

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้ ได้กล่าวถึง การเตรียมวัสดุและการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุที่นำมาใช้ในงานวิจัย การติดตั้งและปรับแต่งอุปกรณ์ ขั้นตอนการทดลองเจาะขึ้นรูปทรงกลม รวมถึงการประมวลผลการเจาะขึ้นรูปทรงกลม และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

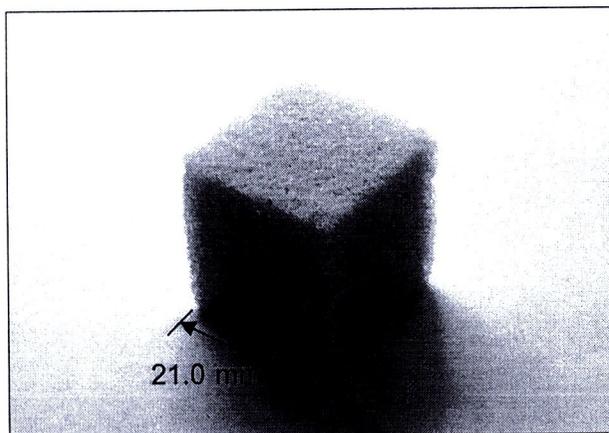
3.1 การเตรียมวัสดุและการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ วัสดุเซรามิก (Ceramic Material) ซึ่งประกอบมี ซิลิกา (Silica; SiO_2) เป็นเฟสหลัก หรือเรียกว่า วัสดุซิลิเกต (Silicate Material) โดยมีการเตรียมและการศึกษาคุณลักษณะของวัสดุ โดยแบ่งเป็นประเด็นได้ ดังต่อไปนี้

1. การเตรียมวัสดุ
2. การวิเคราะห์เฟสของวัสดุ
3. การศึกษาคุณสมบัติเชิงกายภาพ
4. การศึกษาคุณสมบัติเชิงกล

3.1.1 การเตรียมวัสดุ

สำหรับการเตรียมวัสดุเพื่อใช้ในงานวิจัยนั้น มีรูปทรงเป็นลูกบาศก์ ดังรูปที่ 3.1 โดยมีขนาดชิ้นงานมิติ กว้าง x ยาว x สูง เป็น 21 x 21 x 21 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 ลักษณะวัสดุเริ่มต้นในงานวิจัย

3.1.2 การวิเคราะห์เฟส (Phase analysis)

ในงานวิจัยนี้ศึกษาโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction; XRD) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุ ทำให้สามารถทราบถึงรูปแบบโครงสร้างผลึก หรือบ่งบอกถึงส่วนประกอบของวัสดุ โดยอาศัยหลักการของการยิงรังสีเอกซ์ ที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานและเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี ที่มีมุมต่างๆกัน โดยมีอุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) ค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนออกมา ณ มุมต่างๆ แล้วนำมาเทียบเปรียบกับโครงสร้างผลึกในฐานข้อมูล ICDD (International Center Diffraction Data) ของเครื่องทดสอบ ซึ่งจัดทำโดย JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) เนื่องจากธาตุและสารประกอบต่างๆ จะมีส่วนผสมและโครงสร้างที่แตกต่างกันไป ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนที่มีมุมที่มิต่างกัน ดังนั้นข้อมูลที่ได้ จึงสามารถบอกได้ถึงชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารทดสอบได้ (ปัญญา ธนบุญสมบัติ, 2544) สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดสอบโดยใช้ค่า 2θ (Two - Theta) ระหว่าง 20 ถึง 80 องศา (Degree)

3.1.3 การศึกษาคุณลักษณะเชิงกายภาพ (Physical properties characterization)

การศึกษาคุณลักษณะเชิงกายภาพ ได้ศึกษา ความหนาแน่นรวม ความหนาแน่นมวลวัสดุ ความพรุนตัว และขนาดรูพรุน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.3.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density)

ความหนาแน่นรวม (ρ_B) คือ อัตราส่วนระหว่างมวลของวัสดุต่อปริมาตร ซึ่งจะรวมถึงรูพรุนด้วย โดยใช้แนวทางตาม ASTM: C 373 สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 3.1

$$\rho_B = \frac{m}{V} \dots\dots\dots (3.1)$$

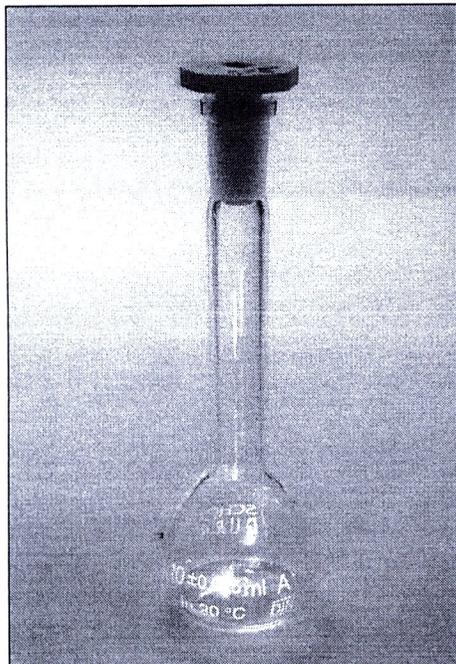
เมื่อ ρ_B = ความหนาแน่นรวม มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 m = มวล มีหน่วยเป็น กรัม
 V = ปริมาตร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.3.2 ความหนาแน่นมวลวัสดุ (Material mass density)

ความหนาแน่นมวลวัสดุ (ρ_T) คือ ความหนาแน่นของเนื้อวัสดุซึ่งไม่รวมรูพรุน สามารถหาได้โดยใช้หลอดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้แนวทางตาม ASTM: C 135 ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังสมการที่ 3.2

$$\rho_T = \frac{(\rho_{H_2O})(W - P)}{(W_1 - P) - (W_2 - W)} \dots\dots\dots (3.2)$$

- เมื่อ ρ_T = ความหนาแน่นมวลวัสดุ มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 P = น้ำหนักของหลอดพิคโนมิเตอร์เปล่าพร้อมฝาปิด มีหน่วยเป็น กรัม
 W = น้ำหนักของหลอดพิคโนมิเตอร์และสารพร้อมฝาปิด มีหน่วยเป็น กรัม
 W_1 = น้ำหนักของหลอดพิคโนมิเตอร์และน้ำพร้อมฝาปิด มีหน่วยเป็น กรัม
 W_2 = น้ำหนักของหลอดพิคโนมิเตอร์ สาร และน้ำ พร้อมฝาปิด มีหน่วยเป็น กรัม
 ρ_{H_2O} = ความหนาแน่นของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.9975 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 หลอดพิคโนมิเตอร์พร้อมฝาปิด

3.1.3.3 ความพรุนตัว (Porosity)

ความพรุนตัว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่บอกถึงปริมาณรูพรุนซึ่งอยู่ในวัสดุทั้งในเนื้อและที่ผิวของวัสดุนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ 3.3

$$\phi = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_T} \dots\dots\dots (3.3)$$

เมื่อ ϕ = ความพรุนตัว

ρ_B = ความหนาแน่นรวมมีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_T = ความหนาแน่นมวลวัสดุ มีหน่วยเป็น กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.1.3.4 ขนาดรูพรุน (Pore size)

ขนาดของรูพรุนนั้น ได้ทำการวัดขนาดโดยการถ่ายภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนนิ่ง (Scanning electron microscope).

3.1.4 การศึกษาคุณลักษณะเชิงกล (Mechanical properties characterization)

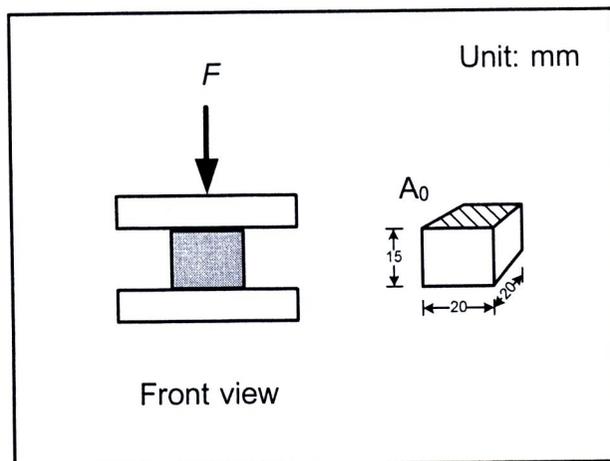
การศึกษาคุณลักษณะเชิงกลนี้ ได้ใช้เครื่องทดสอบความล้า ซึ่งสามารถให้ทดสอบได้ถึง 50 กิโลนิวตัน (kN) โดยทดสอบความสามารถในการทนแรงอัด และแรงดัดโค้ง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.4.1 ความทนแรงอัด (Compressive strength)

ความสามารถในการทนต่อแรงอัด หรือ ความเค้นแรงอัด (σ_c) หาได้จาก แรงกดสูงสุดต่อพื้นที่หน้าตัด ดังสมการที่ 3.4 โดยมีแนวทางศึกษาตามมาตรฐาน ASTM: D 1621 และใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด หน้าตัด 20 x 20 ตารางมิลลิเมตร และสูง 15 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.3

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{A_0} \dots\dots\dots (3.4)$$

- เมื่อ σ_c = ความเค้นแรงอัด มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
 F_{\max} = แรงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 A_0 = พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเริ่มต้น มีหน่วยเป็น ตารางมิลลิเมตร



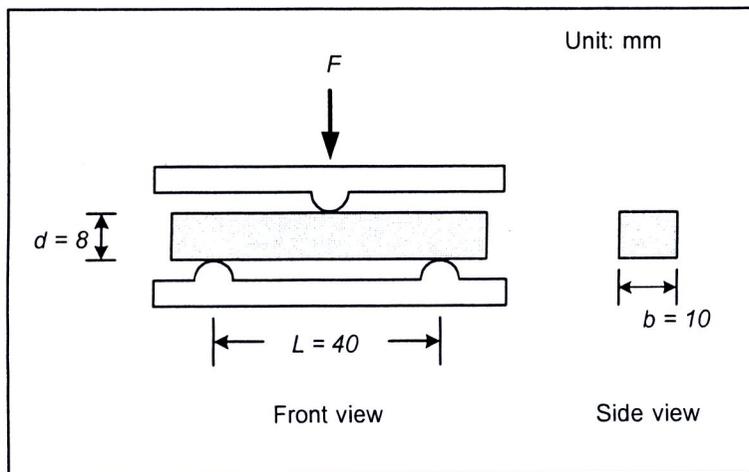
รูปที่ 3.3 การทดสอบความทนแรงอัด

3.1.4.2 ความทนแรงดัดโค้ง (Bending strength)

ความสามารถในการทนต่อแรงดัดโค้ง หรือ ความเค้นแรงดัดโค้ง (σ_b) หาได้จากสมการที่ 3.5 และใช้ชิ้นงานทดสอบขนาด กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 10 x 55 x 8 มิลลิเมตร โดยมีแนวทางการศึกษาตามมาตรฐาน ASTM: D 790 ดังรูปที่ 3.4

$$\sigma_b = \frac{3FL}{2bd^2} \dots\dots\dots (3.5)$$

- เมื่อ
- σ_b = ความเค้นแรงดัดโค้ง มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
 - F = แรงสูงสุดที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 - L = ความกว้างระหว่างจุดรองรับ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 - b = ความลึกของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 - d = ความหนาเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร



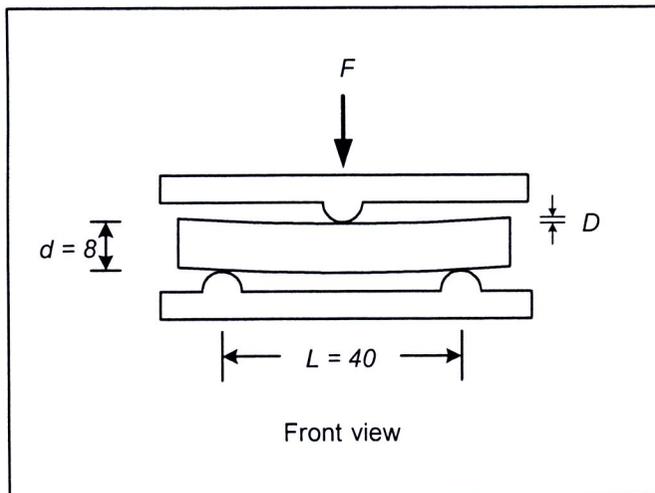
รูปที่ 3.4 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง เมื่อเริ่มต้น

3.1.4.3 ความเครียดการดัดโค้ง (Bending strain)

อัตราส่วนระหว่างระยะที่โค้งตัวได้ต่อระยะความหนาเดิม หรือหาได้จากสมการที่ 3.6 และรูปที่ 3.5 โดยมีแนวทางการศึกษาตามมาตรฐาน ASTM: D 790

$$\varepsilon_b = \frac{6Dd}{L^2} \dots\dots\dots (3.6)$$

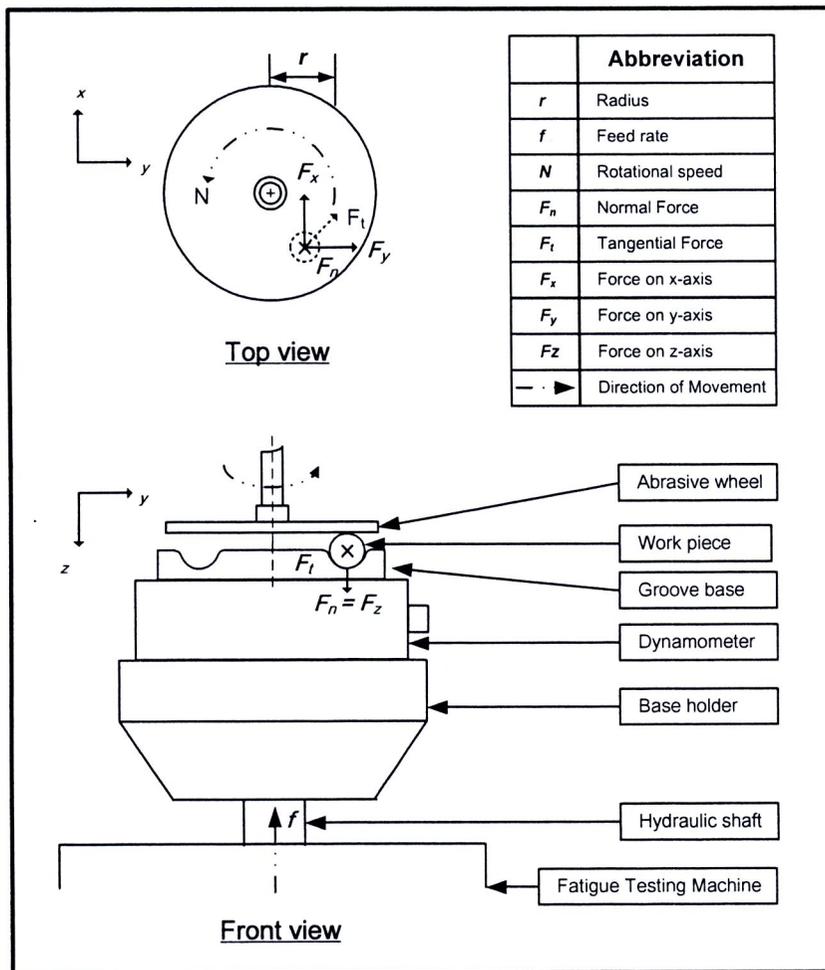
- เมื่อ ε_b = ความเครียดการดัดโค้ง มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อมิลลิเมตร
 D = ระยะการโค้งตัวสูงสุดก่อนขึ้นงานทดสอบแตก มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 d = ความหนาเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 L = ความกว้างระหว่างจุดรองรับ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร



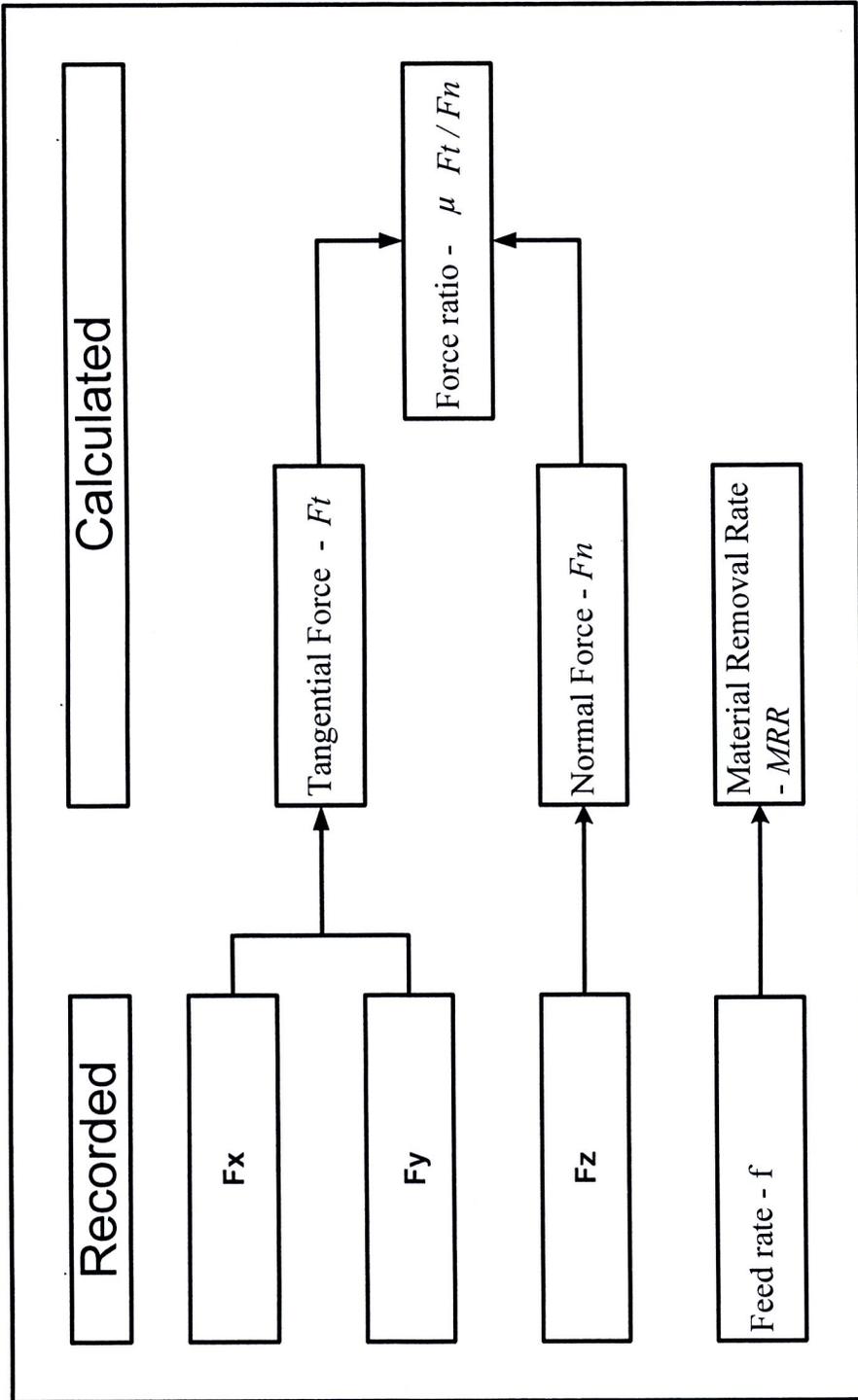
รูปที่ 3.5 การทดสอบความทนแรงดัดโค้ง เมื่อก่อนแตกหัก

3.2 การติดตั้งและปรับแต่งอุปกรณ์

จากการศึกษาทฤษฎีและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้ได้แนวความคิดการติดตั้งอุปกรณ์การวัดและควบคุมการเจียรขึ้นรูปทรงกลม รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แรงเจียรซึ่งประกอบด้วยแรงกดปกติ (F_n) และ แรงในแนวเส้นสัมผัส (F_t) ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางงานขัดกับจุดศูนย์กลางชิ้นงาน (r) อัตราการป้อนชิ้นงาน (Feed rate; f) ความเร็วล้อจานขัด (N) ดังรูปที่ 3.6 และจากปัจจัยพื้นฐานนี้ สามารถนำไปสร้างความสัมพันธ์ของปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ตามสมการเชิงกลศาสตร์ เช่น สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient) หรือ อัตราส่วนแรง (Force ratio) เป็นต้น ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 ภาพเขียนแบบกรรมวิธีการเจียรขึ้นรูปทรงกลมและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 3.7 โครงสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

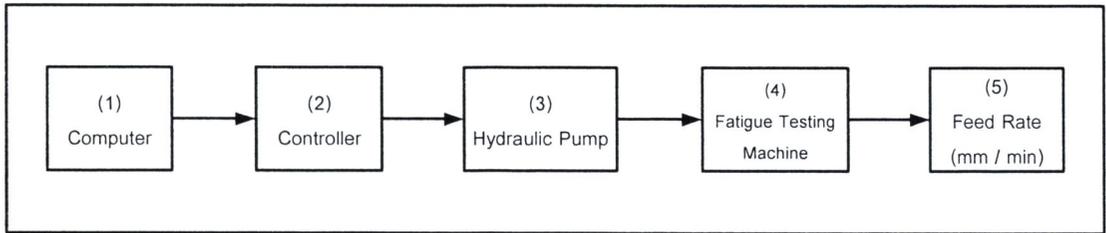
เครื่องมือหลักที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยชุดอุปกรณ์ 4 ชุด ดังนี้

1. ชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน
2. ชุดอุปกรณ์ในควบคุมการหมุนงานขัดกระดาษทราย
3. ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า
4. แผ่นจานรอง

3.2.1.1 ชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน

ชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อนชิ้นงานเข้าหาจานขัดกระดาษทราย ได้ประยุกต์ใช้เครื่องทดสอบความล้า (Fatigue testing machine) ของ SHIMADZU รุ่น SERVOPLUSER โดยใช้ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic system) ในการควบคุมอัตราการป้อนชิ้นงาน มีการทำงานดังรูปที่ 3.8 มีรายละเอียดดังนี้

- (1) เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer) ดังรูปที่ 3.9 สำหรับทำงานผ่านโปรแกรมของเครื่อง หรือ GLOUN software
- (2) อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบ (Controller) ดังรูปที่ 3.10 เมื่อได้รับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ แล้วจะส่งการทำงานไปยังปั๊มไฮดรอลิก
- (3) ปั๊มไฮดรอลิก (Hydraulic pump) ดังรูปที่ 3.11 เมื่อได้รับคำสั่งจากตัวควบคุมแล้ว ปั๊มไฮดรอลิกจะทำการปรับความดันเพื่อให้เพลลาขับของเครื่องทดสอบความล้าเคลื่อนที่
- (4) เครื่องทดสอบความล้า (Fatigue testing machine) ดังรูปที่ 3.12 ในงานวิจัยนี้ได้ดัดแปลงหน้าแปลนส่วนล่าง รูปที่ 3.13 เพื่อจับยึดชุดอุปกรณ์วัดแรง โดยการเคลื่อนที่ของเพลลาขับของเครื่องทดสอบความล้านี้ มาจากการทำงานของปั๊มไฮดรอลิก
- (5) อัตราการป้อนชิ้นงาน ได้จากการเคลื่อนที่ของเพลลาขับ ของเครื่องทดสอบความล้า ในงานวิจัยนี้มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที



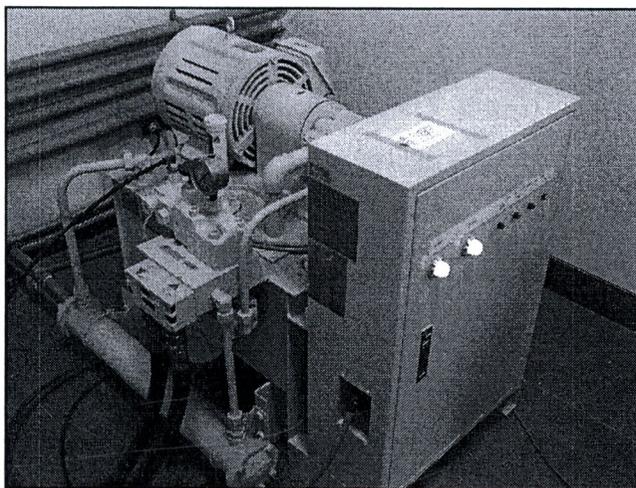
รูปที่ 3.8 ภาพรวมการทำงานของเครื่องทดสอบความล้า



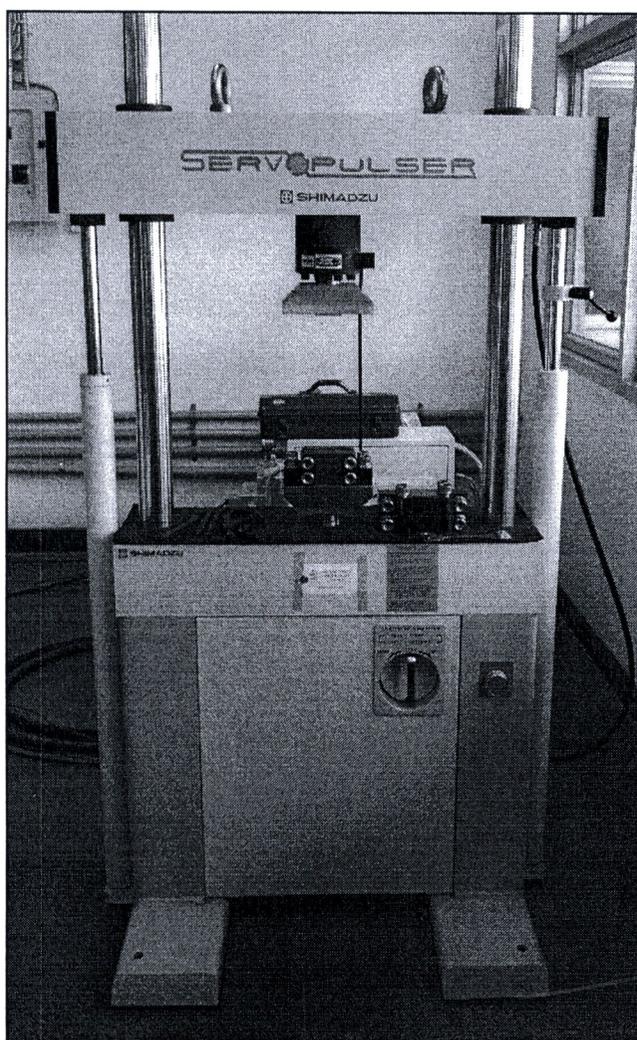
รูปที่ 3.9 เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุมเครื่องทดสอบความล้า



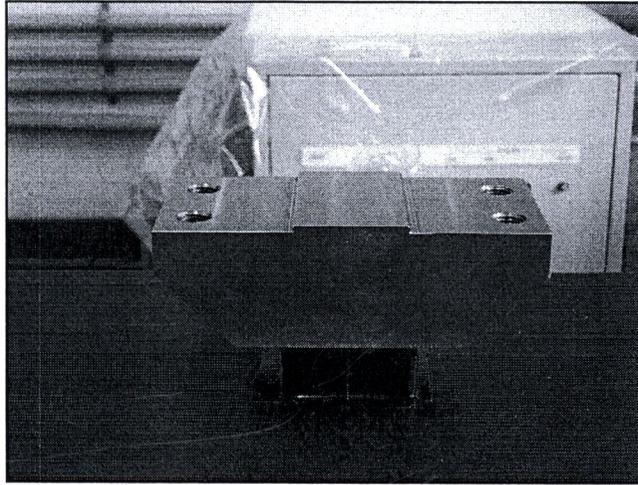
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบความล้า



รูปที่ 3.11 ปัมไฮโดรลิก



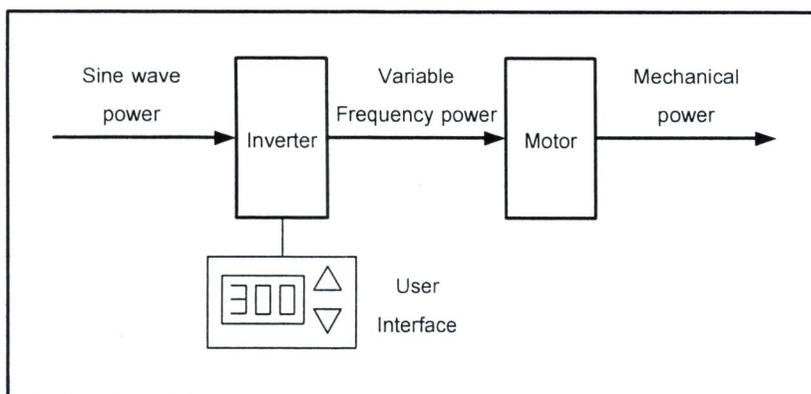
รูปที่ 3.12 เครื่องทดสอบความล้า



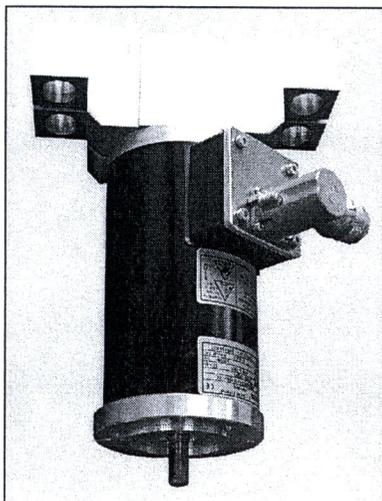
รูปที่ 3.13 หน้าแปลนส่วนล่างของเครื่องทดสอบความล่า

3.2.1.2 ชุดอุปกรณ์ควบคุมการหมุนงานขัดกระดาษทราย

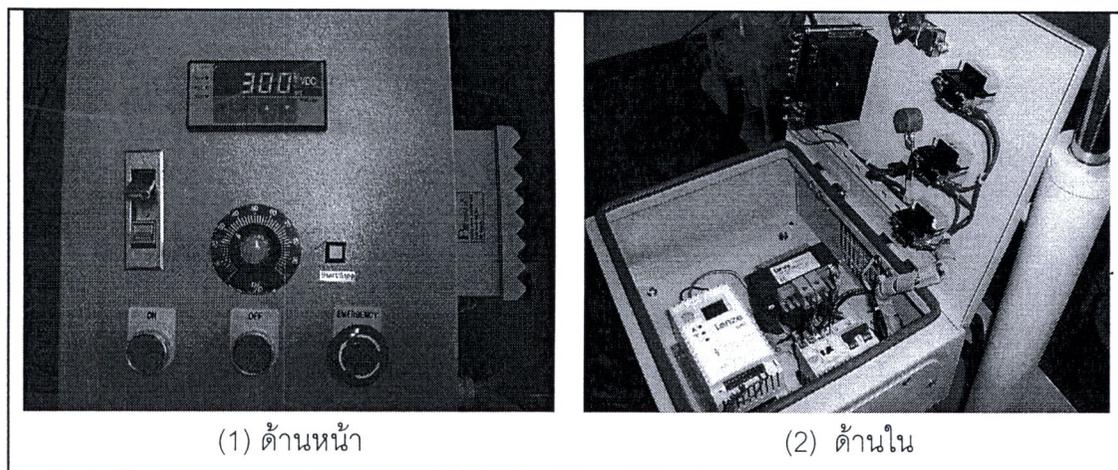
ชุดอุปกรณ์นี้ได้ใช้มอเตอร์ผกผัน (Inverter motor) ของ Lenze ซึ่งสามารถปรับรอบได้ แสดงภาพรวมดังรูปที่ 3.14 ประกอบด้วยอุปกรณ์ส่วนย่อย คือ มอเตอร์ และ ชุดตัวปรับไฟฟ้า ผกผันและตัวปรับรอบ ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ตามลำดับ สำหรับมอเตอร์นั้นเป็นมอเตอร์แบบ วาย (Y) 390 โวลต์ ความเร็วสูงสุด 2790 รอบต่อนาที (rpm) แรงบิด 0.81 นิวตันเมตร (Nm) ในงานวิจัยนี้ได้นำเอามอเตอร์มาใช้ร่วมกับเครื่องทดสอบความล่า โดยจับยึดกับหน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล่า ในรูปที่ 3.17 เมื่อประกอบแล้วจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.18 จากนั้นจึงนำ งานหมุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร มาต่อแกนประกบต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.14 ภาพรวมการทำงานของมอเตอร์ผกผัน



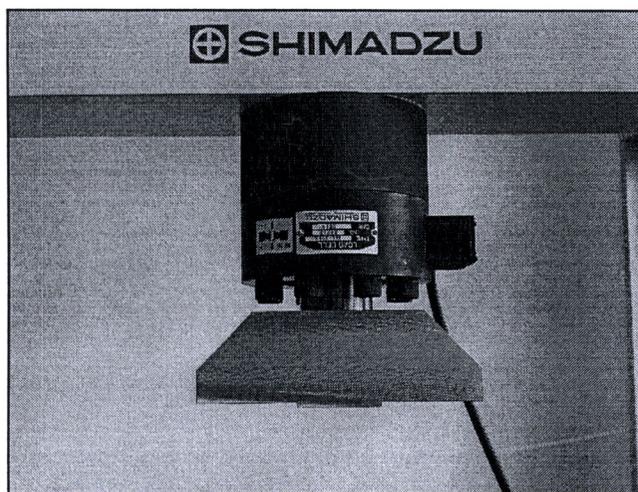
รูปที่ 3.15 มอเตอร์



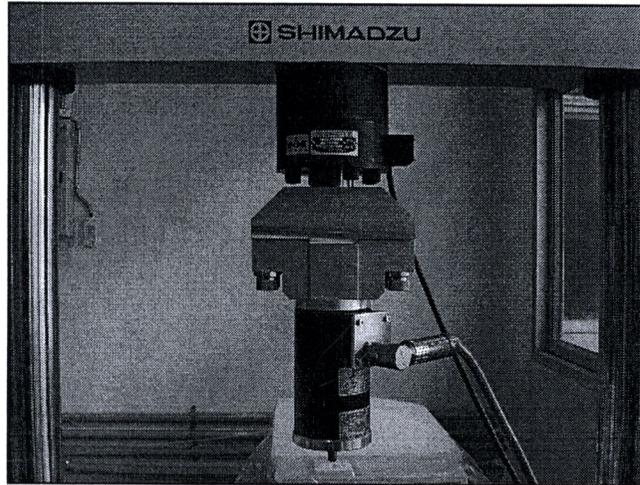
(1) ด้านหน้า

(2) ด้านใน

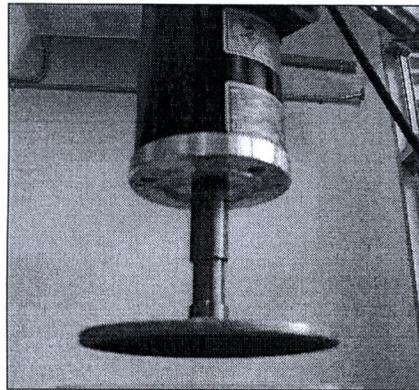
รูปที่ 3.16 ชุดตัวปรับไฟฟ้าผกผัน และ ตัวปรับรอบ



รูปที่ 3.17 หน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล้า

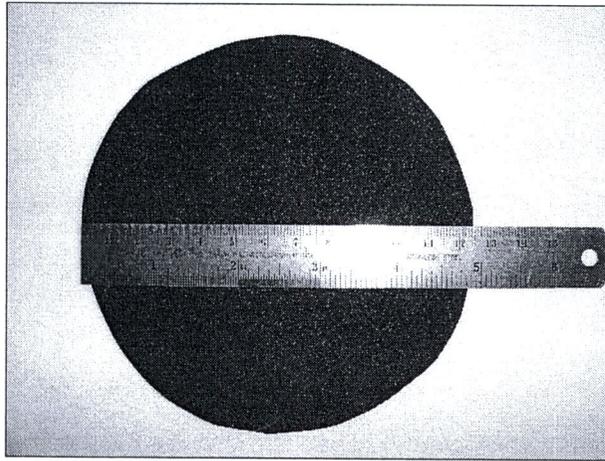


รูปที่ 3.18 หน้าแปลนส่วนบนของเครื่องทดสอบความล้า เมื่อใช้ในการจับยึดมอเตอร์



รูปที่ 3.19 งานขัดกระดาษทรายต่อเข้ากับแกนของมอเตอร์

งานขัดกระดาษทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้กระดาษทรายซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) ความหยาบเบอร์ 240 ซึ่งมีอนุภาคผงขัดขนาด 53.0 ไมโครเมตร (μm) ตามกำหนดของ CAMI (Coated Abrasive Manufacturers Institute) โดยเตรียมจากแผ่นกระดาษทรายมาตรฐานซึ่งมีขนาด 9 x 11 นิ้ว (228.6 x 279.4 มิลลิเมตร) ให้เป็นแผ่นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.20 เพื่อให้สามารถแนบติดกับงานหมุนได้พอดี

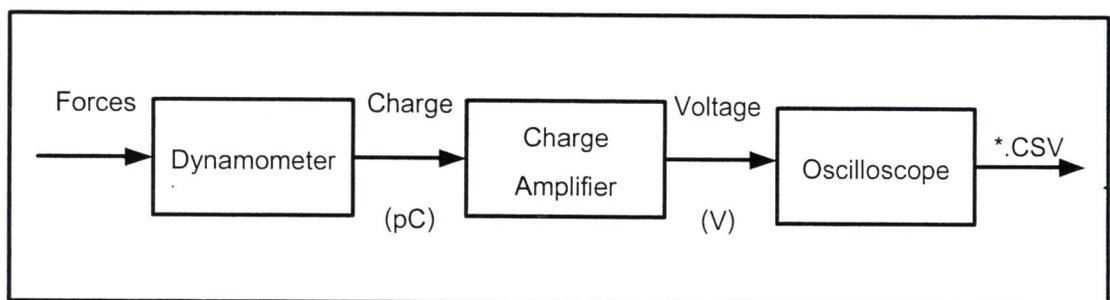


รูปที่ 3.20 กระจาดทรายที่นำมาใช้ติดกับงานหมุน

3.2.1.3 ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า

ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า ประกอบด้วยอุปกรณ์ 3 ชิ้น ได้แสดงการต่อพ่วงในรูปที่ 3.21 ดังนี้

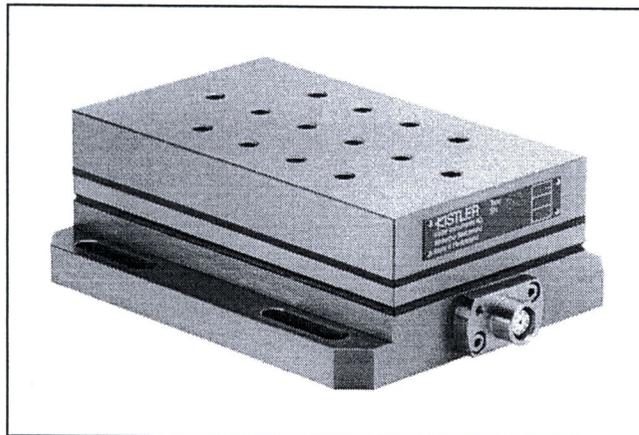
1. ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)
2. เครื่องขยายสัญญาณประจุ (Charge amplifier)
3. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)



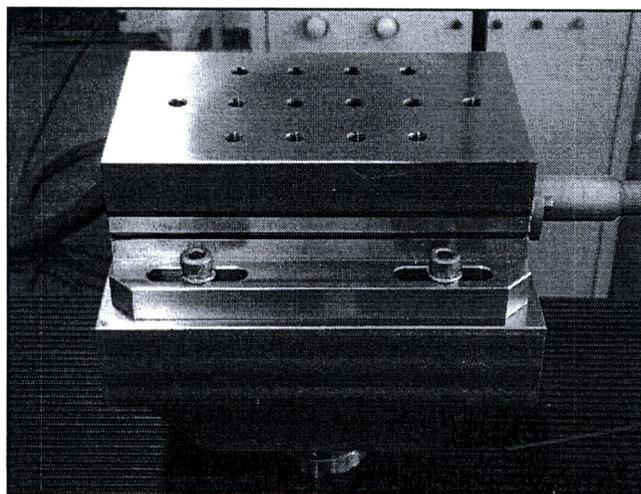
รูปที่ 3.21 การทำงานของชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า

ในรูปที่ 3.21 แสดงภาพรวมการต่อพ่วงชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

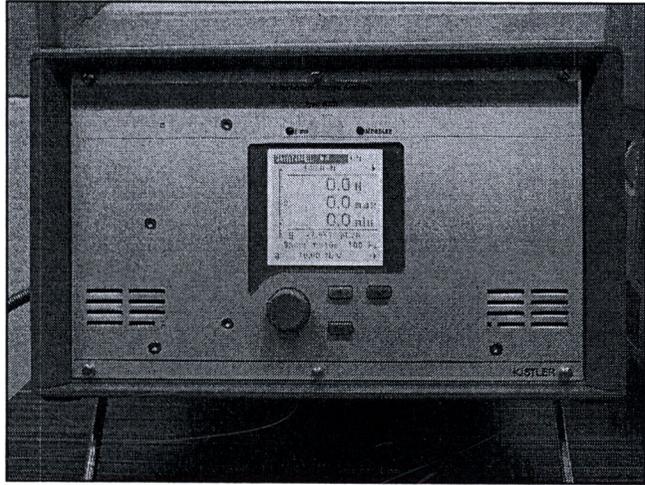
1. ไดนาโมมิเตอร์ ของ KISTLER รุ่น 9257B (รูปที่ 3.22) สำหรับวัดแรงสามารถวัดแรงได้ 3 แกน คือ แกน x y และ z โดยส่งสัญญาณออกเป็นรูปแบบปริมาณประจุไฟฟ้า (Charge) ในหน่วย พิโคคูลอมบ์ (Pico coulomb; pC) และได้ทำการติดตั้งเพื่อใช้งานร่วมกับเครื่องทดสอบความล้า โดยทำการยึดกับหน้าแปลนส่วนล่าง ดังรูปที่ 3.23
2. เครื่องขยายสัญญาณประจุของ KISTLER รุ่น 5070 สำหรับขยายสัญญาณที่ได้จากไดนาโมมิเตอร์ แล้วส่งสัญญาณในรูปแบบความต่างศักย์ (Voltage) ในหน่วยโวลต์ (Volts; V) ไปให้กับออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 3.24
3. ออสซิลโลสโคป ของ YOKOGAWA รุ่น DL 750 ดังรูปที่ 3.25 สำหรับแสดงผลและบันทึกค่า ความต่างศักย์ (Voltage) ในหน่วยโวลต์ (Volts; V) ที่ได้จากการวัดรูปแบบ CSV (Comma-separated valued)



รูปที่ 3.22 ไดนาโมมิเตอร์



รูปที่ 3.23 หน้าแปลนส่วนล่างของเครื่องทดสอบความล้า เมื่อใช้ในการจับยึดไดนาโมมิเตอร์



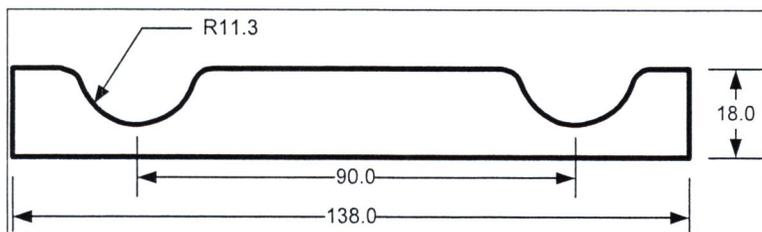
รูปที่ 3.24 เครื่องขยายสัญญาณประจุ



รูปที่ 3.25 ออสซิลโคป

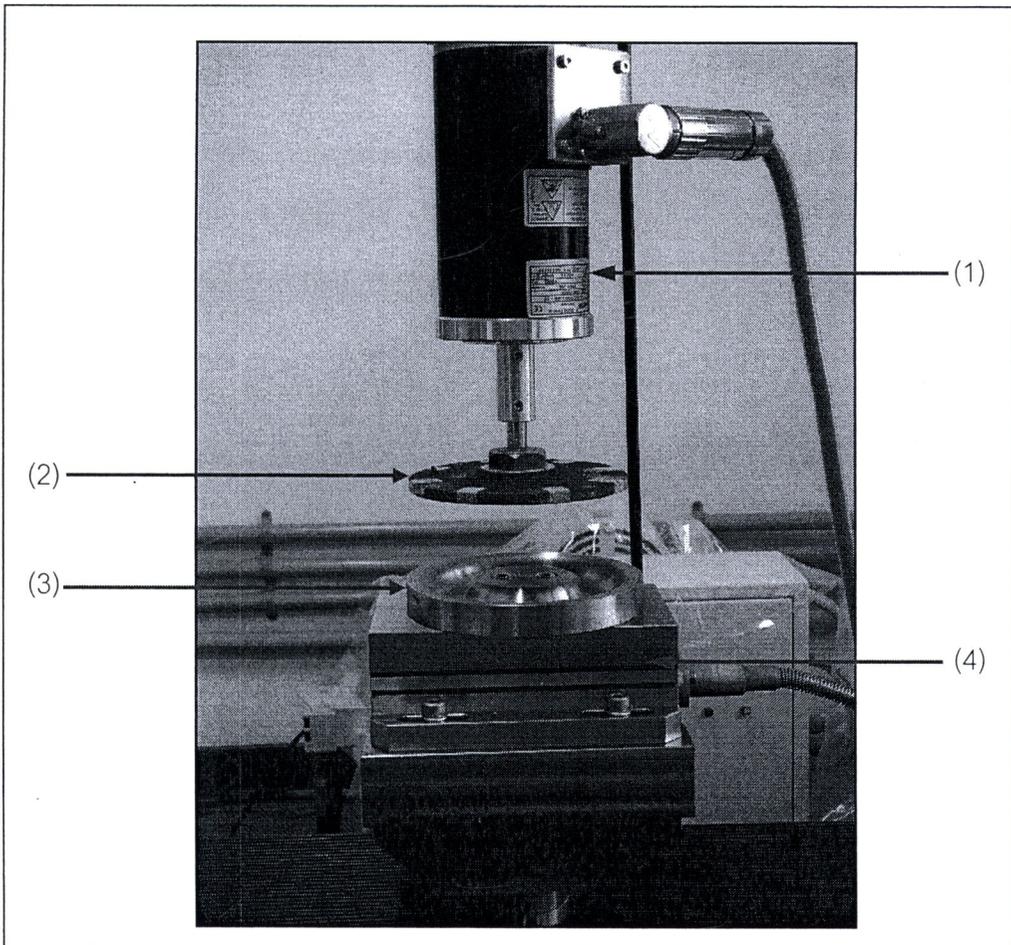
3.2.1.4 แผ่นจานร่อง

แผ่นจานร่อง (Groove disc pad) ขึ้นรูปจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless) เกรด 304 ซึ่งมีมิติ ดังรูปที่ 3.26 จากนั้นนำมาวางและยึดบนไดนาโมมิเตอร์ เพื่อใช้ในการวัดแรงเฉื่อยที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.26 มิติของแผ่นจานร่องรูปโค้ง (หน่วย: มิลลิเมตร)

เมื่อประกอบอุปกรณ์ (1) มอเตอร์ (2) จานขัดกระดาษทราย (3) แผ่นจานรอง และ (4) ไดนาโมมิเตอร์ ต่างๆ รวมกับเครื่องทดสอบความล้า จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 เครื่องทดสอบความล้า เมื่อประกอบอุปกรณ์เข้าไปแล้ว คือ (1) มอเตอร์ (2) จานขัดกระดาษทราย (3) แผ่นจานรอง และ (4) ไดนาโมมิเตอร์

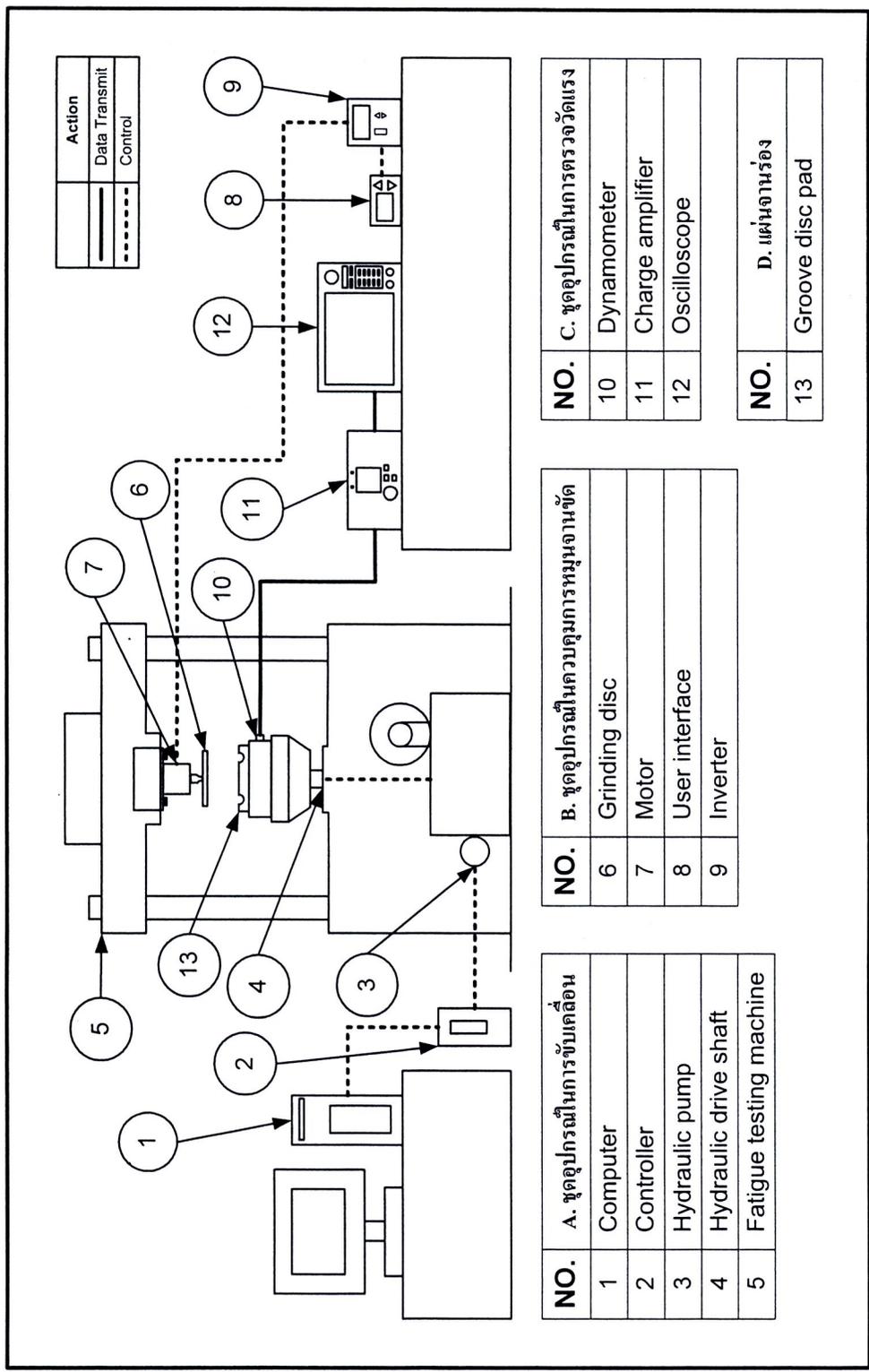


จากชุดอุปกรณ์หลักทั้งสี่ที่สามารถแสดงองค์ประกอบต่างๆ ของชุดอุปกรณ์เจียร์ ดังรูปที่ 3.28 ประกอบด้วย

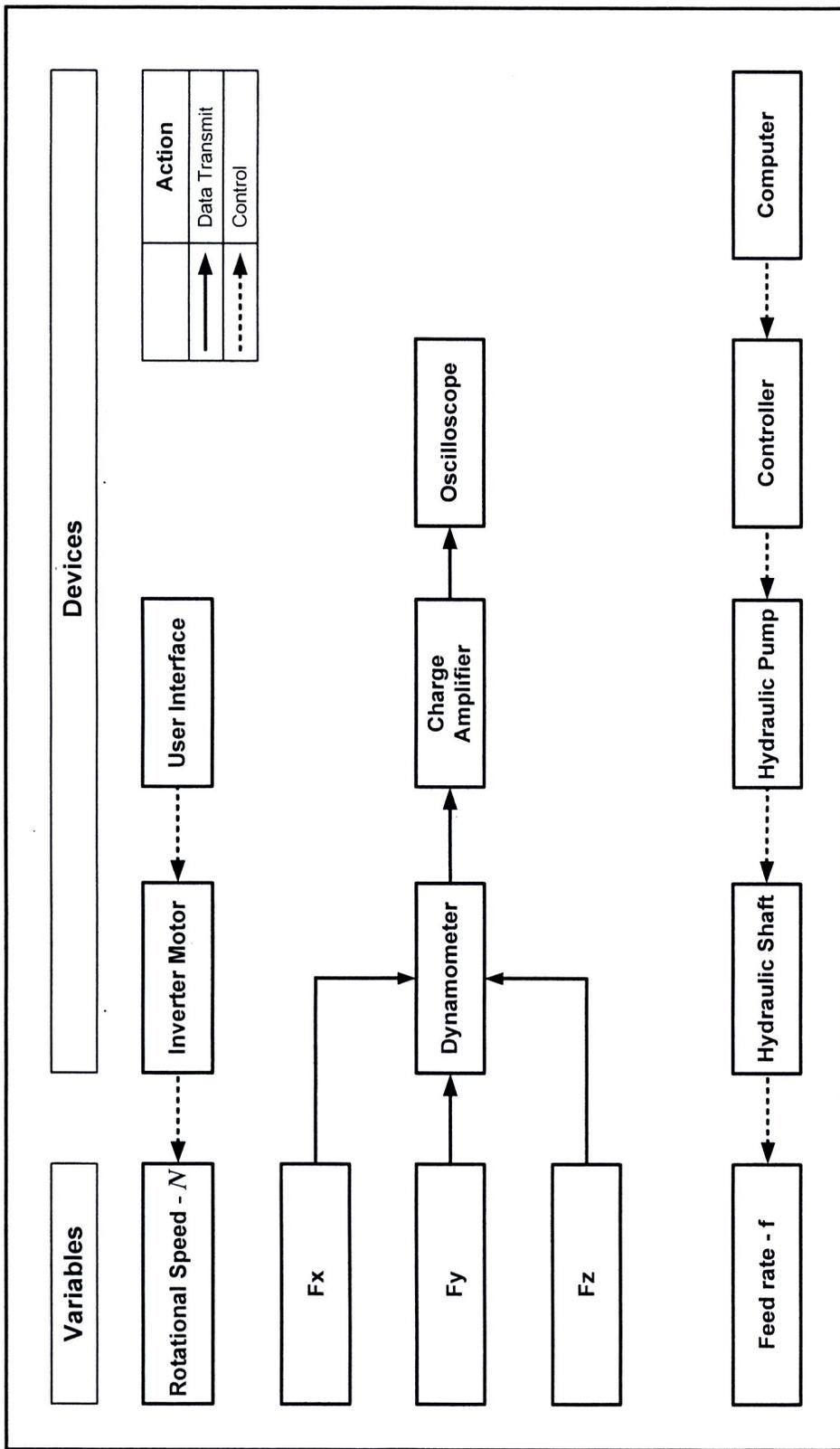
1. ชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน ประกอบด้วยรายการที่ (1) (2) (3) (4) และ (5) ในรูปที่ 3.28
2. ชุดอุปกรณ์ในควบคุมการหมุนงานขัดกระดาษทราย ประกอบด้วยรายการที่ (6) (7) (8) และ (9) ในรูปที่ 3.28
3. ชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า ประกอบด้วยรายการที่ (10) (11) และ (12) ในรูปที่ 3.28
4. แผ่นจานรอง คือรายการที่ (13) ในรูปที่ 3.28

จากรูปที่ 3.29 แสดงโครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Variables) กับเครื่องมือในงานวิจัยนี้ โดยแบ่งตามตัวแปรได้ดังนี้

1. ความเร็วรอบงานขัด (N) ได้จากการสั่งการผ่าน ตัวต่อประสาน (Interface) ซึ่งจะไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์เพื่อหมุนงานขัด
2. แรงในแนวแกน x y และ z หรือ F_x F_y และ F_z ตามลำดับ เมื่อสามารถวัดค่าของตัววัดเหล่านั้นได้ ไดนานาโมมิเตอร์ก็จะส่งค่าในรูปแบบสัญญาณประจุ ให้เครื่องขยายสัญญาณประจุ โดยได้ทำการขยายสัญญาณและเปลี่ยนเป็นรูปแบบความต่างศักย์ เพื่อส่งให้ออสซิลโลสโคปแสดงผลและบันทึกค่า
3. อัตราการป้อนชิ้นงาน (f) เริ่มการสั่งการที่โปรแกรมสั่งการของเครื่องทดสอบความล้า ตัวควบคุมจะตอบรับการสั่งการ แล้วไปสั่งให้ปั๊มไฮดรอลิกทำงาน เพื่อขับเคลื่อนเพลลาขับของเครื่องทดสอบความล้า ทำให้ได้อัตราการป้อนชิ้นงานที่ต้องการ



รูปที่ 3.28 ภาพรวมของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.29 โครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร (Variables) ต่างๆ กับเครื่องมือ (Devices) ในงานวิจัย

3.2.2 การปรับแต่งเครื่องมือเพื่อใช้ในงานวิจัย

การปรับแต่งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน
2. การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการหมุนจานขัด
3. การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรงและบันทึกค่า
มีรายละเอียดดังนี้

3.2.2.1 การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการขับเคลื่อน

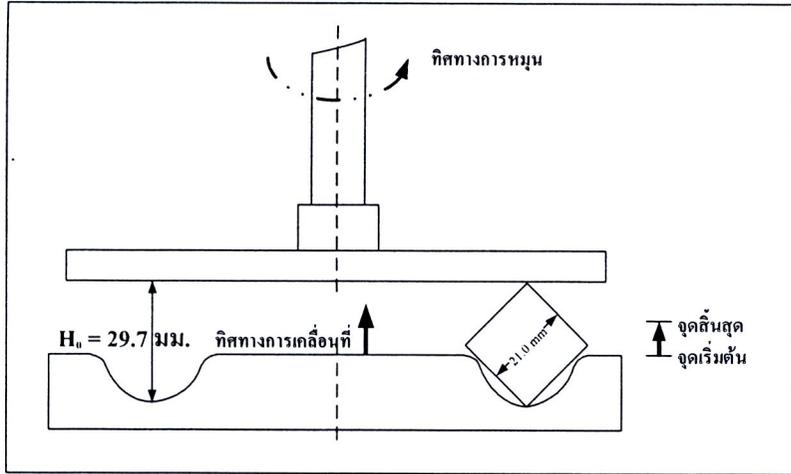
อัตราการป้อนชิ้นงานสามารถควบคุมได้โดยใช้โปรแกรมของเครื่องทดสอบความล้มสำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้อัตราการป้อนชิ้นงาน 1 ถึง 60 มิลลิเมตรต่อนาที โดยที่จุดเริ่มต้นได้ตั้งค่าระยะลึกการเจียร (H_0) ที่ 29.7 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.30 และดำเนินการเจียรไปจนถึงสิ้นสุดที่ระยะลึกการเจียร (H_1) ที่ 20.3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.31 ซึ่งแสดงว่าชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าหาจานขัดเป็นระยะรวม 9.4 มิลลิเมตร

3.2.2.2 การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการหมุนจานขัด

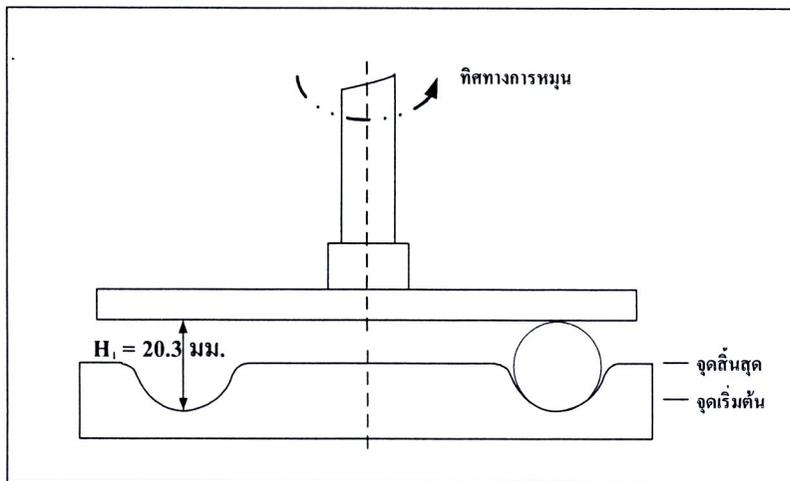
ความเร็วในการหมุนจานขัด สามารถปรับแต่งที่ตัวปรับรอบของชุดอุปกรณ์มอเตอร์ผกผัน โดยใช้ความเร็วรอบ 100 ถึง 1000 รอบต่อนาที

3.2.2.3 การปรับแต่งชุดอุปกรณ์ในการตรวจวัดแรง และบันทึกค่า

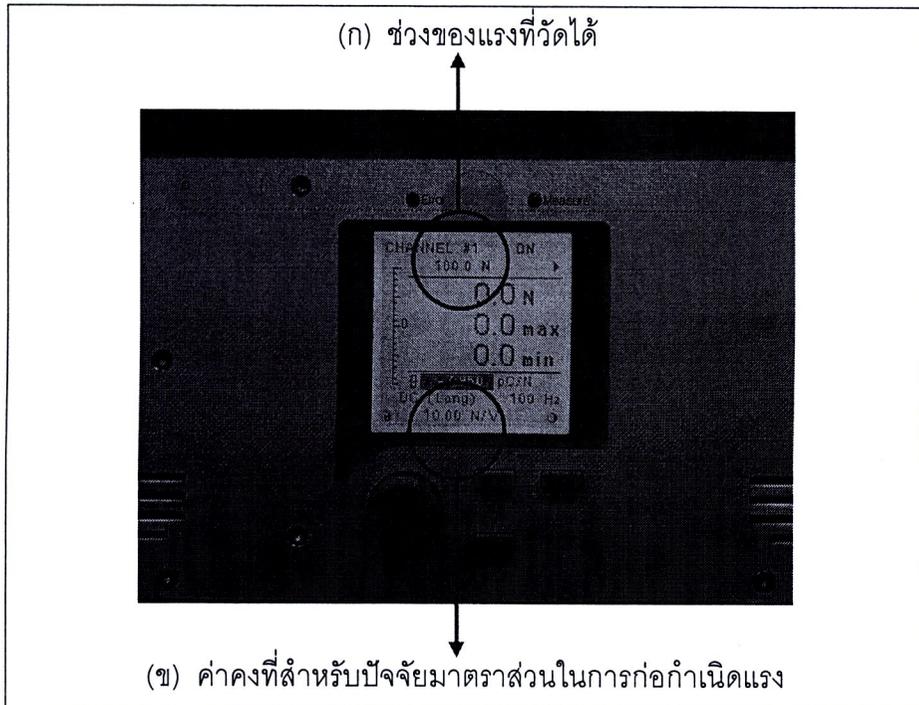
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับแต่งไดนาโมมิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ โดยตั้งช่วงของแรงที่ต้องการจะวัดไว้ที่ 0 ± 100 นิวตัน (N) ดังรูปที่ 3.33 (ก) และทำการปรับแต่งค่าความไวของไดนาโมมิเตอร์ ตามใบรับรองการสอบเทียบมาตรฐานของไดนาโมมิเตอร์ ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.30 จุดเริ่มต้นเริ่มต้นการเจียร ที่ระยะความลึก 29.7 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.31 จุดสิ้นสุดการเจียร ที่ระยะความลึก 20.3 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.32 การปรับแต่งไดนามิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ

ตารางที่ 3.1 การปรับแต่งค่าของไดนามิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ

| แรงในแกน | ช่วงของแรงที่ต้องการวัด Measurement Range (N) | ค่าความไว Sensitivity (pC/N) |
|----------|---|------------------------------------|
| x | 0 -500 | -7.950 |
| y | 0 -500 | -7.951 |
| z | 0 - 100 | -3.701 |

ในส่วนของการปรับแต่งออสซิลโคป มี 2 ส่วนที่ต้องปรับแต่ง คือ อัตราในการเก็บข้อมูล (Sampling rate) และระยะเวลาในการเก็บข้อมูล (Record range) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อัตราการเก็บข้อมูลเป็น 100 ตัวอย่างต่อวินาที (Sample/sec) หรือ 10 มิลลิวินาทีต่อตัวอย่าง (ms/Sample) และ ระยะเวลาในการเก็บข้อมูลสูงสุด เท่ากับ 600.60 วินาที (หากว่าระยะเวลาในการเก็บข้อมูลน้อยกว่า 600.60 วินาที ก็จะเก็บข้อมูลตามเวลาที่ใช้จริง)

3.3 การทดลองเจียรขึ้นรูปทรงกลม

การทดลองเจียรขึ้นรูปทรงกลมมีขั้นตอน ดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างให้เป็นรูปทรงเป็นลูกบาศก์ที่มีมิติ กว้าง x ยาว x สูง เป็น $21 \times 21 \times 21$ มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1
2. เตรียมกระดาษทรายแผ่นใหม่ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร แล้วนำมาติดกับจานขัด ดังรูปที่ 3.20
3. นำจานขัดประกอบเข้ากับแกนของมอเตอร์ ดังรูปที่ 3.19
4. นำชิ้นงานมาวางบนแผ่นจานรอง และปรับระยะความลึกเริ่มต้น (H_0) เท่ากับ 29.7 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.30
5. เริ่มการทำงานของออสซิลโลสโคป เครื่องขยายสัญญาณประจุ และมอเตอร์ โดยควบคุมความเร็วรอบจานขัดให้คงที่ ที่ค่าต่างๆ ตามตารางที่ 3.2
6. เริ่มทำการเจียร ด้วยการส่งการทำงานไปที่เครื่องทดสอบความล้าผ่านโปรแกรม โดยควบคุมให้อัตราการป้อนชิ้นงานคงที่ ที่ค่าต่างๆ ตามตารางที่ 3.2
7. เมื่อถึงระยะ H_1 เท่ากับ 20.3 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.31 จะหยุดการเคลื่อนที่ชิ้นงานเข้าสู่จานขัดอัตโนมัติ
8. หยุดการทำงานของมอเตอร์ เครื่องขยายสัญญาณประจุ และออสซิลโลสโคป ตามลำดับ
9. เมื่อเสร็จการทดลอง ทำการบันทึกค่าลงกับคอมแพคแฟลช (Compact flash card) ที่อยู่ในออสซิลโลสโคป ซึ่งจะได้ชุดข้อมูลในรูปแบบ CSV (Comma-separated valued)
10. ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 10 โดยเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วรอบจานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ โดยแต่ละชุดการทดลองได้ทดลองซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.2 สภาวะปัจจัยของการเจียร

| ปัจจัย | ค่า |
|----------------------|------------------------------------|
| ความเร็วรอบของงานขัด | 100 - 1000 รอบต่อนาที |
| อัตราการป้อนชิ้นงาน | 1 - 60 มิลลิเมตรต่อนาที |
| ระยะลึกการเจียร | 29.7 - 20.3 มิลลิเมตร |
| งานขัด | กระดาษทราย SiC (ความหยาบเบอร์ 240) |

เมื่อสิ้นสุดการเจียร ทำให้ได้ผลตอบสนองของการเจียร ดังนี้

1. รูปทรงของชิ้นงาน (Shape)
2. ขนาด (Dimension) หรือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงานทรงกลม (Diameter; D_{avg}) มีหน่วยคือ มิลลิเมตร (mm.)
3. แรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force; F_t) มีหน่วยคือ นิวตัน (N)
4. แรงกดปกติ (Normal force; F_n) มีหน่วยคือ นิวตัน (N)
5. อัตราส่วนแรงระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสกับแรงกดปกติ (Force ratio) หรือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Coefficient of friction; μ)
6. อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (Material removal rate) มีหน่วยคือ ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที (mm^3 / min)

3.4 การประมวลผลการเจียรขึ้นรูปทรงกลม

สามารถแยกประเด็นการประมวลผลการเจียรขึ้นรูปทรงกลมได้ ดังนี้

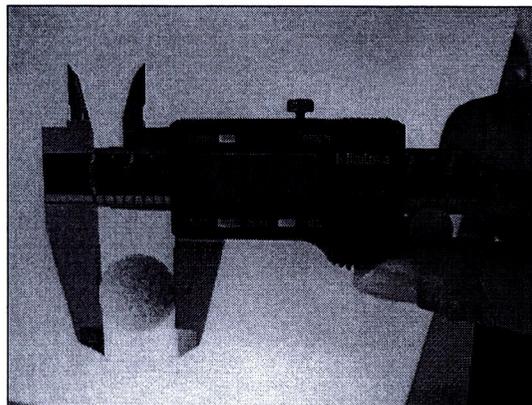
1. การตรวจสอบรูปทรงชิ้นงานหลังการเจียร
2. การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม
3. การประมวลผลแรงเจียร
4. การประมวลผลอัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ

3.4.1 การตรวจสอบรูปทรงชิ้นงานหลังการเจียร

การพิจารณารูปทรงชิ้นงานหลังจากการเจียรนั้น จะพิจารณาว่าได้รูปทรงกลมหรือไม่ ได้พิจารณาด้วยสายตา โดยให้คุณสมบัติของทรงกลม (ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2) ข้อที่ 2 คือ เส้นรอบขอบ และระนาบตัดของทรงกลม ต้องเป็นวงกลม ดังนั้น หากระนาบตัดของชิ้นงานเป็นวงกลม สามารถระบุได้ว่าเป็นทรงกลม หากว่าชิ้นงานหลังการเจียรมีรูปทรงเป็นทรงกลมก็จะนำผลตอบสนองของชิ้นงานนั้นมาวิเคราะห์ต่อไป

3.4.2 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม

เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานนี้ เป็นการศึกษาเฉพาะชิ้นงานที่เป็นทรงกลมเท่านั้น โดยทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเครื่องมือวัดขนาดแบบดิจิตอล (Digimatic caliper) ของ MITUTOYO ซึ่งมีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร ดังรูป 3.33 โดยทำการวัดชิ้นงานละ 20 ค่า แล้วนำมาหาคำนวนหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงานทรงกลม (D_{avg})



รูปที่ 3.33 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทรงกลม

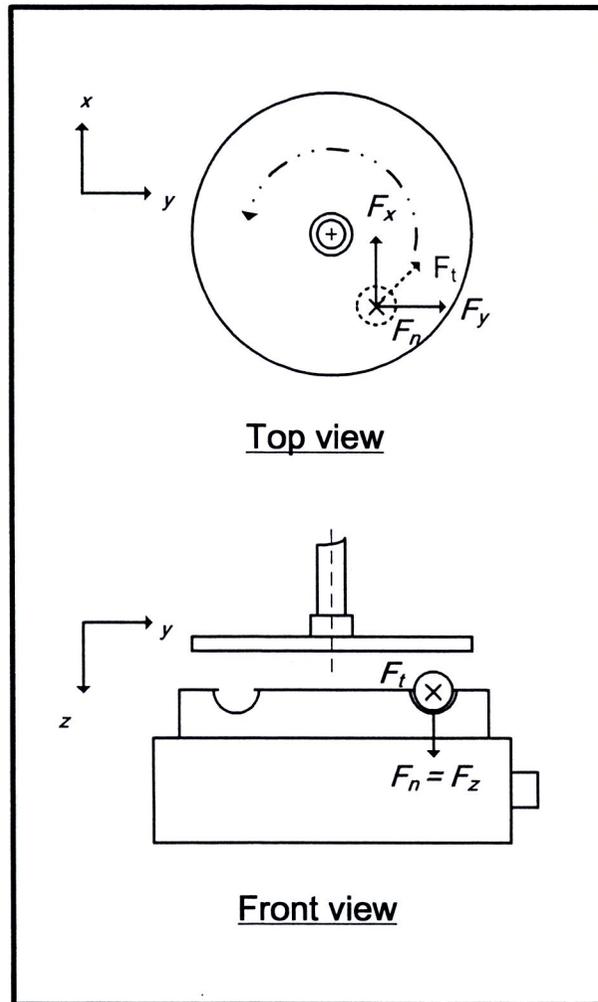
3.4.3 การประมวลผลแรงเจียร์

แรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง (ระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสต่อแรงกดปกติ) ได้มาจากการประมวลผลของชุดข้อมูลความต่างศักย์ที่ได้จากออสซิลอสโคป มาคำนวณด้วยการคูณด้วยค่าคงที่สำหรับปัจจัยมาตราส่วนในการก่อกำเนิดแรง (Force generator scale factor, FGSF) ซึ่งได้จากการปรับแต่งไดนาโมมิเตอร์และเครื่องขยายสัญญาณประจุ ในที่นี้จะป็น 10 นิวตันต่อโวลต์ (N / V) ดังรูปที่ 3.33 (ข) โดยใช้สมการที่ 3.7 และได้แสดงตัวอย่างการคำนวณในภาคผนวก ข

$$F_{ij} = V_{ij} \times FGSF \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

- เมื่อ F_{ij} = แรงในแนวแกน i ณ เวลา j ไตๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 V_{ij} = ความต่างศักย์แรงที่วัดได้ในแกน i ณ เวลา j ไตๆ มีหน่วยเป็น โวลต์
 $FGSF$ = ค่าคงที่สำหรับปัจจัยมาตราส่วนในการก่อกำเนิดแรง สำหรับงานวิจัยนี้เท่ากับ 10 นิวตันต่อโวลต์
 i = แนวแกน x y หรือ z
 j = เวลาไตๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน

แรงเจียร์ที่คำนวณได้ในขั้นตอนนี้ จะเป็นแรงในแนวแกน x y และ z โดยแสดงภาพสัญญาณของแรงในภาคผนวก ก และสามารถคำนวณแรงในแนวเส้นสัมผัสได้จากแรงในแนวแกน x และ y หรือ แรงลัพท์ระหว่างแรงในแกน x และ y ณ เวลานั้นๆ ดังสมการที่ 3.8 ส่วนแรงกดปกติ นั้นได้จากแรงในแนวแกน z ดังสมการที่ 3.9



รูปที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกน x y และ z กับ แรงในแนวสัมผัส และแรงปกติ

$$F_{t_i} = \sqrt{F_{x_i}^2 + F_{y_i}^2} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$$F_{n_i} = F_{z_i} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

- เมื่อ F_{t_i} = แรงในแนวเส้นสัมผัส หรือ แรงดัพธ์ ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 F_{n_i} = แรงปกติ ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 F_{x_i} = แรงในแนวแกน x ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 F_{y_i} = แรงในแนวแกน y ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 F_{z_i} = แรงในแนวแกน z ณ เวลา i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 i = เวลา มีหน่วยเป็น วินาที

เมื่อได้แรงในแนวเส้นสัมผัส และแรงกดปกติ ณ เวลาใดๆ แล้ว (Ft_i, Fn_i) จากนั้นจึงนำมาคำนวณเป็นค่ารากกำลังสองเฉลี่ย (Root-mean-square; rms) ซึ่งเหมาะสำหรับการประมวลค่าที่เป็นสัญญาณพลวัต (Dynamic signal) ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังสมการที่ 3.10 (Richard S. F., 2006)

$$y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} y^2 dt} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

- เมื่อ y_{rms} = ผลตอบสนองของตัวแปร
 t_1 = จุดเวลา ณ จุดที่ 1
 t_2 = จุดเวลา ณ จุดที่ 2
 t = เวลา
 y = ตัวแปรใดๆ

จากสมการที่ 3.10 เมื่อนำค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา มาประมาณการ (Estimate) เป็นแบบวิฤต (Discrete) ด้วยสมการสมมูล (Equivalent of equation) ได้ดังสมการ 3.11

$$y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

- เมื่อ y_{rms} = ผลตอบสนองของตัวแปร
 i = ลำดับของข้อมูล เป็นเลขจำนวนเต็ม มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N
 y = ตัวแปร
 N = จำนวนข้อมูล

จากสมการที่ 3.11 สามารถนำมาเขียนเพื่อให้อยู่ในรูปแบบของแรง ได้ดังสมการที่ 3.12 โดยข้อมูลลำดับที่ 1 เป็นเวลา 0.01 วินาที

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i^2} \quad \dots\dots\dots (3.12)$$

- เมื่อ F_{rms} = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรง มีหน่วยเป็น นิวตัน
 i = ลำดับข้อมูล มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N
 F_i = แรง ณ ลำดับข้อมูล ที่ i ใดๆ มีหน่วยเป็น นิวตัน
 N = จำนวนข้อมูล

เมื่อได้ค่าแรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติแล้ว ก็นำมาคำนวณอัตราส่วนแรง ได้จากสมการที่ 3.13

$$\mu = \frac{Ft_{rms}}{Fn_{rms}} \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

- เมื่อ μ = อัตราส่วนแรง
 Ft_{rms} = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงในแนวเส้นสัมผัส มีหน่วยเป็น นิวตัน
 Fn_{rms} = ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงกดปกติ มีหน่วยเป็น นิวตัน

ค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft_{rms}) และค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงกดปกติ (Fn_{rms}) ในที่นี้จะเรียกว่า แรงในแนวเส้นสัมผัส (Ft_{rms}) และแรงกดปกติ (Fn_{rms}) ตามลำดับ

3.4.4 การประมวลผลอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก เป็นการศึกษาความสามารถในการขจัดเนื้อวัสดุออกโดยเทียบกับเวลาที่ใช้ในการเจียร ในที่นี้สามารถคำนวณได้จากการนำปริมาตรชิ้นงานก่อนการเจียรซึ่งมีรูปทรงลูกบาศก์ ดังสมการที่ 3.14 มาลบออกด้วยปริมาตรชิ้นงานทรงกลมหลังการเจียร คำนวณได้จากสมการที่ 3.15 จากนั้นนำผลต่างของปริมาตรของชิ้นก่อนและหลังการเจียรหารด้วยเวลาที่ใช้ในการเจียร หาได้จากสมการที่ 3.16 ทำให้ได้อัตราการขจัดเนื้อวัสดุ ดังสมการที่ 3.17 และสามารถเขียนเป็นสมการอย่างง่ายได้ในสมการที่ 3.18

$$V_{cube} = D_c^3 \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

$$V_{sphere} = \frac{4}{3} \times \pi \times \left(\frac{D_{avg}}{2} \right)^3 \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

$$T = \frac{H_0 - H_1}{f} \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

$$MRR = \frac{V_{cube} - V_{sphere}}{T} \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

$$MRR = \frac{6D^3 - \pi D_{avg}^3}{6T} \quad \dots\dots\dots (3.18)$$

- เมื่อ
- V_{cube} = ปริมาตรทรงลูกบาศก์ก่อนเจียร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 - V_{sphere} = ปริมาตรทรงกลมหลังเจียร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 - D_c = ความกว้างลูกบาศก์ มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 - D_{avg} = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของชิ้นงานทรงกลมหลังเจียร มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร
 - T = เวลาที่ใช้ในการเจียร มีหน่วยเป็น นาที
 - H_0 = ระยะความลึกเริ่มต้น มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 - H_1 = ระยะความลึกสิ้นสุด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร
 - f = อัตราการป้อนชิ้นงาน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรต่อนาที
 - MRR = อัตราการขจัดเนื้อวัสดุ มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลอง ได้ศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน โดยแยกเป็นประเด็น ดังต่อไปนี้

1. เส้นผ่านศูนย์กลาง
2. แรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง
3. อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

3.5.1 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง

การศึกษาค่าอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่อเส้นผ่านศูนย์กลางได้ใช้การหลักการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังนี้

- 1) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรเดียว)
ประชากรเดียว ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานในแต่ละความเร็วรอบงานขัด
- 2) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรสองชุด)
ประชากรสองชุด ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานที่มีอัตราการป้อนชิ้นงานแตกต่างกัน 2 กลุ่ม และ กลุ่มของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานระหว่างกลุ่มความเร็วรอบงานขัดที่แตกต่างกัน 2 กลุ่ม
- 3) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียว
ประชากรเดียว ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานในกลุ่มความเร็วรอบงานขัด หรือ อัตราการป้อนชิ้นงานเดียวกัน

3.5.2 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วยานยนต์และอัตราการป้อนชิ้นงานต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง

การศึกษาอิทธิพลของความเร็วยานยนต์และอัตราการป้อนชิ้นงานต่อแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง ได้ใช้การหลักการวิเคราะห์ทางสถิติ ดังนี้

- 1) การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียว
ประชากรเดียว ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของแรงในแนวเส้นสัมผัส แรงกดปกติ และอัตราส่วนแรง ในกลุ่มความเร็วยานยนต์ หรือ อัตราการป้อนชิ้นงานเดียวกัน
- 2) การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรแบบสุ่มปกติ (กรณีประชากรสองชุด)
ประชากรเดียว ในที่นี้หมายถึง กลุ่มของอัตราส่วนแรงในแต่ละความเร็วยานยนต์

การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วยานยนต์และอัตราการป้อนชิ้นงาน สามารถหาได้จากหลักการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อนแบบกำลัง (Multiple power regression) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.19 แต่ทั้งนี้เพื่อให้การประมวลผลที่มีประสิทธิภาพ จึงได้โปรแกรม SigmaPlot ในการประมวลผล ซึ่งต้องแปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังสมการที่ 3.20 โดยการแปลงให้อยู่ในรูปแบบของลอการิทึมธรรมชาติ (Logarithm transform model) ดังสมการที่ 3.21 แล้วจึงทำการประมวลผลด้วยหลักการวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อนแบบเส้นตรง (Multiple linear regression) จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณด้วยเลขชี้กำลัง (Exponential) เพื่อแปลงค่ากลับเป็นเลขฐานสิบ ดังสมการที่ 3.20 ทำให้ได้ค่าในรูปสมการที่ 3.19 โดยมีการคำนวณดังนี้

$$z = ax^b y^c \quad \dots\dots\dots (3.19)$$

$$Z = A + BX + CY \quad \dots\dots\dots (3.20)$$

$$\ln z = \ln a + b \ln x + c \ln y \quad \dots\dots\dots (3.21)$$

$$e^{\ln z} = e^{\ln a} \cdot e^{b \ln x} \cdot e^{c \ln y} \quad \dots\dots\dots (3.22)$$



เมื่อ z คือ ผลตอบสนองซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปร x และ y ในแบบกำลัง โดยมี a เป็นค่าคงที่ ส่วน b และ c เป็นสัมประสิทธิ์ยกกำลัง

Z คือ ผลตอบสนองซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปร x และ y ในแบบเส้นตรง โดยมี A เป็นค่าคงที่ ส่วน B และ C เป็นสัมประสิทธิ์ตัวคูณ

จากสมการที่ 3.19 เมื่อนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ z จะหมายถึง ผลตอบสนองในที่นี้คือ แรงในแนวเส้นสัมผัส และ แรงกดปกติ โดย x และ y คือความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำค่าที่แปลงรูปให้อยู่ในรูปแบบของลอการิทึมธรรมชาติไปประมวลผลด้วยโปรแกรม SigmaPlot ทำให้ได้ค่า a b และ c ของสมการที่ 3.21 ออกมา แล้วนำค่า a b และ c นี้ไปยกกำลังด้วย เลขชี้กำลัง (e) ดังสมการที่ 3.22 เพื่อแปลงกลับมาให้อยู่ในรูปแบบ สมการที่ 3.19 และได้แสดงการวิเคราะห์สมการเส้นถดถอยในภาคผนวก ค

3.5.3 การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก

การศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุ ได้ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากประชากรเดียวเพื่อพิจารณาผลของอิทธิพลจากความเร็รรอบงานขัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน