

การควบคุมแรงสำหรับการเจียระไนพลอยด้วยเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

นายชนัยณัฐ แก้วทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

GRINDING FORCE CONTROL OF THE CHULA AUTOMATIC FACETING MACHINE

Mr. Chanainat Kaothong

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 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การควบคุมแรงสำหรับการเจียรไนพลอยด้วย
เครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

โดย

นายชัชชัย แก้วทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.พงศกร บำรุงไทย)

ชัชยัญญู แก้วทอง : การควบคุมแรงสำหรับการเจียรระโนพลอยด้วยเครื่องเจียรระโนพลอย
 จูฬาแบบอัตโนมัติ. (Grinding Force Control of the Chula Automatic Faceting
 Machine) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 96 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมตำแหน่งและแรงทางอ้อม
 สำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรระโนพลอยจูฬาแบบอัตโนมัติ ในงานเจียรระโนพลอยแบบ
 อัตโนมัติ เครื่องเจียรระโนพลอยจูฬาแบบอัตโนมัติประกอบด้วยเครื่องเคลื่อนที่แบบควบคุมตำแหน่ง
 4 แกน และการควบคุมแบบเปิด-ปิด 2 แกน คือการหมุนงานเจียรระโนและการเข้า-ออกของ
 งานเจียรระโน โดยที่สามารถเจียรระโนพลอยได้หลายเม็ดพร้อมกัน นอกจากนี้ขนาดและรูปร่างของ
 พลอยที่ได้จะมีขนาดและคุณภาพความเงาที่ใกล้เคียงเท่ากัน

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการพัฒนาตัวควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่มีความรู้สึกของ
 แรงแบบผ่อนตามในขณะที่เกิดพลอย และทดสอบระบบควบคุมแรงกตที่พัฒนาขึ้นนี้โดยใช้พลอย
 ชนิด คิวบิก เซอร์โคเนีย ที่มีความแข็งระดับ 8.5 โดยการหาแบบจำลองสภาพแวดล้อมของ
 การเจียรระโนพลอยก่อน และหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเจียรระโนขัดชิ้นเงาของพลอย
 ชนิดนี้ พร้อมหาขนาดขอบเขตช่วงของแรงกตที่รู้สึกได้จากตัวควบคุมแรงที่พัฒนาขึ้น แล้วนำ
 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้ทั้งหมดนี้มาทดลองเจียรระโนพลอยเพื่อให้พลอยที่ได้มีขนาดและความเงาที่
 ใกล้เคียงกัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2555.....

5270260921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : THE CHULA AUTOMATIC FACETING MACHINE / INDIRECT FORCE CONTROL / PID CONTROLLER

CHANAINAT KAOTHONG : GRINDING FORCE CONTROL OF THE CHULA AUTOMATIC FACETING MACHINE. ADVISOR : PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 96 pp.

This research work is to develop a controller that combines the position and indirect force control for the gem stone polishing process. The polished gem stones are attached to the end of drop-stick of 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 crank motion. Many gem stones (number of gem stones will depends on the size of the gem stone) can be grinded and polished simultaneously with the result of uniform size and quality.

In this research work, the controller is developed based on PID motion control. The reference position of the controller for the grinding process is obtained based on the compliance force control technique with known compliance model. This reference position will specified the pressing force for the grinding process indirectly. The controller developed in-house is used for testing with Cubic Zirconia gemstone which the hardness is 8.5 Mohs. The compliance model and appropriate parameters including the minimum and maximum boundary of polishing process can be obtained experimentally. Then all parameters obtained from the experiment can be used in the controller. The uniform size and quality of the multi-stone grinding and polishing process can be obtained with this controller.

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

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

Academic Year : ..2012.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของ ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาเสียสละเวลามาให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆที่มีประโยชน์ในงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงคอยสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์ เงินทุน และสถานที่ในการทำวิจัย มาด้วยดีโดยตลอด จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้สนับสนุนเงินทุนการศึกษาสำหรับหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในช่วง 2 ปี และขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกด้วยกันทุกท่านที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและกำลังใจตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และทุกคนในครอบครัวที่ได้คอยเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนทุกๆด้าน โดยเฉพาะทางด้านการเรียนและการดำรงชีวิตแก่ข้าพเจ้า อย่างดียิ่งมาโดยตลอดจนทำให้ข้าพเจ้ามีทุกวันนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เครื่องเจียร์ไนพลอยที่ใช้งานในปัจจุบัน.....	3
2.2 เครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	4
2.2.1 เครื่องเจียร์ไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่ 1.....	4
2.2.2 เครื่องเจียร์ไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่ 2 และรุ่นที่ 3.....	4
2.2.3 การควบคุมเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติก่อนการพัฒนา.....	6
2.2.4 งานวิจัยและบทความที่เกี่ยวข้อง.....	7
บทที่ 3 โครงสร้างของเครื่องเจียร์ไนพลอยอัตโนมัติและหลักการทำงานเบื้องต้น.....	8
3.1 รูปร่าง ลักษณะ โครงสร้าง และการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียร์ไนพลอยอัตโนมัติ.....	8
3.1.1 โครงสร้างภายนอกของเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	8
3.1.2 การเคลื่อนที่ของเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	9
3.2 หลักการทำงานของเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	11
3.3 จลศาสตร์ของเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	13
3.3.1 ฟอว์เวิร์ดคิเนเมติกส์ (Forward Kinematics).....	14
3.3.2 อินเวิร์ดคิเนเมติกส์ (Inward Kinematics).....	15
บทที่ 4 หลักการในการควบคุมการทำงานของเครื่องเจียร์ไนพลอย.....	16
4.1 การควบคุมเครื่องเจียร์ไนพลอย.....	16
4.2 การควบคุมแรงและตำแหน่งเครื่องเจียร์ไนพลอย.....	18
4.2.1 การส่งถ่ายแรงผ่านบอลสกรู.....	18
4.2.2 ทฤษฎีการควบคุมแรงแบบผ่อนตาม.....	23
4.2.3 การควบคุมแรงกดของเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	25

	หน้า
บทที่ 5 ขั้นตอนในการเจียรระไนพลอยโดยใช้เครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	27
5.1 ขั้นตอนการติดพลอยเข้ากับทวนติดพลอย (Drop-stick) โดยใช้กาว.....	27
5.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปพลอยก่อนการนำไปเจียรระไนพลอยด้วย เครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	28
5.3 ขั้นตอนการนำชุดพลอยใส่เข้าชุดจับทวนพลอย.....	29
5.4 ขั้นตอนการเจียรระไนพลอยด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ.....	30
5.5 ขั้นตอนการกลับด้านทวนติดพลอย.....	32
5.6 ขั้นตอนการเจียรระไนด้านล่างพลอย.....	34
5.6 ขั้นตอนการถอดพลอยและทำความสะอาดพลอย.....	35
บทที่ 6 การทดลอง และ ผลการทดลอง.....	36
6.1 การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และค่าสภาพแวดล้อมของเครื่องเจียรระไนพลอย จุฬาแบบอัตโนมัติ.....	37
6.1.1 การทดลองหาน้ำหนักของชุดจับทวนพลอย.....	37
6.1.2 การทดลองหาค่าคงที่ของสปริงที่ทำการทดน้ำหนักของชุดจับทวนพลอย...	39
6.1.3 การทดลองหาค่าคงที่ความหยุ่นตัวของจานขัดเงา.....	41
6.2 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการขัดขึ้นเงาพลอย และทดสอบโปรแกรมการควบคุมแรงทางอ้อม.....	48
6.2.1 การทดลองหาระยะกวดที่เหมาะสมในการขัดขึ้นเงาพลอย.....	48
6.2.2 การทดลองหาค่าแรงกวดที่เหมาะสมในการขัดขึ้นเงาพลอย.....	52
6.2.3 การทดสอบโปรแกรมการควบคุมแรงทางอ้อมในการขัดขึ้นเงาพลอย.....	62
บทที่ 7 บทสรุปผลงานวิจัย และ ข้อเสนอแนะ.....	66
7.1 บทสรุปผลงานวิจัย.....	66
7.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำงานวิจัย.....	67
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	67
รายการอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	69
ภาคผนวก ก หลักในการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์.....	70
ภาคผนวก ข การให้ขนาดและรูปร่างพลอยมาตรฐาน และการใช้งานโปรแกรมซียู-โซลิด.....	82
ภาคผนวก ค การใช้งานโปรแกรม CU Gem Grinding ในการเจียรระไนพลอย.....	87
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	96

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อดีข้อด้อยของการ์ดแปลงสัญญาณในแต่ละรุ่นของเครื่องเจียรไนพลอย	6
ตารางที่ 3.1 DH-Parameter ของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ.....	14
ตารางที่ 6.1 ผลของกระแสที่วัดได้จากการทดลองพร้อมแปลงเป็นหน่วยน้ำหนัก.....	38
ตารางที่ 6.2 ค่าคงที่การหมุนตัวของของการแช่พลอยที่เวลาต่างๆ.....	47
ตารางที่ 6.3 รายละเอียดของเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	53
ตารางที่ 6.4 ค่าแรงกดพลอยเฉลี่ยทั้งหมดของการเจียรไนขัดเงาพลอยที่จำนวนต่างๆ.....	61
ตารางที่ 6.5 รายละเอียดของระยะกดเพิ่มเฉลี่ยและระยะกดเพิ่มสูงสุด ที่ได้จากการทดลองการเจียรไนพลอยขัดขึ้นเงาพลอยในด้าน Crown ของเหลี่ยมพลอยแบบ Standard Round Brilliant	63
ตารางที่ 6.6 รายละเอียดของระยะกดเพิ่มเฉลี่ยและระยะกดเพิ่มสูงสุดที่ได้ จากการทดลองการเจียรไนพลอยขัดขึ้นเงาพลอยในด้าน Pavilion ของเหลี่ยมพลอยแบบ Standard Round Brilliant.....	64
ตารางที่ ข.1 การบอกเหลี่ยมพลอยจากรูปร่างพลอยเหลี่ยม Simple Jack.....	83

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องเจียรระไนพลอยที่ใช้ในอุตสาหกรรมเจียรระไนพลอยในประเทศไทย	3
รูปที่ 2.2 เครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่1	4
รูปที่ 2.3 เครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่2	5
รูปที่ 2.4 เครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่3	5
รูปที่ 3.1 เครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติพร้อมแสดงแผนการเคลื่อนที่	8
รูปที่ 3.2 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน X	9
รูปที่ 3.3 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y	9
รูปที่ 3.4 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z (ก.) แนวการเคลื่อนที่ (ข.) ขอบเขตการเคลื่อนที่.....	10
รูปที่ 3.5 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน A	10
รูปที่ 3.6 แผนภาพหลักการทำงานของเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ.....	11
รูปที่ 3.7 ส่วนของ I/O Port ของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่สั่งงานผ่านมอเตอร์ (ก.) ส่วนขั้วงานเจียรระไนให้หมุน (ข.) ส่วนของการสายชุดงานเจียรระไน.....	12
รูปที่ 3.8 ส่วนของ I/O Port ของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่สั่งผ่าน Limit Switch (ก.) สวิตช์สำหรับป้องกันการชนแกน x (ข.) สวิตช์สำหรับป้องกันการชนแกน z	12
รูปที่ 3.9 แผนภาพจำลองของเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติพร้อมการติดเฟรม.....	13
รูปที่ 4.1 แผนภาพการควบคุมและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องเจียรระไนพลอย จุฬาแบบอัตโนมัติ.....	17
รูปที่ 4.2 ผลของแกนมอเตอร์ต่างๆต่อรูปร่างและขนาดของพลอย	18
รูปที่ 4.3 ภาพการส่งถ่ายแรงของ Thrust collar ที่ถ่ายน้ำหนักลงมายัง กึ่งกลางเกลียวของ ball screw	19
รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมแรงอิสระของเกลียวบอลสกรู.....	20
รูปที่ 4.5 ไดอะแกรมแรงอิสระที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง o บนระนาบที่สนใจ ABDO ในขณะยกขึ้น.....	20
รูปที่ 4.6 ไดอะแกรมแรงอิสระที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง o บนระนาบที่สนใจ ABDO ในขณะยกลง.....	22
รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงการกวดพลอยที่อยู่บนปลายทวนติดพลอยบนจานขัดเงา.....	24
รูปที่ 4.8 แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมตำแหน่งของเครื่องเจียรระไนแบบอัตโนมัติ	25
รูปที่ 4.9 แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแรงและตำแหน่งของเครื่องเจียรระไน แบบอัตโนมัติของมอเตอร์แกน z	26
รูปที่ 5.1 พลอยที่ผ่านการแต่งเกลารูปร่างขึ้นรูปทรงเบื้องต้นแล้ว.....	27
รูปที่ 5.2 การติดพลอยเข้ากับทวนติดพลอยด้วยกาวยูวี.....	27

	หน้า
รูปที่ 5.3 การอบชุดพลอยที่ติดกาแล้วในตู้อบยูวี.....	28
รูปที่ 5.4 การเคล้าขึ้นรูปพลอยด้วยเครื่องเจียรระโนแบบใช้มือ (ก.) พลอยถูกเคล้าขึ้นรูป ด้วยงานเจียรระโนแบบหยาบ (ข.) พลอยที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว.....	28
รูปที่ 5.5 ชุดล๊อคทวนติดพลอย (ก.) ตัวป้องกันทวนติดพลอยกระดกขึ้น (ข.) ตัวหนีบทวนติดพลอยให้แน่นติดกับชุดจับทวนพลอย.....	29
รูปที่ 5.6 การใส่ทวนติดพลอยเข้ากับชุดจับทวนพลอย (ก.) ด้านหน้า (ข.) ด้านหลัง.....	29
รูปที่ 5.7 การเจียรระโนพลอยด้วยเครื่องเจียรระโนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ.....	30
รูปที่ 5.8 งานเจียรระโนพลอยของเครื่องเจียรระโนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ (ก.) งานขึ้นรูปพลอยเบอร์ 300 (ข.) งานขึ้นรูปพลอยเบอร์ 800 (ค.) งานขึ้นรูปพลอยเบอร์ 1200 (ง.) งานทองแดงขัดเงา.....	31
รูปที่ 5.9 การทาน้ำมันขัดเงาที่ผ่านการผสมผงเพชรแล้วบนงานทองแดง.....	31
รูปที่ 5.10 เม็ดพลอยที่ผ่านการเจียรระโนด้านบนของเม็ดพลอย.....	32
รูปที่ 5.11 ชุดอุปกรณ์สำหรับกลับด้านพลอย.....	32
รูปที่ 5.12 การยึดทวนติดพลอยเปล่า กับอุปกรณ์กลับด้านพลอย.....	33
รูปที่ 5.13 การยึดทวนติดพลอยที่ผ่านการเจียรระโนด้านบนพลอยแล้วเข้ากับ ทวนติดพลอยเปล่า.....	33
รูปที่ 5.14 การเผาไฟเพื่อถอดทวนติดพลอยก่อนหน้าออก.....	34
รูปที่ 5.15 พลอยที่ถูกกลับด้านแล้ว.....	34
รูปที่ 5.16 เม็ดพลอยที่ผ่านการเจียรระโนด้านล่างของเม็ดพลอย.....	34
รูปที่ 5.17 การต้มทวนติดพลอยเพื่อแกะพลอยออกจากด้าม.....	35
รูปที่ 5.18 พลอยที่ผ่านการเจียรระโนและทำความสะอาดแล้ว.....	35
รูปที่ 6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มม. และความยาว ขนาดประมาณ 4.5 มม. ของพลอยดิบที่ใช้สำหรับการเจียรระโน.....	36
รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบกระแสไฟระหว่างชุดจับทวนพลอยที่ไม่ติดสปริง กับชุดจับทวนพลอยที่ติดสปริง.....	40
รูปที่ 6.3 ผลต่างกระแสไฟระหว่างชุดจับทวนพลอยที่ไม่ติดสปริง กับชุดจับทวนพลอยที่ติดสปริง.....	40
รูปที่ 6.4 แผนภาพวัตถุอิสระในขณะที่เจียรระโนขัดขึ้นเงา.....	41
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยกับระยะเวลาการเสีรูปร่างของพลอย ที่ระยะแช่พลอย 0 วินาที.....	43
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับระยะเวลาการเสีรูปร่างของพลอย ที่ระยะแช่พลอย 0 วินาที.....	43
รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยกับระยะเวลาการเสีรูปร่างของพลอย ที่ระยะแช่พลอย 1 วินาที.....	44

	หน้า
รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับระยะเวลาการเสีรูปร่างของพลอย ที่ระยะแช่พลอย 1 วินาที.....	44
รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยกับระยะเวลาการเสีรูปร่างของพลอย ที่ระยะแช่พลอย 2 วินาที.....	45
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับระยะเวลาการเสีรูปร่างของพลอย ที่ระยะแช่พลอย 2 วินาที.....	45
รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยกับระยะเวลาการเสีรูปร่างของพลอย ที่ระยะแช่พลอย 3 วินาที.....	46
รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับระยะเวลาการเสีรูปร่างของพลอย ที่ระยะแช่พลอย 3 วินาที.....	46
รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยกับระยะลึกในการกดพลอย พร้อมเปรียบเทียบระยะที่พลอยไม่เงากับพลอยที่เงา.....	49
รูปที่ 6.14 ลักษณะผิวของพลอยที่มีรอยแตกหรือขนแมว.....	49
รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยจากบอลสกรูกับระยะลึก ในการกดพลอยที่ระยะเวลาแช่พลอยตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาที.....	50
รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดจากบอลสกรูกับระยะลึก ในการกดพลอยที่ระยะเวลาแช่พลอยตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาที.....	50
รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยจากบอลสกรูกับระยะลึก ในการกดพลอยที่ระยะเวลาแช่พลอยตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาที พร้อมเปรียบเทียบระยะที่พลอยไม่เงากับพลอยที่เงา.....	51
รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดจากบอลสกรูกับระยะลึก ในการกดพลอยที่ระยะเวลาแช่พลอยตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาที พร้อมเปรียบเทียบระยะที่พลอยไม่เงากับพลอยที่เงา.....	51
รูปที่ 6.19 เหลี่ยมพลอยและขนาดที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid.....	52
รูปที่ 6.20 รูปร่างของพลอยเหลี่ยม Standard Round Brilliant.....	52
รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านกลับในการกดพลอยต่อเม็ดกับหน้าพลอย ที่มุมยก 47.....	54
รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยก 47.....	55
รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับหน้าพลอยที่มุมยก 47.....	55
รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ ของพลอย 1 เม็ด.....	56
รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ ของพลอย 3 เม็ด.....	56
รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ ของพลอย 5 เม็ด.....	57

	หน้า
รูปที่ 6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับน้ำหนักพลอยที่มุ่มยกต่างๆ ของพลอย 7 เม็ด.....	57
รูปที่ 6.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับน้ำหนักพลอยที่มุ่มยกต่างๆ ของพลอย 16 เม็ด.....	58
รูปที่ 6.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับน้ำหนักพลอยที่มุ่มยกต่างๆ ของพลอย 1 เม็ด.....	58
รูปที่ 6.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับน้ำหนักพลอยที่มุ่มยกต่างๆ ของพลอย 3 เม็ด.....	59
รูปที่ 6.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับน้ำหนักพลอยที่มุ่มยกต่างๆ ของพลอย 5 เม็ด.....	59
รูปที่ 6.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับน้ำหนักพลอยที่มุ่มยกต่างๆ ของพลอย 7 เม็ด.....	60
รูปที่ 6.33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับน้ำหนักพลอยที่มุ่มยกต่างๆ ของพลอย 16 เม็ด.....	60
รูปที่ 6.34 เหลี่ยมพลอย Standard Round Brilliant ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียรระไน (ก.) ด้านบนของพลอย (Crown Side) (ข.) ด้านล่างของพลอย (Pavilion Side).....	65
รูปที่ 6.35 พลอยเหลี่ยม Standard Round Brilliant ที่ได้จากการทดลอง.....	65
รูปที่ ก.1 ส่วนประกอบภายในมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โว.....	70
รูปที่ ก.2 แผนภาพบล็อกของระบบไฟฟ้าเชิงกล (DC Servo Motor).....	71
รูปที่ ก.3 ส่วนประกอบของอินทรีเมนทัลเอ็นโคดเดอร์.....	73
รูปที่ ก.4 ส่วนประกอบของแอ็บโซลูตเอ็นโคดเดอร์.....	74
รูปที่ ก.5 แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด.....	75
รูปที่ ก.6 สัญญาณที่ผ่านตัวควบคุมเชิงสัดส่วน.....	76
รูปที่ ก.7 ลักษณะการส่งสัญญาณอ้างอิงแบบเชิงเส้น.....	79
รูปที่ ก.8 ลักษณะสัญญาณแบบเชิงเส้นผสมกับพาราโบลา.....	80
รูปที่ ข.1 การบอกขนาดของพลอย.....	82
รูปที่ ข.2 ลักษณะการบอกขนาดและรูปร่างของพลอย.....	83
รูปที่ ข.3 พารามิเตอร์ในการเจียรระไนพลอย.....	84
รูปที่ ข.4 การกำหนดลักษณะรูปร่างของพลอยดิบในโปรแกรมซียู-โซลิด.....	85
รูปที่ ข.5 พารามิเตอร์ที่ต้องป้อนสำหรับสร้างเหลี่ยมพลอย.....	85
รูปที่ ข.6 การตัดรูปทรงด้วยระนาบจนได้โมเดลพลอยที่ต้องการ.....	86
รูปที่ ค.1 หน้าต่างโปรแกรมหลักของโปรแกรม CU Gem Grinding.....	87
รูปที่ ค.2 ลำดับการเชื่อมต่อเครื่องของโปรแกรม CU Gem Grinding.....	88

	หน้า
รูปที่ ค.3 ตั้งตำแหน่งอ้างอิงแกน x ในขณะแนวแกน z ต่ำเกินไป.....	89
รูปที่ ค.4 สถานะของตำแหน่งอ้างอิงแกน z หลังจากตั้งตำแหน่งอ้างอิงแล้ว.....	89
รูปที่ ค.5 ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่.....	90
รูปที่ ค.6 หน้าต่างแสดงตำแหน่งอ้างอิงใหม่ มีค่าตำแหน่งเป็นศูนย์.....	90
รูปที่ ค.7 ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องเจียระไนพลอย.....	91
รูปที่ ค.8 หน้าต่างโปรแกรมแสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมเครื่อง.....	91
รูปที่ ค.9 หน้าต่างโปรแกรมหลักที่แสดงสถานะพร้อมการใช้งาน.....	92
รูปที่ ค.10 ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการเจียระไนพลอย.....	92
รูปที่ ค.11 หน้าต่างโปรแกรมหลักใช้ควบคุมการเจียระไนพลอย.....	93
รูปที่ ค.12 ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการเรียกไฟล์บันทึกพารามิเตอร์ของพลอย.....	94
รูปที่ ค.13 หน้าต่างแสดงค่าทั้งหมดของพลอยที่ใช้ในการเจียระไน.....	94
รูปที่ ค.14 ข้อความเตือนหลังจากปิดการเชื่อมต่อ.....	95

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอัญมณีของประเทศไทยถือเป็นอุตสาหกรรมระดับต้นๆที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศ แต่โรงงานอุตสาหกรรมที่มีมากกว่า 700 โรงงานปัจจุบันส่วนใหญ่ยังคงตอบสนองความต้องการของตลาดได้เพียงระดับกลางและล่างเท่านั้นส่งผลให้ประเทศคู่แข่งที่กำลังพัฒนาอุตสาหกรรมประเภทนี้ เช่น อินเดีย จีน ปากีสถาน สามารถผลิตออกมาแข่งได้ง่ายกว่าเนื่องจากประเทศเหล่านี้มีจุดแข็งที่สำคัญคือ ค่าแรงที่ต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาถึงแนวทางในการพัฒนาคุณภาพการผลิตของประเทศพบว่าปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทย คือ อุตสาหกรรมในอดีตที่ผ่านมาเป็นอุตสาหกรรมที่พึ่งพาการออกแบบและอาศัยคนเป็นหลักทำให้พลอยสังเคราะห์ในตลาดขนาดใหญ่ที่จำเป็นต้องใช้จำนวนมาก ไม่สามารถผลิตออกมาได้ทันด้วยแรงงานคน เพราะการใช้แรงงานคนไม่สามารถทำให้พลอยสังเคราะห์ที่ออกมามีขนาดที่ uniform ตลอดทุกการผลิตได้ ดังนั้นในปัจจุบันการผลิตพลอยด้วยเทคโนโลยีเก่าจึงไม่สามารถตอบสนองได้ทัน ส่งผลให้ประเทศไทยต้องพัฒนาความสามารถในการผลิตให้เพียงพอ

ทางห้องปฏิบัติการวิจัยระบบผลิตขั้นสูง จึงได้ทำการวิจัย ออกแบบ และสร้างเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ ขึ้นมาใช้งาน พร้อมทั้งปรับปรุงเครื่องจักรดังกล่าว ให้สามารถทำงานเจียรไนเหลี่ยมพลอยได้แบบอัตโนมัติ โดยสั่งการทำงานและประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นผลให้ทำงานได้เร็วและแม่นยำกว่ามนุษย์แต่ในการเจียรไนพลอยแบบใช้คน(Manual) นั้น การขัดขึ้นเงาทำได้ดีกว่าการเจียรไนแบบอัตโนมัติ ทั้งนี้ เนื่องจากคนสามารถรับรู้ความรู้สึกของแรงได้ และหากการเพิ่มในส่วนการรับรู้แรงนี้ โดยการติดตั้ง force sensor ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและยากต่อการบำรุงรักษา อีกทั้งอาจจำเป็นต้องติดตั้งที่ทวนติดพลอยทุกด้านก็เป็นได้ ส่งผลให้ต้นทุนราคาเครื่องสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ดังนั้นการพัฒนาวิธีการหรือเทคนิค เพื่อเพิ่มการรับรู้แรงจากสภาพแวดล้อมเข้าไปอยู่ในส่วนของระบบควบคุมตำแหน่งจึงเป็นงานวิจัยหลัก

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะครอบคลุมในส่วนการปรับปรุงตัวควบคุมการทำงาน และมีส่วนของแรงภายนอกมากระทำกับระบบ เป็นการควบคุมตำแหน่งและแรงเจียรไนทางอ้อม รวมถึงการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการสั่งงานเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ และหากการควบคุมแรงที่เหมาะสมในการเจียรไนการขัดขึ้นเงา โดยจำลองการหยุดตัวของสภาพแวดล้อม หรือ compliance behavior ของการเจียรไน โดยการกำหนดขนาดขอบเขตของแรงในการกวดจากระยะที่กวดร่วมกับค่าคงที่การหยุดตัวของสภาพแวดล้อมเพื่อให้การทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

พัฒนาระบบควบคุมตำแหน่งและแรงเจียรไน สำหรับเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ ตามกระบวนการเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบผลิตขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. พัฒนาและออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งและแรงเจียร์ไน สำหรับเครื่องเจียร์ไน พลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ
2. ปรับปรุงโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียร์ไนพลอย เพื่อให้สอดคล้องกับการควบคุมตำแหน่งและแรงเจียร์ไนที่พัฒนาขึ้น

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาขั้นตอนการทำงาน และทดลองใช้งานเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติต้นแบบ ที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบการผลิตขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. วิเคราะห์ข้อควรปรับปรุงของเครื่องเจียร์ไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ เพื่อนำมา ออกแบบและสร้างระบบควบคุมเครื่องเจียร์ไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติใหม่ โดยอิง พื้นฐานจากระบบเดิม
3. ศึกษาระบบควบคุมตำแหน่งและแรง (Motion and Force Control)
4. หาวิธีการเพื่อปรับปรุงการวัดสัญญาณกระแส (Current signal) ที่ส่งเข้าไปยังมอเตอร์ ในขณะที่เจียร์ไน เพื่อให้สามารถนำสัญญาณกระแสนี้มาใช้ในรูปของการควบคุม ตำแหน่งและแรงเจียร์ไน
5. ออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่สามารถควบคุมได้ทั้งตำแหน่งและแรงเจียร์ไน โดยใช้ข้อมูลความเร็ว ตำแหน่ง และสัญญาณกระแสที่ไหลเข้าสู่มอเตอร์ ปรับปรุงและแก้ไขตัวควบคุมการทำงาน และโปรแกรมที่ใช้ในการสั่งงานเครื่อง เจียร์ไนพลอย เพื่อให้สอดคล้องกับระบบควบคุมตำแหน่งและแรงเจียร์ไนที่พัฒนาขึ้น
6. ทดสอบโปรแกรมที่ปรับปรุงกับเครื่องเจียร์ไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ
7. วิเคราะห์ปัญหา และแก้ไขปรับปรุง
8. วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ระบบควบคุมต้นแบบที่สามารถควบคุมตำแหน่งและแรงเจียร์ไน สำหรับเครื่อง เจียร์ไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ และสามารถประยุกต์ในงานจริงกับภาคอุตสาหกรรม เจียร์ไนพลอย
2. ได้แนวทางในการควบคุมแรงผ่านกระแสโดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงที่มีราคา สูง
3. ได้โปรแกรมต้นแบบสำหรับการควบคุมการเจียร์ไนพลอยของเครื่องเจียร์ไนพลอย อัตโนมัติที่ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานและควบคุมการทำงานของเครื่องเจียร์ไนพลอยจุฬา แบบอัตโนมัติโดยสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่ช่วยในการควบคุมแรงเจียร์ไนพลอย
4. ได้พลอยที่ผ่านการเจียร์ไนที่มีคุณภาพมากขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากตลาดอุตสาหกรรมเจียรไนพลอยมีการเติบโตขึ้น และการผลิตไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด เพราะปัจจุบันอุตสาหกรรมชนิดนี้ยังพึ่งแรงงานคนเป็นหลัก ดังนั้นจึงได้มีความคิดที่จะพัฒนาเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติเพื่อเข้ามามีส่วนร่วมช่วยในการผลิตของอุตสาหกรรมเจียรไนพลอย โดยเครื่องจักรดังกล่าวต้องสามารถทำการเจียรไนได้ครั้งละปริมาณมากและรวดเร็ว พร้อมทั้งผลผลิตที่ได้ต้องมีคุณภาพใกล้เคียงหรือสูงกว่าแรงงานมนุษย์

ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงแนวคิดเบื้องต้นที่ใช้ในการประดิษฐ์และพัฒนาเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ เพื่อนำมาใช้ในงานในอุตสาหกรรมเจียรไนพลอย

2.1 เครื่องเจียรไนพลอยที่ใช้งานในปัจจุบัน

การควบคุมมาตรฐานสำหรับอุตสาหกรรมเจียรไนพลอยภายในประเทศไทยโดยอาศัยแรงงานมนุษย์เป็นหลักยังทำได้ค่อนข้างยาก และไม่มีการศึกษาพัฒนาเครื่องจักรสำหรับช่วยในการเจียรไน ทำให้การแข่งขันกับประเทศคู่แข่งที่กำลังพัฒนาอุตสาหกรรมทางด้านนี้เป็นไปได้ยาก เนื่องจากไม่สามารถผลิตได้ปริมาณและคุณภาพตามความต้องการของตลาดได้ทัน

เครื่องเจียรไนพลอยมือที่ใช้ในปัจจุบันเป็นเครื่องมือที่ใช้ควบคุมโดยมีอุปกรณ์ช่วยในการปรับมุมตลับเจียรไน ในขณะที่มีความลึกในการเจียรไนและมุมที่ใช้ในการเจียรไนต้องใช้ความชำนาญของช่างเจียรไน เป็นเหตุให้หากตั้งมุมผิดเพียงเล็กน้อยส่งผลให้พลอยที่เจียรไนมาเสียคุณภาพไป และโอกาสเกิดความผิดพลาดก็มีสูง โดยเครื่องเจียรไนดังกล่าว แสดงไว้ดังรูปที่ 2.1 เห็นได้ว่าเครื่องเจียรไนพลอยมือชนิดนี้ต้องใช้ความชำนาญของช่างเจียรไนพลอยอย่างมาก ซึ่งปัจจุบันแรงงานดังกล่าวมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการของตลาด อีกทั้งในการเจียรไนแต่ละครั้งยังได้ปริมาณเพียงครั้งละ 1 เม็ด และมีราคาค่อนข้างสูง เมื่อเทียบราคาค่าต้นทุนต่อผลผลิตแล้วพบว่าไม่คุ้มค่า จึงได้มีความคิดที่จะพัฒนาเครื่องเจียรไนพลอยให้เป็นเครื่องจักรอัตโนมัติ เช่นเดียวกับเครื่องจักรในอุตสาหกรรมอื่นๆ



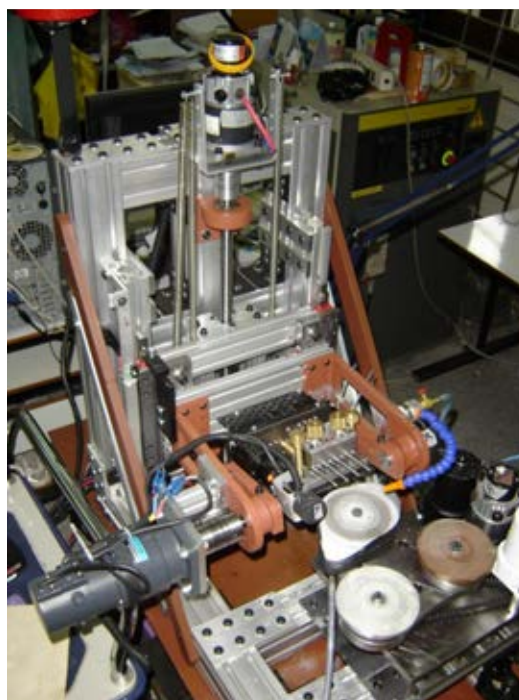
รูปที่ 2.1 เครื่องเจียรไนพลอยที่ใช้ในอุตสาหกรรมเจียรไนพลอยในประเทศไทย [2]

2.2 เครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

ปัจจุบันทางห้องปฏิบัติการวิจัยระบบการผลิตขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้มีความพยายามในการพัฒนาเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติขึ้นมาเพื่อนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมเจียรระไนพลอย มาแล้วดังนี้

2.2.1 เครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่1 [1]

เป็นเครื่องเจียรระไนพลอยที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยระบบการผลิตขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เครื่องมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 ตัวเครื่องประกอบไปด้วยจานเจียรระไน 3 จาน แบ่งเป็นจานขึ้นรูป จานขัดหยาบ และจานขัดเงา สามารถเจียรระไนได้ครั้งละ 4 เม็ดพร้อมกัน มีแกนการเคลื่อนที่ 4 แกน คือ X, Y, Z และ A แต่ละแกนถูกควบคุมผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบสำเร็จรูปสามารถเจียรระไนแบบอัตโนมัติได้ตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนามาเป็นเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นใหม่ โดยมีเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนในการผลิตเครื่อง และเพิ่มปริมาณพลอยในการเจียรระไนแต่ละครั้ง



รูปที่ 2.2 เครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่1 [1]

2.2.1 เครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่2 และรุ่นที่3 [2]

เนื่องจากเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่1 ถูกควบคุมด้วยชุดอุปกรณ์ที่มีราคาค่อนข้างสูง ทำให้ต้องมีการลดต้นทุน และเพิ่มปริมาณพลอยในการผลิตทำให้เครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่2 ถูกพัฒนาออกมามีลักษณะดังรูปที่ 2.3 ซึ่งสามารถเจียรระไนพลอยได้ครั้งละ14 เม็ด และมีการเพิ่มจำนวนจานเจียรระไนเป็นจำนวน 5 จาน มี 3 จานไว้สำหรับเจียรระไนขึ้นรูปแบ่งตามความละเอียดได้ 3 เบอร์ และจานขัดเงา 2 จานเพื่อไว้ใช้ทดสอบวัสดุขัดเงา โดยทางห้องปฏิบัติการวิจัยระบบการผลิตขั้นสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สามารถ

รองรับตลาดอุตสาหกรรมเจียรไนพลอยที่มีการเติบโตขึ้นทุกปี ส่งผลให้เครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่2 ถูกพัฒนาเป็นรุ่นที่3 มีลักษณะดังรูปที่ 2.4 ที่มีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างหลักให้มีความแข็งแรงมากขึ้นโดยใช้เหล็กหล่อแทนที่อะลูมิเนียมจากรุ่นที่2 และเพิ่มจำนวนพลอยในการเจียรไนพลอยเป็น 16 เม็ดต่อครั้ง พร้อมทั้งลดจำนวนงานเจียรไนเป็น 4 งาน โดยยังคงงานเจียรไนพลอยขึ้นรูปทั้ง 3 เบอร์ไว้ ลดเพียงงานขัดเงาให้เหลือเพียงงานเดียว ซึ่งงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่3นี้ โดยเป็นส่วนของการออกแบบและปรับปรุงระบบควบคุมเครื่องเจียรไนพลอย



รูปที่ 2.3 เครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่2 [2]





รูปที่ 2.4 เครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่3

2.3 การควบคุมเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติก่อนการพัฒนา

ระบบควบคุมของเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติรุ่นที่1 มีราคาสูงกว่าเครื่องเจียรไนพลอยรุ่นที่2เนื่องจากใช้การ์ดแปลงสัญญาณสำเร็จรูปที่มีราคาสูงและไม่ยืดหยุ่นต่อการพัฒนา ดังนั้นจึงได้มีการลดต้นทุนโดยหากการ์ดแปลงสัญญาณที่มีความยืดหยุ่นสูงมาเขียนระบบควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยเอง ดังแสดงข้อดีข้อด้อยตามตารางที่ 2.1 โดยการ์ดแปลงสัญญาณมีหน้าที่สำหรับส่งค่าจากผู้ใช้ผ่านทางคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องเจียรไน และรับค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensor) จากเครื่องเจียรไนเพื่อป้อนกลับมายังคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลส่วนตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์ทั้ง 4 แกนของเครื่องเจียรไนพลอยมีลักษณะเป็นตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-Controller) โดยเครื่องเจียรไนพลอยรุ่นที่1 ระบบควบคุมนี้จะมาสำเร็จรูปพร้อมกับการ์ดแปลงสัญญาณทำให้มีราคาสูง ต่างกับเครื่องเจียรไนพลอยรุ่นที่2 กับรุ่นที่3 ที่ทำการเขียนระบบควบคุมเครื่องเจียรไนพลอยขึ้นมาเอง แต่ยังเป็นระบบควบคุมตำแหน่งของการเจียรไนพลอยเพียงอย่างเดียวยังไม่มีความสามารถในการเจียรไนพลอยมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้พยายามพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมดังกล่าวให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อดีข้อด้อยของการ์ดแปลงสัญญาณในแต่ละรุ่นของเครื่องเจียรไนพลอย

	<p>การ์ดแปลงสัญญาณรุ่นที่ 1</p> <p><u>ข้อดี</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● มีฟังก์ชันการทำงานพร้อม ● ไม่ต้องเขียนตัวควบคุมเอง ● มีโปรแกรมการทำงานสำเร็จรูป <p><u>ข้อด้อย</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● มีราคาสูง ● ไม่สามารถออกแบบหน้าตาของโปรแกรมการทำงานเองได้ ● โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ไม่ยืดหยุ่น
	<p>การ์ดแปลงสัญญาณรุ่นที่ 2 และรุ่นที่ 3</p> <p><u>ข้อดี</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● มีราคาถูกกว่ามาก สามารถลดต้นทุนของเครื่องได้มาก ● ออกแบบโปรแกรมที่ยืดหยุ่น และเหมาะสมกับการใช้งานได้ <p><u>ข้อด้อย</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● ไม่มีระบบควบคุมมอเตอร์มาให้ต้องเขียนตัวควบคุมเอง

2.4 งานวิจัยและบทความที่เกี่ยวข้อง

สมจินต์ ธนานันท์ศิริ (2549) [1] ได้ทำโครงการวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อรูปร่างของพลอย และนำไปออกแบบเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยเครื่องเจียรระไนที่สร้างขึ้นนี้มีแกนการเคลื่อนที่ทั้งหมด 4 แกน มีจานเจียรระไน 3 จาน สามารถเจียรระไนพลอยได้ครั้งละ 4 เม็ด และควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมควบคุมแบบสำเร็จรูป ด้วยตัวค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบเหลี่ยมพลอยด้วยโปรแกรม ซียู-โซลิด (CU-Solid) เพื่อเจียรระไนให้ได้รูปร่างของพลอยตามต้องการ โดยเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่ออกแบบขึ้น สามารถนำมาใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาเครื่องเจียรระไนแบบอัตโนมัติรุ่นต่อไปได้

ปรัชญา พิพัฒนานนท์ (2552) [2] ได้ทำโครงการวิทยานิพนธ์ที่เกี่ยวกับการพัฒนาโปรแกรมระบบควบคุมเครื่องเจียรระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม Visual Studio C++ ในการพัฒนาโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติโดยใช้พื้นฐานจากโปรแกรมสำเร็จรูปของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่มีอยู่เดิมเพื่อลดต้นทุนในการผลิต และตัวค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการออกแบบเหลี่ยมพลอยด้วยโปรแกรม ซียู-โซลิดทำให้สามารถเจียรระไนพลอยรูปทรงต่างๆได้ และระบบควบคุมเครื่องเจียรระไนนี้สามารถเป็นต้นแบบในการพัฒนาระบบควบคุมในเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติรุ่นต่อไปได้

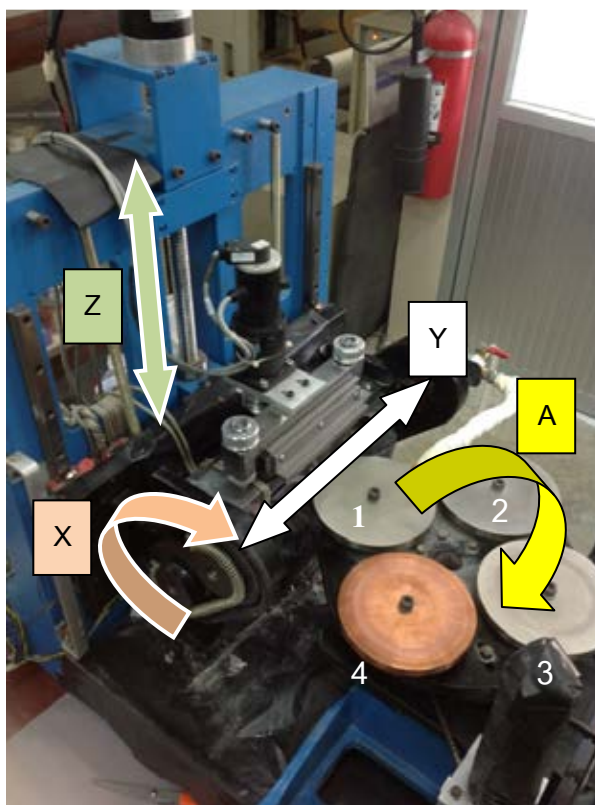
บทที่ 3

โครงสร้างของเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติและหลักการทำงานเบื้องต้น

3.1 รูปร่าง ลักษณะ โครงสร้าง และการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างภายนอกและการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยจุกาแบบอัตโนมัติรุ่นที่ 3

3.1.1 โครงสร้างภายนอกของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ



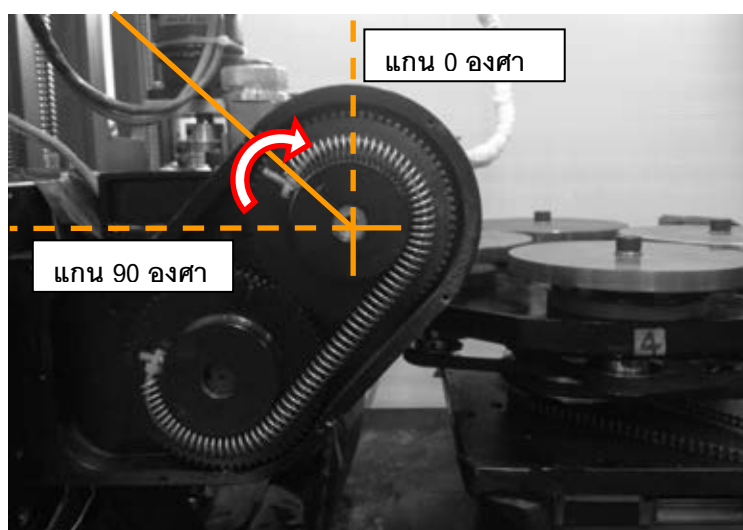
รูปที่ 3.1 เครื่องเจียระไนพลอยจุกาแบบอัตโนมัติพร้อมแสดงแกนการเคลื่อนที่

โครงสร้างของเครื่องเจียระไนพลอยมีลักษณะดังรูปที่ 3 โดยเครื่องเจียระไนพลอยจะประกอบไปด้วยแกนการเคลื่อนที่ทั้งสิ้น 4 แกน คือ แกน X, แกน Y, แกน Z และแกน A (แกนที่ใช้ในการเปลี่ยนความละเอียดงานเจียระไน) โดยแต่ละแกนทำให้เกิดผลต่อรูปร่างของพลอยที่ผ่านการเจียระไนแตกต่างกันออกไป นอกจากนี้แกนการเคลื่อนที่ทั้ง 4 แกนแล้ว ยังมีส่วนที่เป็นชุดขับให้งานเจียระไนหมุนได้ และส่วนกลไกที่ทำให้เกิดการส่ายงานเจียระไนเข้าออกด้วย ส่วนชุดงานเจียระไนประกอบด้วยชุดงานเจียระไนทั้งสิ้น 4 งาน โดยที่แต่ละงานจะมีความละเอียดแตกต่างกันไป งานหยาบสุดไว้ขึ้นเหลี่ยมพลอย งานละเอียดสุดไว้ขัดผิวพลอย และงานทองแดงไว้ขัดเงา โดยหมายเลขงานที่แสดงในรูปข้างต้น เรียงลำดับผิวงานจากงานหยาบที่สุดไปจนถึงงานที่ผิวละเอียดที่สุด

3.1.2 การเคลื่อนที่ของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ

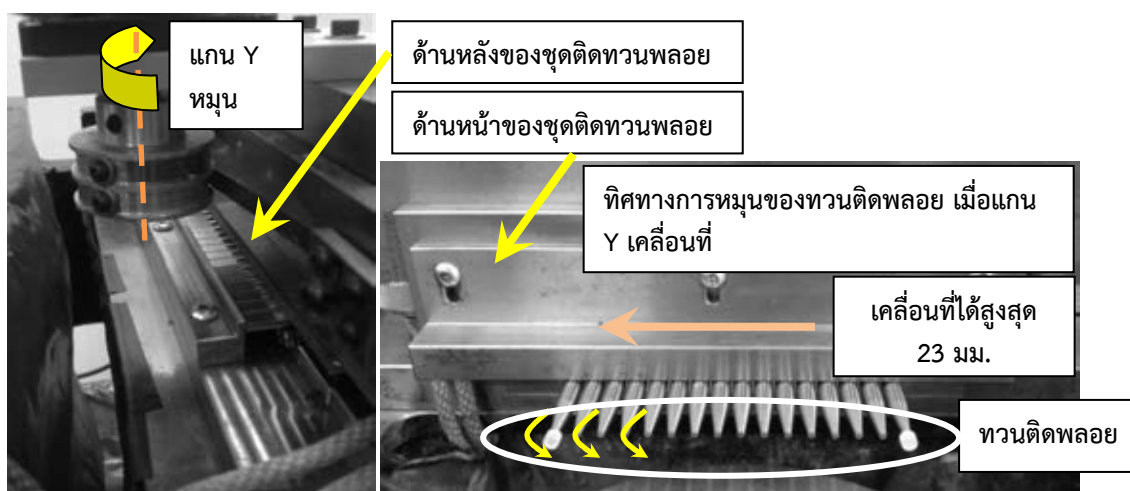
ในหัวข้อนี้อธิบายถึงการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติดังนี้

แกน X ทำให้เกิดมุมยก ที่เป็นตัวกำหนดมุมเหลี่ยมพลอยว่าจะมีกี่องศา โดยมุมนี้จะวัดจากจุดกึ่งกลางทวนติดพลอยตามแนวทวนเทียบกับแกนแนวดิ่ง มีช่วงในการเคลื่อนที่ของแกน X อยู่ในช่วง 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 3.2



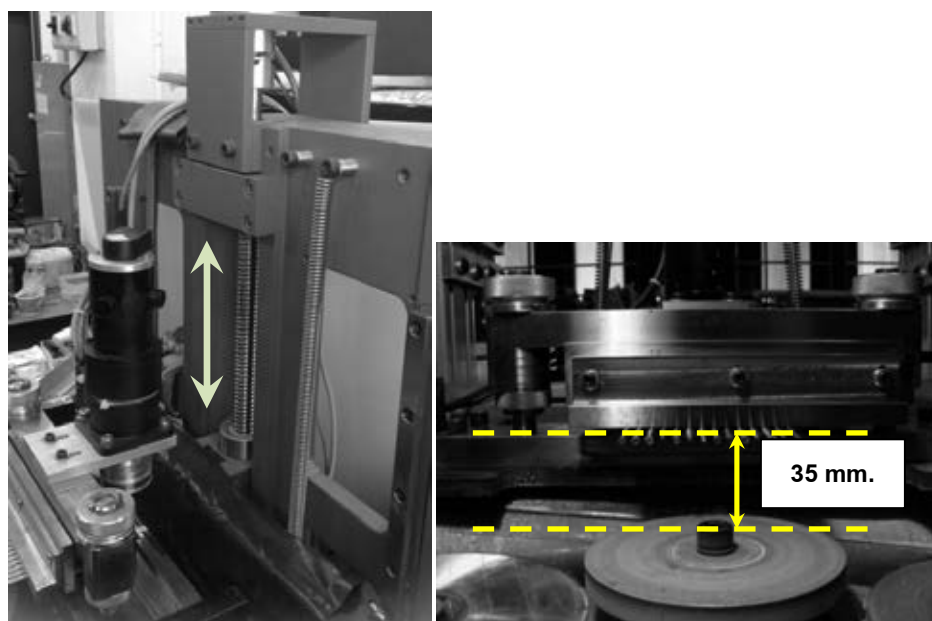
รูปที่ 3.2 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน X

แกน Y ทำให้เกิดหน้าต่างๆของเหลี่ยมพลอย โดยการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ส่งผลให้ในแต่ละมุมยกเกิดหน้าต่างๆในเหลี่ยมพลอย และช่วงในการเคลื่อนที่ของแกน Y สูงสุดจะอยู่ในช่วงประมาณ 23 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3 แต่ในการเจียรไนจริง แกน Y จะเคลื่อนที่ที่อยู่ในช่วงประมาณ 18 มิลลิเมตร เพราะเป็นระยะที่ทวนติดพลอยหมุนครบรอบพอดี



รูปที่ 3.3 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

แกน Z เป็นแกนที่กำหนดขนาดของเม็ดพลอย ถ้าแกน Z ยิ่งเคลื่อนที่ต่ำลงมาก พลอยจะถูกเจียรระไนออกไปมาก และมีขนาดเล็ก โดยช่วงในการเคลื่อนที่ของแกน Z จะอยู่ในช่วง 35 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 โดยระยะดังกล่าวเป็นระยะจากทวนติดพลอยถึงจานเจียรระไน ในขณะที่แกน Z อยู่ในตำแหน่งอ้างอิง



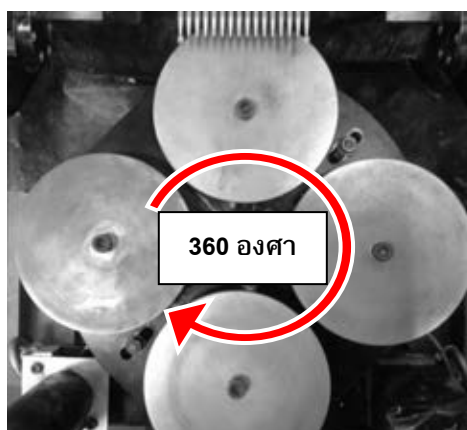
(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.4 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z

(ก.) แนวการเคลื่อนที่ (ข.) ขอบเขตการเคลื่อนที่

แกน A เป็นแกนที่ใช้ในการเปลี่ยนจานเจียรระไน ซึ่งจานเจียรระไนมีทั้งหมด 4 จาน เป็นจานสำหรับขึ้นรูปพลอย 3 จาน และจานสำหรับขัดเงาพลอย 1 จาน โดยช่วงในการเคลื่อนที่ของแกน A สามารถหมุนได้รอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



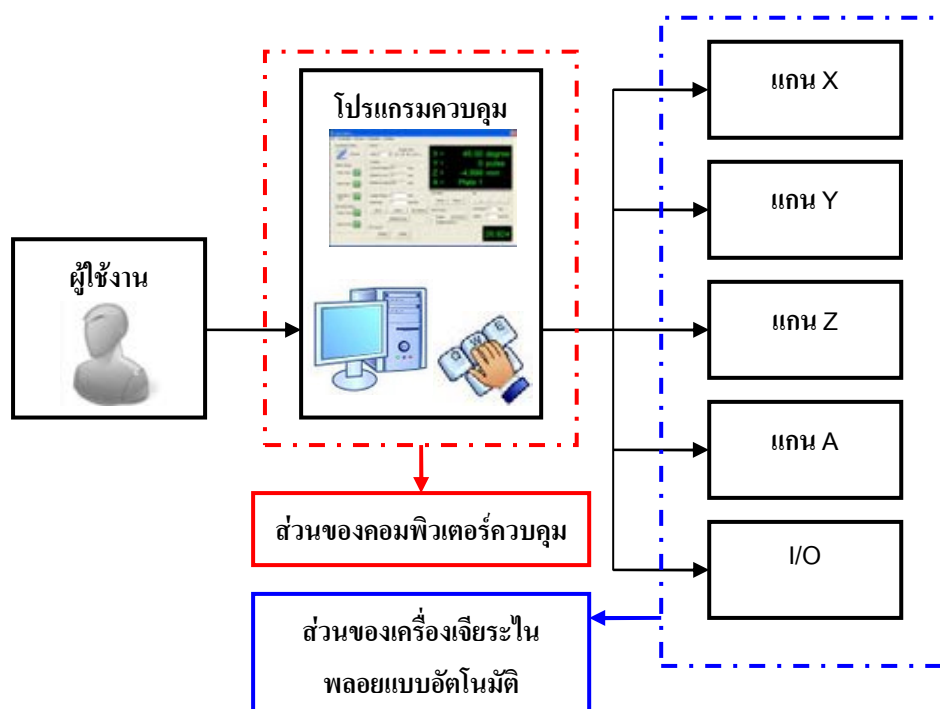
รูปที่ 3.5 การเคลื่อนที่และขอบเขตการเคลื่อนที่ในแนวแกน A

3.2 หลักการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

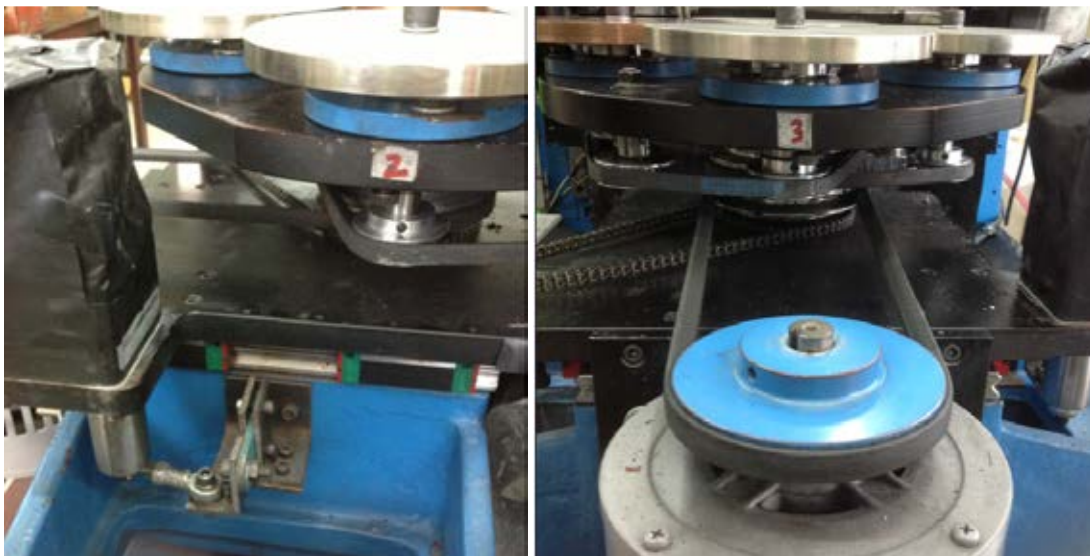
การทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ ถูกควบคุมและประมวลผลโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.6 โดยมีส่วนของโปรแกรมควบคุมอยู่ในคอมพิวเตอร์ ผู้ใช้งานต้องทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ในการเจียระไนพลอย เช่น ตำแหน่ง ความเร็วในการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียระไนพลอย และความลึกของพลอย เพื่อสั่งให้เครื่องเจียระไนพลอยเคลื่อนที่ไปตามที่ผู้ใช้กำหนด

ในส่วนของแกน X, Y, Z และ A เคลื่อนที่โดยอาศัยเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นตัวขับเคลื่อน และใช้เอ็นโคดเดอร์ (Encoder) เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ เพื่อนำกลับไปประมวลผลในโปรแกรม

ในส่วนของ I/O Port ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่ต่อกับ I/O Port ได้แก่ ส่วนขับเคลื่อนเจียระไนให้หมุน (Spindle) ตามรูปที่ 3.7 (ก.) ส่วนของการสายชุดจานเจียระไน (Crank) ตามรูปที่ 3.7 (ข.) และส่วนของสวิตช์สำหรับป้องกันการชนของเครื่อง (Limit Switch) ของแกน x และแกน z ตามรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นส่วนที่ควบคุมแบบ เปิด-ปิด หรือใช้ตรวจสอบการกด-ปล่อย ของสวิตช์ ไม่ได้มีการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็วแต่อย่างใด



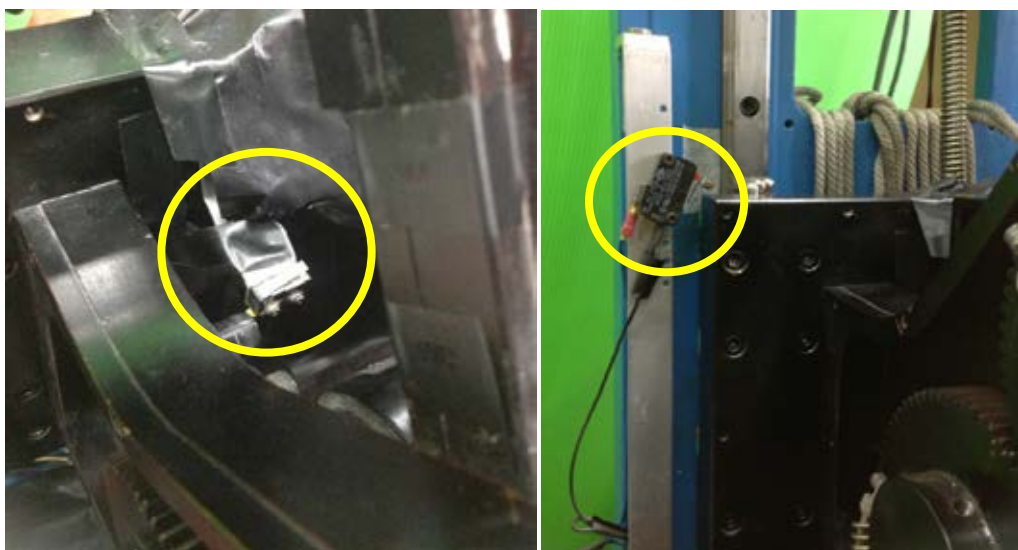
รูปที่ 3.6 แผนภาพหลักการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ [2]



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.7 ส่วนของ I/O Port ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่สั่งงานผ่านมอเตอร์
(ก.) ส่วนขั้วงานเจียระไนให้หมุน (ข.) ส่วนของการสายชุดงานเจียระไน



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.8 ส่วนของ I/O Port ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่สั่งผ่าน Limit Switch
(ก.) สวิตซ์สำหรับป้องกันการชนแกน x (ข.) สวิตซ์สำหรับป้องกันการชนแกน z

3.3 จลศาสตร์ของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ [4]

ในการหาจลศาสตร์ของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ นั้น พิจารณาการเคลื่อนที่ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพลอย เทียบกับตำแหน่งของจานเจียรระไนในทิศทางตั้งฉากกับจานเจียรระไนเท่านั้น ดังนั้นการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y จะไม่มีผลต่อตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพลอย เมื่อเทียบกับจานเจียรระไน แกนที่มีผลต่อตำแหน่งดังกล่าว มีเพียงแกน Z ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และแกน X ที่ควบคุมมุมยกเท่านั้น สามารถเขียนแผนภาพจำลอง และติดเฟรม (Frame) เพื่อใช้ในการหาจลศาสตร์ของเครื่องเจียรระไนพลอยอัตโนมัติตามรูปที่ 3.9 โดยกำหนดให้

Frame 0 ติดอยู่ที่ฐานของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

Frame 1 ติดอยู่ที่ชุดหัวจับด้ามพลอยที่มีการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z

Frame 2 ติดอยู่ที่จุดหมุนของแกน X

Frame 3 ติดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดพลอย

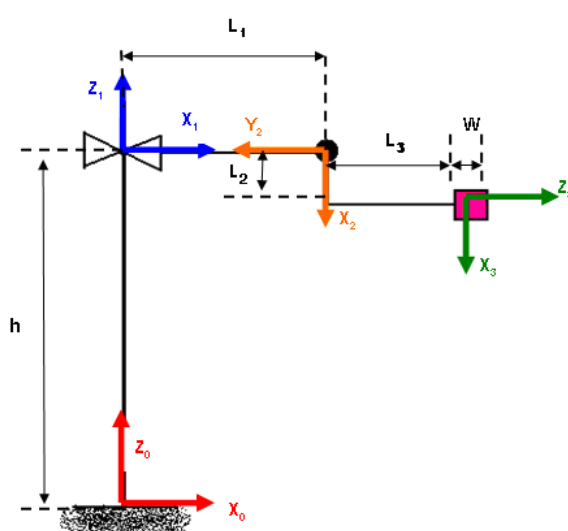
h แทนระยะการเคลื่อนที่ในแกน Z ที่ห่างจากจานเจียรระไน

$L1$ แทนระยะจากแนวแกน Z ถึงจุดหมุนของแกน X

$L2$ แทนระยะจากจุดหมุนของแกน X ไปถึงกึ่งกลางของทวนติดพลอย ตามแนวรัศมีของทวนติดพลอย

$L3$ แทนระยะจากจุดหมุนของแกน X ไปถึงตำแหน่งปลายทวนติดพลอย ตามแนวแกนของทวนติดพลอย

W แทนขนาดความสูงของเม็ดพลอยที่จะทำการเจียรระไน



รูปที่ 3.9 แผนภาพจำลองของเครื่องเจียรระไนพลอยอัตโนมัติพร้อมการติดเฟรม [2]

จากระบบพิกัดที่กำหนดตามรูปข้างต้นสามารถนำไปเขียนตารางแสดง Denevit-Hartenberg parameter ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 DH-Parameter ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

LINK(i)	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	h	0
2	-90	L_1	0	θ_2
3	90	L_2	$L_3+W/2$	0

3.3.1. ฟอว์เวิร์ดคิเนมาติกส์ (Forward Kinematics)

จาก DH-Parameter ตามตารางที่ 3.1 สามารถนำมาหาเมตริกซ์การแปลงของแต่ละ 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

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

เมตริกซ์การแปลงของ frame 3 เทียบกับ frame 2 คือ

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

จะสามารถหาเมตริกซ์การแปลงของ frame 3 เทียบกับ frame 0 ได้เป็น

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

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & S\theta_2 & L_2C\theta_2 + L_3S\theta_2 + L_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S\theta_2 & 1 & C\theta_2 & h + \left(L_3 + \frac{W}{2}\right)C\theta_2 - L_2S\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

เนื่องจากในการควบคุมนั้นสนใจแต่เพียงระยะจากกึ่งกลางพลอย ถึงงานเจียร์ในในแนวตั้งฉากกับงานเจียร์ในเท่านั้น สามารถหาระยะทางดังกล่าวได้จากสมการ

$$Z = h + \left(L_3 + \frac{W}{2}\right)C\theta_2 - L_2S\theta_2 \quad (3.5)$$

Z แทนระยะจากจุดศูนย์กลางเม็ดพลอยถึงงานเจียร์ในในแนวตั้งฉากกับงานเจียร์ในเท่านั้น

ซึ่งค่า h และ θ_2 สามารถอ่านได้จาก อุปกรณ์วัดตำแหน่งของมอเตอร์ในแกน Z และ X ตามลำดับ ในขณะที่ค่า L_2, L_3 และ W สามารถหาได้จากการวัดจริงที่เครื่องเจียร์ในพลอยแบบอัตโนมัติ และขนาดของพลอย

3.3.2 อินเวอร์สคิเนมาติกส์ (Inverse Kinematics)

จากการหา Forward Kinematics ในหัวข้อที่แล้ว ในขณะที่เครื่องเจียร์ในพลอยแบบอัตโนมัติทำงานอยู่ ผู้ใช้จะทราบระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางพลอย ไปยังงานเจียร์ในจากสมการ (3.5) เนื่องจากทราบตำแหน่งในแกน X และตำแหน่งในแกน Z โดยที่ผู้ใช้สามารถสั่งการ และควบคุมตำแหน่งในแต่ละแกนได้

แต่หากว่าผู้ใช้ต้องการสั่งให้จุดศูนย์กลางเม็ดพลอยอยู่ห่างจากงานเจียร์ในเป็นระยะทางเท่าไรนั้น จำเป็นต้องหา Inverse Kinematics ในแนวแกน z มาใช้ โดยอาศัยการกำหนดมุมยกในแกน x ไว้ก่อน จากนั้นสั่งไปว่าต้องการให้จุดศูนย์กลางของเม็ดพลอยห่างจากงานเจียร์ในเป็นระยะเท่าไร โปรแกรมจะทำการคำนวณหาตำแหน่งปลายที่ต้องเคลื่อนที่ไปในแนวแกน z ออกมา และสั่งให้แกน z วิ่งไปที่ตำแหน่งดังกล่าว ทำให้เม็ดพลอยไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ ซึ่งระยะห่างดังกล่าวนี้คือ ตัวแปร h ดังสมการ

$$h = Z - \left(L_3 + \frac{W}{2}\right)C\theta_2 + L_2S\theta_2 \quad (3.6)$$

โดยสมการที่ (3.6) จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมระยะระหว่างเม็ดพลอยกับงานเจียร์ในต่อไป เพื่อให้การควบคุมทำได้ง่ายขึ้น

บทที่ 4

หลักการในการควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรระไนพลอย

4.1 การควบคุมเครื่องเจียรระไนพลอย [3]

การควบคุมเครื่องเจียรระไนพลอยใช้ระบบควบคุมที่เรียกว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback controller) เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการควบคุม โดยการเปรียบเทียบสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปใช้สร้างสัญญาณควบคุมที่สามารถลดการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดพลาดของตำแหน่งที่วัดได้ให้มีค่าน้อยที่สุด

การเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ นั้น เคลื่อนที่โดยอาศัยการขับเคลื่อนจากเซอร์โวมอเตอร์ และใช้การควบคุมการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบการควบคุมอาร์เมเจอร์ (Armature-Controlled) ซึ่งเหมาะสำหรับงานที่ต้องการควบคุมกระแส หรือแรงบิดของมอเตอร์ที่จะจ่ายให้กับระบบ และควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่เท่านั้น

ดังนั้นการควบคุมแบบป้อนกลับเพื่อการควบคุมความแม่นยำของเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติจึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ในแต่ละแกน โดยมีลักษณะการควบคุมดังรูปที่ 4.1 โดยมีสัญญาณอ้างอิง หรือ command reference เป็นค่าตำแหน่งของพลอยที่ติดอยู่ที่ปลายของทวนตีพลอย (dropstick) โดยตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งของการเจียรระไนพลอย แล้วเปรียบเทียบตำแหน่งนี้กับตำแหน่งที่วัดได้จากเอ็นโคดเดอร์ (Encoder) เพื่อนำมาประมวลเป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นผ่านตัวควบคุม (Controller) แบบพีไอดี ในรูปลักษณะของระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time) ดังนี้

$$\text{ชนิดตัวควบคุมเชิงสัดส่วน} \quad u(k) = Ke(k) \quad (4.1)$$

$$\text{ชนิดตัวควบคุมแบบอินทิกรัล} \quad u(k) = u(k-1) + \frac{K}{T_I}Te(k) \quad (4.2)$$

$$\text{ชนิดตัวควบคุมแบบอนุพันธ์} \quad u(k) = \frac{KT_D}{T}[e(k) - e(k-1)] \quad (4.3)$$

จากรูปแบบตัวควบคุมทั้งสาม ในสมการที่ (4.1), (4.2) และ (4.3) จะสามารถเขียนตัวควบคุมพีไอดี ในรูปแบบของระบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังนี้

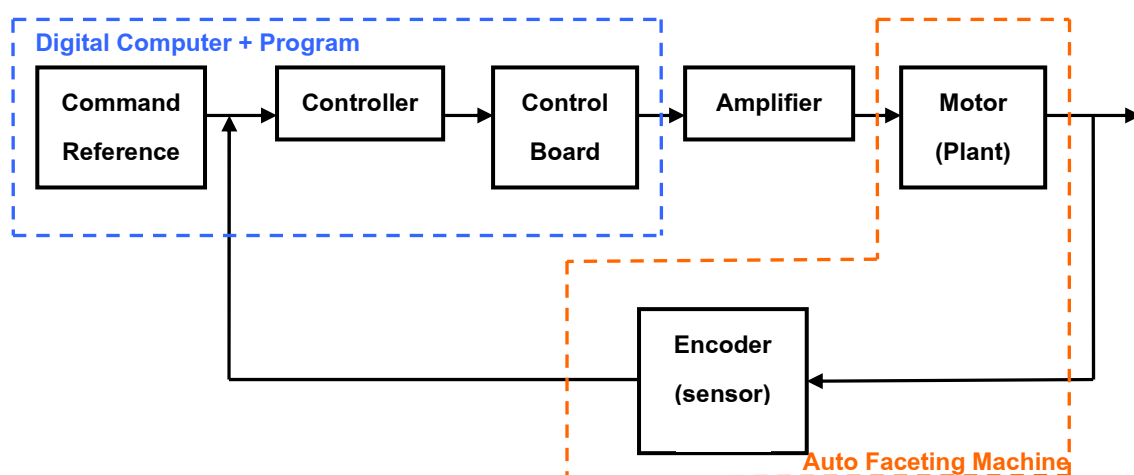
$$u(k) = u(k-1) + K \left[\left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T} \right) e(k) - \left(1 + 2\frac{T_D}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_D}{T} e(k-2) \right] \quad (4.4)$$

หรือ อาจเขียนได้ในรูป

$$u(k) = u(k-1) + K_p(e(k) - e(k-1)) + K_I Te(k) + \frac{K_D}{T}[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4.5)$$

โดยสมการข้างต้นเป็นรูปแบบตัวควบคุมที่จะใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดย $u(k)$ คือค่าสัญญาณการควบคุม ส่วนค่า K_p , K_i และ K_D คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ตามลำดับ ซึ่งก่อนการใช้งานต้องปรับตั้งค่าอัตราขยายเหล่านี้ เพื่อให้ตัวควบคุมสามารถควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำ ในขณะที่ค่า T คือ ช่วงเวลาในการสุ่มข้อมูล หรือ sampling period โดยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของทวนจับหัวพลอยของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัตินี้จะใช้ความถี่ในการสุ่มเท่ากับ 1,000 Hz. หรือคาบเวลาของการสุ่มเท่ากับ 0.001 วินาที และสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในการหมุนของมอเตอร์จะใช้สัญญาณที่มีลักษณะเป็น S-curve กล่าวคือตำแหน่งของการเคลื่อนที่การหมุนของมอเตอร์จะหาได้จากแผนภูมิความเร็ว (velocity profile) ที่สามารถคำนวณได้จากการกำหนดระยะทางการเคลื่อนที่ ค่าความเร็วสูงสุด และค่าความเร่งซึ่งจะเท่ากับค่าความหน่วง

หลังจากหาค่าสัญญาณการควบคุม (Control Signal) จากตัวควบคุมที่อยู่ในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้แล้ว โปรแกรมจะส่งค่าสัญญาณการควบคุมไปยังการ์ดแปลงสัญญาณ (Control Board) ก่อนออกสู่ระบบภายนอกซึ่งก็คือมอเตอร์ในแต่ละแกนของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ เพื่อไปขยายสัญญาณผ่านตัว Amplifier เพื่อนำไปควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ในแต่ละแกนของเครื่องเจียระไนพลอย และวัดสัญญาณออกของเซอร์โวมอเตอร์ซึ่งสามารถวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดเอ็นโคดเดอร์ที่ติดตั้งอยู่ที่แต่ละแกนการเคลื่อนที่ของเครื่องเจียระไนพลอยเพื่อนำมาควบคุมค่าความผิดพลาดให้น้อยที่สุดในแต่ละรอบของคาบเวลา



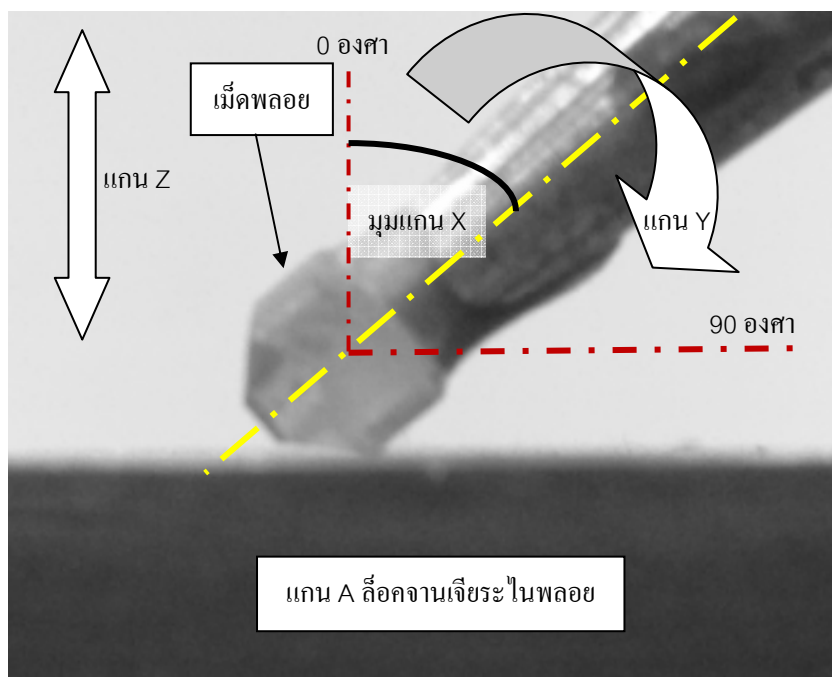
รูปที่ 4.1 แผนภาพการควบคุมและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ [3]

4.2 การควบคุมแรงและตำแหน่งของเครื่องเจียระไนพลอย

ในการควบคุมแรงสำหรับการเจียระไนพลอยสิ่งแรกที่ต้องทราบ คือ แบบจำลองสภาพแวดล้อมของการเจียระไน เพื่อให้ในขณะที่เครื่องทำงานเจียระไนพลอยสามารถรับรู้แรงกดที่เกิดขึ้นจากการเจียระไนขัดเงาพลอยได้ และสามารถนำแรงนี้ควบคุมป้อนกลับมาเพื่อประมวลผลเป็นระยะการกดเพื่อให้ได้แรงกดตามที่ต้องการ

4.2.1 การส่งถ่ายแรงผ่านบอลสกรู [5]

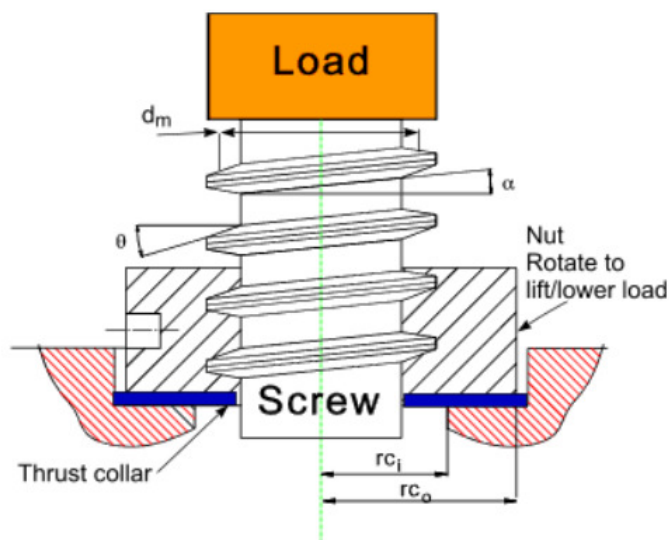
ในการเจียระไนพลอยมอเตอร์เกือบทุกแกนจะถูกล็อคตำแหน่งของการเคลื่อนที่เพื่อให้พลอยขณะถูกเจียระไนได้รูปร่างพลอยตรงตามที่ต้องการแบบไว้ ตามรูปที่ 4.2 โดยมอเตอร์แกน X เป็นตัวล็อคตำแหน่งของมุมยกพลอยเพื่อให้ได้เหลี่ยมพลอยตามที่ต้องการแบบไว้ มอเตอร์แกน Y เป็นตัวล็อคดัชนีพลอยหรือหน้าพลอยที่ต้องการเจียระไน ส่วนมอเตอร์แกน A เป็นตัวเปลี่ยนงานเจียระไนเท่านั้นไม่มีผลต่อรูปร่างของพลอย เห็นได้ว่าเหลือเพียงมอเตอร์แกน Z เท่านั้นที่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลงเพื่อคอยกำหนดระยะลึกในการกัดพลอยให้มีขนาดตามที่ต้องการแบบไว้ ดังนั้นมอเตอร์แกน Z จึงเป็นหัวใจสำคัญในการควบคุมแรงในการเจียระไน แต่แรงที่ขับเคลื่อนเพื่อใช้ในการกัดพลอยนั้นเป็นแรงที่มอเตอร์แกน Z ขับเคลื่อนผ่านบอลสกรูซึ่งสามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 ผลของแกนมอเตอร์ต่างๆต่อรูปร่างและขนาดของพลอย

ในเวลาปกติบอลสกรูมีการรับน้ำหนักที่เกลียวของบอลสกรูอยู่ตลอดเวลาตามรูปที่ 4.3 มีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

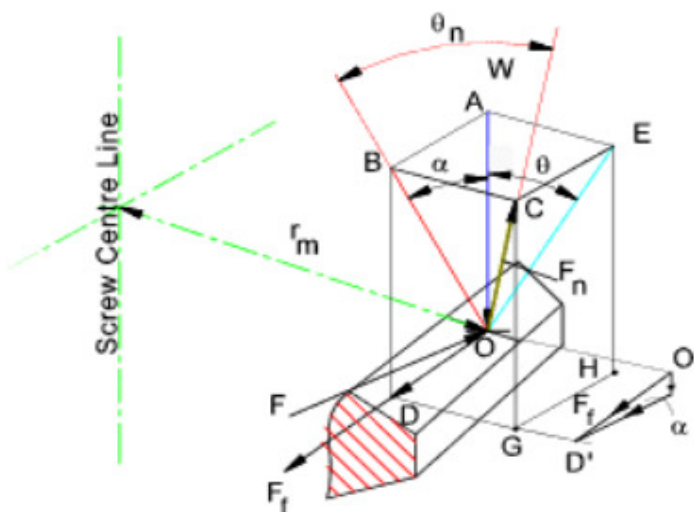
θ	แทนมุมของเกลียว	(Thread angle)	radians
η	แทนประสิทธิภาพของบอลสกรู	(Screw Efficiency)	
d_m	แทนเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยบอลสกรู	(Mean screw dia)	m
μ_s	แทนสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของผิวสกรู	(coefficient of friction of the screw surfaces)	
F	แทนแรงในการหมุนเกลียว	(Force to rotate thread)	
		(Torque /Mean Radius)	N
L	แทนระยะเคลื่อนที่ในหนึ่งรอบการหมุน	(lead of thread)	m
α	แทนมุม $\tan^{-1} L / (\pi \cdot d_m)$		radians
rc_i	แทนรัศมีของวงแหวนด้านใน	(Collar inside radius)	m
rc_o	แทนรัศมีของวงแหวนด้านนอก	(Collar outside radius)	m
r_m	แทนรัศมีเฉลี่ยของเกลียวบอลสกรู	(Mean radius of thread)	m
W	แทนแรงกดตามแนวตั้งที่กระทำบนเกลียว	(Vertical force Load on thread screw)	N
T_R	แทนทอร์กในการยกขึ้น	(Torque to raise load)	Nm
T_L	แทนทอร์กในการยกลง	(Torque to lower load)	Nm



รูปที่ 4.3 ภาพการส่งถ่ายแรงของ Thrust collar ที่ถ่ายน้ำหนักลงมายังกึ่งกลางเกลียวของ ball screw [5]

แต่เมื่อมีแรงบิดเกิดขึ้นหรือพิจารณาแรง F ในการหมุนเกลียวตามทิศตามเข็มนาฬิกาจะทำให้เกิดแรงในการยก W ขึ้น โดยสามารถเขียนแผนภาพไดอะแกรมแรงอิสระของเกลียวบนบอลสกรูได้ตามรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง O สามารถแยกแรงได้ตามนี้

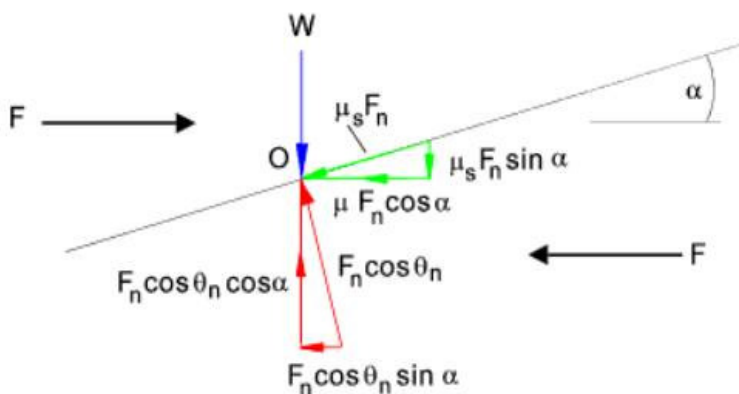
- F_n แทนแรงสะท้อนกลับตั้งฉากกับผิวของเกลียว
- θ_n มุมระหว่างแรง F_n กับระนาบที่สนใจ ABDO
- F_f แทนแรงเสียดทานการเคลื่อนที่ตามแนว OD



รูปที่ 4.4 ไดอะแกรมแรงอิสระของเกลียวบอลสกรู [5]

โดยเมื่อแตกแรงทั้งหมดลงไปยังระนาบที่สนใจ ABDO จะได้แรงตามรูปที่ 4.5

กำหนดให้ $F_f = \mu_s F_n$



รูปที่ 4.5 แสดงไดอะแกรมแรงอิสระที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง O บนระนาบที่สนใจ ABDO ในขณะยกขึ้น [5]

จากรูปที่ 4.5 เมื่อแตกแรงตามแนวตั้งสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F_n \cos \theta_n \cos \alpha = W + \mu_s F_n \sin \alpha \quad (4.6)$$

จากสมการที่ (4.6) จัดรูปสมการได้ดังนี้

$$F_n = \frac{W}{\cos \theta_n \cos \alpha - \mu_s \sin \alpha} \quad \text{N} \quad (4.7)$$

จากรูปที่ 4.5 เมื่อแตกแรงตามแนวนอนสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$F = F_n \mu_s \cos \alpha + F_n \cos \theta_n \sin \alpha \quad (4.8)$$

จากรูปที่ 4.4 แรงบิดในการยกน้ำหนักขึ้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$T_R = F \times r_m \quad \text{Nm} \quad (4.9)$$

แทน F สมการที่ (4.8) ลงไปในสมการที่ (4.9)

$$T_R = r_m (F_n \mu_s \cos \alpha + F_n \cos \theta_n \sin \alpha) \quad (4.10)$$

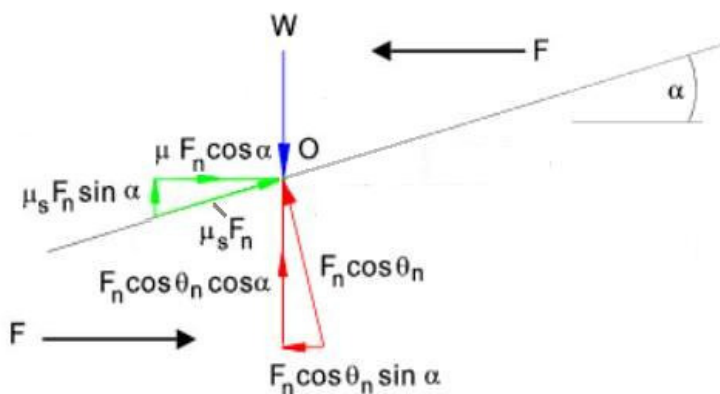
$$\text{โดย } r_m = \frac{d_m}{2}$$

$$T_R = \frac{d_m}{2} (F_n \mu_s \cos \alpha + F_n \cos \theta_n \sin \alpha) \quad (4.11)$$

จากนั้นแทน F_n สมการที่ (4.7) ลงในสมการที่ (4.11) แล้วจัดรูป

$$T_R = \frac{d_m W}{2} \left(\frac{\mu_s + \cos \theta_n \tan \alpha}{\cos \theta_n - \mu_s \tan \alpha} \right) \quad \text{Nm} \quad (4.12)$$

โดยสมการที่ (4.12) นี้เป็นสมการทอร์คบิดยกขึ้นที่บอกความสัมพันธ์ว่ามอเตอร์แกน z ต้องออกแรงบิดเท่าไรเพื่อให้สามารถยกน้ำหนักที่ตกลงมาบนเกลียวของบอลสกรูได้ ในทางกลับกันสมการทอร์คบิดยกลง (T_L) ก็สามารถหาได้จากแผนภาพแรงอิสระของรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงไดอะแกรมแรงอิสระที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่ง o บนระนาบที่สนใจ ABDO
ในขณะยกลง [5]

$$T_L = \frac{d_m W}{2} \left(\frac{\mu_s - \cos \theta_n \tan \alpha}{\cos \theta_n + \mu_s \tan \alpha} \right) \quad \text{Nm} \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.12) และ (4.13) กำหนดค่าขนาดบอลสกรูที่ใช้ในการยกชุดจับทวนพลอยดังนี้

$$d_m = 0.025 \text{ เมตร} , L = 0.005 \text{ เมตร} \text{ และ } \mu_s \approx 0.14$$

$$\text{สามารถหาค่า } \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{L}{\pi d_m} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0.005}{\pi \cdot 0.025} \right) \approx 3.64^\circ$$

และเนื่องจาก $\theta_n = \tan^{-1}[\cos \alpha \tan \theta]$ โดยปกติ $\cos \alpha \approx 0.99 \rightarrow 1$

จึงสามารถประมาณได้ว่า $\theta_n = \theta$

แทนค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ลงในสมการที่ (4.12) และ (4.13) สามารถประมาณได้ว่า

$$T_R = 0.002569W \approx 0.003W \quad \text{Nm} \quad (4.14)$$

$$T_L = 0.000947W \approx 0.001W \quad \text{Nm} \quad (4.15)$$

โดยค่าที่ได้จากสมการที่ (4.14) และ (4.15) นี้ เป็นค่าที่คำนวณในแบบ static ซึ่งเป็นค่าแรงบิดสูงสุดที่ต้องเอาชนะในการเคลื่อนที่ขึ้นลงเพื่อยกน้ำหนักของชุดจับทวนพลอย แต่ในทาง dynamic ประมาณประสิทธิภาพของบอลสกรูได้ที่ 90 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นแรงบิดที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่จึงต้องประมาณตามสมการที่ (4.16)

$$\text{โดย } T = \frac{FL}{2\pi n_p} \quad (4.16)$$

T แทนแรงบิดของมอเตอร์ที่กระทำกับบอลสกรู

F แทนแรงกดตามแนวแกนที่ได้จากบอลสกรู

L แทนระยะเคลื่อนที่ในหนึ่งรอบการหมุน (Lead screw)

n_p แทนประสิทธิภาพของบอลสกรู

ดังนั้นเมื่อแทนสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพของบอลสกรูลงไปในสมการที่ (4.16) จะได้สมการดังนี้

$$T = 0.177FL \quad \text{Nm} \quad (4.17)$$

จากสมการที่ (4.17) เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ทำให้เกิดแรงตามแนวแกนของบอลสกรูแต่ถ้าต้องการสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตามแนวแกนกับค่ากระแสที่ต้องให้กับมอเตอร์แกน z ต้องแทนค่า $T = K_{motor} I$ ซึ่งเป็นสมการแรงบิดที่สร้างขึ้นจากมอเตอร์ตามสัดส่วนของกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ลงในสมการที่ (4.17) โดยกำหนดให้ค่าคงตัวของแรงบิดคือ $K_{motor} = 0.215 \text{ Nm/amp}$ จัดรูปจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$F = \frac{K_{motor} I}{0.177 \times L} = \frac{0.215 \times I}{0.177 \times L} \quad (4.18)$$

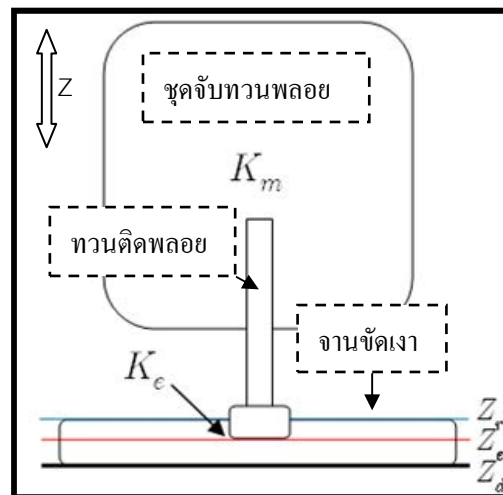
สมการที่ (4.18) นี้เป็นสมการสำคัญในการหาค่าแรงกดเพิ่มเติมในการเจียรระโนพลอยขัดชิ้นงานโดยใช้ค่าความต่างของกระแสเป็นตัวกำหนดขนาดระยะการเคลื่อนที่ของมอเตอร์แกน z

4.2.2 ทฤษฎีการควบคุมแรงแบบผ่อนตาม [6]

ในการควบคุมแรงแบบผ่อนตาม หรือ compliance control เป็นการคำนวณแรงที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสระหว่างแขนกลกับสภาพแวดล้อมแบ่งการเกิดแรงได้เป็น 2 ชนิด คือ การควบคุมแรงที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของแขนกล (active compliance) และการควบคุมแรงที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนรูปของสภาพแวดล้อม (passive compliance) แต่เนื่องจากหัวข้อที่แล้วเห็นว่าเครื่องเจียรระโนพลอยอัตโนมัติในขณะที่กดพลอยมีแกนการเคลื่อนที่เพียงแค่แกนเดียวและไม่มีการบิดหรือหมุนของแกน z ดังนั้นการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นสามารถได้ตามรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นแผนภาพของเม็ดพลอยขณะถูกสั่งให้ไปกดที่งานขัดเงาด้วยอัตราเร็วในการเคลื่อนที่น้อยมากเทียบได้ใกล้เคียงกับสภาพสมดุลสถิต (Quasi-static) มีพารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

- K_m แทนค่าคงที่ความหยุ่นตัวของแกนกลในที่นี่คือชุดจับทวนพลอยกับทวนติดพลอย
- K_e แทนค่าคงที่ความหยุ่นตัวของสภาพแวดล้อมในที่นี่คือหน้าสัมผัสระหว่างเม็ดพลอยกับจาน
- Z_r แทนระยะที่ไม่มีการก่เกิดขึ้นหรือระยะก่อนถูกกดด้วยเม็ดพลอย
- Z_e แทนระยะที่เม็ดพลอยสามารถกดได้
- Z_d แทนระยะที่ต้องการหรือระยะที่สั่งให้เม็ดพลอยกดลงบนจาน

แรงกดพลอยที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้จากสมการ $F = K\Delta Z$ ซึ่งมีค่า F หรือแรงกดที่เกิดขึ้นแปรผันตามชนิดของแรงกดระหว่างค่าคงที่การหยุ่นตัว K กับระยะการเปลี่ยนรูป ΔZ โดยในกรณีชนิดของแรงกดเป็นแบบการเปลี่ยนรูปของแกนกลซึ่งหมายความว่าค่า $K_e \gg K_m$ ค่าคงที่การหยุ่นตัวของการกดสามารถประมาณได้ว่า $K = K_m$ และระยะการเปลี่ยนรูป ΔZ เท่ากับผลต่างระหว่างค่าระยะที่ต้องการกดกับระยะที่กดได้หรือ $|Z_d - Z_e|$ ในทางกลับกันแรงกดที่เกิดจากชนิดของแรงกดแบบการเปลี่ยนรูปของสภาพแวดล้อมซึ่งมีค่า $K_m \gg K_e$ หมายความว่า $K = K_e$ และระยะการเปลี่ยนรูป ΔZ เท่ากับผลต่างระหว่างค่าระยะที่กดได้กับระยะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเสียรูป คือ $|Z_e - Z_r|$



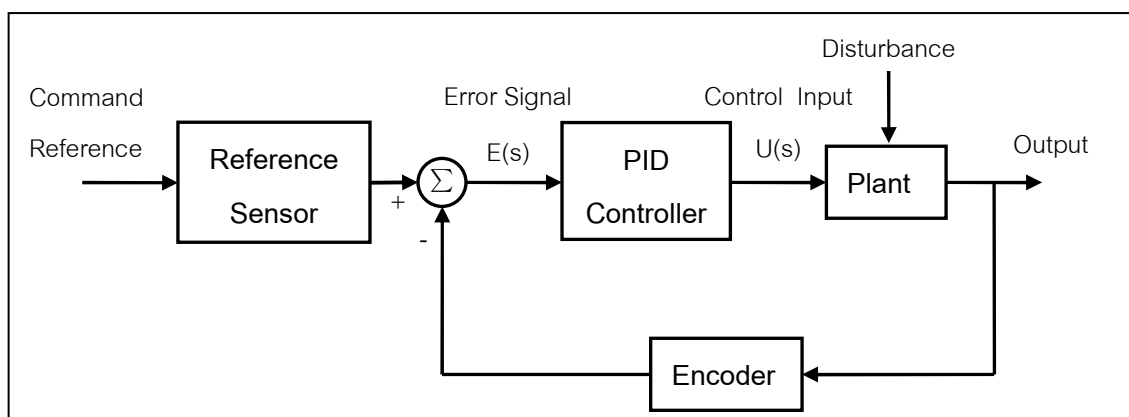
รูปที่ 4.7 แผนภาพแสดงการกดพลอยที่อยู่บนปลายทวนติดพลอยบนจานขัดเงา

แต่เนื่องจากโครงสร้างของชุดจับพลอยถูกออกแบบและสร้างขึ้นให้มีค่าความแข็งเกร็งสูง (high stiffness) และชุดขับเคลื่อนทั้งหมดมีความหยุ่นตัวน้อยมาก (high stiffness) ซึ่งต่างกับค่าความหยุ่นตัวรวมระหว่างพลอยกับจานเจียรระโนมาก ส่งผลให้แรงกดระหว่างหน้าพลอยกับจานขัดเงา

เกิดการเสียรูปตามแนวแกน z (deformation) เฉพาะตรงบริเวณที่กด ทำให้สามารถคำนวณค่าแรงกดระหว่างจานขัดเงากับหน้าพลอยของพลอยที่ติดอยู่กับปลายทวนติดพลอยโดยใช้รูปแบบแรงกดแบบการเปลี่ยนรูปของสภาพแวดล้อม โดยการวัดค่ากระแสที่มอเตอร์ใช้ในการขับเคลื่อนชุดจับทวนพลอยในแนวแกน z นี้ขณะกด

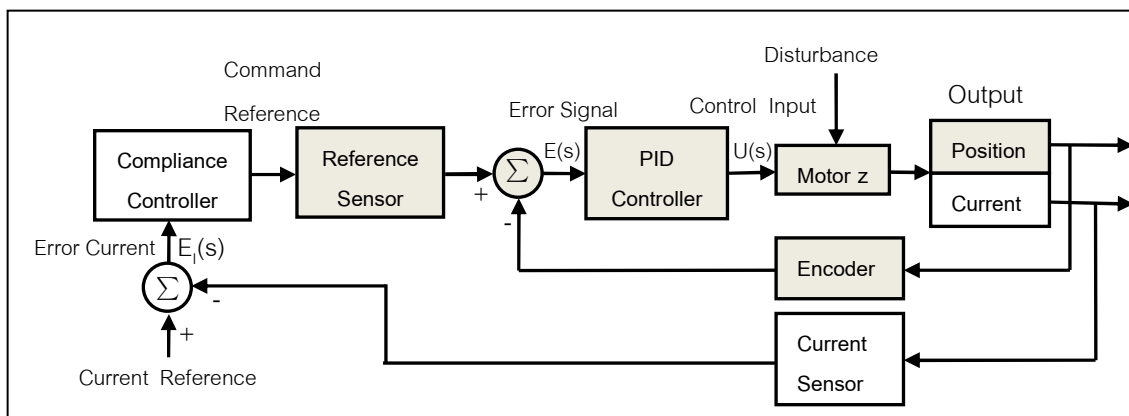
4.2.3 การควบคุมแรงกดของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ

ในการควบคุมแรงกดของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติเป็นการปรับปรุงระบบควบคุมตำแหน่งที่มีอยู่ในส่วนของตัวควบคุม (Controller) อยู่แล้ว ให้สามารถรับรู้ความรู้สึกของแรงกดได้โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง (force sensor) ที่ปลายทวนติดพลอยซึ่งอาจจำเป็นต้องติดเป็นจำนวนมากส่งผลให้ราคาต้นทุนการผลิตสูงขึ้นมาไม่เหมาะแก่การนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเจียรไนพลอยของไทย โดยระบบควบคุมตำแหน่งของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติที่อยู่ในส่วนของตัวควบคุมและถูกประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้น มีลักษณะตามรูปที่ 4.8 ซึ่งมีสัญญาณคำสั่งอ้างอิง (Command Reference) เป็นตำแหน่งที่ต้องการเคลื่อนที่ และถูกเปลี่ยนรูปแบบด้วยระบบตรวจรู้อ้างอิง (Reference Sensor) เพื่อแปลงสัญญาณคำสั่งอ้างอิงให้มีหน่วยเดียวกับสัญญาณที่ตรวจวัดได้จากตัววัดตำแหน่ง (Encoder) ทำให้สามารถเปรียบเทียบเป็นสัญญาณผิดพลาด (error signal) เพื่อส่งต่อไปยังตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) จากนั้นนำสัญญาณความผิดพลาดที่ได้ไปประมวลเป็นสัญญาณควบคุม (Control Input) มอเตอร์ในระบบที่ต้องการควบคุม (Plant) เพื่อลดค่าสัญญาณผิดพลาดที่ได้ให้มีค่าน้อยที่สุดหรือใกล้เคียงศูนย์



รูปที่ 4.8 แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมตำแหน่งของเครื่องเจียรไนแบบอัตโนมัติ [3]

แต่ในการควบคุมแรงกดซึ่งถูกควบคุมโดยมอเตอร์แกน z ระบบควบคุมตำแหน่งของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติข้างต้นจะถูกปรับปรุงโดยการนำค่ากระแสมอเตอร์ที่วัดได้จากการขับเคลื่อนชุดจับทวนพลอยในแนวแกน z ป้อนกลับมาเพื่อคำนวณเป็นค่าแรงที่ใช้ในการกด มีลักษณะตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแรงและตำแหน่งของเครื่องเจียระไนแบบอัตโนมัติของมอเตอร์แกน z

จากแผนภาพในรูปที่ 4.9 บล็อกสี่เหลี่ยมคือระบบการควบคุมตำแหน่งของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติซึ่งก็คือระบบควบคุมแบบเดิมตามรูปที่ 4.8 ส่วนบล็อกการควบคุมแรงก็คือบล็อกสี่เหลี่ยมที่ป้อนกลับเข้ามาโดยมีสัญญาณกระแสอ้างอิง (Current Reference) ที่สามารถหาได้จากสมการที่ 4.18 โดยแปลงแรงกดที่ต้องการในการกดพลอยให้อยู่ในรูปของสัญญาณกระแสอ้างอิง ทำให้สามารถหาค่าสัญญาณกระแสผิดพลาด (Error Current) จากความต่างของค่าสัญญาณกระแสที่วัดได้จากตัววัดกระแส (Current Sensor) ค่าสัญญาณกระแสผิดพลาดที่คำนวณได้นี้จะถูกส่งไปยังตัวควบคุมการแปลงสัญญาณแรงแบบผ่อนตาม (Compliance Controller) เพื่อนำไปประมวลผลเป็นระยะการกดพลอยโดยใช้สมการ $\Delta Z = F / K$ ที่มีค่า K เป็นค่าคงที่การยุบตัวของแบบจำลองธรรมชาติให้เป็นตัวสัญญาณคำสั่งอ้างอิง (Command Reference) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการเคลื่อนที่

แต่ในการเจียระไนขัดเงาพลอยแรงที่ใช้ในการกดพลอยต้องมีความเหมาะสมในการกดคือไม่ใช่แรงกดที่น้อยเกินไปหรือมากเกินไป และเหลี่ยมพลอยที่ได้ต้องไม่เสียรูป ดังนั้นทางผู้พัฒนาจึงต้องมีการกำหนดขอบเขตของแรงขั้นต่ำเพื่อเป็นตัวควบคุมให้พลอยมีการกดเพิ่มเมื่อไม่ได้แรงกดตามที่ต้องการ และมีการกำหนดขอบเขตของแรงขั้นสูงไว้เป็นเพดานในการป้องกันไม่ให้พลอยถูกกดด้วยแรงที่มากเกินไป พร้อมทั้งกำหนดระยะการกดพลอยเพิ่มสูงสุดเพื่อป้องกันการเสียรูปของเหลี่ยมพลอยในการเจียระไนขัดขึ้นเงา

บทที่ 5

ขั้นตอนในการเจียรระไนพลอยโดยใช้เครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ

สำหรับการเจียรระไนพลอยด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติจะใช้พลอยที่ผ่านการแต่งพลอยเบื้องต้นมาแล้วโดยมีลักษณะของเม็ดพลอยตามรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นพลอยสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 มิลลิเมตร และสูงประมาณ 4-5 มิลลิเมตร ส่วนขั้นตอนต่างๆในการเจียรระไนพลอยด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติสามารถอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 5.1 พลอยที่ผ่านการแต่งเกลารูปทรงเบื้องต้นแล้ว

5.1 ขั้นตอนการติดพลอยเข้ากับทวนติดพลอย (Drop-stick) โดยใช้กาว

ในการเจียรระไนพลอยโดยใช้เครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัตินั้น จะใช้พลอยที่ผ่านการแต่งรูปทรงเบื้องต้นมาแล้วมาติดที่ปลายทวนติดพลอยโดยใช้กาวยูวี (UV Glue) ในการติดตามรูปที่ 5.2 เหตุที่ใช้กาวยูวีเนื่องจากเนื้อกาวชนิดนี้สามารถรับแรงเจียรระไนพลอยได้มากและแข็งตัวได้เร็ว แปรผันตามกับความเข้มของรังสียูวีที่ใช้ และสามารถทำให้กาวเสื่อมสภาพได้โดยการใช้ความร้อนที่ไม่สูงจนเกินไป หลังจากนั้นให้นำชุดพลอยที่ผ่านการติดกาวแล้วเข้าไปอบในตู้อบรังสียูวีดังรูปที่ 5.3 เป็นเวลาประมาณ 45-60 นาทีเพื่อให้กาวแห้งสนิท



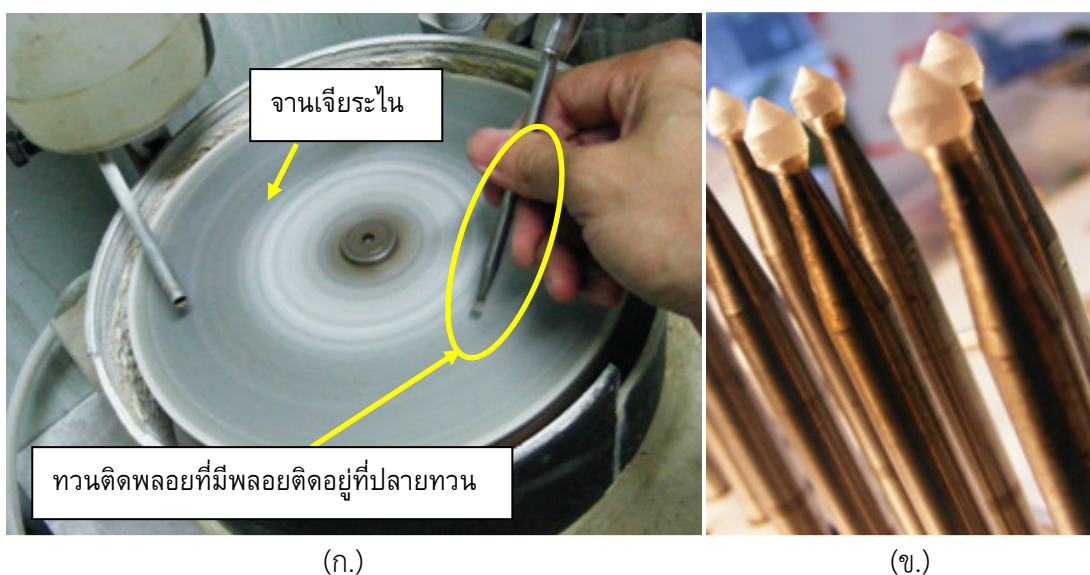
รูปที่ 5.2 การติดพลอยเข้ากับทวนติดพลอยด้วยกาวยูวี



รูปที่ 5.3 การอบชุดพลอยที่ติดกาวแล้วในตู้อบยูวี

5.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปพลอยก่อนการนำไปเจียรระโนพลอยด้วยเครื่องเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติ

ชุดพลอยที่ติดกาวหลังจากผ่านการอบจากตู้อบรังสียูวีมาแล้วจะถูกนำไปเกลารูปพลอยตามรูปที่ 5.4 (ก.) ด้วยเครื่องเจียรระโนพลอยแบบใช้มือ โดยให้เม็ดพลอยที่เกลารูปมีขนาดเม็ดพลอยใกล้เคียงหรือใหญ่กว่าแบบพลอยที่ออกแบบไว้เล็กน้อยตามรูปที่ 5.4 (ข.)



(ก.)

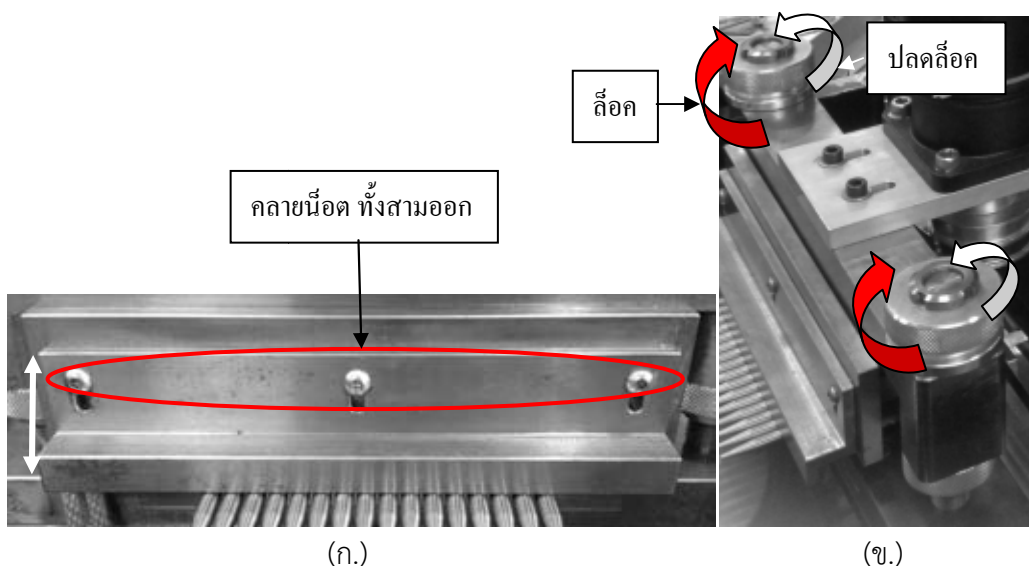
(ข.)

รูปที่ 5.4 การเกลารูปพลอยด้วยเครื่องเจียรระโนแบบใช้มือ

(ก.) พลอยถูกเกลารูปด้วยจานเจียรระโนแบบหยาบ (ข.) พลอยที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว

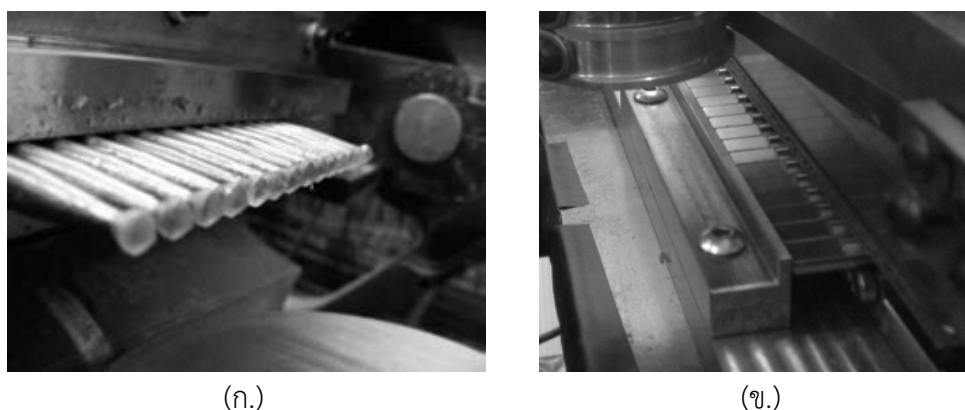
5.3 ขั้นตอนการนำชุดพลอยใส่เข้ากับชุดจับทวนพลอย

หลังจากผ่านขั้นตอนการเกลารูปร่างรูปพลอยแล้วขั้นตอนถัดมาคือ การนำชุดพลอยใส่ลงไปยังชุดจับทวนพลอยของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยการหมุนปลดล๊อคตัวหนีบพลอยของชุดจับทวนพลอยในรูปที่ 5.5 (ข.) จากนั้นใส่ชุดพลอยเข้ากับชุดจับทวนพลอยโดยการใส่ทวนพลอยให้มีลักษณะระนาบเดียวกันดังรูปที่ 5.6 (ก.) และปรับระดับตำแหน่งอ้างอิงการหมุนทวนพลอยที่ส่งผลต่อหน้าต่างๆของเหลี่ยมพลอยให้มีระดับเท่ากันตามรูปที่ 5.6 (ข.) เพื่อเวลาเจียรระไนตอนกลับด้านพลอยเหลี่ยมพลอยจะได้ตรงกัน และคลายน็อตสามตัวที่อยู่บนชุดจับทวนพลอยตามรูปที่ 5.6 (ก.) เพื่อเวลาในขณะที่หมุนล๊อคทวนติดพลอยจะได้ไม่มีระยะช่องว่างเกิดขึ้นทำให้เวลาเจียรระไนพลอยไม่เกิดการหมุนเลื่อนตำแหน่งของทวนติดพลอย และสุดท้ายคือการดันตัวป้องกันทวนติดพลอยกระดกขึ้นที่มีหน้าที่ป้องกันทวนติดพลอยสั่นขึ้นลงในขณะเจียรระไนโดยเลื่อนลงมาและขันน็อตทั้งสามตัวให้แน่น



รูปที่ 5.5 ชุดล๊อคทวนติดพลอย

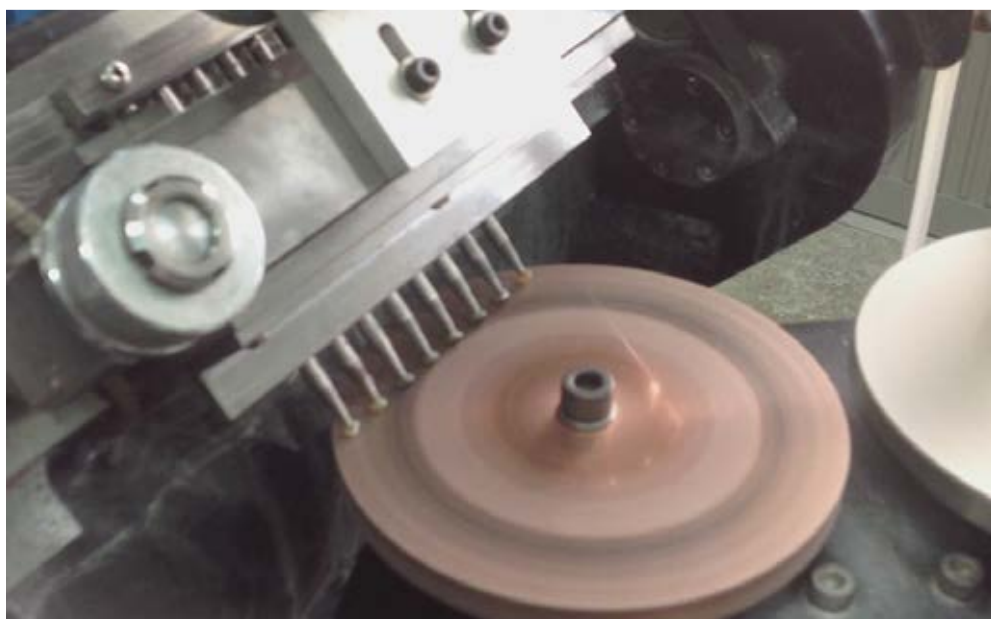
(ก.) ตัวป้องกันทวนติดพลอยกระดกขึ้น (ข.) ตัวหนีบทวนติดพลอยให้แน่นติดกับชุดจับทวนพลอย



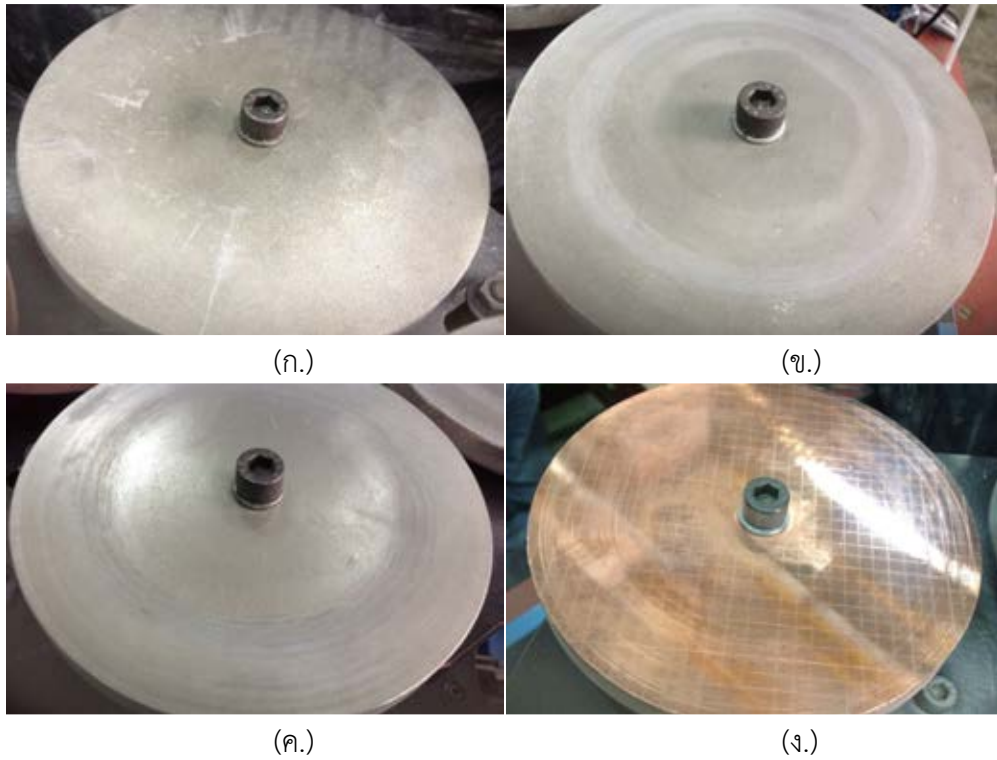
รูปที่ 5.6 การใส่ทวนติดพลอยเข้ากับชุดจับทวนพลอย (ก.) ด้านหน้า (ข.) ด้านหลัง

5.4 ขั้นตอนการเจียรระไนพลอยด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

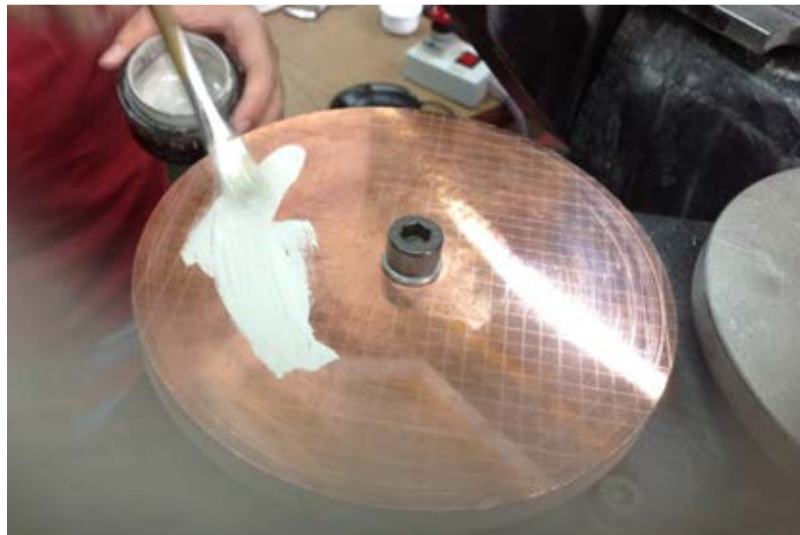
เริ่มต้นจากใส่ค่าพารามิเตอร์สำหรับกำหนดขนาดและรูปร่างของพลอยที่ออกแบบไว้ลงในโปรแกรมเจียรระไนพลอยที่พัฒนาขึ้นแล้วสั่งให้โปรแกรมทำงาน แรกเริ่มเครื่องเจียรระไนพลอยจะเริ่มทำการเจียรระไนขึ้นรูปเหลี่ยมของเม็ดพลอยไปที่ละเหลี่ยมจนเสร็จตามรูปที่ 5.7 โดยเริ่มจากงานเจียรระไนหยาบขึ้นรูปก่อนตามรูปที่ 5.8 (ก.) จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็นขึ้นรูปพลอยด้วยงานเจียรระไนที่ละเอียดขึ้นตามรูปที่ 5.8 (ข.) แล้วสุดท้ายเจียรระไนขัดผิวด้วยงานเจียรระไนที่ละเอียดที่สุดตามรูปที่ 5.8 (ค.) ในขั้นตอนนี้เม็ดพลอยที่ได้เป็นเม็ดพลอยที่มีรูปร่างตรงตามที่ออกแบบไว้แล้ว แต่ผิวของเม็ดพลอยยังไม่มีเงาซึ่งต้องใช้งานขัดเงาขัดผิวของพลอยในที่นี้คือ งานทองแดงที่ผ่านการกรีดผิวเป็นลายเพื่อให้ผงเพชรมีการเกาะที่ผิวของงานได้ดียิ่งขึ้นตามรูปที่ 5.8 (ง.) แต่ก่อนที่จะเจียรระไนขัดเงาต้องทำความสะอาดผิวของทองแดงให้สะอาดก่อน เพราะฝุ่นที่เกาะบนผิวงานทองแดงสามารถทำให้เกิดรอยขีดข่วนหรือรอยขนแมวบนผิวในขณะขัดขึ้นเงาได้ หลังจากที่ทำความสำเร็จแล้วให้ทาน้ำมันขัดเงาที่ผสมผงเพชรแล้วตามรูปที่ 5.9 แล้วทำการขัดขึ้นเงาพลอย สำหรับการเจียรระไนในขั้นตอนนี้ เป็นการเจียรระไนในด้านบนของพลอย (Crown Side) ก่อน เมื่อเจียรระไนเสร็จแล้วจึงถอดทวนติดพลอยออกจากชุดจับทวนพลอยจะได้เม็ดพลอยที่ผ่านการเจียรระไนข้างต้นแล้วตามรูปที่ 5.10 เพื่อนำไปกลับด้านเจียรระไนด้านล่างของพลอย (Pavilion Side) ต่อไป



รูปที่ 5.7 การเจียรระไนพลอยด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 5.8 งานเจียรระไนพลอยของเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ
 (ก.) งานขึ้นรูปพลอยเบอร์ 300 (ข.) งานขึ้นรูปพลอยเบอร์ 800
 (ค.) งานขึ้นรูปพลอยเบอร์ 1200 (ง.) งานทองแดงขัดเงา



รูปที่ 5.9 การทาน้ำมันขัดเงาที่ผ่านการผสมผงเพชรแล้วบนงานทองแดง

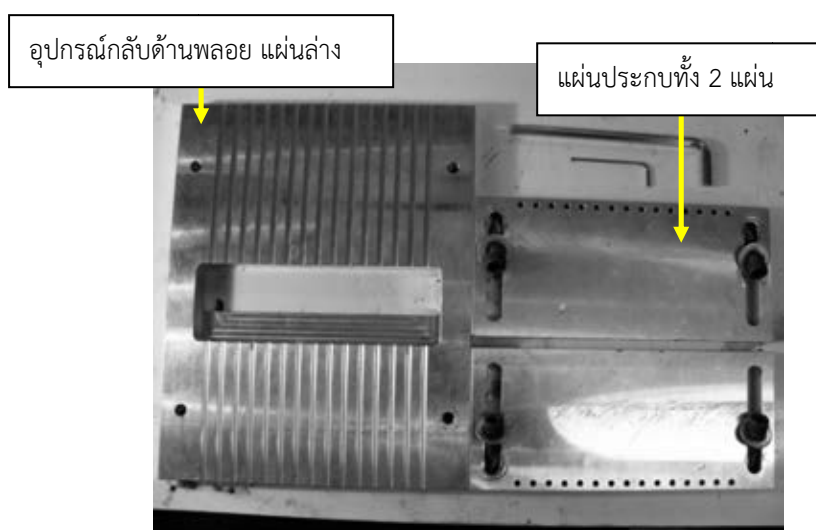


รูปที่ 5.10 เม็ดพลอยที่ผ่านการเจียรไนด้านบนของเม็ดพลอย

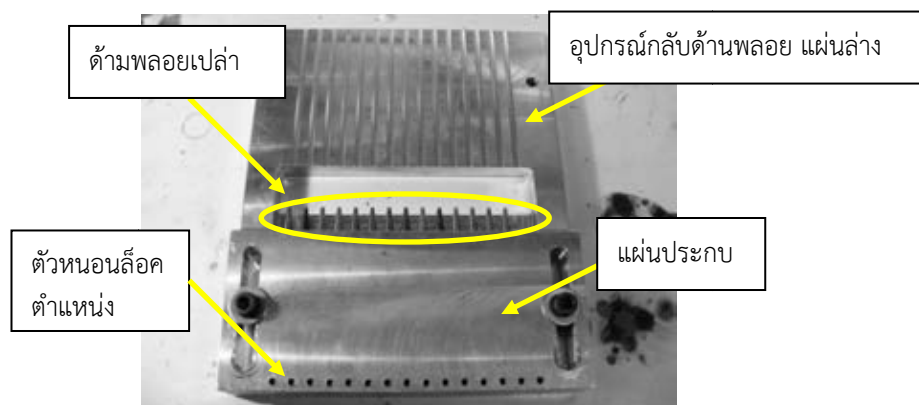
5.5 ขั้นตอนการกลับด้านทวนติดพลอย

ในขั้นตอนนี้เป็นการกลับด้านพลอยที่ผ่านการเจียรไนด้านบนแล้วเพื่อนำไปเจียรไนด้านที่เหลือหรือด้านล่างของพลอย โดยนำทวนติดพลอยออกจากชุดจับทวนพลอยก่อน จากนั้นจึงนำไปกลับด้านพลอยด้วยอุปกรณ์กลับด้านพลอยดังรูปที่ 5.11 โดยมีวิธีใช้ดังนี้

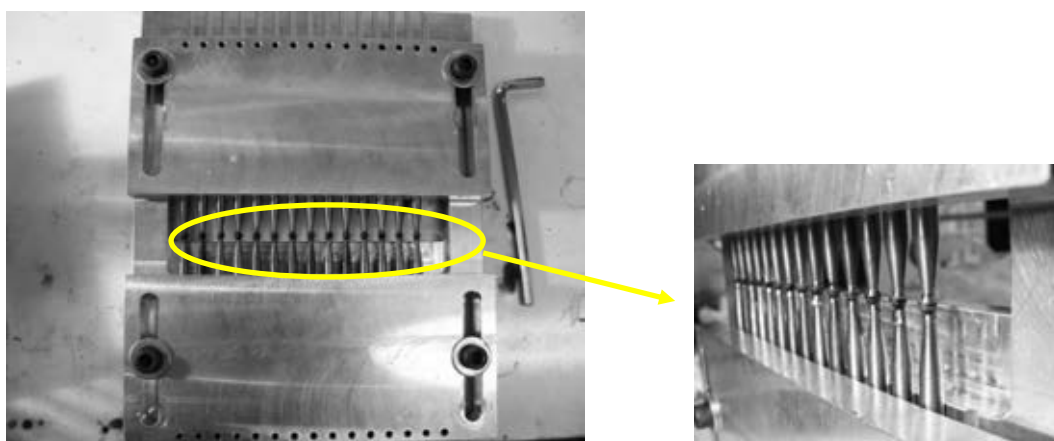
1. นำทวนติดพลอยที่ยังไม่ได้ใช้งานมาวางลงในร่องของอุปกรณ์กลับด้านพลอยแผ่นล่างฝั่งหนึ่ง แล้วนำแผ่นประกบมาปิดทับลงไปพร้อมยึดสลักเกลียวตัวทวนนอนล็อกตำแหน่งอ้างอิงเอาไว้ดังแสดงในรูปที่ 5.12
2. นำทวนติดพลอยที่มีเม็ดพลอยติดอยู่ที่ปลายทวนและผ่านการเจียรไนด้านบนพลอยแล้วมาหยอดกาวยูวีลงบนผิวด้านบนของพลอย แล้วนำไปประกบติดกับทวนติดพลอยเปล่าที่ยึดไว้กับชุดกลับด้านพลอย
3. นำแผ่นประกบมาปิดทับลง ยึดสลักเกลียวตัวทวนนอนเพื่อล็อกตำแหน่งอ้างอิงของทวนติดพลอยทั้งสองฝั่งให้ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.13 จากนั้นนำไปเข้าตู้อบยูวีเพื่อให้กาวแข็งตัวเป็นเวลาประมาณ 45-60 นาที



รูปที่ 5.11 ชุดอุปกรณ์สำหรับกลับด้านพลอย [2]

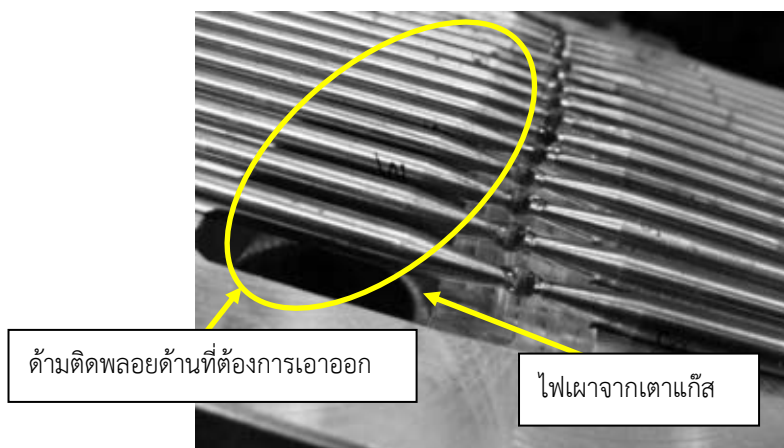


รูปที่ 5.12 การยึดทวนติดพลอยเปล่า กับอุปกรณ์กลับด้านพลอย [2]



รูปที่ 5.13 การยึดทวนติดพลอยที่ผ่านการเจียระไนด้านบนพลอยแล้วเข้ากับทวนติดพลอยเปล่า [2]

4. หลังจากเนื้อกาวแห้งดีแล้ว ให้นำชุดกลับด้านพลอยออกจากตู้อบรังสียูวี แล้วถอดแผ่นประกบทั้งสองด้านออก โดยนำแผ่นล่างที่วางทวนติดพลอยทั้งสองไว้มาจัดตำแหน่งของทวนติดพลอย โดยให้ไฟโดนเฉพาะในทวนติดพลอยที่ต้องการเอาออก เพื่อให้กาวยูวีเสื่อมสภาพ และสามารถถอดทวนติดพลอยเดิมออกจากเม็ดพลอยที่ผ่านการเจียระไนด้านบนแล้วได้ง่าย ดังรูปที่ 5.14
5. หลังจากถอดทวนติดพลอยได้แล้วจะเหลือพลอยด้านที่ยังไม่ได้เจียระไนด้านล่าง ดังรูปที่ 5.15 โดยจะนำไปเจียระไนด้านล่างต่อไป



รูปที่ 5.14 การเผาไฟเพื่อถอดทวนติดพลอยก่อนหน้าออก [2]



รูปที่ 5.15 พลอยที่ถูกกลับด้านแล้ว [2]

5.6 ขั้นตอนการเจียรระโนในด้านล่างพลอย

เมื่อกลับด้านพลอยเสร็จแล้ว ให้ทำการเจียรระโนพลอยในด้านล่างของพลอย ที่ยังไม่ได้เจียรระโน ซึ่งมีขั้นตอนการทำเหมือนกับขั้นตอนก่อนหน้าในส่วนของการเจียรระโนพลอยด้านบนที่กล่าวมาแล้วทุกประการ เมื่อเจียรระโนเสร็จสิ้นแล้วพลอยที่ผ่านการเจียรระโนจะออกมาดังรูปที่ 5.16

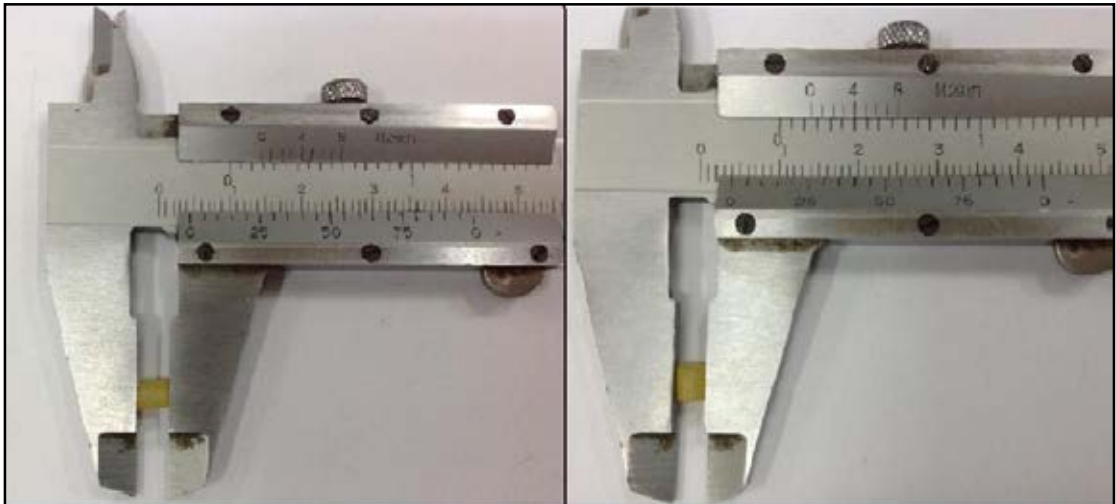


รูปที่ 5.16 เม็ดพลอยที่ผ่านการเจียรระโนด้านล่างของเม็ดพลอย

บทที่ 6

การทดลอง และ ผลการทดลอง

การทดลองควบคุมแรงของเครื่องเจียระไนพลอย จะทำการทดลองเจียระไนพลอยที่มีชื่อว่า คิวบิก เซอร์โคเนีย (Cubic Zirconia) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 มม. และมีขนาดความยาวประมาณ 4.5 มม. ตามรูปที่ 6.1 โดยแร่ชนิดนี้เป็นแร่ที่มีคุณสมบัติคล้ายธรรมชาติมาก มีระดับความแข็งค่อนข้างสูงในระดับสเกลโมส์ที่ 8.5 ซึ่งเป็นค่าความแข็งของพลอยที่นิยมในอุตสาหกรรมทั่วไปเนื่องจากมีราคาไม่สูงมาก และมีความทนทาน เลียนแบบความสวยงามของเพชรได้ โดยการทดลองจะเป็น 2 ส่วนคือ ในส่วนแรกเป็นการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และค่าสภาพแวดล้อมของเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ เช่น น้ำหนักของชุดจับทวนพลอย ค่าเกณฑ์สปริงที่มาทดน้ำหนักชุดจับทวนพลอย และค่าคงที่ความหนืดตัวของจานขัดเงา ส่วนที่สองเป็นการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการขัดขึ้นเงาพลอย และทดสอบโปรแกรมการควบคุมแรงทางอ้อม



รูปที่ 6.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 มม. และความยาวขนาดประมาณ 4.5 มม. ของพลอยดิบที่ใช้สำหรับการเจียระไน

6.1 การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และค่าสภาพแวดล้อมของเครื่องเจียรไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์และค่าสภาพแวดล้อมของเครื่องเจียรไนพลอยโดยใช้ประโยชน์จากการวัดกระแสที่ป้อนกลับมาของมอเตอร์แกน z เพื่อเป็นประโยชน์ในการทำการทดลองส่วนที่สอง โดยมีการทดลองแบ่งย่อยเป็น 3 การทดลอง

6.1.1 การทดลองหาน้ำหนักของชุดจับทวนพลอย

การทดลองหาน้ำหนักของชุดจับทวนพลอยจะถูกทดลองในสภาวะของ static ที่ไม่มีการต่อน้ำหนักของสปริง (counter balance) และไม่มีการจ่ายไฟเข้ามอเตอร์ จากนั้นทำการจ่ายไฟเข้ามอเตอร์แกน z ด้วยโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียรไนพลอย แล้วเก็บค่ากระแสไฟที่จ่ายมากที่สุดที่ทำให้มอเตอร์แกน z เริ่มเกิดการเคลื่อนที่ จากนั้นนำค่ากระแสไฟที่เก็บได้มาวิเคราะห์น้ำหนักของชุดจับทวนพลอยโดยใช้สมการที่ (4.14) และ (4.15) ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4

ขั้นตอนในการทำการทดลอง

1. จัดตำแหน่งของแกน x และแกน z ให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น (home position) โดยใช้คำสั่ง set home แกน x และแกน z ในโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียรไนพลอย
2. สั่งมอเตอร์แกน z เคลื่อนที่ลงไป 1 มม. ด้วยอัตราเร็ว 0.2 มม./วินาที พร้อมเก็บค่ากระแสไฟที่จ่ายให้มอเตอร์
3. รอจนมอเตอร์แกน z เคลื่อนที่ไปตำแหน่งที่สั่ง จากนั้นทำการตัดกระแสไฟจาก amplifier เป็นการชั่วคราว เพื่อไม่ให้มีกระแสไฟเลี้ยงที่ตำแหน่งนั้นอยู่
4. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 อีก 6 ครั้ง และเปลี่ยนจากสั่งมอเตอร์เคลื่อนที่ลงเป็นสั่งมอเตอร์เคลื่อนที่ขึ้นทีละ 1 มม. อีก 7 ครั้งเพื่อกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้น
5. นำกระแสไฟที่จ่ายให้มอเตอร์ ณ ตำแหน่งที่มอเตอร์เริ่มเคลื่อนที่ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาน้ำหนักของชุดจับทวนพลอยโดยเฉลี่ย

ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดลองตามขั้นตอนข้างต้นแล้ว จะได้ผลการทดลองตามตารางที่ 6.1 โดยการเคลื่อนที่ลงกระแสไฟของมอเตอร์จะเป็นลบ ส่วนการเคลื่อนที่ขึ้นกระแสไฟของมอเตอร์จะเป็นบวก เมื่อนำมาแปลงเป็นน้ำหนักโดยกำหนดให้ K_{motor} ของมอเตอร์แกน Z คือ 0.215 แล้วแปลงสัญญาณกระแสที่วัดได้เป็นน้ำหนัก เห็นได้ว่าน้ำหนักที่วัดได้จะอยู่ในช่วงประมาณ 300-400 N

ตารางที่ 6.1 ผลของกระแสที่วัดได้จากการทดลองพร้อมแปลงเป็นหน่วยน้ำหนัก

ตำแหน่งปัจจุบัน (mm)	ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ (mm)	ทิศการเคลื่อนที่ (ขึ้น,ลง)	กระแสที่วัดได้ (amp)	น้ำหนักที่วัดได้ (N)
-5	-6	ลง	-1.48	317.81
-6	-7	ลง	-1.70	365.51
-7	-8	ลง	-1.75	376.29
-8	-9	ลง	-1.85	397.38
-9	-10	ลง	-1.48	317.13
-10	-11	ลง	-1.58	338.88
-11	-12	ลง	-1.50	321.89
-12	-11	ขึ้น	4.80	343.69
-11	-10	ขึ้น	5.12	367.10
-10	-9	ขึ้น	5.19	371.67
-9	-8	ขึ้น	5.27	377.58
-8	-7	ขึ้น	4.76	341.32
-7	-6	ขึ้น	5.19	372.09
-6	-5	ขึ้น	5.30	379.70
			เฉลี่ย	356.29

สรุปผลการทดลอง

ดังนั้นน้ำหนักของชุดจับทวนพลอยที่วัดได้จะอยู่ที่ประมาณ 356.29 N เมื่อแปลงเป็นหน่วยมวลจะได้ประมาณ 36.32 kg

6.1.2 การทดลองหาค่าคงที่ของสปริงที่ทำการทดน้ำหนักของชุดจับทวนพลอย

การทดลองหาค่าคงที่ของสปริงรวมทั้งสองเส้น หรือค่า k (spring constant) ที่ทำหน้าที่ในการทดน้ำหนักของชุดจับทวนพลอย (counter balance) ที่มีการเคลื่อนที่ขึ้นและลงตามแนวแกน z โดยการทดน้ำหนักหรือถ่วงน้ำหนักนี้ ส่งผลให้น้ำหนักที่มีต่อแรงขับเคลื่อนน้อยลง ทำให้มอเตอร์แกน z ทำงานน้อยลง เพื่อประโยชน์ในการควบคุมแรงได้ดีขึ้นเนื่องจากผลจากแรงเสียดทานในการขับเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่บอลสกรูมีค่าน้อยลง

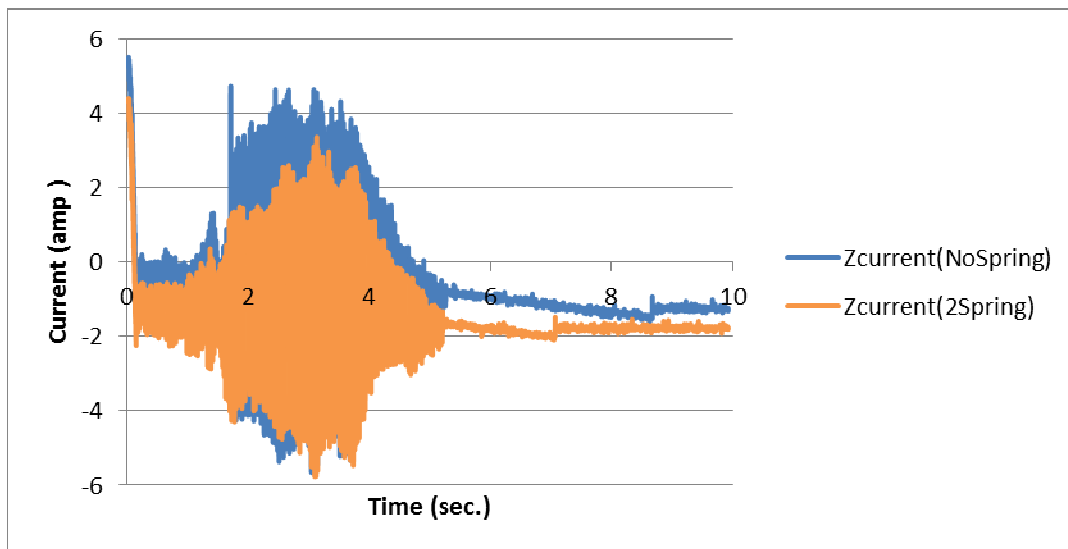
ค่า k ของสปริงหาได้จากสมการ $F = k\Delta z$ โดยแรง F แทนแรงตามแนวแกน z มอเตอร์ที่ส่งผ่านบอลสกรูมา จากการนำสมการที่ (4.18) ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 และ Δz แทนระยะยืดของสปริง

ขั้นตอนในการทำการทดลอง

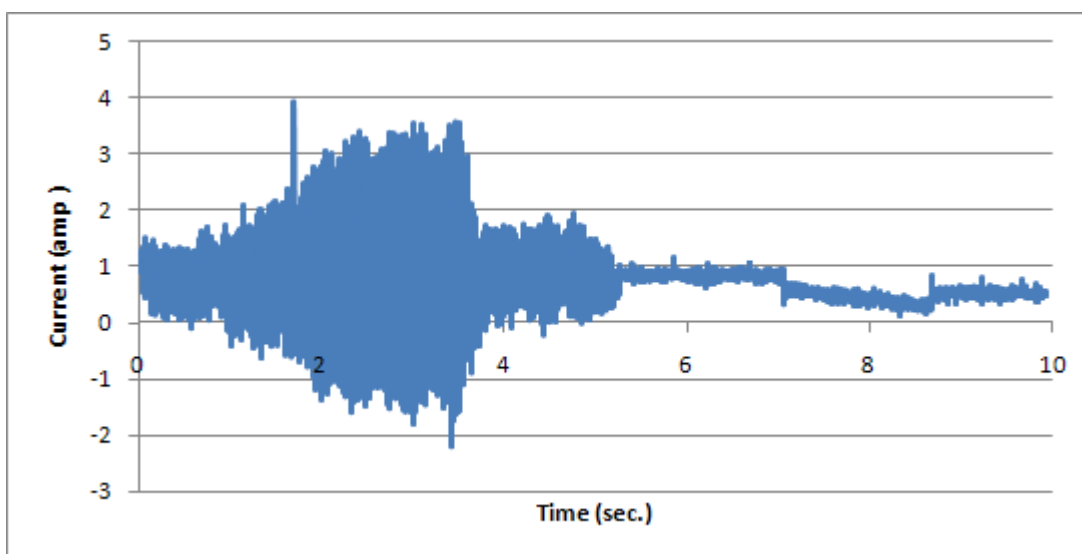
1. จัดตำแหน่งของแกน x และแกน z ให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น (home position) โดยใช้คำสั่ง set home แกน x และแกน z ในโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียระไนพลอย
2. สั่งมอเตอร์แกน z เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 0 มม. โดยตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งที่สปริงมีการยึดตัวตามแนวแกน z เป็นระยะอยู่ 110 มม.
3. สั่งมอเตอร์แกน z เคลื่อนที่ลงไป 26 มม. ด้วยอัตราเร็ว 5 มม./วินาที เพื่อให้สปริงมีระยะยืดที่ 136 มม. พร้อมเก็บค่ากระแสไฟที่จ่ายไปให้มอเตอร์แกน z ทั้งหมดในช่วงนี้
4. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 และ 3 อีกครั้ง แต่ในรอบนี้ให้ถอดสปริงออก
5. นำค่ากระแสไฟที่จ่ายให้มอเตอร์แกน z มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกันระหว่างชุดจับทวนพลอยที่ไม่ติดสปริงกับชุดจับทวนพลอยที่ติดสปริง แล้วนำค่าผลต่างของกระแสไฟมาหาค่าเฉลี่ยของ k สปริง

ผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นเมื่อนำกราฟของกระแสที่วัดได้จากมอเตอร์แกน z ที่จ่ายให้สำหรับการเคลื่อนที่ลงของชุดจับทวนพลอยระหว่างชุดจับทวนพลอยที่ไม่ติดสปริงกับชุดจับทวนพลอยที่ติดสปริงมาเปรียบเทียบกันได้ผลตามรูปที่ 6.2 เห็นได้ว่าค่ากระแสที่ได้จากการทดน้ำหนักหรือถ่วงน้ำหนักนี้ ในช่วงระหว่างเวลา 0-4 วินาที จะมีค่าน้อยกว่าจากนั้นค่ากระแสที่ได้หลังจากเวลา 4 วินาทีขึ้นไปต้องใช้กระแสมากกว่าแบบไม่ทดน้ำหนักเล็กน้อยเนื่องจากว่าแรงกระแสที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ต้องคอยพยายามเอาชนะแรงสปริงเพื่อรักษาตำแหน่งนี้ไว้ แต่เมื่อเทียบกับในช่วงเวลา 0-4 วินาทีเห็นได้ว่ามีค่าต่างกันน้อยมากดังแสดงผลต่างของกระแสระหว่างไม่ทดน้ำหนักกับทดน้ำหนักตามรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบกระแสไฟระหว่างชุดขับเคลื่อนพลอยที่ไม่ติดสปริง
กับชุดขับเคลื่อนพลอยที่ติดสปริง



รูปที่ 6.3 ผลต่างกระแสไฟระหว่างชุดขับเคลื่อนพลอยที่ไม่ติดสปริง
กับชุดขับเคลื่อนพลอยที่ติดสปริง

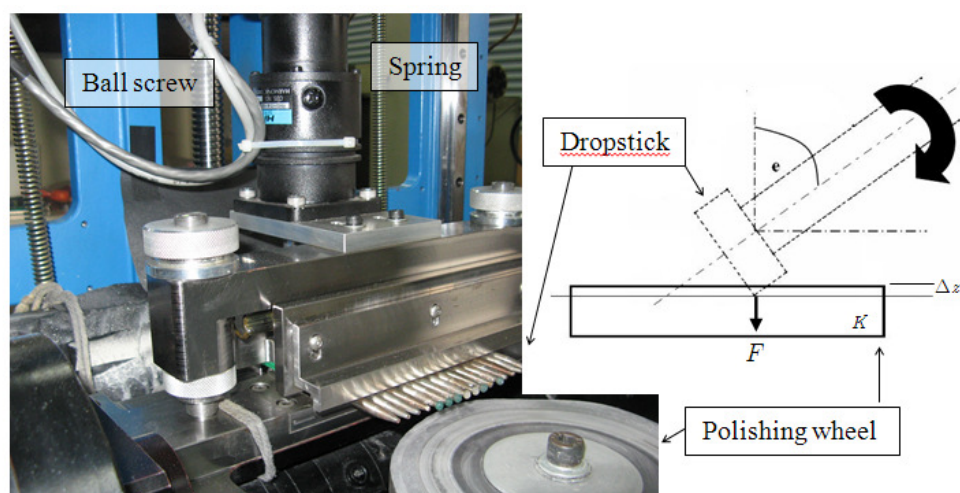
จากนั้นนำค่าผลต่างของกระแสไฟตั้งแต่ระยะยืดของสปริงตั้งแต่ 110 มม. จนถึงระยะยืด 136 มม. ทั้งหมดนี้มาหาค่า k เฉลี่ยของสปริงตามสมการ $k = \frac{F}{\Delta z}$ ตามที่กล่าวข้างต้น ทำให้ได้ค่า k เฉลี่ยคือ 1450 N/m

สรุปผลการทดลอง

ค่า k เฉลี่ย 1450 N/m นี้เป็นค่า k โดยประมาณของสปริงที่ใช้ในการถ่วงน้ำหนักของชุดขับเคลื่อนพลอยซึ่งต้องเลือกให้เหมาะสมกับระยะการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอย

6.1.3 การทดลองหาค่าคงที่ความหยุ่นตัวของงานขัดเงา

เนื่องจากการติดสปริงที่ชุดจับทวนพลอยหรือถ่วงน้ำหนักทำให้มอเตอร์ทำงานน้อยลงส่งผลให้การควบคุมแรงทำได้ดีขึ้นเนื่องจากผลจากแรงเสียดทานในการขับเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่บอลสกรูมีค่าน้อยลง และเนื่องจากโครงสร้างของชุดจับพลอยที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้มีค่าความแข็งเกร็งสูง (high stiffness) ทำให้สามารถคำนวณค่าแรงกดระหว่างงานเจียรระโนกับหน้าพลอยของพลอยที่ติดอยู่กับปลายทวนติดพลอยได้โดยการวัดค่ากระแสที่มอเตอร์ใช้ในการขับเคลื่อนชุดจับทวนพลอยในแนวแกน z นี้สังเกต เนื่องจากการออกแบบเครื่องเจียรระโนพลอยนี้ เราออกแบบให้ชุดขับเคลื่อนทั้งหมดมีความหยุ่นตัวน้อยมาก (high stiffness) และน้อยกว่าความหยุ่นตัวรวมระหว่างพลอยกับงานเจียรระโนมาก ส่งผลให้แรงกดระหว่างหน้าพลอยกับงานเจียรระโนนั้นเกิดการหยุ่นตัวหรือการเสียรูปตามแนวแกน z (deformation) เฉพาะตรงบริเวณที่กด โดยในการทดลองนี้ ค่าการเสียรูปที่วัดได้ตามแนวแกน z และค่าแรงกดที่วัดจากค่ากระแสสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ของการหยุ่นตัว (stiffness) ของงานเจียรระโนหรืองานขัดเงา โดยพิจารณาแผนภาพวัตถุอิสระในขณะเจียรระโนขัดขึ้นเงาตามรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 แผนภาพวัตถุอิสระในขณะเจียรระโนขัดขึ้นเงา [7]

โดย

$$F = K\Delta z$$

F = แรงกดรวมจากบอลสกรูที่ส่งผ่านการกดที่ปลายทวนติดพลอยในรูปของกระแส
 (ในที่นี้ $F = \frac{0.215 \times I}{0.177 \times 0.005} \approx 243 \times I$ N)

K = ค่าคงที่การหยุ่นตัวรวมของงานขัดเงากับพลอยที่เจียรระโน (stiffness of the environment)

Δz = ระยะการเสียรูป (deformation) ที่เกิดจากการกดของทวนติดพลอยตามแนวแกน z

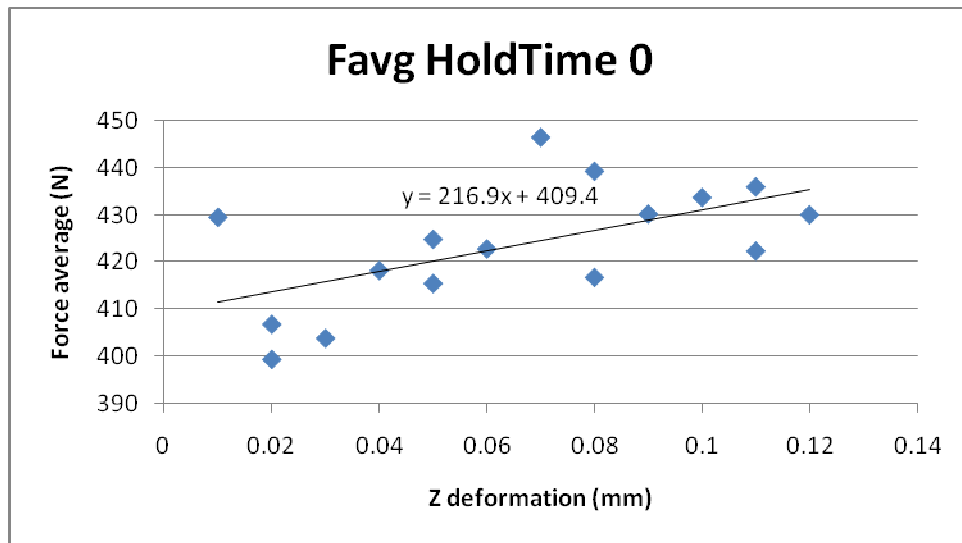
แก้สมการหาค่าคงที่การหยุ่นตัว (stiffness) K ซึ่งก็คือค่าคงที่การหยุ่นตัวรวมระหว่างหน้าพลอยกับงานทองแดงในขณะเจียรระโนขัดขึ้นเงา

ขั้นตอนในการทำการทดลอง

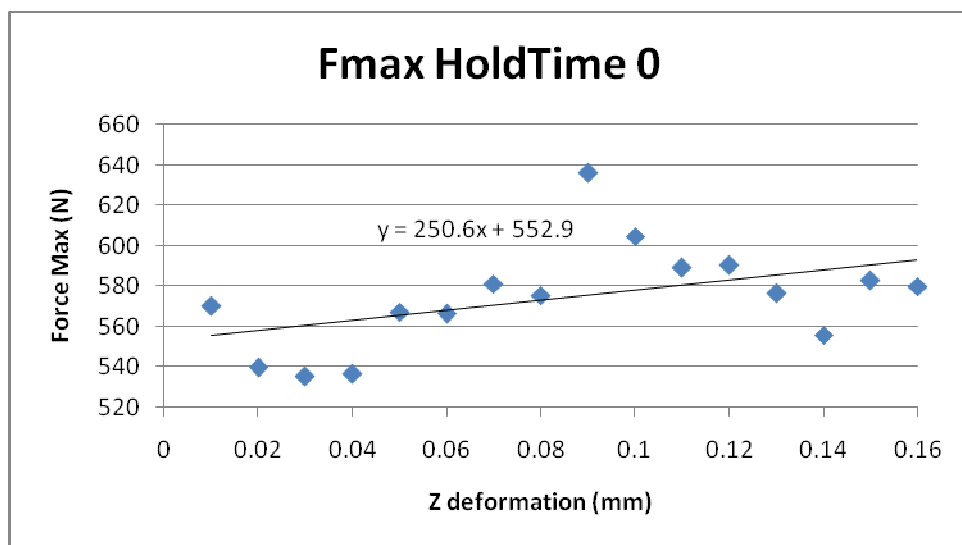
1. จัดตำแหน่งของแกน x และแกน z ให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น (home position) โดยใช้คำสั่ง set home แกน x และแกน z ในโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียระไนพลอย
2. ใส่ทวนติดพลอยแล้วทำการขึ้นรูปพลอยที่มุมยก 45 องศา จำนวน 4 หน้า
3. เมื่อได้พลอยตามรูปทรงที่ต้องการแล้วให้เจียระไนพลอยขัดเงาด้วยอัตราเร็ว 0.08 มม./วินาที โดยกัดพลอยให้แต่ละหน้าพลอยลึก 0.01 0.02 0.03 และ 0.04 มม. ตามลำดับ และแช่พลอยเป็นเวลา 0 วินาที
4. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 และ 3 ไปเรื่อยๆ จนความลึกในการขัดเงาพลอยถึงระยะที่ 0.16 มม.
5. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 3 และ 4 ใหม่แต่ให้เปลี่ยนเวลาแช่พลอยจาก 0 วินาที เป็นแช่พลอย 1 2 และ 3 ตามลำดับ
6. นำค่าแรงกดรวมเฉลี่ยจากการขัดขึ้นเงาที่ทดลองตามขั้นตอนข้างต้นมาพล็อตเปรียบเทียบระหว่างแรงกดกับระยะความลึกในการกัดเพื่อหาค่าคงที่การหยุดตัวรวมของงานขัดเงากับพลอยที่เจียระไน

ผลการทดลอง

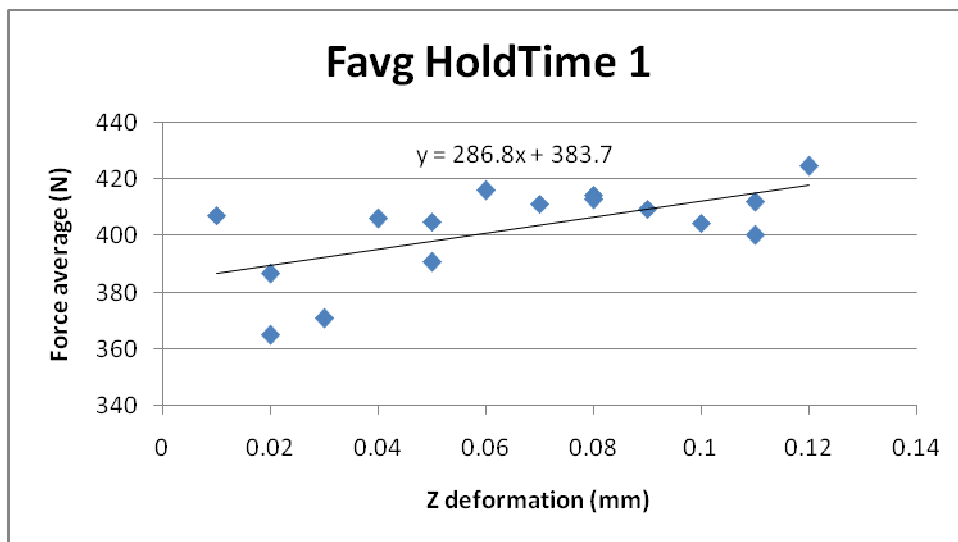
จากการทดลองข้างต้นเมื่อนำค่าของแรงกดเฉลี่ยกับแรงกดสูงสุดมาพล็อตเปรียบเทียบกับระยะการเสีรูปของเม็ดพลอยจะได้ผลตามรูปที่ 6.5 ถึงรูปที่ 6.12 โดยมีแกนตั้งเป็นค่าแรงกดที่มอเตอร์ส่งถ่ายแรงผ่านบอลสกรู และแกนนอนเป็นค่าระยะการเสีรูปของเม็ดพลอย และในแต่ละรูปจะมีเส้นแนวโน้มเป็นตัวบอกค่าคงที่การหยุดตัวในรูปของความชันในหน่วย N/mm นำค่านี้มาแปลงเป็นหน่วย N/m จะเห็นได้ว่าในแต่ละช่วงเวลาของการแช่พลอยค่าคงที่การหยุดตัวเฉลี่ยนี้จะมีค่าน้อยกว่าค่าคงที่การหยุดตัวสูง ดังสรุปตามตารางที่ 6.2 แต่โดยรวมแล้วค่าคงที่การหยุดตัวนี้ไม่ว่าจะแช่พลอยนานเท่าใดต่างมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือมีค่าลำดับขนาด (order of magnitude) ใกล้เคียงกัน คืออยู่ในช่วงลำดับขนาดประมาณ 1.0×10^5 เนื่องจากไม่มีค่าคงที่การหยุดตัวใดมีค่าเกิน 5.0×10^5 ซึ่งเป็นช่วงลำดับขนาดประมาณ 1.0×10^6 แทน



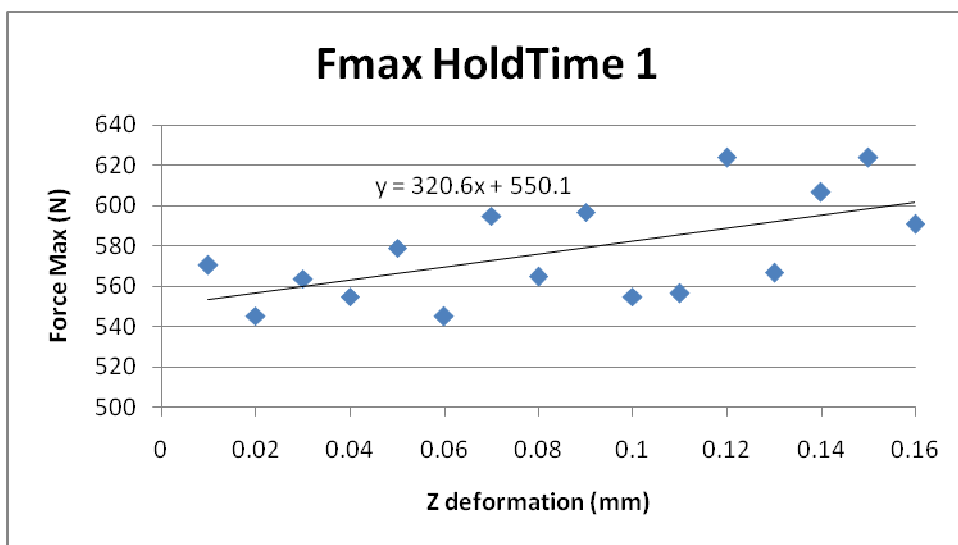
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยกับระยะการเสียรูปของพลอย
ที่ระยะแช่พลอย 0 วินาที



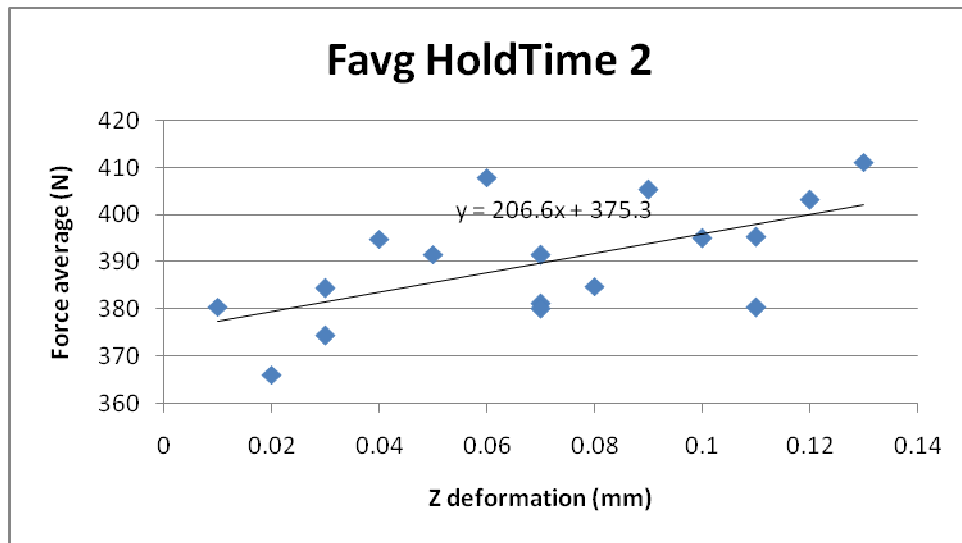
รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับระยะการเสียรูปของพลอย
ที่ระยะแช่พลอย 0 วินาที



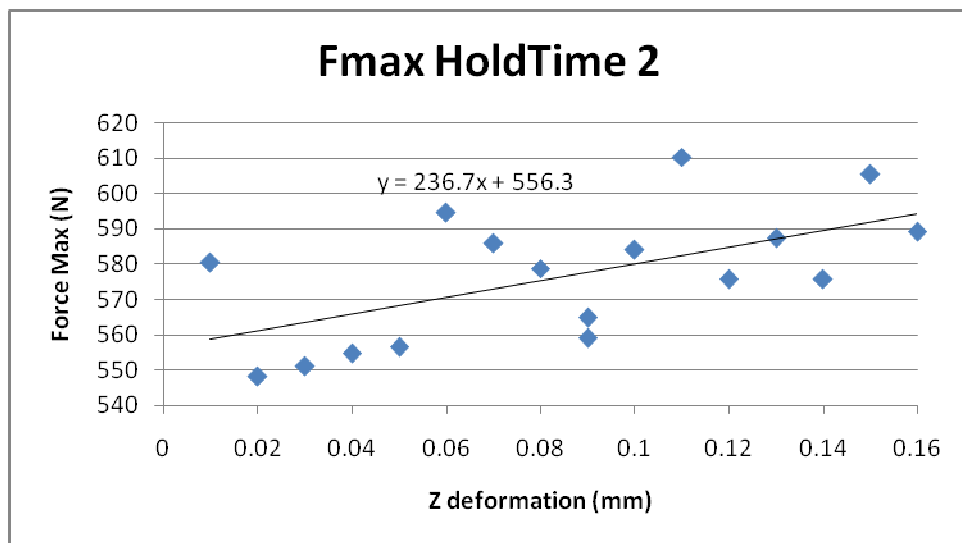
รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยกับระยะการเสียรูปของพลอย
ที่ระยะแช่พลอย 1 วินาที



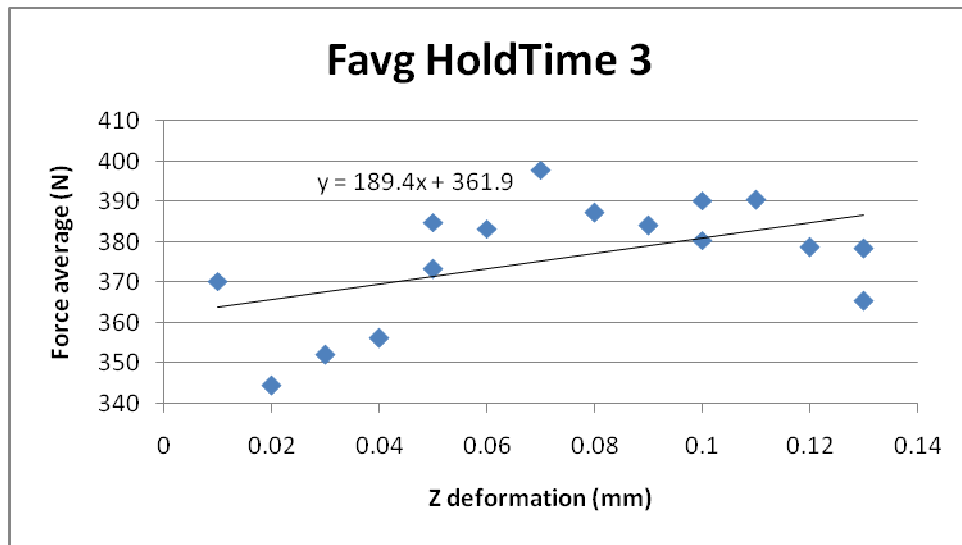
รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับระยะการเสียรูปของพลอย
ที่ระยะแช่พลอย 1 วินาที



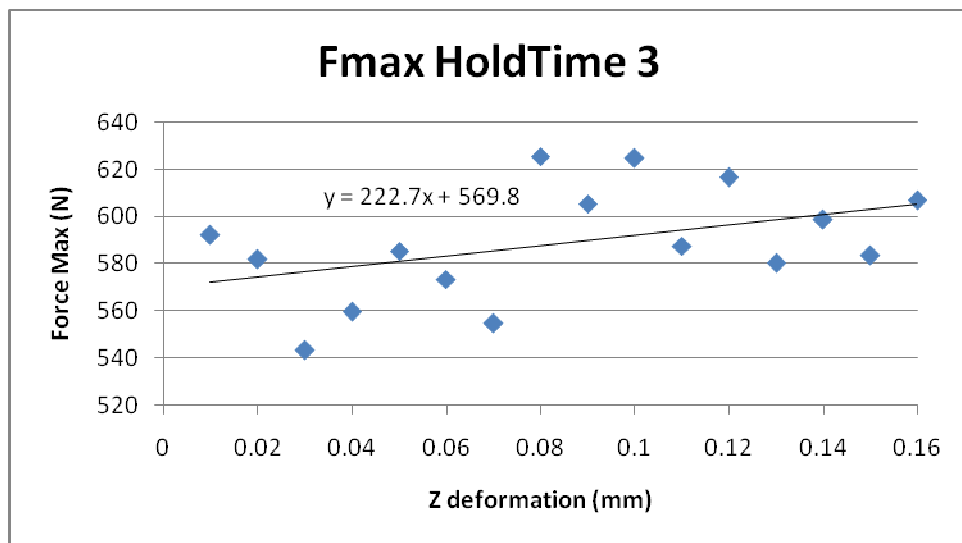
รูปที่ 6.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยกับระยะเวลาเสียรูปของพลอย
ที่ระยะแช่พลอย 2 วินาที



รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดกับระยะเวลาเสียรูปของพลอย
ที่ระยะแช่พลอย 2 วินาที



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยกับระยะการเสียรูปของพลอย
ที่ระยะแช่พลอย 3 วินาที



รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยกับระยะการเสียรูปของพลอย
ที่ระยะแช่พลอย 3 วินาที

ตารางที่ 6.2 ค่าคงที่การหมุนตัวของของการแช่พลอยที่เวลาต่างๆ

ระยะเวลาแช่พลอย (วินาที)	0	1	2	3
ค่าคงที่ความหย่นตัวเฉลี่ย (N/m)	216900	286800	206600	189400
ค่าคงที่ความหย่นตัวสูงสุด (N/m)	250600	320600	236700	222700

สรุปผลการทดลอง

ค่าคงที่การหมุนตัวที่ 1.0×10^5 N/m นี้ เป็นค่าคงที่การหมุนตัวที่อยู่ในค่าลำดับขนาด (order of magnitude) ที่ใกล้เคียงกัน และค่าคงที่การหมุนตัวหรือค่า stiffness ดังกล่าวนี้อาจนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแรงกด จากการวัดค่าระยะการเสียรูป (deformation) ที่ตำแหน่งเจียรระโน โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งเครื่องวัดแรงซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงประกอบกับการบำรุงรักษาค่อนข้างยากไม่เหมาะกับการใช้ในอุตสาหกรรมจริง และค่าแรงที่คำนวณได้จากค่าคงที่ของการหมุนตัวนี้ร่วมกับค่าการเสียรูป (deformation) ในขณะเจียรระโนนี้ สามารถนำไปใช้ในการควบคุมตำแหน่งและแรงแบบ Indirect force control ในการทดลองต่อไปได้ โดยสมมติฐานว่าไม่มีแรงบิด (moment) ที่เกิดจากการเจียรระโนพลอยทำให้เราสามารถใช้ในการควบคุมแบบ Indirect force control ได้โดยไม่ต้องติดตั้งชุดวัดแรง

6.2 การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการขัดชิ้นงานพลอย และทดสอบโปรแกรมการควบคุมแรงทางอ้อม

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการขัดชิ้นงานพลอยเพื่อประโยชน์ในการลดเวลาในการขัดชิ้นงานพลอยของเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติโดยมีการทดลองทั้งหมด 3 การทดลอง

6.2.1 การทดลองหาระยะกดที่เหมาะสมในการขัดชิ้นงานพลอย

ในการทดลองนี้เป็นการหาระยะกดที่เหมาะสมในการกดพลอยสำหรับการขัดชิ้นงานพลอยโดยใช้พลอยที่ผ่านการเจียรระไนขึ้นรูปพลอยที่มุมยก 45 องศา จำนวน 4 หน้า โดยเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ และขัดชิ้นงานพลอยด้วยอัตราเร็วในการกดที่ 0.08 มม./วินาที ด้วยความเร็วในการขัดชิ้นงานที่สูงมากในที่นี้จำนวนขัดชิ้นงานพลอยที่ใช้ทดลองนี้ คือ งานทองแดงซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 3,000 rpm จากนั้นคำนวณแรงกดพลอยด้วยสมการ

$$F_{Gem} = F_{Grinding} - F_N = K \Delta z \quad (6.1)$$

โดยกำหนดให้

F_{Gem}	คือ แรงกดพลอยในการเจียรระไนขัดงานพลอย
$F_{Grinding}$	คือ แรงกดจากบอลสกรูที่มอเตอร์แกน z ส่งผ่านการกดลงมาที่ปลายทวนติดพลอย
F_N	คือ แรงต้านกลับที่ส่งผ่านมายังพลอยในขณะที่เจียรระไนขัดงาน
K	คือ ค่าคงที่การหยุ่นตัวของงานขัดงานกับพลอยที่เจียรระไน (Stiffness of the environment) ในที่นี้คือ 1.0×10^5 N/m
Δz	ระยะความลึกในการกดพลอย

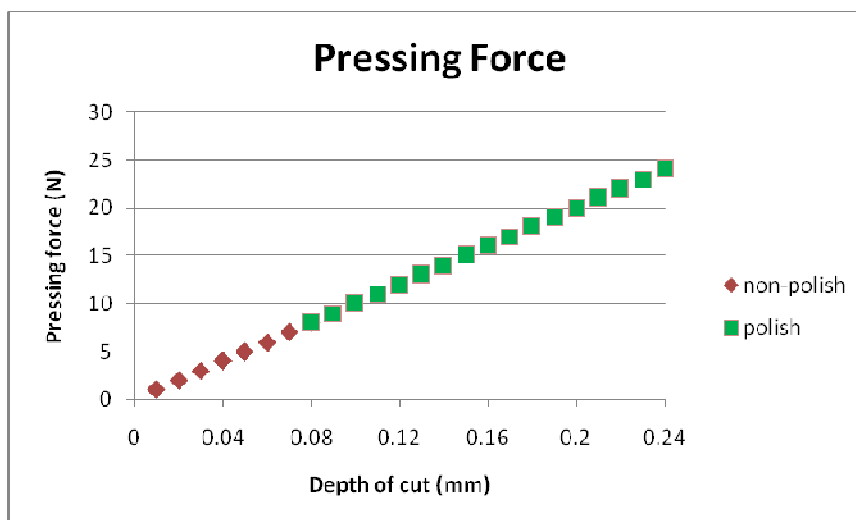
ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดตำแหน่งของแกน x และแกน z ให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น (home position) โดยใช้คำสั่ง set home แกน x และแกน z ในโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียรระไนพลอย
2. ใส่ทวนติดพลอยแล้วทำการขึ้นรูปพลอยที่มุมยก 45 องศา จำนวน 8 หน้า
3. เมื่อได้พลอยตามทรงที่ต้องการแล้วให้เจียรระไนพลอยขัดงาน โดยกดพลอยให้แต่ละหน้าพลอยลึก 0.01 0.02 0.03 จนถึง 0.08 มม. ตามลำดับ และแช่พลอยเป็นเวลา 0 วินาที
4. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 และ 3 ไปเรื่อยๆ จนความลึกในการขัดงานพลอยถึงระยะที่ 0.24 มม.
5. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 3 และ 4 ใหม่แต่ให้เปลี่ยนเวลาแช่พลอยจาก 0 วินาที เป็นแช่พลอย 1 2 และ 3 ตามลำดับ

6. นำค่าแรงกดพลอยจากการขัดชิ้นงานที่ทดลองตามขั้นตอนข้างต้นมาพล็อตเปรียบเทียบระหว่างแรงกดพลอยกับระยะลึกในการกดเพื่อหาค่าความลึกที่เหมาะสมในการขัดชิ้นงานพลอย

ผลการทดลอง

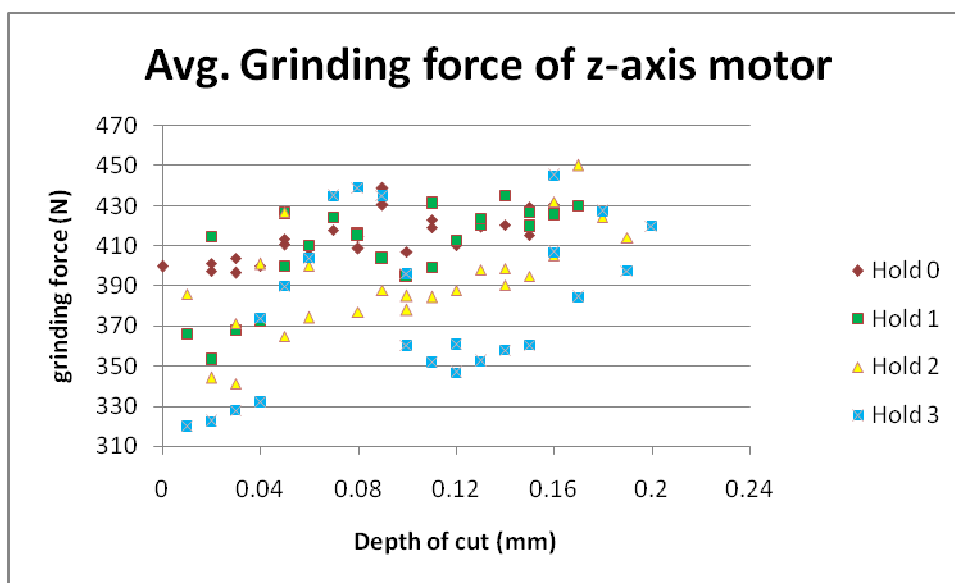
จากการทดลองข้างต้นเมื่อนำค่าของแรงกดพลอยมาพล็อตเปรียบเทียบกับระยะความลึกในการกดของเม็ดพลอยจะได้ผลตามรูปที่ 6.13 พบว่าระยะกดที่ทำให้พลอยเงาต้องกดที่ระยะความลึกตั้งแต่ 0.08 มม. ขึ้นไป และไม่ควรเกินระยะ 0.24 มม. เพราะเป็นระยะที่ทำให้ในขณะที่เจียรระไนขัดเงาพลอยจานทองแดงจะมีกลิ่นไหม้เนื่องจากแรงเสียดสีที่มากเกินไป แม้จะได้พลอยที่เงาแต่เนื่องจากความร้อนของการเสียดสีที่มากเกินไปทำให้เม็ดพลอยที่ขัดเงาจะมีรอยขนแมวหรือรอยแตกเกิดขึ้นตามลักษณะผิวดังรูปที่ 6.14 และเมื่อพล็อตค่าแรงกดเฉลี่ยจากบอลลสกรูกับแรงกดสูงสุดจากบอลลสกรูเปรียบเทียบกับระยะความลึกในการกดที่ระยะแช่พลอยตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาทีจะได้ผลตามรูปที่ 6.15 และ 6.16 และเมื่อนำรูปทั้งสองนี้มาเปรียบเทียบระยะที่พลอยไม่เงากับพลอยที่เงาจะได้ผลตามรูปที่ 6.17 และ 6.18 ทำให้สังเกตได้ว่าความเงาของพลอยนั้นขึ้นกับระยะความลึกในการกดพลอยมากกว่าระยะเวลาในการแช่พลอย



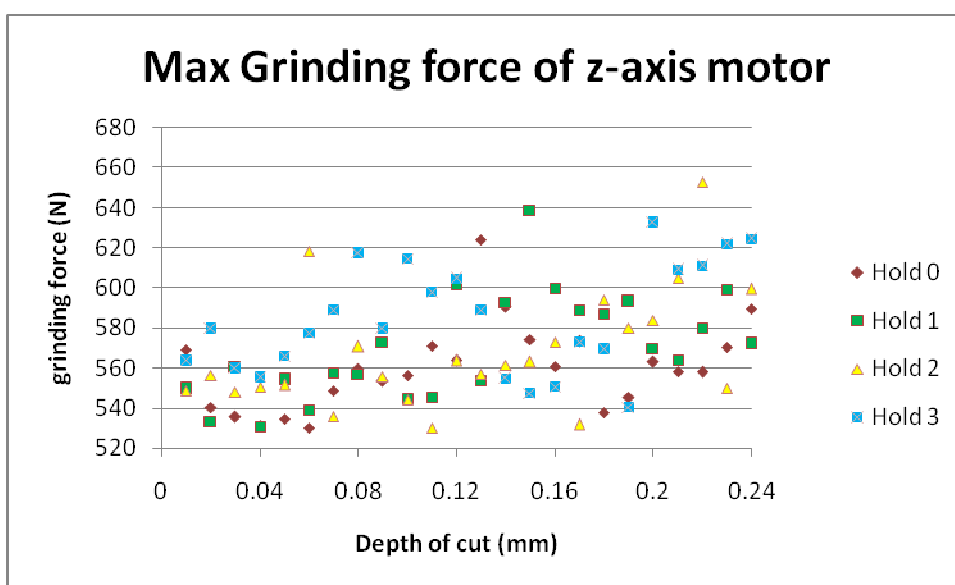
รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยกับระยะลึกในการกดพลอยพร้อมเปรียบเทียบระยะที่พลอยไม่เงากับพลอยที่เงา



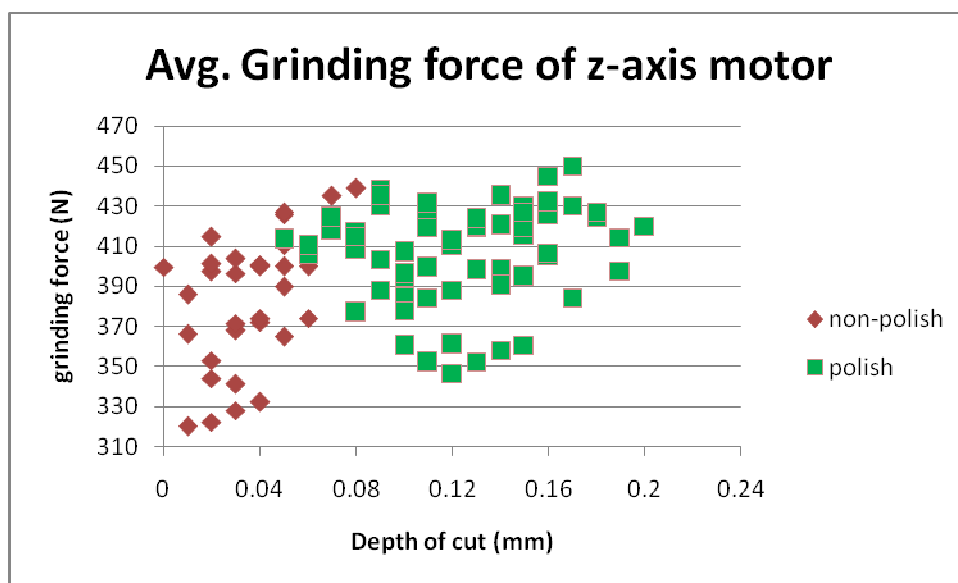
รูปที่ 6.14 ลักษณะผิวของพลอยที่มีรอยแตกหรือขนแมว



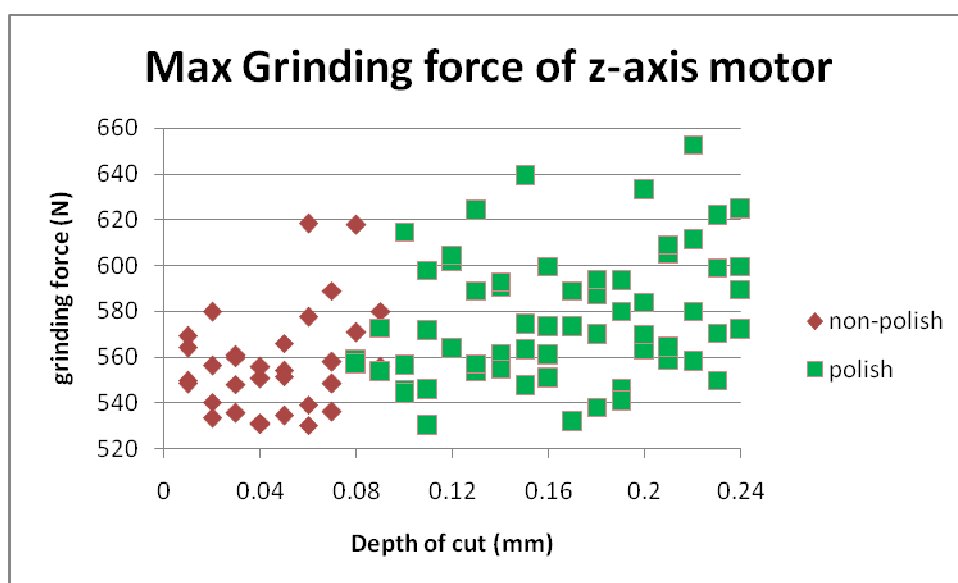
รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยจากบอลสกรูกับระยะลึกในการกดพลอยที่ระยะเวลาแช่พลอยตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาที



รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดจากบอลสกรูกับระยะลึกในการกดพลอยที่ระยะเวลาแช่พลอยตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาที



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเฉลี่ยจากบอลสกรูกับระยะลึกในการกดพลอยที่ระยะเวลาแช่พลอยตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาที พร้อมเปรียบเทียบระยะที่พลอยไม่เงากับพลอยที่เงา



รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดสูงสุดจากบอลสกรูกับระยะลึกในการกดพลอยที่ระยะเวลาแช่พลอยตั้งแต่ 0 ถึง 3 วินาที พร้อมเปรียบเทียบระยะที่พลอยไม่เงากับพลอยที่เงา

สรุปผลการทดลอง

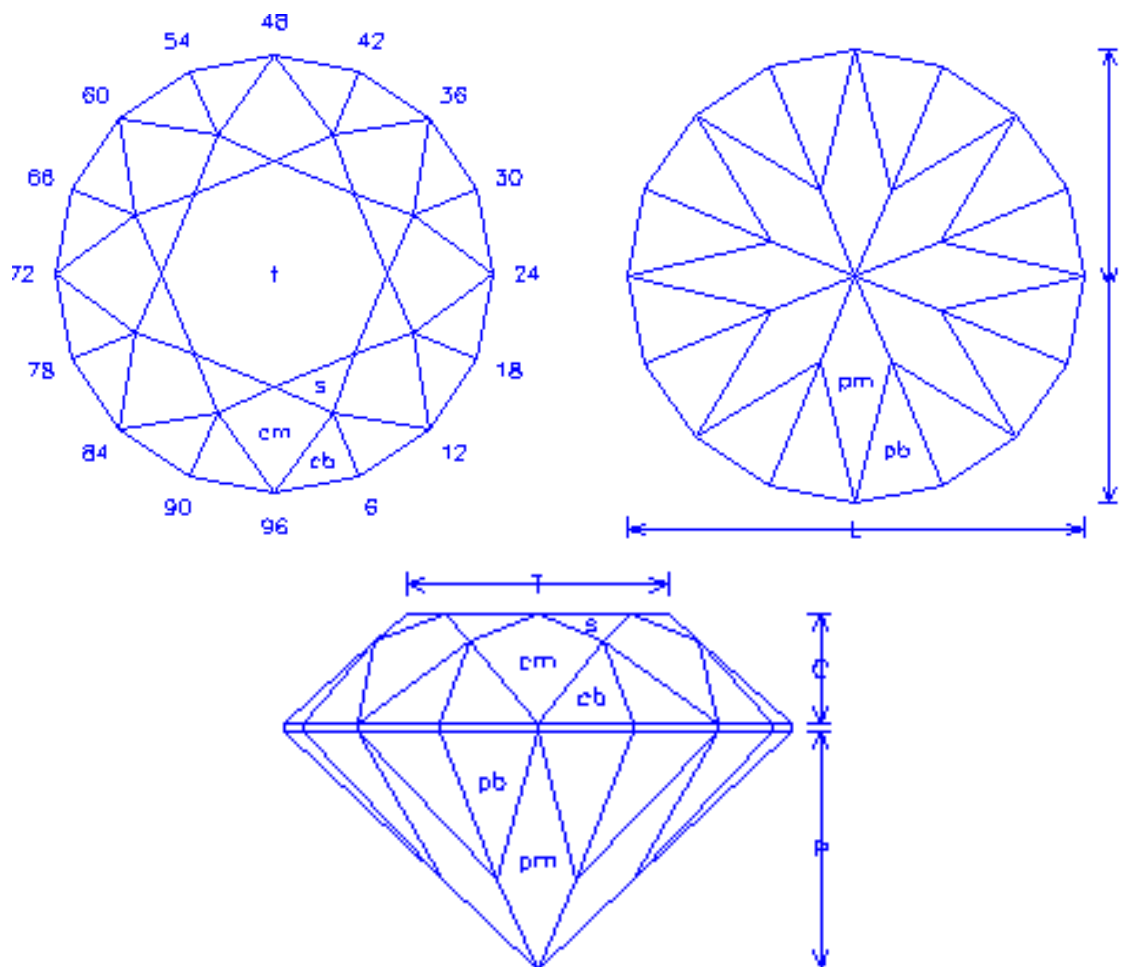
ในการเจียรระโนขัดชิ้นเงาพลอยในที่นี้คืองานทองแดงต้องกดพลอยที่ระยะความลึกตั้งแต่ 0.08 มม. ขึ้นไปแต่ไม่ควรเกิน 0.24 มม. เพราะเนื้อทองแดงจะไหม้ และระยะเวลาในการแช่พลอยถ้าเลือกระยะเวลาแช่พลอยที่ 0 วินาที กับระยะความลึกในการกดที่เหมาะสม ส่งผลให้สามารถลดระยะเวลาในการขัดชิ้นเงาพลอยได้

6.2.2 การทดลองหาค่าแรงกดที่เหมาะสมในการขัดขึ้นเงาพลอย

ในการทดลองนี้เป็นการหาค่าแรงกดที่เหมาะสมในการกดพลอยสำหรับการขัดขึ้นเงาพลอย โดยใช้พลอยที่ผ่านการเจียรระไนขึ้นรูปพลอยตามรูปแบบพลอยมาตรฐานที่ถูกออกแบบโดยโปรแกรม ซียู-โซลิดดังรูปที่ 6.19 โดยมีเหลี่ยมมาตรฐานใกล้เคียงตามแบบ Standard Round Brilliant ดังแสดงได้ดังรูปที่ 6.20 ซึ่งมีรายละเอียดของเหลี่ยมพลอยแสดงได้ดังตารางที่ 6.3



รูปที่ 6.19 เหลี่ยมพลอยและขนาดที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม CU-Solid



รูปที่ 6.20 รูปร่างของพลอยเหลี่ยม Standard Round Brilliant [9]

ตารางที่ 6.3 รายละเอียดของเหลี่ยม Standard Round Brilliant [9]

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

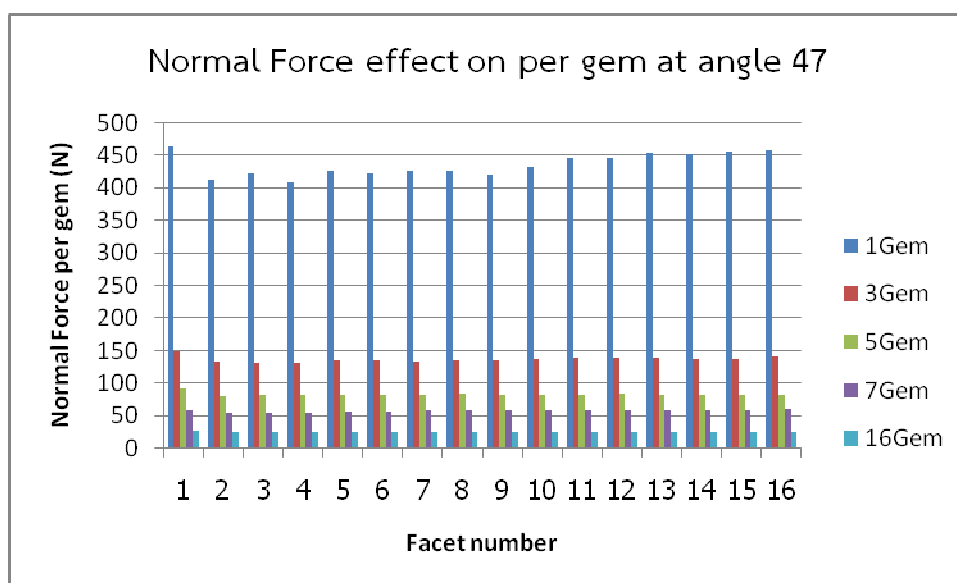
โดยในการทดลองนี้มีพลอยที่ต้องเจียระไนขัดขึ้นเงาทั้งหมด 5 ชุด คือ 1 3 5 7 และ 16 เม็ด ตามลำดับ ด้วยอัตราเร็วในการกดที่ 0.08 มม./วินาที ระยะเวลาในการกดพลอยที่ 0.1 มม. และมีระยะเวลาแช่พลอยที่ 1 วินาที ขัดเงาด้วยจานทองแดงที่มีความเร็วรอบสูงมาก

ขั้นตอนการทดลอง

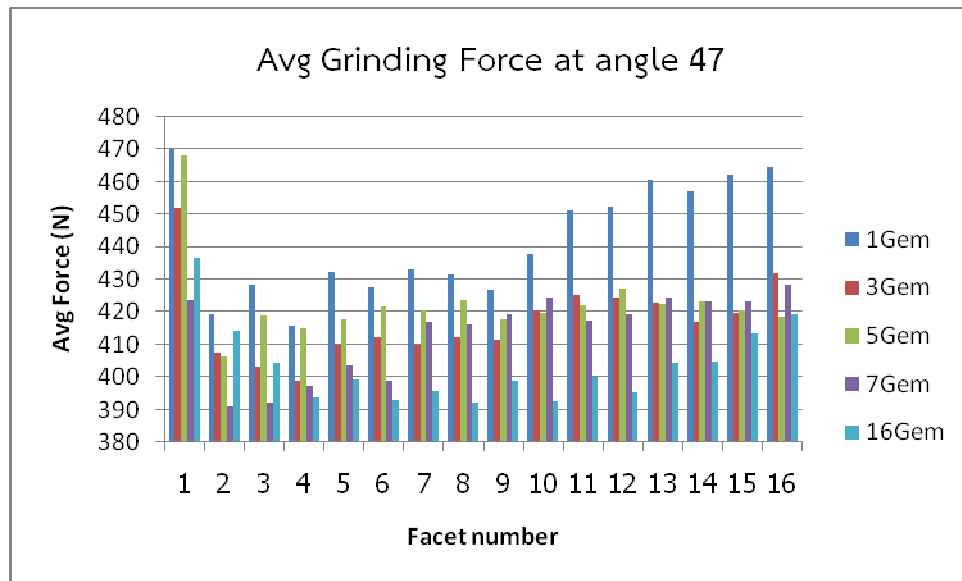
1. จัดตำแหน่งของแกน x และแกน z ให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น (home position) โดยใช้คำสั่ง set home แกน x และแกน z ในโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียระไนพลอย
2. ใส่ทวนติดพลอย 1 เม็ด แล้วทำการขึ้นรูปพลอยที่มุกยตามรูปแบบพลอยมาตรฐาน
3. เมื่อได้พลอยตามทรงที่ต้องการแล้วให้เจียระไนพลอยขัดขึ้นเงา โดยกดพลอยให้แต่ละหน้าพลอยลึก 0.1 มม. และแช่พลอยเป็นระยะเวลา 1 วินาที
4. ทำการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 และ 3 ไปเรื่อยๆ แต่เปลี่ยนจากการขัดขึ้นเงาพลอย 1 เม็ดเป็น 3 5 7 และ 16 เม็ดตามลำดับ
5. นำค่าแรงกดต่างๆที่เกิดจากการขัดขึ้นเงาพลอยที่ทดลองตามขั้นตอนข้างต้นมาพล็อตเป็นกราฟเปรียบเทียบกับกันโดยมีแกนตั้งเป็นแรงกดต่างๆ และแกนนอนเป็นจำนวนหน้าสูงสุดของพลอยที่ทำการเจียระไน ในที่นี้คือ 16 หน้าพลอย เพื่อหาค่าแรงกดที่เหมาะสมในการขัดขึ้นเงาพลอย

ผลการทดลอง

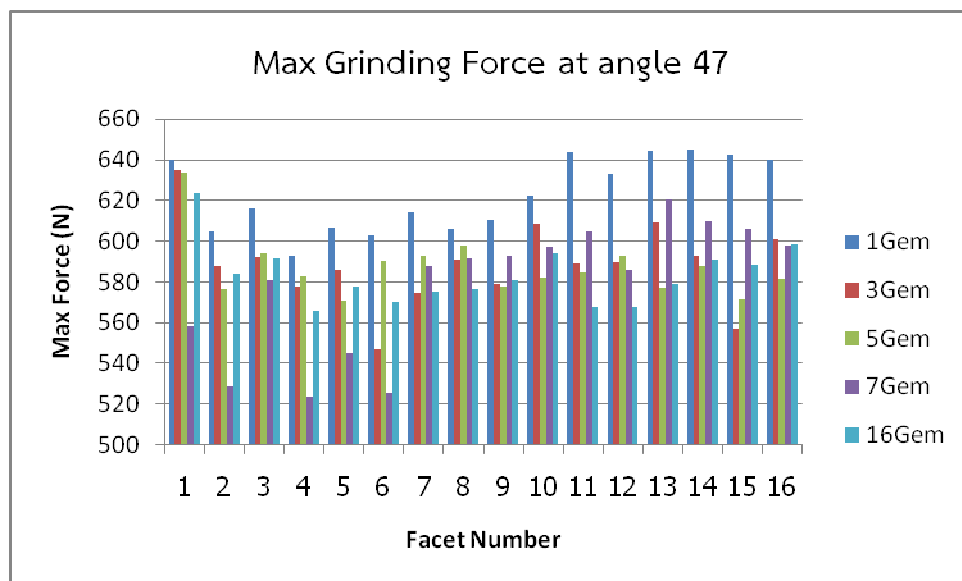
จากการทดลองข้างต้นเมื่อนำค่าของแรงต้านกลับในการกดพลอยต่อเม็ดที่คำนวณจากสมการ (6.1) มาพล็อตเปรียบเทียบกับหน้าพลอยที่มุมยก 47 องศา จะได้ผลตามรูปที่ 6.21 เห็นได้ว่าถ้าเราเจียรระโนพลอยขัดเงาจำนวนครั้งละหลายเม็ดจะยิ่งทำให้พลอยแต่ละเม็ดรับภาระความร้อนจากจานทองแดงน้อยลง และยังช่วยลดภาระในการกดพลอยเฉลี่ยของมอเตอร์แกน z ตามรูปที่ 6.22 เนื่องจากแรงต้านกลับในขณะที่เจียรระโนพลอยขัดเงาคอยช่วยในเรื่องของการทดน้ำหนักของชุดจับทวนพลอยในขณะที่ทำการแช่พลอย แม้ว่าค่าแรงกดสูงสุดของจำนวนพลอยของชุดการทดลองทั้ง 5 ในตอนแรกเริ่มกดจะมีค่าใกล้เคียงกันตามรูปที่ 6.23 จากนั้นเมื่อดูความสัมพันธ์ของแรงกดเฉลี่ยทั้งหมดของทุกชุดการทดลองตามรูปที่ 6.24 - 6.28 เห็นได้ว่าค่าแรงกดในการขัดขึ้นเงาพลอยที่ระยะความลึก 0.1 มม. นี้มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 320 - 520 N ส่วนค่าแรงกดสูงสุดตามรูปที่ 6.29 - 6.33 อยู่ในช่วงประมาณ 490 - 710 N แต่ในการควบคุมแรงกดทางอ้อมจะทำการกำหนดช่วงขอบเขตของแรงกดในการขัดขึ้นเงา ดังนั้นค่าแรงกดเฉลี่ยและค่าแรงกดสูงสุดจึงต้องนำมาเฉลี่ยเพื่อหาค่าขอบเขตของแรงที่ใช้ในการขัดขึ้นเงาตามตารางที่ 8.4 ซึ่งเป็นตารางแสดงค่าแรงกดเฉลี่ยและค่าแรงกดสูงสุดของจำนวนพลอยต่างๆที่ใช้ในการขัดขึ้นเงาที่มีค่าขอบเขตของแรงในการขัดขึ้นเงาขั้นต่ำคือ 434.6 N และขอบเขตสูงสุดในการกดคือ 597.8 N หรือประมาณได้ว่ามีช่วงขอบเขตของการเจียรระโนขัดขึ้นเงาในช่วงประมาณ 435-598 N



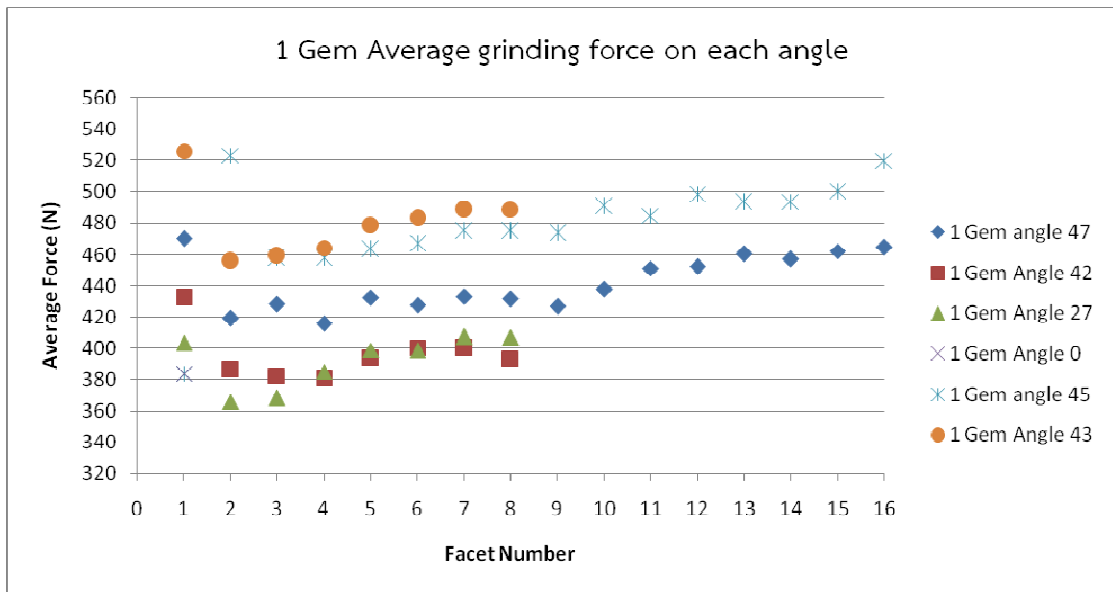
รูปที่ 6.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านกลับในการกดพลอยต่อเม็ดกับหน้าพลอยที่มุมยก 47



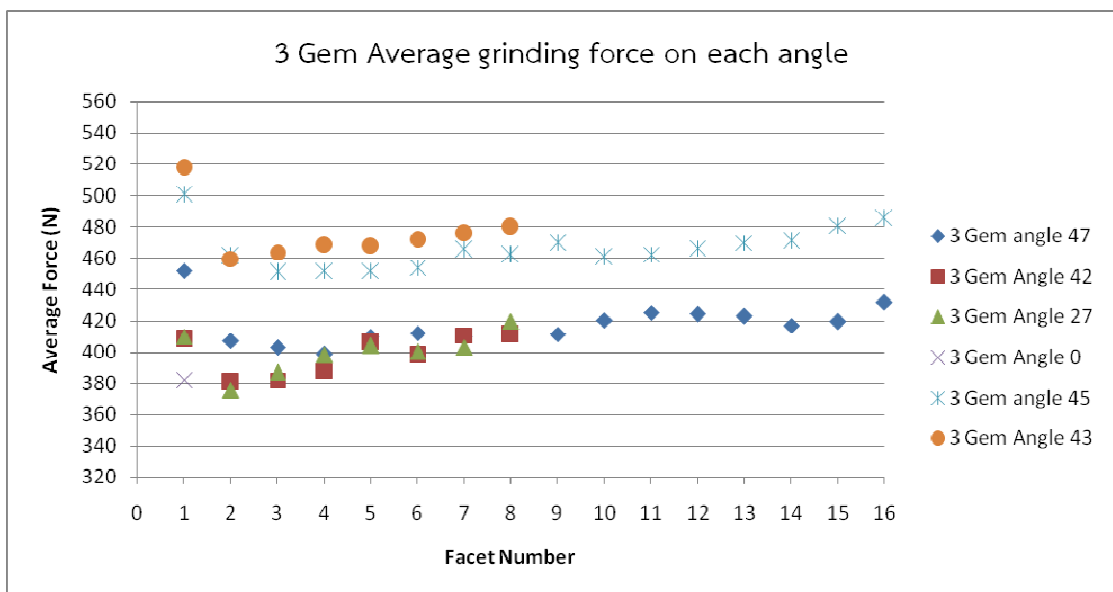
รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยก 47



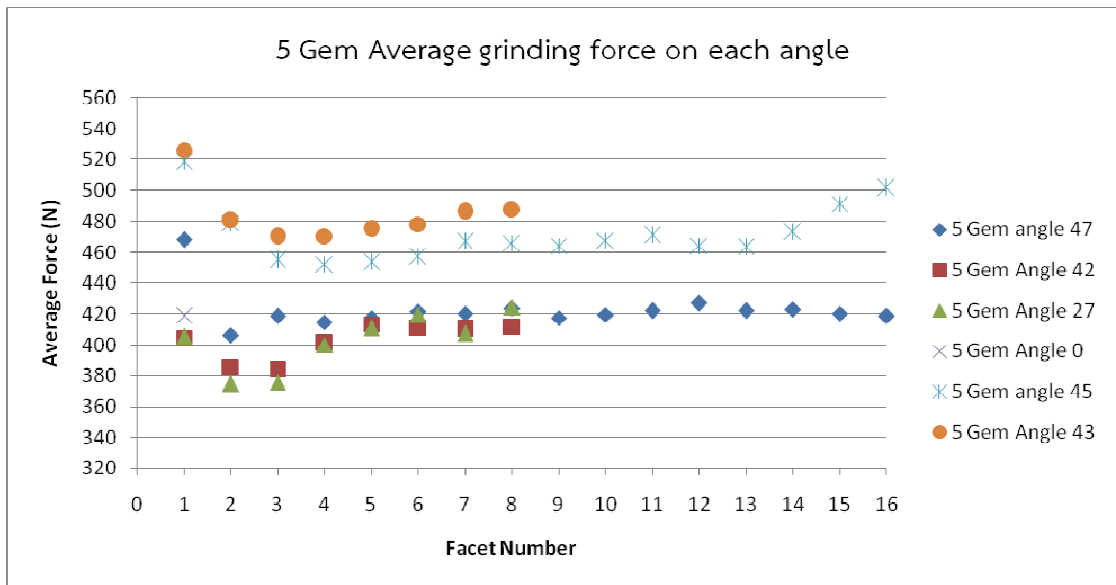
รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับหน้าพลอยที่มุมยก 47



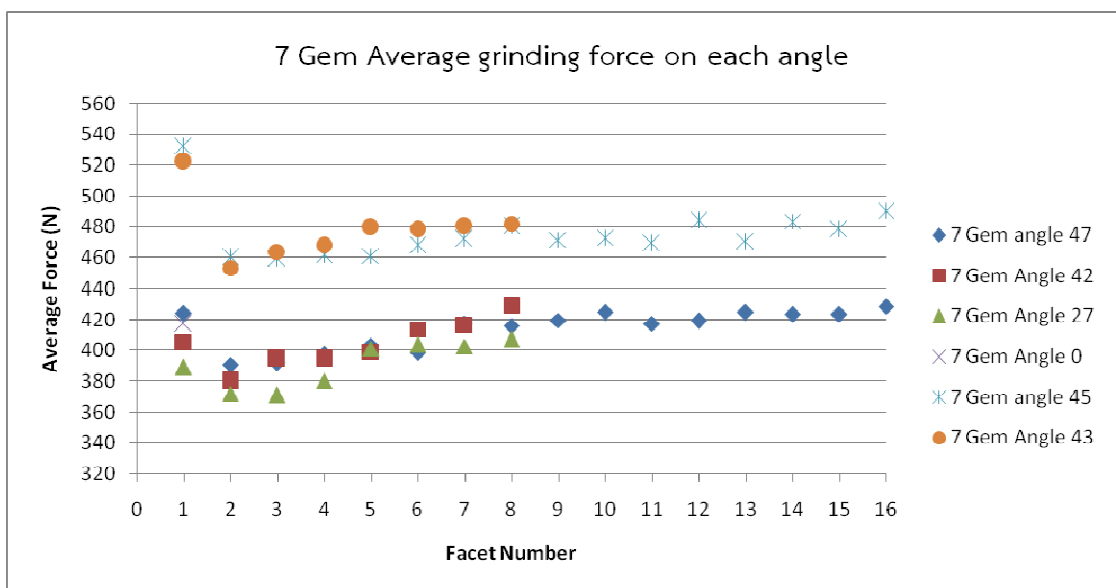
รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 1 เม็ด



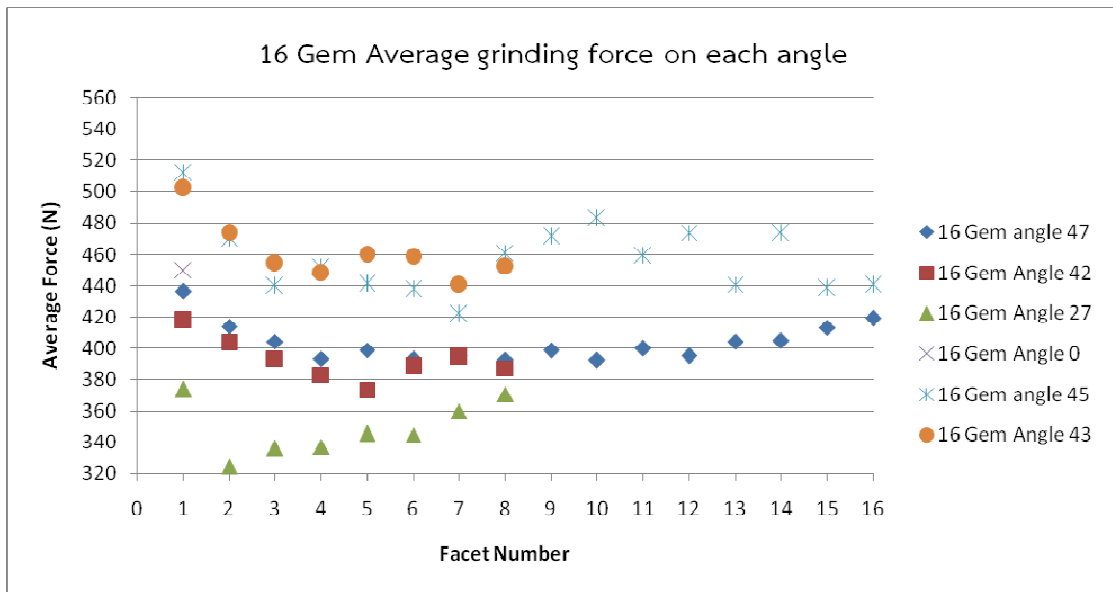
รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 3 เม็ด



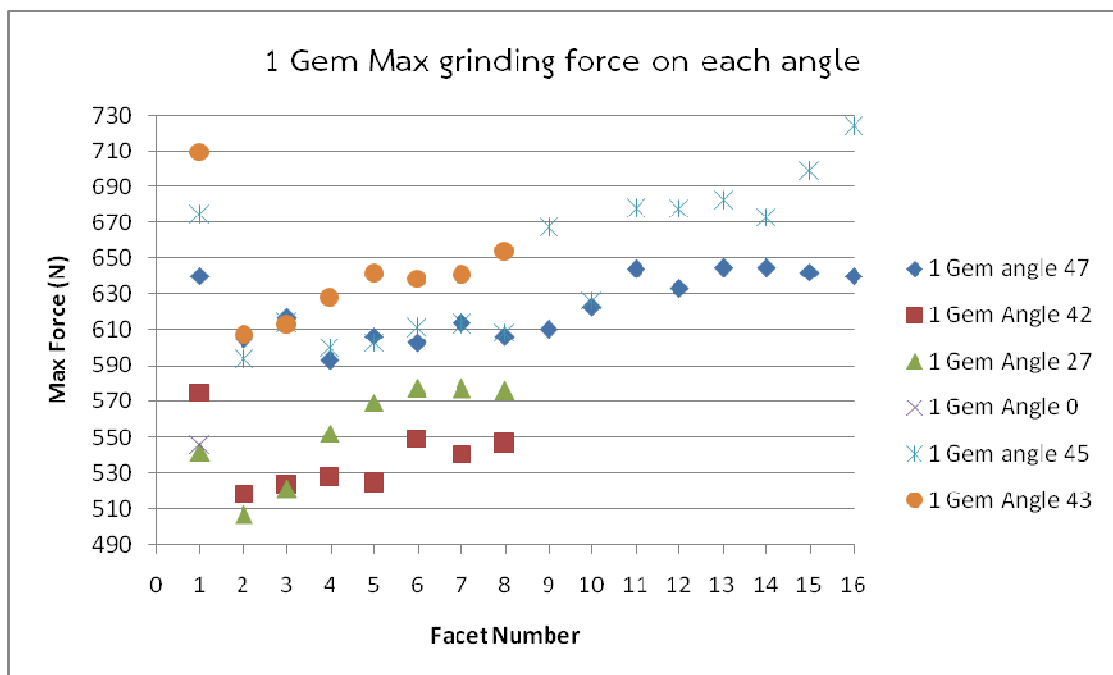
รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 5 เม็ด



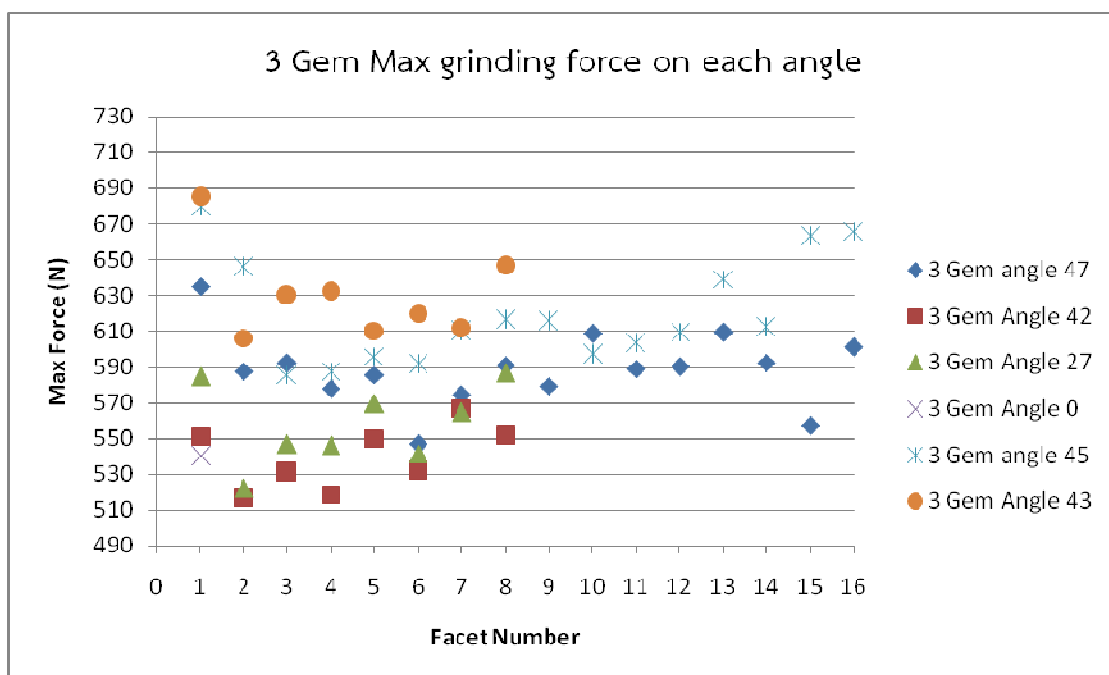
รูปที่ 6.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 7 เม็ด



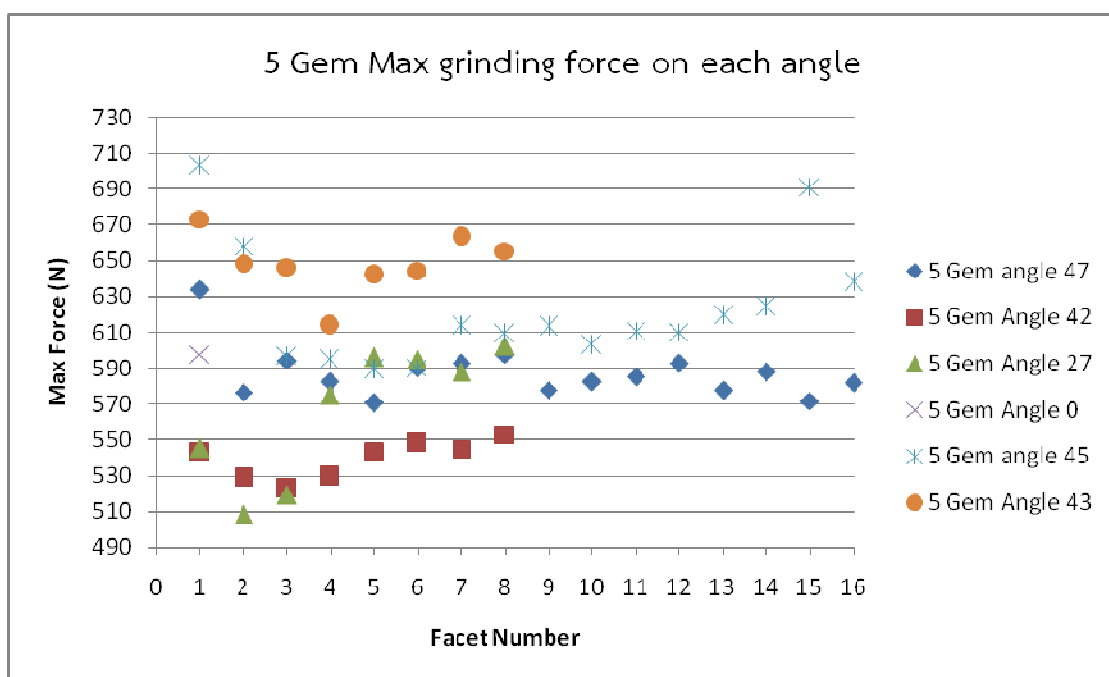
รูปที่ 6.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยเฉลี่ยกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 16 เม็ด



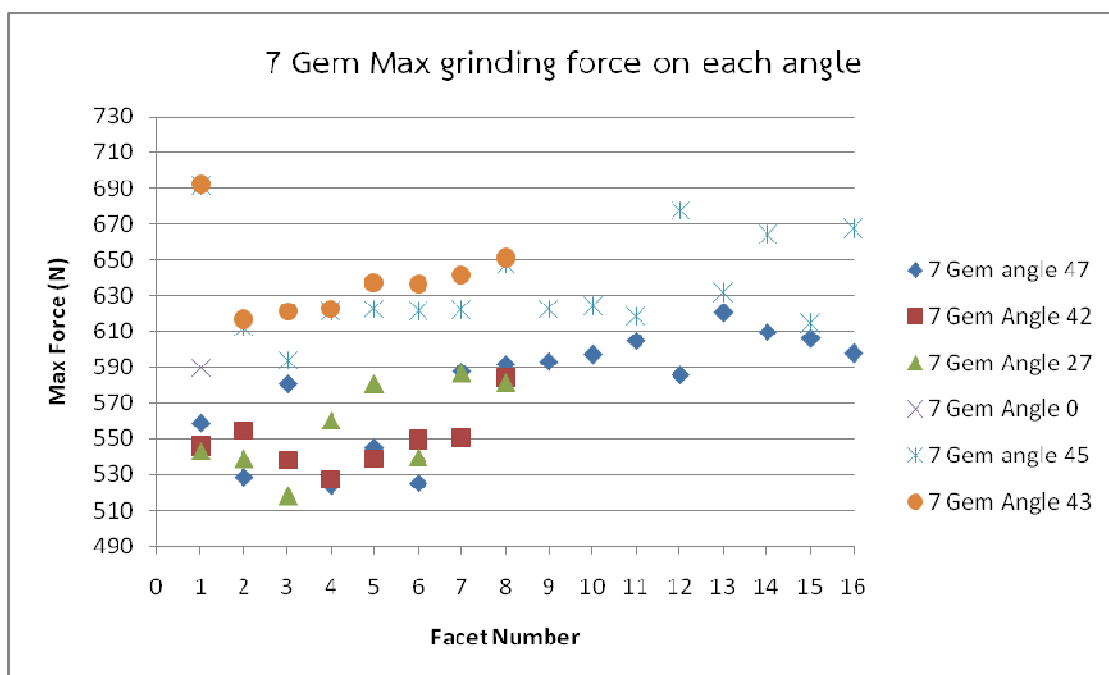
รูปที่ 6.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 1 เม็ด



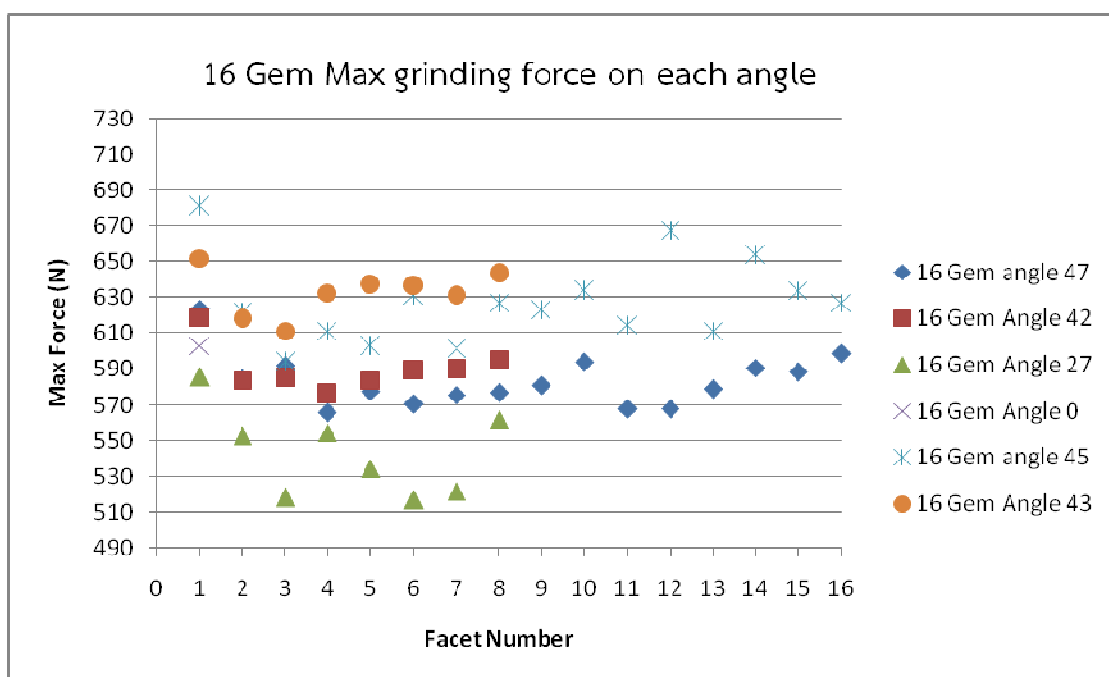
รูปที่ 6.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 3 เม็ด



รูปที่ 6.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 5 เม็ด



รูปที่ 6.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 7 เม็ด



รูปที่ 6.33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดพลอยสูงสุดกับหน้าพลอยที่มุมยกต่างๆ
ของพลอย 16 เม็ด

ตารางที่ 6.4 ค่าแรงกดพลอยเฉลี่ยทั้งหมดของการเจียรระไนขัดเงาพลอยที่จำนวนต่างๆ

จำนวนพลอยที่ขัดเงา	1	3	5	7	16	เฉลี่ยทั้งหมด
แรงกดเฉลี่ย (N)	445.9	433.5	439.3	435.9	418.3	434.6
แรงกดสูงสุดเฉลี่ย (N)	609.0	591.1	594.9	596.3	597.8	597.8

สรุปผลการทดลอง

ดังนั้นช่วงขอบเขตของแรงกดในการเจียรระไนขัดขึ้นเงาพลอยจะอยู่ที่ประมาณ 435 N ถึง 598 N โดยช่วงขอบเขตนี้เป็นช่วงขอบเขตของแรงกดเฉลี่ยของทุกมุมยกที่ทำให้พลอยเงาในระยะลึกของการกดที่ 0.1 มม. ระยะแช่พลอยที่ 1 วินาที

6.2.3 การทดสอบโปรแกรมการควบคุมแรงกดทางอ้อมในการขัดขึ้นเงาพลอย

ในการทดลองนี้เป็นการทดสอบโปรแกรมควบคุมแรงกดทางอ้อมโดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากการทดลองที่ผ่านมาคือ ค่าคงที่การหย่อนตัวของจานขัดเงา 1.0×10^5 N/m และค่าขอบเขตของแรงกดขั้นต่ำกับค่าขอบเขตสูงสุดในการกดคือ 435 N ถึง 598 N โดยค่าแรงกดขั้นต่ำ 435 N นี้เป็นค่าที่คอยควบคุมการทำงานของโปรแกรมการควบคุมแรงกดทางอ้อมโดยเมื่อวัดแรงในขณะเริ่มกดได้น้อยกว่าค่าขอบเขตนี้โปรแกรมจะเริ่มทำงานไปจนกว่าจะสามารถควบคุมแรงกดให้มีค่ามากกว่า 435 N หรือถ้าในขณะที่ยกสามารถวัดแรงได้เกินค่าขอบเขตสูงสุดในการกด โปรแกรมก็จะหยุดการควบคุมแรงกดทางอ้อมเช่นกัน และเพื่อไม่ให้พลอยมีการเสียหายเนื่องจากการขัดเงาในการทดลองนี้ได้กำหนดขอบเขตค่าความลึกในการกดเพิ่มไว้ที่ 0.06 มม.

ขั้นตอนการทดลอง

1. จัดตำแหน่งของแกน x และแกน z ให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น (home position) โดยใช้คำสั่ง set home แกน x และแกน z ในโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียรไนพลอย
2. ใส่ทวนติดพลอย 16 เม็ด แล้วทำการขึ้นรูปพลอยที่มุมยกตามรูปแบบพลอยมาตรฐาน
3. เมื่อได้พลอยตามรูปทรงที่ต้องการแล้วให้กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการเจียรไนพลอยขัดขึ้นเงา โดยกำหนดขอบเขตของแรงกดให้อยู่ในช่วง 435 N ถึง 598 N พร้อมกำหนดค่าคงที่การหย่อนตัวของจานขัดขึ้นเงา 1.0×10^5 N/m และค่าความลึกในการกดเพิ่มไว้ที่ 0.06 มม.
4. เจียรไนพลอยขัดขึ้นเงาโดยกดพลอยให้แต่ละหน้าพลอยลึก 0.1 มม. ด้วยอัตราเร็วในการกดที่ 0.08 มม./วินาที และแช่พลอยเป็นระยะเวลา 1 วินาที
5. เมื่อเจียรไนพลอยขัดขึ้นเงาพลอยทั้งเม็ดเสร็จแล้วให้นำผลที่ได้จากการทดลองมาใส่ตารางเพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโปรแกรมการควบคุมแรงกดและตำแหน่งทางอ้อม

ผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นเมื่อนำค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองมาทำเป็นตารางได้ผลดังตารางที่ 6.5 ซึ่งเป็นตารางแสดงค่าของช่วงเวลาในการกด เวลาในการเจียรไนขัดเงาทั้งหมด และค่าระยะกดเพิ่มจากความลึกในการขัดเงาที่ 0.1 มม. พร้อมแสดงสถานะของการเปิดปิดโปรแกรมการควบคุมแรงกดทางอ้อมในแต่ละหน้าของพลอยด้าน crown และตารางที่ 6.6 เป็นของพลอยด้าน pavilion เห็นได้ว่ามีมุมยก 47 42 และ 27 องศา เท่านั้นที่มีการเปิดการทำงานของโปรแกรมการควบคุมแรง และสังเกตได้ว่าที่มุมยก 27 นั้นเป็นมุมยกที่มีระยะการกดเพิ่มมากที่สุดเนื่องจากมีค่าแรงกดแรกเริ่มที่ต่ำกว่าค่าเฉลี่ย 435 N อยู่มาก ส่วนมุมยกที่ 47 และ 42 องศา มีค่าใกล้เคียงกับค่า 435 N ทำให้มีบางหน้าของพลอยไม่มีการเปิดโปรแกรมการควบคุมแรงกดและตำแหน่ง ส่วนมุมยกอื่นๆ คือ 0 องศา ด้าน crown และ 45 กับ 43 องศาของด้าน pavilion นั้นไม่จำเป็นต้องเปิดโปรแกรมการควบคุมแรงและตำแหน่งเนื่องจากมีค่าแรงกดอยู่ในช่วงขอบระหว่าง 435 N ถึง 598 N

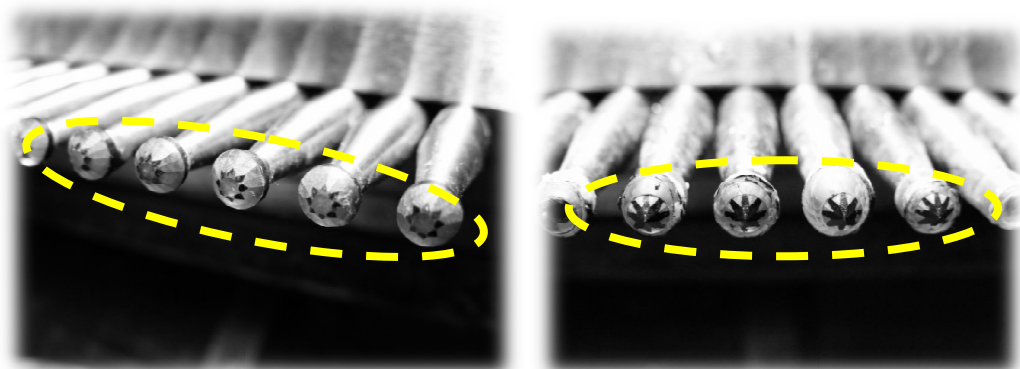
ตารางที่ 6.5 รายละเอียดของระยะกวดเพิ่มเฉลี่ยและระยะกวดเพิ่มสูงสุดที่ได้จากการทดลองการเจียรไนพลอยขัดขึ้นเงาพลอยในด้าน Crown ของเหลี่ยมพลอยแบบ Standard Round Brilliant

มุมยก	ระยะเวลาแช่พลอย	ช่วงเวลาในการกวด	เวลาทั้งหมดในการทำงาน	ระยะกวดเพิ่มเฉลี่ย	ระยะกวดเพิ่มสูงสุด	สถานะ
องศา	วินาที	วินาที	วินาที	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร	การเปิดปิด
47	1	5.26	40.81	0.00	0.00	ปิด
47	1	5.25	49.38	0.03	0.04	เปิด
47	1	5.25	57.95	0.03	0.04	เปิด
47	1	5.24	65.67	0.02	0.03	เปิด
47	1	5.24	73.39	0.03	0.04	เปิด
47	1	5.25	82.01	0.02	0.03	เปิด
47	1	5.24	89.73	0.02	0.03	เปิด
47	1	5.24	98.00	0.03	0.04	เปิด
47	1	5.25	106.70	0.03	0.04	เปิด
47	1	5.24	114.42	0.03	0.04	เปิด
47	1	5.24	122.14	0.02	0.03	เปิด
47	1	5.25	130.70	0.02	0.03	เปิด
47	1	5.24	138.42	0.02	0.03	เปิด
47	1	5.24	146.14	0.03	0.04	เปิด
47	1	5.24	153.86	0.02	0.03	เปิด
47	1	5.24	161.58	0.02	0.03	เปิด
42	1	9.51	183.23	0.00	0.00	ปิด
42	1	5.49	192.29	0.00	0.00	ปิด
42	1	5.47	200.34	0.02	0.03	เปิด
42	1	5.48	208.92	0.03	0.04	เปิด
42	1	5.49	217.94	0.03	0.04	เปิด
42	1	5.47	225.99	0.03	0.04	เปิด
42	1	5.49	234.81	0.03	0.04	เปิด
42	1	5.49	243.79	0.02	0.03	เปิด
27	1	8.86	266.71	0.05	0.06	เปิด
27	1	5.77	275.93	0.05	0.06	เปิด
27	1	5.77	285.24	0.06	0.06	เปิด
27	1	5.75	293.68	0.06	0.06	เปิด
27	1	5.76	302.67	0.05	0.06	เปิด
27	1	5.77	312.13	0.06	0.06	เปิด
27	1	5.77	321.51	0.05	0.06	เปิด
27	1	5.77	330.94	0.06	0.06	เปิด
0	1	8.97	352.57	0.00	0.00	ปิด
		รวมเวลาทั้งหมด	373.98	เท่ากับ	6 นาที	13.98 วินาที

ตารางที่ 6.6 รายละเอียดของระยะกตเพิ่มเฉลี่ยและระยะกตเพิ่มสูงสุดที่ได้จากการทดลองการเจียรไนพลอยขัดขึ้นเงาพลอยในด้าน Pavilion ของเหลี่ยมพลอยแบบ Standard Round Brilliant

มุมยก	ระยะเวลาแช่พลอย	ช่วงเวลาในการกต	เวลาทั้งหมดในการทำงาน	ระยะกตเพิ่มเฉลี่ย	ระยะกตเพิ่มสูงสุด	สถานะ
องศา	วินาที	วินาที	วินาที	มิลลิเมตร	มิลลิเมตร	การเปิดปิด
45	1	4.24	29.23	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.24	36.99	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.25	45.65	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.18	53.34	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.18	61.04	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.32	69.87	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.10	77.49	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.13	85.13	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.15	93.42	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.16	101.10	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.09	108.70	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.14	117.06	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.11	124.69	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.31	132.52	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.32	140.35	0.00	0.00	ปิด
45	1	4.30	148.16	0.00	0.00	ปิด
43	1	2.44	164.56	0.00	0.00	ปิด
43	1	3.10	171.33	0.00	0.00	ปิด
43	1	3.11	177.24	0.00	0.00	ปิด
43	1	3.11	183.56	0.00	0.00	ปิด
43	1	3.11	190.39	0.00	0.00	ปิด
43	1	3.10	196.29	0.00	0.00	ปิด
43	1	3.11	202.84	0.00	0.00	ปิด
43	1	3.10	209.64	0.00	0.00	ปิด
		รวมเวลาทั้งหมด	232.28	เท่ากับ	3 นาที	52.28 วินาที

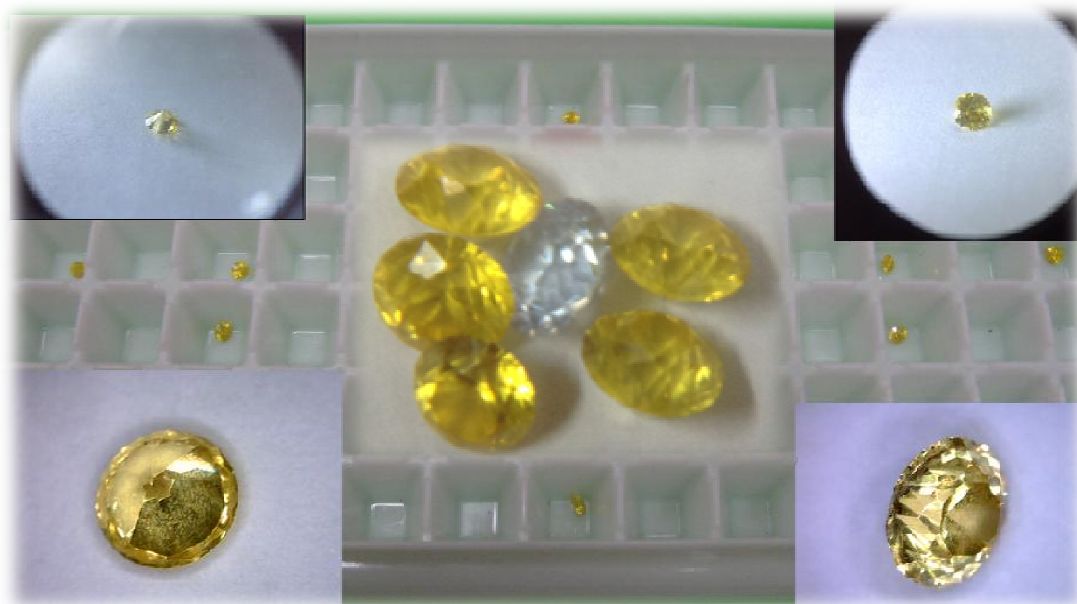
และจากตารางทั้งสองข้างต้นเมื่อนำค่าระยะกตเพิ่มเฉลี่ยและระยะกตเพิ่มสูงสุดทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยจะได้ว่าระยะกตเพิ่มเฉลี่ย คือ 0.02 มม. และระยะกตเพิ่มสูงสุดคือ 0.02 มม. เห็นได้ว่าระยะการกตเพิ่มเท่านี้ไม่ส่งผลให้พลอยมีการเสียมเหลี่ยมพลอยมากนักเมื่อมองด้วยตาเปล่าจากการแต้มนสีไว้ที่เหลี่ยมของพลอยก่อนการเจียรไนขัดขึ้นเงา ดังแสดงในรูปที่ 6.34 และเมื่อเจียรไนพลอยขัดเงาทั้งเม็ดเสร็จแล้วจะได้ผลดังแสดงในรูปที่ 6.35



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 6.34 เหลี่ยมพลอย Standard Round Brilliant ที่เกิดขึ้นเมื่อเจียรระไน
(ก.) ด้านบนของพลอย (Crown Side) (ข.) ด้านล่างของพลอย (Pavilion Side)



รูปที่ 6.35 พลอยเหลี่ยม Standard Round Brilliant ที่ได้จากการทดลอง

บทที่ 7

บทสรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลสรุปของงานวิจัยฉบับนี้โดยรวม ปัญหาและอุปสรรคในการทำงาน และสุดท้ายจะได้กล่าวถึงแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคต

7.1 บทสรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องการออกแบบระบบควบคุมแรงสำหรับเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ มีเป้าหมายในการลดต้นทุนของชุดอุปกรณ์การวัดแรงหรือการติดตั้ง force sensor เข้าไปในระบบการรับรู้ความรู้สึกของแรงในขณะเจียระไน โดยการพัฒนาวิธีการหรือเทคนิคเพื่อเพิ่มการรับรู้แรงจากสภาพแวดล้อมเข้าไปในระบบควบคุมของเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติจากเดิม และให้ผู้ใช้งานสามารถสั่งงานและควบคุมแรงทางอ้อมผ่านทางโปรแกรมเจียระไนพลอยที่สร้างขึ้นมาได้สะดวก และใช้งานได้ง่าย

ซึ่งผลสรุปที่ได้จากการทำงานวิจัยชิ้นนี้พบว่าสำหรับพลอยคิวบิก เซอร์โคเนีย (Cubic Zirconia) หรือพลอยสังเคราะห์ชนิดนี้มีช่วงแรงกดที่เหมาะสมอยู่ในช่วงระหว่าง 435 N ถึง 598 N ของระยะความลึกในการขีดขึ้นเงา 0.1 มิลลิเมตร ที่ระยะแช่พลอย 1 วินาที ด้วยอัตราเร็วในการกด 0.08 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยช่วงแรงกดดังกล่าวเป็นช่วงของแรงกดที่เหมาะสมกับค่าคงที่การยุบตัวรวมระหว่างหน้าพลอยชนิดนี้กับงานทองแดงที่มีค่าลำดับขนาดที่ 1.0×10^5 N/m ทำให้สามารถนำค่าพารามิเตอร์และค่าคงที่การยุบตัวนี้มาประมาณเป็นค่าแรงกดทางอ้อม ทำให้ในแง่ของการลดต้นทุนของชุดอุปกรณ์ควบคุม สามารถลดค่าใช้จ่ายลงไปได้มากจากเดิม เนื่องจากหากติดตั้ง force sensor ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง อาจจำเป็นต้องติดตั้งที่หัวตัดพลอยทุกด้านก็เป็นได้ทำให้ราคาต้นทุนต่อเครื่องเพิ่มขึ้นสูงมากและยากต่อการบำรุงรักษา และในส่วนของโปรแกรมควบคุมแรงทางอ้อมสามารถใช้งานได้สะดวกมากขึ้น เนื่องจากถูกออกแบบมาใช้งานร่วมกับเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติโดยเฉพาะ ทั้งนี้ถึงแม้ว่าจากผลการทดลองพบว่ากราฟของแรงที่วัดได้จะยากต่อการคำนวณให้แม่นยำเนื่องจากกระแสไฟที่จ่ายมีการขึ้นและลงอยู่เสมอ แต่เชื่อว่าเป็นผลมาจากปัจจัยภายนอก เช่น ระบบการจ่ายไฟ แรงเสียดทานในระบบ และการสั่นสะเทือนขณะที่เครื่องทำงาน เป็นต้น แต่ค่าแรงดังกล่าวก็ยังสามารถนำมาประมาณเป็นช่วงของการทำงานข้างต้นได้ อย่างไรก็ตามในการทำทดลอง การวัดค่าความเงายังใช้การสังเกตด้วยสายตาเป็นหลัก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการตรวจสอบความเงาของพลอยจำเป็นต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางในการตรวจวัดโดยละเอียดซึ่งทางห้องปฏิบัติการไม่มีอุปกรณ์ชนิดนี้ จึงไม่สามารถทำการตรวจสอบได้อย่างละเอียด

จากการพัฒนาระบบควบคุมแรงสำหรับเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติในงานวิจัยนี้ ทำให้การพัฒนาเครื่องเจียระไนพลอยอัตโนมัติในประเทศไทย พัฒนาขึ้นไปอีกระดับหนึ่ง ซึ่งหากมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการขีดขึ้นเงา ความเร็วในการกด และระยะความลึกในการกดของพลอยแต่ละชนิดต่อไป คาดว่าในอนาคตจะสามารถนำเครื่องเจียระไนพลอยที่พัฒนาขึ้นนี้ไปใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมอัญมณีของประเทศไทย

7.2 ปัญหาและอุปสรรคในการทำงานวิจัย

ปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างทำงานวิจัยสามารถสรุปได้เป็นข้อๆดังนี้

1. การตั้งระดับของเครื่องเจียรระไนพลอยเมื่อต้องการความแม่นยำของการเจียรระไนพลอยทั้ง 16 เม็ด ทำได้ยากมาก เนื่องจากชิ้นส่วนที่ทำขึ้นมาต้องมีขนาดที่คลาดเคลื่อนไปจากที่ออกแบบไว้น้อยมากๆ เช่น แกนหมุนของมูมยอกกับปลายทวนติดพลอยตามแบบแล้วต้องตรงกันเป็นแนวเดียวกัน แต่ในความเป็นจริงแล้วเป็นไปได้ทำให้ในขณะที่เจียรระไนมูมยอกต่างๆ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย อีกทั้งงานเจียรระไนขัดเงาในขณะที่มูมยอกก็มีการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง เนื่องจากผงเพชรที่อัดบนจานกับกระนาบของแกนหมุนไม่ได้ระดับ ส่งผลให้การควบคุมคุณภาพของพลอยทั้ง 16 เม็ดทำได้ยาก
2. ความสกปรกของเครื่องเจียรระไนพลอย เนื่องจากการเจียรระไนพลอยมีระบบการใช้น้ำหล่อเย็นช่วยในการลดความร้อนของพลอย ทำให้เกิดคราบน้ำและคราบสนิมที่เครื่องรวมทั้งน้ำมันขัดเงาที่ฟุ้งกระจายในขณะที่ทำการขัดเงาเพราะไม่สามารถเกาะบนผิวได้เนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนสูง ซึ่งต้องแก้ไขต่อไป
3. กาวที่ใช้สำหรับติดพลอยใช้เวลาในการอบค่อนข้างนาน ทำให้เวลาที่ใช้ในกระบวนการเจียรระไนมากตามไปด้วย นอกจากนี้หากเจียรระไนพลอยด้วยความเร็วมากเกินไป ทำให้พลอยอาจหลุดจากทวนติดพลอยได้ เนื่องจากแรงยึดของกาวไม่พอ ดังนั้นในการเจียรระไนต้องใช้ความเร็วในการเจียรระไนให้เหมาะสมด้วย ซึ่ง ณ ตอนนั้นไม่สามารถทำได้เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์แบบเฟสเดียวทำให้ไม่สามารถปรับรอบการหมุนได้
4. ขนาดของพลอยดิบที่จัดเตรียมมีขนาดไม่เท่ากัน ทำให้ทุกครั้งที่ต้องเจียรระไนหยุดต้องวัดระยะฟุ้งลงแรกก่อนถึงงานเจียรระไนของมูมยอกแรกก่อนเสมอ
5. โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาใหม่มีความเสถียรในการเจียรระไนมากกว่ารุ่นเก่า แต่ยังมีบางจุดที่ถ้าไม่ใช้งานตามขั้นตอนที่ถูกต้องอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในขณะที่เจียรระไน ซึ่งต้องแก้ไขปรับปรุงต่อไป

7.3 ข้อเสนอแนะ

จากปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำงานวิจัยจะได้กล่าวถึงข้อเสนอแนะในการพัฒนางานวิจัยต่อไปในอนาคตดังนี้

1. ปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้หรือโครงสร้างบางอย่าง เช่น มอเตอร์สำหรับการเจียรระไนควรใช้มอเตอร์ 3 เฟส เพื่อสามารถปรับรอบของมอเตอร์ได้ หรือปรับปรุงรูปแบบการเปลี่ยนงานเจียรระไนเพื่อให้งานเจียรระไนหมุนเฉพาะงานที่ทำงานอยู่เท่านั้น เพื่อลดภาวะความร้อนของมอเตอร์
2. ปรับปรุงคุณภาพในการผลิตชิ้นส่วนของเครื่องเจียรระไนพลอยให้มีคุณภาพมากขึ้น ให้มีขนาดตรงตามที่ออกแบบไว้ใกล้เคียงที่สุด เพื่อให้ง่ายต่อการตั้งระดับเครื่อง
3. ออกแบบระบบน้ำหล่อเย็นในขณะที่เจียรระไนให้เป็นระบบ และมีการทำอุปกรณ์สำหรับกันน้ำกระเด็นขณะเจียรระไน เพื่อความสะดวกขณะเครื่องทำงานและป้องกันสนิม
4. พัฒนาโปรแกรมให้สามารถเจียรระไนได้หลากหลายชิ้น เช่นการเจียรระไนผิวโค้ง เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] สมจินต์ ธนานันท์ศิริ. การออกแบบและสร้างเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [2] ปรัชญา พิพัฒนานนท์. ระบบควบคุมสำหรับเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [3] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [4] Craig, J. J. Introduction to Robotics Mechanics and Control. Third edition. USA: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [5] Roymech. Power Screw Equations[Online]. (2010). Retrieved January 6, 2012. Available from: http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Cams_Springs/Power_Screws_1.html
- [6] Lorenzo Sciavicco and Bruno Siciliano. Robotics Modelling, Planning and Control. Springer-Verlag London Limited, 2009.
- [7] ชนัยณัฐ แก้วทอง, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมตำแหน่งและแรงกดทางอ้อมสำหรับการขัดชิ้นงานพลอยด้วยเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 26, ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย.
- [8] Keller, B. Standard Round Billion Classic Design[Online]. 1995. Available from: http://www.rockhounds.com/rockshop/gem_designs/srb_variations/srb1.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, [2008, August 19].

ภาคผนวก

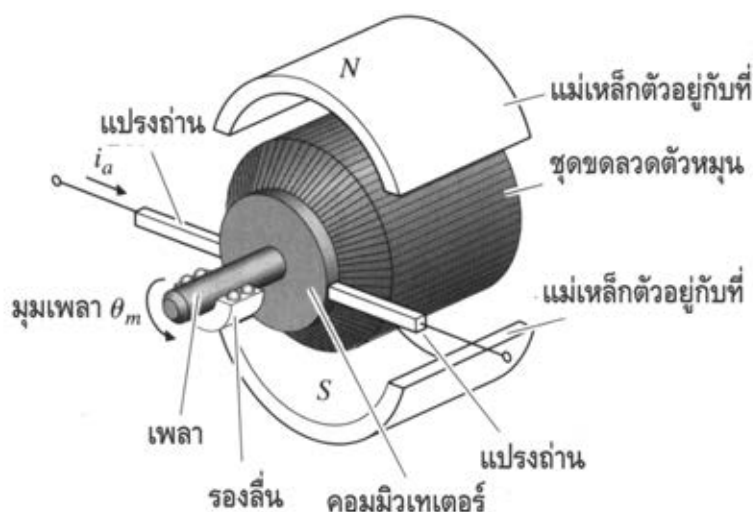
ภาคผนวก ก

หลักในการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

ก.1 เซอร์โวมอเตอร์

ในการเคลื่อนที่ของแกน X, Y, Z และ A ของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ ใช้เซอร์โวมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน ในหัวข้อนี้จะอธิบายถึง วิธีการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ และ อุปกรณ์ที่ต้องใช้สำหรับการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

ก.1.1 วิธีการควบคุม เซอร์โวมอเตอร์

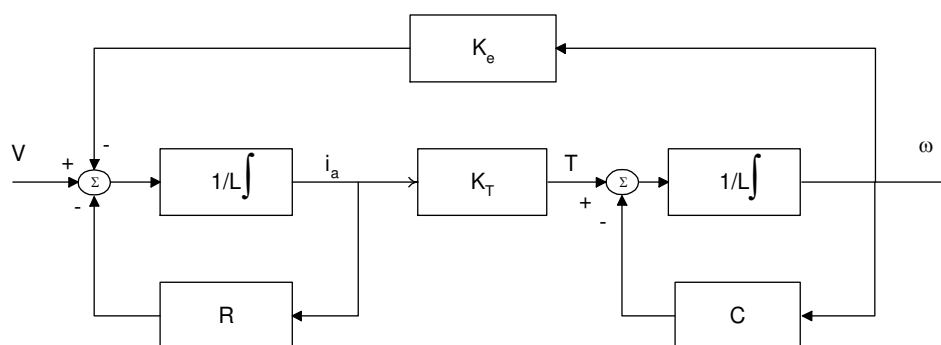


รูปที่ ก.1 ส่วนประกอบภายในมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โว [3]

จากรูปที่ ก.1 เป็นการแสดงชิ้นส่วนต่างๆภายในของมอเตอร์กระแสตรงแบบเซอร์โว โดยที่ การควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติจะเป็นการควบคุมแบบอาร์เมเจอร์ เนื่องจาก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการควบคุมกระแส หรือแรงบิดของมอเตอร์ที่จะจ่ายให้กับระบบ ไม่ต้องการ ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ แต่ต้องการควบคุมตำแหน่งในการเคลื่อนที่

การควบคุมแบบอาร์เมเจอร์ ค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ขดลวด (field coil) จะคงที่ ซึ่งมี ค่าค่อนข้างสูง ในขณะที่เดียวกัน ค่าความเฉื่อยของตัวอาร์เมเจอร์ควรที่จะมีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

วิธีการหาสมการควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยควบคุมกระแสที่ไหลผ่านขดลวด อาร์เมเจอร์ พร้อมทั้งบล็อกไดอะแกรม แสดงได้ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 แผนภาพบล็อกของระบบไฟฟ้าเชิงกล (DC Servo Motor) [3]

แรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่ตกคร่อมวงจรอาร์เมเจอร์ (Armature Circuit) สามารถเขียนได้
ดังนี้

$$V - K_e \omega = i_a R + L \frac{di_a}{dt} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ

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

$$i_a = \text{กระแสไฟฟ้า (amp)}$$

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

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

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

แรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่ง
สามารถเขียนได้ดังนี้

$$T = K_T i_a \quad (\text{ก.2})$$

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

จากกฎข้อที่สองของนิวตัน สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ของมวลที่ติดอยู่ที่ปลายของ
แกนมอเตอร์ได้ดังนี้คือ

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - c\omega \quad (\text{ก.3})$$

โดยที่ J คือค่าความเฉื่อยของภาระ (load) ในที่นี้ ไม่ได้คำนึงถึงระบบส่งกำลัง (gear box)
ระหว่างมอเตอร์กับภาระ รูปที่ ก.2 เป็นรูปบล็อกไดอะแกรมของระบบรวมจากสมการที่ (ก.1), (ก.2)
และสมการที่ (ก.3)

จากสมการที่ ก.3 ถ้านำมาปรับปรุงโดยคำนึงถึงพลศาสตร์ของตัวมอเตอร์ จะได้ว่า

$$K_T I - J_1 \dot{\omega} = T \quad (\text{ก.4})$$

โดยที่ J_1 คือค่าความเฉื่อยของมอเตอร์

การควบคุมกระแสที่ไหลเข้าไปในขดลวดของมอเตอร์ จะคำนวณว่าแรงบิด (T) ที่เกิดจากตัวมอเตอร์จะเป็นค่าสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบหรือคือสัญญาณอินพุตที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของภาระ

ก.1.2 อุปกรณ์ขยายกำลังงาน (Power Amplifier) ที่ใช้กับมอเตอร์

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

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

ในกรณีที่ทำงานในโหมดของการควบคุมการขยายกระแส ตัวมอเตอร์ไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วเข้าไป ชุดขับหรือตัวขยายกำลังงานจะทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณกระแส ซึ่งหมายถึงแรงบิดที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ โดยที่ค่ากระแสนี้จะแปรผันตามขนาดของสัญญาณแรงดันที่ส่งเข้าไปยังตัวขยายสัญญาณ ดังนั้นจะได้ว่า

$$i = KV ; K = \text{amp} / \text{volt} \quad (\text{ก.5})$$

จึงพอจะสรุปได้ว่า ชุดขับที่ทำงานในโหมดของการควบคุมการขยายกระแสจะนิยมใช้งานในการควบคุมตำแหน่งการหมุน และควบคุมแรงบิดของมอเตอร์กับภาระงาน

ก.1.3 อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดตำแหน่งในการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์

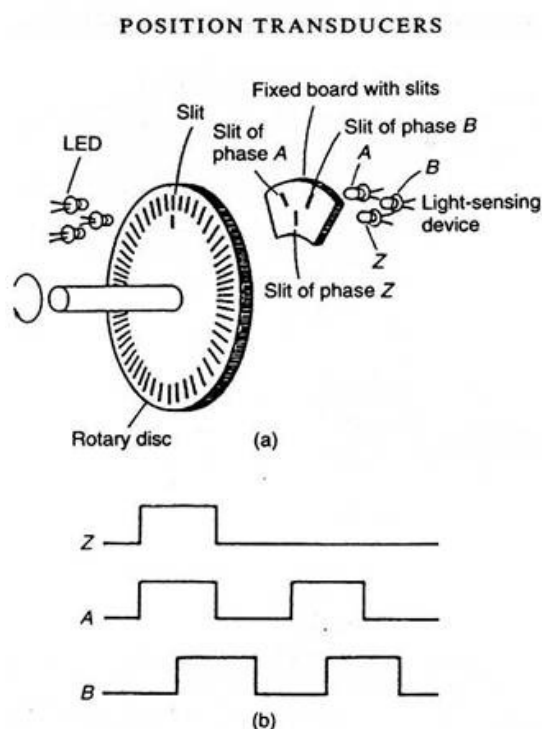
เนื่องจากการควบคุมเครื่องจักรในพลอยแบบอัตโนมัติ ใช้การควบคุมในโหมดการควบคุมการขยายกระแส ซึ่งเน้นไปที่การควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ให้แม่นยำ ในการควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่งของมอเตอร์ เพื่อตรวจสอบตำแหน่ง และทิศทางในการหมุนของมอเตอร์ว่าเป็นไปตามที่ผู้ใช้สั่งการหรือไม่ และทำการป้อนกลับค่าที่วัดได้ให้ระบบควบคุมประมวลผลต่อไป อุปกรณ์ดังกล่าวคือ เอ็นโคเดอร์ (Encoder)

เอ็นโคตเตอร์ ทำหน้าที่ตรวจวัดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ (Direction of Rotation) และ ตำแหน่งเพลลาของโรเตอร์ (shaft position) แล้วรายงานผลกลับไปยังคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมให้ ทรานซิสเตอร์กำลังในวงจรกำลังของชุดขับเคลื่อนเกิดการตัด-ต่อกระแสไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับตำแหน่ง ของโรเตอร์

เอ็นโคตเตอร์ สามารถแยกประเภทตามหลักการได้ 2 กลุ่ม คือชนิดที่ทำงานโดยอาศัย หลักการเหนี่ยวนำหรือเรียกว่า อนาล็อกเอ็นโคตเตอร์ (Analog Encoder) ซึ่งประกอบด้วย แทคโค เจนเนอเรเตอร์ (Tacho Generator) และ รีโซลเวอร์ (Resolver) และชนิดที่ทำงานโดยอาศัย หลักการดิจิตอล หรือเรียกว่า ดิจิตอลเอ็นโคตเตอร์ (Digital Encoder) ซึ่งประกอบด้วย อินคริ เมนทัลเอ็นโคตเตอร์ (Incremental encoder) และ แอบโซลูตเอ็นโคตเตอร์ (Absolute encoder) สำหรับเครื่องเจียรในพลอยแบบอัตโนมัตินี้จะใช้ ดิจิตอลเอ็นโคตเตอร์ ในการตรวจวัดตำแหน่ง ทั้งหมด จึงจะขอกกล่าวถึงเฉพาะ อินคริเมนทัลเอ็นโคตเตอร์ และ แอบโซลูตเอ็นโคตเตอร์

ก.1.3.1 อินคริเมนทัลเอ็นโคตเตอร์

ทำงานโดยอาศัยหลักการอาศัยหลักการออปติคอล (Optical) บ่อยครั้งจะถูกเรียก ตามหลักการว่า ออปติคอลเอ็นโคตเตอร์ (Optical encoder) หรือบางกรณีก็จะถูกเรียกว่า ดิจิตอล เอ็นโคตเตอร์ โดยมีลักษณะดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 ส่วนประกอบของอินคริเมนทัลเอ็นโคตเตอร์ [2]

โครงสร้างของอินคริเมนทัลเอ็นโคตเตอร์ ประกอบด้วยตัวกำเนิดแสง ตัวจับแสงซึ่ง ถูกคั่นกลางด้วยแผ่นจานกลมที่มีการทำรูเจาะไว้รอบๆแผ่น (จำนวนรูจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของ

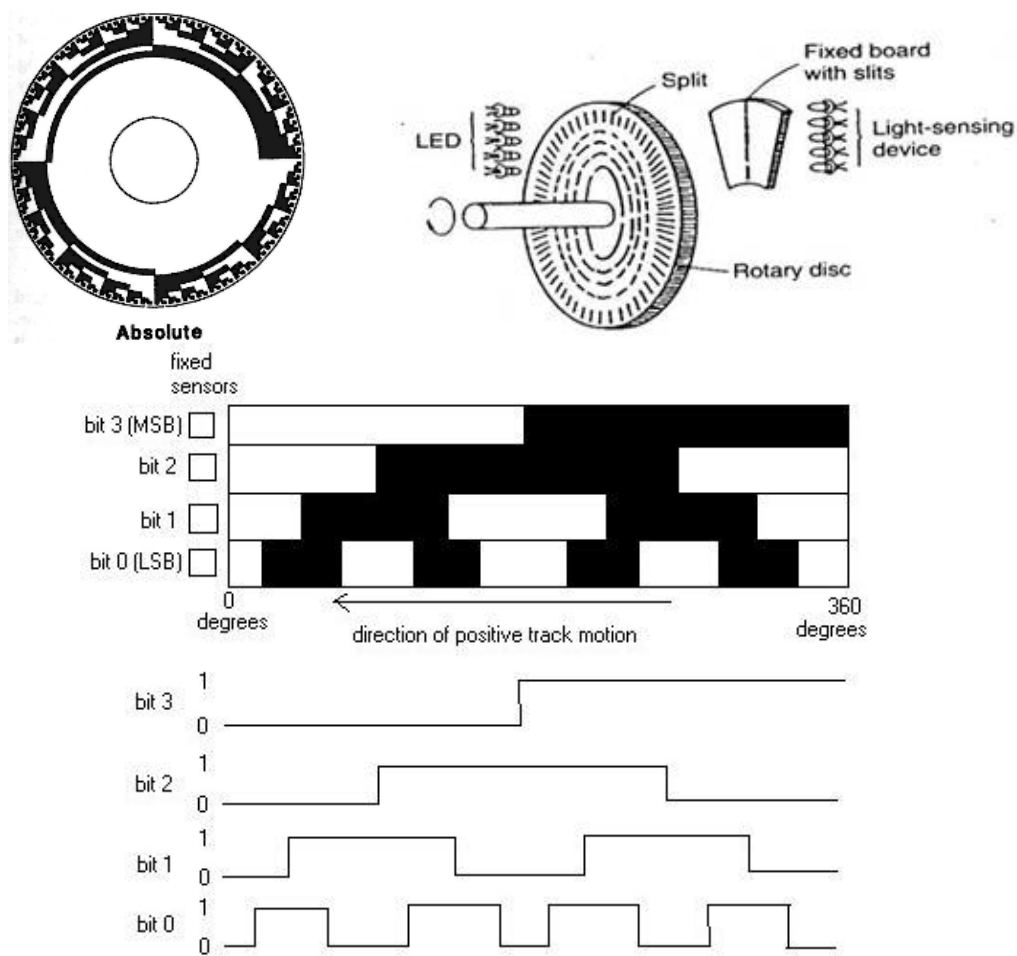
อินคริเมนทัลเอ็นโคดเดอร์) และหน้ากากแยกช่องของสัญญาณพัลส์ A ,B และ Z สัญญาณพัลส์ที่ได้จาก เอ็นโคดเดอร์ ชนิดนี้จะประกอบด้วย 3 แทรค (tracks) คือ A ,B และZ พัลส์ที่เกิดจาก แทรค A และ B จะเกิดการเหลื่อมกันมีความต่างเฟสกัน 90 องศา เพื่อทำหน้าที่รายงานผลของความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ให้คอนโทรลเลอร์ ดังนี้

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

อินคริเมนทัลเอ็นโคดเดอร์ โดยทั่วไปจะไม่นิยมใช้กับระบบเซอร์โวที่มีการควบคุมตำแหน่ง เนื่องจากไม่สามารถจำตำแหน่งเดิมได้กรณีที่มีการปิดเครื่องหรือไฟดับ ซึ่งจะต้องทำการหาจุดอ้างอิงใหม่ทุกครั้ง

ก.1.3.2 แอปโซลูตเอ็นโคดเดอร์

เป็นดิจิทัลเอ็นโคดเดอร์ อีกชนิดหนึ่งที่สำคัญหลักการ ออกพิคคอล คล้ายกับอินคริเมนทัลเอ็นโคดเดอร์ โดยประกอบด้วยตัวกำเนิดแสง ตัวจับแสง และจานเข้ารหัส ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 ส่วนประกอบของแอปโซลูตเอ็นโคดเดอร์ [2]

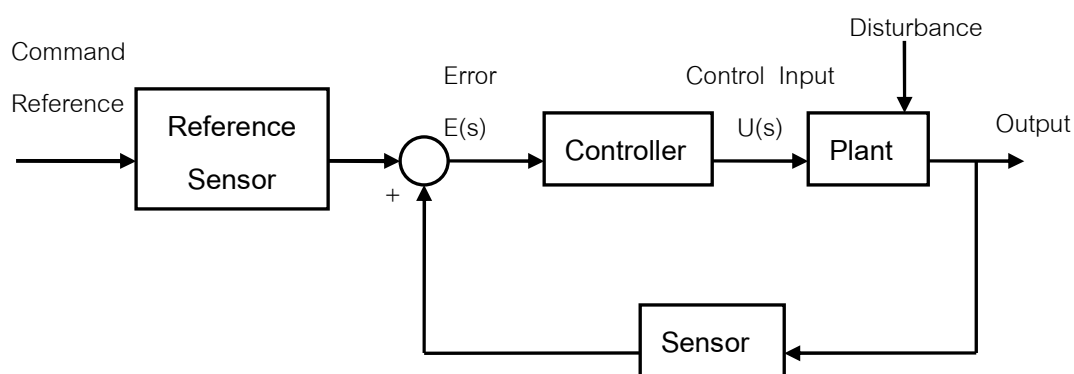
แอปโซลูตเอ็นโคดเดอร์ มีโครงสร้างแผ่นดิสก์พิเศษ ซึ่งมีลักษณะเป็น เกรย์สเกล (Gray Scales) ความละเอียดตำแหน่งของ แอปโซลูตเอ็นโคดเดอร์ จะขึ้นกับจำนวนบิต

แอปโซลูตเอ็นโคดเดอร์ จะให้ข้อมูลตำแหน่งค่อนข้างละเอียดและสามารถรายงานบอกตำแหน่งได้ทุก ๆ จุดที่โรเตอร์หมุนเคลื่อนที่ไป ไม่มีปัญหาเรื่องจุดอ้างอิงกรณีไฟดับหรือปิดเครื่อง แต่จะไม่ทนต่อสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม เช่นการสั่นสะเทือนและฝุ่นควัน นอกจากนี้งานเข้ารหัสยังเปราะและแตกง่าย

สำหรับในเครื่องเจียรระโนพลอยแบบอัตโนมัติ เอนโคเดอร์ที่ใช้ทั้งหมดเป็น อินคริเมนทัลเอนโคดเดอร์ ทั้งหมด ซึ่งทุกครั้งที่มีการปิด-เปิดเครื่อง เครื่องจะจำตำแหน่งเดิมไม่ได้ ดังนั้นก่อนใช้งานทุกครั้งต้องทำการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ในแต่ละแกนทุกครั้ง

ก.2 ทฤษฎีการควบคุมพื้นฐาน

ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติบางครั้งจะเรียกว่าระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback controller) ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบพลศาสตร์ที่ต้องการควบคุม ซึ่งระบบควบคุมอัตโนมัติมีส่วนที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด แล้วเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรที่ต้องการ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นค่าแตกต่าง (error) หรือค่าความผิดพลาด และค่าที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้สร้างสัญญาณควบคุมซึ่งสามารถนำไปช่วยลดการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้ได้ เพื่อให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าเป็นศูนย์ หรือมีค่าน้อยที่สุด การกระทำของระบบควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณควบคุม (Control Signal) นี้เรียกว่ากิริยาควบคุม (Control Action) การควบคุมแบบป้อนกลับดังที่กล่าวมานี้สามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด [3]

จากรูปที่ ก.5 เป็นรูปแผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด โดยสัญญาณคำสั่งอ้างอิง (Command Reference) จะถูกเปลี่ยนรูปแบบด้วยระบบตรวจรู้อ้างอิง (Reference Sensor) เพื่อเปลี่ยนแปลงให้สัญญาณคำสั่งอ้างอิงดังกล่าวมีลักษณะเดียวกับสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้อธิบายให้ง่ายคือเพื่อต้องการให้คำสั่งอ้างอิงมีหน่วยเดียวกันกับสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ตรวจรู้ขาออก (Sensor) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วจะได้สัญญาณผิดพลาด

(error signal) สัญญาณผิดพลาดจะถูกส่งต่อเข้าไปยังตัวควบคุม (Controller) สัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมจะถูกใช้เป็นสัญญาณควบคุม (Control Input) ที่จะส่งเข้าไปยังระบบที่ต้องการจะควบคุม (Plant)

ตัวควบคุม หรือ Controller จะมีบทบาทมากกับลักษณะตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ ตัวควบคุมดังกล่าวมีมาตรฐานและรูปแบบอยู่หลายประเภท ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป

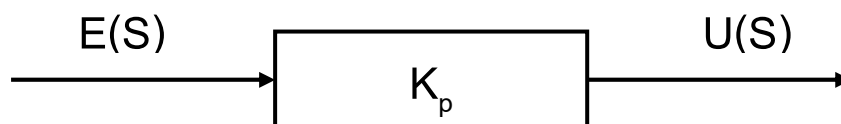
ก.3 ชนิดของตัวควบคุมพื้นฐาน

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)

ก.3.1 ตัวควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportional Controller, P - Control)

ตัวควบคุมประเภทนี้จะทำให้ สัญญาณควบคุม (U) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาด (e) ที่เกิดจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิง กับสัญญาณเอาต์พุตของระบบ แสดงได้ดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 สัญญาณที่ผ่านตัวควบคุมเชิงสัดส่วน [3]

ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดที่ส่งเข้าไปในระบบสามารถเขียนได้ดังนี้

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

ถ้าเขียนให้อยู่ในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซ จะได้ว่า

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_p \quad (\text{ก.6})$$

โดยค่าเกน K_p เป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแบบนี้ หรือเรียกว่าเกนสัดส่วน โดยตัวควบคุมเชิงสัดส่วนมีผลทำให้ระบบที่ต้องการควบคุมมีการตอบสนองที่เร็วขึ้น แต่หากเร็วมากไปอาจทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้

ก.3.2 ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล

ตัวควบคุมประเภทนี้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดสามารถเขียนในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซได้ว่า

$$\frac{U(S)}{E(S)} = \frac{K_P}{T_I S} \quad (\text{ก.7})$$

สำหรับตัวควบคุมแบบอินทิกรัลจะมีผลช่วยให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวเป็นศูนย์ แต่อย่างไรก็ตามมีผลทำให้เสถียรภาพของระบบลดลง จึงไม่นิยมนำมาใช้เดี่ยวๆ

ก.3.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

ตัวควบคุมประเภทนี้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดสามารถเขียนในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซได้ว่า

$$\frac{U(S)}{E(S)} = K_P T_D S \quad (\text{ก.8})$$

ส่วนมากแล้วตัวควบคุมประเภทนี้จะนิยมใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบอื่นๆ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยในการเพิ่มค่าความหน่วง (damping) ให้กับระบบที่ต้องการจะควบคุม นั่นก็คือทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นนั่นเอง แต่จะไม่สามารถทำให้ค่าผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์ได้

ก.3.4 ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์บวกอินทิกรัล

ตัวควบคุมประเภทนี้ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดสามารถเขียนในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซได้ว่า

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

หรือจะเขียนในรูป
$$\frac{U(S)}{E(S)} = K \left(1 + \frac{1}{T_I S} + T_D S \right) \quad (\text{ก.9})$$

ตัวควบคุมประเภทนี้ จะรวมเอาข้อดีของตัวควบคุมทั้ง 3 ตัวข้างต้นเอาไว้ด้วยกัน ทำให้สามารถควบคุมระบบให้แม่นยำได้ง่ายขึ้น ซึ่งในการควบคุมเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ ที่ต้องการความแม่นยำในแต่ละแกนสูงจึงได้เลือกตัวควบคุมประเภทนี้มาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน

ก.4 การควบคุมระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

จากตัวควบคุมที่กล่าวมาในหัวข้อที่แล้วเป็นการพิจารณาระบบที่มีลักษณะเป็นระบบที่มีเวลาต่อเนื่อง (Continuous time Systems) หรือบางทีจะรู้จักกันในชื่อของระบบแอนะล็อก (Analog Systems) แต่ระบบที่ใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมเป็นระบบดิจิทัล (Digital) อุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆก็ให้ข้อมูลเป็นดิจิทัล ซึ่งทำงานเป็นลักษณะของระบบที่เวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete time Systems) โดยที่เวลาที่ทำหน้าที่กำหนดการทำงานของระบบจะเป็นเวลาของการสุ่มข้อมูลที่เรียกว่า Sampling Time โดยที่เวลาในการสุ่มนี้มีผลอย่างมากต่อผลลัพธ์ของระบบควบคุม ซึ่งจากการที่เครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ ถูกควบคุมด้วยโปรแกรมผ่านคอมพิวเตอร์ จึงถือว่าระบบนี้เป็นระบบเวลาไม่ต่อเนื่องเช่นกัน ดังนั้นการพิจารณาใช้ตัวควบคุมเพื่อไปเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน จึงต้องพิจารณาในรูปแบบของระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง

เนื่องจากตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-Control) ประกอบด้วยตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ตามสมการที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ และสามารถเขียนสมการรวมตัวควบคุมทั้งสามส่วนนี้ได้เป็นสมการที่ 4.4 หรือ 4.5 ซึ่งเป็นรูปแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยค่า K_p , K_i และ K_d คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และ ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่า T คือ ช่วงเวลาในการสุ่มข้อมูล โดยในการควบคุมเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัตินี้จะใช้ความถี่ในการสุ่มเป็น 1,000 Hz หรือ 0.001 วินาที

ก.5 ลักษณะของค่าสัญญาณอ้างอิงที่ส่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์

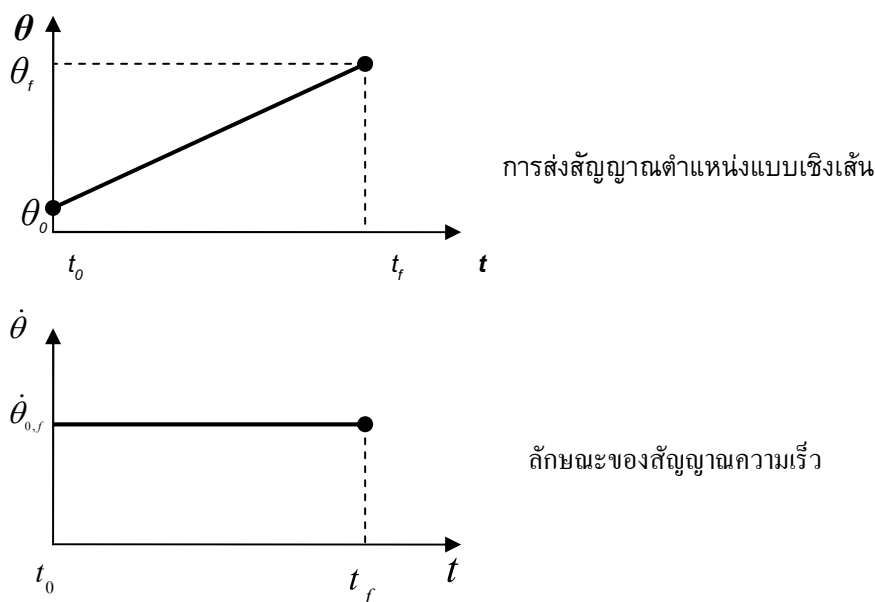
การควบคุมมอเตอร์ในแต่ละแกน จำเป็นจะต้องส่งสัญญาณอ้างอิงเข้าไป โดยสัญญาณอ้างอิงที่ส่งไปควรจะมีหน่วยเดียวกันกับค่าสัญญาณป้อนกลับจากอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งในที่นี้อุปกรณ์ตรวจวัดของเครื่องเจียร์ไนพลอยแบบอัตโนมัติ คือเอนโคเดอร์ โดยที่เอนโคเดอร์จะส่งสัญญาณออกมาเป็นลักษณะของพัลส์ ดังนั้นในการส่งสัญญาณอ้างอิงจึงทำการส่งค่าออกไปเป็นตำแหน่งพัลส์ที่ต้องการให้มอเตอร์เคลื่อนไปถึง ซึ่งการส่งสัญญาณอ้างอิงสามารถส่งสัญญาณได้หลายแบบ ดังนี้

ก.5.1 ส่งเป็นค่าตำแหน่งปลาย (Target) ให้กับระบบ

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

ก.5.2 ส่งสัญญาณเป็นลักษณะเชิงเส้น (Linear Function)

การส่งสัญญาณลักษณะนี้จะส่งสัญญาณอ้างอิงจากจุดเริ่มไปยังเป้าหมายตำแหน่งปลาย โดยจะค่อยๆส่งสัญญาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆแบบคงที่ ดังแสดงในรูป ก.7

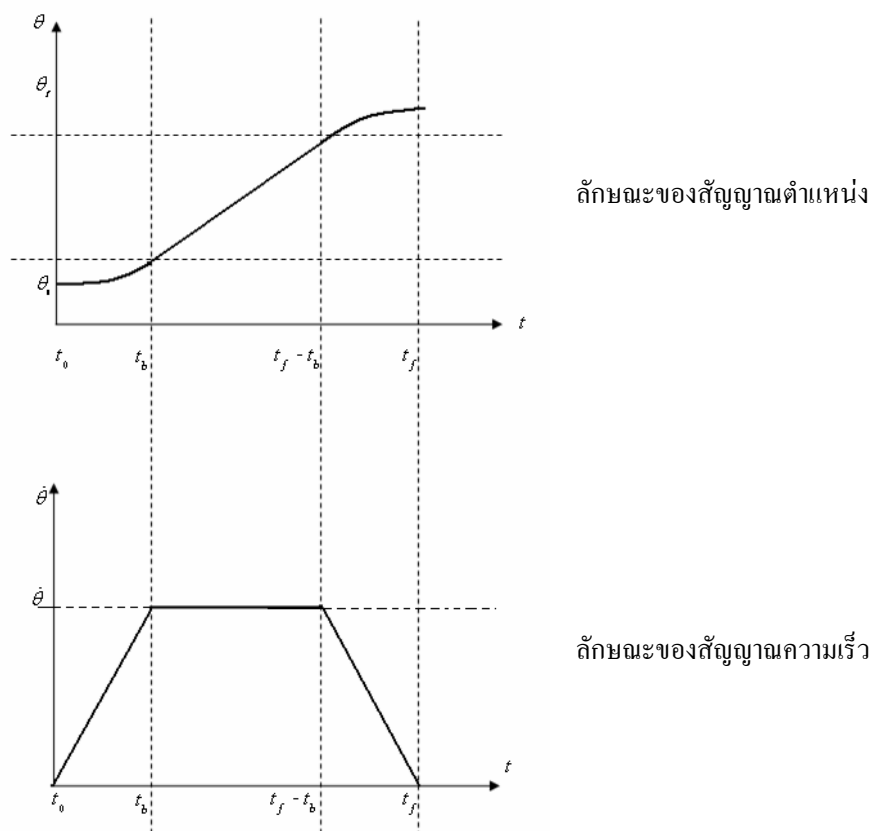


รูปที่ ก.7 ลักษณะการส่งสัญญาณอ้างอิงแบบเชิงเส้น [4]

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

ก.5.3 ส่งสัญญาณเป็นลักษณะเชิงเส้น ผสมกับพาราโบลา (Linear function with parabolic blend)

จากปัญหาความไม่ต่อเนื่องของสัญญาณความเร็วที่เกิดขึ้นในการส่งสัญญาณแบบเชิงเส้น การแก้ปัญหาก็ใช้ลักษณะแนวเส้นแบบพาราโบลามาช่วยในช่วงเริ่มต้น และช่วงปลายการเคลื่อนที่ จากจุดเริ่มต้น ถึงจุดปลาย ในขณะที่ช่วงตรงกลางของการเคลื่อนที่จะยังคงเป็นการเคลื่อนที่ในลักษณะเชิงเส้นแบบธรรมดาอยู่ ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะทำให้ในการเริ่มต้นเคลื่อนที่ความเร็วจะเป็นศูนย์แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับขณะถึงจุดปลาย ความเร็วจะค่อยๆลดลงจนความเร็วเป็นศูนย์ มีผลให้การเคลื่อนที่ที่ราบเรียบและนุ่มนวลกว่าแบบที่แล้ว ดังแสดงในรูปที่ ก.8



รูปที่ ก.8 ลักษณะสัญญาณแบบเชิงเส้นผสมกับพาราโบลา [4]

การจะสร้างสัญญาณลักษณะดังนี้จำเป็นต้องทราบค่าต่างๆที่จำเป็นก่อนคือ

θ_0 คือ ตำแหน่งเริ่มต้นที่จะเริ่มเคลื่อนที่

θ_f คือ ตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการเคลื่อนที่ไปถึง

t_f คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมด

ค่าทั้งสามนี้ คือค่าที่ต้องกำหนดขึ้นมาเพื่อใช้สั่งการเคลื่อนที่ ซึ่งจากค่าเหล่านี้จะนำไปหาค่าอื่นๆที่ใช้ในการสร้างสัญญาณส่งออก ดังนี้

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

ในที่นี้จะใช้ $\ddot{\theta} = \frac{4(\theta_f - \theta_0)}{t^2} + 1$ (ก.10)

หาค่า t_b จาก $t_b = \frac{t}{2} - \frac{\sqrt{\ddot{\theta}^2 t^2 - 4\ddot{\theta}(\theta_f - \theta_0)}}{2\ddot{\theta}}$ (ก.11)

หาค่า $\dot{\theta}$ จาก $\dot{\theta} = \ddot{\theta} t_b$ (ก.12)

เมื่อหาค่าทั้งหมดได้แล้ว สามารถสร้างสัญญาณตำแหน่งเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

ช่วงที่1 ($t_0 \rightarrow t_b$)

หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ $\theta = \theta_0 + 0.5\ddot{\theta}t^2$ (ก.13)

ช่วงที่2 ($t_b \rightarrow t_f-t_b$)

หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ $\theta = \theta_0 + \dot{\theta}(t-0.5t_b)$ (ก.14)

ช่วงที่3 ($t_f-t_b \rightarrow t_f$)

หาสัญญาณตำแหน่งได้จากสมการ

$$\theta = \theta_0 - 0.5\ddot{\theta}(t^2 - (t_f - t_b)^2) + \dot{\theta}(t - 0.5t_b) + \ddot{\theta}(t_f - t_b) \quad (\text{ก.15})$$

จากสมการที่ (ก.13) (ก.14) และ (ก.15) เป็นสมการที่ถูกลำนำไปใช้สร้างสัญญาณตำแหน่งเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องเจียระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ

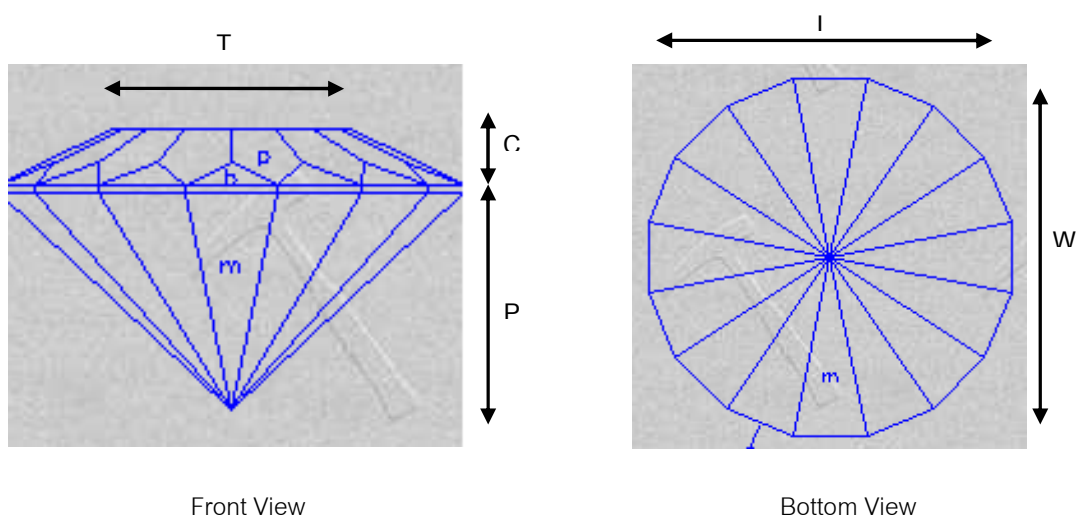
ภาคผนวก ข

การให้ขนาดและรูปร่างพลอยมาตรฐาน และการใช้งานโปรแกรมซียู-โซลิต

ข.1 ลักษณะการให้ขนาด และการบอกรูปร่างพลอย

ในการสร้างโปรแกรมจะต้องพิจารณาถึงการบอกรูปร่างและขนาดของพลอยที่เป็นสากล เพื่อความสะดวกสำหรับผู้ใช้ในการใช้งานเพื่อกำหนด ขนาดและรูปร่างของพลอยที่ต้องการ ลักษณะการบอกขนาดและรูปร่างของพลอยที่เป็นมาตรฐานมีลักษณะดังรูปที่ ข.1 โดยที่

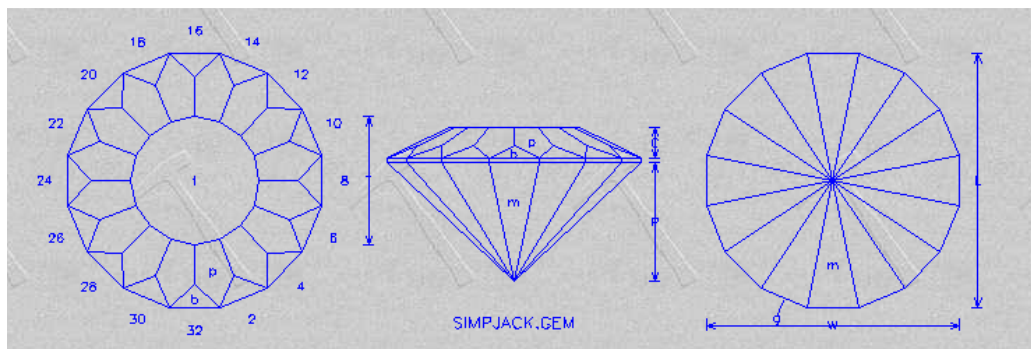
- T หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหน้าที่เป็นกระดาน (Table)
- C หมายถึง ขนาดความสูงของด้านบนของพลอย (Crown)
- P หมายถึง ขนาดความสูงของด้านล่างของพลอย (Pavilion)
- L หมายถึง ความยาวของพลอย
- W หมายถึง ความกว้างของพลอย



รูปที่ ข.1 การบอกขนาดของพลอย [9]

สำหรับการให้ขนาดของพลอยจะไม่ได้บอกเป็นขนาดแน่นอน แต่บอกเป็นอัตราส่วน เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ได้กับพลอยทุกขนาดตามที่ต้องการ

ในส่วนของการบอกรูปร่างของพลอยจะบอกในรูปแบบของตัวแปรที่มีผลต่อเหลี่ยมมุมของพลอย ได้แก่ มุมยก และ มุมตราบนี้ โดยจะบอกว่า พลอยรูปร่างที่ออกแบบมีการเจียรไนที่มุมยกใดบ้าง และในแต่ละมุมยกจะเจียรไนที่มุมตราบนี้ใดบ้าง ตัวอย่างของการบอกขนาดและรูปร่าง ของพลอยที่ต้องการแสดงได้ดังรูปที่ ข.2 และตารางที่ ข.1 เป็นตัวอย่างการบอกขนาดและรูปร่างพลอยที่ใช้กันเป็นสากล โดยพลอยที่ยกมาเป็นพลอยเหลี่ยม Simple Jack



รูปที่ ข.2 ลักษณะการบอกขนาดและรูปร่างของพลอย [9]

ตารางที่ ข.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	
Pavilion for 32 Index			
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
Crown for 32 Index			
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

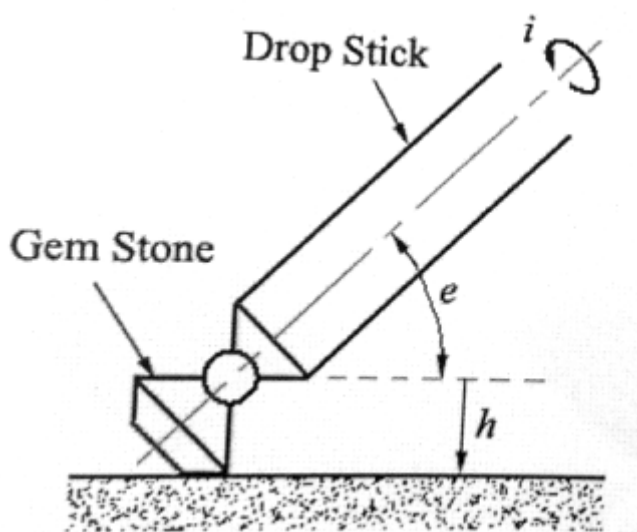
เห็นได้ว่าการบอกขนาดและรูปร่างของพลอย จะแสดงรูปในแต่ละมุมมองของพลอยที่ต้องการ จากนั้นบอกขนาดของพลอยในลักษณะที่เป็นอัตราส่วนของด้านแต่ละด้าน แล้วบอกเหลี่ยมมุมของพลอยที่ต้องการเจียรระโนในด้านล่างของพลอย และด้านบนของพลอย ตามลำดับ

ข.2 การใช้งานร่วมกับโปรแกรม ซียู-โซลิด (CU – Solid)

การเจียรระโนพลอยด้วยเครื่องเจียรระโนอัตโนมัติ สามารถเจียรระโนพลอยได้หลายรูปแบบ ซึ่งวิธีการเจียรระโนให้สะดวกนั้น จำเป็นต้องใช้โปรแกรมอื่นเข้ามาช่วยเพื่อเป็นการช่วยกำหนดระยะ ความลึกในการเจียรระโน รวมถึงมุมที่ใช้ในการเจียรระโนต่างๆ โปรแกรม ซียู-โซลิด ที่ได้พัฒนาขึ้นมา นั้น มีส่วนเสริมที่สามารถช่วยให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบของพลอยได้

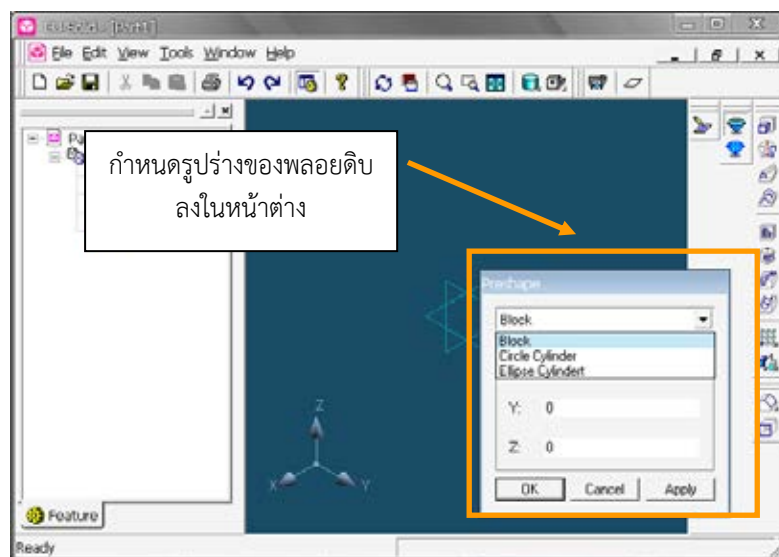
โปรแกรมซียู-โซลิด คือโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเหลี่ยม และรูปร่างของพลอยที่ต้องการเจียรระโน โดยผู้ใช้สามารถป้อนขนาดพลอย เหลี่ยม มุม และความลึกในการกัด เพื่อให้ได้พลอยที่มีรูปร่างและขนาดตามต้องการ ซึ่งในการใช้เครื่องเจียรระโนพลอยอัตโนมัติต้องการที่จะใช้ร่วมกับโปรแกรม ซียู-โซลิด ดังนั้นจึงต้องศึกษาการใช้งานของโปรแกรมว่า ในการวาดรูปพลอยโดยใช้ ซียู-โซลิด ต้องใช้พารามิเตอร์ใดบ้าง เพื่อออกแบบโปรแกรมให้รับค่าเหล่านั้น สำหรับสั่งให้เครื่องทำงานได้อย่างอัตโนมัติ

การเจียรระโนพลอยด้วยเครื่องเจียรระโนแบบอัตโนมัติเริ่มจากการนำพลอยที่ผ่านการแต่งรูปทรงเบื้องต้น มาเจียรระโนเกิดเป็นระนาบขึ้นบนพลอย โดยเครื่องเจียรระโนแบบอัตโนมัติที่สร้างขึ้น อาศัยพารามิเตอร์ 3 ตัว คือ มุมยก (e) มุมดรรชนี (i) และความลึกในการกัด (h) นั่นคือพารามิเตอร์ทั้ง 3 เป็นตัวกำหนดระนาบที่เกิดขึ้นบนพลอย ดังแสดงในรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 พารามิเตอร์ในการเจียรระโนพลอย [1]

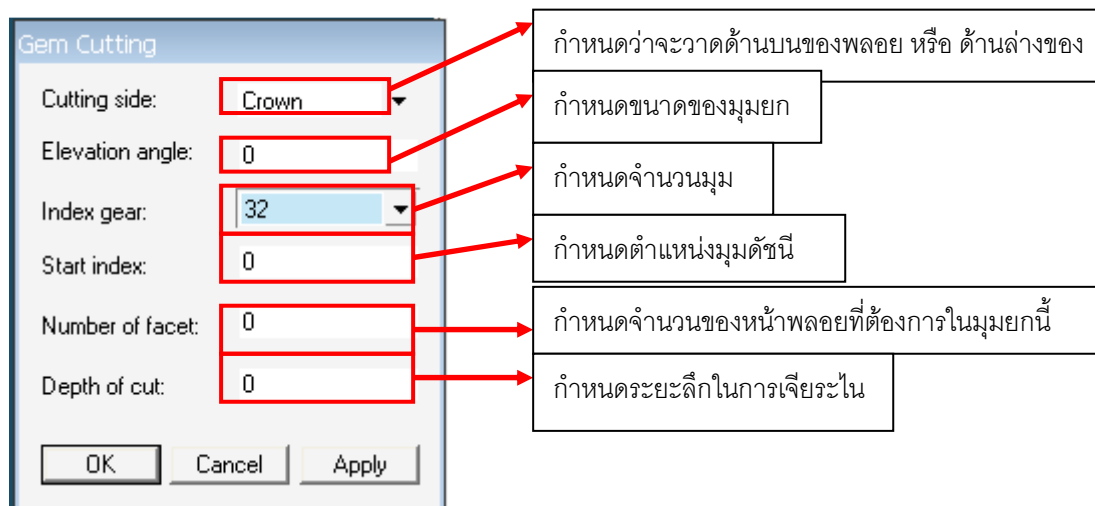
การใช้งานโปรแกรม ซียู-โซลิดคือ เริ่มแรกในการใช้งานต้องกำหนดขนาดของพลอยดิบก่อน ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 การกำหนดลักษณะรูปร่างของพลอยดิบในโปรแกรมซียู-โซลิต [2]

การกำหนดรูปร่างของพลอยดิบก่อนการเจียรระโนสามารถกำหนดได้เป็นลักษณะทรงกระบอก ทรงรี และทรงลูกบาศก์ ซึ่งผู้ใช้ต้องกำหนดรูปร่างและขนาดให้ใกล้เคียงกับ พลอยดิบจริงที่มีอยู่ให้มากที่สุด เพื่อความแม่นยำในการออกแบบ และการนำพารามิเตอร์ไปใช้งาน

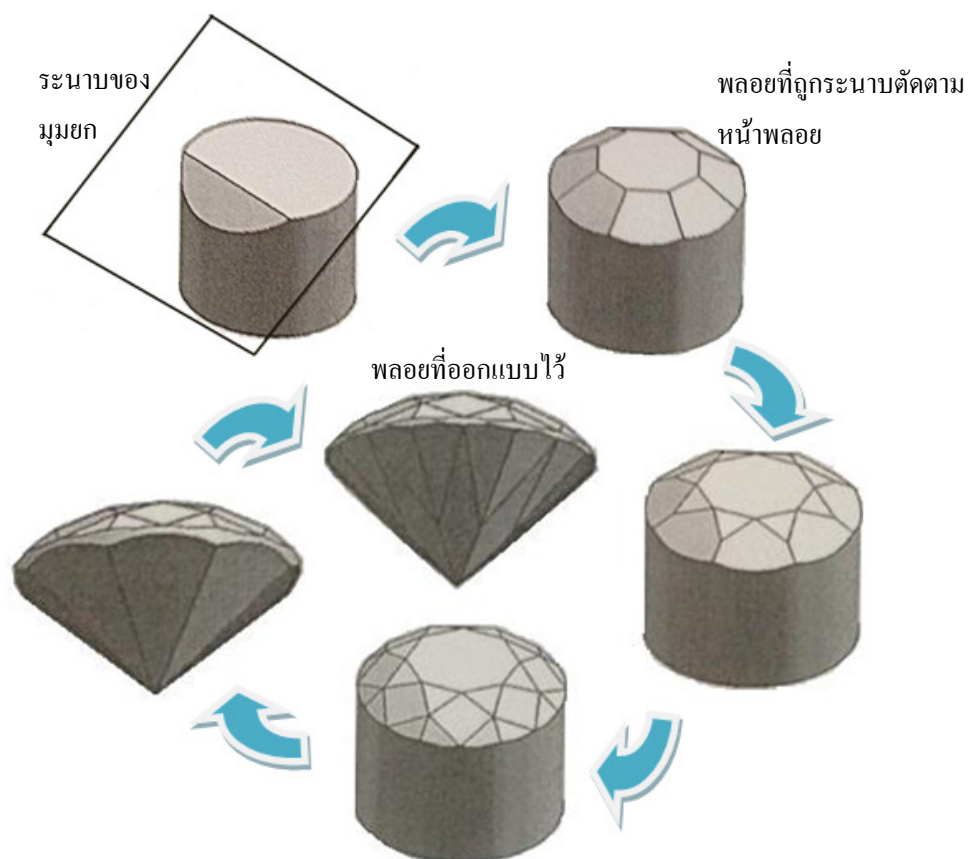
ขั้นตอนต่อไปคือ การกำหนดเหลี่ยมและรูปร่างของพลอยที่ต้องการให้เจียรระโนออกมา ดังรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 พารามิเตอร์ที่ต้องป้อนสำหรับสร้างเหลี่ยมพลอย [2]

จากรูปที่ ข.5 จะเห็นว่า ในการสร้างเหลี่ยมและมุมของพลอยให้ได้ตามต้องการ ต้องทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้ครบ ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้ก็คือตัวแปรในการเจียรระโนพลอยทั้งสิ้น ได้แก่ ค่ามุมยก ค่ามุมดรรชนีที่ใช้ และค่าความลึกในการกัด แต่การป้อนค่ามุมดรรชนีจะเป็นลักษณะการป้อนแบบเหลี่ยมสมมาตร นั่นคือ ป้อนมุมดรรชนีเริ่มต้นของเหลี่ยม และป้อนจำนวนของหน้า

พลอยที่ต้องการในเหลี่ยมดังกล่าว จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณหาระนาบที่จะนำมาตัดกับรูปทรงพลอยดิบที่สร้างไว้ในขั้นแรกเกิดเป็นระนาบตัดบนโมเดลของพลอยดังรูปที่ ข.6 ที่แสดงระนาบของมุมยกในการตัดพลอยไปจนกระทั่งได้รูปทรงของพลอยตามที่ต้องการ



รูปที่ ข.6 การตัดรูปทรงด้วยระนาบจนได้โมเดลพลอยที่ต้องการ

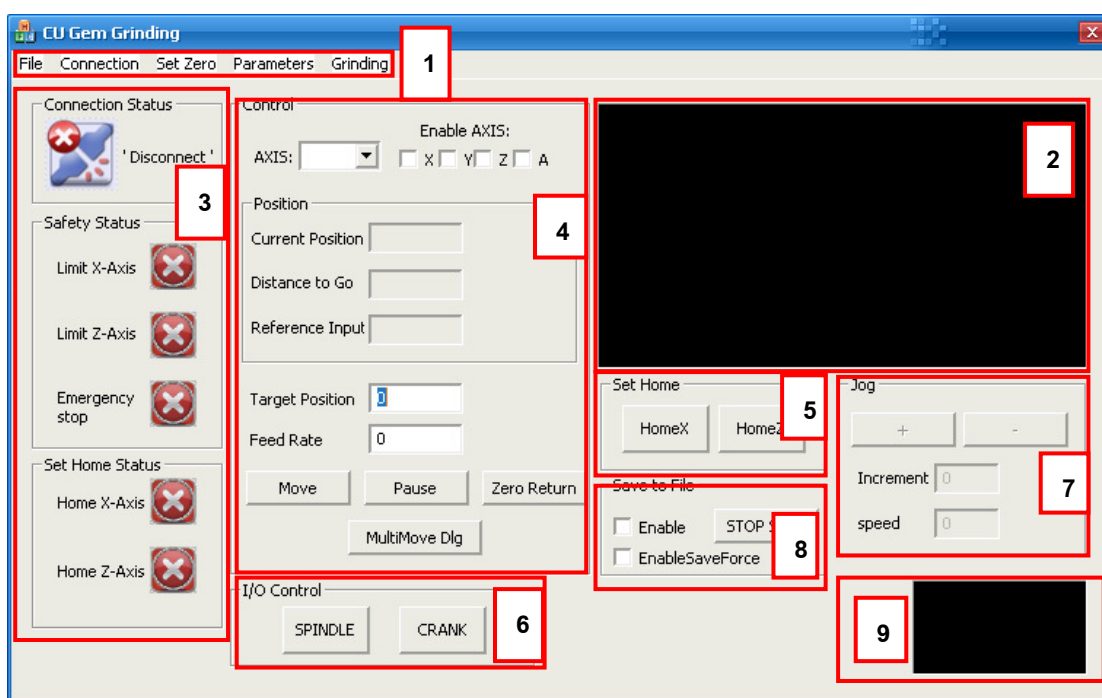
สรุปการใช้โปรแกรม ซียู-โซลิดในการออกแบบรูปร่างพลอย มีค่าที่ต้องใส่หลักๆคือขนาดของพลอยดิบก่อนเจียรระนาบ และค่าตัวแปรในการเจียรระนาบทั้งหมด ดังนั้นการใช้ค่าเหล่านี้จึงเป็นพื้นฐานของโปรแกรมควบคุมเครื่องเจียรระนาบพลอยแบบอัตโนมัติที่สร้างขึ้น เพื่อรับค่าต่างๆสำหรับสั่งให้เครื่องเจียรระนาบพลอยแบบอัตโนมัติทำการเจียรระนาบพลอยให้ได้ขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับที่ออกแบบไว้ในโปรแกรมให้มากที่สุด

ภาคผนวก ค

การใช้งานโปรแกรม CU Gem Grinding ในการเจียรระโนพลอย

ค.1 การเปิดการทำงานของโปรแกรมเบื้องต้น

ในส่วนนี้อธิบายถึงขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม CU Gem Grinding โดยละเอียด ดังนี้ เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมา จะพบหน้าต่างดังรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 หน้าต่างโปรแกรมหลักของโปรแกรม CU Gem Grinding

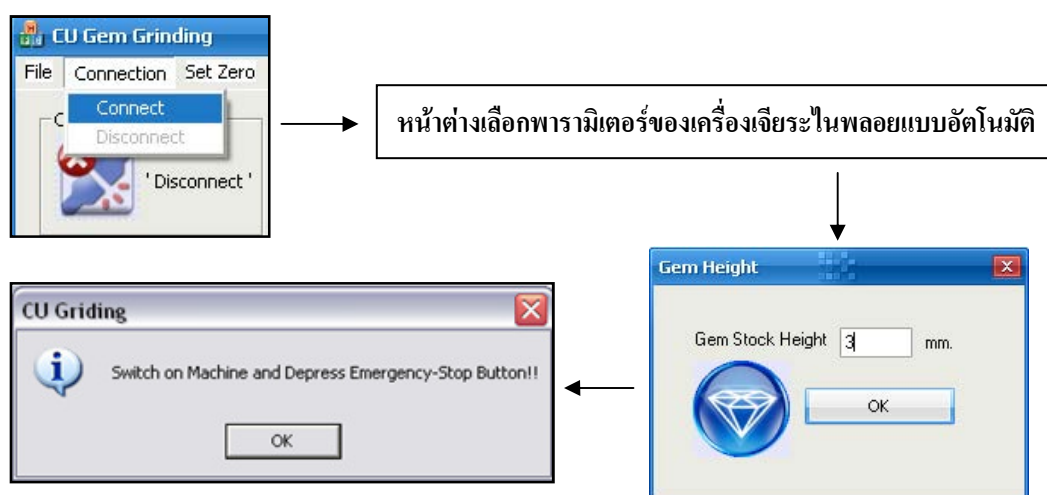
จากรูปที่ ค.1 สามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆของโปรแกรมได้ดังนี้

1. ส่วนของทูลบาร์ ใช้ในการเลือกการเชื่อมต่อ หรือยกเลิกการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมและเครื่อง ใช้ในการตั้งตำแหน่งแต่ละแกนการเคลื่อนที่ให้เป็นศูนย์ ใช้ในการกำหนดขนาดของพลอยดิบ ที่นำมาเจียรระโน ใช้ในการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่อง และเรียกหน้าจอการเจียรระโนพลอย ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป
2. ส่วนของหน้าจอแสดงตำแหน่งของมอเตอร์แกน X Y Z และ A โดยแกน X แสดงค่ามมยก แกน Y แสดงค่าดัชนีของพลอยในหน่วยฟัลส์ แกน Z แสดงตำแหน่งของแกนว่าห่างจาก ตำแหน่งอ้างอิงเท่าไรเป็นหน่วยมิลลิเมตร และแกน A แสดงจานเจียรระโนที่ใช้อยู่
3. ส่วนของหน้าจอแสดงสถานะของเครื่องเจียรระโนพลอย โดยแสดงสถานะการเชื่อมต่อของ โปรแกรมกับเครื่องเจียรระโนพลอย แสดงขอบเขตของแกน X และ Z ว่าเครื่องวิ่งผ่าน ตำแหน่งขอบเขตของเครื่องหรือไม่ แสดงสถานะการตั้งตำแหน่งอ้างอิงของแกน X และ แกน Z ว่าอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นแล้วหรือยัง

4. ส่วนของหน้าจอที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียรไนพลอย หรือควบคุมทุกแกนพร้อมกัน โดยสามารถสั่งให้วิ่งไปทางบวก หรือลบได้ หรือจะป้อนเป็นตำแหน่งปลายทาง และความเร็ว ก็สามารถทำได้เช่นกัน
5. ส่วนของหน้าจอที่ใช้ในการควบคุมการตั้งตำแหน่งอ้างอิงแกน X และแกน Z
6. ส่วนของหน้าจอที่ใช้ในการควบคุมการเปิด/ปิด และสายเข้า/ออก ของชุดงานเจียรไน
7. ส่วนของการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ระยะสั้น ตามแกนมอเตอร์ที่เลือกใช้ในส่วนของ 2
8. ส่วนของการเก็บข้อมูลในการเจียรไนพลอย เช่น ค่าตำแหน่ง ค่ากระแสไฟที่จ่ายเข้ามอเตอร์ ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ และสัญญาณควบคุม
9. ส่วนแสดงระยะระหว่างจุดศูนย์กลางพลอยไปจนถึงงานเจียรไนเป็นหน่วยมิลลิเมตร

ค.1.1 การเชื่อมต่อโปรแกรมกับเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ

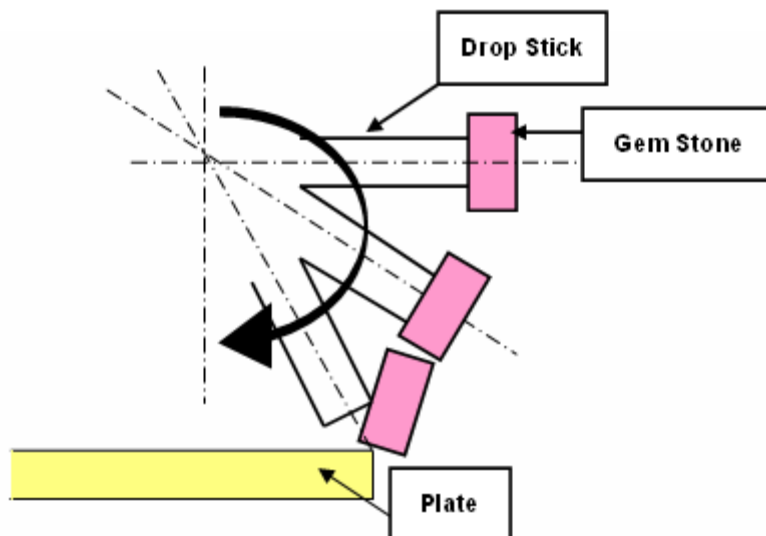
หลังจากจากเปิดโปรแกรมมาแล้วให้เลือกเชื่อมต่อกับเครื่องเจียรไนพลอยดังรูปที่ ค.2 เพื่อใส่ไฟล์ที่มีค่าพารามิเตอร์ของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติอยู่ แล้วกำหนดขนาดของเม็ดพลอยที่ต้องการเจียรไน



รูปที่ ค.2 แสดงลำดับการเชื่อมต่อเครื่องของโปรแกรม CU Gem Grinding

ค.1.2 การตั้งตำแหน่งอ้างอิงของแกน x และ z

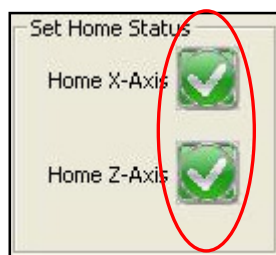
ก่อนการใช้งานโปรแกรมต้องมีการตั้งตำแหน่งอ้างอิงก่อนเสมอ โดยต้องตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแกน X และแกน Z ก่อนเป็นอันดับแรก มิฉะนั้นแล้วโปรแกรมจะไม่สามารถใช้งานฟังก์ชันใดๆได้ โดยแนะนำให้ตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแกน z ก่อน เพื่อไม่ให้พลอยที่ติดอยู่ปลายทวนติดพลอยในแกน x มีโอกาสไปชนกับงานเจียรไนพลอยได้ดังรูปที่ ค.3 ซึ่งเป็นการตั้งตำแหน่งอ้างอิงแกน x ก่อน ในขณะที่แกน z อยู่ต่ำเกินไป



รูปที่ ค.3 ตั้งตำแหน่งอ้างอิงแกน x ในขณะที่แนวแกน z ต่ำเกินไป [2]

โดยการตั้งตำแหน่งอ้างอิงสามารถทำได้ดังนี้

1. คลิกเครื่องหมายถูกข้างหน้า check box ในแต่ละแกนในส่วนหมายเลข 1 ในรูป ค.1 ทั้งหมดก่อนเพื่อเป็นการบอกเครื่องว่าพร้อมจ่ายไฟให้แกนนั้นแล้ว
2. กดปุ่ม HomeZ ในส่วนหน้าจอ Set Home หรือส่วนหมายเลข 5 ในรูป ค.1 จากนั้นแกน z ของเครื่องจะวิ่งเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงเองโดยอัตโนมัติ
3. รอจนกระทั่งสัญลักษณ์กากบาทสีแดงในหน้าจอแสดงสถานะ หรือส่วนหมายเลข 3 ในรูป ง. 1 ของส่วน Set Home Status ของ Z-Axis กลายเป็นเครื่องหมายถูกสีเขียว
4. จากนั้นตั้งตำแหน่งอ้างอิงในแกน x โดยกดปุ่ม HomeX ในส่วนหน้าจอ Set Home จากนั้นแกน x ของเครื่องจะวิ่งเข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงเองโดยอัตโนมัติ
5. รอจนกระทั่งสัญลักษณ์กากบาทสีแดงในหน้าจอแสดงสถานะของส่วน Set Home Status ของ X-Axis กลายเป็นเครื่องหมายถูกสีเขียว
6. หลังจากเครื่องหมายถูกสีเขียวปรากฏขึ้นบนตำแหน่งอ้างอิงในแกน x และ z ดังรูปที่ ค.4 แล้ว สามารถใช้งานฟังก์ชันอื่นได้ตามปกติ

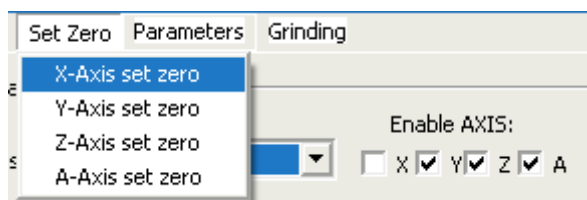


รูปที่ ค.4 สถานะของตำแหน่งอ้างอิงแกน z หลังจากตั้งตำแหน่งอ้างอิงแล้ว

ค.1.3 การตั้งตำแหน่งอ้างอิงใดๆหลังจากใช้งานไปแล้ว

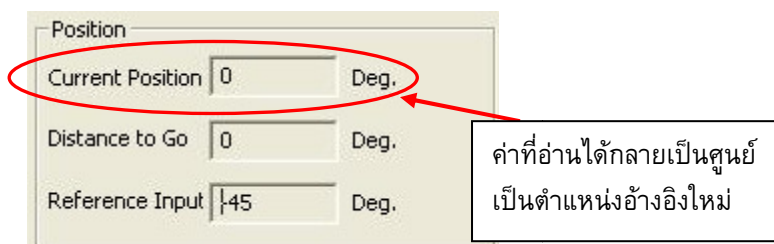
หลังจากที่มีการใช้งานเครื่องไปแล้ว ผู้ใช้อาจมีความจำเป็นที่ตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ให้กับเครื่อง นั่นก็คือการตั้งตำแหน่งที่เป็น 0 ใหม่ ให้กับเครื่อง ซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. ขยับแกนที่ต้องการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ ไปยังตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการ โดยการสั่งโดยโปรแกรม หรือใช้มือในการเลื่อนก็ได้ ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างของแกน x
2. จากนั้นสังเกตว่าตำแหน่งที่อ่านได้ในแกนจะเป็นค่าตำแหน่งใดๆที่ผู้ใช้ต้องการกำหนดให้เป็นตำแหน่งอ้างอิงใหม่
3. จากนั้นให้กดเอาเครื่องหมายถูกหน้าคำว่า Enable Axis ของแกนที่ต้องการจะตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่ ออก
4. ทำการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่โดยไปที่แถบทูลบาร์แล้วเลือก Set Zero -> X-Axis set zero ดังรูปที่ ค.5 จากนั้นให้คลิกหนึ่งครั้ง



รูปที่ ค.5 ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการตั้งตำแหน่งอ้างอิงใหม่

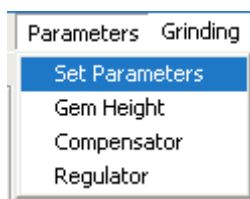
5. จะพบว่าตอนนี้ตำแหน่งที่เราเลื่อนแกนมาได้กลายเป็นตำแหน่งอ้างอิงใหม่แล้ว โดยค่าตำแหน่งจะกลายเป็นศูนย์ ดังรูปที่ ค.6



รูปที่ ค.6 หน้าต่างแสดงตำแหน่งอ้างอิงใหม่ มีค่าตำแหน่งเป็นศูนย์

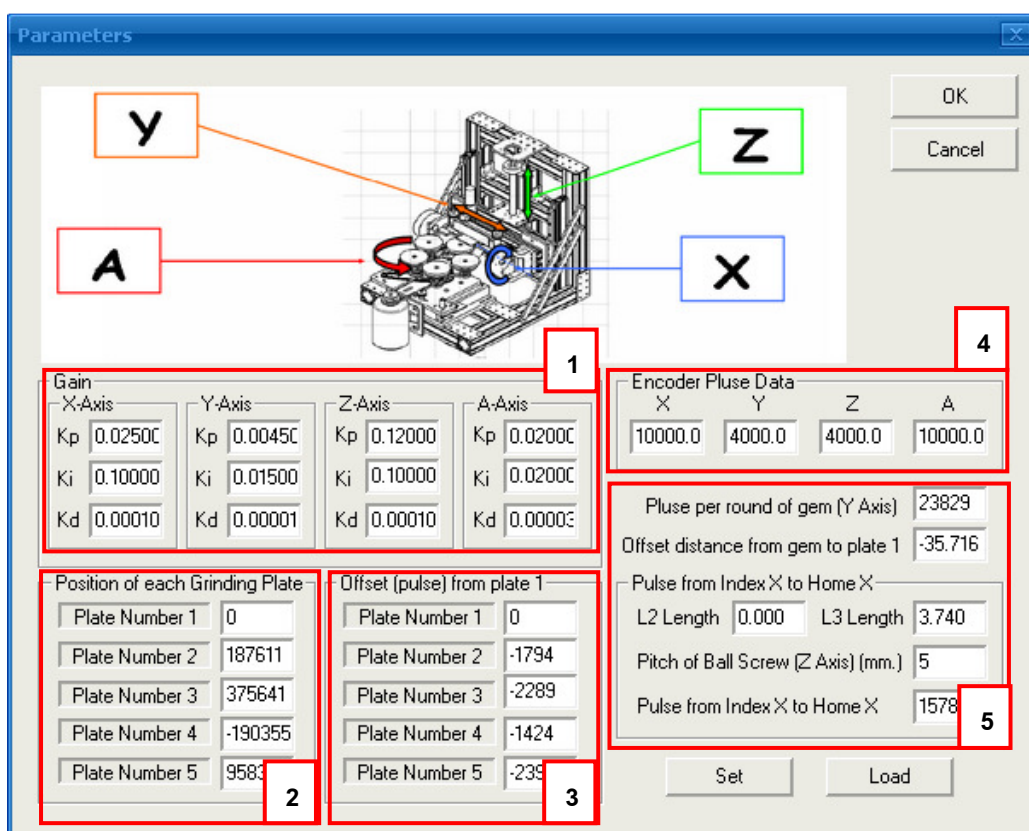
ค.1.4 การตั้งค่าพารามิเตอร์เครื่องหลังจากใช้งานไปแล้ว

ในการใช้งานบางทีต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์เครื่องใหม่ เช่น ระยะห่างระหว่างจานเจียระไน ระยะห่างของความสูงพลอยจากจานเจียระไน ค่าแกนของมอเตอร์ในแต่ละแกน เป็นต้น โดยการเลือกทูลบาร์ที่ Parameters -> Set Parameters ดังรูปที่ ค.7 จากนั้นให้คลิกหนึ่งครั้ง



รูปที่ ค.7 ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการตั้งค่าพารามิเตอร์ของเครื่องเจียรระโนพลอย

หลังจากเลือกแล้วหน้าต่างโปรแกรมที่ขึ้นมาใหม่มีหน้าต่างดังรูปที่ ค.8 โดยอธิบายแต่ละส่วนได้ดังนี้



รูปที่ ค.8 หน้าต่างโปรแกรมแสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมเครื่อง

1. ส่วนของหน้าจอแสดงค่าเกณฑ์ควบคุมต่างๆในการควบคุมมอเตอร์ในแต่ละแกน
 2. ส่วนของหน้าจอแสดงค่าตำแหน่งของงานเจียรระโนในแต่ละงานในรูปของพัลส์
 3. ส่วนของหน้าจอแสดงตำแหน่งระยะห่างระหว่างแต่ละงานเจียรระโนในรูปของพัลส์โดยค่าลบหมายความว่าอยู่ต่ำกว่า ค่าบวกหมายความว่าอยู่สูงกว่าเมื่อเทียบกับงานเจียรระโนงานแรก
 4. ส่วนของหน้าจอแสดงความละเอียดของเอ็นโคดเดอร์ที่ใช้ในแต่ละแกน
 5. ส่วนของหน้าจอแสดงค่าที่จำเป็นต่างๆ ในการควบคุมเครื่อง เช่น ค่าจลน์ศาสตร์ ค่าระยะต่อรอบของบอลสกรู และค่าความสูงจากงานเจียรระโนแรกในรูปหน่วยมิลลิเมตร เป็นต้น
- โดยเมื่อเปิดหน้าจอขึ้นมาแล้วการแก้ไขค่าก็ทำได้ง่ายเพียงแค่เปลี่ยนค่าบนหน้าจอแสดงผล จากนั้นกดปุ่ม Set หรือกดปุ่ม Load เพื่อนำค่าที่ได้บันทึกเก็บไว้ในรูปแบบไฟล์ขึ้นมา

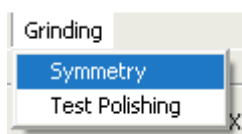
ค.2 การเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ

หลังจากเปิดโปรแกรมและตั้งค่าตำแหน่งอ้างอิงทั้งหมดแล้วจะได้หน้าต่างแสดงสถานะต่างๆ มีหน้าตาดังรูปที่ ค.9

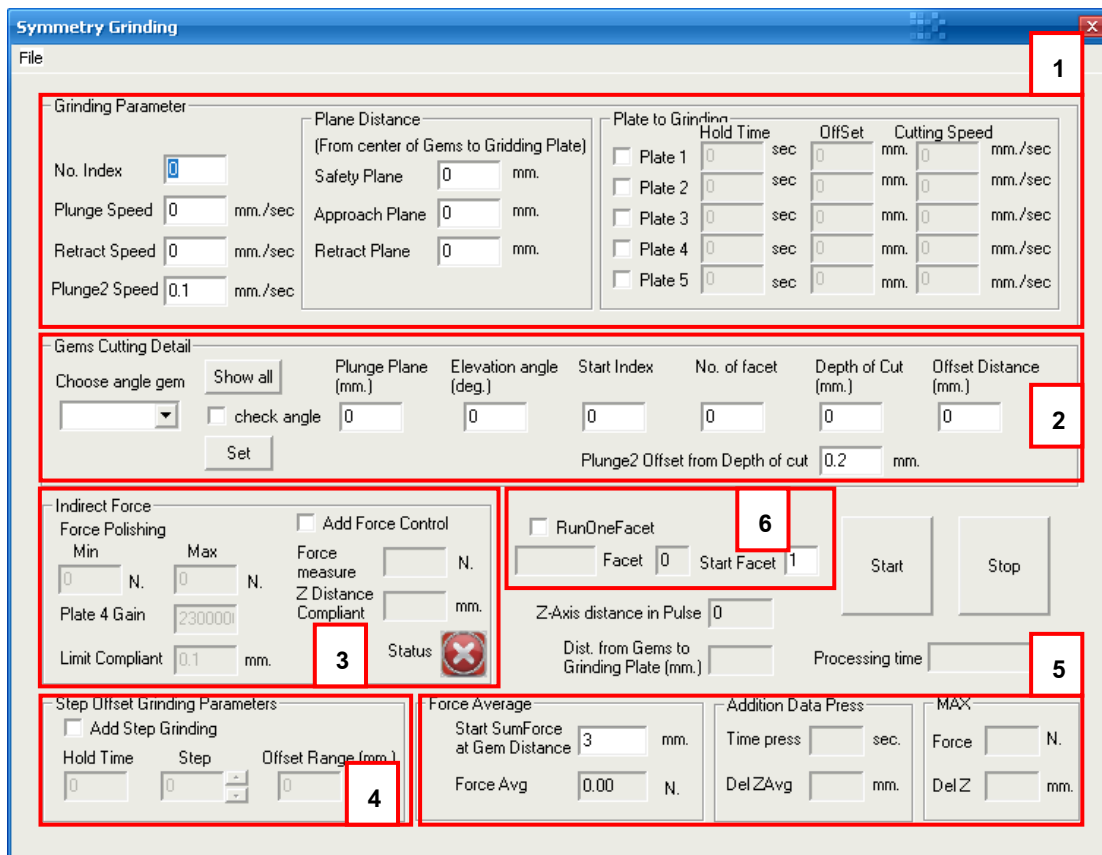


รูปที่ ค.9 หน้าต่างโปรแกรมหลักที่แสดงสถานะพร้อมการใช้งาน

จากนั้นให้เลือกทูลบาร์ที่ Grinding -> Symmetry ดังรูปที่ ค.10 จากนั้นให้คลิกหนึ่งครั้ง เพื่อเรียกหน้าต่างการเจียรไนพลอยดังรูปที่ ค.11



รูปที่ ค.10 ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการเจียรไนพลอย

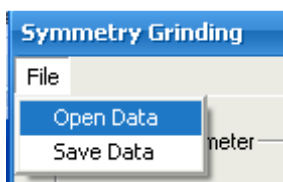


รูปที่ ค.11 หน้าต่างโปรแกรมหลักใช้ควบคุมการเจียรระไนพลอย

จากหน้าต่างดังรูปที่ ค.11 สามารถอธิบายแต่ละส่วนของโปรแกรมได้ดังนี้

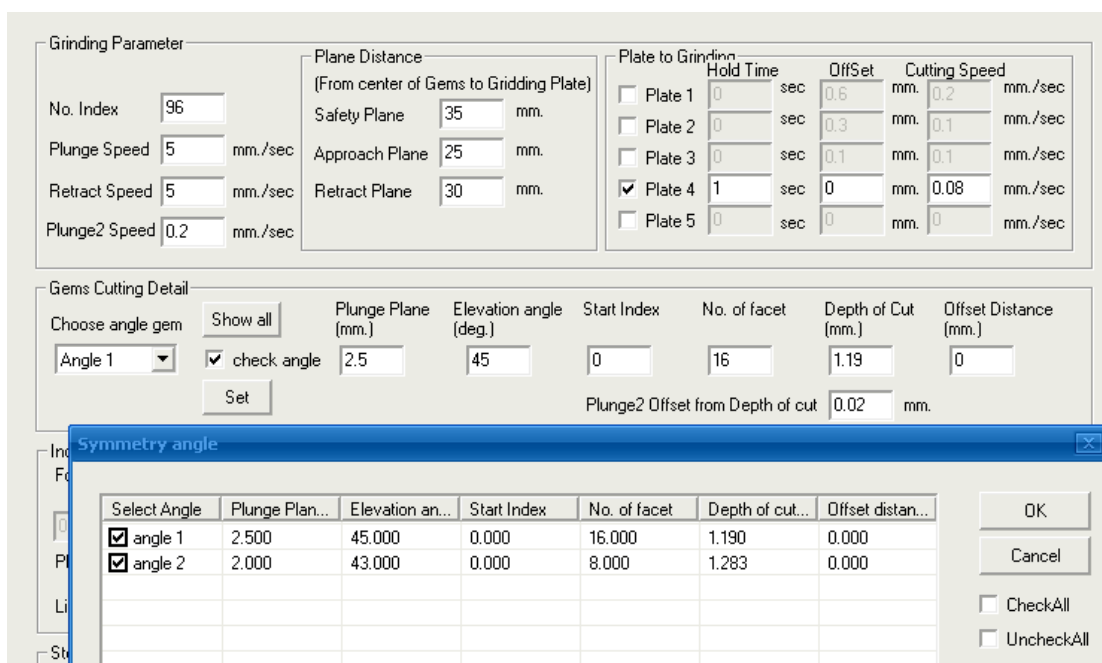
1. ส่วนของหน้าจอแสดงค่าที่ใช้ในการควบคุมการเจียรระไนพลอยในส่วนของการเคลื่อนที่ในแนวแกน z เช่น ค่าระยะความปลอดภัย ระยะก่อนถึงงานเจียรระไน ระยะห่างจากแบบพลอยในแต่ละงานเจียรระไน เป็นต้น
2. ส่วนของการควบคุมพารามิเตอร์ของพลอยตามที่ออกแบบไว้ เช่น มุมยกที่ใช้เจียรระไน จำนวนหน้าพลอยที่ต้องการเจียรระไนในมุมยกนั้น ระยะลึกในการกัดพลอย เป็นต้น
3. ส่วนของการกำหนดแรงควบคุมในการเจียรระไน โดยมีการกำหนดขอบเขตแรงกดขั้นต่ำกับแรงกดขั้นสูง ค่าคงที่การหยุดตัว และค่ากดเพิ่มสูงสุด
4. ส่วนของการควบคุมการทำงานการกัดพลอยให้มีระยะการกดแบบเป็นขั้นบันได โดยแต่ละขั้นบันไดสามารถกำหนดระยะเวลาแช่พลอยได้
5. ส่วนของการวัดแรงในขณะเจียรระไนพลอย เช่น เวลาในการกัด แรงกดเฉลี่ย แรงกดสูงสุด ระยะลึกในการกัดเฉลี่ย ระยะลึกในการกัดสูงสุด
6. ส่วนของการกำหนดว่าจะให้พลอยนั้นเริ่มเจียรระไนที่หน้าที่เท่าไร หรือให้เจียรระไนแค่หน้าเดียว ในส่วนนี้เหมาะสำหรับเวลาเครื่องมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น

ในการเจียรระไนพลอยนั้นอย่างแรกที่ต้องทำคือ การเรียกไฟล์ที่บันทึกจากโปรแกรมซียู-โซลิตขึ้นมา โดยเลือกทูลบาร์ที่ File -> Open Data ดังรูปที่ ค.12 จากนั้นให้คลิกหนึ่งครั้ง



รูปที่ ค.12 ตำแหน่งบนทูลบาร์ที่ใช้ในการเรียกไฟล์บันทึกพารามิเตอร์ของพลอย

หลังจากเรียกไฟล์บันทึกมาแล้วหน้าต่างโปรแกรมในรูป ค.11 จะเปลี่ยนไปเป็นแบบรูปที่ ค.13



รูปที่ ค.13 หน้าต่างแสดงค่าทั้งหมดของพลอยที่ใช้ในการเจียรระไน

จากรูปที่ ค.13 หน้าต่างนี้ถูกเรียกมาได้โดยการคลิกที่ปุ่ม Show all ในส่วนที่ 2 ของรูปที่ ค.11 ซึ่งเป็นค่าต่างๆ ในการเจียรระไนพลอยที่นำมาจากโปรแกรมซียู-โซลิตโดยสามารถอธิบายค่าต่างๆ ได้ดังนี้

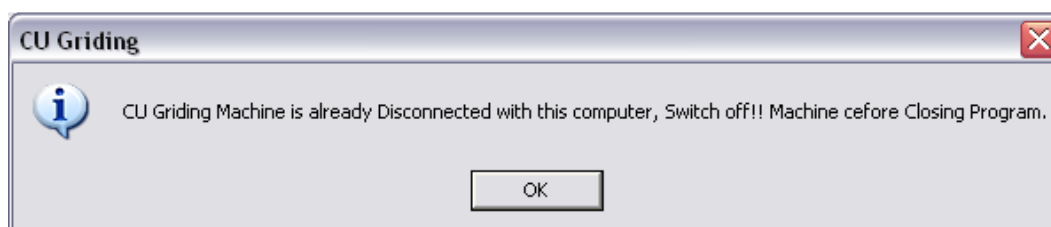
Plunge Plane	แทนระยะที่แกน z กดลงมาก่อนถึงงานเจียรระไน และเป็นระยะที่สามารถหมุนเปลี่ยนหน้าพลอยได้โดยไม่ถูกงานเจียรระไน
Elevation angle	แทนมุมยกของพลอยในการเจียรระไน
Start Index	แทนมุมในการเริ่มของหน้าพลอยที่ต้องการเจียรระไน
Depth of Cut	แทนระยะลึกในการเจียรระไนพลอย
Offset Distance	ระยะความผิดพลาดของพลอยจากแบบที่ได้จากซียู-โซลิต
Plunge Plane 2	แทนระยะที่แกน z กดลงมากล้นงานเจียรระไนมากที่สุด

หลังจากทำการตรวจเช็คค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เรียบร้อยแล้วให้กดปุ่ม Start ในรูปที่ ค.11 เพื่อให้โปรแกรมทำงานไปตามกระบวนการเจียระไนพลอยจนจบโปรแกรม

ค.3 การปิดการทำงานของโปรแกรม

เมื่อใช้งานเสร็จสิ้นการปิดโปรแกรมสามารถทำได้ดังนี้

1. ที่หน้าต่างหลักของโปรแกรมหลักไปที่แถบทูลบาร์ เลือก Connection -> Disconnect ที่อยู่ในส่วนที่ 1 ของรูปที่ ค.1 เพื่อปิดการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม และเครื่องเจียระไน
2. เมื่อกดแล้วให้รอทุกแกนของเครื่องเจียระไนจะเคลื่อนที่กลับสู่จุดอ้างอิงของเครื่อง จากนั้นจะขึ้นข้อความเตือนให้ปิดเครื่องเจียระไนพลอยดังรูปที่ ค.14 ให้ปิดสวิทช์เครื่องเจียระไนพลอย จากนั้นกดปุ่ม OK



รูปที่ ค.14 ข้อความเตือนหลังจากปิดการเชื่อมต่อ

3. ปิดโปรแกรมเพื่อจบการทำงาน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชณัยณัฐ แก้วทอง เกิดเมื่อวันที่ 6 มกราคม พ.ศ. 2530 เป็นคนจังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2551 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552