

## การควบคุมตำแหน่งและแรงกดทางอ้อมสำหรับการขัดชิ้นงานพลอยด้วย เครื่องเจียรในพลอยแบบอัตโนมัติ

### Position and Grinding Indirect Force Control of polishing by an Automatic Faceting Machine

ชนัยณัฐ แก้วทอง<sup>1</sup> และ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

\*ติดต่อ: [Chanainat.K@student.chula.ac.th](mailto:Chanainat.K@student.chula.ac.th)<sup>1</sup>, [Viboon.S@eng.chula.ac.th](mailto:Viboon.S@eng.chula.ac.th)<sup>2</sup>, โทร 0-2218-6610-1, โทรสาร 0-2252-8889

#### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบควบคุมที่ผสมผสานระหว่างการควบคุมตำแหน่งและการควบคุมแรงกดเจียรระไน โดยทราบแบบจำลองสภาพแวดล้อมที่หาได้จากการทดลองจากการเจียรระไนพลอยโดยใช้เครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นจะควบคุมตำแหน่งการเจียรระไนพลอยที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายทวนจับพลอย ในขณะที่เดียวกันก็จะควบคุมแรงกดโดยใช้การการควบคุมแรงแบบทางอ้อม (indirect force control) จากแบบจำลองสภาพแวดล้อมที่หาได้จากการทดลอง โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงกดกระทำ ความสามารถในการควบคุมแรงกดจะช่วยทำให้การขัดชิ้นงานทำได้ดีขึ้น และเป็นส่วนสำคัญที่จะนำไปพัฒนาระบบควบคุมเพื่อให้การเจียรระไนพลอยมีคุณภาพมากขึ้น เช่น ลดระยะเวลาของการขัดชิ้นงาน เป็นต้น

**คำหลัก:** เครื่องเจียรระไนพลอยอัตโนมัติ, การควบคุมตำแหน่งและแรงกดทางอ้อม, แบบจำลองสภาพแวดล้อม

#### Abstract

This research work is to develop a controller that combines the position control and grinding force control at the tool tip, or end of drop-stick, of an automatic faceting machine developed in-house. The controller will responsible both position control of the end of drop-sticks which jewels are attached and grinding force without force sensor installed. The force control part is based on compliance control. The compliance of the environment (contact between jewels and the grinding wheel) is obtained experimentally. Adding in-direct force control at the end of drop-stick to the typical motion control by knowing grinding environment model can improve grinding efficiency which will affect the grinding time as well as polishing quality.

**Keywords:** Automatic Faceting Machine, Position and indirect force control, Environment model



เครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

## 1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมอัญมณีของประเทศไทยถือเป็นอุตสาหกรรมระดับต้นๆที่นำรายได้เข้าสู่ประเทศ แต่โรงงานอุตสาหกรรมที่มีมากกว่า 700 โรงงานปัจจุบันส่วนใหญ่ยังคงตอบสนองความต้องการของตลาดได้เพียงระดับกลางและล่างเท่านั้น ส่งผลให้ประเทศคู่แข่งที่กำลังพัฒนาอุตสาหกรรมประเภทนี้ เช่น อินเดีย จีน ปากีสถาน สามารถผลิตออกมาแข่งได้ง่ายกว่าเนื่องจากประเทศเหล่านี้มีจุดแข็งที่สำคัญคือ ค่าแรงที่ต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาถึงแนวทางในการพัฒนาคุณภาพการผลิตของประเทศพบว่าปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยคือ อุตสาหกรรมในอดีตที่ผ่านมาเป็นอุตสาหกรรมที่พึ่งพาการออกแบบและอาศัยคนเป็นหลัก ทำให้พลอยสังเคราะห์ในตลาดขนาดใหญ่ที่จำเป็นต้องใช้จำนวนมากไม่สามารถผลิตออกมาได้ทันด้วยแรงงานคน เพราะการที่แรงงานคนไม่สามารถทำให้พลอยสังเคราะห์ที่ออกมามีขนาดที่ uniform ตลอดทุกการผลิตได้ ดังนั้นในปัจจุบันการผลิตพลอยด้วยเทคโนโลยีเก่าจึงไม่สามารถตอบสนองได้ทัน ส่งผลให้ประเทศไทยต้องพัฒนาความสามารถในการผลิตให้เพียงพอ

ทางห้องปฏิบัติการวิจัยระบบผลิตขั้นสูง จึงได้ทำการวิจัย ออกแบบ และสร้างเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ ขึ้นมาใช้งาน พร้อมทั้งปรับปรุงเครื่องจักรดังกล่าว ให้สามารถทำงานเจียรไนเหลี่ยมพลอยได้แบบอัตโนมัติ โดยสั่งการทำงานและประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นผลให้ทำงานได้เร็วและแม่นยำกว่ามนุษย์แต่ในการเจียรไนพลอยแบบใช้คน (Manual) นั้น การขัดขึ้นเงาทำได้ดีกว่าการเจียรไนแบบอัตโนมัติ ทั้งนี้เนื่องจากคนสามารถรับรู้ความรู้สึกของแรงได้ และหากการเพิ่มในส่วนการรับรู้แรงนี้ โดยการติดตั้ง force

sensor ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและยากต่อการบำรุงรักษา อีกทั้งอาจจำเป็นต้องติดตั้งที่ทวนจับพลอยทุกด้านก็เป็นได้ ส่งผลให้ต้นทุนราคาเครื่องสูงขึ้นเป็นอย่างมาก ดังนั้นการพัฒนาวิธีการหรือเทคนิค เพื่อเพิ่มการรับรู้แรงจากสภาพแวดล้อมเข้าไปอยู่ในส่วนของระบบควบคุมตำแหน่งจึงเป็นงานวิจัยหลักโดยครอบคลุมในส่วนการปรับปรุงตัวควบคุมการทำงาน และมีส่วนของแรงภายนอกมากกระทำกับระบบ เป็นการควบคุมตำแหน่งและแรงเจียรไนทางอ้อม รวมถึงการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการสั่งงานเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ แต่ที่รายงานในส่วนนี้จะครอบคลุมเฉพาะการทดลองเพื่อหาการควบคุมแรงที่เหมาะสมในการเจียรไนการขัดขึ้นเงา โดยจำลองการหยุดตัวของสภาพแวดล้อม หรือ compliance behavior ของการเจียรไน โดยการกำหนดขนาดของแรงในการกดจากระยะที่ก่ตร่วมกับค่าคงที่การหยุดตัวของสภาพแวดล้อม พร้อมทั้งกำหนดขนาดของอัตราเร็วในการเจียรไนต่างๆ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการเจียรไนการขัดขึ้นเงา เพื่อปรับปรุงระบบควบคุมแบบแรงและตำแหน่งต่อไป

## 2. โครงสร้างและหลักการทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ

สำหรับลักษณะโครงสร้างของเครื่องเจียรไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ ได้ถูกออกแบบโดยพิจารณาควบคุมตัวแปรทั้งหมดที่มีผลต่อการกำหนดรูปร่างเหลี่ยมมุม และขนาดของพลอย ในการเจียรไนพลอยนั้นไม่ว่ารูปแบบการเจียรไนจะเป็นเช่นไรก็ตามจะมีตัวแปรเพียง 3 ตัว ที่ต้องทำการควบคุมตามรูปที่ 1

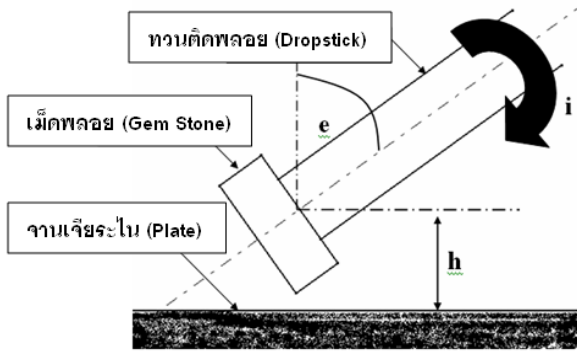
### 2.1 ตัวแปรที่ต้องทำการควบคุมในการเจียรไนพลอย

**2.1.1. มุมดรรชนี (Index Angle:  $i$ )** ตัวแปรนี้เป็นตัวแปรที่กำหนดว่าในแต่ละเหลี่ยมของการเจียรไนนั้นพลอยจะมีทั้งหมดกี่หน้าโดยการแบ่งมุมดรรชนียิ่งมากส่งผลให้การเจียรไนเหลี่ยมละเอียดมากขึ้นตามไปด้วย โดยแกน Y ของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติจะเป็นตัวควบคุมตัวแปรนี้

**2.1.2. มุมยก (Elevation Angle:  $e$ )** ตัวแปรนี้เป็นตัวแปรที่กำหนดมุมเหลี่ยมของพลอยว่าให้เหลี่ยมนั้นมีมุมกึ่งศา โดยมุมนี้จะวัดจากจุดกึ่งกลางทวนติดพลอยตามแนวทวนเทียบกับแกนแนวตั้ง โดยที่แกน X ของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติจะเป็นตัวควบคุมตัวแปรนี้

**2.1.3. ความลึกในการกัด (Depth of cut :  $h$ )** ตัวแปรนี้เป็นตัวแปรที่กำหนดขนาดของพลอย โดยที่แกน Z ของ

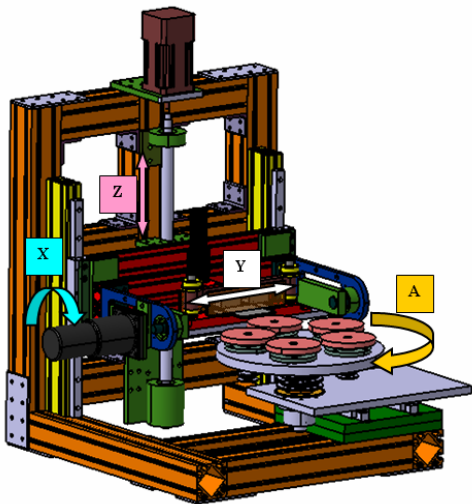
เครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติจะเป็นตัวควบคุมตัวแปรนี้



รูปที่ 1 ตัวแปรที่มีผลต่อรูปร่าง และขนาดของพลอย

## 2.2. รูปแบบโครงสร้างภายนอกและการทำงาน

จากหัวข้อที่แล้วเครื่องเจียรไนพลอยจะประกอบไปด้วยแกนการเคลื่อนที่ทั้งสิ้น 4 แกน คือ แกน X, แกน Y, แกน Z และแกน A (แกนที่ใช้ในการเปลี่ยนความละเอียดจานเจียรไน) ดังรูปที่ 2 โดยแต่ละแกนทำให้เกิดผลต่อรูปร่างของพลอยที่ผ่านการเจียรไนแตกต่างกันออกไป นอกจากแกนการเคลื่อนที่ทั้ง 4 แกนแล้ว ยังมีส่วนที่เป็นชุดขับให้จานเจียรไนหมุนได้ และส่วนกลไกที่ทำให้เกิดการส่ายจานเจียรไนเข้าออกด้วย



รูปที่ 2 โครงสร้างภายนอกของเครื่องเจียรไนพลอยจุฬา แบบอัตโนมัติ

การทำงานของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติในส่วนของโปรแกรมควบคุมนั้นถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ ผู้ใช้งานต้องทำการป้อนตำแหน่งและความเร็วในการเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยส่วนของแกน X, Y, Z และ A นั้น เคลื่อนที่โดยอาศัยเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นตัวขับ

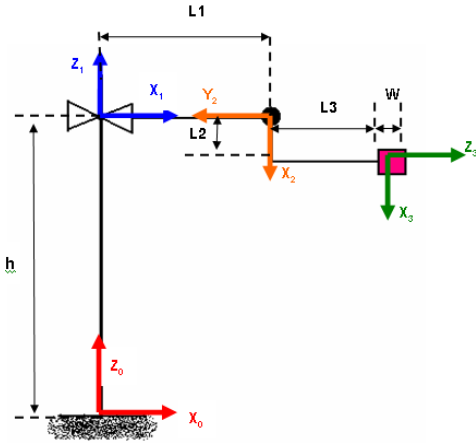
และเอ็นโคดเดอร์ (Encoder) เป็นตัวจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ เพื่อนำกลับไปประมวลผลในโปรแกรม ส่วนของ I/O Port นั้น ได้แก่ ส่วนขับจานเจียรไนให้หมุน (Spindle) ส่วนของการส่ายชุดจานเจียรไน (Crank) และส่วนของสวิตช์สำหรับป้องกันการชนของเครื่อง (Limit Switch) ซึ่งเป็นส่วนที่ควบคุมแบบ เปิด-ปิด และใช้ตรวจสอบการกด-ปล่อยของสวิตช์เท่านั้น ไม่ได้มีการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็ว

## 3. จลศาสตร์ของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ

รายละเอียดในการหาจลศาสตร์ของเครื่องเจียรไนพลอยสามารถดูรายละเอียดได้ที่เอกสารอ้างอิง แต่เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจเนื้อหาทางวิจัยนี้สะดวกขึ้น รายละเอียดบางประการที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยนี้จะถูกนำมากล่าวอีกครั้ง

ในการหาจลศาสตร์ของเครื่องเจียรไนพลอยแบบอัตโนมัติ นั้น พิจารณาการเคลื่อนที่ของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพลอย เทียบกับตำแหน่งของจานเจียรไนในทิศทางตั้งฉากกับจานเจียรไนเท่านั้น ดังนั้นการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y จะไม่มีผลต่อตำแหน่งจุดศูนย์กลางของพลอย เมื่อเทียบกับจานเจียรไน แกนที่มีผลต่อตำแหน่งดังกล่าว มีเพียงแกน Z ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้น-ลง และแกน X ที่ควบคุมมุมยกเท่านั้น สามารถเขียนแผนภาพจำลอง และติดเฟรม (frame) เพื่อใช้ในการหาจลศาสตร์ของเครื่องเจียรไนพลอยอัตโนมัติตามรูปที่ 3 โดยกำหนดให้

- H แทนระยะการเคลื่อนที่ในแกน Z ที่ห่างจากจานเจียรไน
- L1 แทนระยะจากแนวแกน Z ถึงจุดหมุนของแกน X
- L2 แทนระยะจากจุดหมุนของแกน X ไปถึงกึ่งกลางของทวนตีคพลอย ตามแนวรัศมีของทวนตีคพลอย
- L3 แทนระยะจากจุดหมุนของแกน X ไปถึงตำแหน่งปลายทวนตีคพลอย ตามแนวแกนของทวนตีคพลอย
- W แทนขนาดความสูงของเม็ดพลอยที่จะทำการเจียรไน



รูปที่ 3 แสดงแผนภาพจำลองของเครื่องเจียระไนพลอยแบบอัตโนมัติ พร้อมการติดเฟรม

จากระบบพิกัดที่กำหนดสามารถนำไปเขียนตารางแสดง Denevit-Hartenberg parameter ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์ Denevit-Hartenberg ของแต่ละส่วนของเครื่องเจียระไนพลอย

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

### 3.1. ฟอว์เวิร์ดคิเนมาติกส์ (Forward Kinematics) และอินเวอร์สคิเนมาติกส์ (Inverse Kinematics)

จาก DH-Parameter โดยวิธีการหาของ ปรัชญา พิพัฒนานนท์ และคณะ (2552) [2] สามารถหาฟอว์เวิร์ดคิเนมาติกส์ คือ

$$Z = h + \left( L_3 + \frac{W}{2} \right) C_{\theta_2} - L_2 S_{\theta_2} \quad (1)$$

Z แทนระยะจากจุดศูนย์กลางเม็ดพลอยถึงงานเจียระไนในแนวตั้งฉากกับงานเจียระไนเท่านั้น

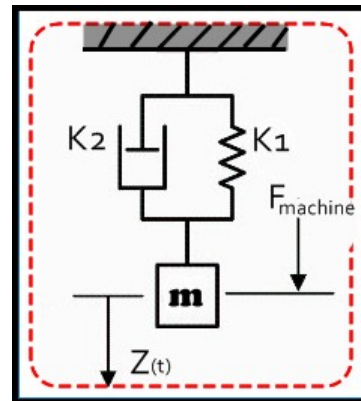
แต่หากว่าผู้ใช้ต้องการสั่งให้จุดศูนย์กลางเม็ดพลอยอยู่ห่างจากงานเจียระไนเป็นระยะทางเท่าไรนั้นจำเป็นต้องหา Inverse Kinematics ในแนวแกน z มาใช้ โดยอาศัยการกำหนดมุมยกในแกน x ไว้ก่อน จากนั้นสั่งไปว่าต้องการให้จุดศูนย์กลางของเม็ดพลอยห่างจากงานเจียระไนเป็นระยะเท่าไร โปรแกรมจะทำการคำนวณหาตำแหน่งปลายที่ต้องเคลื่อนที่ไปในแนวแกน z ออกมา และสั่งให้แกน z วิ่งไปที่ตำแหน่งดังกล่าว ทำให้เม็ดพลอย

ไปอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการได้ ซึ่งระยะห่างดังกล่าวนี้คือตัวแปร h ดังสมการ

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

### 3.2. แบบจำลองของการควบคุมแรงกด

การควบคุมแรงกดในการขัดเจ้านั้นขึ้นกับแรงขับเคลื่อนมอเตอร์ตามแนวแกน z ที่ส่งถ่ายแรงผ่านบอลสกรูโดยมีสปริงสี่เส้นเป็นตัวทดน้ำหนัก (counter balance) ของตัวชุดจับทวนพลอยซึ่งมีการเคลื่อนที่ไปพร้อมกันกับทวนติดพลอยในแนวแกน z ตัวถ่วงหรือทดน้ำหนักนี้ทำให้ผลเนื่องจากน้ำหนักที่มีต่อแรงขับเคลื่อนน้อยลง ทำให้มอเตอร์ทำงานน้อยลงส่งผลให้การควบคุมแรงทำได้ดีขึ้นเนื่องจากผลจากแรงเสียดทานในการขับเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่บอลสกรูมีค่าน้อยลง และเนื่องจากโครงสร้างของชุดจับทวนพลอยที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาี้มีความแข็งแรงสูง (high stiffness) ทำให้สามารถคำนวณพร้อมจำลองค่าแรงกดระหว่างงานเจียระไนกับหน้าพลอยของพลอยที่ติดอยู่กับปลายทวนติดพลอย โดยการกำหนดค่าคงที่การหยุดตัวระหว่างหน้าพลอยกับงานเจียระไน ( $K_1$ ) และค่าคงที่ความหน่วง ( $K_2$ ) ที่หาได้จากการทดลองของ ชัยฉัตร แก้วทอง และคณะ (2555) [1] และมวล m เป็นมวลของพลอยที่ติดอยู่ที่ปลายทวนติดพลอย ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงแบบจำลองแรงกดของเครื่องเจียระไนพลอย

ซึ่งโดยปกติแล้วขนาดและทิศทางของแรงกดแปรผันตรงกับค่าคงที่การหยุดตัวและค่าความหน่วงดังนั้นสามารถแสดงในสมการดังนี้

$$F_{machine} = K_1 (\Delta Z) + K_2 (\Delta \dot{Z}) \quad (3)$$

โดย  $(\Delta Z)$  คือระยะการขจัดระหว่างผิวหน้าของพลอยกับงานเจียระไนขัดเงาหรือระยะที่กดพลอย และ  $(\Delta \dot{Z})$  คือ



ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกน z หรือความเร็วในการเจียรระไนขัดเงา

#### 4. หลักการในการควบคุมเครื่องเจียรระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ

การควบคุมความแม่นยำของเครื่องเจียรระไนพลอยจิวาแบบอัตโนมัติ ในตอนนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ในแต่ละแกน โดยมี command reference เป็นค่าตำแหน่งของพลอยที่ติดอยู่ที่ปลายของทวนติดพลอย (dropstick) โดยตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งของการเจียรระไน ซึ่งในการควบคุมสามารถประมาณตัวควบคุมแบบพีไอดีในรูปลักษณะของระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time) ได้ดังนี้ คือ

$$u(k) = u(k-1) + K_p e(k) + K_i T e(k) + \frac{K_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \quad (4)$$

โดยสมการข้างต้นเป็นรูปแบบตัวควบคุมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ โดยค่า  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_D$  คือค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วน, ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ ตามลำดับ ในขณะที่ค่า  $T$  คือช่วงเวลาในการสุ่มข้อมูล หรือ sampling period โดยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของทวนจับหัวพลอยของเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัตินี้จะใช้ความถี่ในการสุ่มเท่ากับ 1,000 Hz. หรือคาบเวลาของการสุ่มเท่ากับ 0.001 วินาที และสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ในการหมุนของมอเตอร์จะใช้สัญญาณที่มีลักษณะเป็น S-curve กล่าวคือตำแหน่งของการเคลื่อนที่การหมุนของมอเตอร์จะหาได้จาก velocity profile ที่สามารถคำนวณได้จากการกำหนดระยะทางการเคลื่อนที่ ค่าความเร็วสูงสุด และค่าความเร่งซึ่งจะเท่ากับค่าความหน่วง

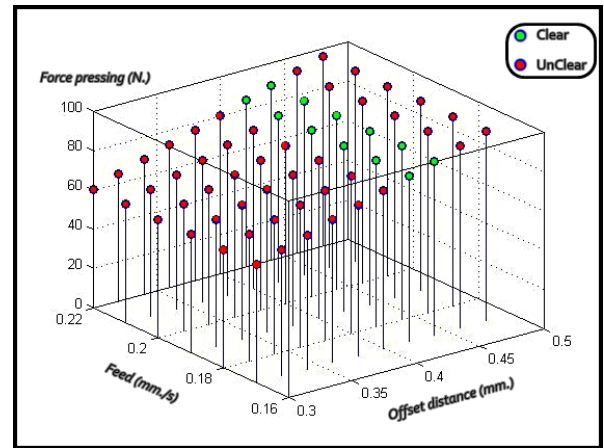
#### 5. การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อหาค่าแรงกดที่เหมาะสมสำหรับการขัดชิ้นงานพลอยโดยใช้แผ่นวัสดุที่มีค่าคงที่การหมุนตัวระหว่างหน้าพลอยกับงานเจียรระไน ( $K_1$ ) ที่มีค่าลำดับประมาณ  $2.0 \times 10^5$  และค่าความหน่วง ( $K_2$ ) ประมาณ  $2.0 \times 10^3$  โดยในการทดลองจะทำการขัดชิ้นงานของหน้าพลอยที่มุมยก 0 องศาหรือด้าน table ของพลอยที่มีการกำหนดค่าของระยะการกด ( $\Delta Z$ ) และความเร็วในการเคลื่อนที่ของแกน z ( $\Delta \dot{Z}$ ) ต่างๆ เพื่อ

นำไปประมาณค่าแรงกดของการเจียรระไนตามสมการที่ (3) และกำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหน้าพลอยห่างจากงานเจียรระไน 1.3 mm. และเจียรระไนพลอยไปเรื่อยตามค่า  $\Delta Z$  และ  $\Delta \dot{Z}$  ที่กำหนดโดยไม่มีการหยุดเม็ดพลอยในขณะที่ตำแหน่งของพลอยถึงระยะกดหรือมีการดึงพลอยกลับทันทีที่ถึงระยะกดที่กำหนดเพื่อหาช่วงของแรงกดที่เหมาะสมในการขัดชิ้นงาน

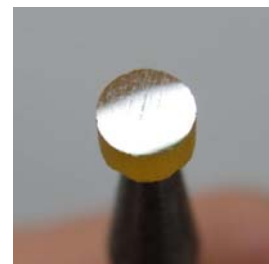
#### 5.1 ผลการทดลอง

จากการทดลองข้างต้นสามารถเก็บผลได้ตามรูปที่ 5



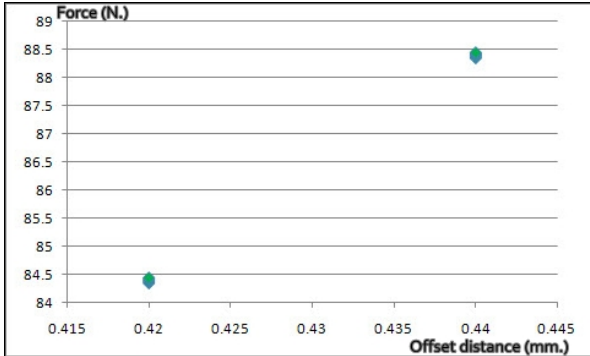
รูปที่ 5 แสดงข้อมูลของการเจียรระไนโดยวงกลมสีเขียวเป็นพลอยที่ใสและวงกลมสีแดงเป็นพลอยที่ไม่ใส

จากรูปที่ 5 แสดงผลการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขการเจียรระไนที่เหมาะสม (suitable grinding condition) ในการทดลองนี้จะเปรียบเทียบระหว่างแรงกดเจียรระไน (force pressing) ระยะเหลืออม (offset distance) ความเร็วในการเข้าเจียรระไน (feed) กับความเงาที่ได้จากการเจียรระไน โดยจะเห็นว่าเม็ดพลอยที่เจียรระไนขัดเงาแล้วเงาหรือใสกับพลอยที่เจียรระไนแต่ไม่เงาหรือไม่ใส โดยพลอยที่ไม่ใสนั้นมี 2 แบบ แบบแรกคือพลอยที่ลักษณะผิวยังทึบแสงอยู่ไม่มีการสะท้อนของแสงมองไม่เห็นตัวพลอย กับแบบสองคือพลอยที่ลักษณะผิวใสแล้วแต่เนื่องจากแรงกดที่มากเกินไปทำให้เกิดรอยขนแมวตามรูปที่ 6

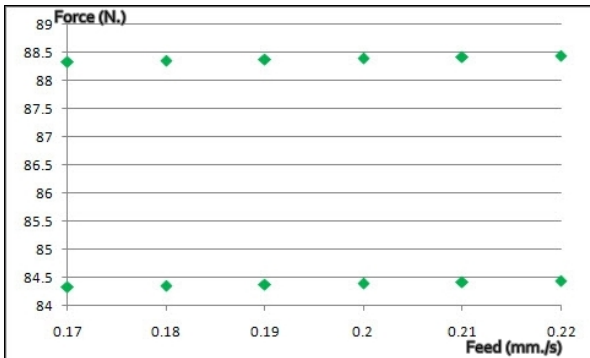


รูปที่ 6 ผิวของพลอยที่ใสแต่มีรอยขนแมว

จากนั้นเมื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเจียรระไนที่ทำให้พลอยใสกับค่าระยะการกดและความเร็วในการกดตามรูปที่ 7 และรูปที่ 8



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเจียรระไนกับระยะกดที่ทำให้พลอยใส



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดเจียรระไนกับความเร็วในการกดที่ทำให้พลอยใส

จากรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ที่แสดงข้างต้น ทำให้สามารถประมาณได้ว่าแรงกดในการเจียรระไนพลอยที่ทำให้พลอยใสควรจะอยู่ในช่วงลำดับประมาณ 80 ถึง 90 N. เนื่องจากถ้าเจียรระไนต่ำกว่า 80 N. ตัวผิวของเม็ดพลอยจะไม่ใส และถ้าเจียรระไนด้วยแรงมากกว่า 90 N. ตัวผิวของเม็ดพลอยจะเริ่มมีรอยขีดข่วนและอาจทำให้เม็ดพลอยกระเด็นหลุดจากทวนติดพลอยได้

### 6. สรุปผลการทดลอง

ค่าลำดับขนาดของแรงกดประมาณ 80 ถึง 90 N. หรือเป็นแรงกดเจียรระไนประมาณ 8 ถึง 9 กิโลกรัมนี้เป็นค่าแรงกดระหว่างผิวหน้าของเม็ดพลอยกับวัสดุขัดเงาที่มีค่าคงที่การหยุ่นตัวรวมประมาณ  $2.0 \times 10^5$  และค่าความหน่วงรวม ประมาณ  $2.0 \times 10^3$  ซึ่งค่าลำดับขนาดช่วงของแรงกดนี้ทำให้เราสามารถนำไปออกแบบระบบควบคุมแบบแรงและตำแหน่งได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากสามารถ

เพิ่มอัตราเร็วในการเจียรระไนพลอย และลดระยะการกดในการเจียรระไนขัดขึ้นเงาทำให้การออกแบบระบบควบคุมแบบแรงและตำแหน่งนี้ ส่งผลให้ช่วงระยะเวลาในการเจียรระไนพลอยขัดขึ้นเงาลดลงได้มากยิ่งขึ้น

### 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ภายใต้โครงการเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมศาสตร์สหสาขา ในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100 ปี)

### 8. เอกสารอ้างอิง

#### 8.1 บทความจากวารสาร (Journal)

[1] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ ชนัยณัฐ แก้วทอง. 2555. การควบคุมตำแหน่งและแรงกดสำหรับการเจียรระไนพลอยด้วยเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ. ใน การประชุมวิชาการของชมรมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50 วันที่ 31 มกราคม-2 กุมภาพันธ์ 2554, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หน้าที่ 112-119.

[2] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ ปรัชญา พิพัฒนานนท์. 2552. ระบบควบคุมสำหรับเครื่องเจียรระไนพลอยจุฬาแบบอัตโนมัติ. ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 23 วันที่ 4-7 พฤศจิกายน 2552, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[3] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การเกรียงไกร สันตุเตชากุล และ ปรัชญา พิพัฒนานนท์. 2551. Development of A 3-D Solid Modeling System Based on The Parasolid Kernel for Gems Stone Faceting. ใน การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 22. หน้าที่175.

#### 8.2 วิทยานิพนธ์

[1] สมจินต์ ธนานันทศิริ. การออกแบบและสร้างเครื่องเจียรระไนพลอยแบบอัตโนมัติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

#### 8.3 หนังสือ

[1] Lorenzo Sciacivco and Bruno Siciliano. 1996. Modeling and control of robot manipulators. Compliance Control: 272-276.

[2] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. 2548. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์.