

ระบบควบคุมสำหรับเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ

นายปรัชญา พิพัฒนานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A CONTROL SYSTEM FOR THE CHULA AUTOMATIC FACETING MACHINE

Mr. Prachya Pipattananont

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระบบควบคุมสำหรับเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบ  
อัตโนมัติ

โดย

นายปรัชญา พิพัฒนานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันท์เจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ดี มลิลดา)

ปรัชญา พิพัฒนานนท์ :ระบบควบคุมสำหรับเครื่องเจียรไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ.  
(A CONTROL SYSTEM FOR THE CHULA AUTOMATIC FACETING MACHINE)  
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :รศ. ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 141หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และสร้างระบบควบคุม สำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ ในงานเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ เครื่องเจียรไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติประกอบด้วยเครื่องเคลื่อนแบบควบคุมตำแหน่ง 4แกน และการควบคุมแบบ ปิด-เปิด 2แกน โดยเป็นการควบคุมการปิด-เปิด และสายเข้า-ออกของงานเจียรไน โดยที่สามารถเจียรไนพลอยได้หลากหลายรูปแบบ นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของพลอยที่ได้จะมีขนาดและคุณภาพที่เท่ากัน

ในงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์สร้างโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติแล้วส่งสัญญาณควบคุมออกไปสั่งการให้เครื่องเจียรไนทำงาน ผ่านทางชุดอุปกรณ์แปลงสัญญาณที่ใช้เชื่อมต่อ โปรแกรมควบคุมแบ่งออกเป็น 2ส่วน ได้แก่ ส่วนการสร้างตัวควบคุม และส่วนของหน้าต่างแสดงผลโปรแกรมเพื่อความสะดวกในการใช้งาน การควบคุมตำแหน่งของการเคลื่อนที่ ใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี โปรแกรมที่สร้างขึ้นมาทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดว มีหน้าต่างควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียรไนพลอย แสดงตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกน รวมไปถึงมีหน้าต่างสำหรับการเจียรไนแบบอัตโนมัติตามโปรแกรมซึ่งผู้ใช้สามารถป้อนค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดรูปร่าง และขนาดของพลอยที่ต้องการลงในโปรแกรม แล้วสั่งให้เครื่องเจียรไนทำงานตามโปรแกรมที่ตั้งไว้จนเสร็จการทำงาน โดยสามารถเจียรไนได้ทั้งพลอยที่เป็นลักษณะเหลี่ยมสมมาตร และไม่สมมาตรตามต้องการ

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
ปีการศึกษา.....2552.....

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

# # 4970430621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : THE CHULA AUTOMATIC FACETING MACHINE / FEEDBACK CONTROL THEORY / PID CONTROLLER

PRACHYA PIPATTANANONT:A CONTROL SYSTEM FOR THE CHULA AUTOMATIC FACETING MACHINE. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 141 pp.

This research work covers a novel design of the controller system, for precision grinding of small-size gem stones, used in the Chula Automatic Faceting machine. The Chula Automatic Faceting Machine has 4-axis high precision motion control and the other 2-axis for spindle and disc swinging. Various style or form of gem stones can be obtained from this faceting machine with uniform size and quality.

In this work, a microcomputer with developed software is used to control the machine. The grinding parameters, according to desired form or shape of gem stones, are input to the developed control software. The whole grinding operations are performed automatically by the software through the microcomputer equipped with the faceting machine interface. The software is basically separated in 2 parts; the controller part and the display part. Feedback control theory is used to design the controller system using PID controller. The display system is operated based on Windows operating system. User can either input directly the position and feed-rate of each axis in the program to control the motion of the grinding process, or input the standard parameters of a gem's shape in the automatic faceting window to automatic faceting process. The machine can facet both symmetry and asymmetry shapes depending on parameters input to the software.

Department :...Mechanical Engineering... Student's Signature .....

Field of Study : Mechanical Engineering... Advisor's Signature .....

Academic Year: 2009.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งคอยสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัยด้วยดีตลอดระยะเวลาทำการวิจัย จึงใคร่ขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ ขอขอบคุณ คณะนิสิตระดับปริญญาโท และปริญญาเอกทุกท่านในห้องปฏิบัติการวิจัยการผลิตชั้นสูงที่ได้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำการวิจัยตลอดมา

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์สำหรับปฏิบัติการ เงินทุนสนับสนุนการศึกษา และความรู้ต่างๆอีกมากมาย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เครื่องเจียระไนพลอยที่ใช้งานในปัจจุบัน.....	3
2.2 เครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	5
2.3 การควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจูป้าแบบอัตโนมัติก่อนการพัฒนา.....	7
2.4 งานวิจัยและบทความที่เกี่ยวข้อง.....	11
3 โครงสร้างของเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติและหลักการทำงานเบื้องต้น.....	12
3.1 รูปร่าง ลักษณะ โครงสร้าง และการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบ อัตโนมัติ.....	12
3.2 หลักการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	15
3.3 จลศาสตร์ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	16
4 หลักการในการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์.....	20
4.1 เซอร์โวมอเตอร์.....	20
4.2 ทฤษฎีการควบคุมพื้นฐาน.....	26
4.3 ชนิดของตัวควบคุมพื้นฐาน.....	27

บทที่	หน้า
4.4 การควบคุมระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง.....	30
4.5 ลักษณะของค่าสัญญาณอ้างอิงที่ส่งไปขับมอเตอร์.....	31
5 องค์ประกอบที่ใช้ในการสร้างโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอย จิวาแบบอัตโนมัติ.....	34
5.1 ตัวแปรที่ต้องทำการควบคุมในการเจียระไนพลอย.....	34
5.2 ลักษณะการให้ขนาด และการบอกรูปร่างพลอย.....	35
5.3 การตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแต่ละแกน.....	37
5.4 การใช้งานร่วมกับโปรแกรม ซียู-โซลิด(CU – Solid).....	43
6 โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ.....	45
6.1 ลักษณะโดยทั่วไปของโปรแกรม.....	47
6.2 ฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม.....	50
7 ขั้นตอนการเจียระไนพลอยด้วยเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ.....	51
7.1 การเตรียมพลอยก่อนการเจียระไน.....	51
7.2 การเจียระไนด้วยเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ.....	54
7.3 การกลับด้านพลอย.....	55
7.4 การเจียระไนด้านล่างของพลอย(Pavilion Side).....	58
7.5.การถอดพลอยและการทำความสะอาดพลอย.....	58
8 การทดลองและผลการทดลอง.....	60
8.1 การทดลองหาอัตราขยาย เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์แต่ละแกน.....	60
8.2 การทดลองใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	72
9 บทสรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
9.1 บทสรุปผลงานวิจัย.....	92
9.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำงานวิจัย.....	93
9.3 ข้อเสนอแนะ.....	93
รายการอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก. ข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใช้ และการเชื่อมต่อเครื่องเจียระไนพลอยจิวา แบบอัตโนมัติกับคอมพิวเตอร์.....	98
ภาคผนวก ข. ตารางสรุปผลการทดลองการใช้โปรแกรมควบคุม.....	103
ภาคผนวก ค. การใช้งานโปรแกรม Tune Motor.....	122



ภาคผนวก ง. การใช้โปรแกรม CU Gems Grinding กับเครื่องเจียรระโนพลอย	
จูป้าแบบอัตโนมัติ.....	126
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	141

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	DH-Parameter ของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	17
5.1	การบอกเหลี่ยมพลอยจากรูปร่างพลอยเหลี่ยม Simple Jack.....	37
8.1	รายละเอียดของเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	74
8.2	ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันระหว่างค่าจากโปรแกรม CU-Solid และ ค่าที่ใช้จริง ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	75
8.3	ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรระไนด้านบนพลอย (Crown Side) ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	76
8.4	ค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรระไนด้านบนพลอย (Crown Side) ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	76
8.5	ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรระไนด้านล่างพลอย (Pavilion Side) ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	77
8.6	ค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรระไนด้านล่างพลอย (Pavilion Side) ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	77
8.7	เวลาที่ใช้ในการเจียรระไนแต่ละช่วง ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	79
8.8	ขนาดของพลอยที่ผ่านการเจียรระไน ในแต่ละการทดลอง ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	80
8.9	รายละเอียดของเหลี่ยม Four Triangles.....	83
8.10	ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันระหว่างค่าจากโปรแกรม CU-Solid และ ค่าที่ใช้จริง ของเหลี่ยม Four Triangles.....	84
8.11	ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรระไนด้านบนพลอย (Crown Side) ของเหลี่ยม Four Triangles.....	85
8.12	ค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรระไนด้านบนพลอย (Crown Side) ของเหลี่ยม Four Triangles.....	85
8.13	ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรระไนด้านล่างพลอย (Pavilion Side) ของเหลี่ยม Four Triangles.....	86
8.14	ค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรระไนด้านล่างพลอย (Pavilion Side) ของเหลี่ยม Four Triangles.....	86

ตารางที่	ฉ หน้า
8.15 เวลาที่ใช้ในการเจียระไนแต่ละช่วง ของเหลี่ยม Four Triangles.....	88
8.16 ขนาดของพลอยที่ผ่านการเจียระไน ในแต่ละการทดลอง ของเหลี่ยม Four Triangles.....	89
ข.1 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 1.....	103
ข.2 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 2.....	104
ข.3 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 3.....	105
ข.4 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 4.....	106
ข.5 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 5.....	107
ข.6 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 1.....	108
ข.7 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 2.....	109
ข.8 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 3.....	110
ข.9 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 4.....	112
ข.10 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 5.....	113
ข.11 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Four Trianglesในการทดลองที่ 1.....	114
ข.12 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Four Trianglesในการทดลองที่ 2.....	115
ข.13 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Four Trianglesในการทดลองที่ 3.....	115

ตารางที่	ฎ หน้า
ข.14	ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านข้างพลอยของเหลี่ยม Four Triangles ในการทดลองที่ 4..... 116
ข.15	ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านข้างพลอยของเหลี่ยม Four Triangles ในการทดลองที่ 5..... 116
ข.16	ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Four Triangles ในการทดลองที่ 1..... 117
ข.17	ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Four Triangles ในการทดลองที่ 2..... 118
ข.18	ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Four Triangles ในการทดลองที่ 3..... 119
ข.19	ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Four Triangles ในการทดลองที่ 4..... 120
ข.20	ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Four Triangles ในการทดลองที่ 5..... 121

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	เครื่องเจียระไนพลอยที่ใช้ในอุตสาหกรรมเจียระไนพลอยในประเทศไทย.....	4
2.2	เครื่องเจียระไนพลอยของ Diamante.....	4
2.3	เครื่องเจียระไนพลอยของ Xristal.....	5
2.4	หุ่นยนต์เจียระไนพลอยอัตโนมัติ.....	6
2.5	เครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติ AD-Series.....	6
2.6	เครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่1.....	7
2.7	แผนควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติรุ่นที่1.....	8
2.8	หน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จรูปเมื่อเปิดโปรแกรม.....	8
2.9	หน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอย.....	9
2.10	หน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ที่ต่อผ่าน Digital IO.	9
2.11	หน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ผู้ใช้สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการให้ เครื่องทำงานแบบอัตโนมัติ.....	10
2.12	ของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการแสดงสถานะของเครื่อง (Safety monitor).....	10
3.1	เครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ.....	12
3.2	ชุดจานเจียระไนของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	13
3.3	การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน X.....	13
3.4	การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y.....	14
3.5	การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z.....	14
3.6	การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน A.....	15
3.7	แผนภาพหลักการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ.....	16
3.8	แผนภาพจำลองของเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติพร้อมการติดเฟรม.	17
4.1	ส่วนประกอบภายในมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โว.....	20
4.2	แผนภาพบล็อกของระบบไฟฟ้าเชิงกล (DC Servo Motor).....	21
4.3	ส่วนประกอบของอินทรีเมนทัลเอนโคดเดอร์.....	24
4.4	ส่วนประกอบของแอบโซลูตเอนโคดเดอร์.....	25
4.5	แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด.....	26
4.6	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบ อัตโนมัติ.....	27

ภาพที่		หน้า
4.7	สัญญาณที่ผ่านตัวควบคุมเชิงสัดส่วน.....	28
4.8	สัญญาณที่ผ่านตัวควบคุมแบบอนุพันธ์.....	29
4.9	ลักษณะการส่งสัญญาณอ้างอิงแบบเชิงเส้น.....	31
4.10	ลักษณะสัญญาณแบบเชิงเส้นผสมกับพาราโบลา.....	32
5.1	ตัวแปรที่มีผลต่อรูปร่างและขนาดของพลอย.....	34
5.2	การบอกขนาดของพลอย.....	36
5.3	ลักษณะการบอกขนาดและรูปร่างของพลอย.....	36
5.4	ตำแหน่งอ้างอิงของแกน X เมื่อเทียบกับทวนติดพลอย.....	38
5.5	เครื่องเจียรระไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติขณะที่แกน X อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง.....	38
5.6	การตั้งตำแหน่งอ้างอิงของชุดหัวจับด้ามพลอย.....	39
5.7	ลักษณะของด้ามติดพลอยที่มีการทำตำแหน่งอ้างอิงไว้ที่ปลายด้าม.....	40
5.8	การใส่ด้ามติดพลอยเข้ากับส่วนอุปกรณ์หัวจับด้ามพลอย.....	40
5.9	ตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกน Z ที่ต่ำเกินไป.....	41
5.10	ตำแหน่งอ้างอิงในแกน Z ที่เหมาะสม.....	41
5.11	เครื่องเจียรระไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติขณะที่แกน Z อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง.....	42
5.12	ตำแหน่งอ้างอิงของแกน A.....	42
5.13	เครื่องเจียรระไนพลอยจูปาแบบอัตโนมัติขณะที่แกน A อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง.....	43
5.14	การกำหนดลักษณะรูปร่างของพลอยดิบในโปรแกรมซียู-ซีลิด.....	43
5.15	พารามิเตอร์ที่ต้องป้อนสำหรับสร้างเหลี่ยมพลอย.....	44
6.1	แผนภาพการทำงานของโปรแกรม เพื่อนำไปออกแบบและสร้างโปรแกรม.....	46
6.2	หน้าต่างของโปรแกรมและส่วนประกอบของโปรแกรม.....	47
6.3	หน้าต่างควบคุมการเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่รูปร่างสมมาตร.....	48
6.4	หน้าต่างควบคุมการเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ ที่รูปร่างไม่สมมาตร.....	49
7.1	พลอยดิบที่ถูกตัดออกเป็นชิ้น.....	51
7.2	การยึดพลอยเข้ากับไม้ซุน.....	52
7.3	การเกลารูปร่างพลอยด้วยเครื่องเกลารมมือ.....	52
7.4	พลอยที่ผ่านการเกลารูปร่างแล้ว.....	52
7.5	การติดพลอยที่เข้ากับด้ามติดพลอย.....	53
7.6	การอบพลอยที่ติดกาวในตู้อบยูวี.....	53
7.7	การขึ้นรูปพลอยให้ได้องศาด้วยเครื่องเจียรระไนแบบใช้มือ.....	53

ภาพที่		หน้า
7.8	พลอยที่ผ่านการขึ้นรูปให้ได้องค์ด้วยเครื่องเจียรระไนแบบใช้มือ.....	54
7.9	การใส่ด้ามติดพลอยเข้ากับชุดหัวจับพลอย.....	54
7.10	การเจียรระไนด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ.....	55
7.11	ชุดอุปกรณ์สำหรับกลับด้านพลอย.....	56
7.12	การยึดด้ามพลอยเปล่า กับอุปกรณ์กลับด้านพลอย.....	56
7.13	การยึดด้ามพลอยที่ผ่านการเจียรระไนด้านบนพลอยแล้วเข้ากับด้ามติดพลอย เปล่า.....	56
7.14	การเผาไฟเพื่อถอดด้ามติดพลอยด้านแรกออก.....	57
7.15	พลอยที่ถูกกลับด้านแล้ว.....	57
7.16	พลอยที่ผ่านการเจียรระไนทั้งสองด้านแล้ว.....	58
7.17	การใช้ไฟต้มน้ำติดพลอยเพื่อแกะพลอยออกจากด้าม.....	58
7.18	พลอยที่ผ่านการเจียรระไนและทำความสะอาดแล้ว.....	59
8.1	โปรแกรม Tune Motor ที่ใช้ในการทดลอง.....	61
8.2	เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน X เมื่อ $K_p =$ $0.02$ , $K_i = 0.1$ และ $K_d = 0.0001$ .....	63
8.3	สัญญาณผิดพลาดในแกน X เมื่อ $K_p = 0.02$ , $K_i = 0.1$ และ $K_d = 0.0001$ .....	63
8.4	เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน X เมื่อ $K_p =$ $0.03$ , $K_i = 0.1$ และ $K_d = 0.0001$ .....	64
8.5	สัญญาณผิดพลาดในแกน X เมื่อ $K_p = 0.03$ , $K_i = 0.1$ และ $K_d = 0.0001$ .....	64
8.6	เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน Z เมื่อ $K_p =$ $0.2$ , $K_i = 0.5$ และ $K_d = 0.0005$ .....	66
8.7	สัญญาณผิดพลาดในแกน Z เมื่อ $K_p = 0.2$ , $K_i = 0.5$ และ $K_d = 0.0005$ .....	66
8.8	เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน Z เมื่อ $K_p =$ $0.1$ , $K_i = 0.5$ และ $K_d = 0.0005$ .....	67
8.9	สัญญาณผิดพลาดในแกน Z เมื่อ $K_p = 0.1$ , $K_i = 0.5$ และ $K_d = 0.0005$ .....	67
8.10	เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน A เมื่อ $K_p =$ $0.002$ , $K_i = 0.03$ และ $K_d = 0.00001$ .....	70
8.11	สัญญาณผิดพลาดในแกน A เมื่อ $K_p = 0.002$ , $K_i = 0.03$ และ $K_d = 0.00001$	70
8.12	เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน A เมื่อ $K_p =$ $0.0008$ , $K_i = 0.003$ และ $K_d = 0.00001$ .....	71

ภาพที่	ณ หน้า
8.13	สัญญาณผิพลาตในแกนAเมื่อ $K_p = 0.0008$ , $K_i = 0.003$ และ $K_d = 0.00001$ 71
8.14	รูปร่างของพลอยเหลี่ยม Standard Round Brilliant..... 73
8.15	เหลี่ยมพลอย Standard Round Brilliant และขนาดที่ได้จากการออกแบบด้วย โปรแกรม CU-Solid..... 74
8.16	เหลี่ยมพลอย Standard Round Brilliant ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียระไนด้านบนของ พลอย (Crown Side)..... 78
8.17	เหลี่ยมพลอย Standard Round Brilliant ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียระไนด้านล่างของ พลอย (Pavilion Side)..... 78
8.18	พลอยเหลี่ยม Standard Round Brilliant ที่ได้จากการทดลอง..... 78
8.19	รูปร่างของพลอยเหลี่ยม Four Triangles..... 82
8.20	เหลี่ยมพลอย Four Triangles และขนาดที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid..... 83
8.21	เหลี่ยมพลอย Four Triangles ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียระไนด้านบนของพลอย (Crown Side)..... 87
8.22	เหลี่ยมพลอย Four Triangles ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียระไนด้านล่างของพลอย (Pavilion Side)..... 87
8.23	พลอยเหลี่ยม Four Triangles ที่ได้จากการทดลอง..... 87
ก.1	การรัดแปลงสัญญาณ..... 98
ก.2	อุปกรณ์ขยายกำลังงาน..... 99
ก.3	บอร์ดสำหรับขับรีเลย์..... 100
ก.4	ลิมิตสวิตช์..... 101
ก.5	เทอร์มินัลบอร์ด..... 101
ก.6	แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ระหว่างเครื่องเจียระไนพลอย และ คอมพิวเตอร์..... 102
ค.1	หน้าต่างโปรแกรม Tune Motor..... 122
ค.2	คำสั่งเชื่อมต่อโปรแกรมกับอุปกรณ์ภายนอก บนแถบพูลบาร์..... 122
ค.3	แถบสถานะของโปรแกรมเมื่อทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกแล้ว..... 123
ค.4	การเลือกแกนที่จะทำการทดลอง..... 123
ค.5	การใส่ค่าต่างๆลงในโปรแกรม..... 124
ค.6	หน้าต่างสำหรับทำการบันทึกค่าที่ได้จากการทดลอง..... 124



ภาพที่	หน้า
ค.7	คำสั่งยกเลิกการเชื่อมต่อโปรแกรมกับอุปกรณ์ภายนอก บนแถบทูลบาร์..... 125
ง.1	หน้าต่างแสดงค่าเตือนให้เปิดเครื่องเจียรไนพลอย..... 126
ง.2	หน้าต่างแสดงค่าเตือนให้ตั้งตำแหน่งอ้างอิงก่อนใช้งาน..... 126
ง.3	หน้าต่างให้ใส่ขนาดความสูงของพลอยดิบที่นำมาเจียรไน..... 126
ง.4	หน้าต่างหลักของโปรแกรม CU Gems Grinding..... 127
ง.5	สถานะของตำแหน่งอ้างอิงแกน Z หลังจากตั้งตำแหน่งอ้างอิงแล้ว..... 128
ง.6	สถานะของตำแหน่งอ้างอิงแกน X หลังจากตั้งตำแหน่งอ้างอิงแล้ว..... 129
ง.7	หน้าต่างแสดงตำแหน่งที่ต้องการให้เป็นตำแหน่งอ้างอิงใหม่..... 129
ง.8	ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่..... 130
ง.9	หน้าต่างแสดงตำแหน่งอ้างอิงใหม่ มีค่าตำแหน่งเป็นศูนย์..... 130
ง.10	ส่วนของหน้าจอที่แสดงขนาดของพลอยดิบ..... 131
ง.11	หน้าต่างสำหรับกำหนดความสูงของพลอยดิบ..... 131
ง.12	หน้าต่างแสดงขนาดของพลอยดิบที่เปลี่ยนไปตามที่ผู้ใช้กำหนด..... 131
ง.13	หน้าต่างในส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน..... 132
ง.14	ปุ่ม Enable เมื่อถูกกด..... 132
ง.15	ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่แบบJog..... 133
ง.16	การเลือกความเร็วของการเคลื่อนที่แบบJog..... 133
ง.17	ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่แบบป้อนตำแหน่ง และความเร็ว..... 133
ง.18	การป้อนตำแหน่งปลายและความเร็วในการเคลื่อนที่..... 134
ง.19	สถานะของการหมุนจานเจียรไน..... 134
ง.20	สถานะของการสายจานเจียรไน..... 135
ง.21	หน้าต่างสำหรับการเจียรไนรูปร่างสมมาตร..... 135
ง.22	การเลือกจานเจียรไนที่ใช้ในการเจียรไน..... 137
ง.23	การเลือกมุมยกที่ต้องการเจียรไน..... 137
ง.24	หน้าต่างสำหรับการเจียรไนรูปร่างไม่สมมาตร..... 138
ง.25	การใส่ค่ามุมดัชนีลงในโปรแกรม..... 139
ง.26	หน้าต่างสำหรับบันทึกโปรแกรม..... 139
ง.27	ข้อความเตือนกรณีที่เปิดไฟล์ผิดประเภท..... 140
ง.28	การปิดการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมกับเครื่องเจียรไน..... 140
ง.29	ข้อความเตือนหลังปิดการเชื่อมต่อ..... 140

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมอัญมณี ถือเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้เข้าประเทศเป็นเงินจำนวนมาก โดยเป็นอุตสาหกรรมที่มีการส่งออกสูงมาก มูลค่าการส่งออกของปี 2550 มีมูลค่าสูงเกือบ 1.7 แสนล้านบาท และมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกๆปี สำหรับอุตสาหกรรมอัญมณีมิใช่ว่า เมื่อพบอัญมณีแล้วจะสามารถนำมาขายทำเงินได้ทันที หากแต่อัญมณีที่ขุดพบจะต้องถูกนำมาผ่านกรรมวิธีที่เรียกว่าการเจียรไนเสียก่อน เพื่อให้อัญมณีที่ได้มีความสวยงาม แวววาว เป็นประกาย ดังนั้นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ยิ่งถือว่าสำคัญมากๆในบรรดาอุตสาหกรรมอัญมณี นั่นคือ อุตสาหกรรมเจียรไนพลอยสี

อุตสาหกรรมเจียรไนพลอยสำหรับอุตสาหกรรมเครื่องประดับยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ และปัญหาเรื่องคุณภาพ ซึ่งแรงงานมนุษย์ไม่สามารถที่จะทำได้ตามปริมาณที่ตลาดต้องการ ทางห้องปฏิบัติการวิจัยระบบการผลิตขั้นสูง จึงได้ทำการวิจัย ออกแบบ และสร้างเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติต้นแบบ เพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการเจียรไนพลอยให้ได้คุณภาพและปริมาณเพิ่มขึ้น เครื่องจักรดังกล่าว สามารถทำงานได้แบบอัตโนมัติ โดยสั่งการทำงานและประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถทำงานได้เร็วกว่ามนุษย์ อีกทั้งการควบคุมคุณภาพก็สามารถทำได้ดีกว่า แต่ต้นทุนในการสร้างชิ้นส่วน รวมไปถึงชุดอุปกรณ์ควบคุม และโปรแกรมควบคุม มีราคาสูง จึงได้มีความคิดที่จะพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างของเครื่อง ชุดอุปกรณ์ควบคุม รวมไปถึงโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเพื่อลดต้นทุนให้ต่ำลง และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติให้สูงขึ้น

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะครอบคลุมในส่วนของการเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุม และการออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ ให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาระบบควบคุม การทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติให้เป็นไปตามกระบวนการเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบการผลิตขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบ พัฒนา และสร้างเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยอาศัยพื้นฐานจากเครื่องเจียรไนแบบอัตโนมัติต้นแบบที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบการผลิตขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุม เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ ที่สร้างขึ้น
3. ออกแบบส่วนโปรแกรม (User Interface) สำหรับผู้ใช้ เพื่อใช้ในการควบคุมเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติให้ทำงานตามกระบวนการเจียรไนที่กำหนด
4. ศึกษา และหาวิธีเจียรไนเพื่อทำให้พลอยที่ผ่านการเจียรไน จากเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ มีความสวยงาม

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาขั้นตอนการทำงาน และทดลองใช้งานเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติต้นแบบที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบการผลิตขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. วิเคราะห์ข้อควรปรับปรุงของเครื่องต้นแบบ เพื่อนำมาออกแบบและสร้างเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติเครื่องใหม่ โดยอิงพื้นฐานจากเครื่องเดิม
3. พิจารณาออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติในแต่ละแกนการเคลื่อนที่
4. ออกแบบโปรแกรมสำหรับผู้ใช้งาน (User Interface) เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานได้สะดวกที่สุด
5. ทดสอบโปรแกรมที่สร้างขึ้นมากับเครื่องเจียรไนแบบอัตโนมัติ
6. วิเคราะห์ปัญหา และแก้ไขปรับปรุง
7. วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้เครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในการใช้งานจริงกับภาคอุตสาหกรรม
2. ได้โปรแกรมต้นแบบสำหรับสนับสนุนการทำงาน เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานและควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติได้ง่ายและสะดวกขึ้น
3. ได้พลอยที่ผ่านการเจียรไนที่มีคุณภาพมากขึ้น

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากปัจจุบันอุตสาหกรรมเจียรไนพลอยเติบโตอย่างมาก และการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด เนื่องจากแรงงานคนมีขีดจำกัดในการทำงาน ดังนั้นจึงได้มีความคิดที่จะพัฒนาเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติเพื่อเข้ามาช่วยในการผลิตของอุตสาหกรรมการเจียรไนพลอย โดยที่เครื่องจักรดังกล่าวจะต้องสามารถทำการเจียรไนได้ครั้งละปริมาณมาก และสามารถเจียรไนได้รวดเร็ว และผลผลิตที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงหรือสูงกว่าแรงงานมนุษย์

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงแนวคิดเบื้องต้นที่ใช้ในการประดิษฐ์และพัฒนาเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ เพื่อนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมเจียรไนพลอย

#### 2.1 เครื่องเจียรไนพลอยที่ใช้งานในปัจจุบัน

สำหรับอุตสาหกรรมเจียรไนพลอยภายในประเทศไทยยังอาศัยแรงงานมนุษย์เป็นหลัก การควบคุมมาตรฐานทำได้ค่อนข้างยากและยังไม่มีการศึกษาพัฒนาเครื่องจักรสำหรับช่วยในการเจียรไนโดยมีการพัฒนาเฉพาะในต่างประเทศเท่านั้น ทั้งที่ประเทศไทยมียอดการส่งออกอัญมณีในระดับที่ค่อนข้างสูงมาก ทำให้ความสามารถในการแข่งขันทางด้านอุตสาหกรรมอัญมณีของประเทศไทยไม่สามารถแข่งขันได้ เนื่องจากไม่สามารถผลิตได้ปริมาณและ คุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการ

เครื่องเจียรไนที่ใช้ในประเทศเป็นเครื่องที่ใช้มือในการควบคุมโดยมีอุปกรณ์ช่วยในการปรับมุมดรชนั้นเท่านั้น ในขณะที่ความลึกในการเจียรไนและมุมที่ใช้ในการเจียรไนต้องใช้ความชำนาญของช่างในการเจียรไนเป็นอย่างสูง ซึ่งพบว่าหากตั้งมุมผิดเพียงเล็กน้อยจะมีผลทำให้พลอยที่ได้เสียคุณภาพไป และโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดก็มีสูง โดยเครื่องเจียรไนดังกล่าวแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าเครื่องเจียรไนชนิดนี้นอกจากจะใช้แรงงานมนุษย์แล้ว ยังต้องเป็นแรงงานมนุษย์ที่มีความชำนาญอย่างมากอีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันแรงงานดังกล่าวมีปริมาณไม่เพียงพอ ในขณะที่ต่างประเทศก็ได้มีการพัฒนาเครื่องเจียรไนพลอยแบบใช้แรงงานมนุษย์ในการทำงานออกสู่ตลาดเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3

โดยในรูปที่ 2.2 เป็นเครื่องเจียรไนพลอยของบริษัท Diamante โดยเครื่องของบริษัท Diamante เป็นเครื่องเจียรไนพลอยแบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งมีมอเตอร์ช่วยในการส่ายเม็ดพลอยไปมา



รูปที่ 2.1 เครื่องเจียรระไนพลอยที่ใช้ในอุตสาหกรรมเจียรระไนพลอยในประเทศไทย



รูปที่ 2.2 เครื่องเจียรระไนพลอยของ Diamante [5]

ขณะที่ทำการเจียรระไนจนกระทั่งถึงระยะที่กำหนดก็จะหยุดสาย แล้วจึงทำการเปลี่ยนมุมดรรชนีให้เป็นเหลี่ยมต่อไป การกำหนดมุมต่างๆของการเจียรระไนทำได้แม่นยำและมีตัวยึดที่มั่นคงในขณะทำงาน

ในขณะที่รูป 2.3 เป็นเครื่องเจียรระไนของบริษัท Xristal สำหรับเครื่องของบริษัท Xristal เป็นเครื่องเจียรระไนแบบที่ต้องใช้มือในการควบคุมเช่นเดียวกัน โดยการแสดงผลการควบคุมมุมในการเจียรระไนมีการแสดงผลในรูปแบบดิจิตอล แต่การแสดงผลของความลึกในการเจียรระไนเป็นการปรับแบบไมโครเมตร



รูปที่ 2.3 เครื่องเจียรระไนพลอยของ Xristal [5]

สำหรับเครื่องมือต่างๆข้างต้นที่กล่าวมา จะเห็นว่าเครื่องมือที่ใช้ในประเทศไทยต้องใช้แรงงานและความชำนาญของมนุษย์ทั้งหมด ในขณะที่เครื่องของต่างประเทศเป็นเครื่องมือที่เรียกว่ากึ่งอัตโนมัติ คือยังคงต้องใช้มนุษย์ในการทำงานแต่ขั้นตอนของการเจียรระไนอยู่ดี อีกทั้งในการเจียรระไนแต่ละครั้งยังได้ปริมาณเพียงครั้งละ 1 เม็ด และมีราคาค่อนข้างสูง เมื่อเทียบราคาต้นทุนต่อผลผลิตแล้วพบว่าไม่คุ้มค่า จึงได้มีความคิดที่จะพัฒนาเครื่องเจียรระไนพลอยให้เป็นเครื่องจักรอัตโนมัติ เช่นเดียวกับเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอื่นๆ ดังจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

## 2.2 เครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

ปัจจุบันได้มีความพยายามในการพัฒนาเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติขึ้นมาเพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมเจียรระไนพลอย โดยแต่ละบริษัท แต่ละหน่วยงานวิจัยก็ได้มีการออกแบบเครื่องเจียรระไนที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไป โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างดังนี้

### 2.2.1 หุ่นยนต์เจียรระไนพลอยอัตโนมัติ (Automatic Gems Faceting Robot) [7]

เครื่องเจียรระไนนี้ดำเนินการวิจัยโดยบริษัทสปาเจมส์ มีลักษณะรูปร่างเป็นหุ่นยนต์แบบอนุกรม (Serial Robot) ดังรูปที่ 2.4 สามารถเจียรระไนพลอยได้ 3 รูปแบบ คือ แบบ 8 เหลี่ยม แบบ 16 เหลี่ยม และแบบ star โดยทำงานแบบอัตโนมัติซึ่งควบคุมด้วยโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อใช้งานกับหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยสามารถเจียรระไนพลอยได้ปริมาณอยู่ที่ 500-800 เม็ดต่อวัน



รูปที่ 2.4 หุ่นยนต์เจียรระโนพลอยอัตโนมัติ

### 2.2.2 All Automatic Gem Faceting Machine (AD-Series) [8]

เป็นเครื่องเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติที่ผลิตและคิดค้นโดยบริษัท Nogix Co.,Ltd ของประเทศเกาหลีใต้ มีลักษณะดังรูปที่ 2.5

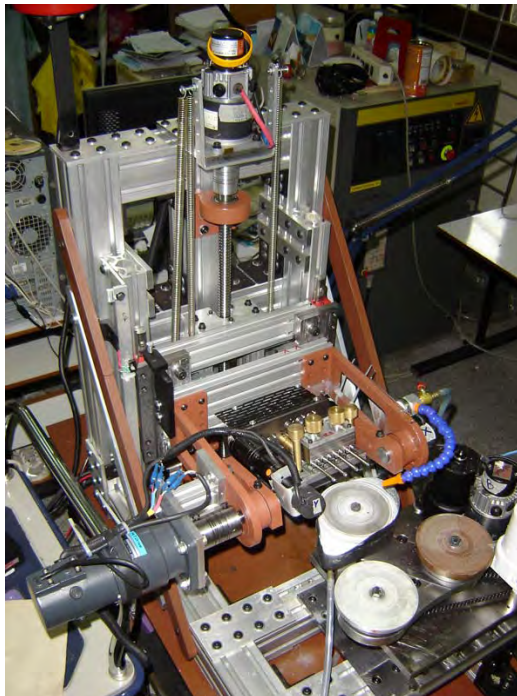


รูปที่ 2.5 เครื่องเจียรระโนพลอยอัตโนมัติ AD-Series

เครื่องเจียรระโนตัวนี้มีขนาด 1 เมตร x 1 เมตร x 1.5 เมตร น้ำหนัก 350 กิโลกรัม สามารถทำงานได้แบบอัตโนมัติโดยสั่งการผ่านหน้าจอบควบคุมที่ติดอยู่ที่เครื่อง งานเจียรระโนมีความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เจียรระโนได้หลากหลายรูปร่าง โดยสามารถเจียรระโนได้ถึงครั้งละ 100 เม็ดพร้อมกัน

### 2.2.3 เครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติรุ่นที่ 1 [5]

เป็นเครื่องเจียระไนพลอยที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบการผลิตขั้นสูง จิวาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เครื่องมีลักษณะดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ

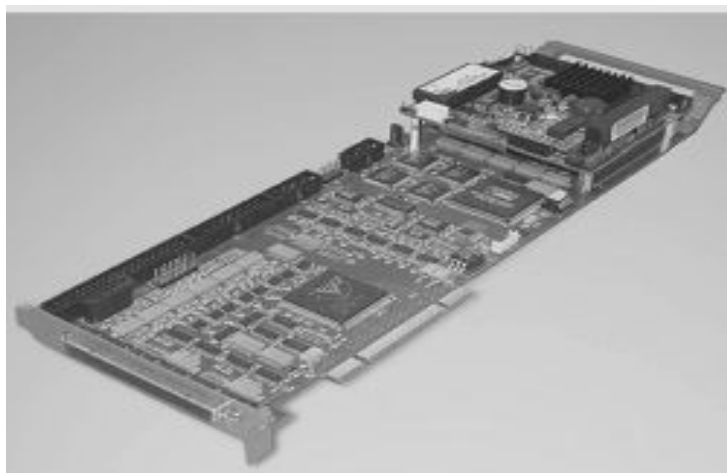
ตัวเครื่องประกอบไปด้วยจานเจียระไน 3 จาน แบ่งเป็นจานขึ้นรูป จานขัดหยาบ และจานขัดเงา สามารถเจียระไนได้ครั้งละ 4 เม็ดพร้อมกัน มีแกนการเคลื่อนที่ 4 แกน คือ X, Y, Z และ A แต่ละแกนทำหน้าที่ควบคุมพารามิเตอร์แต่ละตัวในการเจียระไนพลอย โดยควบคุมผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบสำเร็จรูป สามารถเจียระไนแบบอัตโนมัติได้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนามาเป็นเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติรุ่นใหม่ โดยมีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนในการผลิตเครื่อง และเพิ่มปริมาณพลอยในการเจียระไนแต่ละครั้ง ซึ่งงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติรุ่นใหม่นี้ดังกล่าว โดยเป็นส่วนของการออกแบบระบบควบคุมเครื่องเจียระไน

### 2.3 การควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติก่อนการพัฒนา [5]

เครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติรุ่นที่ 1 ถูกควบคุมด้วยชุดอุปกรณ์ควบคุมที่มีราคาสูง เนื่องจากการดัดแปลงสัญญาณมีราคาสูง ซึ่งการดัดแปลงสัญญาณจะใช้สำหรับส่งค่าจากผู้ใช้



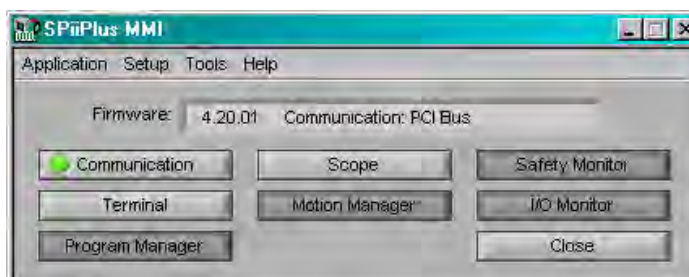
ผ่านทางคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องเจียระไน และรับค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) จากเครื่องเจียระไนเพื่อป้อนกลับมายังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล



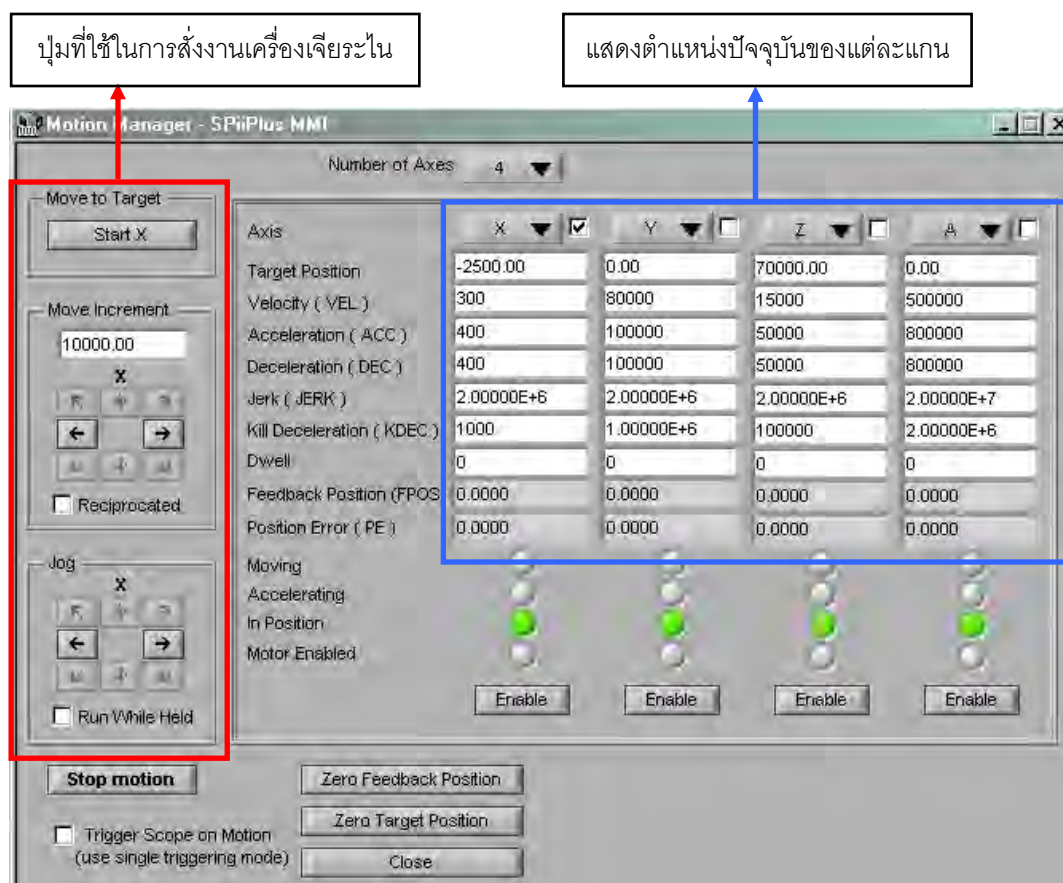
รูปที่ 2.7 การ์ดแปลงสัญญาณที่ใช้ควบคุมเครื่องเจียระไนรุ่นที่ 1

การ์ดแปลงสัญญาณชุดดังกล่าวมีโปรแกรมสำหรับใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ของเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติที่ต่อเข้ากับแผงวงจร ซึ่งตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์มีลักษณะเป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-Controller) ผู้ใช้เพียงแค่ปรับตั้งค่าอัตราขยายก็สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์ผ่านทางโปรแกรมสำเร็จรูปได้ หากผู้ใช้ต้องการสั่งให้เครื่องเจียระไนแบบอัตโนมัติทำงานเป็นขั้นตอนแบบอัตโนมัติก็สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานได้โดยใช้ภาษาเฉพาะ ซึ่งสามารถศึกษาได้จากคู่มือการใช้งาน สำหรับโปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าวมีลักษณะ และการใช้งาน ดังนี้

รูปที่ 2.8 เป็นหน้าต่างแรกของโปรแกรมเมื่อเปิดขึ้นมา ก่อนที่จะใช้โปรแกรมควบคุมเครื่องเจียระไนได้ จะต้องทำการเชื่อมต่อ คอมพิวเตอร์กับเครื่องเจียระไนก่อน ผ่านทางโปรแกรม



รูปที่ 2.8 หน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จรูปเมื่อเปิดโปรแกรม



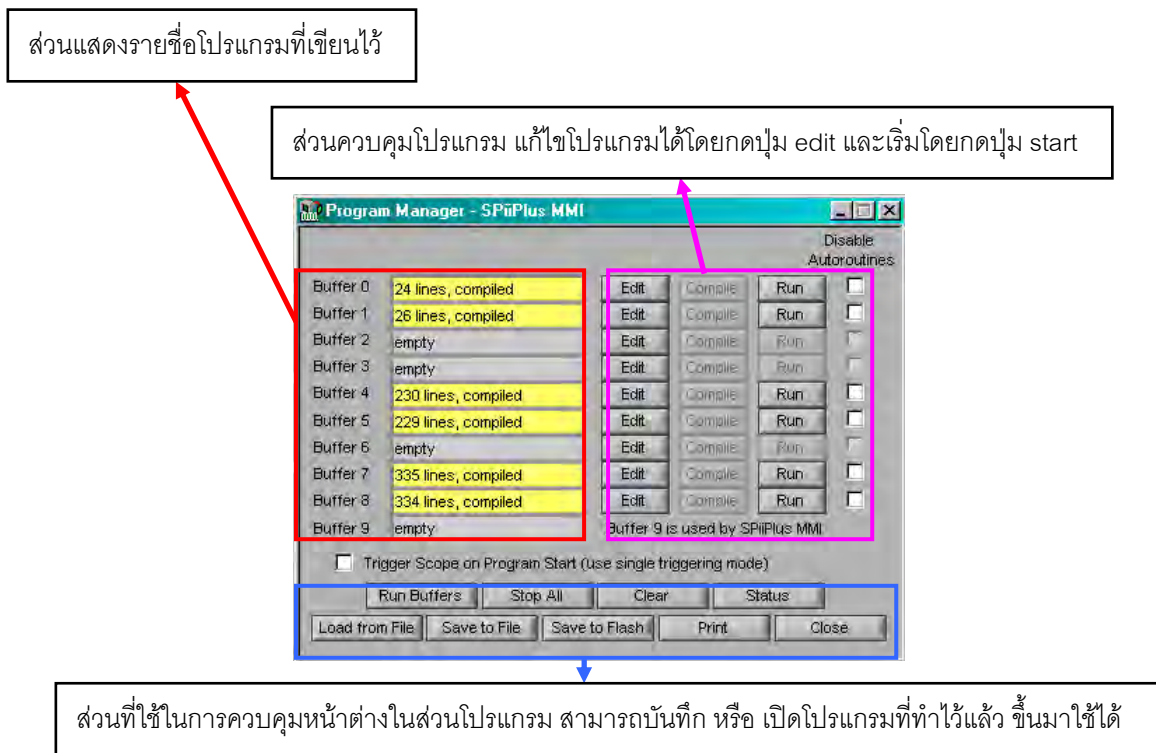
รูปที่ 2.9 หน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอย

รูปที่ 2.9 เป็นส่วนที่ผู้ใช้สามารถเคลื่อนตำแหน่งของเครื่องเจียระไนตามแกนต่างๆได้โดยการเลือกแกนที่จะเคลื่อนที่แล้วกด Jog ให้เคลื่อน หรืออาจสั่งตำแหน่งแล้วให้เครื่องเคลื่อนไปเองโดยการกำหนดความเร็วของการเคลื่อนที่ สำหรับเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ มีอุปกรณ์บางตัวที่ไม่จำเป็นต้องควบคุมการเคลื่อนที่ โดยจะควบคุมในลักษณะของการเปิดและปิด ได้แก่ มอเตอร์ขับจานหมุน ป้อนน้ำยาหล่อเย็น และไฟแสดงสถานะ ซึ่งส่วนนี้จะสั่งเปิด-ปิด ได้ผ่านทาง I/O Monitor ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ที่ต่อผ่าน Digital IO

หากผู้ใช้ต้องการเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการให้เครื่องเจียระไนอัตโนมัติทำงานตามโปรแกรมสามารถทำได้โดยการเรียกหน้าโปรแกรมขึ้นมาดังรูปที่ 2.11 จากนั้นเขียนโปรแกรมและสั่งให้โปรแกรมทำงาน ขณะที่เครื่องเจียระไนทำงานผู้ใช้สามารถสังเกตสถานะของการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียระไนได้โดยดูจากหน้าต่างแสดงสถานะ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 หน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ผู้ใช้สามารถเขียนโปรแกรมเพื่อสั่งการให้เครื่องทำงานแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.12 หน้าต่างของโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการแสดงสถานะของเครื่อง (Safety monitor)

## 2.4 งานวิจัยและบทความที่เกี่ยวข้อง

กฤษณันท์ มะลิทอง (2547) [4] ได้ทำโครงการวิทยานิพนธ์เพื่อพัฒนาโปรแกรมแปลรหัสเอ็นซีสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องจักรอัตโนมัติ โดยในส่วนของโปรแกรมการทำงานได้แบ่งออกเป็นส่วนการสร้างสัญญาณนาฬิกา และส่วนของการควบคุมมอเตอร์ในแต่ละแกน โดยการควบคุมได้ใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี (PID-Controller) และลักษณะสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนเป็นสัญญาณตำแหน่งในลักษณะของ S-Curve นอกจากนี้ยังมีส่วนของการแปลรหัสเอ็นซี เพื่อส่งการควบคุมการทำงานของโต๊ะเอ็กซ์วายแซด ที่ใช้ในการทำงานวิจัย

สมจินต์ ธนानันท์ศิริ (2549) [5] ได้ทำโครงการวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยทำการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อรูปร่างของพลอย เพื่อนำไปออกแบบเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยเครื่องเจียระไนที่สร้างขึ้นมีแกนการเคลื่อนที่ทั้งหมด 4 แกน เจียระไนพลอยได้ครั้งละ 4 เม็ด มีจานเจียระไน 3 จาน ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์โดยผ่านชุดควบคุม และโปรแกรมควบคุมแบบสำเร็จรูป ออกแบบเหลี่ยมพลอยด้วยโปรแกรม ซียู-โซลิด (CU-Solid) แล้วนำค่าพารามิเตอร์มาใส่ลงในโปรแกรมเพื่อเจียระไนให้ได้รูปร่างของพลอยตามต้องการ โดยเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่ออกแบบขึ้น สามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาเครื่องเจียระไนแบบอัตโนมัติรุ่นต่อไปได้

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การเกรียงไกร สันธุเดชากุล และปรัชญา พิพัฒนานนท์ (2551) [6] ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาโปรแกรมออกแบบเหลี่ยมพลอย โดยอาศัยพื้นฐานจาก พาราโซลิด-เคอร์เนล ในการพัฒนา ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาที่มีชื่อว่า ซียู-โซลิด สามารถใช้วาดเหลี่ยมพลอยต่างๆโดยอาศัยการป้อนพารามิเตอร์ของพลอยลงไปโปรแกรม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบเหลี่ยมพลอยนี้ สามารถนำไปใช้พัฒนาสร้างโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ ให้ทำการเจียระไนตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมได้

### บทที่ 3

## โครงสร้างของเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติและหลักการทำงานเบื้องต้น

### 3.1 รูปร่าง ลักษณะ โครงสร้าง และการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

#### 3.1.1 โครงสร้างภายนอกของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ



(ก.)

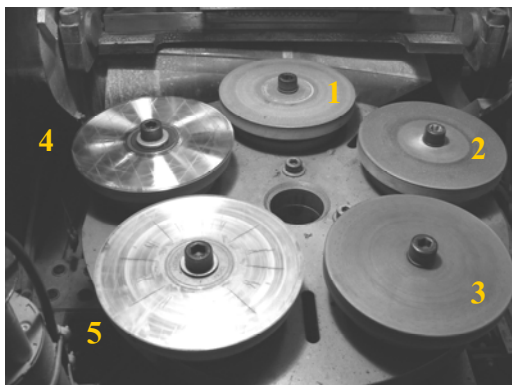


(ข.)

รูปที่ 3.1 เครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ (ก.) รูปหน้าตรง (ข.) รูปจากการออกแบบพร้อมแสดงแกนการเคลื่อนที่

เครื่องเจียระไนพลอยมีลักษณะดังรูปที่ 3.1 (ก.) และ (ข.) โดยประกอบไปด้วยแกนการเคลื่อนที่ทั้งสิ้น 4 แกน คือ แกน X, แกน Y, แกน Z และแกน A โดยแต่ละแกนจะทำให้เกิดผลต่อรูปร่างของพลอยที่ผ่านการเจียระไนแตกต่างกันออกไป นอกจากแกนการเคลื่อนที่ทั้ง 4 แกนแล้วยังมีส่วนที่เป็นชุดขับให้จานเจียระไนหมุนได้ และยังมีส่วนกลไกที่ทำหน้าที่ในการส่ายจานเจียระไนเข้าออกด้วย

ในส่วนของชุดจานเจียระไนประกอบด้วยชุดจานเจียระไนทั้งสิ้น 5 จาน โดยที่แต่ละจานจะมีความละเอียดแตกต่างกันไป จานหยาบที่สุดจะเอาไว้ขึ้นเหลี่ยมพลอย ขัดผิวด้วยจานที่ละเอียดขึ้น และขัดเงาด้วยจานที่ละเอียดที่สุด โดยผสมครีมขัดลงไปด้วย ชุดจานเจียระไนแสดงไว้ดังรูปที่ 3.2 โดยหมายเลขจานที่แสดงในภาพ เรียงลำดับผิวจานจากจานหยาบที่สุดไปจนถึงจานที่ผิวละเอียดที่สุด

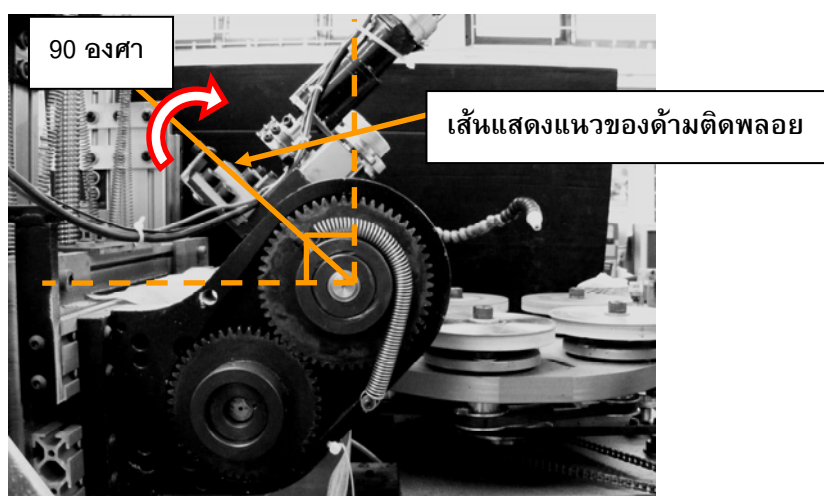


รูปที่ 3.2 ชุดจานเจียรระไนของเครื่องเจียรระไนพอลอยแบบอัดโนมิติ

### 3.1.2 การเคลื่อนที่ของเครื่องเจียรระไนพอลอยแบบอัดโนมิติ

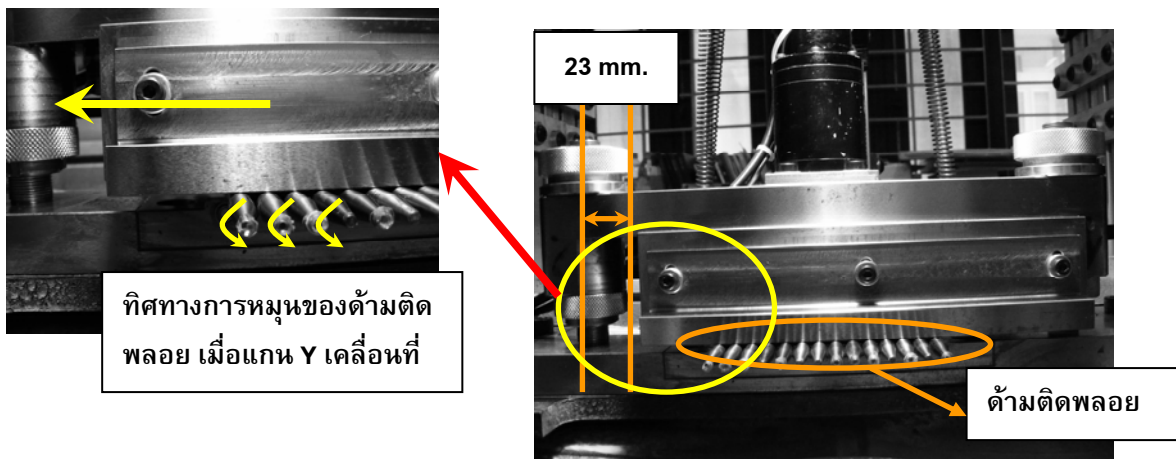
ในหัวข้อนี้จะอธิบายการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียรระไนพอลอยแบบอัดโนมิติให้ทราบดังนี้

**แกน X** ทำให้เกิดมุมยก โดยเหลี่ยมของพอลอยที่เกิดขึ้นจะเป็นมุมแหลม หรือป้านเท่าไร ขึ้นอยู่กับการเคลื่อนที่ในแกนนี้ ถ้ายิ่งเคลื่อนมาก พอลอยที่ได้ออกมาจะยังมีลักษณะแหลม โดยช่วงในการเคลื่อนที่ของแกน X จะอยู่ในช่วง 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.3



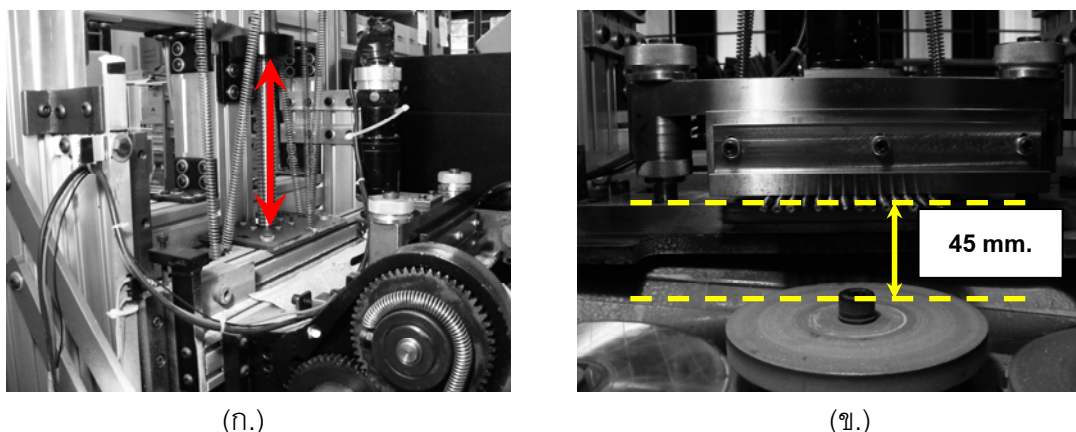
รูปที่ 3.3 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

**แกน Y** ทำให้เกิดหน้าต่างๆของพอลอย โดยปกติในแต่ละเหลี่ยมของพอลอยจะมีหน้าหลายหน้า การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y จะมีผลทำให้เกิดหน้าต่างๆในเหลี่ยม โดยช่วงในการเคลื่อนที่ของแกน Y จะอยู่ในช่วง 23 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 แต่ในการเจียรระไนจริง แกน Y จะเคลื่อนที่อยู่ในช่วงประมาณ 19 มิลลิเมตร เพราะเป็นระยะที่ทำให้ด้ามติดพอลอยหมุนได้ครบรอบพอดี



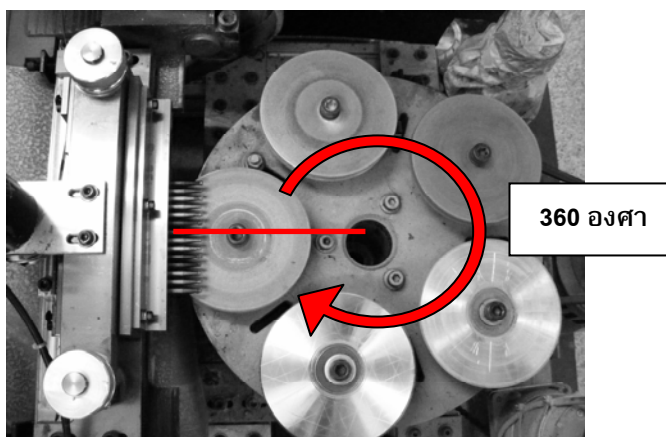
รูปที่ 3.4 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

แกน Z เป็นแกนที่กำหนดขนาดของพลอย ถ้าแกน Z ยิ่งเคลื่อนที่ต่ำลงมาก พลอยก็จะถูกเจียรระโนออกไปมาก และมีขนาดเล็ก โดยช่วงในการเคลื่อนที่ของแกน Z จะอยู่ในช่วง 45 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยระยะดังกล่าวเป็นระยะจากด้ามตีดพลอยถึงจานเจียรระโน ในขณะที่แกน Z อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง



รูปที่ 3.5 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z (ก.) แนวการเคลื่อนที่ (ข.) ขอบเขตการเคลื่อนที่

แกน A เป็นแกนที่ใช้ในการเปลี่ยนจานเจียรระโน ซึ่งจานเจียรระโนมีทั้งหมด 5 จาน แต่ละจานจะมีความละเอียดไม่เท่ากัน จานที่หยาบมากใช้สำหรับการขึ้นเหลี่ยม ในขณะที่จานละเอียดใช้ในการขัดให้เกิดความเงางามของพลอย โดยช่วงในการเคลื่อนที่ของแกน A สามารถหมุนได้รอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

### 3.2 หลักการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

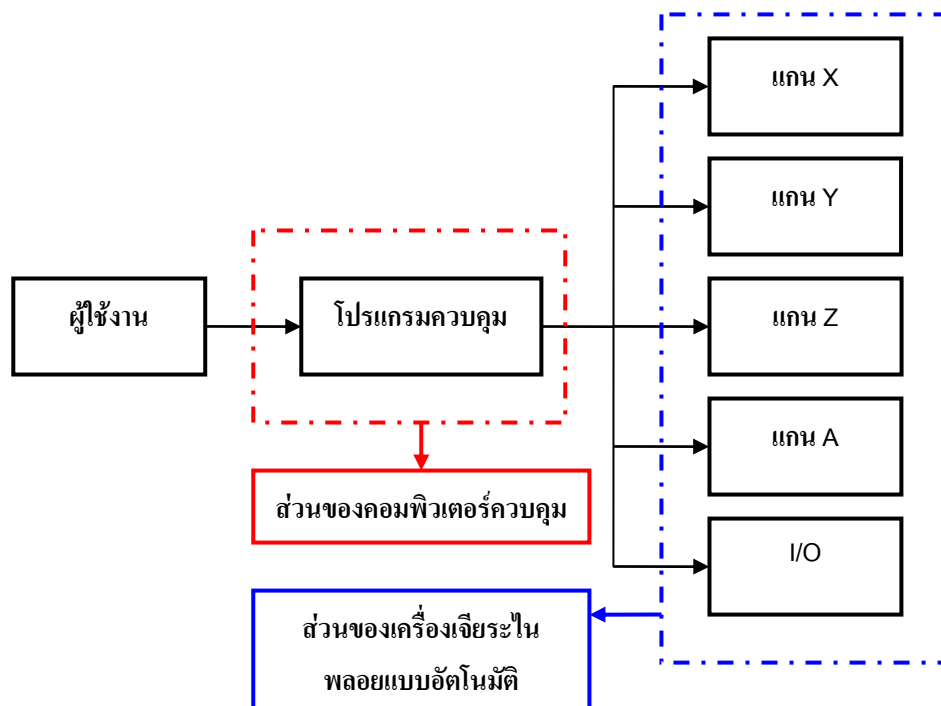
การทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ จะทำงานแบบอัตโนมัติซึ่งควบคุมและประมวลผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.7

ส่วนของโปรแกรมควบคุมจะอยู่ในคอมพิวเตอร์ ผู้ใช้งานต้องทำการป้อนตำแหน่ง และความเร็วในการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ เพื่อสั่งการให้เครื่องเคลื่อนที่ในแต่ละแกนตามที่ผู้ใช้กำหนด

ในส่วนของแกน X, Y, Z และ A เคลื่อนที่โดยอาศัยเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นตัวขับ และใช้ เอ็นโคดเดอร์ (Encoder) เป็นอุปกรณ์ในการจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เพื่อนกลับไปประมวลผลในโปรแกรมต่อไป

ในส่วนของ I/O Port ส่วนของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่ต่อกับ I/O Port ได้แก่ ส่วนขั้วงานเจียระไนให้หมุน (Spindle) ส่วนของการสายชุดงานเจียระไน (Crank) และส่วนของสวิตช์สำหรับป้องกันการชนของเครื่อง (Limit Switch) โดยที่จะเป็นส่วนที่ควบคุมแบบ เปิด-ปิด หรือใช้ตรวจสอบการกด-ปล่อย ของสวิตช์ ไม่ได้มีการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็วแต่อย่างใด





รูปที่ 3.7 แผนภาพหลักการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

### 3.3 จลศาสตร์ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

สำหรับการหาจลศาสตร์ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ จะพิจารณาการเคลื่อนที่ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพลอย เทียบกับตำแหน่งของจานเจียระไน ในทิศทางตั้งฉากกับจานเจียระไน ดังนั้นการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y จะไม่มีผลต่อตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพลอยเมื่อเทียบกับจานเจียระไน แกนที่มีผลต่อตำแหน่งดังกล่าวมีเพียงแกน Z ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และแกน X ที่ควบคุมมุมยก เท่านั้น

จากลักษณะการเคลื่อนที่ และแกนการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอย สามารถเขียนแผนภาพจำลอง และติดเฟรม (Frame) เพื่อใช้ในการหาจลศาสตร์ของเครื่องได้ดังรูปที่ 3.8 กำหนดให้

Frame 0 ติดอยู่ที่ฐานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

Frame 1 ติดอยู่ที่จุดหัวจับด้ามพลอยที่มีการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z

Frame 2 ติดอยู่ที่จุดหมุนของแกน X

Frame 3 ติดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดพลอย

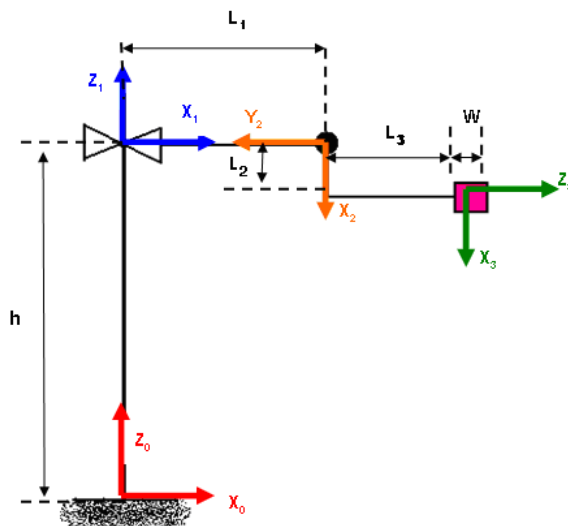
$h$  แทนระยะการเคลื่อนที่ในการ Z

$L_1$  แทนระยะจากแนวแกน Z ถึงจุดหมุนของแกน X

$L_2$  แทนระยะจากจุดหมุนของแกน X ไปถึงกึ่งกลางของด้ามติดพลอย ตามแนวรัศมีของด้ามติดพลอย

$L_3$  แทนระยะจากจุดหมุนของแกน  $X$  ไปถึงตำแหน่งปลายของด้ามติดพลอย ตามแนวแกนของด้ามติดพลอย

$W$  แทนขนาดความสูงของเม็ดพลอยที่จะทำการเจียรระโน



รูปที่ 3.8 แผนภาพจำลองของเครื่องเจียรระโนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติพร้อมการติดเฟรม

จากข้างต้น สามารถนำไปเขียนตารางแสดง Denevit Hartenberg Parameter ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 DH-Parameter ของเครื่องเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติ

$l$	$\alpha_{i-1}$	$a_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	0	$h$	0
2	-90	$L_1$	0	$\theta_2$
3	90	$L_2$	$L_3+W/2$	0

### 3.3.1 ฟอว์เวิร์ดคิเนมาติกส์ (Forward Kinematics)

ตารางที่ 3.1 ข้างต้น สามารถนำมาหา เมตริกซ์การแปลงของแต่ละ link ได้ดังนี้

เมตริกซ์การแปลงของ frame 1 เทียบกับ frame 0 คือ

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

เมตริกซ์การแปลงของ frame 2 เทียบกับ frame 1 คือ

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

เมตริกซ์การแปลงของ frame 3 เทียบกับ frame 2 คือ

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_2 \\ 0 & 0 & -1 & -L_3 + W/2 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

สามารถหาเมตริกซ์การแปลงของ frame 3 เทียบกับ frame 0 ได้เป็น

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 & L_2 \cos\theta_2 + L_3 \sin\theta_2 + L_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 & h + (L_3 + W/2)\cos\theta_2 - L_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

จากเมตริกซ์การแปลงที่ได้ จะพบว่า เนื่องจากการควบคุมสนใจแต่เพียงระยะจากกึ่งกลางพลอย ถึงจานเจียร์ไนในแนวตั้งฉากกับจานเจียร์ไน ดังนั้นสามารถหาระยะทางดังกล่าวได้จากสมการ

$$Z = h + \left(L_3 + \frac{W}{2}\right)\cos\theta_2 - L_2 \sin\theta_2 \quad (3.5)$$

ซึ่ง ค่า  $h$  และ  $\theta_2$  สามารถอ่านได้จาก อุปกรณ์วัดตำแหน่งของมอเตอร์ในแกน Z และ X ตามลำดับ ในขณะที่ค่า  $L_2$ ,  $L_3$  และ  $W$  สามารถหาได้จากการวัดจริง ที่เครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ และขนาดของพลอย

### 3.3.2 อินเวอร์สคิเนมาติกส์ (Inverse Kinematics)

จากการหาฟอร์เวิร์ดคิเนมาติกส์ ในหัวข้อที่แล้ว ในขณะที่เครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติทำงานอยู่ ผู้ใช้จะทราบระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางพลอย ไปยังจานเจียร์ไน

เนื่องจากจะทราบตำแหน่งในแกน Z และตำแหน่งในแกน X โดยที่ผู้ใช้สามารถสั่งการ และควบคุมตำแหน่งในแต่ละแกนได้

แต่หากว่าผู้ใช้ต้องการจะสั่งให้จุดศูนย์กลางเม็ดพลอยอยู่ห่างจากงานเจียระไนเป็นระยะทางเท่าไร จำเป็นที่จะต้องหาอินเวอร์สคิเนมาติกส์ ในแนวแกน Z มาใช้ โดยทำการกำหนดมุมยกในแกน X ไว้ก่อน จากนั้นสั่งไปว่าต้องการให้จุดศูนย์กลางของเม็ดพลอยห่างจากงานเจียระไน เป็นระยะเท่าไร โปรแกรมจะทำการคำนวณหา ตำแหน่งปลายที่ต้องเคลื่อนที่ไป ในแนวแกน Z (ระยะ h ) ออกมา และสั่งให้ แกน Z วิ่งไปที่ตำแหน่งดังกล่าว ทำให้เม็ดพลอยไปอยู่ในตำแหน่งที่เราต้องการได้

จาก สมการที่ (3.5)

$$Z = h + \left( L_3 + \frac{W}{2} \right) \cos \theta_2 - L_2 \sin \theta_2$$

จะได้ว่า

$$h = Z - \left( L_3 + \frac{W}{2} \right) \cos \theta_2 + L_2 \sin \theta_2 \quad (3.6)$$

โดยสมการที่ (3.6) จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมระยะระหว่างเม็ดพลอยกับงานเจียระไนต่อไป เพื่อให้การควบคุมทำได้ง่ายมากขึ้น

## บทที่ 4

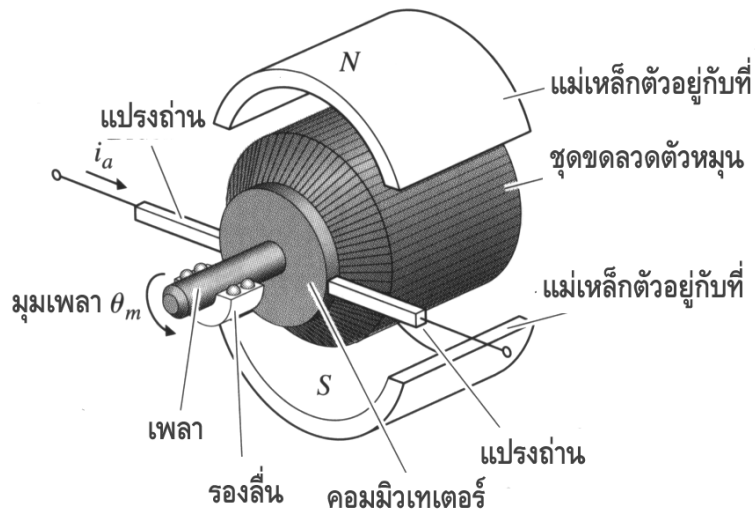
### หลักการในการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ และทฤษฎีการควบคุมแบบพื้นฐาน ลักษณะการส่งสัญญาณควบคุม เพื่อนำไปใช้ในการสร้างโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติต่อไป

#### 4.1 เซอร์โวมอเตอร์

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วจากบทที่ 2 ว่าในการเคลื่อนที่ของแกน X, Y, Z และ A ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ ใช้เซอร์โวมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึง วิธีการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ และ อุปกรณ์ที่ต้องใช้สำหรับการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

##### 4.1.1 วิธีการควบคุม เซอร์โวมอเตอร์

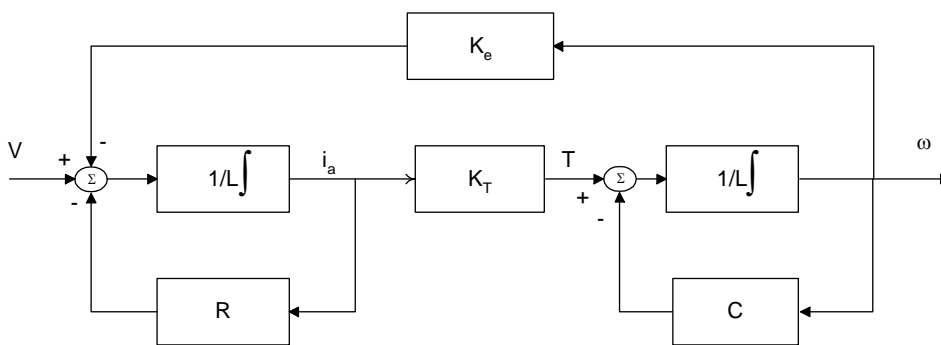


รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบภายในมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โว [2]

จากรูปที่ 4.1 เป็นการแสดงชิ้นส่วนต่างๆภายในของมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โว โดยที่ การควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติจะเป็นการควบคุมแบบอาร์เมเจอร์ เนื่องจากเหมาะสำหรับงานที่ต้องการควบคุมกระแส หรือแรงบิดของมอเตอร์ที่จะจ่ายให้กับระบบ ไม่ต้องการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ แต่ต้องการควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่

การควบคุมแบบอาร์เมเจอร์ ค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ขดลวด (field coil) จะคงที่ ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูง ในขณะที่เดียวกัน ค่าความเฉื่อยของตัวอาร์เมเจอร์ควรที่จะมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

วิธีการหาสมการควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ พร้อมทั้งบล็อกไดอะแกรม แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แผนภาพบล็อกของระบบไฟฟ้าเชิงกล (DC Servo Motor)

แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ตกคร่อมวงจรถออาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$V - K_e \omega = i_a R + L \frac{di_a}{dt} \tag{4.1}$$

เมื่อ

$$K_e = \text{แรงดันไฟฟ้าคงตัวหรือ} \left( \frac{\text{volt}}{\text{rad/sec}} \right) \text{ (back e.m.f constant)}$$

$$i_a = \text{กระแสไฟฟ้า (amp)}$$

$$R = \text{ค่าความต้านทานที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (ohm)}$$

$$L = \text{ค่าความเหนี่ยวนำที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ (henry)}$$

$$\omega = \text{ความเร็วเชิงมุมของเพลามอเตอร์ (rad/sec)}$$

แรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$T = K_T i_a \tag{4.2}$$

$$K_T = \text{ค่าคงตัวแรงบิด (torque constant)} \left( \frac{\text{N-m}}{\text{amp}} \right)$$

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของมวลที่ติดอยู่ที่ปลายของแกนมอเตอร์ได้ดังนี้คือ

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - c\omega \quad (4.3)$$

โดยที่  $J$  คือค่าความเฉื่อยของภาระ (load) ในที่นี้ ไม่ได้คำนึงถึงระบบส่งกำลัง (gear box) ระหว่างมอเตอร์กับภาระ รูปที่ 4.2 เป็นรูปบล็อกไดอะแกรมของระบบรวมจากสมการที่ (4.1), (4.2) และสมการที่ (4.3)

จากสมการที่ 4.3 ถ้านำมาปรับปรุงโดยคำนึงถึงพลศาสตร์ของตัวมอเตอร์ จะได้ว่า

$$K_T I - J_1 \dot{\omega} = T \quad (4.4)$$

โดยที่  $J_1$  คือค่าความเฉื่อยของมอเตอร์

การควบคุมกระแสที่ไหลเข้าไปในขดลวดของมอเตอร์ จะคำนึงว่าแรงบิด ( $T$ ) ที่เกิดจากตัวมอเตอร์จะเป็นค่าสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบหรือคือสัญญาณอินพุตที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของภาระ

#### 4.1.2 อุปกรณ์ขยายกำลังงาน (Power Amplifier) ที่ใช้กับมอเตอร์

อุปกรณ์ขยายกำลังงานที่ใช้กับมอเตอร์ ทำหน้าที่ให้พลังงานกับมอเตอร์ ในบางครั้งจะเรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า “Motor Drive” หรือ “Motor Controller” เป็นต้น จะเห็นว่าจากหัวข้อที่แล้ว แบบจำลองทางพลศาสตร์ของมอเตอร์ประกอบด้วยส่วนแรงดันย้อนกลับ (Back emf, electromotive force) ค่าแรงดันดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากขดลวดหมุนตัดสนามแม่เหล็กทำให้เกิดความต่างศักย์ในขดลวดอาร์เมเจอร์ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ค่าแรงดันย้อนกลับของตัวมอเตอร์นี้เองทำให้ระบบซับซ้อนขึ้น และใช้ในกรณีที่ตัวขยายกำลังงานเป็นชนิดใช้งานทั่วไป (General purpose amplifier) เช่น ใช้ตัวขยายกำลังงานของเครื่องขยายเสียงทั่วไป มาดัดแปลงภาคสัญญาณขาเข้าและขาออกให้ใช้ได้กับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อสามารถนำไปต่อใช้กับมอเตอร์ได้

แต่ในกรณีที่ใช้ชุดขับ หรือขยายกำลังที่ออกแบบมาสำหรับใช้งานกับเซอร์โวมอเตอร์แบบกระแสตรง ส่วนมากจะออกแบบมาเพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกโหมดการทำงานได้ 2 แบบ คือ แบบการควบคุมขยายแรงดัน (Voltage amplifier) และการควบคุมการขยายกระแส (Current amplifier) ทั้ง 2 แบบนี้มีลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกัน

ในกรณีที่ทำงานในโหมดของการควบคุมการขยายกระแส ตัวมอเตอร์ไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วเข้าไป ชูตซ์หรือตัวขยายกำลังงานจะทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณกระแส ซึ่งหมายถึงแรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ โดยที่ค่ากระแสนี้จะแปรผันตามขนาดของสัญญาณแรงดันที่ส่งเข้าไปยังตัวขยายสัญญาณ ดังนั้นจะได้ว่า

$$i = KV \quad ; \quad K = \text{Amp/volt} \quad (4.5)$$

จึงพอจะสรุปได้ว่า ชูตซ์ที่ทำงานในโหมดของการควบคุมการขยายกระแสจะนิยมใช้งานในการควบคุมตำแหน่งการหมุน และควบคุมแรงบิดของมอเตอร์กับภาระงาน

#### 4.1.3 อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดตำแหน่งในการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์

เนื่องจากการควบคุมเครื่องจักรในพลอยแบบอัตโนมัติ ใช้การควบคุมในโหมดการควบคุมการขยายกระแส ซึ่งเน้นไปที่การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ให้แม่นยำ ในการควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของมอเตอร์ เพื่อตรวจสอบตำแหน่ง ละทิศทางในการหมุนของมอเตอร์ว่าเป็นไปตามที่ผู้สั่งการหรือไม่ และทำการป้อนกลับค่าที่วัดได้ให้ระบบควบคุมประมวลผลต่อไป อุปกรณ์ดังกล่าวคือ เอนโคเดอร์ (Encoder)

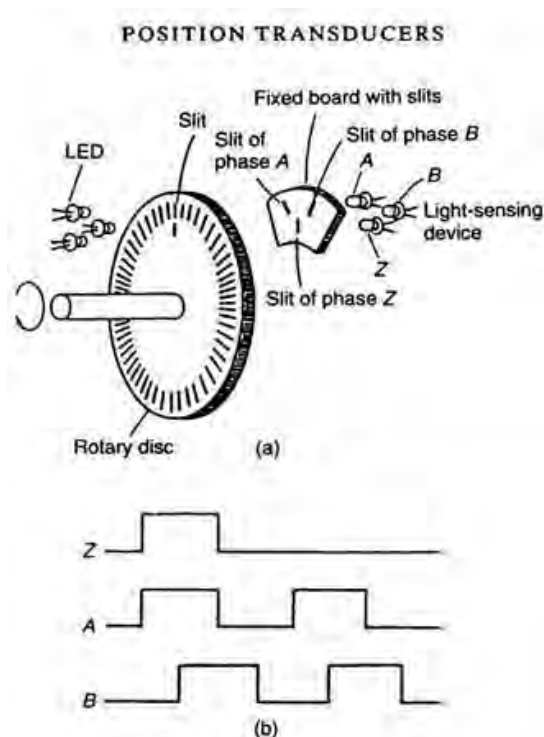
เอนโคเดอร์ ทำหน้าที่ตรวจวัดทิศทางในการหมุนของมอเตอร์ (Direction of Rotation) และตำแหน่งเพลลาของโรเตอร์ (shaft position) แล้วรายงานผลกลับไปยังคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมให้ทรานซิสเตอร์กำลังในวงจรกำลังของชูตซ์เคลื่อนเกิดการตัด-ต่อกระแสไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของโรเตอร์

เอนโคเดอร์ สามารถแยกประเภทตามหลักการได้ 2 กลุ่ม คือชนิดที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำหรือเรียกว่า อนาลอกเอนโคเดอร์ (Analog Encoder) ซึ่งประกอบด้วย แทคโคเจเนอเรเตอร์ (Tacho Generator) และ รีโซลเวอร์ (Resolver) และชนิดที่ทำงานโดยอาศัยหลักการดิจิทัล หรือเรียกว่า ดิจิตอลเอนโคเดอร์ (Digital Encoder) ซึ่งประกอบด้วย อินคริเมนทัลเอนโคเดอร์ (Incremental encoder) และ แอบโซลูตเอนโคเดอร์ (Absolute encoder) สำหรับเครื่องจักรในพลอยแบบอัตโนมัตินี้จะใช้ ดิจิตอลเอนโคเดอร์ ในการตรวจวัดตำแหน่งทั้งหมด จึงจะขอกกล่าวถึงเฉพาะ อินคริเมนทัลเอนโคเดอร์ และ แอบโซลูตเอนโคเดอร์

##### 4.1.3.1 อินคริเมนทัลเอนโคเดอร์

ทำงานโดยอาศัยหลักการอาศัยหลักการออปติคัล (Optical) บ่อยครั้งจึงถูกเรียกตามหลักการว่า ออปติคัลเอนโคเดอร์ (Optical encoder) หรือบางกรณีก็จะถูกเรียกว่า ดิจิตอลเอนโคเดอร์ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.3





รูปที่ 4.3 ส่วนประกอบของอินคริเมนทัลเอนโคดเดอร์

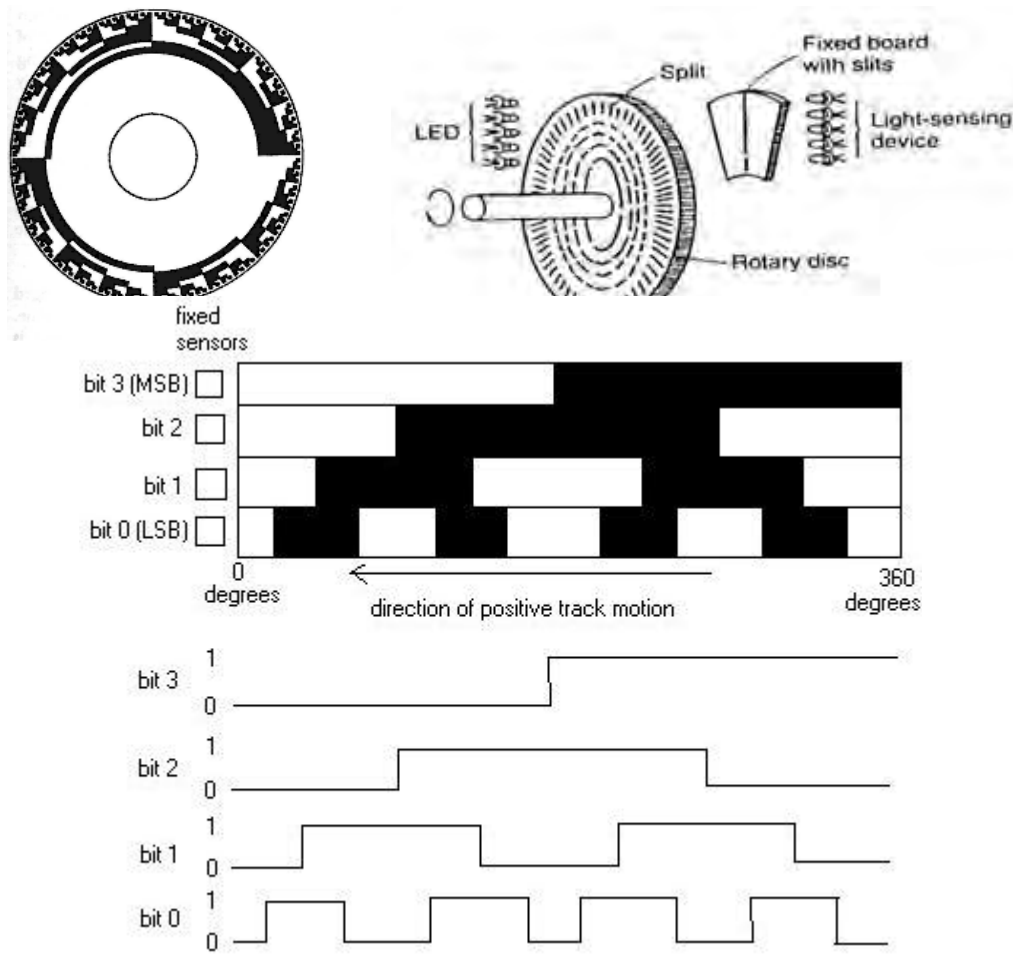
โครงสร้างของอินคริเมนทัลเอนโคดเดอร์ ประกอบด้วยตัวกำเนิดแสง ตัวจับแสง ซึ่งถูกคั่นกลางด้วยแผ่นจานกลมที่มีการทำรูเจาะไว้รอบๆแผ่น (จำนวนรูจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของ อินคริเมนทัลเอนโคดเดอร์) และหน้ากากแยกช่องของสัญญาณพัลส์ A ,B และ Z สัญญาณพัลส์ที่ได้จาก เอนโคดเดอร์ ชนิดนี้จะประกอบด้วย 3 แทรค (tracks) คือ A ,B และ Z พัลส์ที่เกิดจาก แทรค A และ B จะเกิดการเหลื่อมกันมีความต่างเฟสกัน 90 องศา เพื่อทำหน้าที่รายงานผลของความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ให้คอนโทรลเลอร์ ดังนี้

กรณีพัลส์ A เกิดขึ้นก่อน B คอนโทรลเลอร์จะรับรู้ว่ามีมอเตอร์กำลังหมุนด้วยทิศทางตามเข็มนาฬิกา แต่ถ้าหากพัลส์ B เกิดขึ้นก่อน A คอนโทรลเลอร์จะรับรู้ว่ามีมอเตอร์กำลังหมุนด้วยทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ส่วนแทรค Z หรือพัลส์อ้างอิง จะเกิดขึ้น 1พัลส์ในการหมุน 1 รอบ ทำหน้าที่อ้างอิงตำแหน่งของโรเตอร์

อินคริเมนทัลเอนโคดเดอร์ โดยทั่วไปจะไม่นิยมใช้กับระบบเซอร์โวที่มีการควบคุมตำแหน่ง เนื่องจากไม่สามารถจำตำแหน่งเดิมได้กรณีที่มีการปิดเครื่องหรือไฟดับ ซึ่งจะต้องทำการหาจุดอ้างอิงใหม่ทุกครั้ง

### 4.1.3.2 แอปโซลูตเอนโคเดอร์

เป็นดิจิทัลเอนโคเดอร์ อีกชนิดหนึ่งที่อาศัยหลักการ ออปติคอล คล้ายกับ อินคริเมนทัลเอนโคเดอร์ โดยประกอบด้วยตัวกำเนิดแสง ตัวจับแสง และจานเข้ารหัส ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบของแอปโซลูตเอนโคเดอร์

แอปโซลูตเอนโคเดอร์ มีโครงสร้างแผ่นดิสก์พิเศษ ซึ่งมีลักษณะเป็น เกรย์สเกล (Gray Scales) ความละเอียดตำแหน่งของ แอปโซลูตเอนโคเดอร์ จะขึ้นกับจำนวนบิต

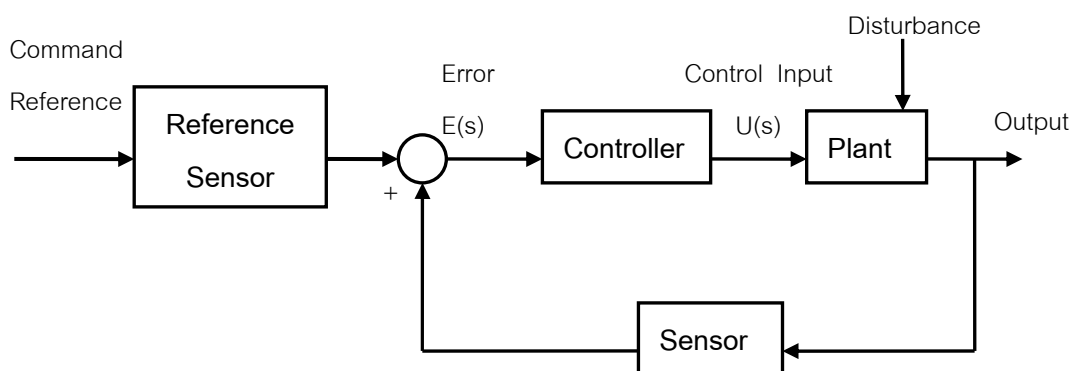
แอปโซลูตเอนโคเดอร์ จะให้ข้อมูลตำแหน่งค่อนข้างละเอียดและสามารถรายงานบอกตำแหน่งได้ทุก ๆ จุดที่โรเตอร์หมุนเคลื่อนที่ไป ไม่มีปัญหาเรื่องจุดอ้างอิงกรณีไฟดับหรือปิดเครื่อง แต่จะไม่ทนต่อสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม เช่น การสั่นสะเทือนและฝุ่นควัน นอกจากนี้จานเข้ารหัสยังเปราะและแตกง่าย

สำหรับในเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ เอนโคเดอร์ที่ใช้ทั้งหมดเป็นอินคริเมนทัลเอนโคเดอร์ ทั้งหมด ซึ่งทุกครั้งที่มีการปิด-เปิดเครื่อง เครื่องจะจำตำแหน่งเดิมไม่ได้ ดังนั้น

ก่อนใช้งานทุกครั้งต้องทำการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ในแต่ละแกนทุกครั้ง สำหรับวิธีในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงจะได้กล่าวต่อไปในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

### 4.2 ทฤษฎีการควบคุมพื้นฐาน

ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติบางครั้งจะเรียกว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback controller) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการจะควบคุม ซึ่งระบบควบคุมอัตโนมัตินี้จะมีส่วนที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด แล้วเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรที่ต้องการ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าแตกต่าง (error) ที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้สร้างสัญญาณควบคุมซึ่งสามารถนำไปช่วยลดการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้ได้ เพื่อให้ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นศูนย์ หรือมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งการกระทำของระบบควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณควบคุม (Control Signal) นี้เรียกว่ากิริยาควบคุม (Control Action) การควบคุมแบบป้อนกลับดังที่กล่าวมานี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.5

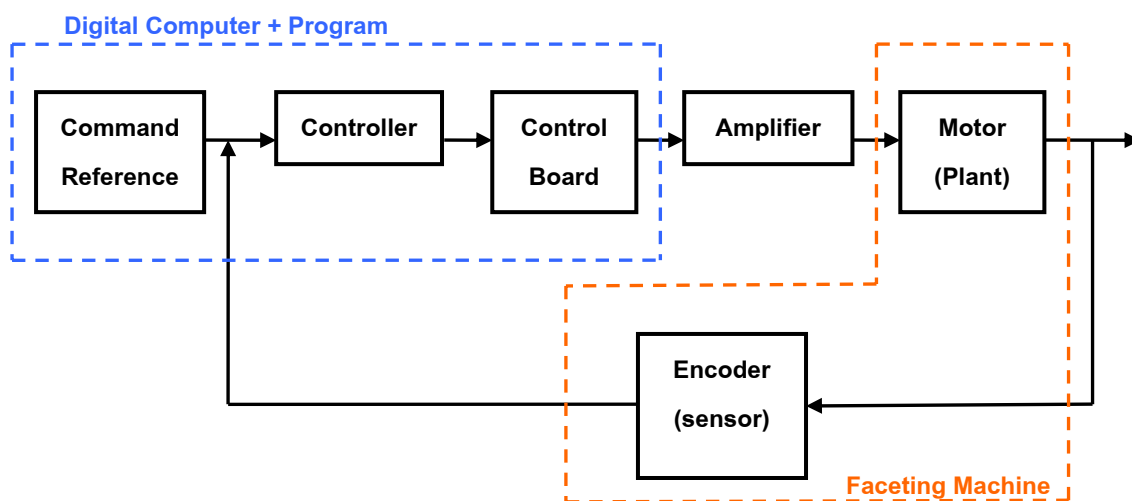


รูปที่ 4.5 แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด

จากรูปที่ 4.5 เป็นรูปแผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด โดยสัญญาณคำสั่งอ้างอิง (Command Reference) จะถูกเปลี่ยนรูปแบบด้วยระบบตรวจจู้อ้างอิง (Reference Sensor) เพื่อเปลี่ยนแปลงให้สัญญาณคำสั่งอ้างอิงดังกล่าวมีลักษณะเดียวกับสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจจู้ อธิบายให้ง่ายคือเพื่อต้องการให้คำสั่งอ้างอิงมีหน่วยเดียวกันกับสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ตรวจจู้ขาออก (Sensor) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะได้สัญญาณผิดพลาด (error signal) สัญญาณผิดพลาดจะถูกส่งต่อเข้าไปยังตัวควบคุม (Controller) สัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมจะถูกใช้เป็นสัญญาณควบคุม (Control Input) ที่จะส่งเข้าไปยังระบบที่ต้องการจะควบคุม (Plant)

ตัวควบคุม หรือ Controller จะมีบทบาทมากกับลักษณะตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ ตัวควบคุมดังกล่าวมีมาตรฐานและรูปแบบอยู่หลายประเภท ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

ซึ่งจากรูปที่ 4.5 สามารถนำมาแสดงเป็นแผนภาพของการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม กับเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ

จะเห็นว่าจากรูปที่ 4.6 ส่วนของ สัญญาณอ้างอิง , ตัวควบคุม และการประมวลผลหาสัญญาณผิดพลาด อยู่ภายในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจะถูกแปลงสัญญาณออกสู่ภายนอกก่อนเข้าสู่ระบบซึ่งก็คือมอเตอร์แต่ละแกนของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ และได้เป็นสัญญาณออกซึ่งสามารถวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดนั่นคือ เอนโคเดเตอร์ที่ติดอยู่ที่แต่ละแกน การเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัตินั่นเอง ซึ่งค่าที่วัดได้จะถูกส่งกลับไปเปรียบเทียบกับค่าสัญญาณออกด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป

### 4.3 ชนิดของตัวควบคุมพื้นฐาน

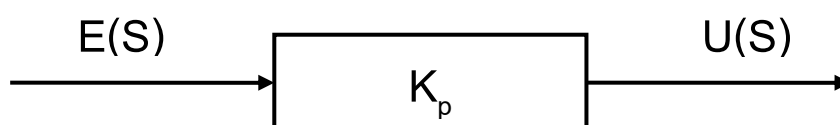
อุปกรณ์ควบคุมจะถูกออกแบบไว้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปควบคุมระบบเมื่อมีสัญญาณผิดพลาดเกิดขึ้น หน้าที่ของตัวควบคุมคือพยายามควบคุมตัวแปรของระบบ (System Variable) ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการมากที่สุด ในที่นี้จะกล่าวถึงตัวควบคุมที่ใช้งานมากในอุตสาหกรรม ดังนี้

- ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportional Controller, P - Control)
- ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Controller, I - Control)
- ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Controller, D - Control)

- ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์บวกอินทิกรัล (Proportional – plus – Integral – plus – Derivative Controller, PID – Control)

#### 4.3.1 ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportional Controller, P - Control)

ตัวควบคุมประเภทนี้จะทำให้ สัญญาณควบคุม (U) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด (e) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิง กับสัญญาณเอาต์พุตของระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 สัญญาณที่ผ่านตัวควบคุมเชิงสัดส่วน

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดที่ส่งเข้าไปในระบบ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t)$$

ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซ จะได้ว่า

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p \quad (4.6)$$

โดยค่าเกน  $K_p$  เป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบนี้ หรือเรียกว่าเกนสัดส่วน โดยตัวควบคุมเชิงสัดส่วนมีผลทำให้ระบบที่ต้องการควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วขึ้น แต่หากเร็วมากไปอาจทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้

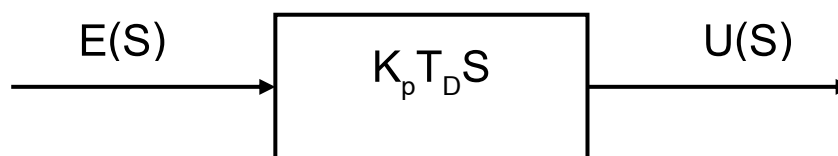
#### 4.3.2 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

ตัวควบคุมประเภทนี้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดสามารถเขียนในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซได้ว่า

$$\frac{U(S)}{E(S)} = \frac{K_p}{T_I S} \quad (4.7)$$

สำหรับตัวควบคุมแบบอินทิกรัลจะมีผลช่วยให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามมีผลทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง จึงไม่นิยมนำมาใช้เดี่ยวๆ

### 4.3.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์



รูปที่ 4.8 สัญญาณที่ผ่านตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมประเภทนี้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดสามารถเขียนในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซได้ว่า

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p T_D S \quad (4.8)$$

ส่วนมากแล้วตัวควบคุมประเภทนี้จะนิยมใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบอื่น ๆ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยในการเพิ่มค่าความหน่วง (damping) ให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม นั่นก็คือทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นนั่นเอง แต่จะไม่สามารถทำให้ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์ได้

### 4.3.4 ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์บวกอินทิกรัล

ตัวควบคุมประเภทนี้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดสามารถเขียนในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซได้ว่า

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p + \frac{K_I}{S} + K_D S$$

หรือจะเขียนในรูป

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K \left( 1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad (4.9)$$

ตัวควบคุมประเภทนี้ จะรวมเอาข้อดีของตัวควบคุมทั้ง 3 ตัวข้างต้นเอาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถควบคุมระบบให้แม่นยำได้ง่ายขึ้น ซึ่งในการควบคุมเครื่องจักรในพลอยแบบอัตโนมัติ ที่ต้องการความแม่นยำในแต่ละแกนสูงจึงได้เลือกตัวควบคุมประเภทนี้มาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน

## 4.4 การควบคุมระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

จากตัวควบคุมที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วเป็นการพิจารณาระบบที่มีลักษณะเป็นระบบที่มีเวลาต่อเนื่อง (Continuous time Systems) หรือบางทีจะรู้จักกันในชื่อของระบบแอนะล็อก

(Analog Systems) แต่ระบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมเป็นระบบดิจิทัล (Digital) อุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆก็ให้ข้อมูลเป็นดิจิทัล ซึ่งทำงานเป็นลักษณะของระบบที่เวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time Systems) โดยที่เวลาที่ทำหน้าที่กำหนดการทำงานของระบบจะเป็นเวลาของการสุ่มข้อมูลที่เรียกว่า Sampling Time โดยที่เวลาในการสุ่มนี้มีผลอย่างมากต่อผลลัพธ์ของระบบควบคุม ซึ่งจากการที่เครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ ถูกควบคุมด้วยโปรแกรมผ่านคอมพิวเตอร์ จึงถือว่าระบบนี้เป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องเช่นกัน ดังนั้นการพิจารณาใช้ตัวควบคุมเพื่อไปเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน จึงต้องพิจารณาในรูปแบบของระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-Control) ประกอบด้วยตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ดังนั้นในการพิจารณาจะทำการแยกส่วนต่างๆ ออกและแสดงในรูปแบบของสมการเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$\text{ส่วนตัวควบคุมเชิงสัดส่วน} \quad u(k) = Ke(k) \quad (4.10)$$

$$\text{ส่วนตัวควบคุมแบบอินทิกรัล} \quad u(k) = u(k-1) + \frac{K}{T_I} Te(k) \quad (4.11)$$

$$\text{ส่วนตัวควบคุมแบบอนุพันธ์} \quad u(k) = \frac{KT_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (4.12)$$

จากรูปแบบตัวควบคุมทั้งสาม ในสมการที่ (4.10), (4.11) และ (4.12) จะสามารถเขียนตัวควบคุมพีไอดี ในรูปแบบของระบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

$$u(k) = u(k-1) + K \left[ \left( 1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right) e(k) - \frac{T_D}{T} e(k-1) \right] \quad (4.13)$$

หรือ อาจเขียนได้ในรูป

$$u(k) = u(k-1) + K_p e(k) + K_I Te(k) + \frac{K_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (4.14)$$

จากสมการที่ 4.14 เป็นรูปแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยค่า  $K_p$ ,  $K_I$  และ  $K_D$  คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่า  $T$  คือ ช่วงเวลาในการสุ่มข้อมูล โดยในการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัตินี้จะใช้ความถี่ในการสุ่มเป็น 1,000 Hz. หรือ 0.001 วินาที

#### 4.5 ลักษณะของค่าสัญญาณอ้างอิงที่ส่งไปขับมอเตอร์

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่า การที่จะควบคุมมอเตอร์ในแต่ละแกน จำเป็นจะต้องส่งสัญญาณอ้างอิงเข้าไป โดยสัญญาณอ้างอิงที่ส่งไปควรจะมีหน่วยเดียวกันกับค่าสัญญาณป้อนกลับจาก

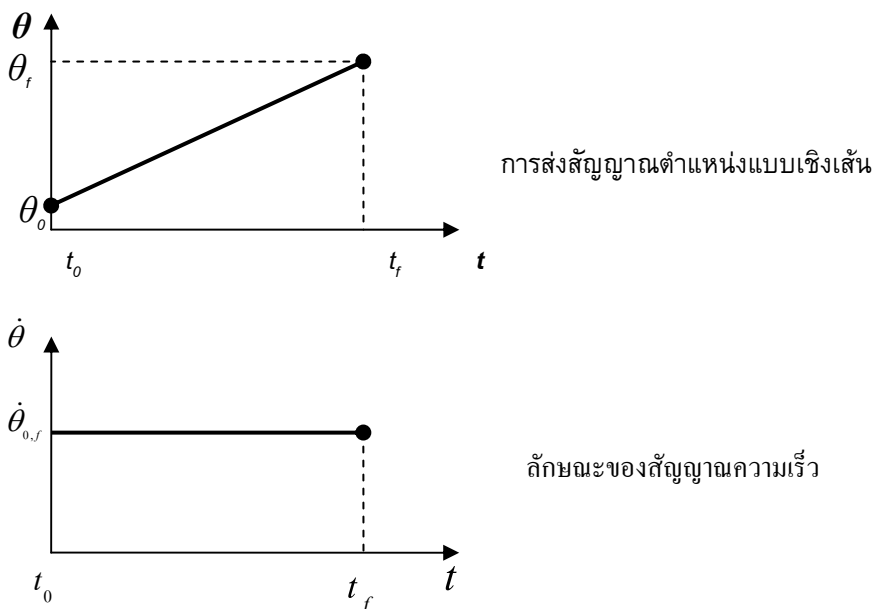
อุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งในที่นี้คืออุปกรณ์ตรวจวัดของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ คือเอนโคเดอร์ โดยที่เอนโคเดอร์จะส่งสัญญาณออกมาเป็นลักษณะของพัลส์ ดังนั้นในการส่งสัญญาณอ้างอิงจึงทำการส่งค่าออกไปเป็นตำแหน่งพัลส์ที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนไปถึง ซึ่งการส่งสัญญาณอ้างอิงสามารถส่งสัญญาณได้หลายแบบ ดังนี้

#### 4.5.1 ส่งเป็นค่าตำแหน่งปลาย (Target) ให้กับระบบ

การส่งสัญญาณในลักษณะนี้ เช่น หากต้องการให้มอเตอร์หมุนไป 3000 พัลส์ ก็ส่งสัญญาณอ้างอิงไปเป็น 3000 พัลส์ให้กับระบบ ข้อดีของการส่งสัญญาณแบบนี้คือ ระบบสามารถไปถึงเป้าหมายได้รวดเร็ว แต่เหมาะกับการเคลื่อนที่ในระยะทางสั้นๆ เนื่องจากถ้าตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งจุดปลายห่างกันมากเกินไป จะมีผลทำให้ค่าผิดพลาด ที่จะส่งไปหาสัญญาณควบคุมมีค่ามาก ทำให้สัญญาณควบคุมมีค่ามากเมื่อเริ่มเคลื่อนที่ ความเร่งของระบบจะสูงมาก อาจทำให้ระบบเกิดโอเวอร์ชูตอย่างมาก หรืออาจเกิดการเสถียรภาพ (Unstable) ไม่ได้ นอกจากนี้การส่งสัญญาณแบบนี้ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของระบบได้

#### 4.5.2 ส่งสัญญาณเป็นลักษณะเชิงเส้น (Linear Function)

การส่งสัญญาณลักษณะนี้จะส่งสัญญาณอ้างอิงจากจุดเริ่มไปยังเป้าหมายตำแหน่งปลาย โดยจะค่อยๆส่งสัญญาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆแบบคงที่ ดังแสดงในรูป 4.9



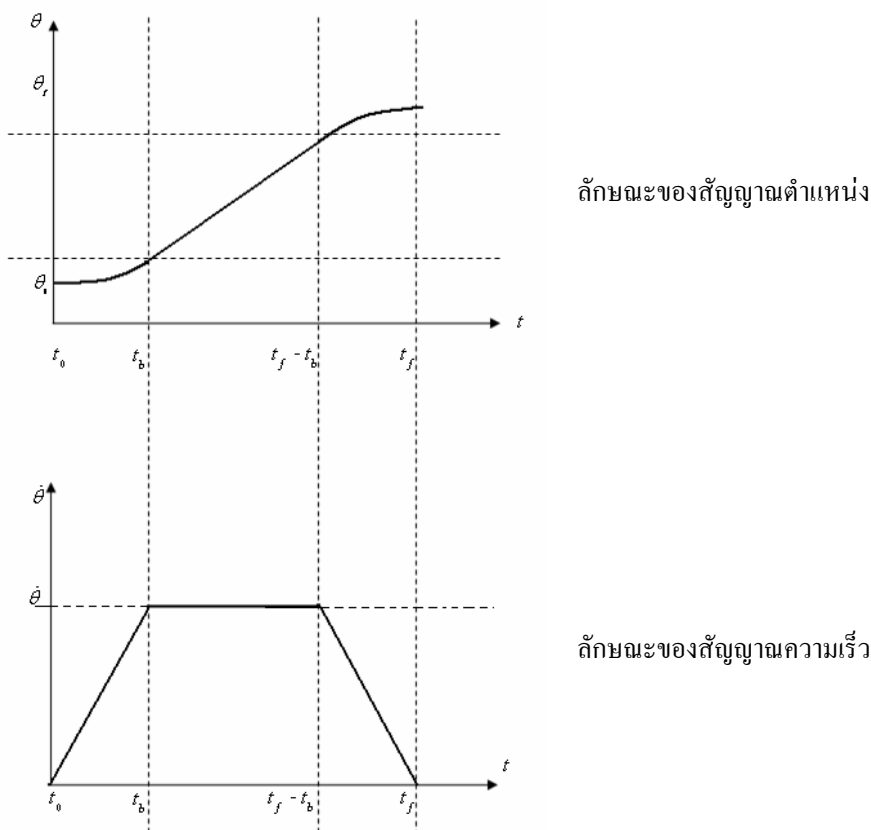
รูปที่ 4.9 ลักษณะการส่งสัญญาณอ้างอิงแบบเชิงเส้น



จะเห็นว่าการส่งสัญญาณในลักษณะนี้ ค่าสัญญาณอ้างอิงจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างคงที่จากจุดเริ่มต้น ไปจนถึงเป้าหมาย และยังทำให้สามารถควบคุมระยะเวลาในการเคลื่อนที่ได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามการส่งสัญญาณแบบนี้เมื่อสังเกตจากสัญญาณความเร็วจะเห็นว่า ณ ตำแหน่งเริ่มต้น และตำแหน่งสุดท้าย สัญญาณความเร็วขาดความต่อเนื่อง คือ ที่จุดเริ่มต้น สัญญาณความเร็วเพิ่มขึ้นสูงสุดในทันทีแล้วจึงคงที่ ก่อนที่จะกลายเป็นศูนย์ทันที ณ ตำแหน่งปลายของการเคลื่อนที่ซึ่งมีผลทำให้การเคลื่อนที่ไม่ราบเรียบ

#### 4.5.3 ส่งสัญญาณเป็นลักษณะเชิงเส้น ผสมกับพาราโบลา (Linear function with parabolic blend)

จากปัญหาความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณความเร็วที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณแบบเชิงเส้น การแก้ปัญหาก็ใช้ลักษณะแนวเส้นแบบพาราโบลามาช่วยในช่วงเริ่มต้น และช่วงปลายการเคลื่อนที่ จากจุดเริ่มต้น ถึงจุดปลาย ในขณะที่ช่วงตรงกลางของการเคลื่อนที่จะยังคงเป็นการเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นแบบธรรมดาอยู่ ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะทำให้ในการเริ่มต้นเคลื่อนที่ความเร็วจะเป็นศูนย์แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับขณะถึงจุดปลาย ความเร็วจะค่อยๆลดลงจนความเร็วเป็นศูนย์ มีผลให้การเคลื่อนที่ราบเรียบและนิ่มนวลกว่าแบบที่แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ลักษณะสัญญาณแบบเชิงเส้นผสมกับพาราโบลา [3]

การจะสร้างสัญญาณลักษณะดังนี้จำเป็นต้องทราบค่าต่างๆที่จำเป็นก่อนคือ

$\theta_0$  คือ ตำแหน่งเริ่มต้นที่จะเริ่มเคลื่อนที่

$\theta_f$  คือ ตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการเคลื่อนที่ไปถึง

$t_f$  คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมด

ค่าทั้งสามนี้ คือค่าที่ต้องกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้สั่งการเคลื่อนที่ ซึ่งจากค่าเหล่านี้จะนำไปหาค่าอื่นๆที่ใช้ในการสร้างสัญญาณส่งออก ดังนี้

$$\text{หาค่า } \ddot{\theta} \text{ จาก } \ddot{\theta} \geq \frac{4(\theta_f - \theta_0)}{t^2}$$

$$\text{ในที่นี้จะใช้} \quad \ddot{\theta} = \frac{4(\theta_f - \theta_0)}{t^2} + 1 \quad (4.15)$$

$$\text{หาค่า } t_b \text{ จาก} \quad t_b = \frac{t}{2} - \frac{\sqrt{\ddot{\theta}^2 t^2 - 4\ddot{\theta}(\theta_f - \theta_0)}}{2\ddot{\theta}} \quad (4.16)$$

$$\text{หาค่า } \dot{\theta} \text{ จาก} \quad \dot{\theta} = \ddot{\theta} t_b \quad (4.17)$$

เมื่อหาค่าทั้งหมดได้แล้ว สามารถสร้างสัญญาณตำแหน่งเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

**ช่วงที่1** ( $t_0 \rightarrow t_b$ )

$$\text{หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ} \quad \theta = \theta_0 + 0.5\ddot{\theta}t^2 \quad (4.18)$$

**ช่วงที่2** ( $t_b \rightarrow t_f - t_b$ )

$$\text{หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ} \quad \theta = \theta_0 + \dot{\theta}(t - 0.5t_b) \quad (4.19)$$

**ช่วงที่3** ( $t_f - t_b \rightarrow t_f$ )

หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ

$$\theta = \theta_0 - 0.5\ddot{\theta}(t^2 - (t_f - t_b)^2) + \dot{\theta}(t - 0.5t_b) + \ddot{\theta}(t_f - t_b) \quad (4.20)$$

จากสมการที่ (4.18) , (4.19) และ (4.20) จะถูกนำไปใช้สร้างสัญญาณตำแหน่งเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติต่อไป

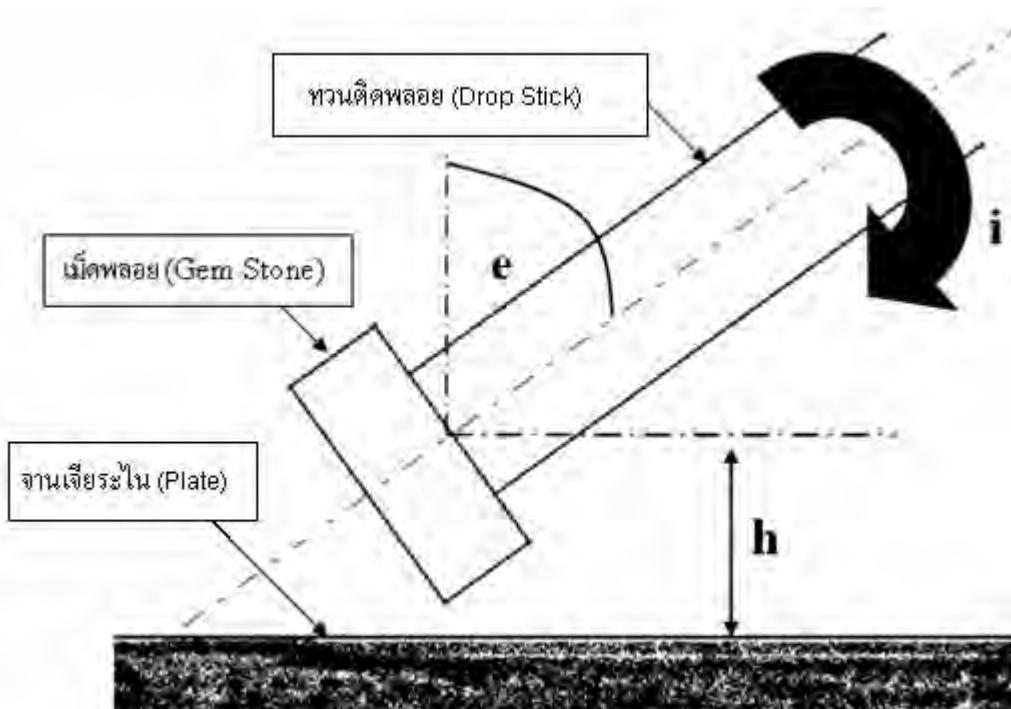
## บทที่ 5

### องค์ประกอบที่ใช้ในการสร้างโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไน พลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

ในบทนี้จะกล่าวถึง องค์ประกอบ ความรู้ และแนวคิด ในด้านต่างๆที่พิจารณาเพื่อนำมาใช้ ในการสร้างโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยอธิบาย เกี่ยวกับ ตัวแปรที่ต้องควบคุมในการเจียรไนพลอย การให้ขนาดและการบอกรูปร่างพลอย การ พิจารณาดำเนินการอ้างอิงของแต่ละแกนการเคลื่อนที่ และการนำไปใช้งานร่วมกับโปรแกรม ออกแบบรูปร่างพลอย ซียู-โซลิด (CU-Solid)

#### 5.1 ตัวแปรที่ต้องทำการควบคุมในการเจียรไนพลอย

จากบทที่ 3 ที่ได้แสดงลักษณะโครงสร้างของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ จะเห็นว่า มีแกนการเคลื่อนที่ ที่ต้องทำการควบคุมทั้งสิ้น 4 แกน โดยที่แต่ละแกนก็จะควบคุมตัวแปรของ เหลี่ยมพลอยแตกต่างกันไป ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง ตัวแปรที่มีผลต่อรูปร่าง และขนาดของพลอย ว่ามีตัวแปรใดบ้าง ดังนี้



รูปที่ 5.1 ตัวแปรที่มีผลต่อรูปร่างและขนาดของพลอย

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่า ในการเจียระไนพลอย ไม่ว่าจะรูปแบบการเจียระไนจะเป็นเช่นไรก็ตามจะตัวแปรเพียง 3 ตัวที่จะต้องทำการควบคุม คือ

### 5.1.1 มุมดรรชนี (Index Angle : $i$ )

ตัวแปรตัวนี้จะเป็นตัวแปรที่กำหนดว่าในแต่ละเหลี่ยมของการเจียระไน พลอยจะมีทั้งหมดกี่หน้า ซึ่งในแต่ละหน้าจะมีเลขดรรชนีเป็นตัวกำกับ โดยทั่วไปแล้วพลอย 1 เม็ดจะถูกแบ่งมุมดรรชนีออกเป็นหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับความละเอียดในการเจียระไน ซึ่งที่นิยมใช้ส่วนมากจะมีรูปแบบ 32 , 64 , 80 , 96 , 120 และ 128 มุมดรรชนี เป็นต้น โดยที่การแบ่งมุมดรรชนียิ่งมาก ก็จะทำให้การเจียระไนเหลี่ยมละเอียดมากขึ้นตามไปด้วย โดยการเคลื่อนที่ของแกนนี้ก็คือ แกน Y ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัตินั่นเอง ลักษณะการเคลื่อนที่ คือจะเป็นการหมุนทวนทิศพลอยตามแนวแกนของตัวเอง

### 5.1.2 มุมยก (Elevation Angle : $e$ )

ตัวแปรนี้จะเป็นตัวแปรที่กำหนดมุมของเหลี่ยมพลอยว่าจะให้เหลี่ยมมีมุมกี่องศา สำหรับการเจียระไนต้องพิจารณาจากคุณสมบัติค่าดรรชนีหักเหของแสงสำหรับพลอยแต่ละชนิด เพื่อให้การสะท้อนแสงของพลอยที่เจียระไนออกมามีความแวววาว โดยที่มุมนี้จะวัดจากทวนทิศพลอยเทียบกับแกนแนวตั้ง โดยที่การเคลื่อนที่ของแกนนี้คือ แกน X ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

### 5.1.3 ความลึกในการกัด (Depth of cut : $h$ )

ตัวแปรนี้จะเป็นตัวแปรที่กำหนดขนาดของพลอยที่นำมาเจียระไนแต่ละเม็ด คือถ้ายิ่งเจียระไนลึกมาก ขนาดก็จะยิ่งเล็กลง โดยที่การเคลื่อนที่ของแกนนี้คือ แกน Z ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยการเคลื่อนที่จะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่หัวจับด้ามพลอยขึ้น-ลง

## 5.2 ลักษณะการให้ขนาด และการบอกรูปร่างพลอย

ในการสร้างโปรแกรมจะต้องพิจารณาถึงการบอกรูปร่างและขนาดของพลอยที่เป็นสากลเพื่อความสะดวกสำหรับผู้ใช้ในการใช้งานเพื่อกำหนด ขนาดและรูปร่างของพลอยที่ต้องการ ลักษณะการบอกขนาดและรูปร่างของพลอยที่เป็นมาตรฐานมีลักษณะดังรูปที่ 5.2 โดยที่

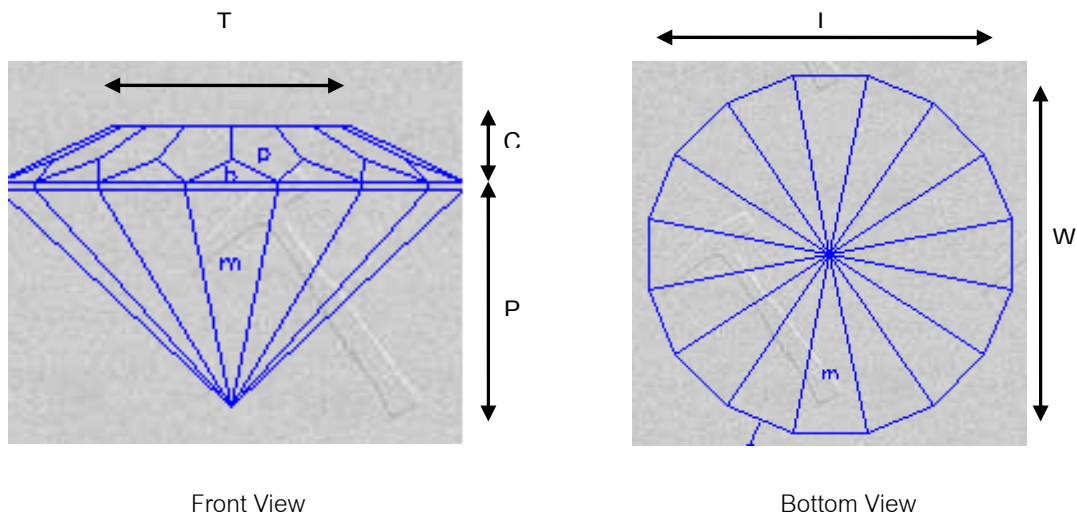
T หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าที่เป็นกระดาน (Table)

C หมายถึง ขนาดความสูงของด้านบนของพลอย (Crown)

P หมายถึง ขนาดความสูงของด้านล่างของพลอย (Pavilion)

L หมายถึง ความยาวของพลอย

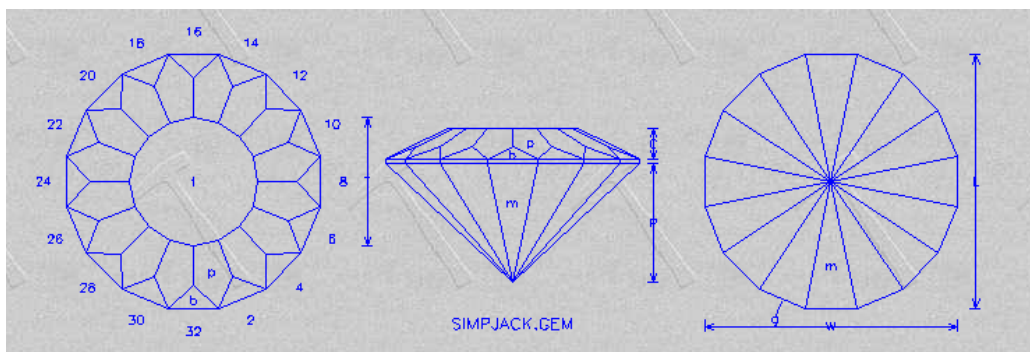
W หมายถึง ความกว้างของพลอย



รูปที่ 5.2 การบอกขนาดของพลอย [9]

สำหรับการให้ขนาดของพลอยจะไม่ได้บอกเป็นขนาดแน่นอน แต่จะบอกเป็นอัตราส่วน เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ได้กับพลอยทุกๆขนาดตามแต่ต้องการ

ในส่วนของการบอกรูปร่างของพลอยจะบอกในรูปแบบของตัวแปรที่มีผลต่อเหลี่ยมมุมของพลอย ได้แก่ มุมยก (e) และ มุมดรรชนี (i) โดยจะบอกว่า พลอยรูปร่างที่ออกแบบมีการเจียรระไนที่มุมยกใดบ้าง และในแต่ละมุมยกจะเจียรระไนที่มุมดรรชนีใดบ้าง ตัวอย่างของการบอกขนาดและรูปร่าง ของพลอยที่ต้องการแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 และตารางที่ 5.1 เป็นตัวอย่างการบอกขนาดและรูปร่างพลอยที่ใช้กันเป็นสากล โดยพลอยที่ยกมาเป็นพลอยเหลี่ยม Simple Jack



รูปที่ 5.3 ลักษณะการบอกขนาดและรูปร่างของพลอย [9]

ตารางที่ 5.1 การบอกเหลี่ยมพลอยจากรูปร่างพลอยเหลี่ยม Simple Jack [9]

Simple Jack - designed by Bob Keller 6/98

L/W = 1.000 T/W = 0.506 T/L = 0.506		P/W = 0.466 C/W = 0.122	
H/W = (P+C)/W+0.02 = 0.608		P/H = 0.766 C/H = 0.201	
<b>Pavilion for 32 Index</b>			
m	43.00	32-02-04-06-08-10-12-14-16-18-20-22-24-26-28-30	Cut mains to center point (equal depth)
g	90.00	32-02-04-06-08-10-12-14-16-18-20-22-24-26-28-30	Cut level girdle to meet with mains
<b>Crown for 32 Index</b>			
b	29.00	32-02-04-06-08-10-12-14-16-18-20-22-24-26-28-30	Cut breaks to meet with approx 2% girdle
p	25.00	01-03-05-07-09-11-13-15-17-19-21-23-25-27-29-31	Cut petals to meet with breaks and girdle
t	00.00	Table	Cut level table to 50-55% of diameter

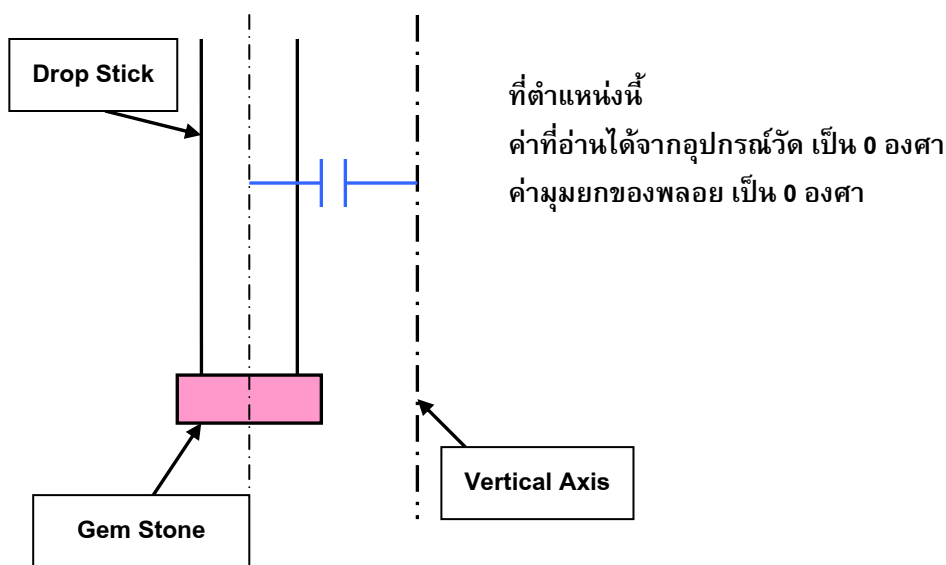
จะเห็นว่าการบอกขนาดและรูปร่างของพลอย จะแสดงรูปในแต่ละมุมของพลอยที่ต้องการ จากนั้นจะบอกขนาดของพลอยในลักษณะที่เป็นอัตราส่วนของด้านแต่ละด้าน แล้วจึงบอกเหลี่ยมมุมของพลอยที่ต้องการเจียรระโนในด้านล่างของพลอย และด้านบนของพลอยตามลำดับ

### 5.3 การตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแต่ละแกน

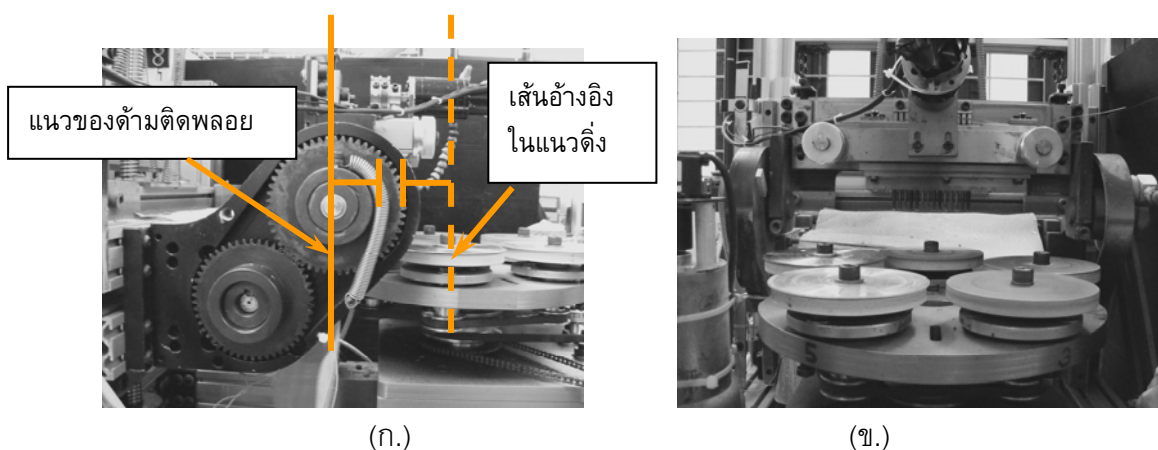
ในบทที่ 4 ได้กล่าวไว้ถึงชนิดของอุปกรณ์วัดตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ (Encoder) ซึ่งในเครื่องเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติใช้ เป็นชนิด อินคริเมนทัลเอนโคดเดอร์ (Incremental Encoder) โดยเอนโคดเดอร์ชนิดนี้ มีข้อดีอยู่คือ เมื่อทำการปิดเครื่อง หรือตัดไฟที่ป้อนให้กับเอนโคดเดอร์แล้ว เอนโคดเดอร์จะไม่สามารถจำตำแหน่งเดิมได้ นั่นคือทุกครั้งที่เปิดเครื่องเจียรระโนพลอยอัตโนมัติ เอนโคดเดอร์ในแต่ละแกน จะอ่านค่าตำแหน่งเป็นศูนย์เสมอ ไม่ว่าตำแหน่งของแต่ละแกนจะอยู่ที่ใดก็ตาม ซึ่งส่งผลทำให้ผู้ใช้งานไม่สามารถใช้ค่าตำแหน่งของการเจียรระโนครั้งก่อนหน้าได้ ดังนั้นเพื่อให้ทุกครั้งของการเจียรระโนสามารถใช้ค่าตำแหน่งของการเจียรระโนเดิมได้ทุกครั้งก่อนการใช้งานจึงจำเป็นต้องตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ทุกครั้งที่ทำกรเปิดเครื่องเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติ ดังนั้นในขณะที่ทำงาน ค่าตำแหน่งที่อ่านได้จากเอนโคดเดอร์ในแต่ละแกน คือค่าตำแหน่งเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงของแต่ละแกน สำหรับการตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแต่ละแกน ใช้แนวคิดดังนี้

### 5.3.1 ตำแหน่งอ้างอิงของแกน X

ดังกล่าวมาแล้วว่าแกน X ทำหน้าที่ควบคุมมุมยกของเม็ดพลอย ซึ่งมุมยกของเม็ดพลอยเป็นมุมที่วัดจากแกนแนวตั้ง (Vertical Axis) เทียบกับแนวของทวนติดพลอย ดังนั้น ตำแหน่งอ้างอิงในแกน X จึงควรที่จะอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้ ทวนติดพลอยอยู่ขนานกับแกนแนวตั้ง หรือตั้งฉากกับจานเจียรระโน้นเอง เพื่อให้ ณ ตำแหน่งอ้างอิงของมุมยกมีค่ามุมยกเป็นศูนย์และค่าที่อ่านได้จากเอนโคเดอร์เป็นศูนย์ด้วยเช่นเดียวกัน ซึ่งการตั้งตำแหน่งอ้างอิงของแกน X ไว้ที่ตำแหน่งนี้มีผลทำให้ค่าที่วัดได้ในแกน X ที่อ่านได้จากเอนโคเดอร์ขณะที่เคลื่อนที่ เป็นค่าเดียวกันกับค่ามุมยกของพลอย ตลอดการเจียรระโน่ ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งตำแหน่งเครื่องขณะที่แกน X อยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.4 ตำแหน่งอ้างอิงของแกน X เมื่อเทียบกับทวนติดพลอย

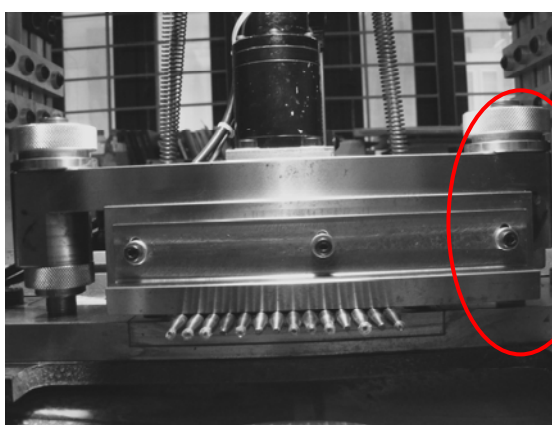


รูปที่ 5.5 เครื่องเจียรระโน่พลอยจุฬาแบบอัตโนมัติขณะที่แกน X อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง (ก.) ด้านข้าง (ข.) ด้านหน้าตรง

### 5.3.2 ตำแหน่งอ้างอิงของแกน Y

ดังกล่าวมาแล้วว่าแกน Y ทำหน้าที่ในการควบคุมมุมดรรชนีของเม็ดพลอย สำหรับมุมดรรชนีของเม็ดพลอยค่าของมุมดรรชนีที่เป็นศูนย์จะอยู่ที่ใดก็ได้ ต่างจากมุมยกที่จะเป็นศูนย์เมื่อทวนติดพลอยตั้งฉากกับพื้นราบ แต่สิ่งสำคัญของมุมดรรชนีในการเจียรระไนคือ มุมดรรชนีของด้านบนของพลอย (Crown) และมุมดรรชนีของด้านล่างของพลอย (Pavilion) และมุมดรรชนีในแต่ละมุมยกที่แตกต่างกัน จะต้องตรงกันเสมอในแต่ละเม็ด ซึ่งการเจียรระไนแต่ละมุมยกที่แตกต่างกัน มุมดรรชนีจะตรงกันเสมอแน่นอนเพราะเป็นการเจียรระไนในขั้นตอนเดียวกันตั้งแต่ต้นจนจบไม่ได้มีการถอดพลอยและด้ามติดพลอยออกมาจากส่วนของหัวจับแต่อย่างใด แต่ปัญหาจะอยู่ที่การกลับด้านพลอยเพื่อเจียรระไนจากด้านบนพลอย ไปเจียรด้านล่างพลอย ซึ่งต้องมีการถอดเม็ดพลอย และด้ามติดพลอยออกจากส่วนหัวจับแล้วใส่เข้าไปใหม่ ซึ่งอาจทำให้มุมดรรชนีเริ่มต้นผิดพลาดไปจากเดิม เป็นผลให้มุมดรรชนีของพลอยทั้ง 2 ด้านไม่ตรงกัน จึงได้ใช้แนวคิดในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกน Y ดังนี้

ประการแรกคือ การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y เป็นการเลื่อน ซึ่งมีขอบเขตการเคลื่อนที่ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ดังนั้นก่อนการเคลื่อนที่จึงต้องปรับให้หัวจับด้านพลอยส่วนที่เคลื่อนที่ อยู่ชิดทางด้านขวามือ (เมื่อนหันหน้าเข้าหาเครื่อง) เสมอ เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่เกินขอบเขตของหัวจับ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้ ดังรูปที่ 5.6



ตั้งให้อยู่ตำแหน่ง  
ชิดขวามือเสมอ

รูปที่ 5.6 การตั้งตำแหน่งอ้างอิงของชุดหัวจับด้ามพลอย

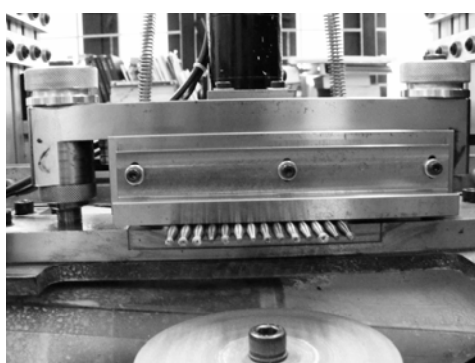
ประการที่สองคือ ปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อทำการกลับด้านพลอยที่อาจทำให้มุมดรรชนีคลาดเคลื่อนไป จึงได้ทำการออกแบบ ด้ามติดพลอยให้มีตำแหน่งอ้างอิงไว้ที่ปลายของด้ามติดพลอยด้วย แสดงได้ดังรูปที่ 5.7





รูปที่ 5.7 ลักษณะของด้ามตีดพลอยที่มีการทำตำแหน่งอ้างอิงไว้ที่ปลายด้าม

โดยขณะใส่ด้ามตีดพลอยเข้ากับชุดหัวจับด้ามพลอย ต้องทำการตั้งตำแหน่งอ้างอิงของด้ามตีดพลอยให้ตรงกันทุกด้าม และอยู่ที่ตำแหน่งเดิมเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ดังนั้นเมื่อมีการถอดด้ามตีดพลอยออกจากชุดหัวจับแล้วใส่กลับเข้าไปใหม่ ตำแหน่งอ้างอิงจะยังคงเป็นตำแหน่งเดิม



(ก.)

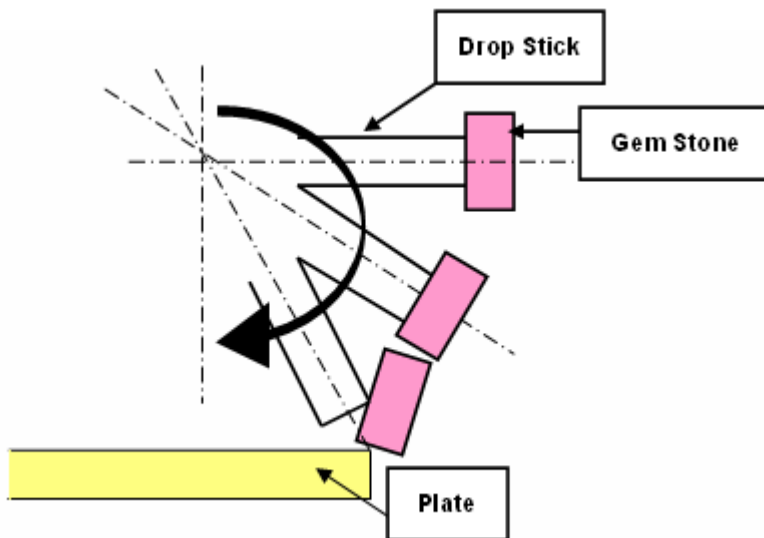


(ข.)

รูปที่ 5.8 การใส่ด้ามตีดพลอยเข้ากับส่วนอุปกรณ์หัวจับด้ามพลอย (ก.) ด้านหน้า (ข.) ด้านหลัง

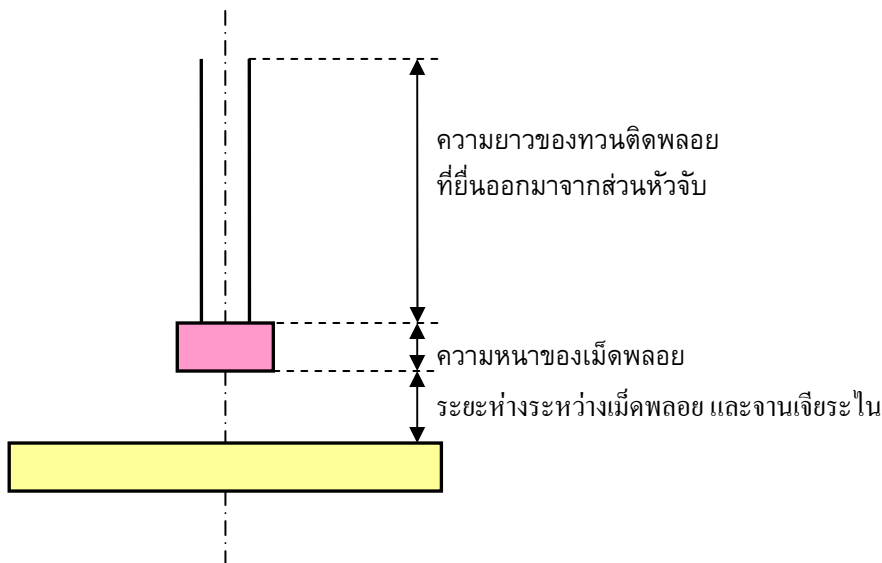
### 5.3.3 ตำแหน่งอ้างอิงของแกน Z

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าแกน Z เป็นแกนที่ควบคุมความลึกในการกัดของเม็ดพลอย ซึ่งขนาดของเม็ดพลอยที่ผ่านการเจียรระโนจะขึ้นอยู่กับตัวแปรนี้ โดยตำแหน่งอ้างอิงของแกน Z ถือว่าเป็นแกนที่สำคัญอีกแกนหนึ่ง เนื่องจากหากตำแหน่งอ้างอิงอยู่ต่ำจนเกินไป อาจจะมีผลทำให้ในขณะที่ตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแกน X ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มุมยกเป็นศูนย์ เม็ดพลอยอาจเบียดกับจานเจียรระโน จนทำให้เม็ดพลอยหลุดจากทวนตีดพลอย หรือ จานเจียรระโนเสียหายได้ ดังรูปที่ 5.9

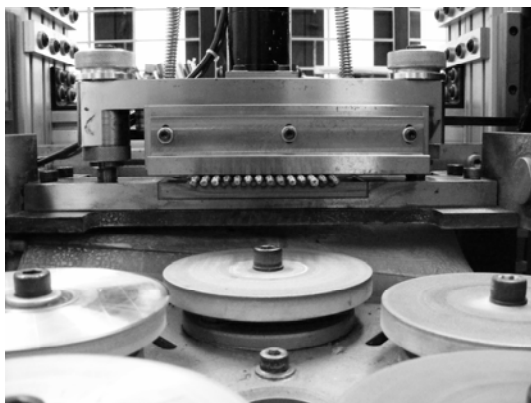


รูปที่ 5.9 ตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกน Z ที่ต่ำเกินไป

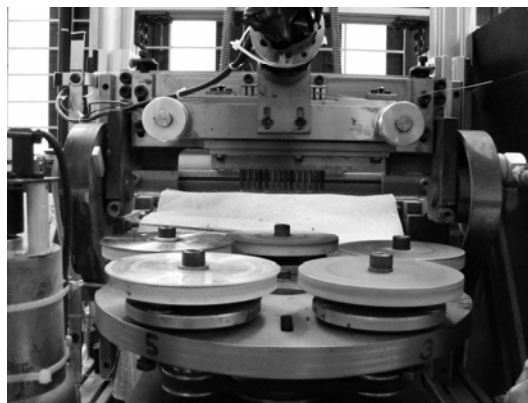
การพิจารณาตำแหน่งอ้างอิงในแกน Z ควรจะพิจารณาจาก ระยะห่างของเม็ดพลอยที่มุกยกเป็นศูนย์ กับงานเจียรระโนพลอยให้มีระยะห่างที่เหมาะสม โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวของทวนติดพลอยที่ยึดออกมาจากส่วนหัวจับ และขนาดความหนาของเม็ดพลอยที่จะเจียรระโนดังรูปที่ 5.10 ซึ่งระยะห่างที่เหมาะสม ทำให้เมื่อแกนอื่นเคลื่อนที่ เม็ดพลอยจะไม่พลาดไปชนกับงานเจียรระโนซึ่งตำแหน่งเครื่องขณะที่แกน Z อยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.11 จะเห็นว่าตำแหน่งปลายของด้ามติดพลอย อยู่สูงจากงานเจียรระโนพอสมควร ทำให้การเคลื่อนที่ในแกน X สามารถทำได้อย่างปลอดภัย โดยที่ไม่ต้องกังวลว่า ด้ามติดพลอยจะกระแทกกับงานเจียรระโนหรือไม่



รูปที่ 5.10 ตำแหน่งอ้างอิงในแกน Z ที่เหมาะสม



(ก.)

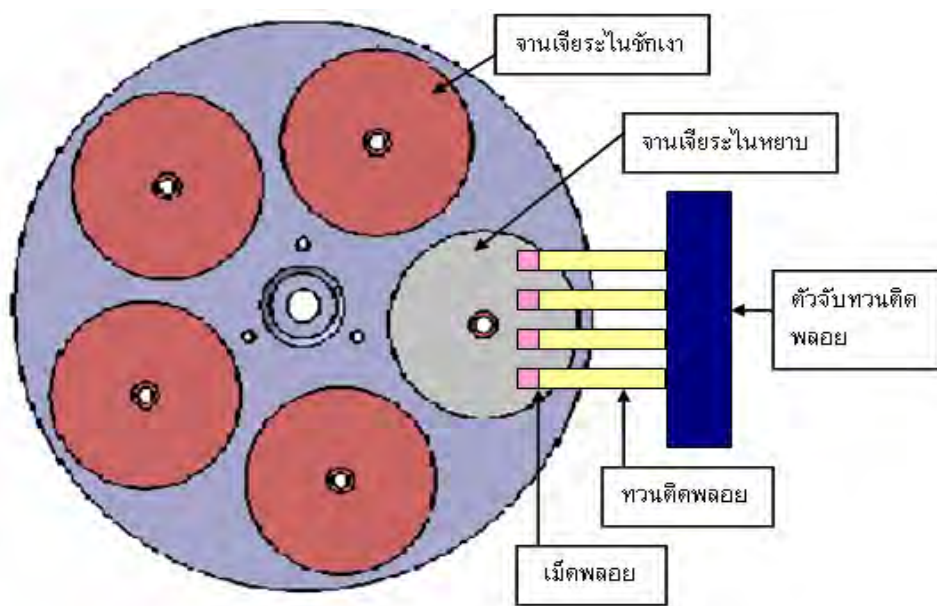


(ข.)

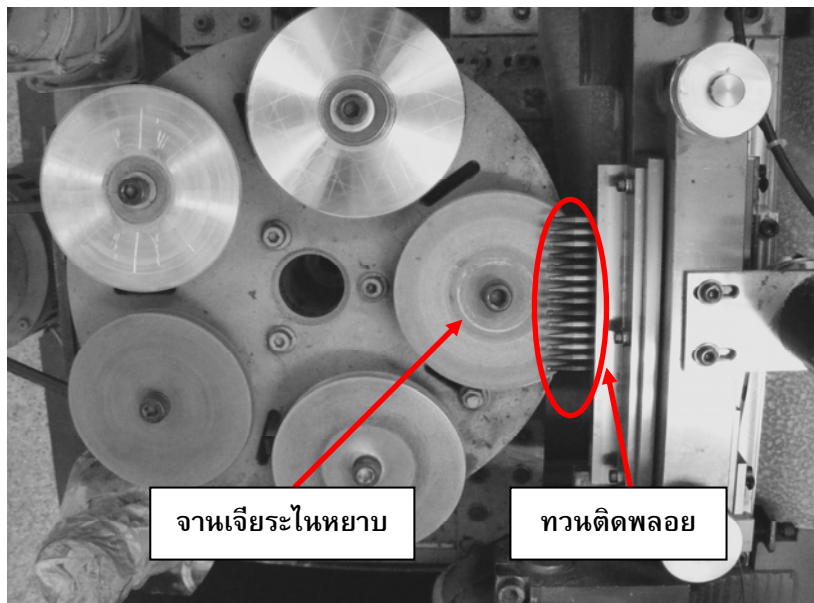
รูปที่ 5.11 เครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติชนิดที่แกน Z อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง (ก.) แกน X อยู่ที่ตำแหน่ง 90 องศา (ข.) แกน X อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง

### 5.3.4 ตำแหน่งอ้างอิงของแกน A

สำหรับแกน A เป็นแกนควบคุมการเปลี่ยนงานเจียระไนพลอย สำหรับเจียระไน และการชักเงาเท่านั้น แต่ไม่ได้มีผลต่อขนาดและรูปร่างของพลอย ซึ่งในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงของแกน A จะกำหนดให้ตำแหน่งที่งานเจียระไนหยุด (สำหรับเจียระไนขึ้นรูป) อยู่ในตำแหน่งพร้อมเจียระไนเป็นตำแหน่งอ้างอิง และแกน A จะหมุนเปลี่ยนงานไปเรื่อยๆตลอดการเจียระไนเมื่อมีการชักเงาพลอย จากนั้นเมื่อจบการทำงานแกน A จะหมุนกลับมาหยุดที่ตำแหน่งอ้างอิงเสมอ ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งตำแหน่งเครื่องขณะที่แกน Z อยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิง แสดงได้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.12 ตำแหน่งอ้างอิงของแกน A



จานเจียรระไนหยาบ

ทวนติดพลอย

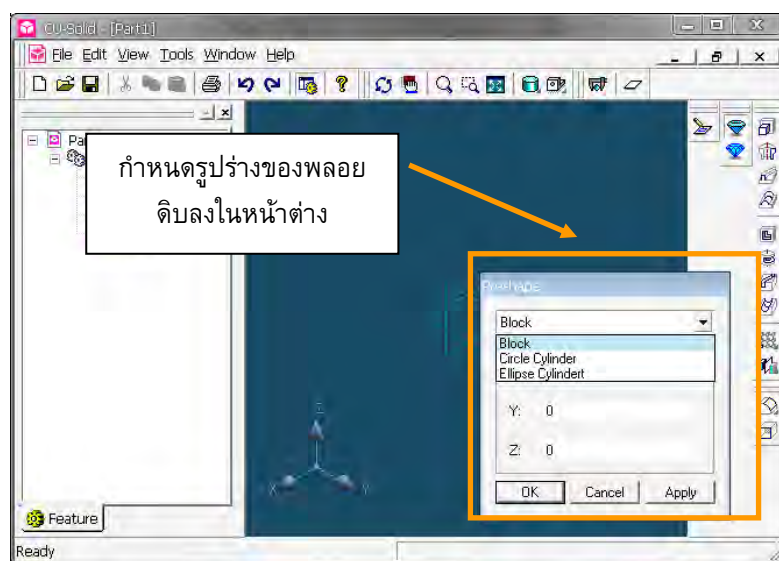
รูปที่ 5.13 เครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติขณะที่แกน A อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง

#### 5.4 การใช้งานร่วมกับโปรแกรม ซียู-โซลิด (CU – Solid)

โปรแกรมซียู-โซลิด คือโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเหลี่ยม และรูปร่างของพลอยที่ต้องการเจียรระไน โดยผู้ใช้งานสามารถป้อนขนาดพลอย เหลี่ยม มุม และความลึกในการกัด เพื่อให้ได้พลอยที่มีรูปร่างและขนาดตามต้องการ ซึ่งในการใช้เครื่องเจียรระไนพลอยอัตโนมัติต้องการที่จะใช้ร่วมกับโปรแกรม ซียู-โซลิด ดังนั้นจึงต้องศึกษาการใช้งานของโปรแกรมว่า ในการวาดรูปพลอยโดยใช้ ซียู-โซลิด ต้องใช้พารามิเตอร์ใดบ้าง เพื่อออกแบบโปรแกรมให้รับค่าเหล่านั้น สำหรับสั่งให้เครื่องทำงานได้อย่างอัตโนมัติ

การใช้งานโปรแกรม ซียู-โซลิดคือ เริ่มแรก ต้องกำหนดขนาดของพลอยดิบก่อน ดังรูปที่

5.14

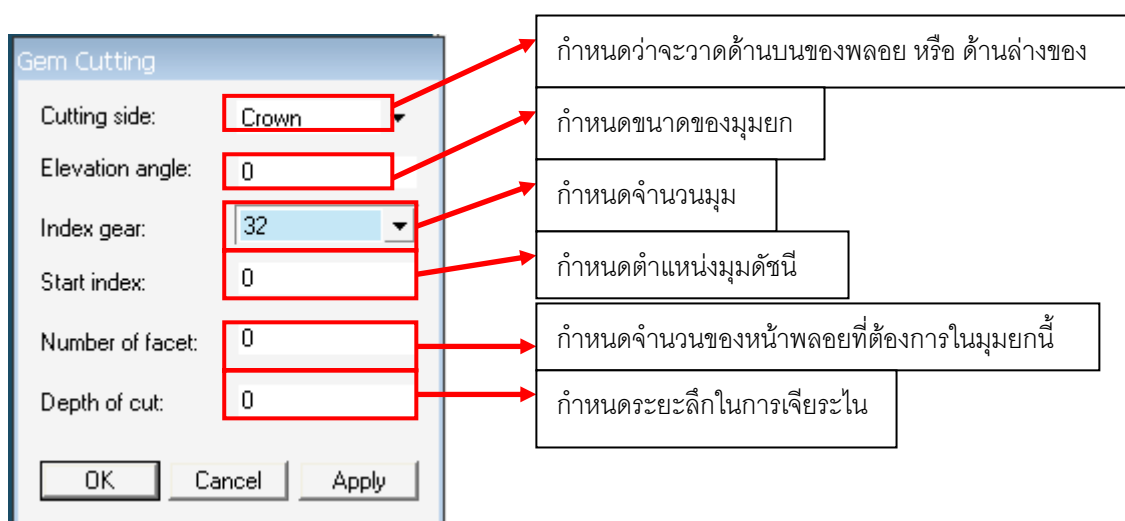


กำหนดรูปร่างของพลอย  
ดิบลงในหน้าต่าง

รูปที่ 5.14 การกำหนดลักษณะรูปร่างของพลอยดิบในโปรแกรมซียู-โซลิด

การกำหนดรูปร่างของพลอยดิบก่อนการเจียระไนสามารถกำหนดได้เป็นลักษณะทรงกระบอก ทรงรี และทรงลูกบาศก์ ซึ่งผู้ใช้ต้องกำหนดรูปร่างและขนาดให้ใกล้เคียงกับ พลอยดิบจริงที่มีอยู่ให้มากที่สุด เพื่อความแม่นยำในการออกแบบ และการนำพารามิเตอร์ไปใช้งาน

ขั้นตอนต่อไปคือ กำหนดเหลี่ยม และรูปร่างของพลอยที่ต้องการให้เจียระไนออกมา ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 พารามิเตอร์ที่ต้องป้อนสำหรับสร้างเหลี่ยมพลอย

จากรูปที่ 5.15 จะเห็นว่า ในการสร้างเหลี่ยม และมุมของพลอยให้ได้ตามต้องการ ต้องทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้ครบ ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ก็คือตัวแปรในการเจียระไนพลอยทั้งสิ้น ได้แก่ ค่ามุมยก ค่ามุมดรรชนีที่ใช้ และค่าความลึกในการกัด แต่การป้อนค่ามุมดรรชนีจะเป็นลักษณะการป้อนแบบเหลี่ยมสมมาตร นั่นคือ ป้อนมุมดรรชนีเริ่มต้นของเหลี่ยม และป้อนจำนวนของหน้าพลอยที่ต้องการในเหลี่ยมดังกล่าว ซึ่งถ้าหากต้องการวาดพลอยที่ไม่ได้มีลักษณะสมมาตร ก็จะทำให้ยุ่งยากกว่าเล็กน้อย

จะพบว่า การใช้โปรแกรม ซียู-โซลิดในการออกแบบรูปร่างพลอย มีค่าที่ต้องใส่หลักๆคือ ขนาดของพลอยดิบก่อนเจียระไน และค่าตัวแปรในการเจียระไนทั้งหมด ดังนั้นจะใช้ค่าเหล่านี้เป็นพื้นฐานของโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่จะสร้างขึ้น เพื่อรับค่าต่างๆสำหรับสั่งให้เครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติทำการเจียระไนพลอยให้ได้ขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ในโปรแกรมให้มากที่สุด

## บทที่ 6

### โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ

สำหรับโปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ มีชื่อว่า ซียู-เจมส์ ไกรดิง (CU Gems Grinding) พัฒนาโปรแกรมด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Studio 2005 บนระบบปฏิบัติการ Microsoft Window XP โดยนี้ใช้ภาษา C++ ในการเขียนโปรแกรม ซึ่งสาเหตุที่ใช้โปรแกรมนี้ในการพัฒนาเนื่องจาก

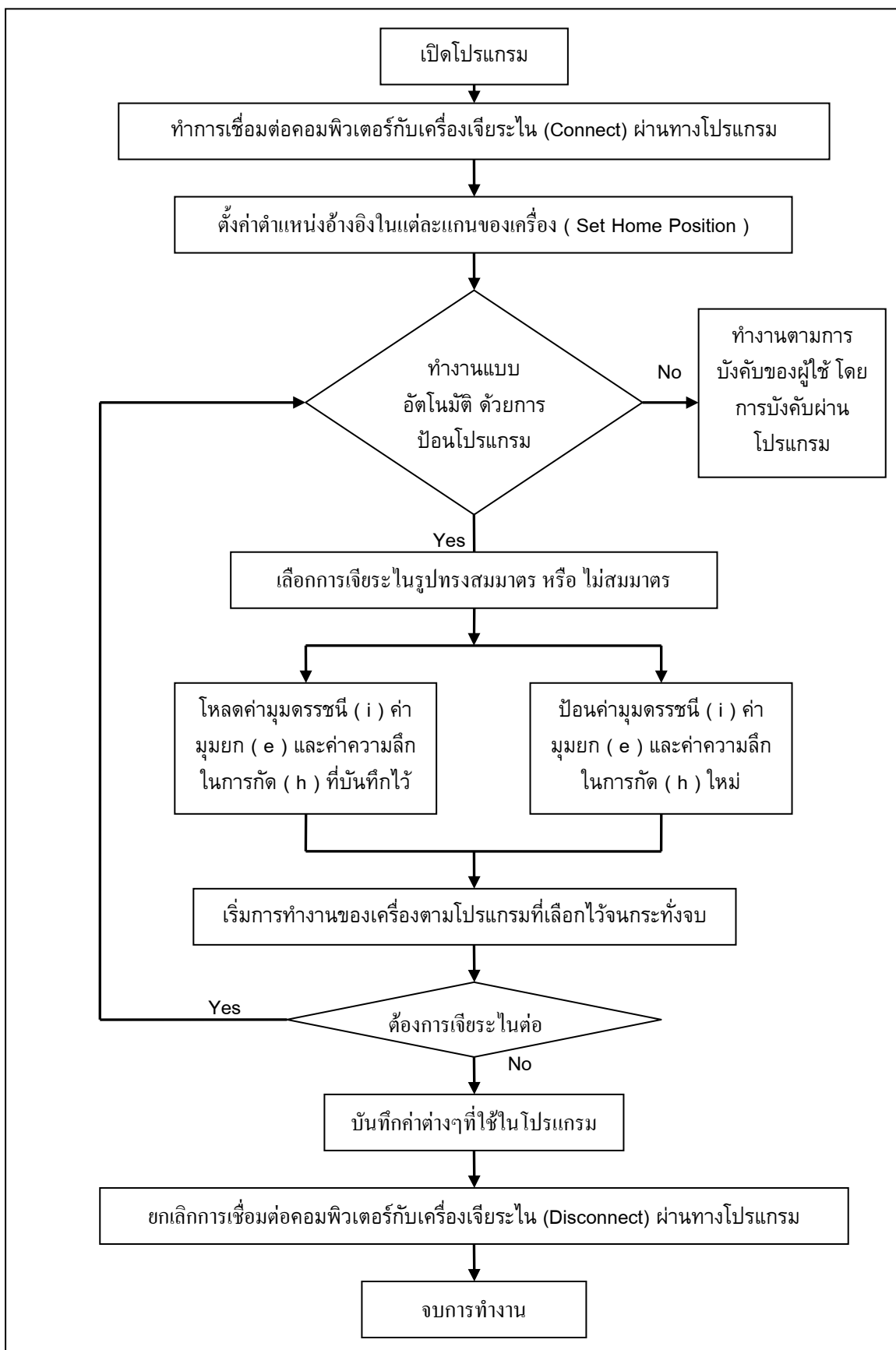
- มีการทำงานในลักษณะของการโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object Oriented Programming) ทำให้สะดวกในการเขียนโปรแกรม สามารถแก้ไข และพัฒนาต่อได้ง่าย
- ใช้พัฒนาโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการ Windows ซึ่งเป็นระบบปฏิบัติการที่แพร่หลายและใช้งานได้ง่าย
- สามารถสร้างไฟล์โปรแกรมได้เป็นไฟล์เดียวโดยที่ไม่ต้องมีไฟล์อื่นประกอบ ทำให้ง่ายในการติดตั้งเพื่อใช้งาน

สำหรับรูปแบบในการพัฒนาโปรแกรมด้วย Microsoft Visual Studio 2005 จะมีอยู่ 2 รูปแบบคือ

1. เขียนในรูปแบบของ Console Application การเขียนโปรแกรมในรูปแบบนี้ โปรแกรมที่ได้ออกมาจะทำงานบนระบบ DOS
2. เขียนในรูปแบบของ Dialog Base การเขียนโปรแกรมในรูปแบบนี้จะเป็นการสร้างโปรแกรมบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows)

จากแนวคิดและองค์ประกอบในการสร้างโปรแกรมในบทที่ 5 จะพบว่า ในการใช้โปรแกรมจะต้องมีการป้อนค่าต่างๆให้กับโปรแกรมหลายค่า อีกทั้งยังต้องมีหน้าจอแสดงผล รวมถึงหน้าจอที่สามารถควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติได้ ดังนั้นในการเขียนโปรแกรมจึงจะเขียนในรูปแบบของ Dialog Base เพื่อแสดงผลบนวินโดวส์ เนื่องจากสามารถใช้งานได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นมากกว่า โดยจากแนวคิดทั้งหมดที่กล่าวมานำมาเขียนแผนภาพลักษณะการทำงานของโปรแกรมเพื่อนำไปสร้างโปรแกรมใช้งานจริงต่อไป ได้ดังรูปที่ 6.1 โดยโปรแกรมที่สร้างขึ้นมีส่วนประกอบการทำงานดังนี้

1. ส่วนควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ เป็นส่วนของตัวควบคุม ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ
2. ส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้ (User Interface) เป็นส่วนที่ผู้ใช้ติดต่อกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นเป็นหน้าต่างโปรแกรม เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

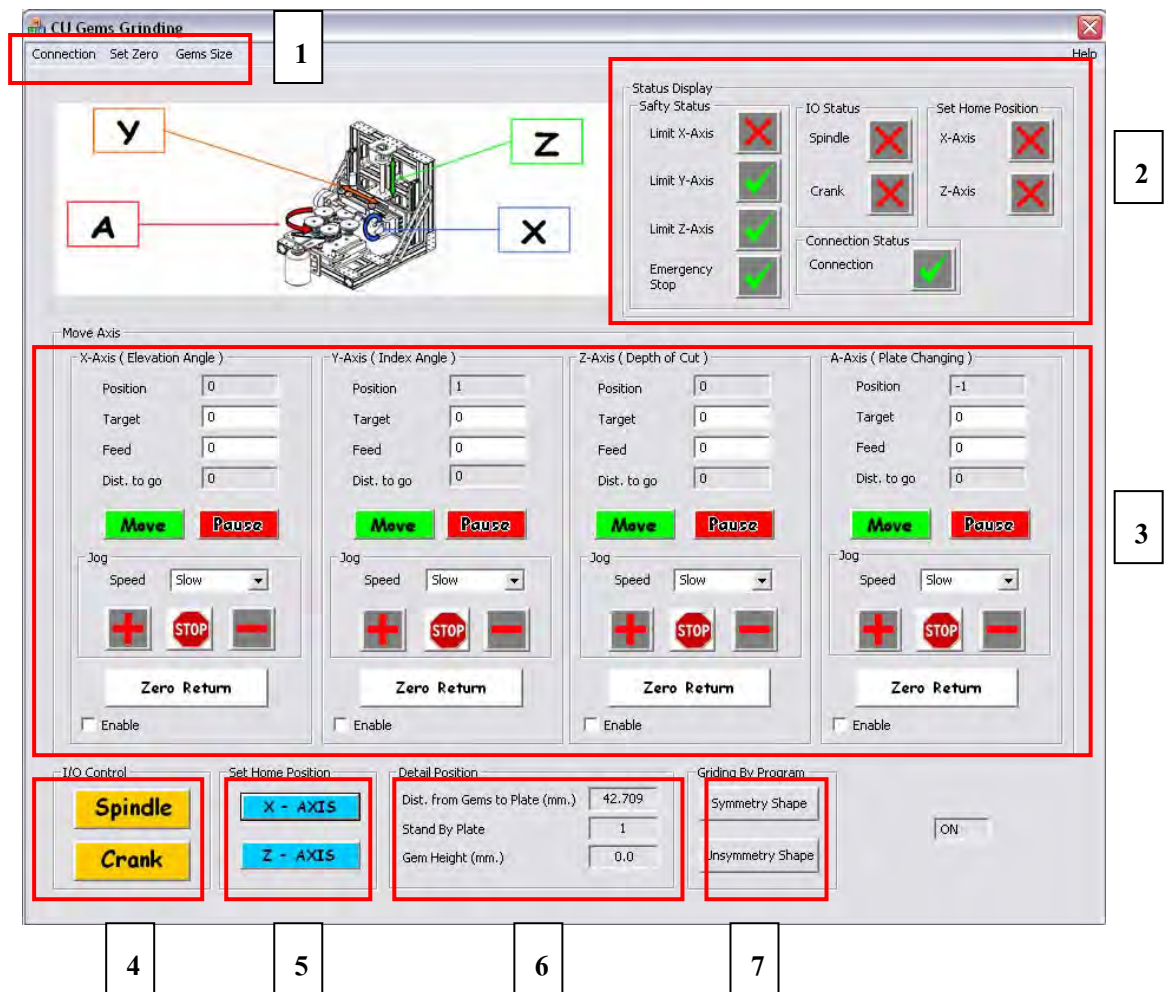


รูปที่ 6.1 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม เพื่อนำไปออกแบบและสร้างโปรแกรม

จากแผนภาพลักษณะการทำงานในรูปที่ 6.1 ได้ถูกนำมาพัฒนาสร้างเป็นโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียรระโนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ โดยจะได้กล่าวถึงดังต่อไปนี้

### 6.1 ลักษณะโดยทั่วไปของโปรแกรม

โปรแกรมที่สร้างขึ้นใช้ชื่อว่า CU Gems Grinding เป็นลักษณะโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) โดยที่ลักษณะของโปรแกรม แสดงได้ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 หน้าต่างของโปรแกรมและส่วนประกอบของโปรแกรม

จะเห็นว่าหน้าต่างหลักของโปรแกรมจะแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ 7 ส่วนคือ

- ส่วนที่ 1** แถบเมนูบาร์ (Menu Bar) ซึ่งใช้เรียกฟังก์ชันการเชื่อมต่อเครื่องเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติ ใช้ล้างค่าตำแหน่งของแต่ละแกน และใช้กำหนดขนาดของเม็ดพลอยที่จะทำการเจียรระโน
- ส่วนที่ 2** ส่วนแสดงผลสถานะ (Status Monitor) ให้แสดงสถานการณ์ทำงานต่างๆของโปรแกรม
- ส่วนที่ 3** ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียรระโนพลอยแต่ละแกน



ส่วนที่ 4 ส่วนที่ควบคุมการเปิด และปิด งานเจียรระโนพลอย และชุดสายงานเจียรระโน

ส่วนที่ 5 ส่วนที่ใช้สั่งการเพื่อตั้งตำแหน่งอ้างอิงของเครื่องเจียรระโนพลอย

ส่วนที่ 6 ส่วนที่ใช้แสดงผล ระยะห่างของพลอยกับงานเจียรระโน ตำแหน่งของงานเจียรระโน และขนาดของเม็ดพลอยที่นำมาเจียรระโน

ส่วนที่ 7 ส่วนที่ใช้สำหรับเรียกหน้าต่างควบคุมการเจียรระโนแบบอัตโนมัติ โดยเลือกได้ทั้งแบบรูปร่างสมมาตร และไม่สมมาตร

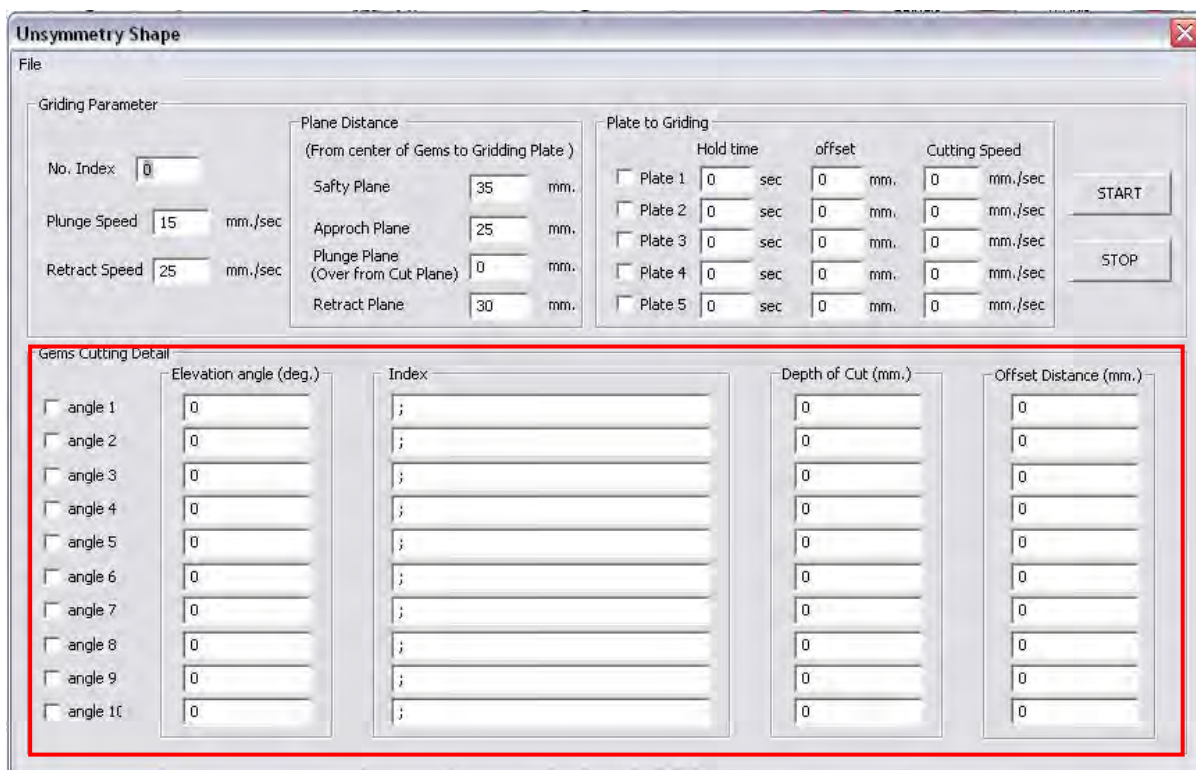
สำหรับในส่วนสั่งการเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติ หน้าต่างควบคุมจะมีลักษณะดังรูปที่ 6.3 สำหรับการเจียรระโนรูปร่างสมมาตร และดังรูปที่ 6.4 สำหรับการเจียรระโนรูปร่างไม่สมมาตร

Gridding Parameter		Plane Distance (From center of Gems to Gridding Plate )		Plate to Gridding			
No. Index	Plunge Speed	Safety Plane	Approch Plane		Hold time	offset	Cutting Speed
0	15 mm./sec	35 mm.	25 mm.	<input type="checkbox"/> Plate 1	0 sec	0 mm.	0 mm./sec
	Retract Speed 25 mm./sec	Plunge Plane (Over from Cut Plane) 0 mm.	Retract Plane 30 mm.	<input type="checkbox"/> Plate 2	0 sec	0 mm.	0 mm./sec
				<input type="checkbox"/> Plate 3	0 sec	0 mm.	0 mm./sec
				<input type="checkbox"/> Plate 4	0 sec	0 mm.	0 mm./sec
				<input type="checkbox"/> Plate 5	0 sec	0 mm.	0 mm./sec

Gems Cutting Detail					
	Elevation angle (deg.)	Start Index	No. of facet	Depth of Cut (mm.)	Offset Distance (mm.)
<input type="checkbox"/> angle 1	0	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> angle 2	0	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> angle 3	0	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> angle 4	0	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> angle 5	0	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> angle 6	0	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> angle 7	0	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> angle 8	0	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> angle 9	0	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> angle 10	0	0	0	0	0

รูปที่ 6.3 หน้าต่างควบคุมการเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติที่รูปร่างสมมาตร



รูปที่ 6.4 หน้าต่างควบคุมการเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติ ที่รูปร่างไม่สมมาตร

จะเห็นว่าหน้าต่างควบคุมการทำงานทั้ง 2 แบบจะมีความคล้ายคลึงกัน แต่จะแตกต่างกันในส่วนของการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการกำหนดมุมดัชนีของพลอยเท่านั้น ซึ่งอยู่ในส่วนที่กรอบสี่เหลี่ยมวงไว้

สาเหตุที่การป้อนค่าของมุมดัชนีต่างกันเนื่องจาก พลอยที่มีรูปร่างสมมาตร ค่าของมุมดัชนีในแต่ละมุมยกจะห่างกันแบบเท่าๆกันเสมอ เช่น กำหนดการเจียรระโนโดยใช้จำนวนมุมดัชนีเป็น 96 เจียรระโนที่มุมดัชนี 6 – 18 – 30 – 42 – 54 – 66 – 78 – 90 จะเห็นว่ามุมดัชนีแต่ละมุมจะต่างกัน 12 มุมดัชนีเสมอ ดังนั้นสำหรับการป้อนมุมดัชนีของพลอยที่มีรูปร่างสมมาตร จึงป้อนเพียงแค่ จำนวนมุมดัชนี มุมดัชนีที่เริ่มเจียรระโน และ จำนวนหน้าพลอยในมุมยก เช่น จากตัวอย่างข้างต้น จะป้อนจำนวนมุมดัชนีเป็น 96 มุมดัชนีที่เริ่มเจียรระโนคือ 6 และจำนวนหน้าพลอยในมุมยกคือ 8 หน้า เป็นต้น

แต่สำหรับพลอยที่มีรูปร่างไม่สมมาตร คือ ค่าของมุมดัชนีในแต่ละมุมยก จะห่างกันแบบไม่เท่ากัน เช่น กำหนดการเจียรระโนโดยใช้จำนวนมุมดัชนีเป็น 96 เจียรระโนที่มุมดัชนี 4 – 28 – 36 – 60 – 68 – 92 จะเห็นว่ามุมดัชนีแต่ละมุมห่างกันแบบไม่เท่ากัน การป้อนมุมดัชนี จึงต้องป้อนเป็นตำแหน่งของมุมดัชนีทุกมุมลงในโปรแกรมซึ่งสะดวกมากกว่า

## 6.2 ฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรม

สำหรับฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรมจะเน้นไปที่การควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ และจะมีฟังก์ชันในการกำหนดค่าอื่นๆ โดยสามารถแบ่งได้ดังนี้

### 6.2.1 ฟังก์ชันควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

ฟังก์ชันควบคุมการเคลื่อนที่ประกอบด้วย

1. ฟังก์ชันสำหรับตั้งตำแหน่งอ้างอิงของเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติ ในแกน X และแกน Z
2. ฟังก์ชันสำหรับการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการในแต่ละแกน
3. ฟังก์ชันสำหรับควบคุมการ ปิด-เปิด งานเจียระไน และ ชุดสายงานเจียระไน
4. ฟังก์ชันสำหรับเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ พลอยรูปร่างสมมาตร
5. ฟังก์ชันสำหรับเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ พลอยรูปร่างไม่สมมาตร

### 6.2.2 ฟังก์ชันกำหนดค่าอื่น ๆ ของโปรแกรม

ฟังก์ชันสำหรับกำหนดค่าอื่นๆของโปรแกรมประกอบด้วย

1. ฟังก์ชันสำหรับเชื่อมต่อ และยกเลิกการเชื่อมต่อเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติกับคอมพิวเตอร์
2. ฟังก์ชันสำหรับล้างค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนให้เป็นศูนย์
3. ฟังก์ชันสำหรับกำหนดขนาดเริ่มต้นของเม็ดพลอยก่อนการเจียระไน
4. ฟังก์ชันสำหรับบันทึกข้อมูล รายละเอียดของรูปร่างพลอยที่จะเจียระไนโดยจะอยู่ในส่วนหน้าต่างควบคุมการเจียระไนพลอยอัตโนมัติรูปร่างสมมาตร และ ไม่สมมาตร

จากที่กล่าวข้างต้นเป็นฟังก์ชันการทำงานเบื้องต้นที่อยู่ในโปรแกรม CU Gems Grinding สำหรับวิธีการใช้งานโปรแกรมอย่างละเอียด ได้กล่าวไว้ในส่วนของภาคผนวก ง.

## บทที่ 7

### ขั้นตอนการเจียรระไนพลอยด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

ขั้นตอนการเจียรระไนที่จะกล่าวถึงนี้ใช้ได้กับพลอยได้ทุกชนิด และทุกลักษณะรูปร่าง ไม่ว่าจะเจียรระไนเป็นรูปร่างลักษณะใดก็ทำได้ทั้งสิ้น เนื่องจากรูปร่างของพลอยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ลงไปโปรแกรมควบคุมการทำงาน ให้เครื่องเจียรระไนพลอยทำงานแบบอัตโนมัติ ซึ่งขั้นตอนต่างๆสามารถอธิบายได้ดังนี้

#### 7.1 การเตรียมพลอยก่อนการเจียรระไน

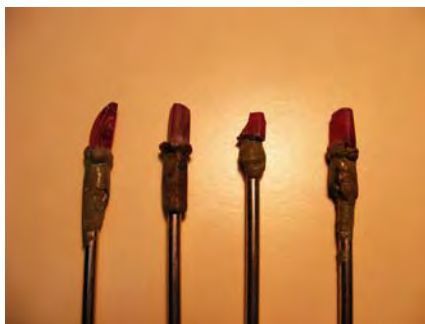
พลอยดิบที่จะนำมาเจียรระไน จะมีลักษณะเป็นก้อนใหญ่ๆ ต้องนำมาตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆ ก่อนที่จะนำมาเจียรระไน ซึ่งพลอยที่ถูกตัดออกมาจะมีลักษณะเป็นชิ้นๆขนาดเล็กบ้าง ใหญ่บ้างไม่เท่ากันดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 พลอยดิบที่ถูกตัดออกเป็นชิ้น

หลังจากนั้นต้องคัดขนาดของเศษพลอยที่ตัดได้ โดยแยกกลุ่มขนาดไว้ให้ใกล้เคียงกัน เพื่อความสะดวกในการขึ้นรูป (Pre – Shaping) และการเจียรระไน โดยวิธีการขึ้นรูปสามารถอธิบายได้ดังนี้

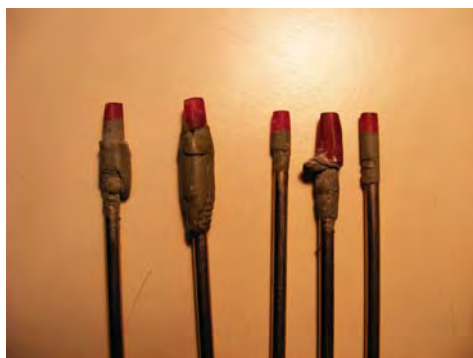
**การแต่งพลอยเบื้องต้น** เมื่อทำการคัดขนาดพลอยแล้ว จะนำพลอยมาติดเข้ากับไม้ซุน โดยใช้เชลแล็คเป็นตัวยึดพลอยกับไม้ซุน ดังรูปที่ 7.2 จากนั้นนำพลอยที่ติดเสร็จแล้ว ไปเกลารูปร่างด้วยเครื่องเกลามือ ดังรูปที่ 7.3 ให้ออกมาเป็นลักษณะของรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 7.4 โดยขนาดที่ต้องการคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร และสูงประมาณ 3 มิลลิเมตร



รูปที่ 7.2 การยัดพลอยเข้ากับไม้ซุง



รูปที่ 7.3 การเกลารูปพลอยด้วยเครื่องเกลามือ



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 7.4 พลอยที่ผ่านการเกลารูปแล้ว (ก.) ยังติดอยู่กับไม้ซุง (ข.) ถอดออกจากไม้ซุงแล้ว

การขึ้นรูปพลอยก่อนนำไปเจียรระไนด้วยเครื่องเจียรระไนแบบอัตโนมัติ พลอยที่ผ่านการแต่งในขั้นแรกมาแล้ว จะถูกนำมาติดเข้ากับปลายด้ามติดพลอย โดยใช้กาวยูวี (UV Glue) ในการติด ดังรูปที่ 7.5 ซึ่งกาวยูวีจะแข็งตัวเมื่อถูกแสงยูวีเท่านั้น หลังจากติดกาวแล้วจะนำด้ามติดพลอยที่ติดพลอยเข้าไปอบในตู้อบยูวี ดังรูปที่ 7.6 เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงเพื่อให้กาวแห้งสนิท จึงนำออกจากตู้อบเพื่อนำไปขึ้นเกลารูปให้ได้องศาใกล้เคียงกับเหลี่ยมที่จะเจียรระไนด้วยเครื่องเจียรระไนด้วยมือ ดังรูปที่ 7.7 โดยให้มีขนาดใหญ่กว่าที่ต้องการเล็กน้อย โดยในขั้นตอนนี้ต้องทำ

อย่างระมัดระวัง เพราะหากขึ้นรูปแล้วขนาดเล็กเกินไป หรือไม่สม่ำเสมอ อาจจะทำให้พอลอยเม็ดยุติใช้เจียรไนไม่ได้เลย พอลอยที่ได้ออกมาจะมีลักษณะดังรูปที่ 7.8 ซึ่งหลังจากที่ทำการขึ้นรูปแล้วจะนำไปเข้าสู่กระบวนการเจียรไนต่อไป



รูปที่ 7.5 การติดพอลอยที่เข้ากับด้ามติดพอลอย



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 7.6 การอบพอลอยที่ติดกาวในตู้อบยูวี (ก.)ชุดพอลอยที่อบในตู้ (ข.)หลอดยูวีที่ใช้อบพอลอย



รูปที่ 7.7 การขึ้นรูปพอลอยให้ได้องศาด้วยเครื่องเจียรไนแบบใช้มือ



รูปที่ 7.8 ฟลอยที่ผ่านการขึ้นรูปให้ได้องศาด้วยเครื่องเจียรไนแบบใช้มือ

## 7.2 การเจียรไนด้วยเครื่องเจียรไนฟลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

หลังจากขึ้นรูปฟลอยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนของการเจียรไน ด้วยเครื่องเจียรไนฟลอยแบบอัตโนมัติ

การนำด้ามติดฟลอยใส่เข้ากับชุดหัวจับด้ามฟลอย ชุดหัวจับด้ามฟลอยสามารถใส่ได้ทั้งสิ้น 14 เม็ด ต่อการเจียรไนหนึ่งครั้ง โดยการใส่ด้ามติดฟลอยเข้ากับชุดหัวจับ จะต้องใส่ให้ตำแหน่งอ้างอิงของด้ามติดฟลอยทุกด้ามตรงกันหมด ดังรูปที่ 7.9 เพื่อที่เวลากลับด้านแล้วเจียรไน เหลี่ยมจะได้ตรงกัน



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 7.9 การใส่ด้ามติดฟลอยเข้ากับชุดหัวจับฟลอย (ก.) ด้านหน้า (ข.) ด้านหลัง

การเจียรไนด้วยเครื่องเจียรไนแบบอัตโนมัติ เริ่มต้นจากใส่ค่าพารามิเตอร์เพื่อกำหนดขนาดและรูปร่างของฟลอยลงในโปรแกรมแล้วสั่งให้โปรแกรมทำงาน เครื่องเจียรไนจะเริ่มทำการเจียรไนไปที่ละเหลี่ยมจนเสร็จ โดยการเจียรไนจะเริ่มจากงานเจียรไนหยาบขึ้นรูปก่อน จากนั้นจึงเจียรไนด้วยจานละเอียด แล้วเจียรไนด้วยจานขัดเงา ดังแสดงในรูปที่ 7.10 สำหรับการเจียรไนในขั้นตอนนี้ จะทำการเจียรไนในด้านบนของฟลอย (Crown Side) ก่อน เมื่อ

เจียระไนเสร็จแล้วจึงถอดด้ามติดพลอยออกจากชุดหัวจับ เพื่อนำไปกลับด้านเจียระไนด้านล่างของพลอย (Pavilion Side) ต่อไป



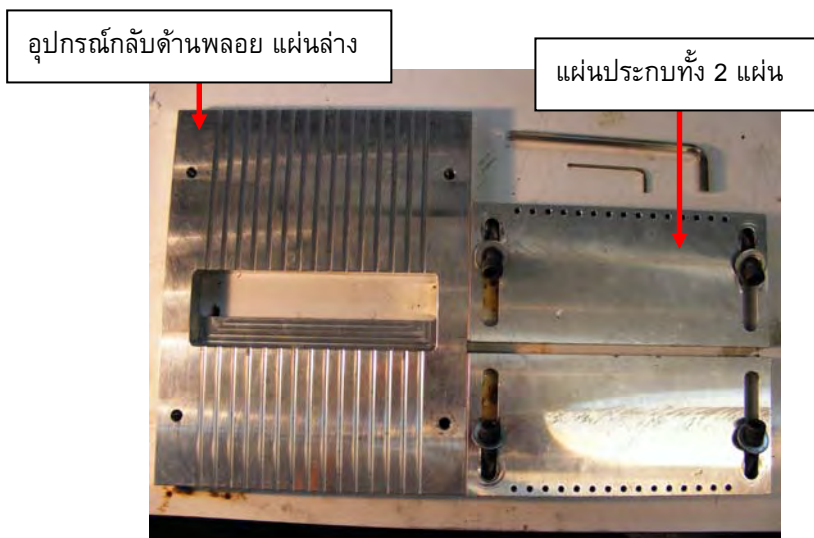
รูปที่ 7.10 การเจียระไนด้วยเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

### 7.3 การกลับด้านพลอย

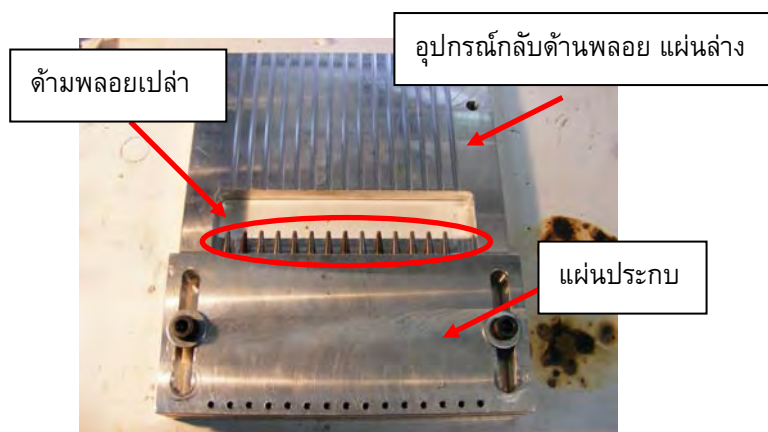
ถึงขั้นตอนนี้จะได้พลอยที่ด้านบนของพลอย (Crown Side) ถูกเจียระไนเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก่อนที่จะเจียระไนอีกด้านที่เหลือต้องทำการกลับด้านพลอยก่อน โดยนำด้ามติดพลอยออกจากชุดหัวจับด้ามพลอยก่อน จากนั้นจึงนำไปกลับด้านพลอยด้วยอุปกรณ์กลับด้านพลอย ดังรูปที่ 7.11

**การใช้อุปกรณ์กลับด้านพลอย** นำด้ามติดพลอยที่ยังไม่ได้ใช้งานมาวางลงในร่องของอุปกรณ์กลับด้านพลอยแผ่นล่างฝั่งหนึ่ง แล้วนำแผ่นประกบมาปิดทับลงไป จากนั้นยึดสลักเกลียวตัวหนอนล็อกตำแหน่งอ้างอิงเอาไว้ ดังแสดงในรูปที่ 7.12 นำชุดด้ามติดพลอยที่นำออกมาจากเครื่องเจียระไนพลอย และมีพลอยที่ผ่านการเจียระไนด้านบนพลอยแล้ว มาหยอดกาวยูวีลงบนพลอยด้านที่เจียระไนแล้ว นำไปติดเข้ากับด้ามพลอยเปล่าที่ยึดไว้กับชุดกลับด้านพลอย จากนั้นนำแผ่นประกบมาปิดทับลง ยึดสลักเกลียวตัวหนอนเพื่อล็อกตำแหน่งอ้างอิงของด้ามติดพลอยทั้ง 2 ฝั่งให้ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 7.13 จากนั้นนำไปเข้าตู้อบยูวี เพื่อให้กาวแข็งตัวเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

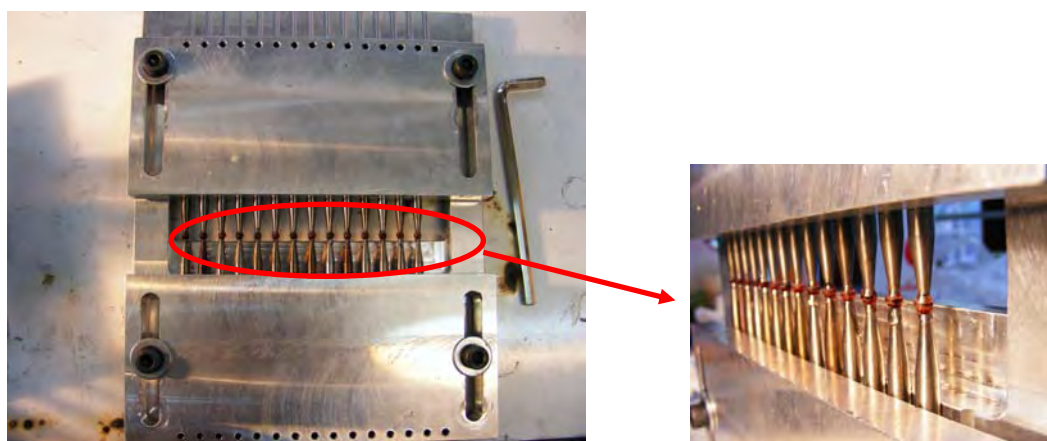




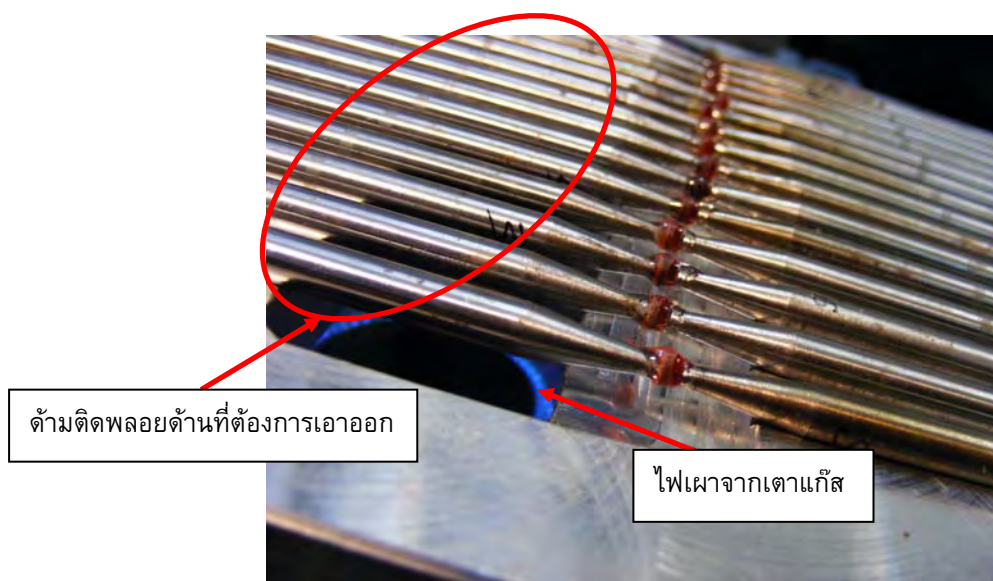
รูปที่ 7.11 ชุดอุปกรณ์สำหรับกลับด้านพลอย



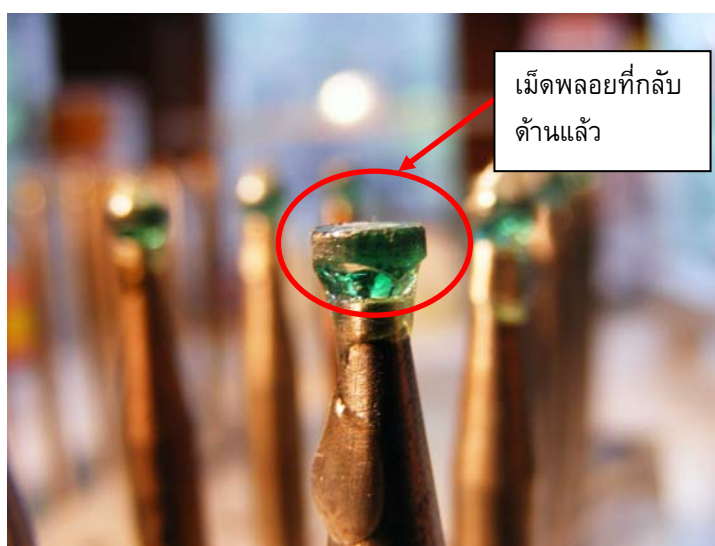
รูปที่ 7.12 การยึดด้ามพลอยเปล่า กับอุปกรณ์กลับด้านพลอย



การถอดพลอยออกจากอุปกรณ์กลับด้านพลอย เมื่ออบจนขาวแห้งดีแล้ว นำชุดกลับด้านพลอยออกจากตู้อบ ถอดแผ่นประกบทั้ง 2 ด้านออก แล้วนำเอาแผ่นล่างที่วางด้ามติดพลอย อยู่เผาไฟเล็กน้อย โดยให้ไฟโดนในส่วนของด้ามติดพลอยด้านที่ต้องการจะเอาออกเพื่อให้การยู่วีเสื่อมสภาพ และสามารถถอดด้ามออกได้ง่าย ดังรูปที่ 7.14 เมื่อทำการถอดเอาด้ามติดพลอยด้านแรกออกจะได้พลอยติดอยู่กับด้ามติดพลอย โดยจะเหลือพลอยด้านที่ยังไม่ได้ทำการเจียรระไนดังรูปที่ 7.15 โดยจะนำไปทำการเจียรระไนต่อไป



รูปที่ 7.14 การเผาไฟเพื่อถอดด้ามติดพลอยด้านแรกออก



รูปที่ 7.15 พลอยที่ถูกกลับด้านแล้ว

#### 7.4 การเจียรระโนในด้านล้างของพลอย (Pavilion Side)

เมื่อกลับด้านพลอยเสร็จแล้ว จะทำการเจียรระโนพลอยในด้านล้างของพลอย ที่ยังไม่ได้เจียรระโน ซึ่งขั้นตอนการทำจะเหมือนกับการเจียรระโนด้านบนของพลอยทุกประการ เมื่อเสร็จสิ้นแล้ว จะได้พลอยที่ผ่านการเจียรระโนออกมาดังรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.16 พลอยที่ผ่านการเจียรระโนทั้งสองด้านแล้ว

#### 7.5 การถอดพลอยและการทำความสะอาดพลอย

เมื่อเจียรระโนด้านล่างของพลอยเสร็จแล้ว ถือว่าการเจียรระโนเสร็จสิ้นแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการถอดพลอยออกจากด้ามติดพลอยและนำไปทำความสะอาดต่อไป

**การถอดพลอยออกจากด้าม** ทำได้โดยการนำด้ามติดพลอยด้านที่มีพลอยที่เจียรระโนเสร็จแล้วติดอยู่ จุ่มลงในบีกเกอร์ที่ใส่น้ำแล้วทำการต้ม ความร้อนจะทำให้กาวยูวีเสื่อมสภาพ ดังรูปที่ 7.17 แต่ห้ามให้ความร้อนโดยใช้ไฟเผาโดยตรงที่พลอย เพราะจะทำให้พลอยเสียคุณภาพ จะสามารถแกะเอาเม็ดพลอยออกมาจากด้ามได้โดยง่าย



รูปที่ 7.17 การต้มด้ามติดพลอยเพื่อแกะพลอยออกจากด้าม

การทำความสะอาดเม็ดพลอย เม็ดพลอยที่แกะออกมา อาจจะมีคราบขาวและคราบ  
น้ำยาขัดเลอะติดอยู่ คราบเหล่านี้สามารถขจัดออกได้โดยนำเอาเม็ดพลอยไปต้มในน้ำเปล่าผสม  
น้ำยาล้างจาน เพื่อให้ขาวใสสะอาดและหลุดร่อนออก และเป็นการล้างคราบมันที่พลอยออกด้วย  
จากนั้นนำพลอยมาเช็ดให้สะอาด ก็จะได้เม็ดพลอยที่ผ่านการเจียรไนอย่างสมบูรณ์ ดังรูปที่ 7.18



รูปที่ 7.18 พลอยที่ผ่านการเจียรไนและทำความสะอาดแล้ว

## บทที่ 8

### การทดลอง และ ผลการทดลอง

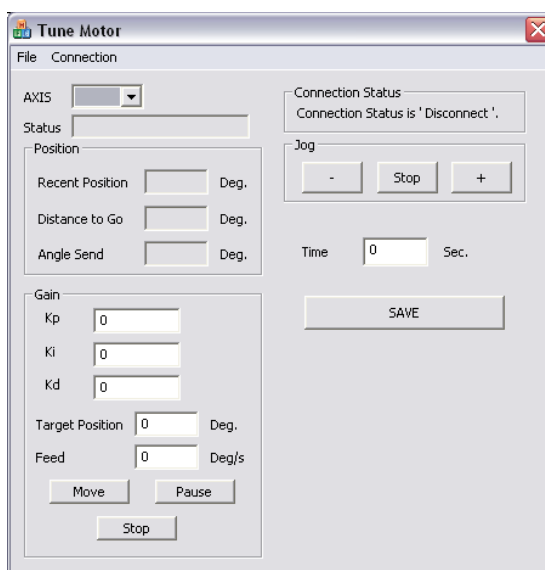
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงเนื้อหาในส่วนของการทดลองใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ ว่าทำงานได้มีประสิทธิภาพเพียงใด โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ในส่วนแรกเป็นการทดลองหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมสำหรับควบคุมมอเตอร์ในแต่ละแกน และส่วนที่สองเป็นการทดลองใช้งานโปรแกรมไปควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติเพื่อเจียระไนพลอยรูปร่างต่างๆกัน ว่าผลที่ได้ออกมาเป็นเช่นไร

#### 8.1 การทดลองหาค่าอัตราขยาย เพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์แต่ละแกน

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ว่าในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละแกนใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี (PID-Controller) ซึ่งตัวควบคุมประเภทนี้จะต้องกำหนดค่าอัตราขยายที่เหมาะสมให้กับตัวควบคุม เพื่อความสามารถในการควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนได้แม่นยำและเคลื่อนที่ได้อย่างราบเรียบ ซึ่งหากกำหนดอัตราขยายไม่เหมาะสม อาจจะทำให้การเคลื่อนที่ เกิดภาวะไร้เสถียรภาพได้ (Unstable) ซึ่งอาจทำให้เครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติเกิดความเสียหาย

สำหรับการหาค่าอัตราขยาย ในตัวควบคุมจะมีค่าอัตราขยายอยู่ 3 ตัว คือ  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  โดยในการหาค่าอัตราขยายจะทำโดยใช้โปรแกรม Tune Motor ที่สร้างขึ้นมามีรูปที่ 8.1 (การใช้งานโปรแกรม Tune Motor จะกล่าวไว้ในภาคผนวก ค.) ซึ่งจะทำให้การทดลองที่ละแกน โดยทำการสุ่มค่าอัตราขยายลงไป จากนั้นสั่งให้เคลื่อนที่โดยกำหนดตำแหน่งปลายทาง (Target) และความเร็วในการเคลื่อนที่ (Feed) แล้วจึงเก็บค่าสัญญาณขาเข้า และขาออกมาสร้างเป็นกราฟเปรียบเทียบและพิจารณาจากค่าความผิดพลาด ว่ามากน้อยเพียงใด ลักษณะการตอบสนองเป็นเช่นไร

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการหาค่าอัตราขยายของตัวควบคุมในแกน X, Z และ A เท่านั้น ในส่วนของแกน Y ที่เป็นชุดอุปกรณ์จับด้ามพลอยจะอยู่ในวิทยานิพนธ์เรื่องการออกแบบอุปกรณ์จับด้ามพลอยแบบหลายด้าม



รูปที่ 8.1 โปรแกรม Tune Motor ที่ใช้ในการทดลอง

ขั้นตอนในการทำการทดลอง

1. จัดตำแหน่งของแกนให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นที่จะทำการทดลอง
2. ทดลองหาค่าอัตราขยาย Kp, Ki และ Kd ลงในโปรแกรม
3. กำหนดตำแหน่งปลาย และ ความเร็วในการเคลื่อนที่ ลงในโปรแกรม
4. กำหนดระยะเวลาในการเก็บค่า
5. สั่งให้เริ่มเคลื่อนที่
6. ทำการบันทึกผลการเคลื่อนที่ที่ได้
7. นำผลการเคลื่อนที่ไปพลอตกราฟระหว่างตำแหน่งและเวลา เปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณขาเข้าและสัญญาณขาออก นำไปสร้างกราฟคุณลักษณะของสัญญาณผิดพลาด (Error) เปรียบเทียบกับเวลา
8. ถ้าผลไม่เป็นที่น่าพอใจให้ทดลองปรับค่าอัตราขยายใหม่

### 8.1.1 การหาอัตราขยายของตัวควบคุมในแกน X

การเคลื่อนที่ในแกนนี้ เป็นการกำหนดตัวแปรมุมยกของพลอย (elevation angle) สำหรับในการทดลองหาอัตราขยายในแกนนี้ จะกำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่มุมยกเป็น 0 องศา หรือตำแหน่งอ้างอิงของแกน X นั่นเอง เป็นจุดเริ่มต้น แล้วเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่มุมยกเป็น 90 องศา เพราะเป็นขอบเขตการเคลื่อนที่ของแกนนี้ขณะที่ทำการเจียรไน โดยในการเคลื่อนที่ที่จะสั่งค่าตำแหน่ง และอ่านตำแหน่งเป็นหน่วยพัลส์ ที่อ่านได้จากเอนโคเดอร์ โดยที่ไม่ได้แปลงเป็นหน่วยองศา เพื่อความละเอียดในการอ่านตำแหน่ง โดยที่ตำแหน่งมุมยกเป็นศูนย์ อ่านค่าได้ 0

พัลส์ และตำแหน่งที่มูมยักเป็น 90 องศา อ่านค่าได้ -2500 พัลส์ และกำหนดให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 500 พัลส์/วินาที และทำการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 6 วินาที

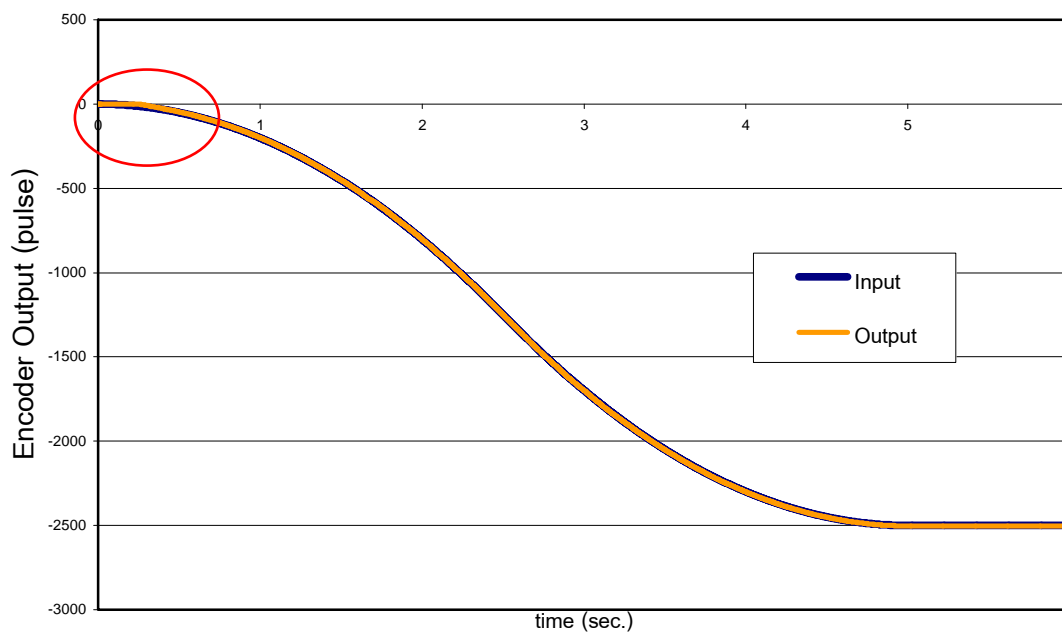
### ผลการทดลอง

เริ่มต้นกำหนดอัตราขยายของตัวควบคุมดังนี้  $K_p = 0.02$  ,  $K_i = 0.1$  และ  $K_d = 0.0001$  จะได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่ 8.2 และได้สัญญาณแสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 8.3 ซึ่งจากสัญญาณดังกล่าวจะเห็นว่า ดังรูปที่ 8.2 ในส่วนที่วงไว้ พบว่ามีการส่งสัญญาณอ้างอิงไปเป็นระยะเวลาหนึ่งก่อน มอเตอร์ในแกน X จึงเริ่มมีการเคลื่อนที่ ซึ่งอ่านจากข้อมูลจะพบว่ามีค่าส่งสัญญาณเป็นเวลา 0.274 วินาที มอเตอร์ในแกน X จึงเริ่มมีการเคลื่อนที่ โดยเป็นผลมาจากความเสียดทาน และน้ำหนักของอุปกรณ์ในระบบ แต่เมื่อเริ่มเคลื่อนที่แล้ว การเคลื่อนที่จะเป็นไปอย่างรวดเร็วตามแนวสัญญาณอ้างอิง เป็นลักษณะ S-Curve ตลอดการเคลื่อนที่จนถึงจุดปลาย ซึ่งจากรูปที่ 8.3 พบว่าที่ตำแหน่งจุดปลาย ค่าสัญญาณผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์ นั่นคือการเคลื่อนที่ในแนวแกน X เคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำไปยังตำแหน่งปลายที่ต้องการ ในขณะที่ค่าสัญญาณผิดพลาดที่มีการสั่นไปมา อาจเกิดจากแรงเสียดทานในระบบ

ต่อมาได้ทดลองเปลี่ยนค่าอัตราขยายเป็น  $K_p = 0.03$  ,  $K_i = 0.1$  และ  $K_d = 0.0001$  โดยเพิ่มอัตราขยาย  $K_p$  เล็กน้อย เนื่องจากต้องการให้ระบบตอบสนองเร็วขึ้นในช่วงต้น ได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่ 8.4 และได้สัญญาณแสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 8.5 จะพบว่าการตอบสนองจะเร็วขึ้น โดยจะเริ่มเคลื่อนที่เมื่อสัญญาณอ้างอิงถูกส่งไปแล้วเป็นเวลา 0.217 วินาที แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของค่าสัญญาณผิดพลาดดังรูปที่ 8.5 จะเห็นว่ามีส่วนที่สัญญาณผิดพลาดกระโดดขึ้น-ลง ในส่วนที่วงกลมไว้ ซึ่งเกิดจากค่าอัตราขยายที่สูงเกินไป ทำให้เกิดการสั่น เมื่อเคลื่อนที่ไปถึงบริเวณดังกล่าว และที่จุดปลายค่าสัญญาณผิดพลาดมีค่าเป็น 2 พัลส์ อีกด้วย นั่นคือ แกน X ไม่ได้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งปลายที่ต้องการ

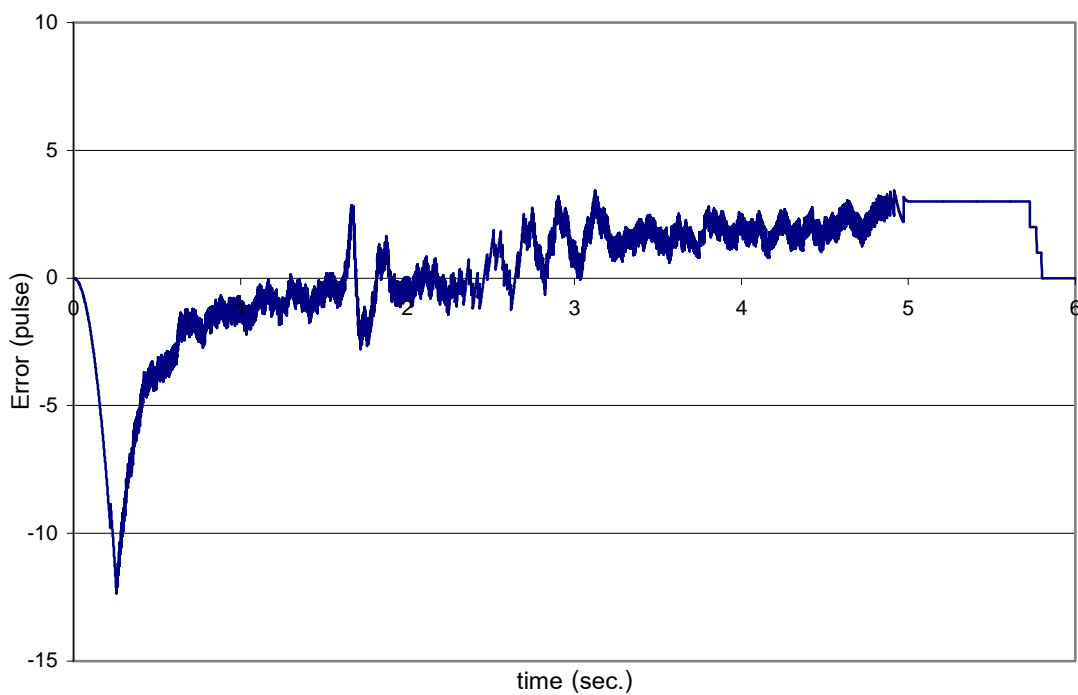
### สรุปผลการทดลอง

ดังนั้นสำหรับ อัตราขยายในแกน X เลือกราคา  $K_p = 0.02$  ,  $K_i = 0.1$  และ  $K_d = 0.0001$  ในการควบคุมการเคลื่อนที่



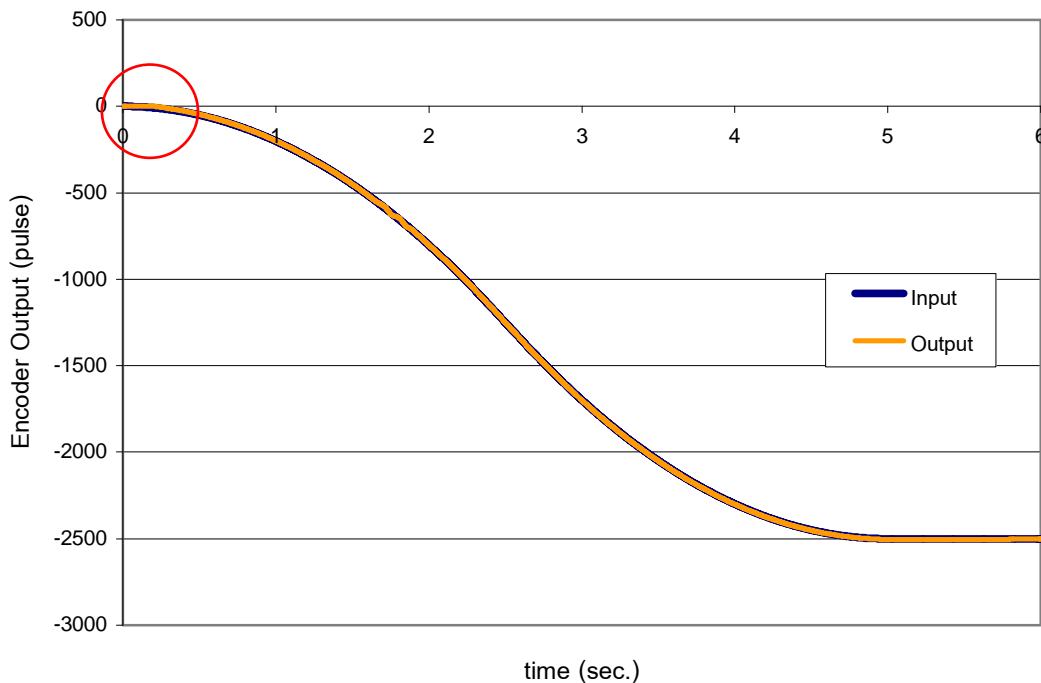
รูปที่ 8.2 เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน X เมื่อ

$$K_p = 0.02, K_i = 0.1 \text{ และ } K_d = 0.0001$$

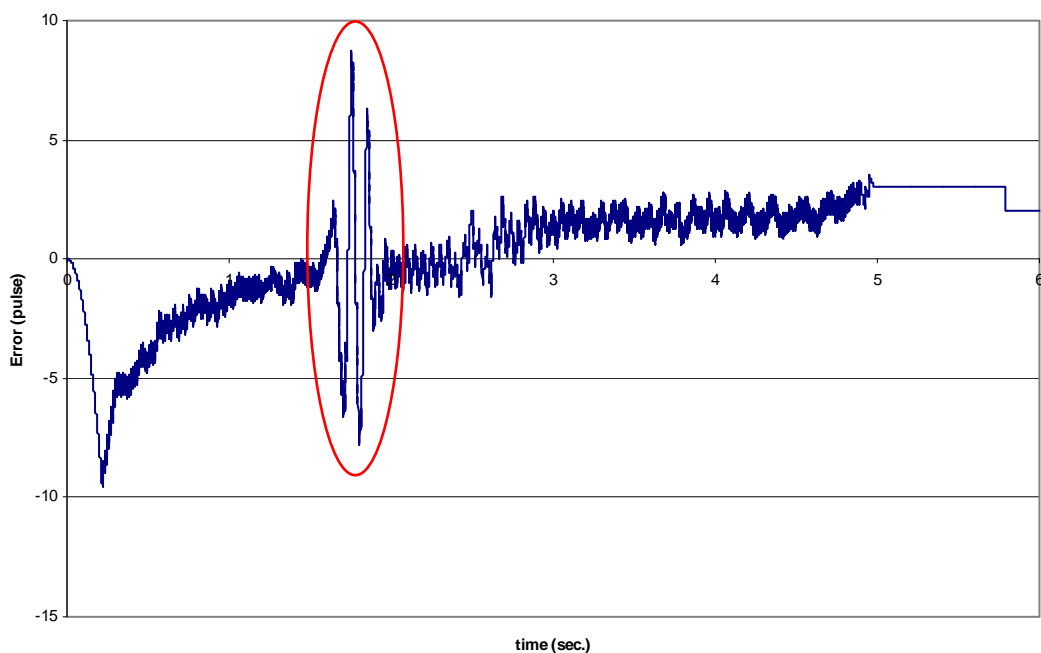


รูปที่ 8.3 สัญญาณผิดพลาดในแกน X เมื่อ  $K_p = 0.02$ ,  $K_i = 0.1$  และ  $K_d = 0.0001$





รูปที่ 8.4 เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน X เมื่อ  $K_p = 0.03$  ,  $K_i = 0.1$  และ  $K_d = 0.0001$



รูปที่ 8.5 สัญญาณผิดพลาดในแกน X เมื่อ  $K_p = 0.03$  ,  $K_i = 0.1$  และ  $K_d = 0.0001$

### 8.1.2 การหาอัตราขยายของตัวควบคุมในแกน Z

การเคลื่อนที่ในแกนนี้ เป็นการกำหนดตัวแปรระยะลึกในการกัด (depth of cut) การทดลองหาอัตราขยายในแกนนี้กำหนดให้มอเตอร์เคลื่อนที่จากตำแหน่งอ้างอิงในแกน Z เป็นจุดเริ่มต้น แล้วเคลื่อนลงไปยังตำแหน่งที่ด้ามติดพลอยเกือบจะสัมผัสกับงานเจียรระไน คือตำแหน่งที่เอนโคเดอร์อ่านค่าได้ -20000 พัลส์ เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ เพราะหากเกิดการชนกันของชุดหัวจับด้ามพลอย กับงานเจียรระไน จะทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องเจียรระไน พลอยแบบอัตโนมัติได้ สำหรับในการเคลื่อนที่จะตั้งค่าตำแหน่ง และอ่านตำแหน่งเป็นหน่วยพัลส์ที่อ่านได้จากเอนโคเดอร์ เช่นเดียวกันกับในแกน X เพื่อความละเอียดในการอ่านตำแหน่ง โดยที่ตำแหน่งเริ่มต้นเป็นศูนย์ อ่านค่าได้ 0 พัลส์ และตำแหน่งปลายทางคือตำแหน่ง -20000 พัลส์ และกำหนดให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 4000 พัลส์/วินาที และทำการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 6 นาที

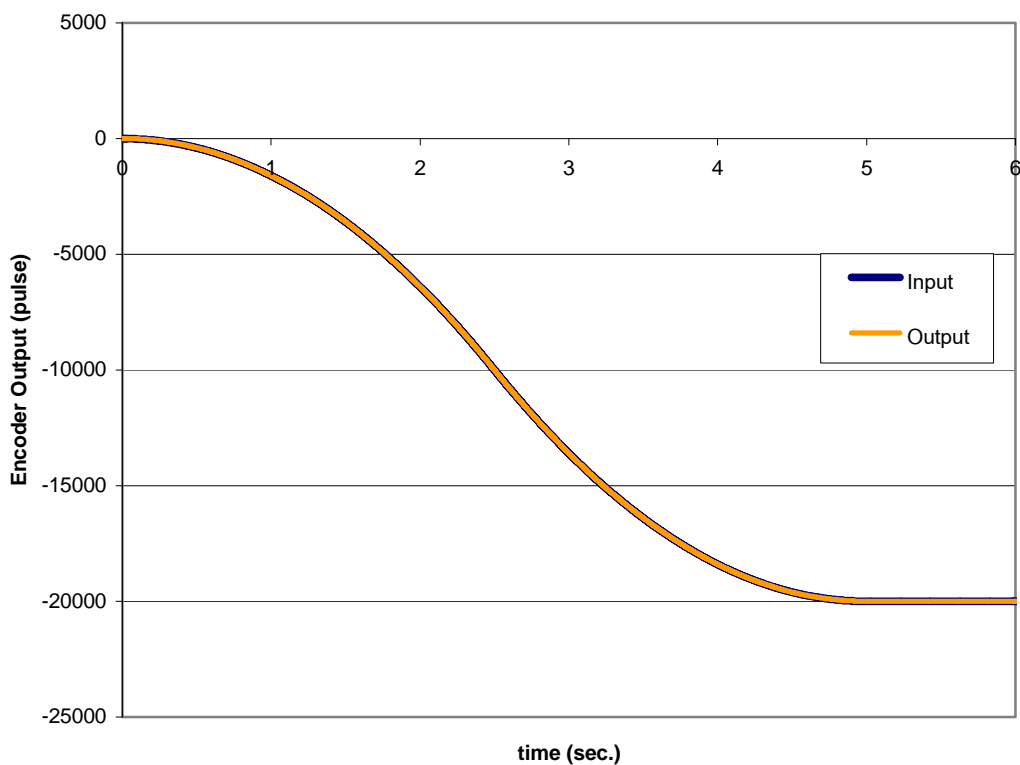
#### ผลการทดลอง

เริ่มต้นกำหนดอัตราขยายของตัวควบคุมดังนี้  $K_p = 0.2$  ,  $K_i = 0.5$  และ  $K_d = 0.0005$  จะได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่ 8.6 และได้สัญญาณแสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 8.7 ซึ่งจากสัญญาณดังกล่าวจะเห็นว่า ดังรูปที่ 8.6 ในส่วนที่วงไว้ พบว่ามีการตอบสนองที่ดี โดยในช่วงต้นการตอบสนองค่อนข้างเร็ว การเคลื่อนที่เริ่มต้นเมื่อสัญญาณอ้างอิงถูกส่งไปแล้วเป็นเวลาประมาณ 0.069 วินาที และเคลื่อนที่ตามแนวเส้น S-Curve ของสัญญาณอ้างอิงไปตลอดจนถึงตำแหน่งปลายทาง แต่เมื่อพิจารณาลักษณะของสัญญาณค่าผิดพลาด ดังรูปที่ 8.7 ค่าสัญญาณผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายทางของการเคลื่อนที่ มีค่าเป็น -1 พัลส์ ในส่วนที่วงเอาไว้ และพบว่าสัญญาณค่าผิดพลาดมีลักษณะของการสั่นอยู่ค่อนข้างมาก

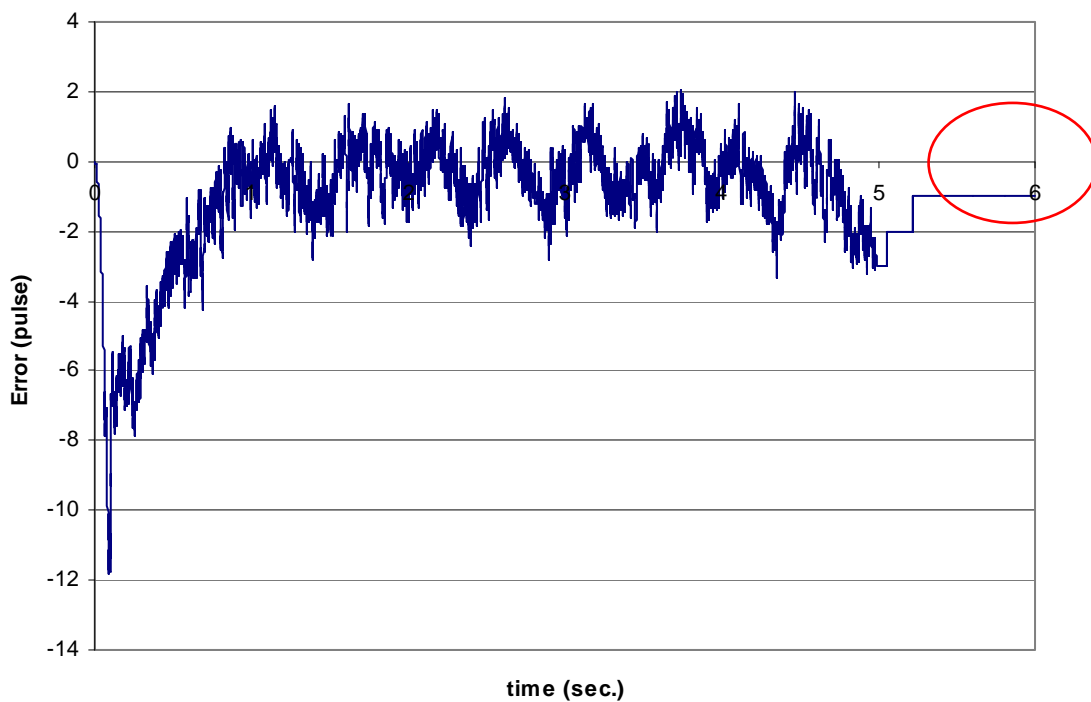
ต่อมาได้ทดลองเปลี่ยนค่าอัตราขยายเป็น  $K_p = 0.1$  ,  $K_i = 0.5$  และ  $K_d = 0.0005$  โดยลดอัตราขยาย  $K_p$  เล็กน้อย เนื่องจากต้องการให้ค่าสัญญาณผิดพลาดที่ตำแหน่งสุดท้ายของระบบตอบเป็นศูนย์ ทำให้ได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่ 8.8 และได้สัญญาณแสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 8.9 จะพบว่า การตอบสนองจะช้าลงเล็กน้อยในช่วงต้น โดยจะเริ่มเคลื่อนที่เมื่อสัญญาณอ้างอิงถูกส่งไปแล้วเป็นเวลา 0.094 วินาที แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของค่าสัญญาณผิดพลาดดังรูปที่ 8.9 จะเห็นว่ามีการสั่นของสัญญาณผิดพลาดมีค่าน้อยลงกว่าเดิม และค่าสัญญาณผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายทางเป็นศูนย์ แสดงว่าการแกน Z เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งปลายทางที่ต้องการ

#### สรุปผลการทดลอง

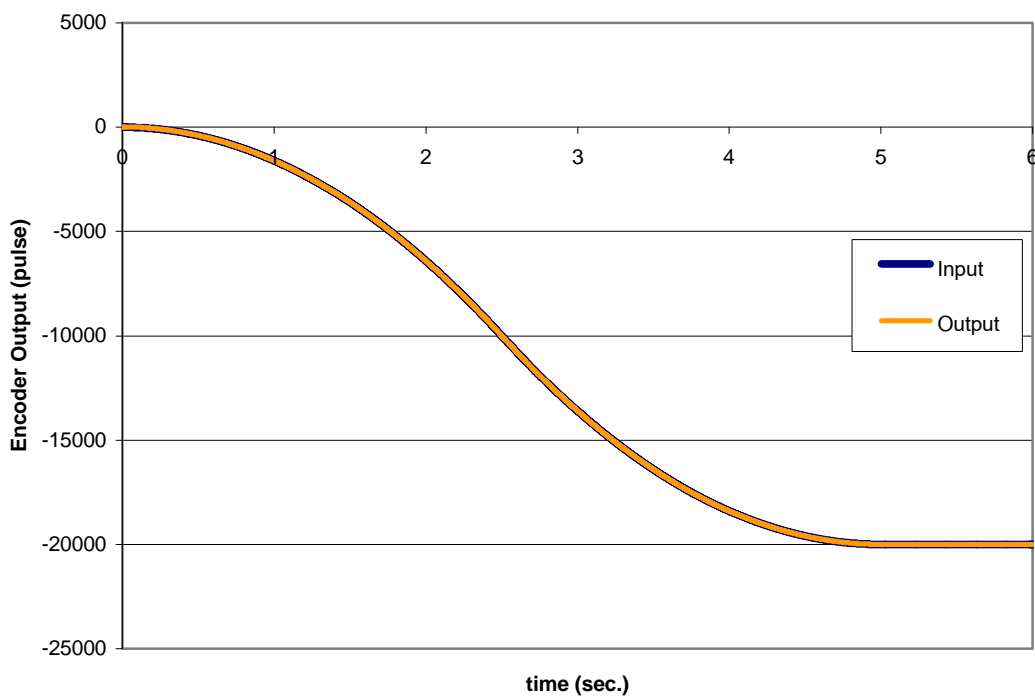
ดังนั้นสำหรับ อัตราขยายในแกน Z เลือกใช้ค่า  $K_p = 0.1$  ,  $K_i = 0.5$  และ  $K_d = 0.0005$  ในการควบคุมการเคลื่อนที่



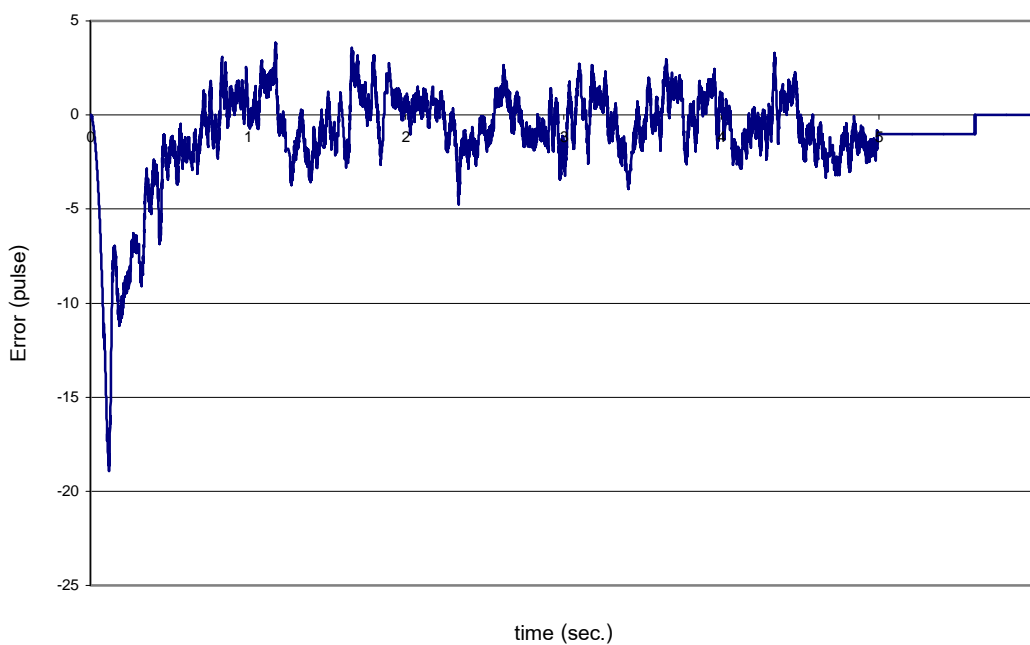
รูปที่ 8.6 เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน Z เมื่อ  $K_p = 0.2$  ,  $K_i = 0.5$  และ  $K_d = 0.0005$



รูปที่ 8.7 สัญญาณผิดพลาดในแกน Z เมื่อ  $K_p = 0.2$  ,  $K_i = 0.5$  และ  $K_d = 0.0005$



รูปที่ 8.8 เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน Z เมื่อ  $K_p = 0.1$  ,  $K_i = 0.5$  และ  $K_d = 0.0005$



รูปที่ 8.9 สัญญาณผิดพลาดในแกน Z เมื่อ  $K_p = 0.1$  ,  $K_i = 0.5$  และ  $K_d = 0.0005$

### 8.1.3 การหาอัตราขยายของตัวควบคุมในแกน A

การเคลื่อนที่ในแกนนี้ เป็นการเคลื่อนที่สำหรับการหมุนเปลี่ยนงานเจียร์ในว่าต้องการใช้ งานใดเจียร์ใน การควบคุมตำแหน่งจุดปลายอาจมีค่าผิดพลาดได้เล็กน้อย เนื่องจากการขับให้ แกนนี้อัตราการเคลื่อนที่ มีอัตราหลายจุดทั้งจากมอเตอร์ที่เป็นมอเตอร์แบบมีเฟืองทด และการส่งกำลัง ด้วยโซ่ จึงทำให้ค่าผิดพลาดที่เล็กน้อยในหน่วยพัลส์ มีผลน้อยมากเมื่อพิจารณาถึงค่าผิดพลาด ของตำแหน่งงานเจียร์ใน การทดลองเริ่มต้นโดยให้งานเจียร์ในอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ได้แต่จะตั้งให้ ตำแหน่งดังกล่าวเป็นตำแหน่งที่อ่านค่าตำแหน่งได้เป็นศูนย์ โดยตำแหน่งปลายของการเคลื่อนที่ จะกำหนดให้เป็นตำแหน่งที่ 1,000,000 พัลส์ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่แกนเปลี่ยนงานเจียร์ใน หมุนครบ 1 รอบ หรือ 360 องศา โดยกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่เป็น 50,000 พัลส์/วินาที และกำหนดระยะเวลาในการเก็บข้อมูลเป็นเวลา 21 วินาที

#### ผลการทดลอง

เริ่มต้นกำหนดอัตราขยายของตัวควบคุมดังนี้  $K_p = 0.002$  ,  $K_i = 0.03$  และ  $K_d = 0.00001$  จะได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณขาเข้า ดังรูปที่ 8.10 และได้สัญญาณ แสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 8.11 จากรูปสัญญาณตอบสนองจะเห็นว่าการตอบสนองในแกน Z มีการตอบสนอง เกือบจะทันทีที่มีการส่งสัญญาณอ้างอิงให้กับระบบ และสัญญาณออกมีลักษณะ เป็น S-Curve ไปตลอดการเคลื่อนที่จนถึงตำแหน่งปลาย แต่เมื่อพิจารณาที่สัญญาณค่าผิดพลาดจะ พบว่า ตำแหน่งปลายยังมีค่าผิดพลาดอยู่ประมาณ -1 พัลส์ และระบบมีการสั่นค่อนข้างมากตลอด การเคลื่อนที่ โดยเฉพาะขณะเริ่มการเคลื่อนที่ ขณะเมื่อเคลื่อนที่ไปได้บริเวณกึ่งกลาง และขณะ เคลื่อนที่กำลังจะถึงจุดหมาย ดังที่วงไว้ในรูป

ต่อมาได้ทดลองเปลี่ยนค่าอัตราขยายเป็น  $K_p = 0.0008$  ,  $K_i = 0.003$  และ  $K_d = 0.00001$  โดยลดอัตราขยาย  $K_p$  และ  $K_i$  ลงเล็กน้อย เนื่องจากต้องการให้ค่าสัญญาณผิดพลาด ตลอดแนวการเคลื่อนที่มีความนิ่งขึ้นกว่าเดิม ทำให้ได้ลักษณะของการตอบสนองเทียบกับสัญญาณ ขาเข้า ดังรูปที่ 8.12 และได้สัญญาณแสดงค่าผิดพลาดดังรูปที่ 8.13 จะพบว่าการตอบสนองของ แกน Z แตกต่างจากเดิมน้อยมาก ยังคงเคลื่อนที่เป็นลักษณะ S-Curve ตามแนวของสัญญาณขา เข้าเช่นเดิม แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของค่าสัญญาณผิดพลาดดังรูปที่ 8.13 จะเห็นว่าการสั่นของ สัญญาณผิดพลาดมีค่าน้อยลงกว่าเดิมค่อนข้างมาก จะคงหลงเหลือการสั่นของสัญญาณในช่วง เริ่มการเคลื่อนที่ และช่วงปลายการเคลื่อนที่อยู่ดังที่วงไว้ในรูป และค่าสัญญาณผิดพลาดที่ ตำแหน่งปลายมีค่าประมาณ 8 พัลส์ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากน้ำหนักของชุดงานที่มาก ทำให้เกิด แรงต้านการเคลื่อนที่มาก และแรงเสียดทานอื่นๆในการหมุนของชุดงานก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง อย่างไรก็ตามค่าผิดพลาดดังกล่าวเมื่อทำการแปลงให้เป็นหน่วยองศาจะพบว่ามีค่าน้อยมากดังนี้

มอเตอร์ขับเคลื่อน A มีอัตราทด 1:25

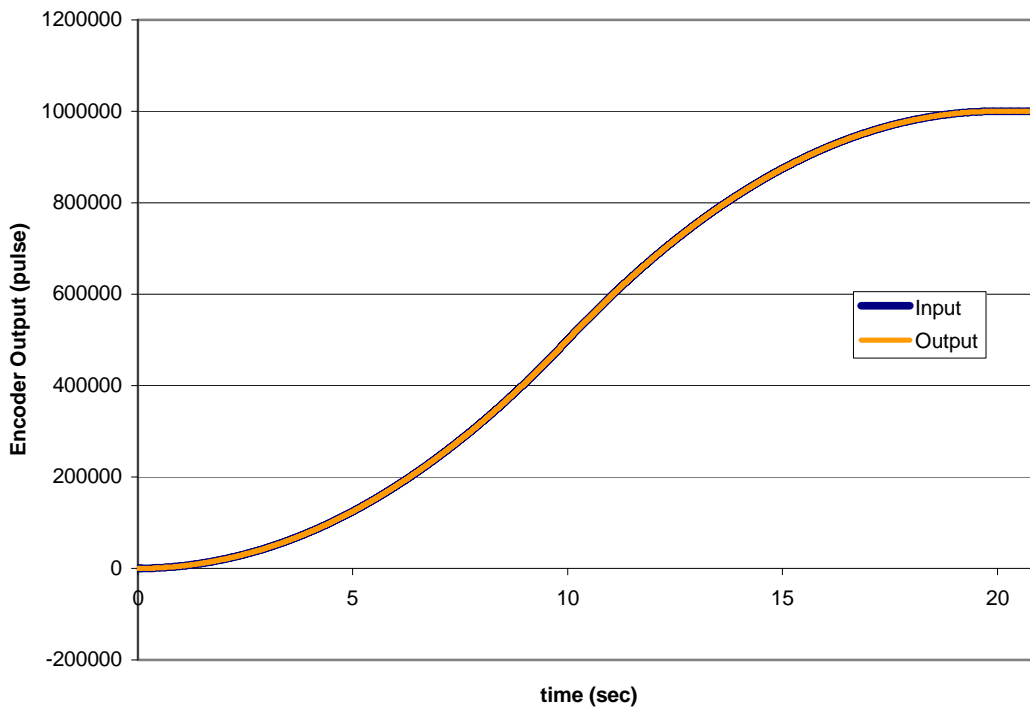
เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองของแกนขับ : เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองของแกนตาม มีค่า 1:4

จากอัตราทดดังกล่าว จะเห็นว่า อัตราทดจากมอเตอร์ไปยังแกนเคลื่อนที่ของแกน Z มีค่าเป็น 1:100

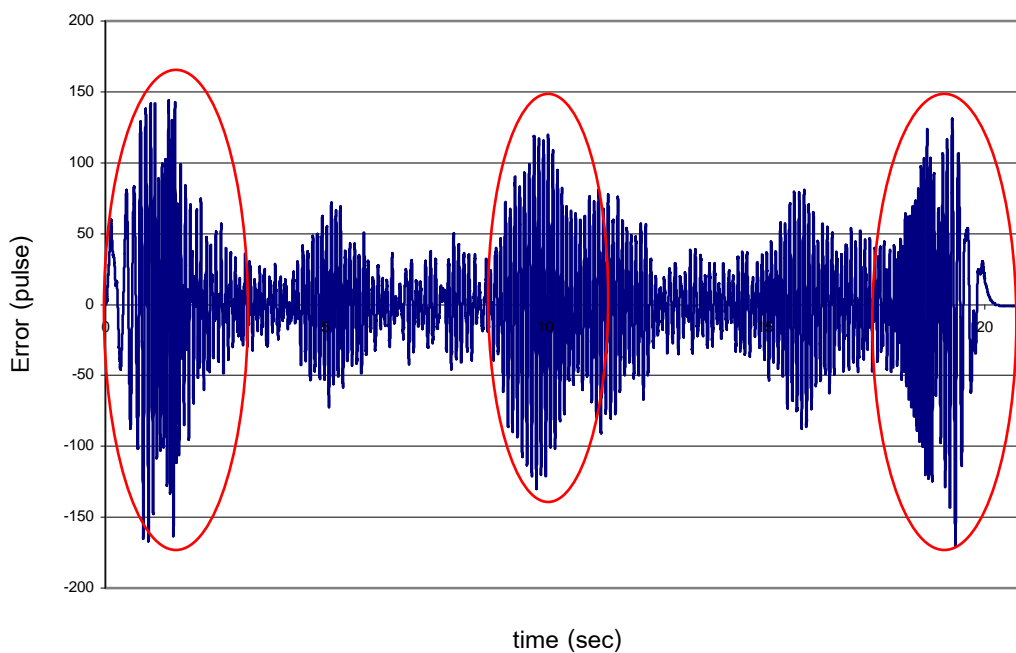
ซึ่งการที่มอเตอร์หมุนครบ 1 รอบ หรือ 360 องศา มอเตอร์จะอ่านค่าได้ 10,000 พัลส์ ดังนั้นการที่ตำแหน่งของมอเตอร์ผิดพลาดไป 8 พัลส์ มีผลทำให้ตำแหน่งของงานเจียรระโนเพี้ยนไปเพียงแค่ 0.00288 องศา เท่านั้น ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก

### สรุปผลการทดลอง

ดังนั้นสำหรับ อัตราขยายในแกน A เลือกใช้ค่า  $K_p = 0.0008$  ,  $K_i = 0.003$  และ  $K_d = 0.00001$  ในการควบคุมการเคลื่อนที่



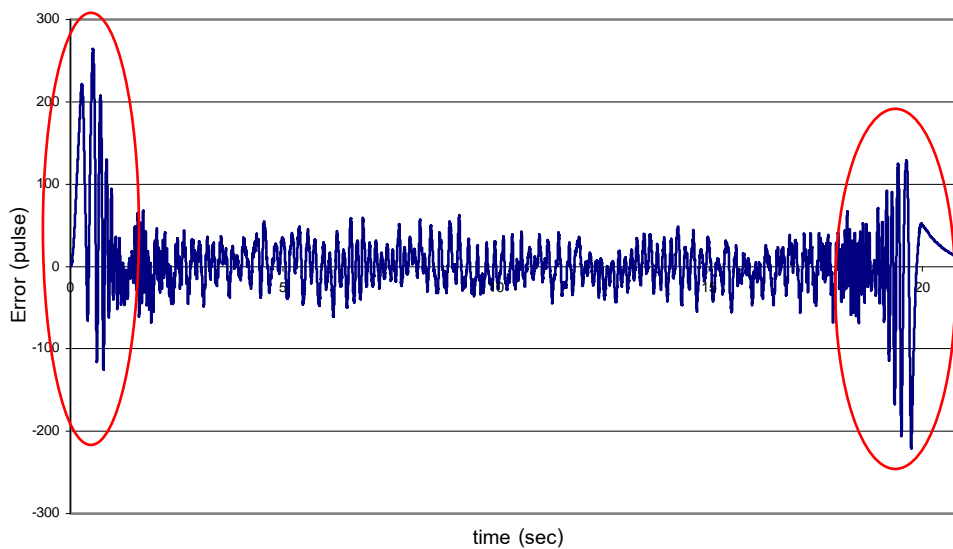
รูปที่ 8.10 เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน A เมื่อ  $K_p = 0.002$  ,  $K_i = 0.03$  และ  $K_d = 0.00001$



รูปที่ 8.11 สัญญาณผิดพลาดในแกน A เมื่อ  $K_p = 0.002$  ,  $K_i = 0.03$  และ  $K_d = 0.00001$



รูปที่ 8.12 เปรียบเทียบของสัญญาณขาเข้า และสัญญาณตอบสนองในแกน A เมื่อ  $K_p = 0.0008$  ,  $K_i = 0.003$  และ  $K_d = 0.00001$



รูปที่ 8.13 สัญญาณผิดพลาดในแกน A เมื่อ  $K_p = 0.0008$  ,  $K_i = 0.003$  และ  $K_d = 0.00001$



## 8.2 การทดลองใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

เมื่อทำการหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสม สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนได้แล้ว ในขั้นตอนต่อไปจะได้เริ่มทำการทดลองการเจียรระไนพลอยด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรมควบคุมการทำงาน (CU Gems Grinding) ในการเจียรระไน โดยที่ในการทดลองจะทำการเจียรระไนพลอยทั้ง 2 รูปแบบคือ แบบสมมาตร และแบบไม่สมมาตร ในการทดลองจะพิจารณาถึง ค่าระยะลึกที่แตกต่างกันระหว่างค่าที่ออกแบบด้วยโปรแกรม ซิยู-โซลิดกับค่าที่ใช้จริง ตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน เวลาที่ใช้ในการเจียรระไน และผลการเจียรระไนที่ได้ว่ามีลักษณะเป็นเช่นไร

สำหรับขั้นตอนในการทดลองมีดังนี้

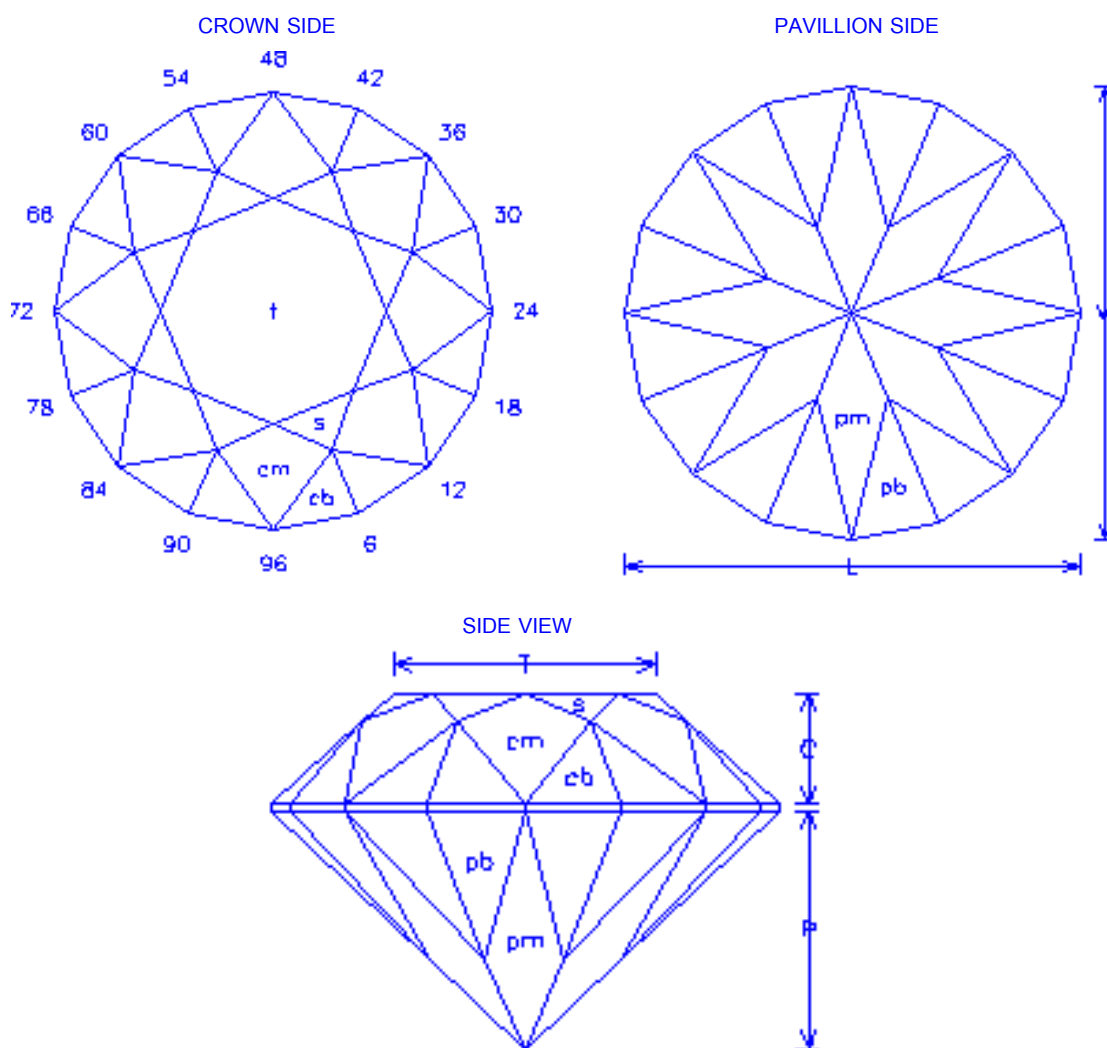
1. วาดรูปพลอยเหลี่ยมที่ต้องการเจียรระไนด้วยโปรแกรม CU-Solid ให้ได้ขนาดใกล้เคียงกับขนาดของพลอยที่ต้องการ
2. จดค่าพารามิเตอร์ระยะลึกในการกัด (Depth of Cut) ของแต่ละมุมยก จาก CU-Solid เอาไว้
3. นำพารามิเตอร์เหลี่ยมพลอยที่ต้องการเจียรระไน และ ค่าพารามิเตอร์ระยะลึกในการกัดที่ได้จากโปรแกรม CU-Solid ป้อนลงในโปรแกรม CU Gems Grinding ทดลองทดลองเจียรระไนตามโปรแกรม ด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ
4. ปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในโปรแกรม CU Gems Grinding และทดลองเจียรระไน จนได้ขนาดพลอยตามที่ต้องการ
5. พิจารณาเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ระยะลึกในการกัดที่ใช้จริงในการเจียรระไน กับค่าที่ได้จากโปรแกรม CU-Solid ว่าแตกต่างกันหรือไม่ ทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้เอาไว้ เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป
6. ทดลองเจียรระไนพลอย โดยใช้พลอยทั้งหมด 5 ชุด โดยแบ่งเป็นพลอยสังเคราะห์ 2 ชุด สีแดง และสีเหลือง และพลอยกระจก 3 ชุด สีเขียว สีฟ้า และสีเทา โดยเตรียมพลอยให้มีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร สูง 3 มิลลิเมตร
7. เก็บค่าตำแหน่งในการเจียรระไนจากโปรแกรม CU Gems Grinding ในงานเจียรระไนชิ้นรูป (งานที่ 2) เพื่อวิเคราะห์ว่าเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ เคลื่อนที่แม่นยำหรือไม่ ซึ่งจะมีผลต่อขนาดและรูปร่างของพลอย
8. บันทึกเวลาที่ใช้ในการเจียรระไนแต่ละขั้นตอน เพื่อพิจารณาหาเวลาเฉลี่ยในการเจียรระไนพลอยแต่ละเม็ด
9. เมื่อเจียรระไนเสร็จ ทดลองวัดขนาดของพลอยที่ผ่านการเจียรระไนว่าใกล้เคียงกับขนาดที่ออกแบบไว้ในโปรแกรม CU-Solid หรือไม่

**หมายเหตุ:** การทดลองในขั้นตอนที่ 5 จะเปรียบเทียบเฉพาะการเจียรระโนด้านบนพลอย (Crown Side) เท่านั้น เนื่องจากเมื่อกลับด้านเพื่อเจียรระโนด้านล่างพลอย (Pavilion Side) ขนาดของพลอย จะมีขนาดไม่เท่ากับขนาดเริ่มต้นของพลอยในโปรแกรม CU-Solid เนื่องจากถูกเจียรระโนไปหนึ่ง ด้านแล้ว ทำให้ค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม ไม่สามารถนำมาใช้ได้

### 8.2.1 พลอยที่มีลักษณะสมมาตร

สำหรับการเจียรระโนพลอยที่มีลักษณะสมมาตร ในที่นี้หมายถึงเหลี่ยมพลอยที่มีลักษณะ สมมาตรทั้ง 2 แนว หรือหมายถึงพลอยที่ในแต่ละมุมยกของพลอย มุมดัชนีแต่ละมุมจะห่างกันเป็น ลักษณะที่เท่ากันทุกมุม

ในการทดลองนี้จะทดลองเจียรระโนพลอยด้วยเหลี่ยม Standard Round Brilliant โดย เหลี่ยมดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 8.14



รูปที่ 8.14 รูปร่างของพลอยเหลี่ยม Standard Round Brilliant [10]

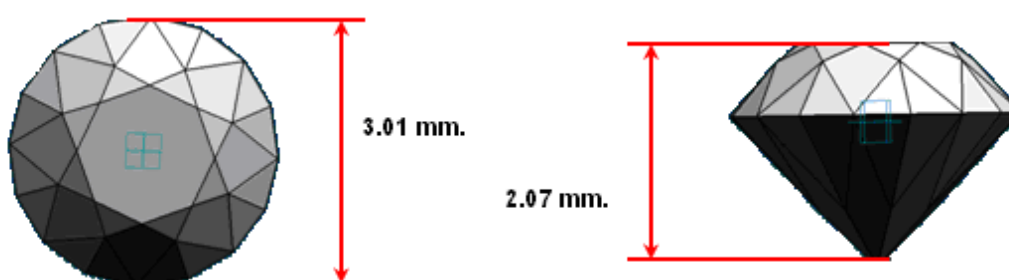
รายละเอียดของเหลี่ยมพลอยดังรูปที่ 8.14 แสดงได้ดังตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 รายละเอียดของเหลี่ยม Standard Round Brilliant [10]

Index Gear : 96		
Pavilion		
Facet	Elevation Angle	Index
Pb	45	3 - 9 - 15 - 21 - 27 - 33 - 39 - 45 - 51 - 57 - 63 - 69 - 75 - 81 - 87 - 93
Pm	43	0 - 12 - 24 - 36 - 48 - 60 - 72 - 84
Crown		
Facet	Elevation Angle	Index
Cm	42	0 - 12 - 24 - 36 - 48 - 60 - 72 - 84
Cb	47	3 - 9 - 15 - 21 - 27 - 33 - 39 - 45 - 51 - 57 - 63 - 69 - 75 - 81 - 87 - 93
S	27	6 - 18 - 30 - 42 - 54 - 66 - 78 - 90
T	0	Table

### ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ต้องการเจียรระโนพลอยออกมาให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อทดลองออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid แล้ว จะได้พลอยที่มีขนาดดังรูปที่ 8.15



รูปที่ 8.15 เหลี่ยมพลอย Standard Round Brilliant และขนาดที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid

จะเห็นว่าพลอยที่ออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid มีขนาดใกล้เคียงกับที่ต้องการ คือมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.01 มิลลิเมตร และสูง 2.07 มิลลิเมตร โดยคิดเป็นอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางต่อความสูงของพลอยได้เป็น 1.45

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ระยะลึกในการกัดที่ได้จากโปรแกรม CU-Solid ไปทดลองเจียรระไน และทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้ได้พลอยที่มีขนาดใกล้เคียงที่ต้องการแล้ว จะพบว่าค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่ได้จากโปรแกรม CU-Solid และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จริงในการเจียรระไน มีค่าดังตารางที่ 8.2

ตารางที่ 8.2 ค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกันระหว่างค่าจากโปรแกรม CU-Solid และ ค่าที่ใช้จริง ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant

Facet	Depth of Cut in mm. (ได้จากCU-Solid)	Depth of Cut in mm. (ใช้จริงในการเจียรระไน)	Error in mm.
Cm	1.062	0.962	-0.100
Cb	1.130	1.010	-0.120
S	0.976	0.956	-0.020
T	0.730	0.580	-0.150
		Mean	-0.098

จากตารางที่ 8.2 จะพบว่าค่าระยะลึกในการกัดที่ใช้จริงจะมีค่าที่ลึกกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid ในทุกๆเหลี่ยม โดยมีค่าเฉลี่ยโดยรวมเป็น -0.098 มิลลิเมตร

ในการทดลองเก็บพิกัดตำแหน่งในการเจียรระไนแต่ละเหลี่ยม ในการเจียรระไนขึ้นรูปที่งานเจียรระไนที่ 2 ได้พิกัดตำแหน่งแสดงไว้เป็นตารางผลการทดลองโดยละเอียดในภาคผนวก ข. ตารางที่ ข.1 ถึง ข.10 โดยจากผลการทดลองที่เก็บได้ นำมาแสดงเป็นตารางสรุปค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยของพารามิเตอร์แต่ละตัว และค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของพารามิเตอร์แต่ละตัว ในแต่ละการทดลองได้ดังตารางที่ 8.3 และ 8.4 แสดงการเจียรระไนด้านบนพลอย (Crown Side) และตารางที่ 8.5 และ 8.6 แสดงการเจียรระไนด้านล่างพลอย (Pavilion Side) โดยที่การทดลองที่ 1 ถึง 5 คือการเจียรระไนโดยใช้พลอยสังเคราะห์สีแดง สีเหลือง และพลอยกระจกสีเทา สีเขียว และสีฟ้าตามลำดับ

ตารางที่ 8.3 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียระไนด้านบนพลอย  
(Crown Side) ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant

Test	Elevation Angle Error in Degree (Mean)	Depth Error in mm. (Mean)	Index Error in Degree (Mean)
1	-0.016	-0.001	0.002
2	-0.007	0.000	0.004
3	0.002	0.000	0.000
4	-0.007	0.000	0.003
5	-0.016	0.000	0.002
<b>Mean</b>	<b>-0.009</b>	<b>0.000</b>	<b>0.002</b>

ตารางที่ 8.4 ค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียระไนด้านบน  
พลอย (Crown Side) ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant

Test	Max Elevation Angle Error in Degree	Max Depth Error in mm.	Max Index Error in Degree
1	-0.036	-0.001	0.010
2	-0.016	-0.001	0.009
3	0.036	0.001	-0.011
4	-0.016	0.001	0.009
5	-0.036	-0.001	0.010
<b>Max</b>	<b>0.036</b>	<b>0.001</b>	<b>-0.011</b>

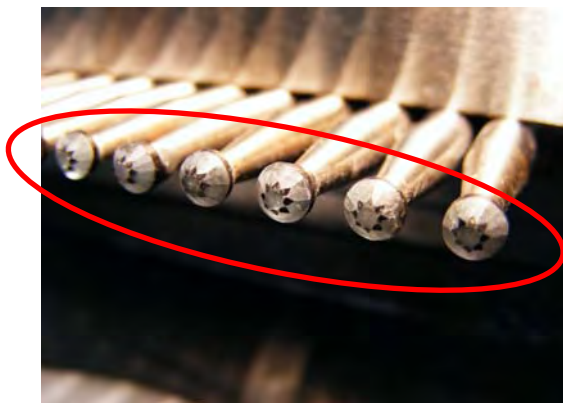
ตารางที่ 8.5 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียระไนด้านล่างพลอย (Pavilion Side) ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant

Test	Elevation Angle Error in Degree (Mean)	Depth Error in mm. (Mean)	Index Error in Degree (Mean)
1	-0.006	-0.001	0.003
2	-0.005	-0.001	0.004
3	-0.008	-0.001	0.004
4	-0.011	0.000	0.003
5	-0.011	-0.001	0.004
<b>Mean</b>	<b>-0.008</b>	<b>0.000</b>	<b>0.004</b>

ตารางที่ 8.6 ค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียระไนด้านล่างพลอย (Pavilion Side) ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant

Test	Max Elevation Angle Error in Degree	Max Depth Error in mm.	Max Index Error in Degree
1	-0.036	-0.002	0.009
2	0.036	-0.002	0.010
3	-0.036	0.001	0.010
4	-0.036	0.001	0.009
5	0.036	-0.002	0.009
<b>Max</b>	<b>0.036</b>	<b>-0.002</b>	<b>0.010</b>

จากค่าการทดลองพบว่าเหลี่ยมพลอยที่ได้ออกมา มีลักษณะที่สม่ำเสมอ เมื่อมองด้วยตาเปล่า ถึงแม้ว่าค่าตำแหน่งจะมีค่าผิดพลาดไปบ้าง โดยในการทดลองได้ทำการแต้มสีไว้ที่พลอยก่อนทำการเจียระไน แล้วสังเกตเหลี่ยมที่เกิดขึ้นหลังการเจียระไน ดังแสดงในรูปที่ 8.16 และ 8.17

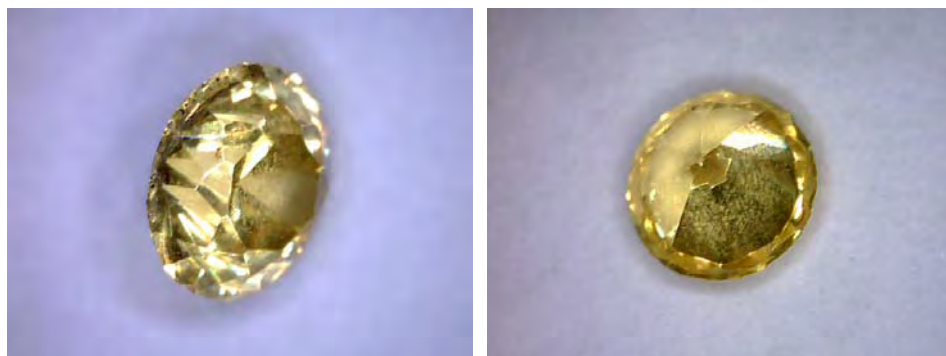


รูปที่ 8.16 เหลี่ยมพลอย Standard Round Brilliant ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียรระไนด้านบนของพลอย  
(Crown Side)



รูปที่ 8.17 เหลี่ยมพลอย Standard Round Brilliant ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียรระไนด้านล่างของพลอย  
(Pavilion Side)

เมื่อเจียรระไนเสร็จแล้ว จะได้พลอยที่ผ่านการเจียรระไนที่มีลักษณะดังรูปที่ 8.18



รูปที่ 8.18 พลอยเหลี่ยม Standard Round Brilliant ที่ได้จากการทดลอง

สำหรับเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเจียรระโนพลอยแต่ละชุด แสดงได้ดังตารางที่ 8.7

ตารางที่ 8.7 เวลาที่ใช้ในการเจียรระโนแต่ละช่วง ของเหลี่ยม Standard Round Brilliant

ช่วงการทำงาน	ขั้นตอนการทำงาน	เวลาที่ใช้
การเตรียมพลอย ก่อนการ เจียรระโน	การติดพลอยกับด้ามติดพลอยด้วยกาว UV (14 เม็ด)	4 นาที 32 วินาที
	การอบพลอยให้กาวแห้งในตู้อบ UV	60 นาที
	การขึ้นรูปพลอยด้วยมือ (14 เม็ด)	4 นาที 50 วินาที
การเจียรระโน ด้านบนพลอย (Crown Side)	การขึ้นรูปหยาบด้วยจานเจียรระโนที่ 1	4 นาที 10 วินาที
	การขึ้นรูปด้วยจานเจียรระโนที่ 2	13 นาที 15 วินาที
	การขัดเงาหยาบด้วยจานเจียรระโนที่ 4	6 นาที 29 วินาที
	การขัดเงาละเอียดด้วยจานเจียรระโนที่ 5	5 นาที 59 วินาที
การกลับด้าน พลอย	กลับด้านพลอยด้วยชุดกลับด้านพลอย	9 นาที 37 วินาที
	การอบพลอยให้กาวแห้งในตู้อบ UV	60 นาที
	การถอดเอาด้ามติดพลอยด้านที่เจียรแล้วออก	5 นาที 40 วินาที
	การขึ้นรูปพลอยด้วยมือ (14 เม็ด)	4 นาที 28 วินาที
การเจียรระโน ด้านล่างพลอย (Pavilion Side)	การขึ้นรูปหยาบด้วยจานเจียรระโนที่ 1	4 นาที 10 วินาที
	การขึ้นรูปด้วยจานเจียรระโนที่ 2	9 นาที 34 วินาที
	การขัดเงาหยาบด้วยจานเจียรระโนที่ 4	4 นาที 40 วินาที
	การขัดเงาละเอียดด้วยจานเจียรระโนที่ 5	4 นาที 17 วินาที
	<b>รวมเวลา</b>	<b>3 ชั่วโมง 21 นาที 41 วินาที</b>

เมื่อทำการทดลองจนครบแล้วพบว่าพลอยที่ผ่านการเจียรระโนในแต่ละการทดลอง มีขนาดดัง  
ตารางที่ 8.8



ตารางที่ 8.8 ขนาดของพลอยที่ผ่านการเจียระไน ในแต่ละการทดลอง ของเหลี่ยม Standard  
Round Brilliant

Test	มิติของ พลอย	ขนาดของพลอย(mm)														เฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	Diameter	2.85	2.90	2.92	2.85	2.92	2.82	2.79	2.80	2.79	2.81	2.78	2.75	2.67	2.69	2.81
	Height	1.95	2.00	2.01	1.95	2.08	1.95	1.93	1.94	1.95	1.96	1.95	1.93	1.87	1.89	1.95
	D/H ratio	1.46	1.45	1.45	1.46	1.40	1.45	1.45	1.44	1.43	1.43	1.43	1.42	1.43	1.42	1.44
2	Diameter	2.90	2.90	2.87	2.88	2.90	2.87	2.92	2.83	2.86	2.83	2.80	2.66	2.78	2.72	2.84
	Height	2.00	1.99	1.98	2.02	2.02	2.01	2.07	1.96	2.01	1.97	1.94	1.94	1.95	1.89	1.98
	D/H ratio	1.45	1.46	1.45	1.43	1.44	1.43	1.41	1.44	1.42	1.44	1.44	1.37	1.43	1.44	1.43
3	Diameter	2.95	2.92	2.94	2.90	2.87	2.95	2.89	2.87	2.88	2.91	2.86	2.79	2.80	2.76	2.87
	Height	1.99	2.02	2.01	2.01	2.01	2.05	2.01	2.00	2.00	2.02	1.99	1.97	1.98	1.95	2.00
	D/H ratio	1.45	1.45	1.46	1.44	1.43	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.44	1.42	1.41	1.42	1.44
4	Diameter	2.93	2.96	2.83	2.93	2.90	2.90	2.85	2.87	2.90	2.84	2.93	2.85	2.83	2.75	2.88
	Height	2.00	2.03	2.00	2.01	2.00	1.98	1.96	1.96	1.94	1.96	2.03	2.00	1.99	1.90	1.98
	D/H ratio	1.47	1.46	1.42	1.46	1.45	1.46	1.45	1.46	1.49	1.45	1.44	1.43	1.42	1.45	1.45
5	Diameter	2.90	2.89	2.86	2.86	2.69	2.85	2.72	2.85	2.96	2.96	2.94	2.89	2.69	2.69	2.86
	Height	2.10	2.06	1.91	1.95	1.75	1.99	1.94	2.06	2.11	2.11	2.12	2.08	1.83	1.87	1.99
	D/H ratio	1.43	1.46	1.50	1.47	1.54	1.43	1.40	1.38	1.40	1.40	1.39	1.39	1.47	1.44	1.43

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเจียระไนพลอยรูปแบบสมมาตรด้วยเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากตารางที่ 8.2 จะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ระยะลึกในการกัดที่ใช้จริงในการเจียระไนมีค่าลึกกว่าค่าที่ได้ออกมาจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid โดยมีค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 เหลี่ยมอยู่ที่ -0.098 มิลลิเมตร นั่นคือ ระยะลึกจริงๆที่เครื่องเจียระไนพลอยเหลี่ยมนี้จะลึกกว่าระยะที่ได้จากการออกแบบอยู่โดยเฉลี่ย 0.098 มิลลิเมตร

2. จากตารางที่ 8.3 ถึงตารางที่ 8.6 จะพบว่า การควบคุมตำแหน่งขณะที่มีการเจียระไนพลอยมีค่าผิดพลาดอยู่บ้าง ซึ่งมีค่าผิดพลาดไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยสรุปค่าผิดพลาดได้ดังนี้

- ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของมุมยกในการทดลองมีค่าประมาณ -0.009 องศา และค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของมุมยกมีค่าเป็น 0.036 องศา

- ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะลึกในการกัดมีค่าประมาณ 0.000 มิลลิเมตร และค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของระยะลึกในการกัดมีค่าเป็น -0.002 มิลลิเมตร

- ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของมุมตัดชันมีค่าประมาณ 0.003 องศา และค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของมุมตัดชันมีค่าเป็น -0.011 องศา

จากค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลองดังกล่าวจะพบว่า ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก และมีผลต่อลักษณะของเหลี่ยมพลอยน้อยมาก

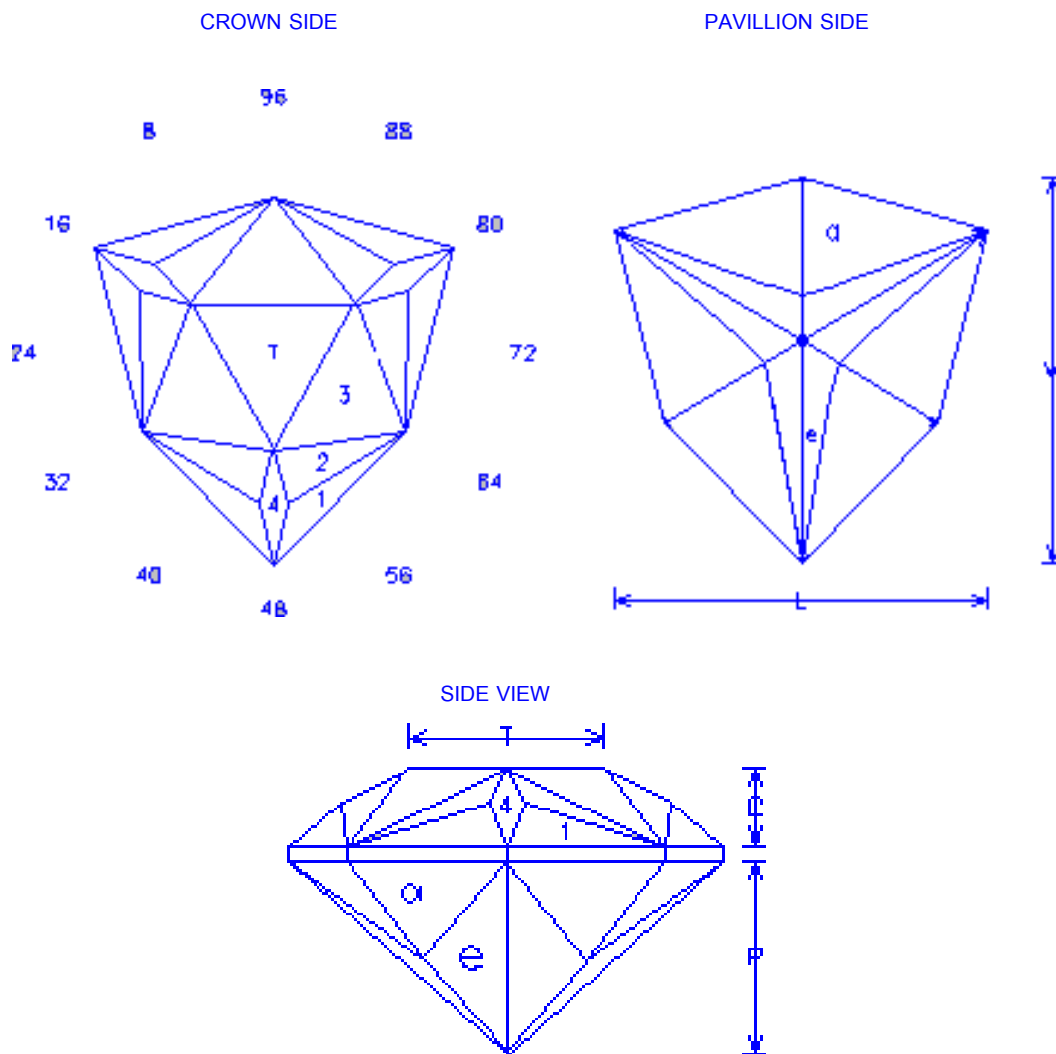
3. จากตารางที่ 8.7 พบว่าเวลาที่ใช้ในการเจียรระโนเหลี่ยมสมมาตรทั้งหมดคือ 3 ชั่วโมง 21 นาที 41 วินาที โดยคิดเป็น 14 นาที 24 วินาที ต่อการเจียรระโนพลอย 1 เม็ด ทั้งนี้หากคิดเฉพาะเวลาที่ทำงาน โดยไม่รวมระยะเวลาที่ใช้ในการอบพลอย จะพบว่าใช้เวลาทั้งสิ้น 1 ชั่วโมง 21 นาที 41 วินาที ซึ่งเมื่อคิดเฉลี่ยเป็นเวลาที่ใช้ต่อพลอย 1 เม็ด จะพบว่า การเจียรระโนพลอยใช้เวลา 5 นาที 50 วินาที ต่อพลอย 1 เม็ด และหากพิจารณาเฉพาะเวลาที่เครื่องเจียรระโนทำงานจะพบว่าใช้เวลาในการเจียรระโนทั้งสิ้น 52 นาที 34 วินาที หรือคิดเฉลี่ยเป็น 3 นาที 45 วินาที ต่อพลอย 1 เม็ด

4. จากตารางที่ 8.8 พบว่าขนาดของพลอยที่เจียรระโนออกมาแม้ว่าขนาดไม่เท่ากันทุกเม็ด แต่ขนาดที่ได้ใกล้เคียงกัน โดยสังเกตว่าพลอยเม็ดแรกๆจะมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดท้ายๆ ในการทดลองทุกๆชุด อาจเกิดจากการตั้งระดับของเครื่องยังทำได้ไม่ดีพอ เป็นผลให้งานเจียรระโนเอียง โดยพลอยที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่ได้ออกมามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.96 มิลลิเมตร ในขณะที่เม็ดที่เล็กที่สุดที่ได้ออกมามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.66 มิลลิเมตร โดยมีขนาดต่างกันอยู่ 0.3 มิลลิเมตร แต่เมื่อสังเกตอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความสูงของพลอยโดยเฉลี่ยของการทดลองแต่ละชุด จะเห็นว่าค่าที่ใกล้เคียงกันมาก และใกล้เคียงกับอัตราส่วนของขนาดจริงของพลอยจากแบบที่ออกแบบเอาไว้ ดังนั้นหากปรับตั้งเครื่องให้ดีขึ้น น่าจะทำให้ได้พลอยที่มีขนาดใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้น

## 8.2.2 พลอยที่มีลักษณะไม่สมมาตร

สำหรับการเจียรระโนพลอยที่มีลักษณะไม่สมมาตร ในที่นี้หมายถึง หมายถึงพลอยที่ในแต่ละมุมยกของพลอย มุมตัดชันแต่ละมุมจะห่างกันเป็นลักษณะที่ไม่เท่ากันเท่ากันในแต่ละมุม

ในการทดลองนี้จะทดลองเจียรระโนพลอยด้วยเหลี่ยม Four Triangle โดยเหลี่ยมดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 8.19



รูปที่ 8.19 รูปร่างของพลอยเหลี่ยม Four Triangles [11]

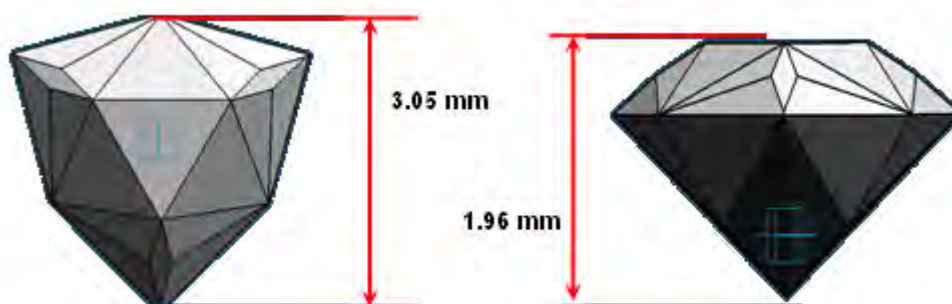
รายละเอียดของเหลี่ยมพลอยดังรูปที่ 8.19 แสดงได้ดังตารางที่ 8.9

ตารางที่ 8.9 รายละเอียดของเหลี่ยม Four Triangles [11]

Index Gear : 96		
Pavilion		
Facet	Elevation Angle	Index
a	52	4 - 28 - 36 - 60 - 68 - 92
e	42	7 - 25 - 39 - 57 - 71 - 89
Crown		
Facet	Elevation Angle	Index
1	45.5	4 - 28 - 36 - 60 - 68 - 92
2	33.6	2 - 30 - 34 - 62 - 66 - 94
3	30.5	0 - 32 - 64
4	28.5	16 - 48 - 80
5	0	Table

#### ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ต้องการเจียรระโนพลอยออกมาให้มีขนาดเส้นเส้นทแยงมุมประมาณ 3 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อทดลองออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid แล้ว จะได้พลอยที่มีขนาดดังรูปที่ 8.20



รูปที่ 8.20 เหลี่ยมพลอย Four Triangles และขนาดที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid

จะเห็นว่าพลอยที่ออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid มีขนาดใกล้เคียงกับที่ต้องการ คือ เส้นทแยงมุมยาว 3.05 มิลลิเมตร และมีความสูง 1.96 มิลลิเมตร โดยคิดเป็นอัตราส่วนของเส้นทแยงมุมต่อความสูงของพลอยได้เป็น 1.56

เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ระยะลึกในการกัดที่ได้จากโปรแกรม CU-Solid ไปทดลองเจียรระโนและทำการปรับค่าพารามิเตอร์ให้ได้พลอยที่มีขนาดใกล้เคียงที่ต้องการแล้ว จะพบว่า

ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวที่ได้จากโปรแกรม CU-Solid และค่าพารามิเตอร์ที่ใช้จริงในการเจียรระโน มีค่าดังตารางที่ 8.10

ตารางที่ 8.10 ค่าพารามิเตอร์ที่ต่างกันระหว่างค่าจากโปรแกรม CU-Solid และ ค่าที่ใช้จริงของเหลี่ยม Four Triangles

Facet	Depth of Cut in mm. (ได้จาก CU-Solid)	Depth of Cut in mm. (ใช้จริงในการเจียรระโน)	Error in mm.
1	1.200	1.000	-0.200
2	1.150	0.930	-0.220
3	1.080	0.900	-0.180
4	1.420	1.300	-0.120
5	0.950	0.680	-0.270
		Mean	-0.198

จากตารางที่ 8.10 จะพบว่าค่าระยะลึกในการกัดที่ใช้จริงจะมีค่าที่ลึกกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid ในทุกๆเหลี่ยม โดยมีค่าเฉลี่ยโดยรวมเป็น -0.198 มิลลิเมตร

ในการทดลองเก็บพิกัดตำแหน่งในการเจียรระโนแต่ละเหลี่ยม ในการเจียรระโนขึ้นรูปที่งานเจียรระโนที่ 2 ได้พิกัดตำแหน่งแสดงไว้เป็นตารางผลการทดลองโดยละเอียดในภาคผนวก ข. ตารางที่ ข.11 ถึง ข.20 โดยจากผลการทดลองที่เก็บได้ นำมาแสดงเป็นตารางสรุปค่าผิดพลาดโดยเฉลี่ยของพารามิเตอร์แต่ละตัว และค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของพารามิเตอร์แต่ละตัว ในแต่ละการทดลองได้ดังตารางที่ 8.11 และ 8.12 แสดงการเจียรระโนด้านบนพลอย (Crown Side) และตารางที่ 8.13 และ 8.14 แสดงการเจียรระโนด้านล่างพลอย (Pavilion Side) โดยที่การทดลองที่ 1 ถึง 5 คือ การเจียรระโนโดยใช้พลอยสังเคราะห์สีแดง สีเหลือง และพลอยกระจกสีเทา สีเขียว และสีฟ้าตามลำดับ

ตารางที่ 8.11 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรในด้านบนพลอย (Crown Side) ของเหลี่ยม Four Triangles

Test	Elevation Angle Error in Degree (Mean)	Depth Error in mm. (Mean)	Index Error in Degree (Mean)
1	-0.006	0.007	0.002
2	-0.006	0.008	0.002
3	-0.008	0.008	0.002
4	-0.015	0.008	0.002
5	0.006	0.007	0.001
<b>Mean</b>	<b>-0.006</b>	<b>0.008</b>	<b>0.002</b>

ตารางที่ 8.12 ค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรในด้านบนพลอย (Crown Side) ของเหลี่ยม Four Triangles

Test	Max Elevation Angle Error in Degree	Max Depth Error in mm.	Max Index Error in Degree
1	0.048	0.039	0.009
2	-0.040	0.039	0.006
3	-0.028	0.039	0.006
4	-0.036	0.038	0.006
5	-0.040	0.039	0.006
<b>Max</b>	<b>0.048</b>	<b>0.039</b>	<b>0.009</b>

ตารางที่ 8.13 ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรไนด้านล้างพลอย (Pavilion Side) ของเหลี่ยม Four Triangles

Test	Elevation Angle Error in Degree (Mean)	Depth Error in mm. (Mean)	Index Error in Degree (Mean)
1	-0.010	-0.001	0.004
2	-0.010	-0.001	0.004
3	-0.007	0.000	0.003
4	-0.001	-0.001	0.003
5	-0.004	-0.001	0.003
<b>Mean</b>	<b>-0.006</b>	<b>-0.001</b>	<b>0.003</b>

ตารางที่ 8.14 ค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของตำแหน่ง ในแต่ละการทดลองของการเจียรไนด้านล้างพลอย (Pavilion Side) ของเหลี่ยม Four Triangles

Test	Max Elevation Angle Error in Degree	Max Depth Error in mm.	Max Index Error in Degree
1	0.024	-0.002	0.007
2	0.024	-0.002	0.009
3	0.024	-0.002	0.005
4	0.024	-0.002	0.007
5	0.024	-0.002	0.005
<b>Max</b>	<b>0.024</b>	<b>-0.002</b>	<b>0.009</b>

จากค่าการทดลองพบว่าเหลี่ยมพลอยที่ได้ออกมามีลักษณะที่สม่ำเสมอ เมื่อมองด้วยตาเปล่า ถึงแม้ว่าค่าตำแหน่งจะมีค่าผิดพลาดไปบ้าง โดยในการทดลองได้ทำการแต้มสีไว้ที่พลอยก่อนทำการเจียรไน แล้วสังเกตเหลี่ยมที่เกิดขึ้นหลังการเจียรไน ดังแสดงในรูปที่ 8.21 และ 8.22



รูปที่ 8.21 เหลี่ยมพลอย Four Triangles ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียระไนด้านบนของพลอย  
(Crown Side)



รูปที่ 8.22 เหลี่ยมพลอย Four Triangles ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียระไนด้านล่างของพลอย  
(Pavilion Side)

เมื่อเจียระไนเสร็จแล้ว จะได้พลอยที่ผ่านการเจียระไนที่มีลักษณะดังรูปที่ 8.23



รูปที่ 8.23 พลอยเหลี่ยม Four Triangles ที่ได้จากการทดลอง



เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเจียรระโนพลอยแต่ละชุด แสดงได้ดังตารางที่ 8.15

ตารางที่ 8.15 เวลาที่ใช้ในการเจียรระโนแต่ละช่วง ของเหลี่ยม Four Triangles

ช่วงการทำงาน	ขั้นตอนการทำงาน	เวลาที่ใช้
การเตรียมพลอย ก่อนการเจียรระโน	การติดพลอยกับด้ามติดพลอยด้วยกาว UV (14 เม็ด)	4 นาที 32 วินาที
	การอบพลอยให้กาวแห้งในตู้อบ UV	60 นาที
	การขึ้นรูปพลอยด้วยมือ (14 เม็ด)	4 นาที 50 วินาที
การเจียรระโน ด้านบนพลอย (Crown Side)	การขึ้นรูปหยาบด้วยจานเจียรระโนที่ 1	3 นาที 17 วินาที
	การขึ้นรูปด้วยจานเจียรระโนที่ 2	8 นาที 14 วินาที
	การขัดเงาหยาบด้วยจานเจียรระโนที่ 4	4 นาที 18 วินาที
	การขัดเงาละเอียดด้วยจานเจียรระโนที่ 5	4 นาที 2 วินาที
การกลับด้าน พลอย	กลับด้านพลอยด้วยชุดกลับด้านพลอย	9 นาที 37 วินาที
	การอบพลอยให้กาวแห้งในตู้อบ UV	60 นาที
	การถอดเอาด้ามติดพลอยด้านที่เจียรแล้วออก	5 นาที 40 วินาที
	การขึ้นรูปพลอยด้วยมือ (14 เม็ด)	4 นาที 28 วินาที
การเจียรระโน ด้านล่างพลอย (Pavilion Side)	การขึ้นรูปหยาบด้วยจานเจียรระโนที่ 1	3 นาที 15 วินาที
	การขึ้นรูปด้วยจานเจียรระโนที่ 2	5 นาที 9 วินาที
	การขัดเงาหยาบด้วยจานเจียรระโนที่ 4	2 นาที 40 วินาที
	การขัดเงาละเอียดด้วยจานเจียรระโนที่ 5	2 นาที 28 วินาที
<b>รวมเวลา</b>		<b>3 ชั่วโมง 2 นาที 30 วินาที</b>

เมื่อทำการทดลองจนครบแล้วพบว่าพลอยที่ผ่านการเจียรระโนในแต่ละการทดลอง มีขนาดดัง  
ตารางที่ 8.16

ตารางที่ 8.16 ขนาดของพลอยที่ผ่านการเจียระไน ในแต่ละการทดลอง ของเหลี่ยม Four  
Triangles

Test	มิติของ พลอย	ขนาดของพลอย(mm)														เฉลี่ย
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	Diagonal	3.01	3.06	3.02	2.98	2.92	2.85	2.79	2.81	2.77	2.82	2.78	2.75	2.70	2.69	2.85
	Height	1.93	1.95	1.94	1.91	1.90	1.83	1.78	1.80	1.82	1.86	1.80	1.76	1.74	1.78	1.84
	D/H ratio	1.56	1.57	1.56	1.56	1.54	1.56	1.57	1.56	1.52	1.52	1.54	1.56	1.55	1.51	1.55
2	Diagonal	3.01	3.05	2.99	2.95	2.90	2.88	2.80	2.83	2.86	3.02	2.80	2.77	2.75	2.81	2.89
	Height	1.92	1.94	1.89	1.87	1.85	1.84	1.83	1.86	1.88	1.94	1.81	1.77	1.76	1.80	1.85
	D/H ratio	1.57	1.57	1.58	1.58	1.57	1.57	1.53	1.52	1.52	1.56	1.55	1.56	1.56	1.56	1.56
3	Diagonal	3.08	3.00	3.05	3.01	3.05	3.09	2.95	2.96	2.98	2.99	2.95	2.94	2.93	2.97	3.00
	Height	1.94	1.90	1.94	1.92	1.93	1.95	1.85	1.90	1.91	1.88	1.88	1.88	1.88	1.90	1.90
	D/H ratio	1.59	1.58	1.57	1.57	1.58	1.58	1.59	1.56	1.56	1.59	1.57	1.56	1.56	1.56	1.57
4	Diagonal	2.94	2.92	2.97	3.00	2.95	2.93	3.04	2.91	2.94	2.86	2.89	2.82	2.69	2.86	2.91
	Height	1.87	1.85	1.87	1.92	1.90	1.88	1.97	1.83	1.90	1.83	1.84	1.79	1.69	1.83	1.86
	D/H ratio	1.57	1.58	1.59	1.56	1.55	1.56	1.54	1.59	1.55	1.56	1.57	1.58	1.59	1.56	1.57
5	Diagonal	2.92	3.07	2.96	3.02	2.93	2.95	2.87	2.85	2.97	2.96	2.90	2.88	2.82	2.76	2.92
	Height	1.89	1.95	1.90	1.93	1.87	1.90	1.82	1.83	1.93	1.92	1.88	1.85	1.85	1.78	1.88
	D/H ratio	1.54	1.57	1.56	1.56	1.57	1.55	1.58	1.56	1.54	1.54	1.54	1.56	1.52	1.55	1.55

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเจียระไนพลอยรูปแบบไม่สมมาตรด้วยเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากตารางที่ 8.10 จะเห็นว่า ค่าพารามิเตอร์ระยะลึกในการกัดที่ใช้จริงในการเจียระไนจะมีค่าลึกกว่า ค่าที่ได้ออกมาจากการออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid โดยมีค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 เหลี่ยมอยู่ที่ -0.198 มิลลิเมตร นั่นคือ ระยะลึกจริงๆที่เครื่องเจียระไนพลอยเหลี่ยมนี้ จะลึกกว่าระยะที่ได้จากการออกแบบอยู่โดยเฉลี่ย 0.198 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าลึกกว่าการเจียระไนแบบสมมาตร

2. จากตารางที่ 8.11 ถึงตารางที่ 8.14 จะพบว่าการควบคุมตำแหน่งขณะที่มีการเจียระไนพลอยมีค่าผิดพลาดอยู่บ้าง ซึ่งมีค่าผิดพลาดไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยสรุปค่าผิดพลาดได้ดังนี้

- ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของมุมยกในการทดลองมีค่าประมาณ -0.006 องศา และค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของมุมยกมีค่าเป็น 0.048 องศา

- ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของระยะลึกในการกัดมีค่าประมาณ 0.004 มิลลิเมตร และค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของระยะลึกในการกัดมีค่าเป็น 0.039 มิลลิเมตร

- ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของมุมดัชนีมีค่าประมาณ 0.003 องศา และค่าผิดพลาดที่มากที่สุดของมุมดัชนีมีค่าเป็น 0.009 องศา

จากค่าผิดพลาดที่ได้จากการทดลองดังกล่าวจะพบว่า ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก และมีผลต่อลักษณะของเหลี่ยมพลอยน้อยมาก

3. จากตารางที่ 8.15 พบว่าเวลาที่ใช้ในการเจียรระโนเหลี่ยมสมมาตรทั้งหมดคือ 3 ชั่วโมง 2 นาที 30 วินาที โดยคิดเป็น 13 นาที 2 วินาที ต่อการเจียรระโนพลอย 1 เม็ด ทั้งนี้หากคิดเฉพาะเวลาที่ทำงาน โดยไม่รวมระยะเวลาที่ใช้ในการอบพลอย จะพบว่าใช้เวลาทั้งสิ้น 1 ชั่วโมง 2 นาที 30 วินาที ซึ่งเมื่อคิดเฉลี่ยเป็นเวลาที่ใช้ต่อพลอย 1 เม็ด จะพบว่า การเจียรระโนพลอยใช้เวลา 4 นาที 28 วินาที ต่อพลอย 1 เม็ด และหากพิจารณาเฉพาะเวลาที่เครื่องเจียรระโนทำงานจะพบว่าใช้เวลาทั้งสิ้น 33 นาที 23 วินาที หรือคิดเป็นเวลา 2 นาที 23 วินาที ต่อพลอย 1 เม็ด

4. จากตารางที่ 8.16 พบว่าขนาดของพลอยที่เจียรระโนออกมาได้ มีถึงแม้ว่าขนาดไม่เท่ากันทุกเม็ดแต่ขนาดที่ได้ใกล้เคียงกัน โดยสังเกตว่าพลอยเม็ดแรกๆจะมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดท้ายๆ ในการทดลองทุกๆชุด เช่นเดียวกับการเจียรระโนพลอยแบบสมมาตร จึงสันนิษฐานว่ามีความเป็นไปได้ที่การตั้งระดับของเครื่องเจียรระโนอาจจะยังทำได้ไม่ดีพอเป็นผลให้จานเจียรระโนเอียง โดยพลอยที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่ได้ออกมามีขนาดเส้นทแยงมุม 3.09 มิลลิเมตร ในขณะที่เม็ดที่เล็กที่สุดที่ได้ออกมามีขนาดเส้นทแยงมุม 2.69 มิลลิเมตร โดยมีขนาดต่างกันอยู่ 0.4 และเมื่อสังเกตอัตราส่วนระหว่างเส้นทแยงมุมต่อความสูงของพลอยโดยเฉลี่ยของการทดลองแต่ละชุด จะเห็นว่า มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก และใกล้เคียงกับอัตราส่วนของขนาดจริงของพลอยจากแบบที่ออกแบบเอาไว้ ดังนั้นหากปรับตั้งเครื่องให้ดีขึ้น น่าจะทำให้ได้พลอยที่มีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้น

จากผลสรุปของการทดลองเจียรระโนพลอยทั้ง 2 รูปร่างข้างต้น สามารถอภิปรายผลการทดลองได้ดังนี้

1. สาเหตุที่ค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้จริงในการควบคุมเครื่องเจียรระโนพลอย กับค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมซียู-โซลิด มีค่าไม่เท่ากันเพราะ ระยะเวลาต่างๆของเครื่องเจียรระโนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ออกแบบไปบ้างเนื่องจากกระบวนการในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องเจียรระโน ซึ่งค่าระยะเวลาของเครื่องเจียรระโนที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งปลายถูกนำมาจากโปรแกรม CAD ที่ใช้ในการออกแบบเครื่อง ดังนั้นเมื่อการผลิตชิ้นงานจริงมีความคลาดเคลื่อน เมื่อควบคุมตำแหน่งปลายด้วยการใช้ระยะเวลาจากการออกแบบจึงมีผลให้ตำแหน่งปลายคลาดเคลื่อนไปด้วย

2. สาเหตุที่การควบคุมตำแหน่งในแต่ละแกนการเคลื่อนที่ มีค่าผิดพลาดไปบ้างอาจมีสาเหตุมาจากการสั่นสะเทือนของเครื่องเจียรระโน ขณะที่ทำการเจียรระโน เนื่องจากการยึด

เอนโคเดอรักับแกนเพลลาของมอเตอร์ที่ควบคุม ใช้การยึดด้วยข้อต่อยืดหยุ่น (Coupling) ทำให้เมื่อมีการสั่นสะเทือนของเครื่องเจียระไนทำให้ข้อตอดังกล่าวได้รับการสั่นสะเทือนไปด้วย เป็นผลให้การอ่านตำแหน่งมีค่าผิดพลาดไปบ้าง นอกจากนี้ น้ำหนักของแต่ละแกนการเคลื่อนที่ก็มีผลเช่นกัน เนื่องจากแต่ละแกนมีน้ำหนักมาก เมื่อเคลื่อนที่ในขณะที่เครื่องมีการสั่นสะเทือน อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้เช่นกัน อย่างไรก็ตาม ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมากซึ่งแทบจะไม่มีผลกับพลอยที่เจียระไน

3. พบว่าเวลาที่ใช้ในการเจียระไนของเครื่องเจียระไนเมื่อคิดเป็นเวลาต่อพลอย 1 เม็ดแล้วใช้เวลาอย่างมาก ซึ่งเวลาดังกล่าวสามารถปรับให้เร็วขึ้นได้โดยการปรับความเร็วในการเจียระไนของเครื่อง ทั้งนี้ขึ้นกับขนาดของเม็ดพลอย และชนิดของพลอย ที่ต้องสอดคล้องกับความเร็วในการเจียระไน เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับเครื่องได้

4. ขนาดของพลอยที่เจียระไนออกมาไม่เท่ากันทุกเม็ด แต่นับว่ามีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งหากสังเกตขนาดของพลอยจะพบว่าถึงแม้ขนาดจะไม่เท่ากัน แต่สัดส่วนของพลอยมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก จึงสันนิษฐานว่าอาจเกิดจากการตั้งระดับของเครื่องเจียระไนที่อาจจะไม่ได้ระดับพอ เนื่องจากข้อจำกัดในด้านของอุปกรณ์

## บทที่ 9

### บทสรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลสรุปของงานวิจัยฉบับนี้โดยรวม ปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน และสุดท้ายจะได้กล่าวถึงแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

#### 9.1 บทสรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องการออกแบบระบบควบคุมสำหรับเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ มีเป้าหมายในการลดต้นทุนของชุดอุปกรณ์ควบคุมของเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติลงจากเดิม และทำให้ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานเครื่องเจียระไนผ่านทางโปรแกรมที่สร้างขึ้นมาได้สะดวกและใช้งานได้ง่าย

ซึ่งผลสรุปที่ได้จากการทำงานวิจัยชิ้นนี้พบว่า ในแง่การลดต้นทุนของชุดอุปกรณ์ควบคุมสามารถลดค่าใช้จ่ายลงไปได้มากจากเดิม และในส่วนของโปรแกรมควบคุมการทำงานสามารถใช้งานได้สะดวกมากขึ้น เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ออกแบบขึ้นมาสำหรับใช้งานร่วมกับเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติโดยเฉพาะ ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจากผลการทดลองจะพบว่า การควบคุมตำแหน่งยังมีค่าผิดพลาดอยู่บ้าง แต่เชื่อว่าค่าผิดพลาดดังกล่าวเป็นผลมาจากปัจจัยภายนอก เช่น น้ำหนักของเครื่องเจียระไน แรงเสียดทานในระบบ และการสั่นสะเทือนขณะที่เครื่องทำงานเป็นต้น อีกทั้งค่าผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยมาก อย่างไรก็ตามในการทำการทดลอง ใช้วิธีการวัดด้วยอุปกรณ์วัดเบื้องต้น ได้แก่ เวอร์เนียคาลิเปอร์ และไมโครมิเตอร์ ในขณะที่ขนาดของเหลี่ยมอาศัยการสังเกตด้วยสายตาเป็นหลัก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการตรวจวัดพลอยจะต้องใช้เครื่องมือเฉพาะในการตรวจวัดโดยละเอียดซึ่งทางห้องปฏิบัติการไม่มีอุปกรณ์ชนิดนี้ จึงไม่สามารถทำการวัดได้

จากการพัฒนาระบบควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติในงานวิจัยนี้ ทำให้การพัฒนาเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติในประเทศไทย พัฒนาขึ้นไปอีกระดับหนึ่ง ซึ่งหากมีการปรับปรุงโครงสร้างของเครื่องให้ได้มาตรฐานมากขึ้น คาดว่าในอนาคตจะสามารถนำเครื่องเจียระไนที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมอัญมณีของประเทศไทย

## 9.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำงานวิจัย

ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทำงานวิจัยสามารถสรุปได้เป็นข้อๆดังนี้

1. การตั้งระดับของเครื่องเจียรระโนพลอยทำได้ยาก เนื่องจากชิ้นส่วนที่ทำขึ้นมาบางชิ้น มีขนาดที่คลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบไว้ ทำให้ในการตั้งระดับทำได้ยาก และเครื่องมือที่ใช้ในการตั้งระดับยังมีไม่ครบถ้วนและใช้งานลำบาก จึงทำให้ระดับของเครื่องอาจผิดพลาดไปบ้าง
2. ความสกปรกของเครื่องเจียรระโนพลอย เนื่องจากในการเจียรระโนหยาบมีการใช้น้ำหล่อเย็น เพื่อช่วยในการเจียรระโน ทำให้เกิดคราบน้ำ คราบสนิมที่เครื่อง และในขณะที่ทำการเจียรระโน น้ำหล่อเย็นก็ฟุ้งกระจาย ซึ่งต้องแก้ไขต่อไป
3. โครงสร้างของเครื่องเจียรระโนพลอยไม่แข็งแรง เพราะโครงสร้างทำมาจากอลูมิเนียม ทำให้ในขณะที่เจียรระโน มีการสั่นสะเทือนของโครงสร้าง ซึ่งอาจมีผลต่อขนาด รูปร่าง และคุณภาพผิวของพลอยได้ นอกจากนี้ยังทำให้เกิดเสียงดังในขณะที่เจียรระโนอีกด้วย
4. กาวที่ใช้ในการติดพลอยใช้เวลาในการอบค่อนข้างนาน ทำให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการเจียรระโนมากตามไปด้วย นอกจากนี้หากเจียรระโนด้วยความเร็วที่มากเกินไป ก็จะทำให้พลอยหลุดจากด้ามติดพลอยได้ เนื่องจากแรงยึดของกาวไม่พอ ดังนั้นในการเจียรระโนจะต้องใช้ความเร็วในการเจียรระโนให้เหมาะสมด้วย
5. ขนาดของพลอยดิบที่จัดเตรียมมีขนาดไม่เท่ากัน ทำให้ในการตั้งระยะยกของการเจียรระโนแต่ละชุดไม่เท่ากัน เนื่องจากขนาดของพลอยที่เตรียมมีขนาดไม่เท่ากัน
6. โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาใช้งานได้ง่ายขึ้นกว่าเดิม แต่ก็ยังมีบางจุดที่ใช้งานยากอยู่บ้าง ซึ่งต้องแก้ไขปรับปรุงต่อไป นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดในด้านการเจียรระโนรูปร่างของพลอย

## 9.3 ข้อเสนอแนะ

จากปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำงานวิจัยจะได้กล่าวถึงข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตดังนี้

1. ควรปรับปรุงโครงสร้างของเครื่องเจียรระโนให้มีความแข็งแรงมากกว่าเดิม โดยอาจจะใช้โครงสร้างที่เป็นเหล็ก เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของตัวเครื่องอันจะเป็นผลให้การสั่นสะเทือนขณะทำงานน้อยลง
2. ปรับปรุงคุณภาพในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องเจียรระโนพลอยให้มีคุณภาพมากขึ้น มีขนาดตรงตามที่ออกแบบไว้ เพื่อให้ง่ายต่อการตั้งระดับเครื่อง

3. ออกแบบระบบหล่อเย็นให้เป็นระบบ และมีการทำอุปกรณ์สำหรับกันน้ำกระเด็นขณะเจียรไน เพื่อความสะดวกสะอาดขณะทำงาน
4. พัฒนาโปรแกรมให้สามารถเจียรไนได้หลากหลายขึ้น เช่นการเจียรไนผิวโค้ง การเจียรไนผิวข้างให้เป็นรูปร่างต่างๆ เป็นต้น และใช้งานได้ง่ายขึ้นกว่าเดิม

## รายการอ้างอิง

- [1] นิรุช อำนวยศิลป์. คู่มือการเขียนโปรแกรม Microsoft Visual C++ Version 6.0.  
กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์เอเชียเพรส, 2542.
- [2] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร:  
สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [3] Craig, J. J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. Third edition. USA:  
Pearson Prentice Hall, 2005.
- [4] กฤษณ์ มะลิทอง. การพัฒนาโปรแกรมแปลรหัสเอ็นซีสำหรับตัวควบคุมซีเอ็นซีแบบ  
สถาปัตยกรรมเปิด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
- [5] สมจินต์ ธานันท์ศิริ. การออกแบบและสร้างเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย, 2549.
- [6] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การเก็ยงไกร สันธุเดชากุล และ ปรัชญา พิพัฒนานนท์.  
Development of A 3-D Solid Modeling System Based on The Parasolid Kernel for  
Gems Stone Faceting. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 22 (2551) : หน้า  
175.
- [7] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. หุ่นยนต์เจียระไนพลอยอัตโนมัติ(Automatic Gems Faceting  
Robot)[Online]. 2549. Available from: [http://products.innook.com/  
product.php?pid=60](http://products.innook.com/product.php?pid=60), [2008, August 19].
- [8] KITA (KOREA INTERNATIONAL TRADE ASSOCIATION). All Automatic Gems  
Faceting Machine[Online]. 2008. Available from: [http://www.tradekorea.com/  
product-detail/P00103003/All\\_Automatic\\_Gem\\_Faceting\\_Machine\\_AD\\_Series  
\\_.html#](http://www.tradekorea.com/product-detail/P00103003/All_Automatic_Gem_Faceting_Machine_AD_Series_.html#), [2008, August 19].
- [9] Keller, B. Simple Jack Design[Online]. 1995. Available from:  
[http://www.rockhounds.com/rockshop/gem\\_designs/simple\\_jack/simple\\_jack2.  
html](http://www.rockhounds.com/rockshop/gem_designs/simple_jack/simple_jack2.html), [2008, August 19].
- [10] Keller, B. Standard Round Billion Classic Design[Online]. 1995. Available from:  
[http://www.rockhounds.com/rockshop/gem\\_designs/srb\\_variations/srb1.html](http://www.rockhounds.com/rockshop/gem_designs/srb_variations/srb1.html),  
[2008, August 19].



[11] Keller, B. Four Triangles Design[Online].1995. Available from:

[http://www.rockhounds.com/rockshop/gem\\_designs/four\\_triangles/four\\_triangles\\_2.html](http://www.rockhounds.com/rockshop/gem_designs/four_triangles/four_triangles_2.html), [2008, August 19].

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใช้ และการเชื่อมต่อเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติกับคอมพิวเตอร์

#### 1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อการทำงานของเครื่อง

จากบทที่ 3 ในรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติกับคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ทำการเชื่อมต่อ เพื่อแปลงสัญญาณส่งออก และสัญญาณป้อนกลับ และอุปกรณ์ขยายสัญญาณเพื่อส่งไปขับให้มอเตอร์ทำงาน โดยที่ในหัวข้อนี้จะกล่าวคร่าวๆถึง ชื่อเรียก และหน้าที่ในการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชิ้น

##### 1.1 การ์ดแปลงสัญญาณ (PCI Multifunction I/O Board)

สำหรับเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติจะใช้การ์ดแปลงสัญญาณ ดังรูปที่ ก.1 อุปกรณ์ตัวนี้จะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณดิจิทัล (Digital) จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก (Analog) เพื่อส่งไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละแกนการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่รับค่าตำแหน่งที่วัดได้จากเอนโคเดอร์ในแต่ละแกนการเคลื่อนที่ เพื่อทำการควบคุมแบบป้อนกลับต่อไป



รูปที่ ก.1 การ์ดแปลงสัญญาณ

ในส่วนของการเชื่อมต่อของการ์ดแปลงสัญญาณนี้จะประกอบไปด้วยช่องการเชื่อมต่อทั้งสิ้น 5 ช่อง ประกอบไปด้วย ช่องต่างๆดังนี้

**ช่อง J1** เป็นช่องที่ใช้ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลจากคอมพิวเตอร์ ให้เป็นสัญญาณแอนะล็อก เพื่อส่งออกไปสั่งงานให้อุปกรณ์ภายนอกทำงานโดยสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ทั้งสิ้น 4 ชิ้น นั่นคือสำหรับการ์ดหนึ่งตัว สามารถส่งสัญญาณควบคุมมอเตอร์ได้ทั้งสิ้น 4 ตัว ดังนั้นสำหรับการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ จึงใช้การ์ดเพียงตัวเดียวในการ

ควบคุม เนื่องจากควบคุมมอเตอร์ 4 ตัว พอดีนอกจากนี้ในช่องนี้ยังใช้เป็นช่องทางในการรับสัญญาณแอนาล็อกจากภายนอกแล้วแปลงให้เป็นสัญญาณดิจิทัล สำหรับให้คอมพิวเตอร์ประมวลผลได้อีกด้วย โดยสามารถรับสัญญาณจากภายนอกได้ทั้งสิ้น 15 สัญญาณ

**ช่อง J2 และ J3** ทั้ง 2 ช่องนี้เป็นช่องที่ใช้สำหรับการควบคุม Digital I/O ของการ์ด หรือการควบคุมแบบ เปิด/ปิด นั้นเอง สำหรับในส่วนนี้จะสามารถต่อการควบคุมเปิดปิดกับอุปกรณ์ภายนอกได้มากถึง 48 ชัน

**ช่อง J4 และ J5** ทั้ง 2 ช่องนี้ เป็นช่องที่ใช้สำหรับการต่อสัญญาณจาก Encoder เพื่อส่งกลับไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์ สำหรับใช้ในการควบคุม โดยแต่ละช่องสามารถเชื่อมต่อกับเอนโคเดอร์ได้ทั้งสิ้น 3 ตัว สรุปคือการ์ด 1 ตัว สามารถต่อสัญญาณจากเอนโคเดอร์ได้ 6 ตัว

## 1.2 อุปกรณ์ขยายกำลังงาน (Power Amplifier)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ จะต้องมีอุปกรณ์ขยายกำลังงาน เพื่อให้พลังงานกับมอเตอร์ โดยสำหรับเครื่องเจียร์ะโนพลอยแบบอัตโนมัติจะใช้อุปกรณ์ขยายกำลังดังรูปที่ ก.2 ในการขยายกำลังงานส่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์ อุปกรณ์ตัวนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณอ้างอิงที่ส่งออกมาจากโปรแกรม ผ่านการ์ดแปลงสัญญาณ เมื่อได้รับสัญญาณอ้างอิงแล้วจะทำการขยายสัญญาณเพื่อส่งไปขับมอเตอร์ต่อไป โดยในที่นี้จะทำงานในโหมดควบคุมการขยายกระแส (Current Amplifier)



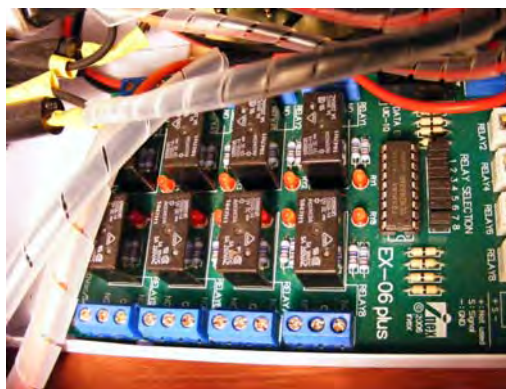
รูปที่ ก.2 อุปกรณ์ขยายกำลังงาน

สำหรับอุปกรณ์ขยายกำลังงาน 1 ตัว จะใช้คู่กับเซอร์โวมอเตอร์ได้แค่ตัวเดียวเท่านั้น ดังนั้นสำหรับเครื่องเจียร์ะโนพลอยแบบอัตโนมัติ จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ขยายกำลังงานทั้งสิ้น 4 ตัวด้วยกัน สำหรับการดำเนินงานจะต้องมีอุปกรณ์ป้อนไฟกระแสตรงในช่วงระหว่าง 22 V – 125 V เป็นอุปกรณ์จ่ายกำลังให้กับอุปกรณ์ขยายกำลังงาน ถ้าน้อยกว่านี้จะไม่สามารถทำงานได้ ในขณะที่หากเกินกว่านี้จะทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

### 1.3 บอร์ดสำหรับขับรีเลย์ (Relay Driver Board)

รีเลย์เป็นอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าแบบหนึ่งที่ใช้ในการตัดต่อวงจร เมื่อขดลวดรีเลย์มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ทำให้หน้าสัมผัสโลหะที่ปกติเปิดแยกวงจรกันอยู่ ถูกดูดติดกันเกิดการต่อวงจรขึ้น ในขณะที่หน้าสัมผัสที่เดิมต่อวงจรอยู่ก็จะแยกออกจากกัน

สำหรับบอร์ดขับรีเลย์จะใช้ในการควบคุมแบบ I/O คือควบคุมแบบเปิด-ปิด โดยจะใช้กับการเปิด-ปิด จานเจียร์ไน และใช้เปิด-ปิด การสายจานเจียร์ไน โดยที่บอร์ดสำหรับขับรีเลย์นี้ จะรับสัญญาณ Digital I/O จากการ์ดแปลงสัญญาณเพื่อเปิด-ปิด รีเลย์แต่ละตัว บอร์ดขับรีเลย์มีลักษณะดังรูปที่ ก.3 โดยที่บอร์ดชุดนี้เป็นบอร์ดที่ต่อวงจรรีเลย์มาแล้วสำเร็จรูป

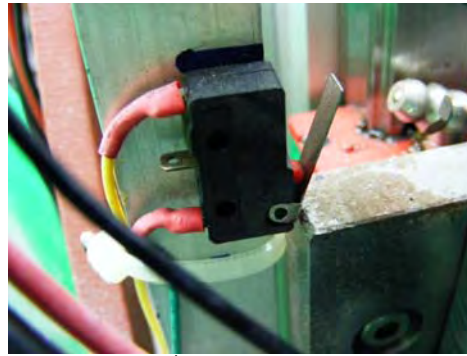


รูปที่ ก.3 บอร์ดสำหรับขับรีเลย์

สำหรับบอร์ดขับรีเลย์ประกอบไปด้วยรีเลย์ทั้งสิ้น 8 ตัว จะทำงานได้โดยต้องป้อนไฟตรง 12 V เป็นไฟเลี้ยงรีเลย์แต่ละตัว ในขณะที่สัญญาณที่ใช้ในการเปิด-ปิด รีเลย์ จะต้องต่อมาจากช่องสัญญาณ I/O ของการ์ดแปลงสัญญาณ โดยที่รีเลย์แต่ละตัวมีพิกัดหน้าสัมผัส 220 Vac/5A หากชุดอุปกรณ์ภายนอกใช้กำลังไฟเกินกว่านี้จะทำให้รีเลย์เสียหายได้ เช่น ตัวมอเตอร์ที่ใช้ขับชุดจานเจียร์ไนขณะเริ่มทำงานใช้ไฟสูงกว่า 5A จึงต้องนำเอา รีเลย์ตัวที่ใหญ่ขึ้น มาต่อพ่วงเข้าไปอีกหนึ่งตัว

### 1.4 ลิ้มิตสวิตช์ (Limit Switch)

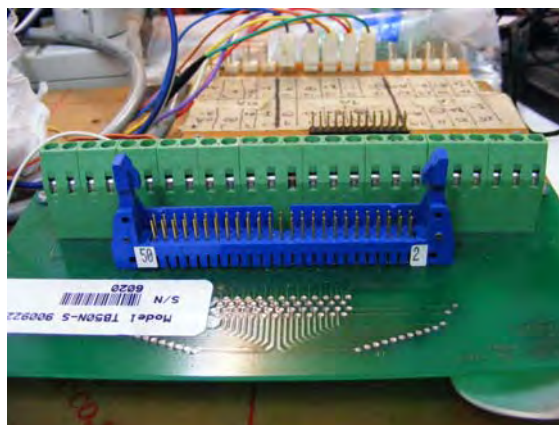
ลักษณะจะเป็นสวิตช์เล็กๆ ดังรูปที่ ก.4 จะใช้ในการป้องกันไม่ให้เกิดเคลื่อนที่ในแต่ละแกนเคลื่อนเกินจากขอบเขต ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติได้ โดยจะติดตั้งไว้สำหรับใน แกน X และ แกน Z โดยจะต่อสัญญาณ I/O จากการ์ดแปลงสัญญาณเข้ากับสวิตช์ เมื่อการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน เคลื่อนไปชนสวิตช์ เครื่องก็จะอยู่การทำงานเพื่อความปลอดภัยทันที



รูปที่ ก.4 ลิ้มิตสวิตช์

### 1.5 เทอร์มินัลบอร์ด (Terminal Board)

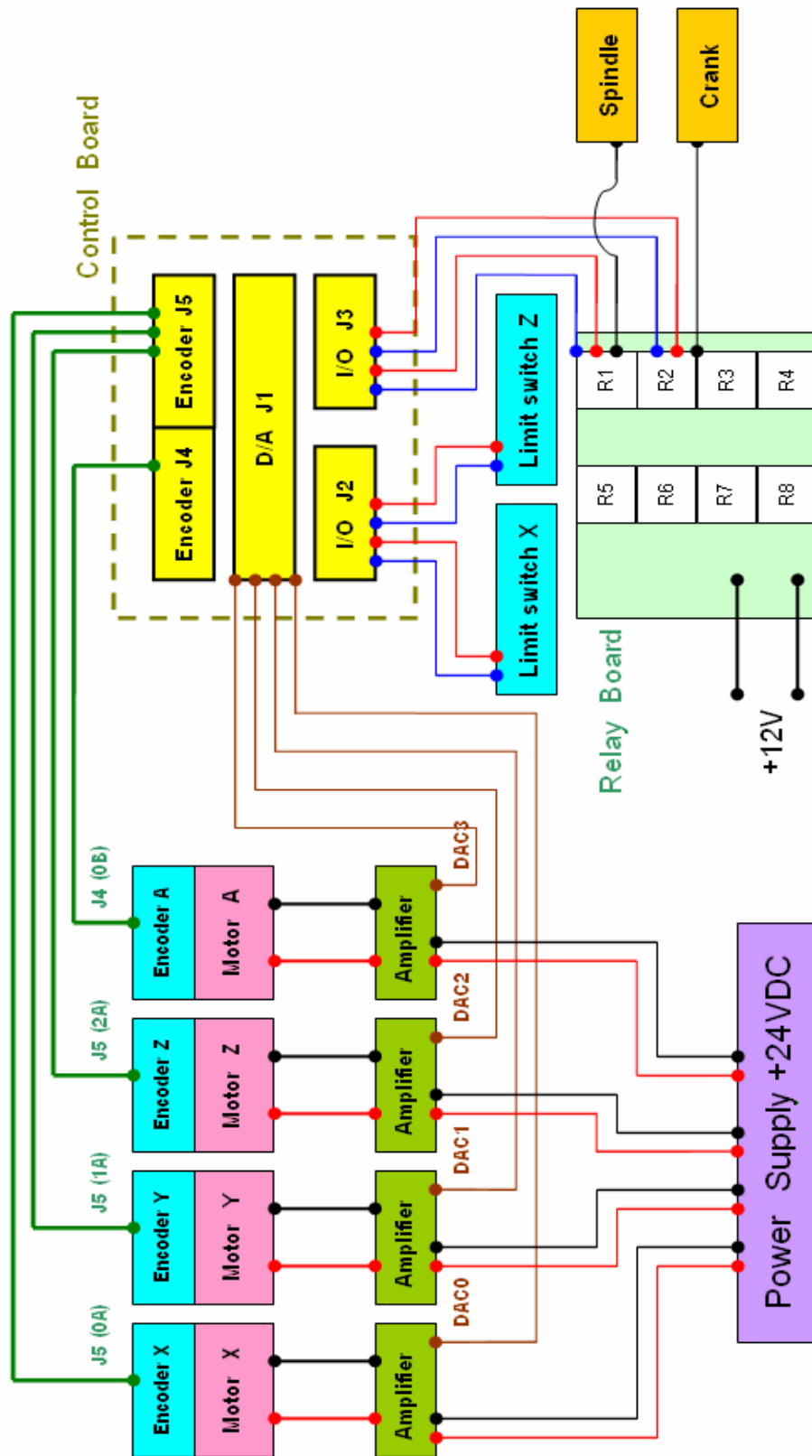
เป็นบอร์ดที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อสายสัญญาณจากภายนอก เช่น สายไฟจากมอเตอร์ สายสัญญาณเอนโคเดอร์ และสายสัญญาณอื่นๆ เข้ากับการ์ดแปลงสัญญาณ เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณ เทอร์มินัลบอร์ด แสดงได้ดังรูปที่ ก.5 โดยสำหรับเครื่องเจียระไนพลอยจะใช้ เทอร์มินัลบอร์ด 4 ชุด เพื่อเชื่อมต่อสายสัญญาณจากมอเตอร์ เอนโคเดอร์ และ สัญญาณ I/O



รูปที่ ก.5 เทอร์มินัลบอร์ด

### 3. การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆระหว่างคอมพิวเตอร์และเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติ

ในส่วนนี้จะแสดงแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอก คือเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติ กับอุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ ก.6



รูปที่ ก. 6 แผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆระหว่างเครื่องเจียระไนพลังยและคอมพิวเตอร์

## ภาคผนวก ข

## ตารางสรุปผลการทดลองการใช้โปรแกรมควบคุม

ในภาคผนวก ข. ได้นำเอาตารางแสดงตำแหน่งในแต่ละแกนการเคลื่อนที่ ที่ได้จากการทดลองที่ 7.2 ในบทที่ 7 มาแสดงไว้โดยละเอียด

ตารางที่ ข.1 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 1

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pm	-1194.44	-1195	-0.56	-0.020	0.181	0.18	-0.001	0	0	0	0.000
		-1194	0.44	0.016		0.181	0.000	10575	10576	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	21150	21151	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	31725	31725	0	0.000
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	42300	42300	0	0.000
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	52875	52876	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	63450	63451	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	74025	74027	2	0.009
				mean		-0.016		mean	0.000		
		max	-0.56	-0.020		max	-0.001		max	2	0.009

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pb	-1250	-1249	1	0.036	0.25	0.248	-0.002	2643.75	2644	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	7931.25	7933	1.75	0.007
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	13218.8	13219	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	18506.3	18508	1.75	0.007
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	23793.8	23795	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	29081.3	29082	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	34368.8	34369	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	39656.3	39657	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	44943.8	44944	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	55518.8	55519	0.25	0.001
		-1249	1	0.036		0.248	-0.002	60806.3	60807	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	66093.8	66095	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	71381.3	71382	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	76668.8	76669	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	81956.3	81958	1.75	0.007
		mean	0.005		mean	-0.001			mean	0.003	
		max	-1	-0.036		max	-0.002		max	1.75	0.007



ตารางที่ ข.2 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 2

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pm	-1194.44	-1195	-0.56	-0.020	0.181	0.181	0.000	0	0	0	0.000
		-1194	0.44	0.016		0.18	-0.001	10575	10576	1	0.004
		-1194	0.44	0.016		0.18	-0.001	21150	21152	2	0.009
		-1194	0.44	0.016		0.18	-0.001	31725	31726	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	42300	42302	2	0.009
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	52875	52875	0	0.000
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	63450	63450	0	0.000
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	74025	74026	1	0.004
		<b>mean</b>	<b>-0.007</b>		<b>mean</b>	<b>0.000</b>		<b>mean</b>	<b>0.004</b>		
		<b>max</b>	<b>-0.56</b>	<b>-0.020</b>		<b>max</b>	<b>-0.001</b>		<b>max</b>	<b>2</b>	<b>0.009</b>

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pb	-1250	-1250	0	0.000	0.25	0.249	-0.001	2643.75	2645	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	7931.25	7932	0.75	0.003
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	13218.8	13220	1.25	0.005
		-1249	1	0.036		0.248	-0.002	18506.3	18507	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	23793.8	23795	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	29081.3	29082	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	34368.8	34370	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	39656.3	39656	-0.25	-0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	44943.8	44946	2.25	0.010
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	55518.8	55520	1.25	0.005
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	60806.3	60807	0.75	0.003
		-1249	1	0.036		0.248	-0.002	66093.8	66094	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	71381.3	71382	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	76668.8	76669	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	81956.3	81957	0.75	0.003
		<b>mean</b>	<b>-0.002</b>		<b>mean</b>	<b>-0.001</b>		<b>mean</b>	<b>0.004</b>		
		<b>max</b>	<b>1</b>	<b>0.036</b>		<b>max</b>	<b>-0.002</b>		<b>max</b>	<b>2.25</b>	<b>0.010</b>

ตารางที่ ข.3 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 3

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pm	-1194.44	-1194	0.44	0.016	0.181	0.18	-0.001	0	0	0	0.000
		-1194	0.44	0.016		0.18	-0.001	10575	10577	2	0.009
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	21150	21151	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	31725	31727	2	0.009
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	42300	42301	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	52875	52876	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	63450	63451	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	74025	74026	1	0.004
		mean	-0.011		mean	0.000			mean	0.005	
		max	-0.56	-0.020		max	-0.001		max	2	0.009

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pb	-1250	-1250	0	0.000	0.25	0.249	-0.001	2643.75	2646	2.25	0.010
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	7931.25	7932	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	13218.8	13220	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	18506.3	18507	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	23793.8	23794	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	29081.3	29082	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	34368.8	34369	0.25	0.001
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	39656.3	39658	1.75	0.007
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	44943.8	44945	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	55518.8	55518	-0.75	-0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	60806.3	60807	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	66093.8	66095	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	71381.3	71382	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	76668.8	76669	0.25	0.001
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	81956.3	81957	0.75	0.003
				mean		-0.005		mean	-0.001		
		max	-1	-0.036		max	0.001		max	2.25	0.010

ตารางที่ ข.4 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 4

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pm	-1194.44	-1194	0.44	0.016	0.181	0.18	-0.001	0	0	0	0.000
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	10575	10576	1	0.004
		-1194	0.44	0.016		0.18	-0.001	21150	21150	0	0.000
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	31725	31726	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	42300	42300	0	0.000
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	52875	52877	2	0.009
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	63450	63450	0	0.000
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	74025	74026	1	0.004
		mean	-0.011		mean	0.000			mean	0.003	
		max	-0.56	-0.020		max	0.000		max	2	0.009

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pb	-1250	-1250	0	0.000	0.25	0.249	-0.001	2643.75	2645	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	7931.25	7932	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	13218.8	13218	-0.75	-0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	18506.3	18506	-0.25	-0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	23793.8	23794	0.25	0.001
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	29081.3	29083	1.75	0.007
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	34368.8	34369	0.25	0.001
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	39656.3	39657	0.75	0.003
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	44943.8	44945	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	50231.3	50231	-0.25	-0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	55518.8	55519	0.25	0.001
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	60806.3	60807	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	66093.8	66094	0.25	0.001
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	71381.3	71383	1.75	0.007
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	76668.8	76670	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	81956.3	81958	1.75	0.007
		mean	-0.011		mean	0.000			mean	0.003	
		max	-1	-0.036		max	0.001		max	1.75	0.007

ตารางที่ ข.5 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 5

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pm	-1194.44	-1195	-0.56	-0.020	0.181	0.181	0.000	0	0	0	0.000
		-1194	0.44	0.016		0.18	-0.001	10575	10576	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	21150	21151	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	31725	31726	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	42300	42301	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	52875	52877	2	0.009
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	63450	63451	1	0.004
		-1195	-0.56	-0.020		0.181	0.000	74025	74026	1	0.004
		mean	-0.016		mean	0.000			mean	0.004	
		max	-0.56	-0.020		max	-0.001		max	2	0.009

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Pb	-1250	-1250	0	0.000	0.25	0.249	-0.001	2643.75	2644	0.25	0.001
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	7931.25	7933	1.75	0.007
		-1249	1	0.036		0.248	-0.002	13218.8	13220	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	18506.3	18507	0.75	0.003
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	23793.8	23793	-0.75	-0.003
		-1249	1	0.036		0.248	-0.002	29081.3	29082	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	34368.8	34369	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	39656.3	39657	0.75	0.003
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	44943.8	44943	-0.75	-0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	55518.8	55519	0.25	0.001
		-1251	-1	-0.036		0.251	0.001	60806.3	60806	-0.25	-0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	66093.8	66095	1.25	0.005
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	71381.3	71383	1.75	0.007
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	76668.8	76669	0.25	0.001
		-1250	0	0.000		0.249	-0.001	81956.3	81958	1.75	0.007
		mean	-0.005		mean	-0.001			mean	0.003	
		max	1	0.036		max	-0.002		max	1.75	0.007

ตารางที่ ข.6 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 1

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cm	1166.67	-1167	-0.33	-0.012	0.962	0.962	0	0	0	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	10575	10576	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	21150	21151	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	31725	31727	2	0.009
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	42300	42302	2	0.009
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	52875	52876	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	63450	63450	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	74025	74026	1	0.004
			mean	-0.012		mean	0			mean	0.004
		max	-0.33	-0.012		max	0			max	0.009

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cb	-1305.56	-1306	-0.44	-0.016	1.01	1.01	0	2643.75	2646	2.25	0.010
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	7931.25	7932	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	13218.8	13220	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	18506.3	18507	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	23793.8	23794	0.25	0.001
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	29081.3	29082	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	34368.8	34370	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	39656.3	39658	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	44943.8	44945	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	50231.3	50233	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	55518.8	55519	0.25	0.001
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	60806.3	60808	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	66093.8	66095	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	71381.3	71383	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	76668.8	76671	2.25	0.010
-1306	-0.44	-0.016	1.01	0	81956.3	81958	1.75	0.007			
			mean	-0.016		mean	0			mean	0.006
		max	-0.44	-0.016		max	0			max	0.01

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
S	-750	-750	0	0.000	0.956	0.955	-0.001	5287.5	5289	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	15862.5	15862	-0.5	-0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	26437.5	26438	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	37012.5	37014	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	47587.5	47589	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	58162.5	58164	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	68737.5	68739	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	79315.5	79314	-1.5	-0.006
			mean	0.000		mean	-0.001			mean	0.003
		max	0	0		max	-0.001			max	0.006

ตารางที่ ข.6 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม  
Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 1 (ต่อ)

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
T	0	-1	-1	-0.036	0.58	0.579	-0.001	0	-1	-1	-0.004
		<b>max</b>	<b>-1</b>	<b>-0.036</b>		<b>max</b>	<b>-0.001</b>		<b>max</b>	<b>-1</b>	<b>-0.004</b>

ตารางที่ ข.7 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม  
Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 2

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cm	-1166.67	-1167	-0.33	-0.012	0.962	0.962	0	0	0	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	10575	10576	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	21150	21151	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	31725	31726	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	42300	42302	2	0.009
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	52875	52875	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	63450	63451	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	74025	74026	1	0.004
		<b>mean</b>	<b>-0.012</b>		<b>mean</b>	<b>0</b>		<b>mean</b>	<b>0.004</b>		
		<b>max</b>	<b>-0.33</b>	<b>-0.012</b>		<b>max</b>	<b>0</b>		<b>max</b>	<b>2</b>	<b>0.009</b>

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cb	-1305.56	-1306	-0.44	-0.016	1.01	1.01	0	2643.75	2645	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	7931.25	7932	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	13218.8	13220	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	18506.3	18508	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	23793.8	23795	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	29081.3	29083	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	34368.8	34370	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	39656.3	39658	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	44943.8	44945	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	55518.8	55519	0.25	0.001
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	60806.3	60808	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	66093.8	66095	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	71381.3	71383	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	76668.8	76670	1.25	0.005
-1306	-0.44	-0.016	1.01	0	81956.3	81958	1.75	0.007			
		<b>mean</b>	<b>-0.016</b>		<b>mean</b>	<b>0</b>		<b>mean</b>	<b>0.006</b>		
		<b>max</b>	<b>-0.44</b>	<b>-0.016</b>		<b>max</b>	<b>0</b>		<b>max</b>	<b>1.75</b>	<b>0.007</b>

ตารางที่ ข.7 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 2 (ต่อ)

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
S	-750	-750	0	0.000	0.956	0.955	-0.001	5287.5	5288	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	15862.5	15863	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	26437.5	26438	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	37012.5	37013	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	47587.5	47589	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	58162.5	58164	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	68737.5	68739	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	79315.5	79316	0.5	0.002
			mean	0.000				mean	-0.001		
			max	0				max	-0.001		
										mean	0.004
										max	1.5
											0.006

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
T	0	0	0	0.000	0.58	0.58	0	0	0	0	0.000
			max	0				max	0		
										max	0
											0

ตารางที่ ข.8 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 3

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cm	-1166.67	-1167	-0.33	-0.012	0.962	0.962	0	0	0	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	10575	10575	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	21150	21150	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	31725	31726	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	42300	42301	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	52875	52876	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	63450	63451	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	74025	74026	1	0.004
			mean	-0.012				mean	0		
			max	-0.33				max	0		
										mean	0.003
										max	1
											0.004

ตารางที่ ข.8 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 3 (ต่อ)

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cb	-1305.56	-1306	-0.44	-0.016	1.01	1.01	0	2643.75	2645	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	7931.25	7932	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	13218.8	13219	0.25	0.001
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	18506.3	18507	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	23793.8	23794	0.25	0.001
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	29081.3	29082	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	34368.8	34370	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	39656.3	39657	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	44943.8	44944	0.25	0.001
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	55518.8	55521	2.25	0.010
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	60806.3	60807	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	66093.8	66095	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	71381.3	71382	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	76668.8	76670	1.25	0.005
-1306	-0.44	-0.016	1.01	0	81956.3	81957	0.75	0.003			
		mean	-0.016		mean	0		mean	0.004		
		max	-0.44	-0.016	max	0		max	2.25	0.01	

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
S	-750	-750	0	0.000	0.956	0.955	-0.001	5287.5	5289	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	15862.5	15863	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	26437.5	26438	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	37012.5	37013	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	47587.5	47588	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	58162.5	58163	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	68737.5	68738	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	79315.5	79313	-2.5	-0.011
		mean	0.000		mean	-0.001		mean	0.001		
		max	0	0	max	-0.001		max	-2.5	-0.011	

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
T	0	1	1	0.036	0.58	0.579	-0.001	0	-2	-2	-0.009
		max	1	0.036		max	-0.001		max	-2	-0.009



ตารางที่ ข.9 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 4

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cm	-1166.67	-1167	-0.33	-0.012	0.962	0.962	0	0	0	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	10575	10576	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	21150	21150	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	31725	31726	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	42300	42301	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	52875	52876	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	63450	63451	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	74025	74027	2	0.009
		mean	-0.012		mean	0		mean	0.004		
		max	-0.33	-0.012	max	0		max	2	0.009	

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cb	-1305.56	-1306	-0.44	-0.016	1.01	1.01	0	2643.75	2645	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	7931.25	7933	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	13218.8	13220	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	18506.3	18507	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	23793.8	23794	0.25	0.001
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	29081.3	29082	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	34368.8	34370	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	39656.3	39657	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	44943.8	44945	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	50231.3	50233	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	55518.8	55520	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	60806.3	60807	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	66093.8	66095	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	71381.3	71382	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	76668.8	76670	1.25	0.005
-1306	-0.44	-0.016	1.01	0	81956.3	81958	1.75	0.007			
		mean	-0.016		mean	0		mean	0.005		
		max	-0.44	-0.016	max	0		max	1.75	0.007	

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
S	-750	-750	0	0.000	0.956	0.955	-0.001	5287.5	5289	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	15862.5	15864	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	26437.5	26439	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	37012.5	37013	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	47587.5	47588	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	58162.5	58163	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	68737.5	68739	1.5	0.006
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	79315.5	79314	-1.5	-0.006
		mean	0.000		mean	-0.001		mean	0.003		
		max	0	0	max	-0.001		max	-1.5	-0.006	

ตารางที่ ข.9 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 4 (ต่อ)

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
T	0	0	0	0.000	0.58	0.579	-0.001	0	0	0	0.000
		max	0	0		max	-0.001		max	0	0

ตารางที่ ข.10 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 5

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cm	-1166.67	-1167	-0.33	-0.012	0.962	0.962	0	0	0	0	0.000
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	10575	10576	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	21150	21151	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	31725	31726	1	0.004
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	42300	42302	2	0.009
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	52875	52877	2	0.009
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	63450	63452	2	0.009
		-1167	-0.33	-0.012		0.962	0	74025	74026	1	0.004
		mean	-0.012		mean	0		Mean	0.005		
		max	-0.33	-0.012		max	0		max	2	0.009

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
Cb	-1305.56	-1306	-0.44	-0.016	1.01	1.01	0	2643.75	2646	2.25	0.010
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	7931.25	7932	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	13218.8	13219	0.25	0.001
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	18506.3	18507	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	23793.8	23794	0.25	0.001
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	29081.3	29082	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	34368.8	34370	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	39656.3	39658	1.75	0.007
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	44943.8	44945	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	55518.8	55520	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	60806.3	60807	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	66093.8	66095	1.25	0.005
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	71381.3	71382	0.75	0.003
		-1306	-0.44	-0.016		1.01	0	76668.8	76670	1.25	0.005
-1306	-0.44	-0.016	1.01	0	81956.3	81958	1.75	0.007			
		mean	-0.016		mean	0		Mean	0.005		
		max	-0.44	-0.016		max	0		max	2.25	0.01

ตารางที่ ข.10 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม

Standard Round Brilliant ในการทดลองที่ 5 (ต่อ)

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
S	-750	-750	0	0.000	0.956	0.955	-0.001	5287.5	5288	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	15862.5	15863	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	26437.5	26438	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	37012.5	37013	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	47587.5	47588	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	58162.5	58163	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	68737.5	68738	0.5	0.002
		-750	0	0.000		0.955	-0.001	79312.5	79313	-1.5	-0.006
		mean	0.000		mean	-0.001		Mean	0.001		
		max	0	0	max	-0.001		max	-1.5	-0.006	

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
T	0	-1	-1	-0.036	0.58	0.579	-0.001	0	-1	-1	-0.004
		max	-1	-0.036		max	-0.001		max	-1	-0.004

ตารางที่ ข.11 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Four

Triangles ในการทดลองที่ 1

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
a	-1444.44	-1444	0.44	0.016	0.180	0.178	-0.002	3525	3526	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0.000	24675	24676	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0.000	31725	31726	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0.000	52875	52875	0	0.000
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0.000	59925	59926	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0.000	81075	81076	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0.000	81075	81076	1	0.004
		mean	-0.014		mean	0.000		Mean	0.004		
		max	-0.56	-0.020	max	-0.002		max	1	0.004	

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
e	-1166.67	-1166	0.67	0.024	0.160	0.158	-0.002	6168.75	6169	0.25	0.001
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	22031.3	22033	1.75	0.007
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	34368.8	34369	0.25	0.001
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	62568.8	62570	1.25	0.005
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	78431.3	78433	1.75	0.007
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	78431.3	78433	1.75	0.007
		mean	-0.006		mean	-0.001		Mean	0.004		
		max	0.67	0.024	max	-0.002		max	1.75	0.007	

ตารางที่ ข.12 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียรในด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Four  
Trianglesในการทดลองที่ 2

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
a	-1444.44	-1444	0.44	0.016	0.180	0.178	-0.002	3525	3527	2	0.009
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	24675	24676	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	31725	31726	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	52875	52876	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	59925	59925	0	0.000
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	81075	81075	0	0.000
		mean	-0.014		mean	0.000			Mean	0.004	
		max	-0.56	-0.020		max	-0.002		max	2	0.009

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
e	-1166.67	-1166	0.67	0.024	0.160	0.158	-0.002	6168.75	6169	0.25	0.001
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	22031.3	22032	0.75	0.003
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	34368.8	34370	1.25	0.005
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	62568.8	62570	1.25	0.005
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	78431.3	78433	1.75	0.007
		mean	-0.006		mean	-0.001			Mean	0.004	
		max	0.67	0.024		max	-0.002		max	1.75	0.007

ตารางที่ ข.13 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียรในด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Four  
Trianglesในการทดลองที่ 3

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
a	-1444.44	-1445	-0.56	-0.020	0.180	0.180	0.000	3525	3525	0	0.000
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0.000	24675	24676	1	0.004
		-1444	0.44	0.016		0.178	-0.002	31725	31726	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0.000	52875	52875	0	0.000
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0.000	59925	59926	1	0.004
		-1444	0.44	0.016		0.178	-0.002	81075	81076	1	0.004
		mean	-0.008		mean	-0.001			Mean	0.003	
		max	-0.56	-0.020		max	-0.002		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
e	-1166.67	-1166	0.67	0.024	0.160	0.158	-0.002	6168.75	6170	1.25	0.005
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	22031.3	22032	0.75	0.003
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	34368.8	34368	-0.75	-0.003
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	62568.8	62570	1.25	0.005
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	78431.3	78432	0.75	0.003
		mean	-0.006		mean	-0.001			Mean	0.003	
		max	0.67	0.024		max	-0.002		max	1.25	0.005

ตารางที่ ข.14 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียรในด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Four  
Trianglesในการทดลองที่ 4

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
a	-1444.44	-1444	0.44	0.016	0.180	0.178	-0.002	3525	3525	0	0.000
		-1444	0.44	0.016		0.178	-0.002	24675	24676	1	0.004
		-1444	0.44	0.016		0.178	-0.002	31725	31726	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	52875	52876	1	0.004
		-1444	0.44	0.016		0.178	-0.002	59925	59925	0	0.000
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	81075	81075	0	0.000
		mean	0.004		mean	-0.001			Mean	0.002	
		max	-0.56	-0.020		max	-0.002		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
e	-1166.67	-1166	0.67	0.024	0.160	0.158	-0.002	6168.75	6169	0.25	0.001
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	22031.3	22031	-0.25	-0.001
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	34368.8	34370	1.25	0.005
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	50231.3	50233	1.75	0.007
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	62568.8	62570	1.25	0.005
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	78431.3	78432	0.75	0.003
		mean	-0.006		mean	-0.001			Mean	0.004	
		max	0.67	0.024		max	-0.002		max	1.75	0.007

ตารางที่ ข.15 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียรในด้านล่างพลอยของเหลี่ยม Four  
Trianglesในการทดลองที่ 5

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
a	-1444.44	-1445	-0.56	-0.020	0.180	0.180	0	3525	3526	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	24675	24676	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	31725	31726	1	0.004
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	52875	52875	0	0.000
		-1445	-0.56	-0.020		0.180	0	59925	59925	0	0.000
		-1444	0.44	0.016		0.178	-0.002	81075	81075	0	0.000
		mean	-0.014		mean	0.000			Mean	0.002	
		max	-0.56	-0.020		max	-0.002		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
e	-1166.67	-1166	0.67	0.024	0.160	0.158	-0.002	6168.75	6169	0.25	0.001
		-1166	0.67	0.024		0.158	-0.002	22031.3	22032	0.75	0.003
		-1166	0.67	0.024		0.158	-0.002	34368.8	34369	0.25	0.001
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	50231.3	50232	0.75	0.003
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	62568.8	62570	1.25	0.005
		-1167	-0.33	-0.012		0.159	-0.001	78431.3	78432	0.75	0.003
		mean	0.006		mean	-0.002			Mean	0.003	
		max	0.67	0.024		max	-0.002		max	1.25	0.005

ตารางที่ ข.16 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจาะระนาด้านบนพลอยของเหลี่ยม Four  
Triangles ในการทดลองที่ 1

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
1	-1263.89	-1264	-0.11	-0.004	1.000	1.000	0.038	3525	3527	2	0.009
		-1265	-1.11	-0.040		1.001	0.039	24675	24676	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	31725	31725	0	0.000
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	52875	52876	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	59925	59925	0	0.000
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	81075	81075	0	0.000
		mean	-0.010		mean	0.038			Mean	0.003	
		max	-1.11	-0.040		max	0.039		max	2	0.009

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
2	-933.33	-932	1.33	0.048	0.930	0.927	-0.003	1762.5	1764	1.5	0.006
		-933	0.33	0.012		0.929	-0.001	26437.5	26438	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	29962.5	29963	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	54637.5	54639	1.5	0.006
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	58162.5	58163	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	82837.5	82839	1.5	0.006
		mean	-0.006		mean	0.000			Mean	0.004	
		max	1.33	0.048		max	-0.003		max	1.5	0.006

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
3	-847.22	-848	-0.78	-0.028	0.900	0.900	0.000	0	0	0	0.000
		-847	0.22	0.008		0.899	-0.001	28200	28200	0	0.000
		-848	-0.78	-0.028		0.900	0.000	56400	56400	0	0.000
			mean	-0.016			mean	0.000			Mean
		max	-0.78	-0.016		max	-0.001		max	0	0.000

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
4	-791.67	-791	0.67	0.024	1.300	1.297	-0.003	14100	14100	0	0.000
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	42300	42301	1	0.004
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	70500	70501	1	0.004
			mean	0.000			mean	-0.001			Mean
		max	0.67	0.024		max	-0.003		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
5	0	0	0	0.000	0.680	0.679	-0.001	0	0	0	0.000
		max	0	0.000		max	-0.001	max	0	0.000	

ตารางที่ ข.17 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Four  
Triangles ในการทดลองที่ 2

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
1	-1263.89	-1263	0.89	0.032	1.000	0.998	0.036	3525	3525	0	0.000
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	24675	24676	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	31725	31726	1	0.004
		-1265	-1.11	-0.040		1.001	0.039	52875	52876	1	0.004
		-1263	0.89	0.032		0.998	0.036	59925	59926	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	81075	81076	1	0.004
		mean	0.002		mean	0.038			Mean	0.004	
		max	-1.11	-0.040		max	0.039		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
2	-933.33	-933	0.33	0.012	0.930	0.929	-0.001	1762.5	1764	1.5	0.006
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	26437.5	26438	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	29962.5	29963	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	54637.5	54639	1.5	0.006
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	58162.5	58163	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	82837.5	82839	1.5	0.006
		mean	-0.018		mean	0.001			Mean	0.004	
		max	-0.67	-0.024		max	0.001		max	1.5	0.006

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
3	-847.22	-848	-0.78	-0.028	0.900	0.900	0.000	0	0	0	0.000
		-847	0.22	0.008		0.899	-0.001	28200	28201	1	0.004
		-848	-0.78	-0.028		0.900	0.000	56400	56400	0	0.000
			mean	-0.016			mean	0.000			Mean
		max	-0.78	-0.016		max	-0.001		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
4	-791.67	-791	0.67	0.024	1.300	1.299	-0.001	14100	14100	0	0.000
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	42300	42300	0	0.000
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	70500	70501	1	0.004
		mean	0.000		mean	0.000			Mean	0.001	
		max	0.67	0.024		max	-0.001		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
5	0	0	0	0.000	0.680	0.679	-0.001	0	0	0	0.000
			max	0		0.000		max	-0.001		max

ตารางที่ ข.18 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจาะในระดับบนพลอยของเหลี่ยม Four  
Triangles ในการทดลองที่ 3

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
1	-1263.89	-1263	0.89	0.032	1.000	0.998	0.036	3525	3526	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	24675	24676	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	31725	31725	0	0.000
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	52875	52876	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	59925	59925	0	0.000
		-1265	-1.11	-0.040		1.001	0.039	81075	81076	1	0.004
		mean	-0.004		mean	0.038			Mean	0.003	
		max	-1.11	-0.040		max	0.039		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
2	-933.33	-934	-0.67	-0.024	0.930	0.931	0.001	1762.5	1763	0.5	0.002
		-933	0.33	0.012		0.929	-0.001	26437.5	26438	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	29962.5	29964	1.5	0.006
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	54637.5	54638	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	58162.5	58163	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	82837.5	82839	1.5	0.006
		mean	-0.018		mean	0.001			Mean	0.004	
		max	-0.67	-0.024		max	0.001		max	1.5	0.006

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
3	-847.22	-848	-0.78	-0.028	0.900	0.900	0.000	0	0	0	0.000
		-847	0.22	0.008		0.899	-0.001	28200	28199	-1	-0.004
		-847	0.22	0.008		0.899	-0.001	56400	56400	0	0.000
		mean	-0.004		mean	-0.001			Mean	-0.001	
		max	-0.78	-0.028		max	-0.001		max	-1	-0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
4	-791.67	-792	-0.33	-0.012	1.300	1.300	0.000	14100	14100	0	0.000
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	42300	42300	0	0.000
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	70500	70501	1	0.004
		mean	-0.012		mean	0.000			Mean	0.001	
		max	-0.33	-0.012		max	0.000		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
5	0	0	0	0.000	0.680	0.679	-0.001	0	0	0	0.000
		max	0	0.000		max	-0.001	max	0	0.000	



ตารางที่ ข.19 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจาะระนาด้านบนพลอยของเหลี่ยม Four  
Triangles ในการทดลองที่ 4

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)	
1	-1263.89	-1263	0.89	0.032	1.000	0.998	0.036	3525	3525	0	0.000	
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	24675	24676	1	0.004	
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	31725	31726	1	0.004	
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	52875	52876	1	0.004	
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	59925	59925	0	0.000	
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	81075	81076	1	0.004	
			mean	0.002		mean	0.038			Mean	0.003	
			max	0.89	0.032		max	0.038		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)	
2	-933.33	-933	0.33	0.012	0.930	0.929	-0.001	1762.5	1763	0.5	0.002	
		-933	0.33	0.012		0.929	-0.001	26437.5	26439	1.5	0.006	
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	29962.5	29964	1.5	0.006	
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	54637.5	54638	0.5	0.002	
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	58162.5	58164	1.5	0.006	
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	82837.5	82838	0.5	0.002	
			mean	-0.012		mean	0.000			Mean	0.004	
			max	-0.67	-0.024		max	0.001		max	1.5	0.006

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)	
3	-847.22	-848	-0.78	-0.028	0.900	0.900	0.000	0	0	0	0.000	
		-848	-0.78	-0.028		0.900	0.000	28200	28201	1	0.004	
		-848	-0.78	-0.028		0.900	0.000	56400	56400	0	0.000	
				mean		-0.028		mean	0.000			Mean
			max	-0.78	-0.028		max	0.000		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)	
4	-791.67	-791	0.67	0.024	1.300	1.299	-0.001	14100	14100	0	0.000	
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	42300	42300	0	0.000	
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	70500	70501	1	0.004	
			mean	0.000		mean	0.000			Mean	0.001	
			max	0.67	0.024		max	-0.001		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
5	0	-1	-1	-0.036	0.680	0.680	0.000	0	0	0	0.000
				max		-1	-0.036		max	0.000	

ตารางที่ ข.20 ตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละแกนในการเจียระไนด้านบนพลอยของเหลี่ยม Four  
Triangles ในการทดลองที่ 5

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
1	-1263.89	-1264	-0.11	-0.004	1.000	1.000	0.038	3525	3526	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	24675	24676	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	31725	31725	0	0.000
		-1265	-1.11	-0.040		1.001	0.039	52875	52875	0	0.000
		-1263	0.89	0.032		0.998	0.036	59925	59926	1	0.004
		-1264	-0.11	-0.004		1.000	0.038	81075	81076	1	0.004
			mean	-0.004		mean	0.038			Mean	0.003
		max	-1.11	-0.040		max	0.039		max	1	0.004

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
2	-933.33	-934	-0.67	-0.024	0.930	0.931	0.001	1762.5	1764	1.5	0.006
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	26437.5	26438	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	29962.5	29963	0.5	0.002
		-933	0.33	0.012		0.929	-0.001	54637.5	54638	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	58162.5	58163	0.5	0.002
		-934	-0.67	-0.024		0.931	0.001	82837.5	82838	0.5	0.002
			mean	-0.018		mean	0.001			Mean	0.003
		max	-0.67	-0.024		max	0.001		max	1.5	0.006

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
3	-847.22	-848	-0.78	-0.028	0.900	0.900	0.000	0	0	0	0.000
		-848	-0.78	-0.028		0.900	0.000	28200	28200	0	0.000
		-848	-0.78	-0.028		0.900	0.000	56400	56400	0	0.000
			mean	-0.028		mean	0.000			Mean	0.000
		max	-0.78	-0.028		max	0.000		max	0	0.000

เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
4	-791.67	-792	-0.33	-0.012	1.300	1.300	0.000	14100	14100	0	0.000
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	42300	42301	1	0.004
		-792	-0.33	-0.012		1.300	0.000	70500	70500	0	0.000
			mean	-0.012		mean	0.000			Mean	0.001
		max	-0.33	-0.012		max	0.000		max	1	0.004

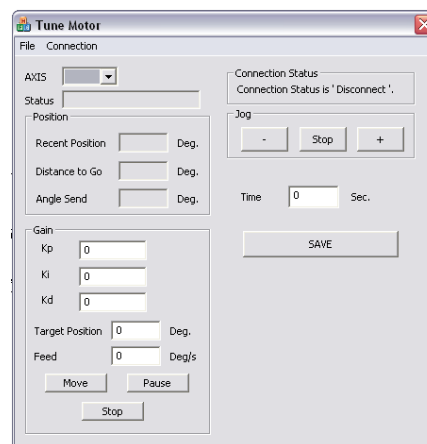
เหลี่ยม	Elevation angle	test	Error (Pulse)	Error (Degree)	Depth	test	Error (mm)	Index	Test	Error (Pulse)	Error (Degree)
5	0	1	1	0.036	0.680	0.678	-0.002	0	0	0	0.000
		max	1	0.036		max	-0.002	max	0	0.000	

## ภาคผนวก ค

### การใช้งานโปรแกรม Tune Motor

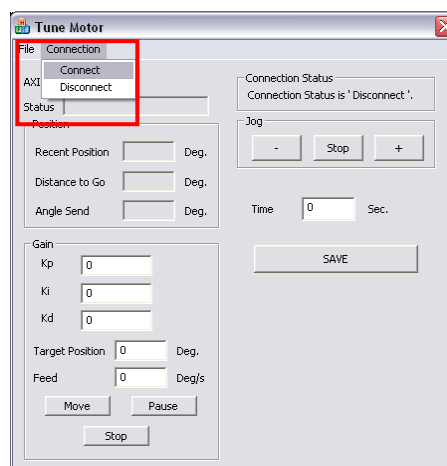
จากที่กล่าวไว้ในบทที่ 7 ในการทดลองหาค่าอัตราขยายที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์แต่ละแกน ได้ใช้โปรแกรม Tune Motor ที่สร้างขึ้นมาในการทดลอง โดยที่วิธีในการใช้โปรแกรมหาดังกล่าวอธิบายได้ดังนี้

1. เมื่อทำการเปิดโปรแกรมขึ้นมา จะพบหน้าต่างของโปรแกรมดังรูปที่ ค.1

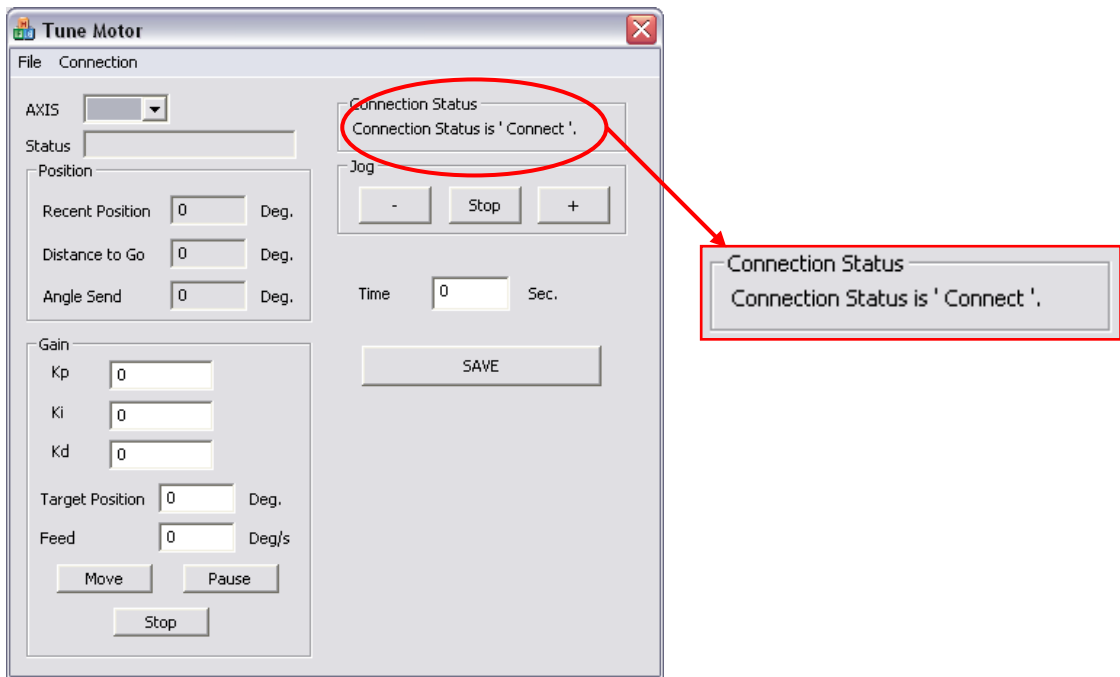


รูปที่ ค.1 หน้าต่างโปรแกรม Tune Motor

2. ทำการเชื่อมต่อโปรแกรมกับอุปกรณ์ภายนอกโดยเลือกแถบ ทูลบาร์ Connection -> Connect แถบแสดงสถานะของโปรแกรมจะแสดงสถานะว่ามีการเชื่อมต่อแล้ว ดังรูปที่ ค.2 และ ค.3

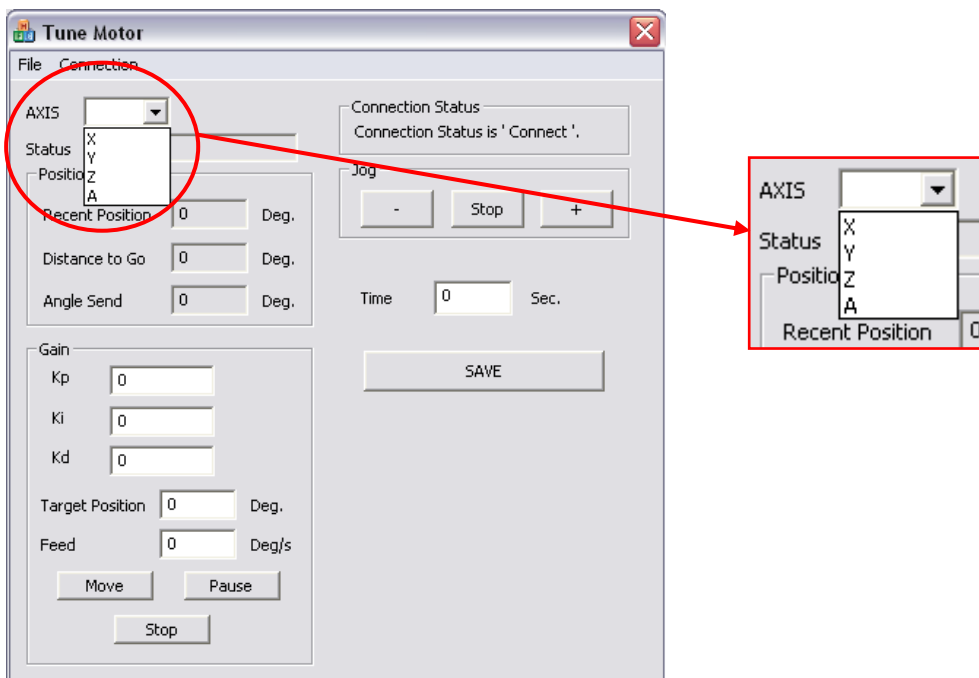


รูปที่ ค.2 คำสั่งเชื่อมต่อโปรแกรมกับอุปกรณ์ภายนอก บนแถบทูลบาร์



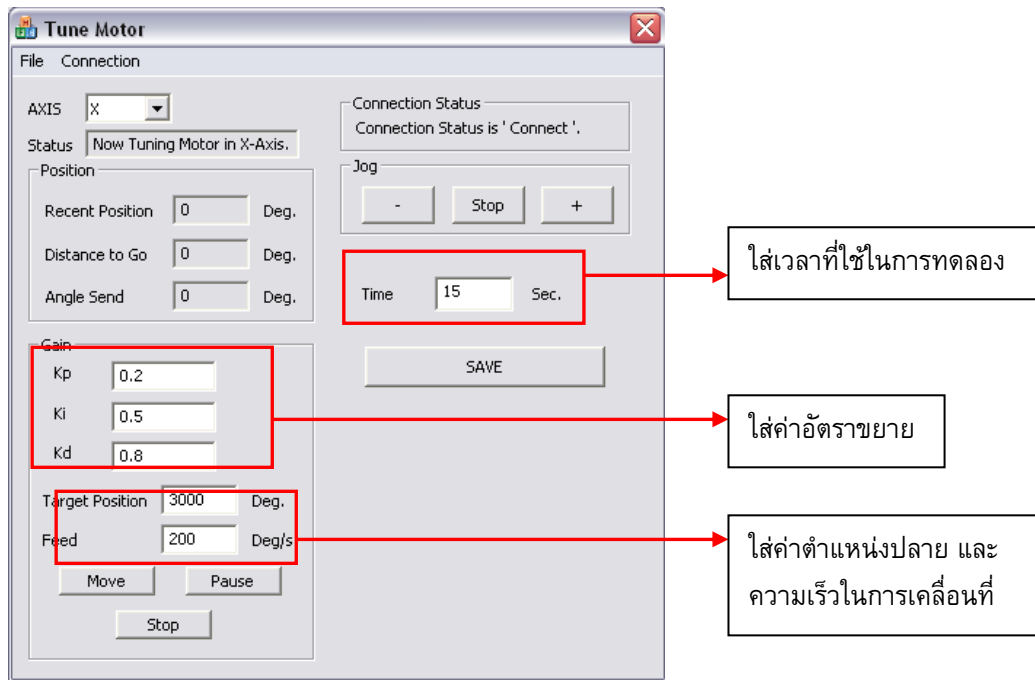
รูปที่ ค.3 แถบสถานะของโปรแกรมเมื่อทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกแล้ว

3. เลือกแกนของมอเตอร์ที่ต้องการจะทำการทดลองหาอัตราขยายโดยเลือกที่แถบ Axis ดังรูปที่ ค.4 โดยสามารถเลือกได้ทั้ง 4 แกน คือ X , Y , Z และ A



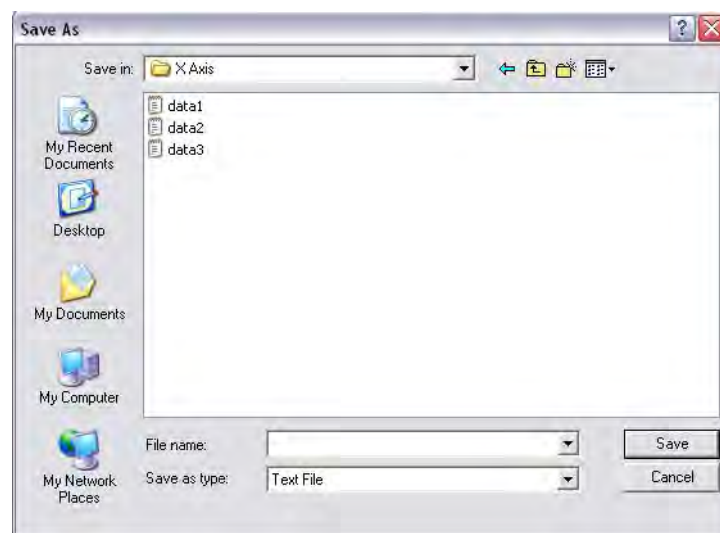
รูปที่ ค.4 การเลือกแกนที่จะทำการทดลอง

4. กำหนดค่าอัตราขยาย  $K_p$  ,  $K_i$  และ  $K_d$  ที่ต้องการ ใส่ตำแหน่งปลายของการเคลื่อนที่ลงในช่อง Target Position ใส่ความเร็วของการเคลื่อนที่ลงในช่อง Feed และใส่เวลาที่ใช้ในการทดลองเป็นหน่วยวินาทีลงในช่อง Time ดังรูปที่ ค.5 จากนั้นกดปุ่ม Move แล้วสังเกตการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์



รูปที่ ค.5 การใส่ค่าต่างๆลงในโปรแกรม

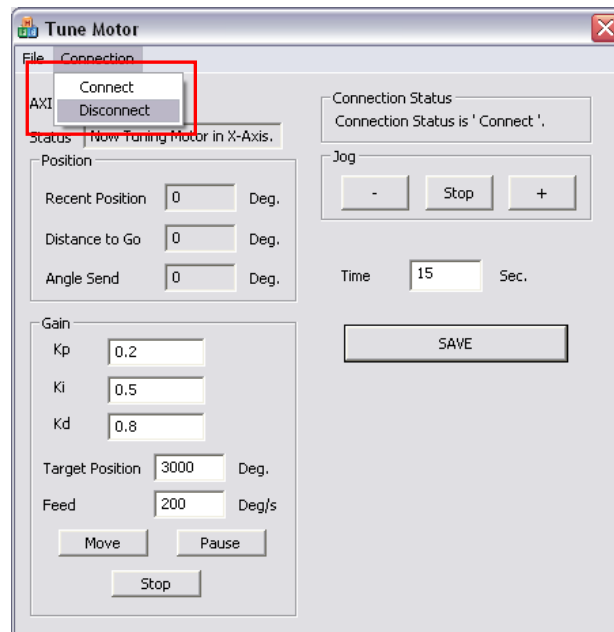
5. เมื่อครบเวลาที่ทำการทดลองแล้ว หากต้องการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่เป็นตำแหน่งเทียบกับเวลา ให้กดปุ่ม Save จะขึ้นหน้าต่าง Save ดังรูปที่ ค.6



รูปที่ ค.6 หน้าต่างสำหรับการบันทึกค่าที่ได้จากการทดลอง

6. หากผลการทดลองยังไม่เป็นที่น่าพอใจ สามารถทำซ้ำได้อีกครั้งตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 หากต้องการเปลี่ยนแกนในการทดลอง ให้ทำการทดลองใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 โดยก่อนทำการเปลี่ยนแกนการทดลอง ต้องมั่นใจว่า แกนเดิมที่ทำการทดลองหยุดนิ่งแล้ว

7. เมื่อได้ผลเป็นที่พอใจแล้ว ให้ปิดโปรแกรม โดยทำการยกเลิกการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกก่อน โดยเลือกที่ทูลบาร์ Connection -> Disconnect ดังรูปที่ ค.7 จากนั้นทำการปิดโปรแกรมได้



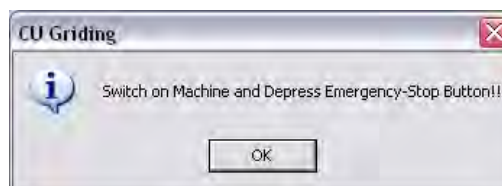
รูปที่ ค.7 คำสั่งยกเลิกการเชื่อมต่อโปรแกรมกับอุปกรณ์ภายนอก บนแถบทูลบาร์

## ภาคผนวก ง

### การใช้โปรแกรม CU Gems Grinding กับเครื่องเจียรระโนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ

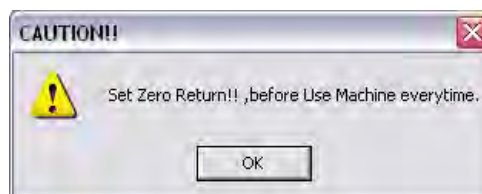
จากในบทที่ 5 ได้แสดงหน้าต่างของโปรแกรม CU Gems Grinding ให้เห็นแล้ว ในส่วนนี้จะได้อธิบายถึงขั้นตอนการใช้งานโปรแกรกดังกล่าวโดยละเอียด ดังนี้

เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมา จะพบหน้าต่างเตือนให้เปิดสวิตช์เครื่องเจียรระโนพลอย และปลดปุ่ม Emergency Stop ของเครื่อง ดังรูปที่ ง.1 ให้ผู้ใช้เปิดสวิตช์เครื่อง จากนั้นกดปุ่ม OK ต่อไป



รูปที่ ง.1 หน้าต่างแสดงคำเตือนให้เปิดเครื่องเจียรระโนพลอย

จากนั้นจะพบหน้าต่างคำเตือนถัดมาว่าให้ทำการตั้งตำแหน่งอ้างอิง (Home Position) ของแกน X และแกน Z ก่อนที่จะใช้งานเครื่องเสมอ ดังรูปที่ ง.2 จากนั้นให้กด OK



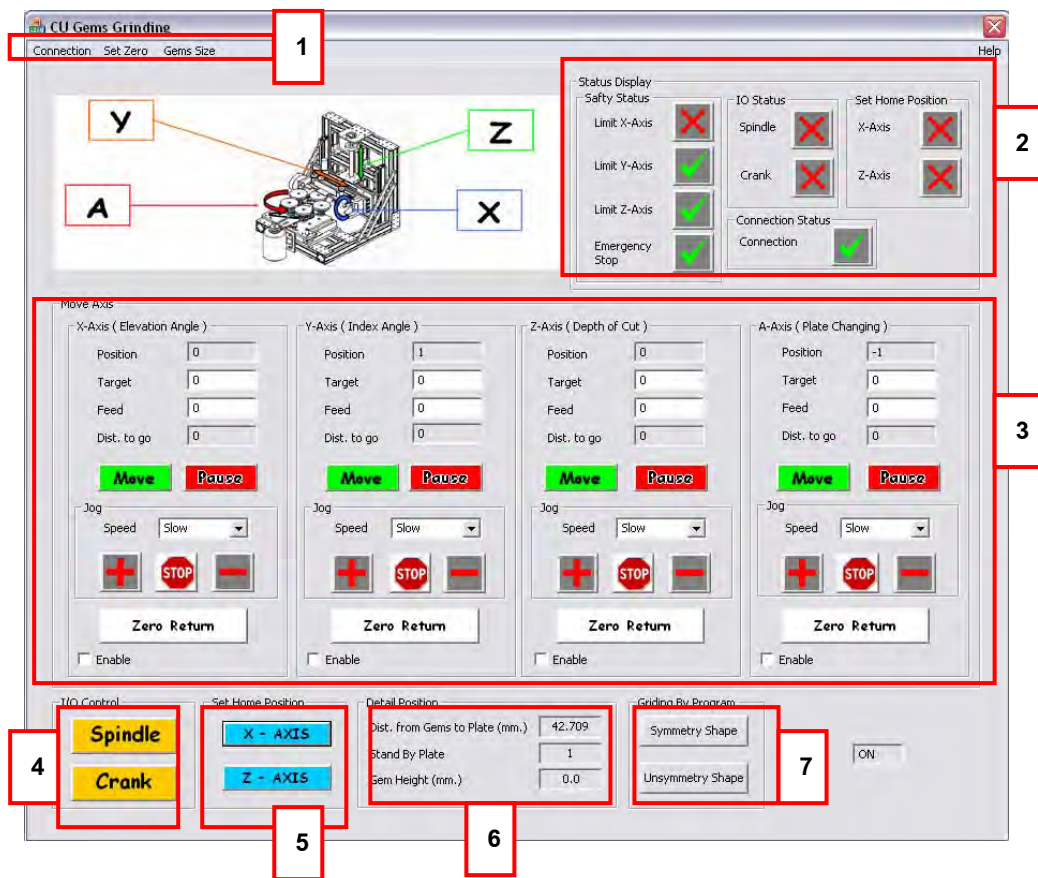
รูปที่ ง.2 หน้าต่างแสดงคำเตือนให้ตั้งตำแหน่งอ้างอิงก่อนใช้งาน

ต่อไปจะมีหน้าต่างใหม่ปรากฏขึ้นมา โดยจะให้ผู้ใช้ใส่ขนาดความสูงของเม็ดพลอยดิบที่จะนำมาเจียรระโนลงไปเป็นหน่วยมิลลิเมตร ดังรูปที่ ง.3 ให้ใส่ค่าลงไปจากนั้นกด OK



รูปที่ ง.3 หน้าต่างให้ใส่ขนาดความสูงของพลอยดิบที่นำมาเจียรระโน

ต่อจากนั้นหน้าต่างหลักของโปรแกรมจะแสดงขึ้นมาดังรูปที่ ๔.4 และสามารถอธิบายส่วนต่างๆของหน้าต่างหลังได้ดังนี้



รูปที่ ๔.4 หน้าต่างหลักของโปรแกรม CU Gems Grinding

จากรูปที่ ๔.4 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรมได้ดังนี้

1. ส่วนของทูลบาร์ ใช้ในเลือกการเชื่อมต่อ หรือยกเลิกการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมและเครื่อง ใช้ในการตั้งตำแหน่งแต่ละแกนการเคลื่อนที่ให้เป็นศูนย์ และใช้ในการกำหนดขนาดของพลอยดิบที่นำมาเจียรใน ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป
2. ส่วนของหน้าจอแสดงสถานะของเครื่องเจียรในพลอย โดยจะแสดง ขอบเขตของแต่ละแกน ว่าเครื่องวิ่งเลยตำแหน่งขอบเขตของเครื่องหรือไม่ แสดงสถานะ การเชื่อมต่อของโปรแกรมกับเครื่อง แสดงสถานะของจานเจียรใน ว่าเปิดหรือปิดอยู่ แสดงสถานะ การตั้งตำแหน่งอ้างอิงของแกน X และแกน Z ว่าตั้งแล้วหรือยัง
3. ส่วนของหน้าจอที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียรในพลอย โดยสามารถสั่งให้วิ่งไปทางบวก หรือลบได้ หรือจะป้อนเป็นตำแหน่งปลายทาง และความเร็วก็น่าสามารถทำได้เช่นกัน



4. ส่วนของหน้าจอที่ใช้ในการควบคุมการเปิด/ปิด และสายเข้า/ออก ของชุดจานเจียร์ใน
5. ส่วนของหน้าจอที่ใช้ในการควบคุมการตั้งตำแหน่งอ้างอิงแกน X และแกน Z ของเครื่องเจียร์ใน
6. ส่วนของหน้าจอแสดงค่า โดยจะแสดงระยะระหว่างจุดศูนย์กลางพลอยไปจนถึงจานเจียร์ในเป็นหน่วยมิลลิเมตร นอกจากนี้ยังมีการแสดงผลว่าจานเจียร์ในโดยอยู่ในตำแหน่งเจียร์ใน และ บอกขนาดของพลอยดิบที่ใช้ในการเจียร์ในตามที่ใช้ได้ใส่ไว้
7. ส่วนของหน้าจอที่ใช้ในการเรียกหน้าตาสำหรับการเจียร์ในตามโปรแกรม โดยสามารถเลือกได้ทั้งการเจียร์ในแบบสมมาตร และ ไม่สมมาตร

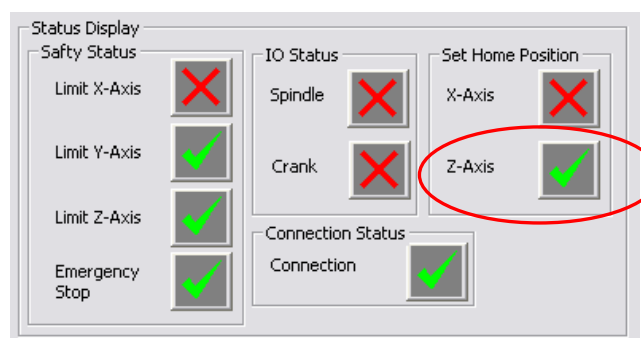
### 1. การตั้งตำแหน่งอ้างอิง

ในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงของเครื่องเจียร์ในพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ การตั้งตำแหน่งอ้างอิงก่อนใช้งาน และการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ที่ตำแหน่งใดๆ หลังจากใช้งานไปแล้ว

#### 1.1 การตั้งตำแหน่งอ้างอิงก่อนที่จะใช้งาน

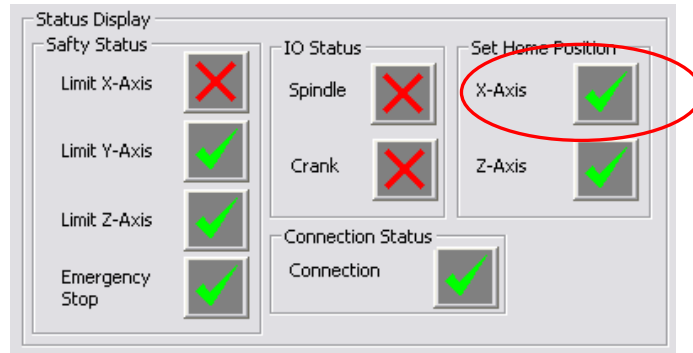
ดังกล่าวมาแล้วในตอนต้นว่าก่อนที่จะใช้งานโปรแกรมจะต้องมีการตั้งตำแหน่งอ้างอิงก่อนเสมอ โดยต้องตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแกน X และแกน Z ก่อนเป็นอันดับแรก มิฉะนั้นแล้วโปรแกรมจะไม่สามารถใช้งานฟังก์ชันใดๆได้เลย โดยแนะนำว่าให้ตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแกน Z ก่อน โดยการตั้งตำแหน่งอ้างอิงสามารถทำได้ดังนี้

1. กดปุ่ม Z-Axis ในส่วนหน้าจอ Set Home Position หรือส่วนหมายเลข 5 ในรูป ง.4 จากนั้นแกน Z ของเครื่องจะวิ่งเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงเองโดยอัตโนมัติ
2. รอจนกระทั่งสัญลักษณ์กากบาทสีแดงในหน้าจอแสดงสถานะ หรือส่วนหมายเลข 2 ในรูป ง.4 ของส่วน Set Home Position ของ Z-Axis กลายเป็นเครื่องหมายถูกสีเขียวดังรูปที่ ง.5



รูปที่ ง.5 สถานะของตำแหน่งอ้างอิงแกน Z หลังจากตั้งตำแหน่งอ้างอิงแล้ว

- จากที่ตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแกน X โดยกดปุ่ม X-Axis ในส่วนหน้าจอ Set Home Position หรือส่วนหมายเลข 5 ในรูป ง.4 จากนั้นแกน X ของเครื่องจะวิ่งเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงเองโดยอัตโนมัติ
- รอจนกระทั่งสัญลักษณ์กากบาทสีแดงในหน้าจอแสดงสถานะ หรือส่วนหมายเลข 2 ในรูป ง.4 ของส่วน Set Home Position ของ X-Axis กลายเป็นเครื่องหมายถูกสีเขียวดังรูปที่ ง.6



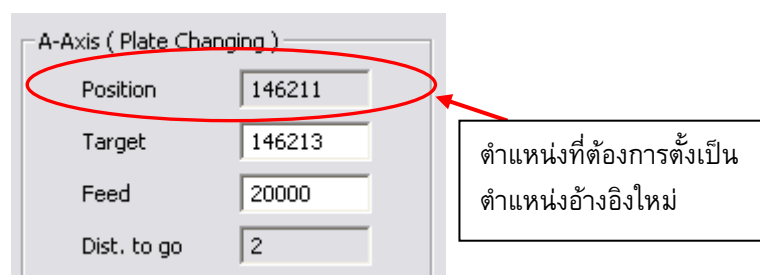
รูปที่ ง.6 สถานะของตำแหน่งอ้างอิงแกน X หลังจากตั้งตำแหน่งอ้างอิงแล้ว

- หลังจากตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแกน X และ Z แล้ว สามารถใช้งานฟังก์ชันอื่นได้ตามปกติ

## 1.2 การตั้งตำแหน่งอ้างอิงใดๆหลังจากใช้งานไปแล้ว

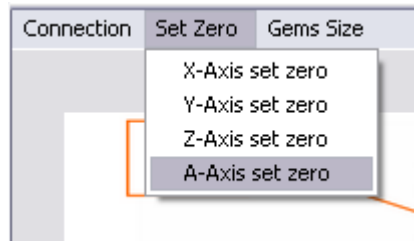
หลังจากที่มีการใช้งานเครื่องไปแล้ว ผู้ใช้อาจมีความจำเป็นที่ตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ให้กับเครื่อง นั่นก็คือการตั้งตำแหน่งที่เป็น 0 ใหม่ ให้กับเครื่อง ซึ่งมีวิธีการดังนี้

- ขยับแกนที่ต้องการจะตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ ไปยังตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการ โดยการสั่งโดยโปรแกรม หรือใช้มือในการเลื่อนก็ได้ (วิธีการขยับตำแหน่งแกนด้วยโปรแกรม และใช้มือเลื่อน จะอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3 เรื่องการควบคุมตำแหน่งแต่ละแกนของเครื่องเจียระไนพลอย) ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างของแกน A
- จากนั้นสังเกตว่าตำแหน่งที่อ่านได้ในแกนจะเป็นค่าตำแหน่งใดๆที่ผู้ใช้ต้องการกำหนดให้เป็นตำแหน่งอ้างอิงใหม่ ดังรูปที่ ง.7



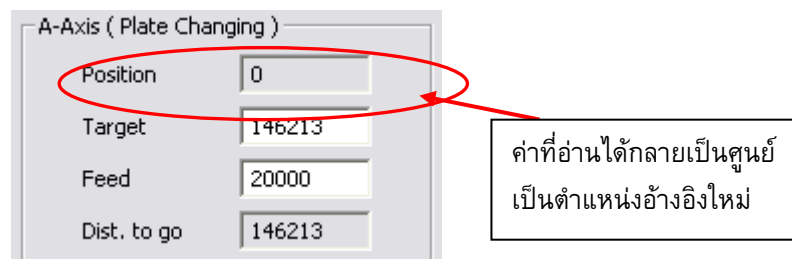
รูปที่ ง.7 หน้าต่างแสดงตำแหน่งที่ต้องการให้เป็นตำแหน่งอ้างอิงใหม่

- จากนั้นให้กดเอาเครื่องหมายถูกหน้าคำว่า Enable ของแกนที่ต้องการจะตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ออก
- ทำการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่โดยไปที่แถบทูลบาร์แล้วเลือก Set Zero -> A-Axis Set Zero ดังรูปที่ ง.8 จากนั้นให้คลิกหนึ่งครั้ง



รูปที่ ง.8 ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่

- จะพบว่าตอนนี้ตำแหน่งที่เราเลื่อนแกนมาได้กลายเป็นตำแหน่งอ้างอิงใหม่แล้ว โดยค่าตำแหน่งจะกลายเป็นศูนย์ ดังรูปที่ ง.9

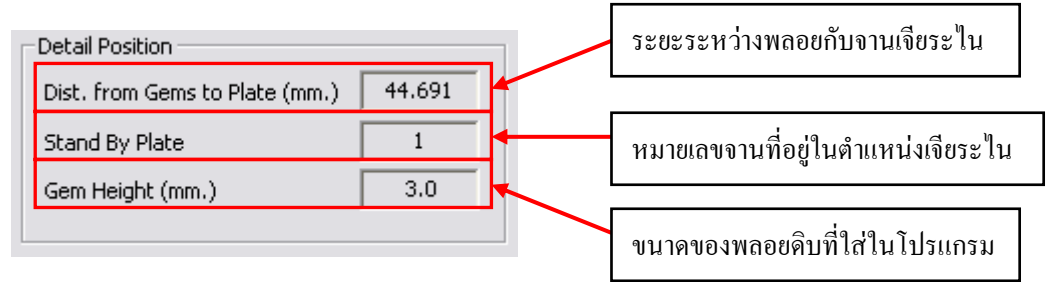


รูปที่ ง.9 หน้าต่างแสดงตำแหน่งอ้างอิงใหม่ มีค่าตำแหน่งเป็นศูนย์

## 2. การปรับตั้งขนาดของพลอยดิบที่ใช้ในการเจียรระโน

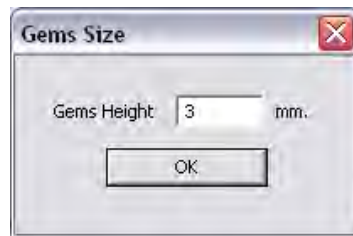
ดังที่กล่าวมาแล้วว่าก่อนการเจียรระโนต้องมีการกำหนดขนาดของพลอยดิบที่ใช้ในการเจียรระโนลงไปโปรแกรม เพื่อที่โปรแกรมจะได้สามารถคำนวณระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเม็ดพลอยกับจานเจียรระโนได้อย่างถูกต้อง โดยที่การกำหนดขนาด อาจจะเป็นการกำหนดตั้งแต่ตอนเปิดโปรแกรม หรือ กำหนดขณะที่ใช้งานโปรแกรมก็ได้ ดังนี้

- ที่หน้าจอหลัก สังเกตส่วนหมายเลข 6 ในรูปที่ ง.4 จะเป็นส่วนที่แสดงขนาดของพลอยดิบที่ผู้ป้อนเข้าไป และแสดงระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางพลอยไปยังจานเจียรระโนเป็นหน่วยมิลลิเมตร อีกทั้งยังแสดงว่าจานเจียรระโนได้อยู่ในตำแหน่งที่พร้อมเจียรระโน ดังรูปที่ ง.10



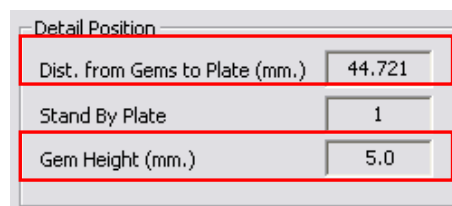
รูปที่ ง.10 ส่วนของหน้าจอที่แสดงขนาดของพลอยดิบ

- ถ้าต้องการเปลี่ยนขนาดของพลอยดิบในโปรแกรม สามารถทำได้โดยไปที่แถบทูลบาร์ เลือก Gem Size -> Gem Height แล้วคลิก 1 ครั้ง จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ง.11



รูปที่ ง.11 หน้าต่างสำหรับกำหนดความสูงของพลอยดิบ

- ให้ผู้ใช้ใส่ขนาดของพลอยดิบที่ต้องการลงไปในช่วง จากนั้นกด OK ในที่นี้จะลองเปลี่ยนขนาดของพลอยเป็น 5 มิลลิเมตร
- จะพบว่าขนาดของพลอยที่แสดงในหน้าต่างจะเปลี่ยนเป็น 5 มิลลิเมตร และระยะระหว่างพลอยกับงานเจียรไนก็จะเปลี่ยนไปด้วย ดังรูปที่ ง.12

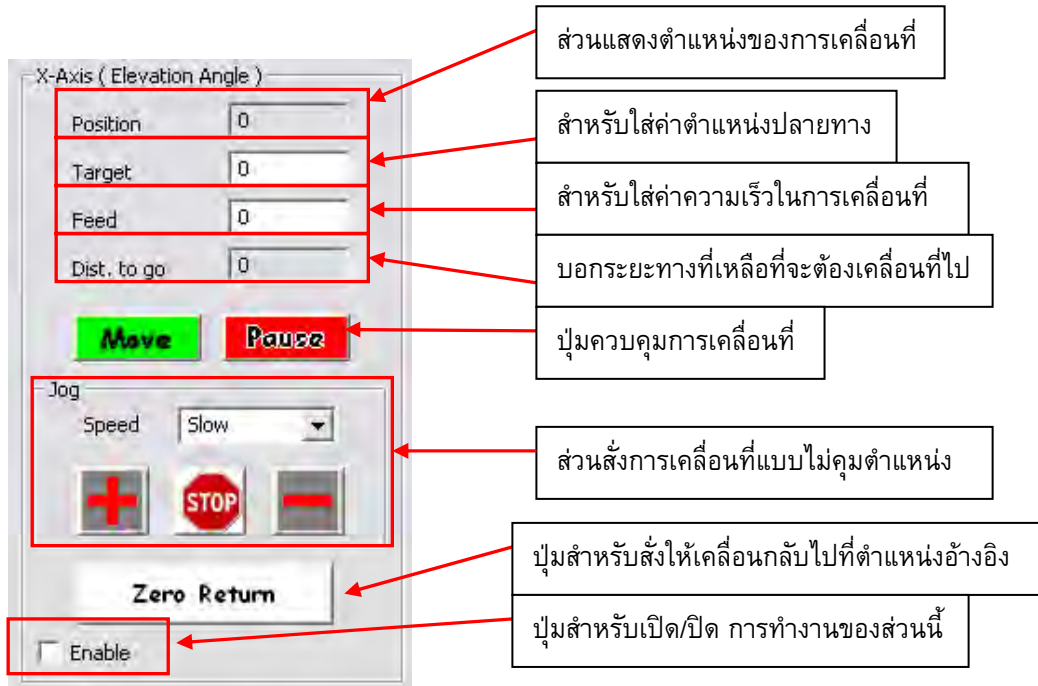


รูปที่ ง.12 หน้าต่างแสดงขนาดของพลอยดิบที่เปลี่ยนไปตามที่ผู้ใช้กำหนด

### 3. การควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียรไนพลอย

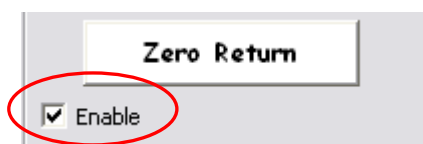
สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยจะใช้หน้าจอในส่วนควบคุม นั่นคือส่วนหมายเลข 3 ของรูป ง.4 โดยการควบคุมการเคลื่อนที่ที่เหมือนกันทุกแกน โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างแกน X ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. เมื่อพิจารณาในส่วนหน้าจอของการควบคุมการเคลื่อนที่ จะพบว่า มีลักษณะ และปุ่มที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ ดังอธิบายไว้ในรูป ง.13



รูปที่ ง.13 หน้าต่างในส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละแกน

2. เมื่อต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรมให้กดที่ปุ่ม Enable จะพบว่า มีเครื่องหมายถูกขึ้นมาหน้าข้อความ ดังรูปที่ ง.14 เมื่อกดแล้วจะพบว่า ผู้ใช้จะไม่สามารถใช้มือขยับแกนได้ เนื่องจากโปรแกรมเริ่มควบคุมตำแหน่งของแกนแล้ว ซึ่งถ้าหากผู้ใช้ต้องการใช้มือในการเลื่อนแกนของเครื่องเจียระไน ให้กดที่ปุ่ม Enable อีกครั้ง เครื่องหมายถูกจะหายไป และสามารถใช้มือขยับแกนการเคลื่อนที่ได้



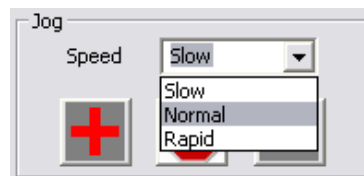
รูปที่ ง.14 ปุ่ม Enable เมื่อถูกกด

3. เมื่อปุ่ม Enable ถูกกดดังรูปที่ ง.14 แล้ว ผู้ใช้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนการเคลื่อนที่ได้แล้ว โดยอาจจะควบคุมการเคลื่อนที่แบบไม่คุมตำแหน่ง หรือที่เรียกว่า Jog ได้

โดยการใช้ส่วนควบคุม Jog ดังรูปที่ ง.15 โดยในการเคลื่อนที่แบบ Jog สามารถเลือกความเร็วได้ 3 ระดับคือ Slow , Normal และ Rapid โดยการเลือกที่ส่วน Speed ดังรูปที่ ง.16 เมื่อต้องการให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เป็นบวก ให้กดปุ่ม + และกดปุ่ม - เมื่อต้องการให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางลบ หากต้องการหยุดให้กดปุ่ม Stop

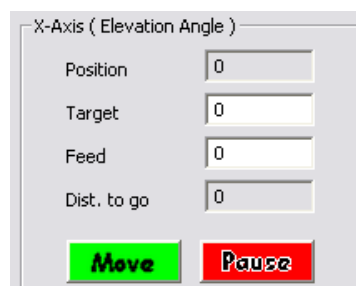


รูปที่ ง.15 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่แบบJog

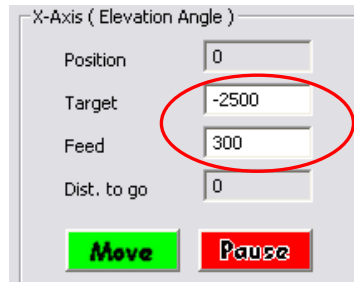


รูปที่ ง.16 การเลือกความเร็วของการเคลื่อนที่แบบJog

4. หากผู้ใช้ต้องการควบคุมตำแหน่ง โดยควบคุมตำแหน่งปลาย และความเร็วในการเคลื่อนที่ ผู้ใช้สามารถทำได้เช่นกันโดยใช้ส่วนควบคุมตำแหน่งปลาย และความเร็ว ดังรูปที่ ง.17 โดยการควบคุมแบบนี้ ก่อนที่จะสั่งให้เคลื่อนที่ ผู้ใช้ต้องแน่ใจว่าทุกๆแกนการเคลื่อนที่ของเครื่องหยุดนิ่ง เพื่อป้องกันความที่หายที่อาจเกิดขึ้นขณะเคลื่อนที่ ผู้ใช้จะต้องป้อนตำแหน่งปลายของการเคลื่อนที่ และความเร็วที่จะใช้ในการเคลื่อนที่ลงไปในช่วงโดยการป้อนตำแหน่งจะป้อนในหน่วยพัลส์ (Pulse) ของ Encoder เพื่อความละเอียดในการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ ง.18 จากนั้นกดปุ่ม Move เพื่อสั่งให้เคลื่อนที่ หากเวลาที่แกนเคลื่อนที่ ผู้ใช้ต้องการหยุดการเคลื่อนที่ให้กดปุ่ม Pause



รูปที่ ง.17 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่แบบป้อนตำแหน่ง และความเร็ว



รูปที่ ง.18 การป้อนตำแหน่งปลายและความเร็ว ในการเคลื่อนที่

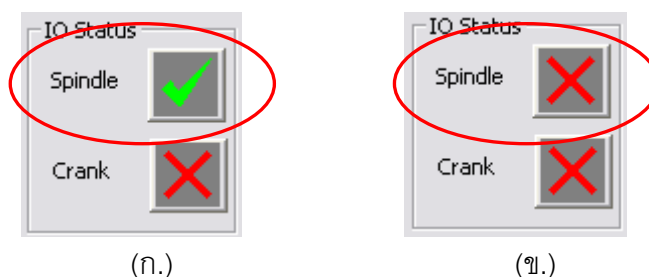
**หมายเหตุ** เนื่องจากการป้อนตำแหน่งจะป้อนเป็นหน่วยพัลส์ ดังนั้นระยะทางของแต่ละแกนเทียบกับหน่วยพัลส์ มีค่าดังนี้

- แกน X ระยะการหมุน 1 องศา มีค่าเป็น 27.78 พัลส์
- แกน Y ระยะการเคลื่อนที่ 1 มิลลิเมตร มีค่าเป็น 4490 พัลส์
- แกน Z ระยะการเคลื่อนที่ 1 มิลลิเมตร มีค่าเป็น 640 พัลส์
- แกน A ระยะการเคลื่อนที่ 1 องศา มีค่าเป็น 2770 พัลส์

#### 4. การควบคุมการเปิด/ปิด และ การสายเข้า/ออก ของจานเจียร์ไน

การควบคุมการเปิด/ปิด และสายเข้า/ออก ของชุดจานเจียร์ไนสามารถทำได้เช่นกันโดยใช้ส่วนควบคุมชุดจานเจียร์ไน หรือหมายเลข 4 ในรูป ง.4

1. การเปิด/ปิด การหมุนจานเจียร์ไนสามารถทำได้โดยการกดปุ่ม Spindle 1 ครั้ง จานเจียร์ไนจะหมุน หากต้องการปิดให้กดที่ปุ่มเดิมอีกครั้ง จานเจียร์ไนจะหยุด โดยเมื่อจานเปิดจานเจียร์ไน ที่หน้าจอแสดงสถานะจานเจียร์ไน จะเป็นสัญลักษณ์เครื่องหมายถูก แต่เมื่อปิดจานเจียร์ไน สัญลักษณ์จะกลายเป็นกากบาทสีแดง ดังรูปที่ ง.19



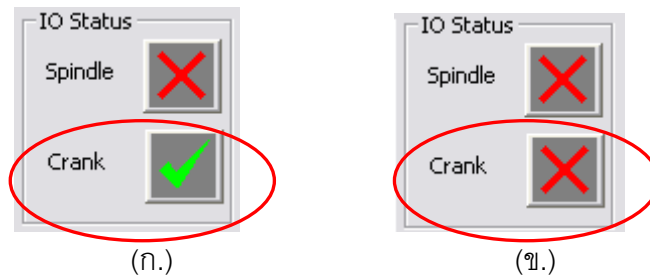
(ก.)

(ข.)

รูปที่ ง.19 สถานะของการหมุนจานเจียร์ไน (ก.)เมื่อเปิด (ข.)เมื่อปิด

2. การเปิด/ปิด การสายของจานเจียร์ไนทำได้โดยการกดปุ่ม Crank จานเจียร์ไนจะสายเข้า/ออก หากต้องการปิดให้กดที่ปุ่มเดิมอีกครั้ง จานเจียร์ไนจะหยุดสาย โดยเมื่อจานเปิด

งานเจียรระโน ที่หน้าจอแสดงสถานะงานเจียรระโน จะเป็นสัญลักษณ์เครื่องหมายถูก แต่เมื่อปิดงานเจียรระโน สัญลักษณ์จะกลายเป็นกากบาทสีแดง ดังรูปที่ ง.20



รูปที่ ง.20 สถานะของการส่ายงานเจียรระโน (ก.)เมื่อเปิด (ข.)เมื่อปิด

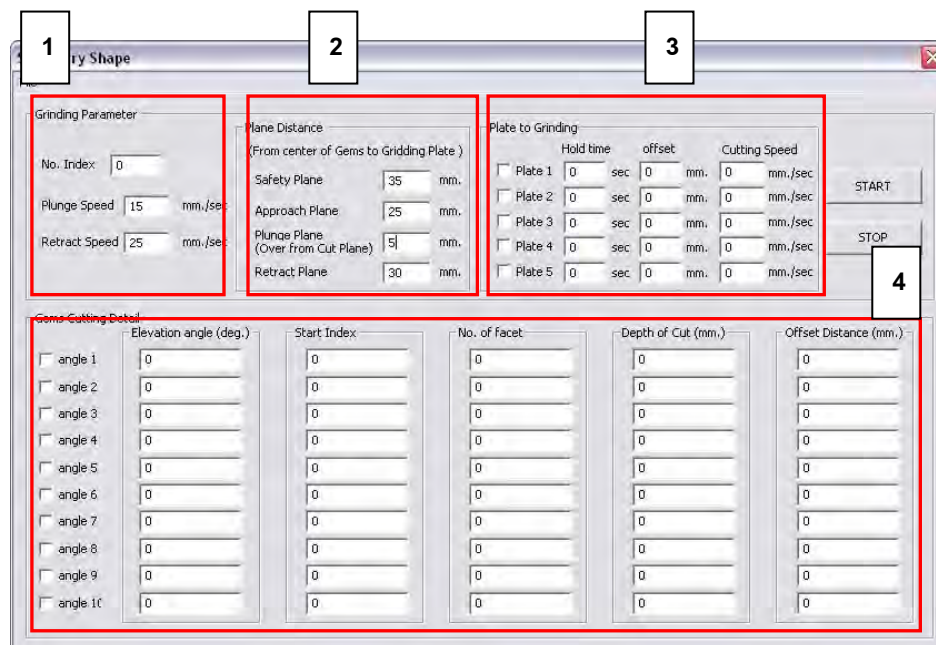
## 5. การเจียรระโนแบบอัตโนมัติตามโปรแกรม

การเจียรระโนตามโปรแกรมแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ การเจียรระโนรูปร่างสมมาตร และรูปร่างไม่สมมาตร

### 5.1 การเจียรระโนรูปร่างสมมาตร

การเจียรระโนด้วยโปรแกรมเจียรระโนสมมาตรมีขั้นตอนดังนี้

1. กดปุ่มเลือกหน้าต่างการเจียรระโนแบบสมมาตรขึ้นมาโดยกดที่ปุ่ม Symmetry Shape ที่อยู่ในส่วนหมายเลข 7 ในรูปที่ ง.4
2. เมื่อเลือกขึ้นมาแล้ว จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ง.21



รูปที่ ง.21 หน้าต่างสำหรับการเจียรระโนรูปร่างสมมาตร

โดยจากรูปที่ ง.21 พบว่าหน้าต่างของโปรแกรมถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้



### ส่วนที่ 1 เป็นส่วนของ Grinding Parameter ประกอบไปด้วย

**No. Index** ให้ผู้ใช้ใส่ค่าจำนวนมุมดัชนีที่ใช้สำหรับพลอยที่ต้องการเจียรระโนลงไป  
**Plunge Speed** ให้ผู้ใช้ใส่ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ จาก Safety Plane ลงมายัง  
 Plunge Plane โดยมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร / วินาที  
**Retract Speed** ให้ผู้ใช้ใส่ค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ถอยหลังจาก Cut Plane มายัง  
 Retract Plane โดยมีหน่วยเป็น มิลลิเมตร / วินาที

**ส่วนที่ 2** เป็นส่วนของ Plane Distance ใช้สำหรับกำหนดระยะของระนาบต่างๆ  
 ดังนี้

**Safety Plane** เป็นระนาบปลอดภัย ระนาบนี้จะเป็นระนาบที่พลอยจะถูกยกขึ้นมา  
 เมื่อมีการเปลี่ยนงานเจียรระโน โดยระยะจะวัดเป็นระยะห่างระหว่างศูนย์กลางพลอยกับ  
 งานเจียรระโน เป็นหน่วยมิลลิเมตร

**Approach Plane** เป็นระนาบที่พลอยจะถูกยกขึ้นมา เมื่อมีการเปลี่ยนมุมยกเกิดขึ้น เพื่อ  
 ความปลอดภัยในการเจียรระโน โดยระยะจะวัดเป็นระยะห่างระหว่างศูนย์กลางพลอย กับ  
 งานเจียรระโนเป็นหน่วยมิลลิเมตร

**Plunge Plane** เป็นระนาบสุดท้ายที่พลอยจะไปรออยู่ ก่อนที่จะวิ่งลงสู่งานเจียรระโน เพื่อ  
 ทำการเจียรระโน โดยระยะจะเป็นระยะที่วัดสูงขึ้นมาจาก Cut Plane

**Retract Plane** เป็นระนาบที่พลอยจะถูกยกขึ้นมาหลังจากที่การเจียรระโนเสร็จสิ้น โดย  
 ระยะจะวัดเป็นระยะห่างระหว่างศูนย์กลางพลอย กับ งานเจียรระโนเป็นหน่วยมิลลิเมตร

**ส่วนที่ 3** เป็นส่วนของ Plate to Grinding โดยจะเป็นส่วนที่กำหนดพารามิเตอร์  
 ต่างๆเกี่ยวกับงานเจียรระโนพลอยแต่ละงาน ดังนี้

**Hold time** เป็นการกำหนดเวลาที่จะแช่พลอยนานขนาดเท่าไรขณะที่พลอยถูกเจียรระโน  
 อยู่ที่ Cut Plane

**Offset** เป็นการกำหนดการเผื่อระยะของงานแต่ละงานกับ Cut Plane โดยวัดเป็นหน่วย  
 มิลลิเมตรจาก Cut Plane โดยถ้าใส่เป็นค่าลบหมายถึงกดลึกลงไปจากระยะ Cut Plane  
 ถ้าใส่ค่าบวกหมายถึงยกขึ้นมาจากระยะ Cut Plane โดยค่านี้จะเป็นค่าเฉพาะของแต่ละ  
 งานเจียรระโน

**Cutting Speed** เป็นการกำหนดความเร็วในการเจียรระโน ว่าให้มีความเร็วเท่าไร โดยมี  
 หน่วยเป็น มิลลิเมตร / วินาที

**ส่วนที่ 4** เป็นส่วนของ Gems Cutting Detail โดยเป็นส่วนที่บอกรายละเอียด  
 ของเหลี่ยมพลอยในการเจียรระโนทั้งหมด ดังนี้

**Elevation Angle** ให้ใส่ค่ามุมยกลงไป โดยใช้หน่วยเป็นองศา

- Start Index** ให้ใส่มุมดัชนีเริ่มต้นของการเจียรระไนที่มุมยกลงไป
- No. of Facet** ให้ใส่ค่าจำนวนเหลี่ยมที่ต้องการ ในมุมยกลงไป
- Depth of Cut** ให้ใส่ระยะลึกในการเจียรระไนลงไป โดยใส่เป็นระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางพลอย กับจานเจียรระไน โดยถ้าค่าเป็นบวกคือวัดจากจานเจียรระไนขึ้นด้านบน ในขณะที่หากใส่ค่าลบ จะวัดจากจานเจียรระไนลงด้านล่าง โดยวัดเป็นหน่วยมิลลิเมตร
- Offset Plane** ให้ใส่การเผื่อระยะของการเจียรระไน โดยวัดจาก Cut Plane หรือค่า Depth of Cut โดยถ้าใส่ค่าบวกจะเป็นการวัดขึ้นทางด้านบน ในขณะที่หากใส่ค่าลบ จะวัดจากจานเจียรระไนลงด้านล่าง โดยวัดเป็นหน่วยมิลลิเมตร

3. สำหรับการใช้งานโปรแกรมทำได้โดยการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้อธิบายไว้แล้วในข้อ 2. ลงไปในโปรแกรมให้ครบถ้วน จากนั้นทำการเลือกว่าจะเจียรระไน โดยใช้จานเจียรระไนหมายเลขใดบ้าง โดยทำการคลิกเลือกที่จาน เมื่อเลือกแล้วจะมีเครื่องหมายถูกปรากฏขึ้นดังรูปที่ ง.22 เป็นการเลือกเจียรระไนที่จานที่ 1, 2 และ 4 ตามลำดับ

Plate to Grinding						
	Hold time		offset		Cutting Speed	
<input checked="" type="checkbox"/> Plate 1	2	sec	0	mm.	0.05	mm./sec
<input checked="" type="checkbox"/> Plate 2	3	sec	0	mm.	0.02	mm./sec
<input type="checkbox"/> Plate 3	0	sec	0	mm.	0	mm./sec
<input checked="" type="checkbox"/> Plate 4	3	sec	0	mm.	0.3	mm./sec
<input type="checkbox"/> Plate 5	0	sec	0	mm.	0	mm./sec

รูปที่ ง.22 การเลือกจานเจียรระไนที่ใช้ในการเจียรระไน

4. จากนั้นทำการเลือกมุมยกที่จะทำการเจียรระไน โดยคลิกที่มุมยกที่ต้องการ เมื่อเลือกแล้วจะมีเครื่องหมายถูกปรากฏขึ้นดังรูปที่ ง.23

Gems Cutting Detail					
	Elevation angle (deg.)	Start Index	No. of facet	Depth of Cut (mm.)	Offset Distance (mm.)
<input checked="" type="checkbox"/> angle 1	42	0	8	1.062	-0.1
<input checked="" type="checkbox"/> angle 2	47	3	16	1.13	-0.12
<input checked="" type="checkbox"/> angle 3	27	6	8	0.976	-0.02
<input checked="" type="checkbox"/> angle 4	0	0	1	0.73	-0.15
<input type="checkbox"/> angle 5	0	0	0	0	0

รูปที่ ง.23 การเลือกมุมยกที่ต้องการเจียรระไน

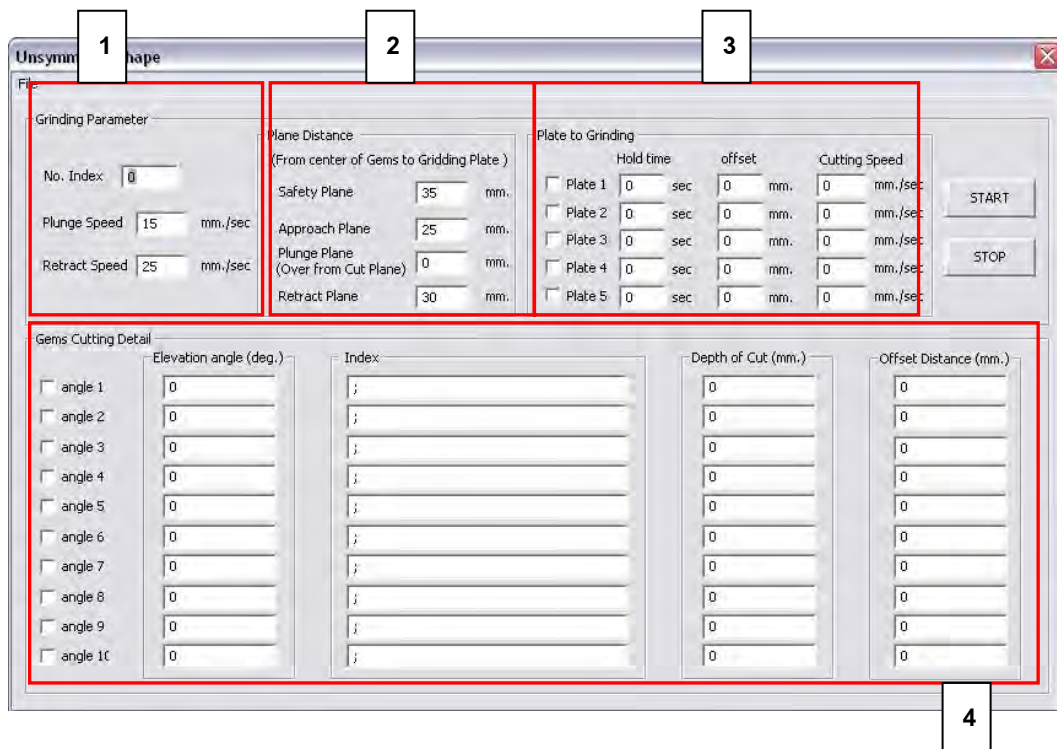
5. เมื่อทำการกำหนดค่าต่างๆเรียบร้อยแล้ว เริ่มโปรแกรมการเจียรระไนได้โดยการกดปุ่ม Start ที่อยู่ทางขวามือของหน้าต่าง ดังรูปที่ ง.21

6. โปรแกรมจะเริ่มสั่งการให้เครื่องเจียรระโนเริ่มทำงานตามโปรแกรม ไปจนกระทั่งจบ
7. หากขณะเจียรระโน มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น หรือต้องการหยุดเจียรระโน สามารถทำได้โดยการ กดปุ่ม Stop ที่อยู่ใต้ปุ่ม Start ดังรูปที่ ง.22 ทั้งนี้ หรือกดปุ่ม Emergency Stop ของเครื่อง ก็ได้เช่นกัน จากนั้นแก้ไขโปรแกรมใหม่ และต้องเริ่มการเจียรระโนใหม่ตั้งแต่ต้น ไม่สามารถเจียรระโนต่อจากเดิมได้

## 5.2 การเจียรระโนรูปร่างไม่สมมาตร

การเจียรระโนด้วยโปรแกรมเจียรระโนแบบไม่สมมาตรมีขั้นตอนดังนี้

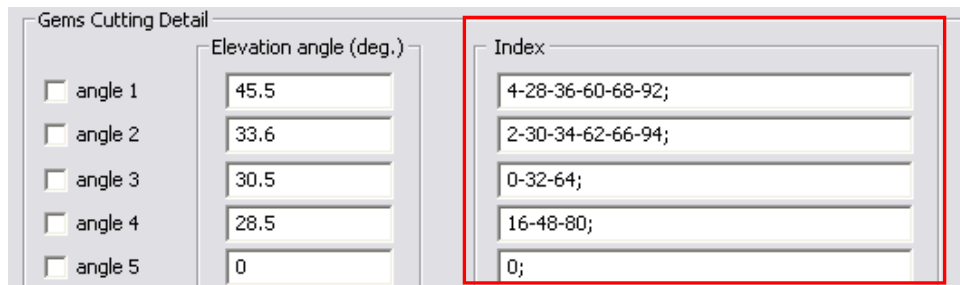
1. กดปุ่มเลือกหน้าต่างการเจียรระโนแบบไม่สมมาตรขึ้นมาโดยกดที่ปุ่ม Unsymmetry Shape ที่อยู่ในส่วนหมายเลข 7 ในรูปที่ ง.4
2. เมื่อเลือกขึ้นมาแล้ว จะปรากฏหน้าต่างดังรูปที่ ง.24



รูปที่ ง.24 หน้าต่างสำหรับการเจียรระโนรูปร่างไม่สมมาตร

จากรูปที่ ง.24 จะเห็นว่าหน้าต่างที่ใช้ในการควบคุมโปรแกรมการเจียรระโนแบบไม่สมมาตรแบ่งออกเป็น 4 ส่วน เช่นเดียวกับหน้าต่างการเจียรระโนแบบสมมาตร ซึ่งในส่วนที่ 1 ถึง ส่วนที่ 3 ของหน้าต่างสำหรับการเจียรระโนทั้ง 2 แบบ มีรายละเอียดที่เหมือนกันทุกอย่าง ต่างกันแต่เพียงในส่วนที่ 4 เท่านั้น โดยจากเดิมที่เหลี่ยมสมมาตรจะมีช่อง Start Index และ No. of Facet ให้ใส่ แต่สำหรับการเจียรระโนแบบไม่สมมาตรจะไม่มี 2 ช่อง

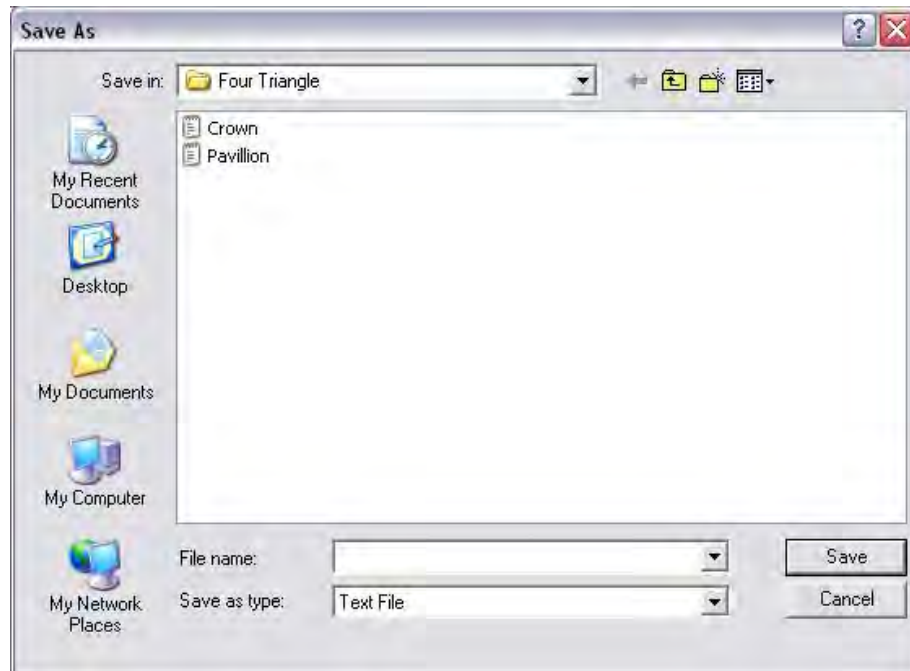
ดังกล่าว และถูกแทนที่ด้วยช่อง Index นั่นคือให้ใส่ค่ามุมดัชนีที่ต้องการเจียรระโน ในมุมยก  
ลงไปเลย โดยขึ้นแต่ละมุมด้วยเครื่องหมาย “ - “ และลงท้ายด้วยเครื่องหมาย “ ; “ ดัง  
แสดงในรูปที่ ง.25



รูปที่ ง.25 การใส่ค่ามุมดัชนีลงในโปรแกรม

- ส่วนขั้นตอนการเลือกงานเจียรระโนที่จะใช้ การเลือกมุมยกที่จะเจียรระโน และขั้นตอนการ  
สั่งการเจียรระโนทำเหมือนกับการเจียรระโนแบบสมมาตรทุกประการ

สำหรับโปรแกรมการเจียรระโนทั้ง 2 แบบนี้สามารถบันทึกค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเจียรระโนได้  
โดยไปที่แถบทูลบาร์ แล้วเลือก File -> Save จะขึ้นหน้าต่างมาให้ Save ดังรูปที่ ง.26



รูปที่ ง.26 หน้าต่างสำหรับบันทึกโปรแกรม

โดยไฟล์ที่บันทึกจะมีนามสกุลเป็น .txt สามารถเปิดและแก้ไขได้ ในขณะที่การโหลดไฟล์เข้ามา  
ใช้ก็ทำได้เช่นกัน โดยไฟล์ที่เป็นแบบสมมาตรไม่สามารถเปิดในหน้าต่างการเจียรระโนแบบไม่

สมมาตรได้ เช่นกันไฟล์ที่เป็นแบบไม่สมมาตรก็ไม่สามารถเปิดในหน้าต่างการเจียระไนแบบสมมาตรได้ หากเปิดไฟล์ผิดประเภทจะมีข้อความเตือนแสดงขึ้นมาดังรูปที่ ง.27

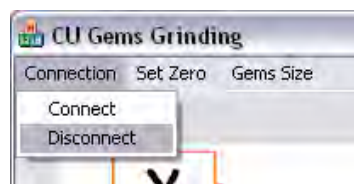


รูปที่ ง.27 ข้อความเตือนกรณีที่เปิดไฟล์ผิดประเภท

## 6. การปิดโปรแกรมหลังเสร็จสิ้นการทำงาน

เมื่อใช้งานเสร็จสิ้นการปิดโปรแกรมสามารถทำได้ดังนี้

1. ที่หน้าต่างหลักของโปรแกรมไปที่แถบทูลบาร์ เลือก Connection -> Disconnect ดังรูปที่ ง.28 เพื่อปิดการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม และเครื่องเจียระไน



รูปที่ ง.28 การปิดการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมกับเครื่องเจียระไน

2. เมื่อกดแล้วให้รอทุกแกนของเครื่องเจียระไนจะเคลื่อนที่กลับสู่จุดอ้างอิงของเครื่อง จากนั้นจะขึ้นข้อความเตือนให้ปิดเครื่องเจียระไนพลอยดังรูปที่ ง.29 ให้ปิดสวิตซ์เครื่องเจียระไนพลอย จากนั้นกดปุ่ม OK



รูปที่ ง.29 ข้อความเตือนหลังจากปิดการเชื่อมต่อ

3. ปิดโปรแกรมเพื่อจบการทำงาน

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปรัชญา พิพัฒนานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2527 เป็นชาว กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในระดับอุดมศึกษาที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2549