932.225	932.676	931.556	0.451	0.670	1.339	0.137
979.921	1023.529	1033.194	1007.191	9.665	16.339	32.677	3.334

จากตารางที่ 8.10 จะได้ค่าความถูกต้องเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกลคือ 3.334

8.3.2. ค่ารีพีทอะบิลิตี (repeatability)

เป็นค่าที่แสดงถึงความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัดโดยการป้อนค่าอินพุตค่าเดิมหลาย ๆ ครั้ง แล้วทำการวัดเพื่อตรวจสอบลักษณะการกระจายของค่าเอาต์พุต ซึ่งหาได้ดังสมการที่ (8.2)

$$\text{รีพีทอะบิลิตี} = (\text{ค่าเอาต์พุตมากที่สุด} - \text{ค่าเอาต์พุตน้อยสุด}) / \text{ค่าฟูลสเกล} * 100 \% \quad (8.2)$$

ตารางที่ 8.11 ค่ารีฟิทอะบิลิตีของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงในแนวแกน z

โหลดที่ใส่ (N)	แรงที่อ่านได้ (N)		Max.-Min.	รีฟิทอะบิลิตี
	ค่ามากที่สุด (Max.)	ค่าน้อยสุด (Min.)		
0.000	1.470	0.534	0.935	0.095
42.183	47.671	44.318	3.353	0.342
108.401	111.159	110.179	0.980	0.100
148.131	166.447	152.243	14.204	1.449
187.567	201.112	191.431	9.681	0.988
245.446	262.928	252.040	10.888	1.111
328.733	331.867	323.984	7.883	0.804
364.147	362.997	352.368	10.629	1.085
405.349	416.489	412.492	3.997	0.408
496.288	503.507	499.768	3.739	0.382
586.148	586.525	584.140	2.385	0.243
682.384	674.660	672.352	2.307	0.235
761.060	767.654	755.516	12.138	1.239
805.205	806.217	789.006	17.211	1.756
852.783	851.543	851.100	0.443	0.045
882.410	881.995	879.020	2.975	0.304
911.545	906.214	897.248	8.966	0.915
939.994	932.676	931.556	1.121	0.114
979.921	1033.194	1007.191	26.003	2.653

จากตารางที่ 8.11 ได้ค่ารีฟิทอะบิลิตีของอุปกรณ์ตรวจจู้แรงในแนวแกน z คือ 2.653

บทที่ 9

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

9.1 สรุปผล

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจรู้แรงขึ้นมาสําหรับใช้กับงานกักบนเครื่องกัก โดยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่สร้างขึ้นนี้สามารถวัดแรงได้ใน 3 ทิศทางได้แก่ F_x , F_y และ F_z ใช้สเตรนเกจเป็นตัวตรวจวัด (Sensing element) สามารถวัดแรงได้ในแต่ละแนวแกน -1000 ถึง 1000 นิวตัน ซึ่งจะสามารถสรุปขั้นตอนและผลการวิจัยได้ดังนี้

การออกแบบโครงสร้างสำหรับรับแรงของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนั้น เป็นการออกแบบโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการวัดความเครียดที่เกิดจากโมเมนต์ดัด โดยความเครียดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเท่ากันและมีทิศทางตรงกันข้าม เพื่อให้เหมาะสำหรับการใช้วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์ในการวัด

ในการวิเคราะห์หาการเสียรูปของโครงสร้าง ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วย เพื่อลดเวลาในการทดลอง ซึ่งในส่วนนี้จะต้องมีการปรับเปลี่ยนขนาดของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงหลาย ๆ ส่วนเพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมที่สุด โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้ว่าโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ มีความแข็งแรงและมีความไวในการวัดแรงต่างกันเล็กน้อยเพียงใด มีค่าความถี่ธรรมชาติเท่าใด โครงสร้างมีการเสียรูปมากน้อยเพียงใด ดูว่าบริเวณใดเกิดความเครียดมากซึ่งจะเป็นจุดที่เหมาะสมที่จะทำการติดสเตรนเกจ

หลังจากออกแบบโครงสร้างแล้ว ทำการติดสเตรนเกจ ในตำแหน่งที่ได้จากการวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วทำการเชื่อมสาย และปิดเคสอุปกรณ์ตรวจรู้แรง และต่อวงจรกับอุปกรณ์ปรับปรุงคุณภาพสัญญาณ ผ่านทางสเตรนเกจเฟดมีลติเพลกเซอร์ จำนวน 16 ช่องสัญญาณ ของเครื่องเอชพี 3852A พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน และการแสดงผลของเครื่อง

การโปรแกรมได้เลือกใช้โปรแกรม เอชพีวี ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบกราฟฟิก ข้อดีของโปรแกรมนี้ก็คือสามารถรับข้อมูลที่เก็บมาจากเครื่องเอชพี 3852A ได้โดยไม่ยุ่งยาก โดยผ่านทางสายเคเบิล เอชพี 10833B ต่อเข้ากับการ์ดและต่อกับคอมพิวเตอร์ทาง ISA บัส

ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลองเนื่องมาจากผลการทดลองที่แสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการวัดโดยใช้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น กับอุปกรณ์วัดแรงคิสท์เลอร์ที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบ นั้นมีผลแตกต่างกันอยู่บ้าง เนื่องจากว่าเราไม่สามารถสร้างเงื่อนไขในการกักให้เหมือนกันได้ทุก

ประการเช่น ความคมของมีดกัด ความลึกหรือของมีดกัด ความเหมือนกันของวัสดุหรือการกระจายของเนื้อวัสดุที่ใช้ในการกัดที่มีความแตกต่างกัน ตำแหน่งที่วัด การเกิดเบลล (Burr) ขึ้นที่ขอบของชิ้นงานตามเส้นทางเดินของการกัด เป็นต้น

9.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะหรือแนวทางในการที่จะพัฒนาอุปกรณ์ตรวจรู้แรงนี้ต่อไปในอนาคตมีดังต่อไปนี้

1. ตัว Case ควรปรับปรุงให้มีความแข็งแรงมากขึ้นเพียงพอที่จะรับแรงกัดที่มากกว่านี้ได้ และป้องกันการรั่วซึมของน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในงานกัดจริง
2. ควรใช้อุปกรณ์อ่านสัญญาณจากสเตรนเกจที่มีความเร็วในการสุ่มข้อมูลสูงกว่านี้ หรือมี Sampling rate สูงกว่าอุปกรณ์ที่ใช้ปัจจุบัน อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถตั้งค่า Sampling rate ได้สูงสุดคือ 500 Hz ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงความถี่ใช้งาน (bandwidth) ของอุปกรณ์ที่ต้องการสร้าง
3. ตัว Case ควรชุบแข็ง เพื่อป้องกันการรอยขีดและสนิมที่อาจจะเกิดขึ้น
4. ควรใช้สเตรนเกจที่มีความไวหรือเกจแพคเตอร์มากกว่าเดิม ซึ่งจะสามารถทำให้ตรวจวัดการเกิดความเครียดที่มีขนาดเล็ก และทำให้สามารถใช้อัตราการขยายสัญญาณของวงจรสเตรนเกจลดลง เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากสัญญาณรบกวนอื่น ๆ ได้ดีขึ้น
5. พัฒนาระบบซีลเพื่อให้สามารถบรรจุก๊าซเฉื่อยในช่องภายใน เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของสเตรนเกจที่ติดตั้งอยู่ภายในอุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่พัฒนาขึ้นนี้

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัลยา วานิชย์บัญชา. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ชาติ ตระการกุล. เทคโนโลยีซีเอ็นซี. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2542.

ปราโมทย์ เดชะอำไพ. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

พรจิต ประทุมสุวรรณ. เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: เรือนแก้วการพิมพ์, 2537.

ภาษาอังกฤษ

Adams, Vince and Askenazi, Abraham. Building better products with finite element analysis. U.S.A.: Onword press, 1998.

Beckwith, Tomas G. et al. Mechanical Measurement . Fifth edition, New York : Addison-Wesley Publishing Company, 1993.

Kim, H.S. and Ehmann, K.F.. A Cutting force model for face milling operation.

International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 33,.5, (1993): 651-673.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรพรม บุญพรม เกิดเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมที่โรงเรียนเบญจมราชาลัย ในปีการศึกษา 2537 ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย