

บทที่ 2

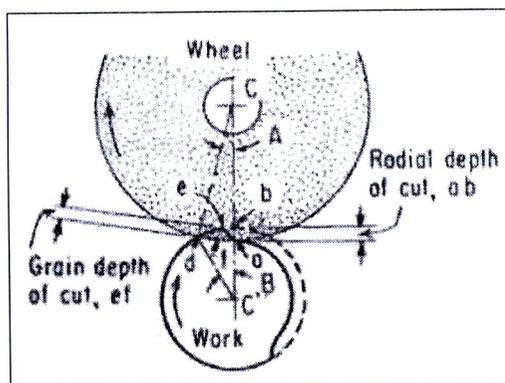
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการเจียรระโน ระบบการเผ่าสังเกด คุณสมบัติของทรงกลม และการวิเคราะห์ทางสถิติ ได้แก่ การทดสอบสมมติฐานและการวิเคราะห์ความแปรปรวน สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจียรขึ้นรูปทรงกลมและปัจจัยที่มีผลต่อการเจียร

2.1 การเจียรระโน (Grinding)

การเจียร เป็นกระบวนการกำจัดเนื้อวัสดุชิ้นเล็กๆ ออกจากชิ้นงาน ด้วยการขูดเนื้อออกหรือทำให้เนื้อสึกออกไป ด้วยแรงขัดที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาควัสดุของล้อหินขัดและชิ้นงาน

ในขณะที่อนุภาคของวัสดุขัดถูได้เริ่มเข้าสัมผัสกับผิวชิ้นงาน ความลึกของการตัด (Depth of cut) จะเท่ากับศูนย์ เมื่อล้อหินขัดและชิ้นงานเริ่มหมุน ความลึกของการตัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงค่าที่มากที่สุดบนส่วนโค้งของการสัมผัสระหว่างล้อหินขัดกับชิ้นงาน ปกติแล้วล้อหินขัดจะหมุนเร็วกว่าชิ้นงาน ณ จุดที่ความลึกตัดมากที่สุด โดยทั่วไปแล้วจะเป็นจุดที่ล้อหินขัดห่างจากชิ้นงาน โดยจะเรียกจุดที่มีความลึกตัดมากที่สุดว่า ความลึกอนุภาคของการตัด (Grain depth of cut) (Dallas, D. B. , 1976)



รูปที่ 2.1 ความลึกเกรนของการตัด (Grain depth of cut)

จากรูปที่ 2.1 จุด C และ C' เป็นจุดกึ่งกลางของล้อหินขัดและชิ้นงาน ตามลำดับ (เครื่องเจียรแบบศูนย์กลาง – center type) ab เป็น รัศมีความลึกของการตัด ad เป็น ส่วนโค้งการสัมผัสระหว่างล้อหินขัดและชิ้นงาน และ ef คือ ความลึกอนุภาคของการตัด

สมมติให้อนุภาควัสดุหินขัดมีเพียงแค่อนุภาคเดียวที่จุด a ในรูปที่ 2.1 เมื่อล้อหินขัดหมุนอนุภาคนี้จะเคลื่อนที่ไปที่จุด d ภายในหนึ่งหน่วยเวลา และ ณ เวลาเดียวกัน จุด d บนชิ้นงานก็เคลื่อนที่ไปที่จุด e เมื่อชิ้นงานหมุนช้ากว่าหินขัดมาก ความยาว de จะสั้นกว่า ad โดยอนุภาคนี้จะขจัดเนื้อ (chip) ade ออกมา ในเวลานั้น

เมื่อเพิ่มระยะ ef ไปถึงระยะที่มากที่สุด เนื้อวัสดุ ade จะโดนขจัดออกมา โดยเรียกระยะ ef นี้ว่า ความลึกอนุภาคการตัด สำหรับการควบคุมความลึกอนุภาคการตัดนี้ สามารถทำได้โดยใช้หินขัดที่อ่อนลงหรือแข็งขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือ เพิ่มหรือลดความลึกอนุภาคการตัด นอกจากนี้ ระยะ ef เปลี่ยนแปลงไปตาม การเพิ่มหรือการลดความเร็วของการหมุนชิ้นงาน หรือรัศมีความลึกการตัด

Dallas, D. B., 1976 ได้ระบุข้อดีของการเจียร ดังนี้

1. ใช้ตกแต่งวัสดุที่มีความแข็งหรือเวลล์ (Rockwell hardness) มากกว่า C50
2. ปริมาณวัสดุที่ถูกขจัดออก (Material removal) มีความหลากหลาย
3. โดยปกติแล้วชิ้นงานมีความหยาบผิว (Roughness) อยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 2200 ไมครอน (μm) ทั้งนี้เนื่องมาจากหินขัดเล็กๆ จำนวนมากที่ติดอยู่กับล้อหินขัด
4. มีความแม่นยำ (Accuracy) ในการทำชิ้นงานให้ได้ขนาดที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว มีขนาดเผื่อ (Tolerance) $\pm 0.005 \text{ mm}$.
5. ความดันในการเจียร (Grinding pressure) มีค่าน้อย

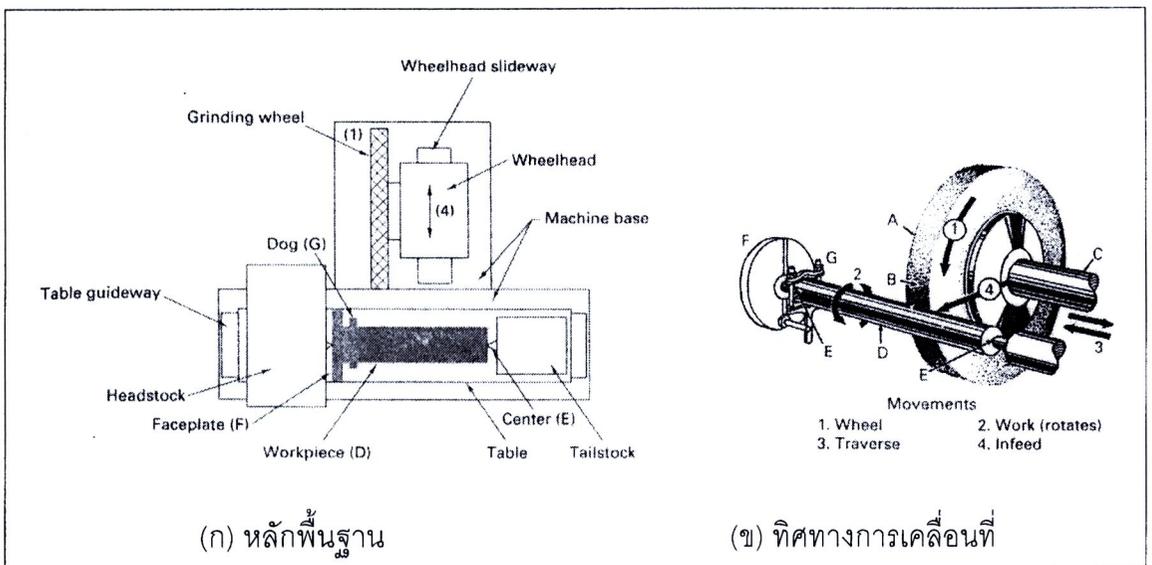
Degarmo, *et al.*, 2003 ได้แบ่งประเภทของการเจียร ที่มีความแตกต่างกันตามประเภทการใช้งานของเครื่องจักร ซึ่งสามารถจำแนกได้ 12 ประเภท ดังนี้

1. การเจียรทรงกระบอก (Cylindrical grinding)

การเจียรทรงกระบอกมัก จะเป็นการเจียรที่ผิวนอกของชิ้นงาน (External cylindrical grinding) โดยรูปที่ 2.2 (ก) แสดงหลักพื้นฐานการทำงาน ชิ้นงานจะถูกยึดจัดศูนย์ (Center) กับ ส่วนหัว (Headstock) และท้าย (Tailstock) สำหรับล้อหินขัดจะขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่ยึดติดอยู่

กับหัวล้อ การป้อนชิ้นงานสามารถป้อนได้ละเอียดถึง 0.001 นิ้วหรือ 25.4 ไมโครเมตร เครื่องมือประเภทนี้บางเครื่อง จะมีหัวแต่งคมซึ่งเป็นเพชรจะทำการแต่งคมอัตโนมัติ รูปที่ 2.2 (ข) แสดงการเคลื่อนที่ในระหว่างการทำงาน โดยล้อหินขัดหมุนไปในทิศทางที่ 1 ชิ้นงานหมุนไปตามทิศทางที่ 2 ล้อหินขัดเคลื่อนที่ตามแนวทิศทางที่ 3 ล้อหินขัดเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานในทิศทางที่ 4

การเจียรแบบนี้ล้อหินขัดจะหมุนด้วยความเร็วสูง และชิ้นงานจะหมุนด้วยความเร็วต่ำ โดยจะมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน การเจียรในลักษณะนี้จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีทักษะสูงในการจับยึดชิ้นงานให้ได้ศูนย์กลาง และต้องทำการเผื่อปริมาณเนื้องานทั้งในส่วนหัวและท้าย



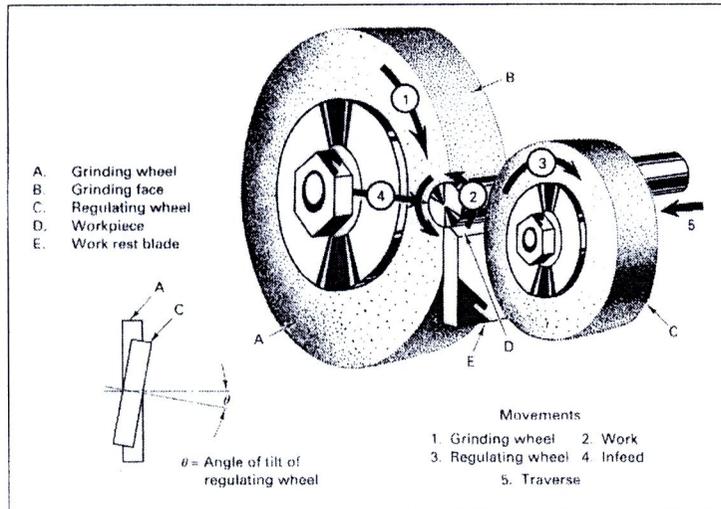
รูปที่ 2.2 การเจียรทรงกระบอกแบบตรงศูนย์

2. การเจียรแบบไม่ตรงศูนย์ (Centerless grinding)

การเจียรแบบไม่ตรงศูนย์ สามารถกระทำเจียรได้สองรูปแบบคือ เจียรผิวภายนอกและภายใน (External and internal cylindrical surfaces) โดยไม่ต้องจับยึดชิ้นงานเข้าศูนย์ ทำให้ลดเรื่องการตอกนำศูนย์และการจับยึดชิ้นงาน ซึ่งทำให้ลดรอบเวลาการทำงานได้ (Cycle time) ได้ แสดงความสัมพันธ์ของชิ้นงานและล้อหินขัดไว้ในรูปที่ 2.3 มีล้อหินขัด 2 ล้อ ล้อหินขัด (A) จะมีหน้าหินขัด (B) สำหรับเจียร โดยหมุนในทิศทางที่ 1 ส่วนล้อควบคุม (C) หมุนในทิศทางที่ (3) จะคอยจัดระเบียบชิ้นงาน (D) ซึ่งหมุนในทิศทางที่ 2 โดยล้อควบคุมได้วางตัวทำมุม (θ) กับล้อหินขัด

การเจียรแบบนี้มีข้อดี คือ ใช้เวลาในการติดตั้งน้อย ไม่จำเป็นต้องใช้ผู้ที่มีทักษะสูง สามารถออกแบบให้เป็นระบบอัตโนมัติได้ (Automatic) ชิ้นงานไม่เกิดการบิดเบี้ยว (Distortion)

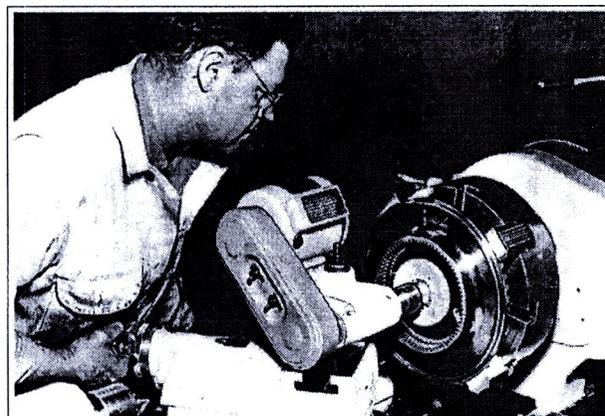
ทำให้ควบคุมขนาดได้ง่าย และ การใช้ล้อหินขัดใหญ่ทำให้ลดการสึกของล้อหินขัดได้ แต่การเจียรแบบนี้ก็มีข้อเสีย คือ ต้องใช้เครื่องจักรที่มีความพิเศษเฉพาะตัว ซึ่งงานต้องมีลักษณะกลม มีข้อจำกัดเรื่องชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 ขนาด และในกรณีของการเจียรท่อ ไม่สามารถรับประกันได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและภายในจะร่วมศูนย์กลางกัน (Concentric)



รูปที่ 2.3 การเจียรแบบไม่ตรงศูนย์กลาง

3. Tool-post grinding

วิธีนี้ส่วนมากจะใช้ในการกรัด แต่บางครั้งก็นำมาใช้ในการเจียรทรงกระบอกด้วยเช่นกัน โดยมอเตอร์ที่ใช้ก็น่าจะเป็นได้ทั้ง มอเตอร์ไฟฟ้าความเร็วสูง (High-speed motor) หรือมอเตอร์ลม (Air motor) โดยล้อหินขัดจะต่อตรงกับแกนเพลามอเตอร์ โดยเครื่องมือมีลักษณะดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเจียรตลับลูกปืนด้วยเครื่องเจียรแบบ Tool-post

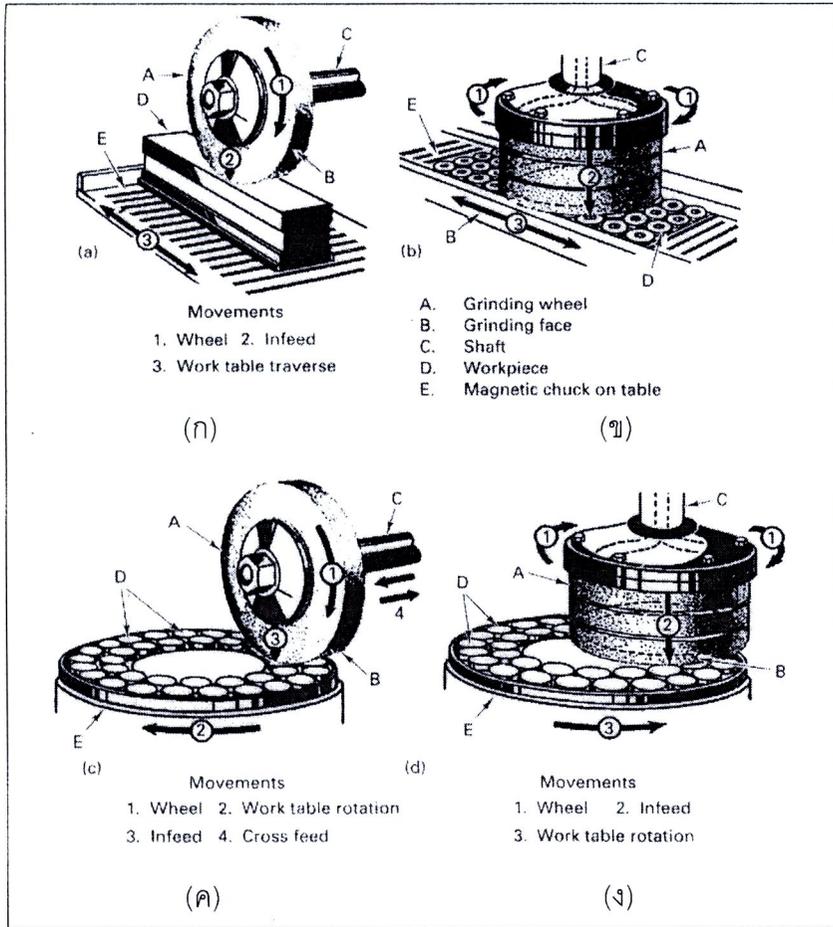
4. Surface grinding

การเจียรแบบนี้ใช้ในการขัดผิวเรียบ (Flat surfaces) แต่ก็สามารถขึ้นรูปได้โดยการออกแบบ ล้อหินขัดให้เหมาะกับงาน โดยทั่วไปสามารถแบ่ง เครื่องจักรในการเจียรผิวเรียบออกได้ ตามการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและล้อหินขัด เป็น 4 ลักษณะด้วยกัน ดังรูปที่ 2.5 คือ

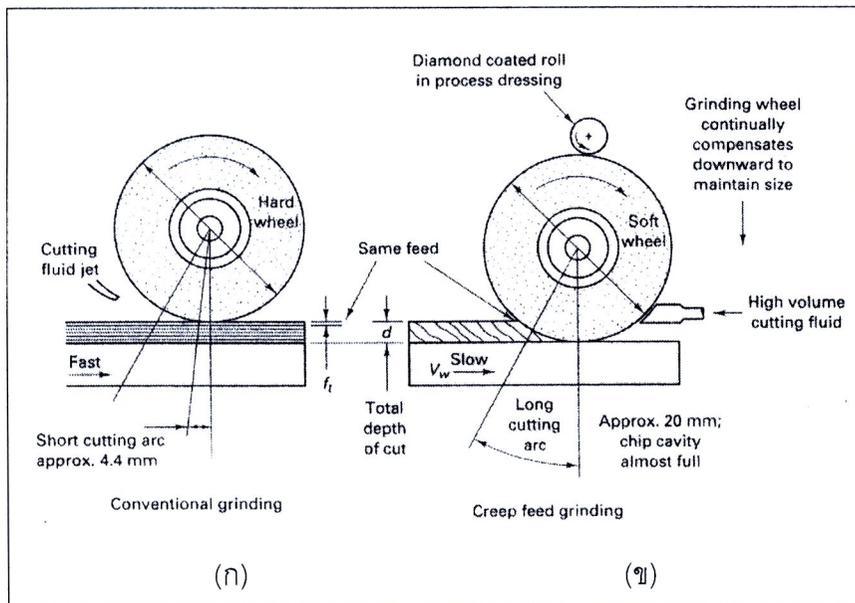
- (ก) การเจียรผิวแบบแนวระนาบ และมีโต๊ะเคลื่อนที่แบบไปกลับ ดังรูปที่ 2.5 (ก) หินขัด (A) หมุนในทิศทาง 1 และเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน (D) ในทิศทาง 2 ชิ้นงานที่ถูกจับยึดอยู่บนโต๊ะ (E) งานจะเคลื่อนที่ไปมาในทิศทาง 3
- (ข) การเจียรผิวแบบแนวตั้งด้วยโต๊ะเคลื่อนที่แบบไปกลับ ดังรูปที่ 2.5 (ข) หินขัด (A) จับยึดด้วยเพลลา (C) หมุนในทิศทาง 1 และเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน (D) ในทิศทาง 2 โดยผิวขัด (B) ขัดถูกับชิ้นงานที่ถูกจับยึดอยู่บนโต๊ะ (E) งานจะเคลื่อนที่ไปมาในทิศทาง 3
- (ค) การเจียรผิวแบบแนวระนาบ กับโต๊ะหมุน ดังรูปที่ 2.5 (ค) หินขัด (A) หมุนในทิศทาง 1 เคลื่อนที่ในทิศทาง 3 เพื่อเข้าหาผิวชิ้นงาน (D) ซึ่งหมุนในทิศทาง 2 โดยล้อหินขัดเคลื่อนที่เข้าออกด้วยทิศทาง 4
- (ง) การเจียรผิวแบบแนวตั้ง กับโต๊ะหมุน ดังรูปที่ 2.5 (ง) หินขัด (A) หมุนในทิศทาง 1 เคลื่อนที่ผิวเจียร (B) ตามทิศทาง 2 เพื่อเข้าสู่ผิวชิ้นงาน (D) ซึ่งหมุนในทิศทาง 3

5. Creep feed grinding

ส่วนมากจะเป็นการเจียรผิวชิ้นงาน มีความแตกต่างกับการเจียรแบบดั้งเดิม ดังรูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบการเจียรแบบดั้งเดิมกับการเจียรแบบป้อนความคืบ ซึ่งสามารถเพิ่มความลึกการตัดได้ถึง 1,000 ถึง 10,000 เท่า โดยที่ชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว V_w ที่ช้า มีการใช้ของไหลช่วยตัดในปริมาณมาก เพิ่มส่วนโค้งสัมผัสผิวยกหว่างชิ้นงานกับล้อหินขัด นอกจากนี้ยังมีล้อเพชรแต่งผิว ล้อหินขัด การเจียรแบบนี้จะช่วยให้โปรไฟล์ (Profile) ของล้อหินขัดใช้ได้ยาวนานขึ้น มีอัตราการกัดเนื้อเพิ่มขึ้น สามารถเจียรชิ้นงานให้ได้ความแม่นยำขึ้น ลดแรงเจียร และลดผลกระทบของอุณหภูมิต่อชิ้นงาน



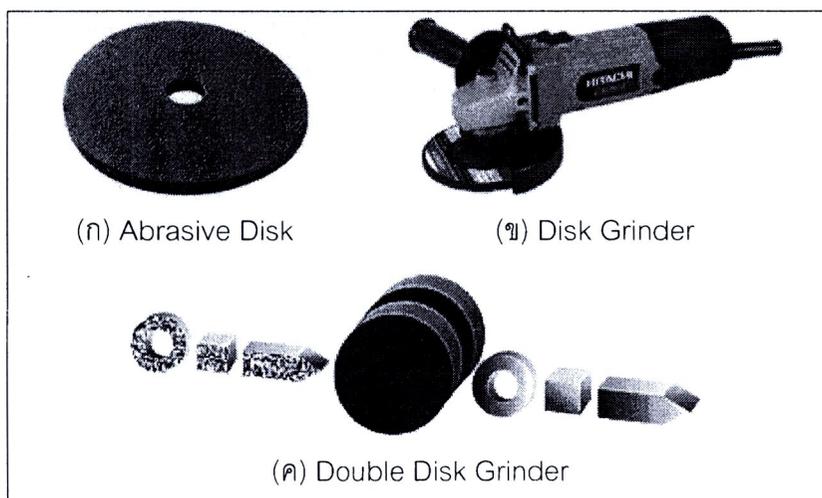
รูปที่ 2.5 การเจียรผิวแบบต่างๆ



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบ (ก) การเจียรแบบดั้งเดิมกับ (ข) การเจียรแบบป้อนความคืบ

6. Disk grinding

การเจียรแบบนี้เป็นการเจียรโดยใช้จานขัดที่มีลักษณะเป็นจาน โดยจะมี 2 แบบ คือ แบบ ด้านเดียว และแบบสองด้าน สำหรับการเจียรแบบด้านเดียวนี้ ดังรูปที่ 2.7 (ก) และ (ข) จะต้องทำการถือและใช้งานด้วยมือโดยวางชิ้นงานบนโต๊ะ จะได้งานที่มีความเที่ยงไม่มาก แต่ค่าเครื่องมือถูก สำหรับการเจียรแบบสองด้าน ดังรูปที่ 2.7 (ค) จะเป็นการนำชิ้นงานผ่านไประหว่างจานเจียรสองจานพร้อมกัน ปกติแล้วจะเป็นการทำงานโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะได้งานที่มีความเที่ยงสูงและมีค่าใช้จ่ายที่ประหยัด



รูปที่ 2.7 ลักษณะของการเจียรแบบจาน

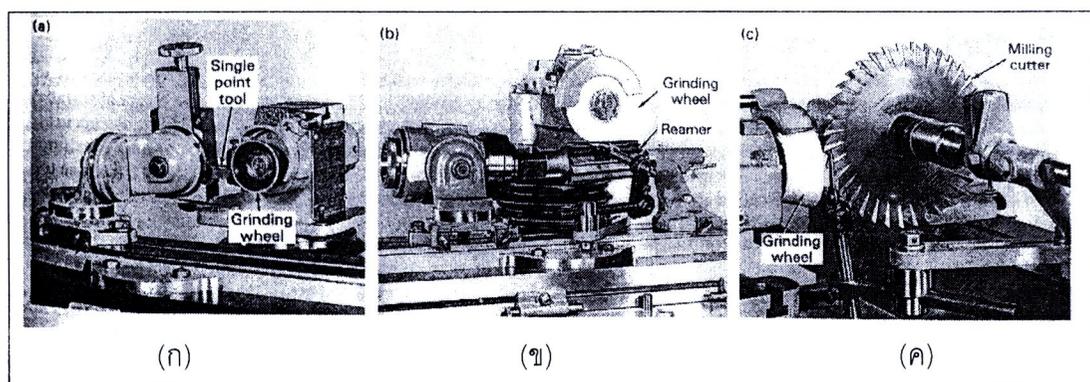
7. Tool and cutter grinding

การเจียรแบบอย่างง่าย คือ Single-point tools เป็นการเจียรโดยใช้มือบังคับกับเครื่องเจียรแบบมีฐาน ดังรูปที่ 2.8 (ก) สำหรับในกรณีที่ซับซ้อนขึ้น เช่น milling cutters รูปที่ 2.8 (ข) reamers รูปที่ 2.8 (ค) และ hobs ส่วน single-point tools นั้นสำหรับการผลิตระดับอุตสาหกรรมนั้น จะมีการออกแบบเครื่องมือให้สมบูรณ์ขึ้น โดยเรียกว่า Universal tool and cutter grinders ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับ Universal cylindrical center-type grinders แต่มีความแตกต่างใน 4 ประเด็น คือ

1. ส่วนของ headstock ไม่มีมอเตอร์ติดตั้ง
2. ส่วนของ headstock สามารถหมุนได้ทั้งในแนวแกนนอนและแกนตั้ง

3. ส่วนของ wheelhead สามารถยกขึ้นและลดระดับลง และสามารถหมุนในแนว แกน ตั้งได้ 360 องศา
4. ส่วนต่างๆ ของเครื่อง ต้องปรับด้วยมือ

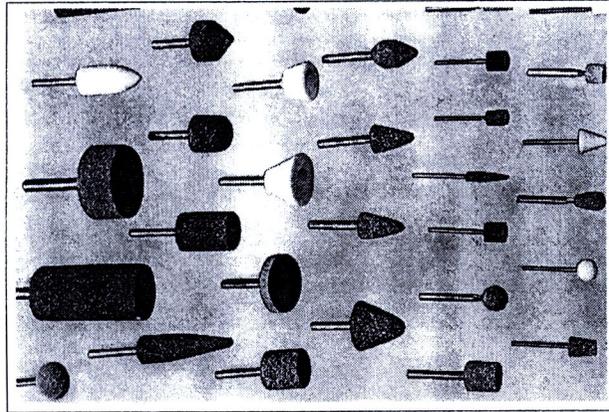
เครื่องเจียรชนิดนี้มีลักษณะที่ยืดหยุ่นสูง (Flexibility) ในส่วนของเครื่องมือ (Tool) และล้อหินขัด สามารถปรับได้หลากหลาย ซึ่งการติดตั้งนั้นต้องให้พนักงานที่มีทักษะสูงในการปรับแต่ง แต่เมื่อติดตั้งแล้ว ก็จะใช้งานได้โดยง่าย



รูปที่ 2.8 ลักษณะของ เครื่องเจียรแบบ Tool and cutter (ก) Single-point tool (ข) Reamer และ (ค) Milling cutter

8. Mounted wheels and points grinding

การเจียรแบบนี้จะใช้ล้อหินขัดขนาดเล็ก หรือเป็นจุด ซึ่งมีรูปร่างหลากหลาย ดังรูปที่ 2.9 โดยไปจับยึดกับเครื่องเจียรขนาดเล็ก มีมอเตอร์ความเร็วสูงอาจจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือลม สามารถทำงานด้วยความเร็วได้ถึง 100,000 รอบต่อนาที ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของล้อขัด โดยทั่วไป จะเป็นการใช้ลบคมหรือแต่งผิว (Deburring) และขัดผิวเรียบ (Finishing)



รูปที่ 2.9 ล้อและเม็ดหินขัด

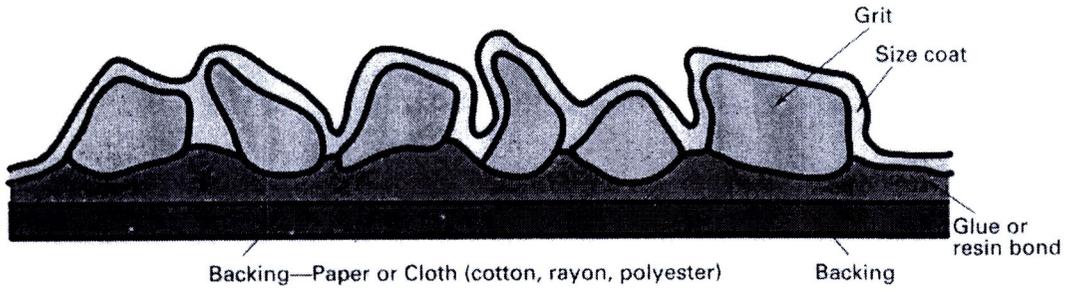
9. Coated abrasive grinding

สารขัดถูชนิดฉาบ ใช้งานมากในการขัดผิวเรียบทั้งผลิตภัณฑ์พวกโลหะและอโลหะ สารขัดถูชนิดฉาบผลิตโดยติดอนุภาคของสารขัดถูลงบนพื้นผิวเรียบและยึดหยุ่น ดังรูปที่ 2.10 (ก) เช่น ผ้า กระดาษ ไฟเบอร์ หรือ ฟิล์ม เป็นต้น ตัวอย่างสารขัดถูสังเคราะห์ (Synthetic abrasives) เช่น อะลูมินา (Aluminum Oxide) SiC (Silicon Carbide) Al (Aluminum) Zirconia CBN และเพชร เป็นต้น ส่วนสารขัดถูธรรมชาติ ได้แก่ ททราย หินเหล็กไฟ (flint) โกเมน (garnet) และ emery สำหรับสารที่ใช้ยึดติดอนุภาคสารขัดถูกับแผ่นหลังจะเป็นสารประกอบ (compound) ที่ช่วยทำให้มีความยืดหยุ่นด้วย

สารขัดถูชนิดฉาบมีหลายประเภทด้วยกัน ดังรูปที่ 2.10 (ข) เช่น แบบแผ่น (Sheet) ม้วน (Roll) สายพาน (Endless belt) ดังรูปที่ 2.10 (ค) และจาน (Disc)



Belt composition



Grit size—Grade

vs	Approx.	Finish (rms)
24	300	μ in.
36	250	"
50	140	"
80	125	"
120	60-80	"
150	40-60	"

Bonds

Name	Make coat	Size coat	Backing
Glue bond	Glue	Glue	Non WP
Modified glue	Mod. glue	Mod. glue	"
Resin over glue	Glue	Resin	"
Resin over resin	Resin	Resin	"
Waterproof	Resin	Resin	WP

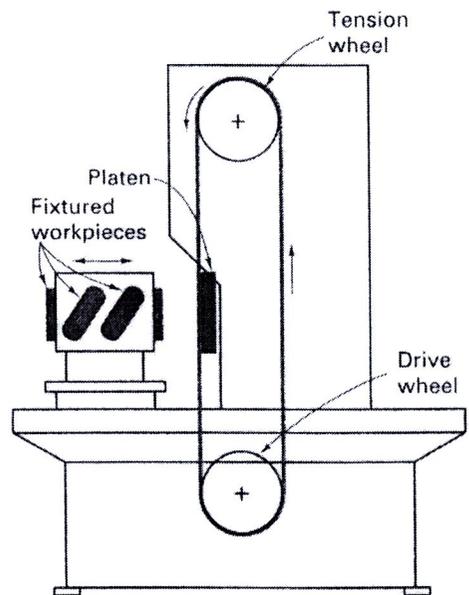
WP = waterproof

(ก)

Platen grinder



(ข)

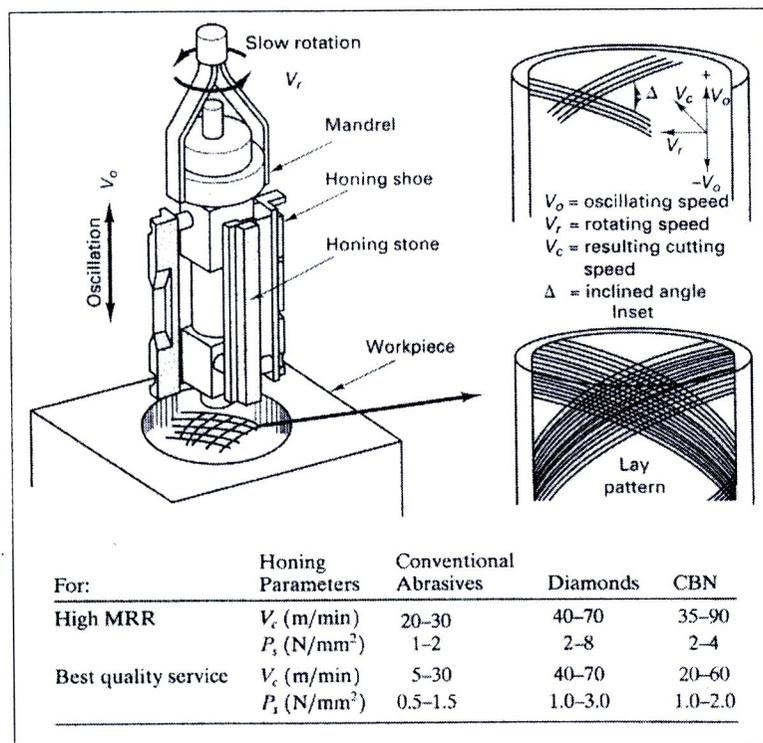


(ค)

รูปที่ 2.10 (ก) ส่วนผสมของสารขัดถู (ข) ตัวอย่างสารขัดถูแบบต่างๆ และ (ค) ตัวอย่างเครื่องเจียร

10. Honing

กระบวนการที่ใช้หินขัดแบบละเอียด มีการกินเนื้อน้อย โดยมีความเร็วรอบต่ำกว่าการเจียรทั่วไป ใช้ในการขัดเรียบรูเจาะ แก้ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการเจาะ หรือการลบรอยที่เกิดจากการเจียร ส่วนมากแล้วจะเป็นการขัดผิวภายในทรงกระบอก จะเกิดลายภายใน (Lay pattern) และได้แสดงตัวอย่างค่าจำเพาะสำหรับการเจียร ไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 หัวเจียร เมื่อมีการหมุน (Rotary) และการสั่น (Oscillation) ของการเจียรแบบ honing

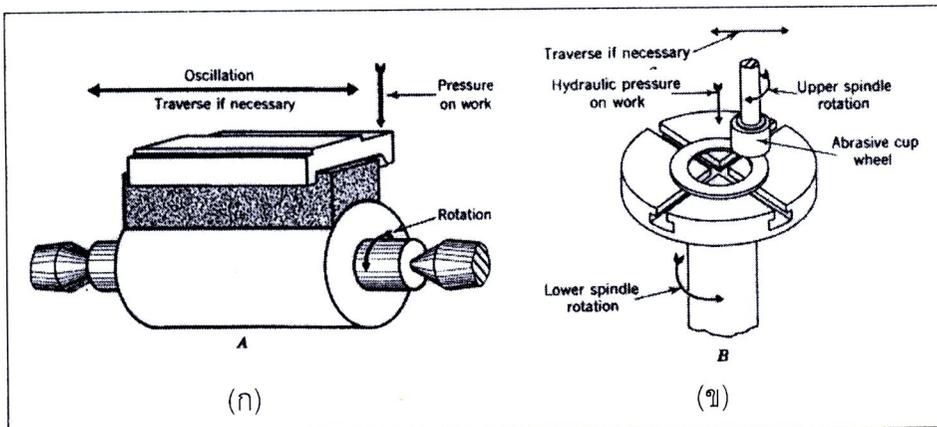
จากรูปที่ 2.11 หัวเจียรมีหินเจียรที่แรงกด P_s กระทำบนผิวชิ้นงาน หมุนด้วยความเร็ว V_r และเคลื่อนที่ขึ้นลงด้วยความเร็ว V_o ทำให้เกิดความเร็วลัพธ์ V_c เกิดลายภายในที่มีมุมเอียง Δ บนผิวชิ้นงาน โดยหากต้องการอัตราการขจัดเนื้อวัสดุสูง สำหรับวัสดุขัดสีชนิดดั้งเดิม หัวเจียรเพชร และหัวเจียร CBN ต้องใช้ความเร็วลัพธ์ V_c 20 – 30 40 – 70 และ 35 – 90 เมตรต่อนาที และแรงกด P_s 1 – 2 2 – 8 และ 2 – 4 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ

11. Superfinishing

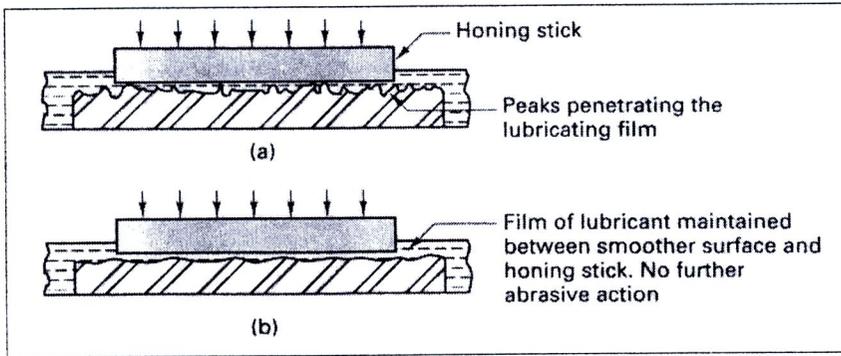
การเจียรแบบ superfinishing สามารถใช้ได้ทั้งกับงานผิวทรงกระบอกและงานผิวเรียบ มีการกินเนื้อน้อย ใช้กับงานที่ต้องการความเรียบผิวสูง โดยมีการใช้ทั้งสารหล่อลื่นและสารหล่อเย็น เพื่อให้อุณหภูมิในการทำงานมีความสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.12 โดยรูป (ก) แสดงการเจียรชิ้นงานทรงกระบอก โดยใช้แรงกดกระทำต่อชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานกำลังหมุน และ (ข) แสดงเจียรผิวเรียบ โดยใช้แรงดันไฮดรอลิกในการกดชิ้นงาน

มีกลไกการเกิดความเรียบดังรูปที่ 2.13 โดยใช้แรงกดจากแท่งหินและการเกิดฟิล์มของสารหล่อลื่น ช่วยให้ผิวที่ไม่เรียบในรูป (a) กลายเป็นผิวเรียบ (b) โดยไม่ต้องใช้กลไกของวัสดุขัดสีเลย และ นอกจากนี้ยังช่วยขจัดเศษเนื้อหรืออนุภาคที่หลุดออกมาเพื่อป้องกันรอยที่จะเกิดขึ้นบนผิวงาน ด้วย การเจียรแบบนี้มีลักษณะเฉพาะคือ

- ก. แรงที่ใช้กดเบามาก ประมาณ 10 – 40 psi
- ข. รวดเร็ว (ประมาณ 400 รอบ ต่อ นาที) ระยะเคลื่อนที่สั้น (น้อยกว่า 6.35 มิลลิเมตร หรือ 0.25 นิ้ว)
- ค. มีการควบคุมไม่ให้เกิดการเจียรย้อนกลับมาที่รอยเดิม
- ง. มีการใช้สารหล่อลื่นและสารหล่อเย็นที่มีความหนืดต่ำ



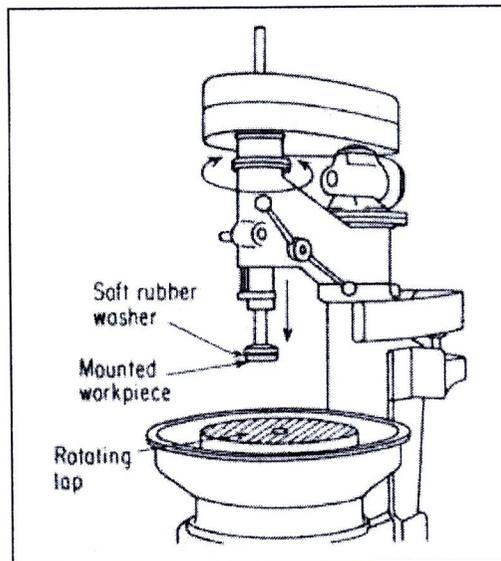
รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของชิ้นงานและหินขัด (ก) ชิ้นงานทรงกระบอก (ข) ชิ้นงานผิวเรียบ



รูปที่ 2.13 ฟิล์มของสารหล่อลื่นช่วยให้งานมีความเรียบมากขึ้น

12. Lapping

การบดผิว (Lapping) เป็นการเจียรผิวเรียบ โดยใช้ผิวหน้าสัมผัส 2 ผิวในการขัดถูกัน มีการจับมีการกินเนื้อน้อย (น้อยกว่า 25.4 ไมโครเมตร) ทำให้สามารถบรอยที่เกิดจากการเจียรหายไปได้ การบดผิวนี้ใช้อนุภาคขัดถูขนาดละเอียด เช่น อะลูมินา ซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือ เพชร เป็นต้น ติดกับวัสดุนุ่มเป็นตัวขัด (Lap) เช่น วัสดุจำพวกผ้า เหล็กหล่อ หรือ ทองแดง โดยตัวขัดนี้จะนุ่มหรืออ่อนกว่าชิ้นงาน การบดผิวนี้สามารถใช้ได้ทั้งวัสดุพวกโลหะและอโลหะ ในรูปที่ 2.14 แสดงเครื่องจักรที่ใช้ในการ Lapping โดยมีตัวยึดชิ้นงานและกดชิ้นงานเพื่อสัมผัสกับหน้าตัวขัด

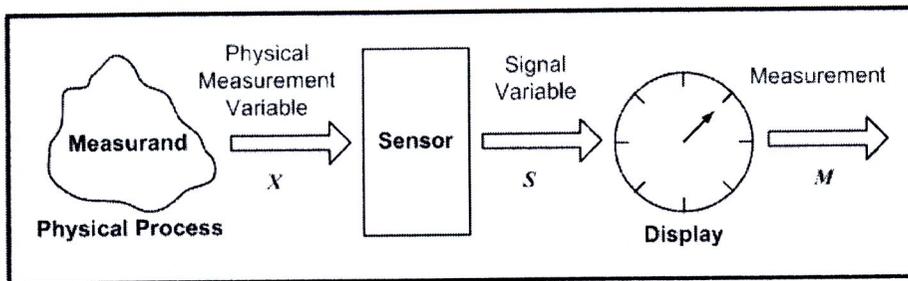


รูปที่ 2.14 Lapping Machine



2.2 ระบบการเฝ้าสังเกต (Monitoring system)

เครื่องมือ (Instrument) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยเปลี่ยนรูปแบบ ของตัวแปรกายภาพ (Physical variable) ที่สนใจศึกษา หรือ สิ่งที่ได้รับการวัด (Measurand) ไปสู่รูปแบบที่เหมาะสม สำหรับการบันทึกค่าในการวัด (Measurement) ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้การวัดนั้น มีจุดประสงค์ที่เด่นชัดและแน่นอน ควรจะมีระบบมาตรฐานของหน่วย ที่ใช้ในการวัด และสามารถเปรียบเทียบกับการวัดอื่นได้ (Webster, J.G, 1999)



รูปที่ 2.15 แบบจำลองการติดตั้งเครื่องมืออย่างง่าย

รูปที่ 2.15 แสดงแบบจำลองการติดตั้งเครื่องมืออย่างง่าย กระบวนการทางกายภาพที่วัดได้ซึ่งอยู่ทางซ้ายของรูป และสามารถนำเสนอโดยเป็นตัวแปรกายภาพ X หน้าที่หลักของส่วนต่างๆ ในแบบจำลองเครื่องมือในรูปนั้น ได้แก่ ตัวรับรู้ (Sensor) มีหน้าที่ในการเปลี่ยนจากค่าป้อนเข้าของตัวแปรกายภาพ (Physical variable input) ไปเป็นค่านำออกของตัวแปรสัญญาณ (Signal variable output; S) สำหรับตัวแปรสัญญาณนั้น สามารถที่จะควบคุมคุณสมบัติในระบบการส่งผ่านได้ (Transmission) เช่น วงจรไฟฟ้าหรือทางกล (Electrical or mechanical circuits) เพราะว่าคุณสมบัติเหล่านี้ที่ทำให้ตัวแปรสัญญาณสามารถที่จะส่งผ่านออกมา หรือส่งไปสู่เครื่องมือบันทึก (Recording device) ซึ่งต่อเซ็นเซอร์ได้ โดยทั่วไปแล้ว ตัวแปรสัญญาณ ในวงจรไฟฟ้าจะเป็นแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ส่วนในระบบทางกลนั้นจะเป็นการกระจัด (Displacement) หรือแรง (Force) สำหรับตัวอย่างของตัวแปรกายภาพและตัวแปรสัญญาณอื่นๆ ได้แสดงในตารางที่ 2.1 และในตารางที่ 2.2 แสดงลักษณะการวัดและชนิดของตัวรับรู้ ซึ่งมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะ ประเภทและความเหมาะสมในการวัด

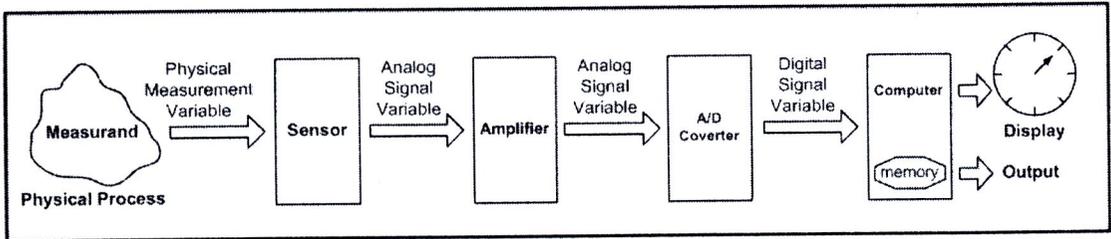
สำหรับสัญญาณที่ออกมาจากตัวรับรู้ นั้น สามารถที่จะแสดง บันทึก หรือใช้สัญญาณเหล่านี้กับอุปกรณ์หรือระบบอื่นได้ ในเครื่องมือพื้นฐาน สัญญาณได้ถูกส่งผ่านไปเพื่อแสดงผล (Display) หรือบันทึก เมื่อการวัดนั้นสามารถอ่านโดยการสังเกตของมนุษย์ ค่านำออกที่ได้จากการ

สังเกตจากการวัดจะออกมาอยู่ในรูปของ M โดยเครื่องมือแสดงผลนั้นมีหลายชนิดด้วยกัน สามารถที่จะจัดสเกลง่ายๆ ไปสู่ระบบที่ซับซ้อนของคอมพิวเตอร์ สัญญาณสามารถใช้ได้โดยตรงกับระบบที่ใหญ่ขึ้น โดยเครื่องมือนี้เป็นส่วนหนึ่งของระบบ เช่น สัญญาณที่ได้นี้สามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณที่ป้อนเข้ากับระบบควบคุม

ตารางที่ 2.1 ชนิดของตัวแปรเชิงกายภาพและตัวแปรเชิงสัญญาณที่ใช้โดยทั่วไป

ตัวแปรเชิงกายภาพ (Physical variables)	ตัวแปรเชิงสัญญาณ (Signal variables)
Force	Current
Length	Voltage
Temperature	Displacement
Acceleration	Force
Velocity	Frequency
Pressure	Light
Frequency	Pressure
Capacity	
Resistance	
Time	
...	

ถ้าสัญญาณที่ออกมาจากตัวรับรู้นั้นมีค่าน้อย ก็จำเป็นที่จะต้องขยายสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 เมื่อขยายสัญญาณออกมาแล้วก็สามารถที่จะส่งผ่านเพื่อแสดงหรือบันทึกได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน โดยส่วนมากแล้วจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือที่สามารถจัดหาสัญญาณเชิงตัวเลข (สัญญาณดิจิทัล; Digital signal) ซึ่งสามารถต่อประสาน (Interface) กับระบบการได้ข้อมูล (Data acquisition) หรือการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ ถ้าตัวรับรู้อาจไม่สามารถส่งสัญญาณดิจิทัลได้ตัวเองก็สามารถที่จะเปลี่ยนสัญญาณเชิงอุปมาน (สัญญาณแอนะล็อก; Analog signal) ด้วยการให้ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to digital converter; ADC) สัญญาณดิจิทัลส่งไปสู่ตัวประมวลผลคอมพิวเตอร์ (Computer processor) ซึ่งสามารถที่จะแสดง เก็บ หรือส่งผ่านข้อมูล ซึ่งส่งออกไปยังระบบอื่นที่ใช้ในการวัดได้



รูปที่ 2.16 แบบจำลองการติดตั้งเครื่องมือโดยมีอุปกรณ์เพิ่มเติม

ตารางที่ 2.2 ลักษณะของการวัดและชนิดของตัวรับรู้

ลักษณะการวัด	ประเภทของการวัด	ตัวอย่างของตัวรับรู้
การวัดตัวแปรเชิงพื้นที่ (Spatial Variable Measurement)	การวัดการกระจัด (Displacement Measurement)	Resistive Sensors Inductive Sensors Capacitive Sensors Piezoelectric Transducers and Sensors Laser Interferometer Sensors Bore Gaging Sensors Time-of-Flight Ultrasonic Sensors Optical Encoder Sensors Magnetic Sensors Synchro / Resolver Sensors Optical Fiber Sensors Optical Beam Deflection Sensing
การวัดตัวแปรเชิงกล (Mechanical Variable Measurement)	การวัดการยืดตัว (ความเครียด) (Strain Measurement)	Strain Sensors ^{ได้แก่} Piezoresistive Foil Gages Piezoresistive Semiconducting Gages Piezoelectric Gages Fiber Optic Strain Gages Birefringent Film Strain Sensing Moiré Strain Sensing
	การวัดแรง (Force Measurement)	Force Sensors ^{ได้แก่} Strain Gage Load Cell Piezoelectric Methods Capacitive Force Transducer Force Sensing Resistors Magnetoresistive Force Sensor Magnetoelastive Force Sensor Tactile Sensors

2.3 คุณสมบัติของทรงกลม (Property of the sphere)

Hilbert, D., 1952 ได้ระบุคุณสมบัติของทรงกลมไว้ 11 ประการ ดังนี้

1. จุดของทรงกลมมีระยะทางเท่ากัน (Equidistant) จากจุดตรง และอัตราส่วนของระยะทางของจุดนั้นกับจุดตรงเป็นค่าคงที่ด้วย
2. เส้นรอบขอบ (Contour) และระนาบตัดของทรงกลม (Plane sections) เป็นวงกลม
3. ทรงกลมมีความกว้าง (Width) และเส้นระหว่างจุดที่สั้นที่สุดบนเส้นรอบวง (Girth) เป็นค่าคงที่
4. ทุกจุดของทรงกลมเป็นจุดที่มีความสัมพันธ์กับจุดศูนย์กลาง (Umbilics)
5. วงกลมของทรงกลมมีจุดศูนย์กลางเดียวเท่านั้น
6. ทุกจีโอเดสิก (Geodesics; เส้นที่สั้นที่สุดระหว่างสองจุดบนพื้นผิว) ของทรงกลมเป็นส่วนโค้งปิด (Closed curves)
7. ทรงกลมเป็นทรงตันมีพื้นที่ผิวที่เล็กที่สุด โดยมีปริมาตรที่มากที่สุด
8. ทรงกลมมีความโค้งเฉลี่ยรวม (Total mean curvature) ที่เล็กที่สุดของทรงตันที่มีลักษณะโค้งนูน (Convex solids)
9. ทรงกลมมีความโค้งเฉลี่ย (Mean curvature) คงที่
10. ทรงกลมมีความโค้งเกาส์เซียน (Gaussian curvature) เป็นบวกที่คงที่
11. ทรงกลมเมื่อถูกเปลี่ยนสภาพ (Transformed) ให้กลายเป็นทรงกลม ต้องปรับค่าทั้งสามแกน ทั้งในแกน x y และ z

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

การทดสอบสถิติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย

1. การทดสอบสมมติฐาน
2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน

2.4.1 การทดสอบสมมติฐาน (Test of hypothesis)

การทดสอบสมมติฐาน ที่ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ

1. การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรเดียว
2. การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรสองชุด

การทดสอบสมมติฐาน คือ การตัดสินใจแบบมีการทดลองด้วยการยืนยันความเชื่ออย่างใดอย่างหนึ่งแล้ว ก็สามารถกำหนดตัวแบบการตัดสินใจอีกประเภทหนึ่งซึ่งมีลักษณะเป็นการตัดสินใจแบบก่อนการทดลอง (กิตติศักดิ์ พลอยเจริญพานิช, 2540)

สมมติฐานแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สมมติฐานหลัก (Null hypothesis; H_0) และ สมมติฐานอื่น (Alternative hypothesis; H_1) สำหรับสมมติฐานหลัก หมายถึง สมมติฐานที่ตั้งขึ้นเพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่ามันเป็นจริง และการปฏิเสธไม่ยอมรับสมมติฐานหลัก ก็คือ การยอมรับสมมติฐานอื่น ว่าเป็นจริง (ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, 2536)

สมมติฐานทั้งสองชนิดอาจแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ สมมติฐานแบบสองด้าน (Two-sided alternative hypothesis) ดังสมการที่ 2.1 และสมมติฐานแบบด้านเดียว (One-sided alternative hypothesis) ดังสมการที่ 2.2 เมื่อ μ_0 คือ ค่าเฉพาะเจาะจง

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &= \mu_0 \\ H_1 : \mu &\neq \mu_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อตั้งสมมติฐานแบบด้านเดียว สามารถบอกได้ว่า

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &\leq \mu_0 \\ H_1 : \mu &> \mu_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (2.2)$$

และในทำนองเดียวกัน ก็อาจจะตั้งสมมติฐานได้ว่า

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &\geq \mu_0 \\ H_1 : \mu &< \mu_0 \end{aligned} \dots\dots\dots (2.3)$$

การทดสอบสมมติฐานทางวิศวกรรม แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ทดสอบค่าพารามิเตอร์ของการกระจายของความน่าจะเป็น ซึ่งอาจจะเป็นการทดสอบค่าพารามิเตอร์กับค่าคงที่ ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของสองประชากร และการทดสอบลักษณะของการกระจายของความน่าจะเป็น

1. การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรเดียว

การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรเดียว สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่ากรณีการแบบสองด้าน

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_1 : \mu \neq \mu_0$$

กรณีการแบบด้านเดียว

ก. $H_0 : \mu = \mu_0$ หรือ $H_0 : \mu \leq \mu_0$

$$H_1 : \mu > \mu_0$$

ข. $H_0 : \mu = \mu_0$ หรือ $H_0 : \mu \geq \mu_0$

$$H_1 : \mu < \mu_0$$

1.1 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มปกติ กรณีที่ค่าเฉลี่ยมาจากประชากรที่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เป็นการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของประชากรแบบปกติชุดหนึ่งมีค่าแตกต่างหรือมากกว่า หรือน้อยกว่า ค่าที่กำหนดค่าหนึ่งอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยมีข้อสมมติว่าประชากรชุดดังกล่าวมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่าใด

ในการทดสอบความมีนัยสำคัญนั้น จะกำหนดให้ X เป็นตัวแปรปกติที่มีค่าเฉลี่ย (μ) ที่ไม่ทราบค่า และมีความแปรปรวนที่ทราบค่าเป็น σ^2 และสมมติว่าทำการชักสิ่งตัวอย่างมา n ตัว ได้ $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$ และในการอธิบายค่า μ จะอาศัยตัวสถิติ \bar{X} โดยในกรณีนี้ทราบว่า $\bar{X} \sim N(\mu, \sigma^2/n)$ เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ α สามารถคำนวณค่าสถิติสำหรับทดสอบได้จากสมการที่ 2.4

$$Z = \frac{(\bar{X} - \mu)\sqrt{n}}{\sigma} \dots \dots \dots (2.4)$$

ในกรณีการทดสอบแบบสองด้าน จะได้ช่วงที่มีการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-Z_{\alpha/2}, Z_{\alpha/2})$

ในกรณีการทดสอบแบบด้านเดียว สำหรับ $H_1 : \mu > \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-\infty, Z_\alpha)$ และ สำหรับ $H_1 : \mu < \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-Z_\alpha, \infty)$ หากอยู่นอกช่วงดังกล่าว แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

1.2 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของตัวแปรสุ่มปกติ กรณีที่ค่าเฉลี่ยมาจากประชากรที่ไม่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ในการทดสอบความมีนัยสำคัญนั้น จะกำหนดให้ X เป็นตัวแปรปกติที่มีค่าเฉลี่ย (μ) ที่ไม่ทราบค่า และความแปรปรวนที่ไม่ทราบค่า คือ σ^2 ถ้าหากทำการชักสิ่งตัวอย่างมา n ตัว ได้ $X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n$ และจากสิ่งตัวอย่างเหล่านี้ จะคำนวณค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของสิ่งตัวอย่างได้ \bar{X} และ S^2 ตามลำดับ ทั้งนี้ความแปรปรวนไม่ใช่ค่าที่แท้จริง แต่มาจากความชำนาญหรือประสบการณ์ แล้วสามารถคำนวณค่าสถิติสำหรับการทดสอบได้จากสมการที่ 2.5

$$t = \frac{(\bar{X} - \mu)\sqrt{n}}{S} \dots\dots\dots (2.5)$$

ในกรณีการทดสอบแบบสองด้าน จะได้ช่วงที่มีการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-t_{\alpha/2, n-1}, t_{\alpha/2, n-1})$

ในกรณีการทดสอบแบบด้านเดียว สำหรับ $H_1 : \mu > \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-\infty, t_{\alpha, n-1})$ และ สำหรับ $H_1 : \mu < \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-t_{\alpha, n-1}, \infty)$ หากอยู่นอกช่วงดังกล่าว แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

2. การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรสองชุด

การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยกรณีประชากรสองชุด สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังนี้

กรณีการแบบสองด้าน

$$H_0 : \mu_x = \mu_y$$

$$H_1 : \mu_x \neq \mu_y$$

กรณีการแบบด้านเดียว

ก. $H_0 : \mu_x = \mu_y$ หรือ $H_0 : \mu_x \leq \mu_y$

$$H_1 : \mu_x > \mu_y$$

ข. $H_0 : \mu_x = \mu_y$ หรือ $H_0 : \mu_x \geq \mu_y$

$$H_1 : \mu_x < \mu_y$$

2.1 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยที่ทราบความแปรปรวนของทั้งสองประชากร

ให้ X และ Y คือประชากรที่ให้ความสนใจ 2 ชุดซึ่งมีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ย μ_x และ μ_y และมีความแปรปรวนที่ทราบค่าเป็น σ_x^2 และ σ_y^2

ในการทดสอบได้กำหนดให้ทำการสุ่มตัวอย่างขนาด n_x และ n_y ตัว จากประชากร X และ Y และกำหนดให้เป็น X_1, X_2, \dots, X_{n_x} และ Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_y} ตามลำดับ เป็นการแจกแจงแบบปกติที่มีค่าเฉลี่ย μ_x และ μ_y และมีความแปรปรวน σ_x^2 และ σ_y^2 แล้วคำนวณ \bar{X} และ \bar{Y} เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ α สามารถคำนวณค่าทางสถิติได้จากสมการ 2.6

$$Z = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n_x} + \frac{\sigma_y^2}{n_y}}} \dots\dots\dots (2.6)$$

ในกรณีการทดสอบแบบสองด้าน จะได้ช่วงที่มีการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-Z_{\alpha/2}, Z_{\alpha/2})$

ในกรณีการทดสอบแบบด้านเดียว สำหรับ $H_1 : \mu > \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-\infty, Z_\alpha)$ และ สำหรับ $H_1 : \mu < \mu_0$ จะได้ช่วงการยอมรับสมมติฐานหลัก คือ $(-Z_\alpha, \infty)$ หากอยู่นอกช่วงดังกล่าว แสดงว่า ปฏิเสธ H_0 และยอมรับ H_1

2.2 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยไม่ทราบความแปรปรวนของทั้งสองประชากรแต่ทราบว่าเท่ากัน

ให้ X และ Y คือประชากรที่ให้ความสนใจ 2 ชุดซึ่งมีการแจกแจงแบบปกติ มีค่าเฉลี่ย μ_x และ μ_y และมีความแปรปรวนที่ไม่ทราบค่าเป็น σ_x^2 และ σ_y^2 โดยที่ X และ Y มีความอิสระต่อกัน และ $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$

ในการทดสอบให้ทำการชักสิ่งตัวอย่างขนาด n_x และ n_y ตัว จากประชากร X และ Y และกำหนดให้เป็น X_1, X_2, \dots, X_{n_x} และ Y_1, Y_2, \dots, Y_{n_y} ตามลำดับ แล้วคำนวณค่าของตัวสถิติ \bar{X} และ \bar{Y} เมื่อกำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ α สามารถคำนวณค่าทางสถิติได้จากสมการ 2.7

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_x} (X_i - \bar{X})^2 + \sum_{i=1}^{n_y} (Y_i - \bar{Y})^2}{n_x + n_y - 2}}} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.3 การทดสอบความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการกระจายตัวแบบปกติ โดยไม่ทราบความแปรปรวนของทั้งสองประชากร และไม่จำเป็นต้องเท่ากัน

ในการตัดสินใจปัญหาทางวิศวกรรมนั้น มีหลายครั้งที่อาจจะไม่มีเหตุผลเพียงพอที่จะกำหนดให้ $\sigma_x^2 = \sigma_y^2$ จึงทำให้ไม่สามารถใช้ตัวสถิติสำหรับการทดสอบ t สำหรับการทดสอบความแตกต่างของ μ_x และ μ_y ได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องอาศัยการประมาณตัวสถิติสำหรับการทดสอบขึ้น โดยอาศัย t' เป็นสถิติสำหรับการทดสอบ โดยที่ t' มีคุณสมบัติว่า ถ้า $\mu_x = \mu_y$ แล้ว การกระจายของความน่าจะเป็นจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการกระจายแบบ t ค่าสถิติสำหรับการทดสอบ t' มีสูตรดังสมการที่ 2.8

$$t' = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sqrt{\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y}}} \dots\dots\dots (2.8)$$

เมื่อ $\mu_x = \mu_y$ และ $t' = t_{\alpha, v}$ โดยที่ α เท่ากับระดับนัยสำคัญ และ v คือ องศาอิสระ มีสูตรการหาดังสมการที่ 2.9

$$v = \frac{\left(\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y} \right)^2}{\frac{(S_x^2/n_x)^2}{n_x + 1} + \frac{(S_y^2/n_y)^2}{n_y + 1}} - 2 \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

โดยมีช่วงการยอมรับ สมมติฐานหลัก ดังนี้

กรณี $H_1 : \mu_x \neq \mu_y$ ยอมรับ H_0 ในช่วง $(-t_{\alpha/2, v}, t_{\alpha/2, v})$

กรณี $H_1 : \mu_x > \mu_y$ ยอมรับ H_0 ในช่วง $(-\infty, t_{\alpha, v})$

กรณี $H_1 : \mu_x < \mu_y$ ยอมรับ H_0 ในช่วง $(-t_{\alpha, v}, \infty)$

2.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ เทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรผัน (Variation) ที่เกิดขึ้นในข้อมูลเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผัน อาจเขียนเป็นสมการที่ 2.10

$$\begin{aligned} \text{ความแปรผันทั้งหมด} &= \text{ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย} \\ &+ \text{ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล} \dots(2.10) \end{aligned}$$

สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้นไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่า ความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random error) ของข้อมูล แต่เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะมาจากปัจจัย (Factor) หนึ่งปัจจัยใดหรือหลายๆ ปัจจัย ทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตามซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมหรือวัดผลมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะไม่มีความเดียวแต่จะมีหลายๆ ค่าซึ่งเรียกว่า ระดับ (Level) ของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ละระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามที่ไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำได้โดยทำการทดลอง (Treatment)

กำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาค่าตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีนัยสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง จึงมักจะต้องการทวนซ้ำ (Replicated) ให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัย ถ้าเป็นการเจาะจง รูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าเป็นแบบเจาะจง (Fixed effect model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าเป็นการเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่ม รูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม (Random effect model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวมของปัจจัย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยเดียว (Single factor ANOVA)

เมื่อมีปัจจัย k ระดับที่คาดว่ามีความแปรผันของข้อมูล และสมมติว่าได้ทำการทดลองที่แต่ละระดับ n ครั้ง อาจจัดเรียงข้อมูลได้ในตารางที่ 2.3

สมมติให้ μ_j เป็นค่าเฉลี่ยของประชากรที่ได้จากการทดลองที่ระดับ j และทุกประชากรมีความแปรปรวนร่วมกัน σ^2 และทุกประชากรมีลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นแบบนอร์มอล นั่นคือ $X_{ij} \sim N(\mu_j, \sigma^2)$ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ และ $j = 1, 2, \dots, k$ ดังนั้นสามารถอธิบายด้วยสมการ 2.11

$$X_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

- เมื่อ
- X_{ij} = ผลจากการทดลองของการทดลองที่ i และการซ้ำครั้งที่ j
 - μ_{ij} = ค่าเฉลี่ยทั้งหมดซึ่งเป็นค่าคงที่
 - α_j = อิทธิพลของปัจจัยระดับที่ j
 - ε_{ij} = ความผิดพลาดแบบสุ่ม

ตารางที่ 2.3 ผลการทดลองสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดลองที่	ข้อมูลจากการทดลอง			
	1	2	3.....k	
1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{1n}
2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{2k}
.
.
.
n	X_{n1}	X_{n2}	X_{n3}	X_{nk}
รวม	$T_{.1}$	$T_{.2}$	$T_{.3}$	$T_{.k}$
เฉลี่ย	$\bar{X}_{.1}$	$\bar{X}_{.2}$	$\bar{X}_{.3}$	$\bar{X}_{.k}$

เพื่อทดสอบอิทธิพลของปัจจัย จึงทดสอบสมมติฐานหลักว่า ค่าเฉลี่ยของทุกประชากร เท่ากันหรือไม่ เพราะถ้าตอบรับสมมติฐานแสดงว่าปัจจัยไม่มีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูล นั่นคือ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

หรือ $H_0 : \mu + \sigma_1 = \mu + \sigma_2 = \dots = \mu + \sigma_k$

หรือ $H_0 : \sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_k$

เพราะว่า $\sum_{j=1}^k \alpha_j = 0$ ดังนั้นสมมติฐานที่จะทดสอบจึงเป็น

$$H_0 : \alpha_j = 0 \quad \text{สำหรับทุก } j \quad \text{หรือ } H_0 : \text{ปัจจัยที่พิจารณาไม่มีผล}$$

$$H_1 : \alpha_j \neq 0 \quad \text{สำหรับบาง } j \quad \text{หรือ } H_1 : \text{ปัจจัยที่พิจารณา มีผล}$$

สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรตามเนื่องจากปัจจัยเดียว มีขั้นตอนดังนี้

1. เนื่องจากความแปรผันของตัวแปรตาม X_{ij} คาดว่ามีผลมาจากอิทธิพลของปัจจัยหนึ่ง ปัจจัยจึงอาจเขียนรูปแบบของความแปรผัน X_{ij} ได้เป็น

$$X_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij}$$

สมมติฐานที่จะทดสอบ คือ $H_0 : \alpha_j = 0$ สำหรับทุก j

$H_1 : \alpha_j \neq 0$ สำหรับบาง j

2. คำนวณผลบวกกำลังสองทั้งหมด (Total sum of square; SS_T) ได้จากสมการที่ 2.12 หรือ 2.13 และองศาของควมอิสระได้จาก สมการที่ 2.14

$$SS_T = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_{..})^2 \dots\dots\dots (2.12)$$

$$= \sum_j \sum_i X_{ij}^2 - \frac{\left(\sum_j \sum_i X_{ij} \right)^2}{nk} \dots\dots\dots (2.13)$$

องศาของควมอิสระ (DF) $\nu_T = nk - 1 \dots\dots\dots (2.14)$

3. คำนวณผลบวกกำลังสองเนื่องจากปัจจัย (Treatment sum of square; SS_{Tr}) ได้จาก สมการที่ 2.15 หรือ 2.16 และองศาของควมอิสระได้จาก สมการที่ 2.17

$$SS_{Tr} = \sum_j (\bar{X}_{.j} - \bar{X}_{..})^2 \dots\dots\dots (2.15)$$

$$= \frac{\sum_j \left(\sum_i X_{ij} \right)^2}{n} - \frac{\left(\sum_j \sum_i X_{ij} \right)^2}{nk} \dots\dots\dots (2.16)$$

องศาของควมอิสระ $\nu_{Tr} = k - 1 \dots\dots\dots (2.17)$

4. คำนวณผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม (Error sum of square; SS_E) ได้จากสมการที่ 2.18 และองศาของควมอิสระได้จาก สมการที่ 2.19

$$SS_E = SS_T - SS_{Tr} \dots\dots\dots (2.18)$$

องศาของควมอิสระ $\nu_E = nk - k \dots\dots\dots (2.19)$



5. คำนวณค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean square; MS) สำหรับปัจจัยและค่าผิดพลาดแบบสุ่มได้จากสมการที่ 2.20 และ 2.21 ตามลำดับ

$$MS_{Tr} = \frac{SS_{Tr}}{\nu_{Tr}} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{\nu_E} \dots\dots\dots (2.21)$$

6. คำนวณค่าสถิติสำหรับทดสอบ F ได้จากสมการที่ 2.22

$$F = \frac{MS_{Tr}}{MS_E} \dots\dots\dots (2.22)$$

7. เปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับ $F_{\alpha, \nu_{Tr}, \nu_E}$

ถ้า $F \geq F_{\alpha, \nu_{Tr}, \nu_E}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha, \nu_{Tr}, \nu_E}$ ยอมรับ H_0

เพื่อสรุปผลการทดสอบให้ดูได้ง่าย จึงจัดทำเป็นตารางที่เรียกว่า ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนเนื่องจากปัจจัยเดียว

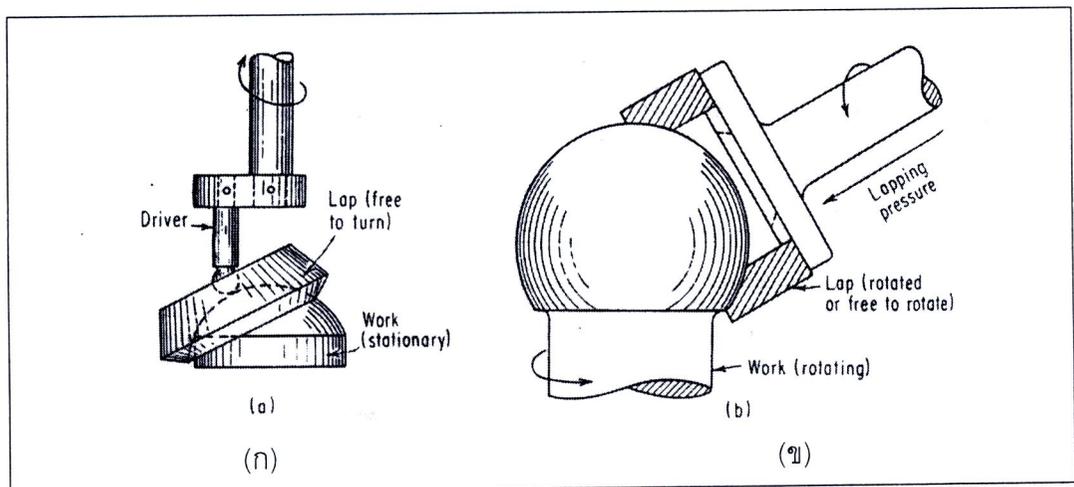
แหล่งความแปรผัน	องศาของควมอิสระ	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง	F
ปัจจัย	ν_{Tr}	SS_{Tr}	MS_{Tr}	$\frac{MS_{Tr}}{MS_E}$
ความผิดพลาดแบบสุ่ม	ν_E	SS_E	MS_E	
รวม	ν_T	SS_T		

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การเจียรขึ้นรูปทรงกลม (Spherical grinding)

การขึ้นรูปทรงกลมนั้น สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การอัดขึ้นรูป (Die pressing) การหล่อแบบ (Die casting) และการเจียรขึ้นรูปทรงกลม (Spherical grinding) เป็นต้น สำหรับการเจียรขึ้นรูปทรงกลมนั้น เป็นการนำวัสดุขัดถูมาขัดผิวชิ้นงานเพื่อให้เกิดชิ้นงานทรงกลมขึ้น ซึ่งมีหลายประเภทด้วยกัน ดังนี้

1. การเจียรด้วยถ้วยหินเจียร (Cup lapping) เป็นการนำวัสดุขัดถูที่มีลักษณะว่าเป็นถ้วย มาใช้ในการเจียรทำให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปทรงและขนาดตามลักษณะของถ้วยหินเจียร (Dallas, D., 1976) ดังรูปที่ 2.17

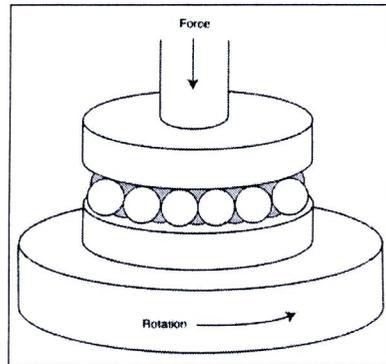


รูปที่ 2.17 การเจียรทรงกลมด้วยถ้วยหินเจียร (ก) ชิ้นงานอยู่กับที่ (ข) ชิ้นงานเคลื่อนที่

จากรูปที่ 2.17 (ก) เครื่องจักรนี้จะมีลักษณะคล้ายเครื่องเจาะ โดยมีลักษณะข้อเหวี่ยงที่มีระยะเหวี่ยงที่พอดี เมื่อแกนหมุนส่งผลให้ตัวขัดได้หมุนตามไปด้วย โดยตัวขัดมีการเคลื่อนที่ที่เป็นอิสระตามระยะข้อเหวี่ยง ตัวขัดจะเคลื่อนที่แต่ชิ้นงานจะอยู่กับที่ การเจียรแบบนี้สามารถเจียรแบบแรงดันได้

รูปที่ 2.17 (ข) ชิ้นงานและตัวขัดจะเคลื่อนที่ด้วยกันทั้งคู่ โดยตัวขัดมีลักษณะว่า เพื่อให้ได้รัศมีของชิ้นงานที่ต้องการ จำเป็นจะต้องตั้งการจัดเรียงให้ดี โดยลักษณะการเจียรแบบนี้ ได้นำไปใช้ผลิตเลนส์ หรือ ล้อหินขัดเพชร

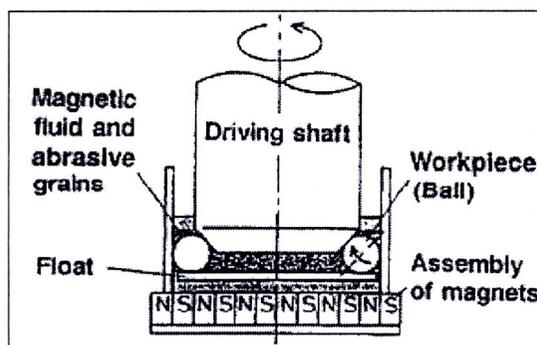
2. การเจียรทรงกลมแบบไม่ตรงศูนย์ (Centerless Spherical Grinding) ซึ่งนิยมใช้กันในเชิงพาณิชย์ (http://www.precisionballs.com/all_wias2.htm)



รูปที่ 2.18 การเจียรทรงกลมแบบไม่ตรงศูนย์

การเจียรทรงกลมแบบไม่ตรงศูนย์ ดังรูปที่ 2.18 ทำการเจียรโดยให้ชิ้นงานป้อนเข้าไปในแผ่นวงแหวน 2 วง โดยวงหนึ่งหมุน อีกวงอยู่กับที่ หลักการคือใส่ลูกบอลมาตรฐาน 3 ลูก เข้าไประหว่างแผ่นวงแหวน ทำการเจียรโดยหมุนแผ่นล่าง และออกแรงกดจากด้านบน ทำให้เกิดการขจัดเนื้อออกอย่างรวดเร็ว วิธีการนี้ทำให้ความแตกต่างของขนาดและความหยาบผิวในแต่ละล้อตการผลิตลดลง หรือ ในทุกๆ ล้อตการผลิตจะชิ้นงานที่กลมและมีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน

3. Magnetic fluid grinding เป็นการเจียรชิ้นงานซิลิกอนไนไตรด์ (Si_3N_4) ด้วยของไหลซึ่งอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก (Umehara, N., 1996) ดังรูปที่ 2.19



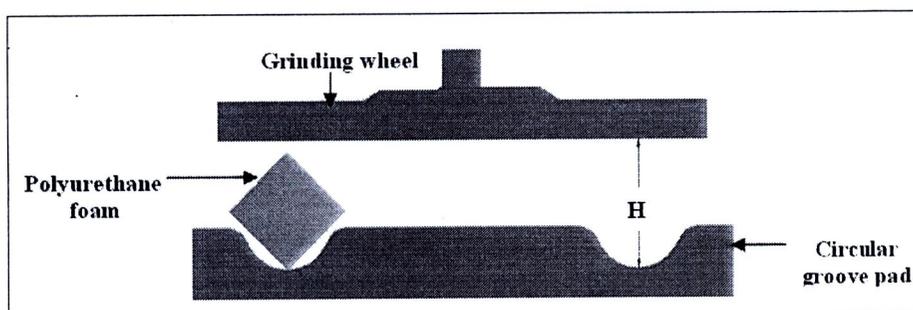
รูปที่ 2.19 Magnetic fluid grinding

จากรูปที่ 2.19 แสดงของไหลสารแม่เหล็ก (Magnetic fluid) เกรนวัสดุขัดดี (abrasive grain) ชิ้นงาน แผ่นลอย และแม่เหล็กถาวร โดยเกรนวัสดุขัดดี ชิ้นงาน และแผ่นลอย ไม่ได้มี

คุณสมบัติทางแม่เหล็ก ได้ลอยอยู่ในของไหลสารแม่เหล็กด้วยแรงลอย (Buoyant force) เมื่อเพลลาขับเคลื่อนด้วยความเร็ว 5000 รอบต่อนาที ทำให้ชิ้นงานหมุนรอบตัวเองและหมุนไปรอบผนังด้านในของภาชนะ โดยชิ้นงานถูกเจียรด้วยเกรนวัสดุขัดสี มีอัตราการขจัด (Removal rate) $12.4 \mu\text{m}$ ต่อ นาที ความกลม $2.4 \mu\text{m}$ และความเรียบผิว $0.05 \mu\text{m}R_{\text{max}}$ และพบว่า เมื่อของไหลสารแม่เหล็กกับเกรนวัสดุขัดสีมีความหนืดต่ำ ทำให้ไม่เกิดการหมุนตัวของชิ้นงาน ในทางตรงกันข้ามหากมีความหนืดสูง จะทำให้การเจียรของวัสดุไม่มีประสิทธิภาพ

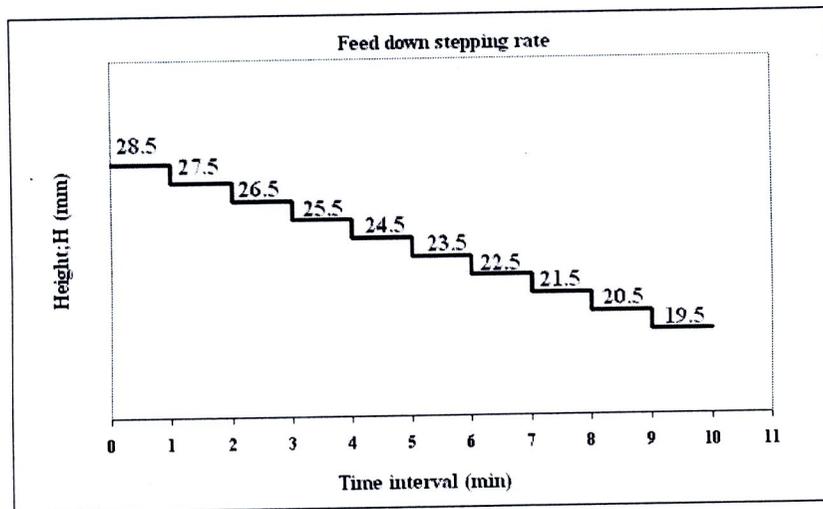
4. การเจียรทรงกลมด้วยร่องรูปโค้ง (Circular - groove grinding) เป็นการเจียรโดยใช้กระดาษทรายความหยาบเบอร์ 240 ติดกับจานขัดด้านบน และแผ่นจานร่องด้านล่าง ได้ทำการเจียรชิ้นรูปวัสดุทรงกลมโดยใช้วัสดุชนิดโพลียูรีเทนโฟม โดยใช้ความเร็วรอบจานขัด 520 รอบต่อนาที ทำการเจียรดังรูปที่ (Isarawit Chaopanich, *et.al.*, 2007)

ทำการเจียรด้วยระยะความลึกเจียร (H) ในรูปที่ 2.20 โดย H มีค่าตั้งแต่ 28.5 ถึง 19.5 มิลลิเมตร ทำการเจียรแบบขั้นบันได โดยลดระดับลงครั้งละ 1 มิลลิเมตรและคงที่ไว้ในระดับนั้นระดับละ 1 นาที ดังรูป 2.21



รูปที่ 2.20 ลักษณะการเจียรด้วยแผ่นจานร่องรูปโค้ง

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ สามารถขึ้นเจียรชิ้นรูปชิ้นงานโพลียูรีเทนโฟมทรงกลมขนาด 19.33 ± 0.06 มิลลิเมตร โดยมีอัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก 591 ± 12 ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที

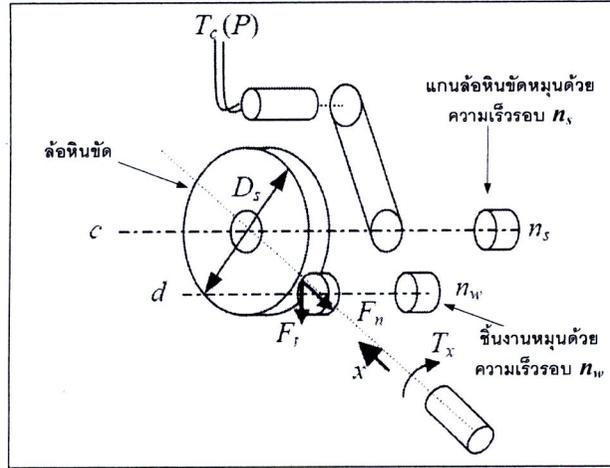


รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความลึกเจียรกับเวลา

2.5.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเจียร

Stianko, M., 2005 ได้ศึกษาและเฝ้าสังเกตปัจจัยที่เกิดขึ้นในระหว่างการเจียรผิวชิ้นงานรูปทรงกระบอกโดยใช้เครื่องซีเอ็นซี (CNC) โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

T_x	ทอร์ก (Torque) รอบแกน x
T_c	ทอร์กรอบแกน c
P	กำลัง
F_n	แรงกดปกติ (Normal force)
F_t	แรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force)
n_s	ความเร็วรอบของล้อหินขัด
n_w	ความเร็วรอบของชิ้นงาน
D_s	เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อหินขัด
R_s	รัศมีของล้อหินขัด
ω_s	ความเร็วเชิงมุมของล้อหินขัด
x	ตำแหน่งในแนวแกน x



รูปที่ 2.22 ตัวแปรที่เป็นผลจากการเจียร

รูปที่ 2.22 แสดงกลไกของการเจียรผิวชิ้นงานรูปทรงกระบอกด้วยล้อหินเจียรที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง D_s และได้จำแนกตัวแปรต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นในขณะที่เจียร โดยล้อหินขัดหมุนรอบแกน c ด้วยความเร็วรอบ n_s โดยมีทอร์ก T_c และกำลังขัด (P) ที่เกิดขึ้น ขณะเจียรผิวบนชิ้นงานที่หมุนด้วยความเร็วรอบ n_w รอบแกน d เกิดแรงกระทำ คือ แรงกดปกติ (Normal force; F_n) ที่มีทิศทางต้านชิ้นงานในแนวแกน x และแรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force; F_t) ในแนวเส้นสัมผัสกับล้อเจียร ดังรูป สามารถบันทึกค่าต่างๆ ในระหว่างการเผ่าสังเกต เช่น ทอร์กบนแกน c ทอร์กบนแกน x ความเร็วของล้อหินขัด ความเร็วของชิ้นงาน และตำแหน่งในแนวแกน x เป็นต้น

จากตัวแปรข้างต้น สามารถนำมาคำนวณหาตัวแปรตอบสนองต่างๆ ได้แก่ กำลังที่ใช้ในการเจียร (Power) แรงปกติ (Normal force) แรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force) อัตราส่วนความเร็ว (Speed ratio) อัตราส่วนแรง (Force ratio) และ พลังงานจำเพาะ (Specific energy) เป็นต้น

กำลังที่ใช้ในการเจียร (Power; P) คำนวณได้จาก ทอร์กรอบแกน c (T_c) กับความเร็วรอบของล้อหินขัด (n_s) ดังสมการที่ 2.23

$$P = \frac{T_c \cdot 2\pi \cdot n_s}{60} \dots\dots\dots (2.23)$$

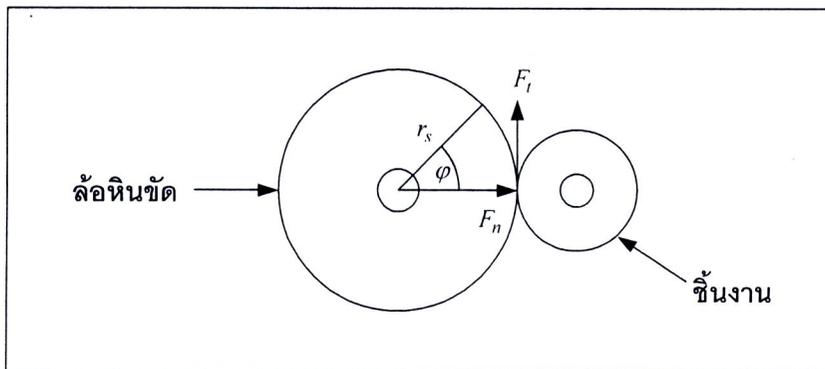
- เมื่อ P = กำลังที่ใช้ในการเจียร (นิวตัน-เมตร / วินาที)
- T_c = ทอร์กรอบแกน c (นิวตัน-เมตร)
- n_s = ความเร็วรอบของล้อหินขัด (รอบต่อนาที)

แรงกดปกติ (Normal force; F_n) คำนวณได้จาก ทอร์กรอบแกน \times (T_x) ระยะเวลาเคลื่อนที่เชิงมุม (φ) และ ตำแหน่งในแนวแกน \times (x) ได้ดังสมการที่ 2.24

$$F_n = \frac{T_x \cdot \varphi}{x} \dots\dots\dots (2.24)$$

- เมื่อ F_n = แรงกดปกติ (นิวตัน)
- T_x = ทอร์กรอบแกน \times (นิวตัน-เมตร)
- φ = ระยะเวลาเคลื่อนที่เชิงมุม
- x = ตำแหน่งในแนวแกน \times (เมตร)

แรงในแนวเส้นสัมผัส (Tangential force; F_t) ได้แสดงลักษณะการเกิดแรงในรูปที่ 2.23 สามารถคำนวณได้จาก กำลังที่ใช้ในการเจียร (P) และความเร็วตัดของล้อหินขัด (v_s) ดังสมการที่ 2.25



รูปที่ 2.23 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นขณะเจียร

$$F_t = \frac{P}{v_s} \dots\dots\dots (2.25)$$

โดย $v_s = \frac{\pi n_s D_s}{60} \dots\dots\dots (2.26)$

เมื่อแทนสมการ 2.26 ลงในสมการที่ 2.25 จะได้

$$F_t = \frac{60 P}{\pi n_s D_s} \dots\dots\dots (2.27)$$

- เมื่อ F_t = แรงในแนวเส้นสัมผัส (นิวตัน)
 P = กำลังที่ใช้ในการเจียร (นิวตัน-เมตร / วินาที)
 v_s = ความเร็วตัดของล้อหินขัด (เมตรต่อวินาที)
 n_s = ความเร็วรอบของล้อหินขัด (รอบต่อนาที)
 D_s = เส้นผ่านศูนย์กลางของล้อหินขัด (เมตร)

อัตราส่วนความเร็ว (Speed ratio; q) แสดงถึงคุณภาพผิวของชิ้นงานในการเจียรทรงกระบอก ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างความเร็วรอบหินขัด (n_s) และความเร็วรอบชิ้นงาน (n_w) ดังสมการที่ 2.28 อัตราส่วนความเร็วเป็นเลขจำนวนเต็ม ระหว่างการเจียร (ตัวอย่างเช่น $q = 17$ หรือ 18 เป็นต้น) และอัตราส่วนความเร็วเป็นเลขทศนิยม ระหว่างการเกิดประกายไฟ (Spark-out) (ตัวอย่างเช่น $q = 17.3$ หรือ 17.5 เป็นต้น)

$$q = \frac{n_s}{n_w} \dots\dots\dots (2.28)$$

- เมื่อ n_s = ความเร็วรอบของล้อหินขัด (รอบต่อนาที)
 n_w = ความเร็วรอบของชิ้นงาน (รอบต่อนาที)

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient; μ) หรือเรียกว่า อัตราส่วนแรง (force ratio) หมายถึงอัตราส่วนระหว่างแรงในแนวเส้นสัมผัสล้อหินเจียรต่อแรงกดปกติบนผิวชิ้นงาน หาได้จากสมการ 2.29

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \dots\dots\dots (2.29)$$

- เมื่อ μ = อัตราส่วนแรง
 F_t = แรงในแนวเส้นสัมผัส (นิวตัน)
 F_n = แรงกดปกติ (นิวตัน)

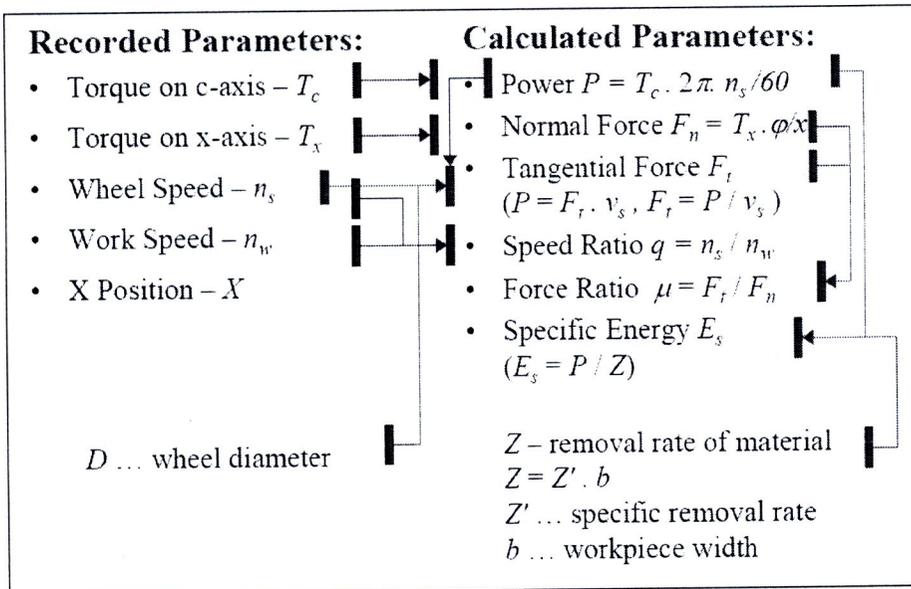
พลังงานเจียรจำเพาะ (Specific grinding energy; E_s) คือ อัตราส่วนระหว่างกำลังที่ใช้ในการเจียรต่ออัตราการขจัดเนื้อวัสดุออกใน 1 หน่วยปริมาตร แสดงได้ดังสมการที่ 2.30 ซึ่งสามารถบอกได้ถึงคุณภาพของกระบวนการเจียรระหว่างล้อหินขัดและชิ้นงาน

$$E_s = \frac{P}{Z} \dots\dots\dots (2.30)$$

- เมื่อ E_s = พลังงานเจียรจำเพาะ (นิวตัน-เมตร / ลูกบาศก์มิลลิเมตร)
 P = กำลังที่ใช้ในการเจียร (นิวตัน-เมตร / วินาที)
 Z = อัตราการขจัดเนื้อวัสดุออก (ลูกบาศก์มิลลิเมตร / วินาที)

ดังนั้น ตัวแปรที่สามารถคำนวณได้ คือ กำลังที่ใช้ในการเจียร แรงกดปกติ แรงในแนวเส้นสัมผัส อัตราส่วนความเร็ว อัตราส่วนแรง และพลังงานเจียรจำเพาะ จากข้อมูลทั้งในส่วนของคุณค่าของตัวแปร ที่ได้จากบันทึกและการคำนวณสามารถเขียนแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่

2.24

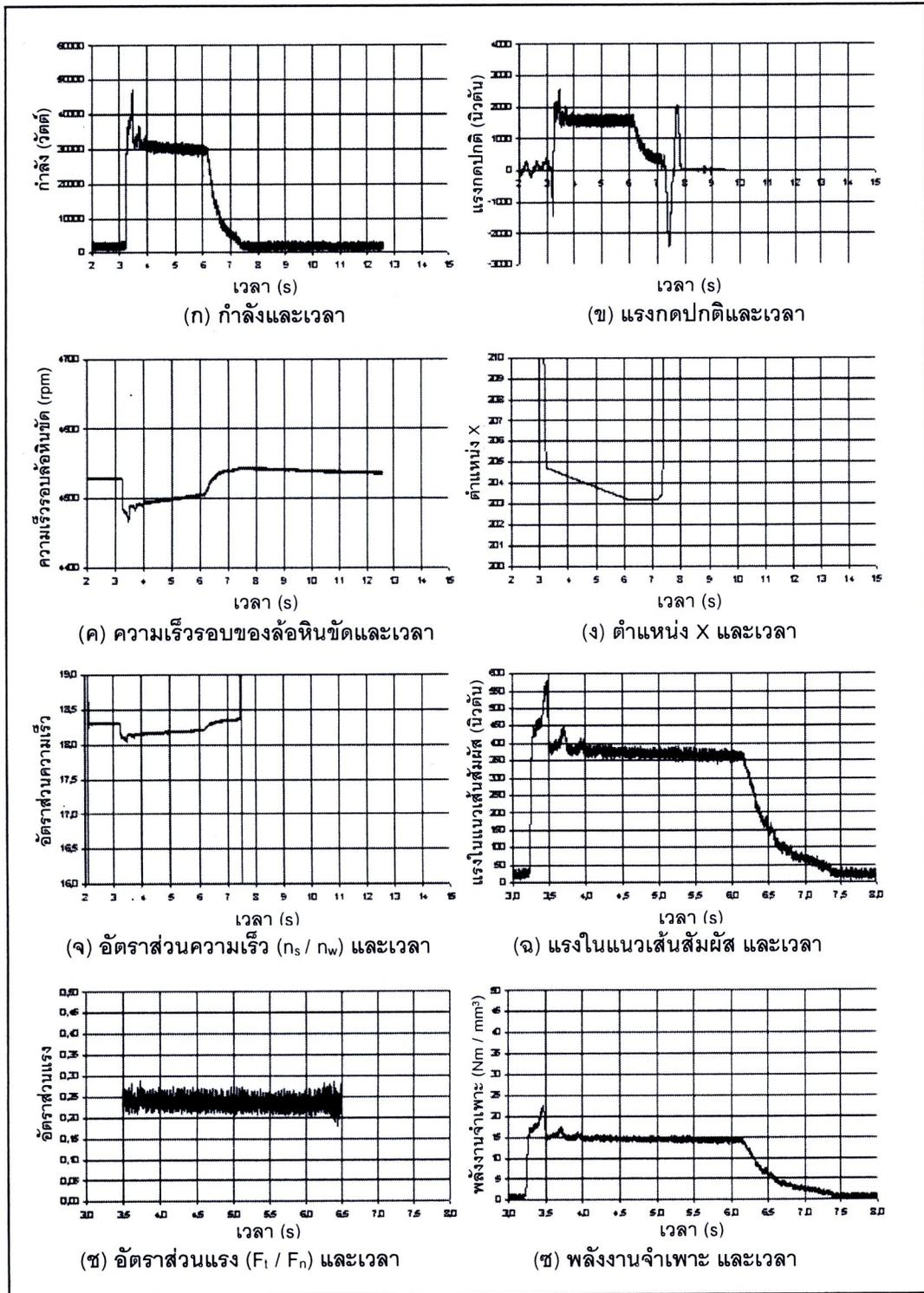


รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อการเจียร

จากการเฝ้าสังเกตปัจจัย พบว่างานวิจัยนี้สามารถที่แสดงสารสนเทศที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาระดับสูงและแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่ชัดเจน เช่น กำลังที่ใช้ในการเจียร ความเร็วรอบของล้อ

หินขัด อัตราส่วนความเร็ว อัตราส่วนแรง แรงกดปกติ แรงในแนวเส้นสัมผัส ตำแหน่งในแนวแกน X และ พลังงานเฉื่อยจำเพาะ เป็นต้น

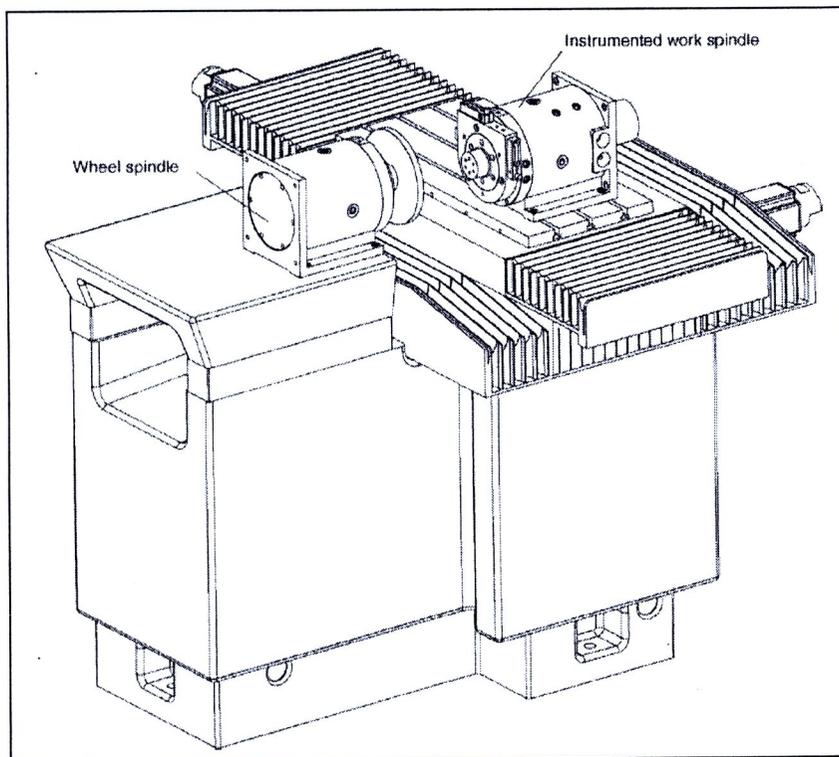
โดยได้แสดงปัจจัยต่างๆนี้ เทียบกับเวลาดังรูปที่ 2.25 เช่น ก่อนที่ชิ้นงานจะเคลื่อนที่เข้าถึง หินขัด กำลังที่ใช้ในการเฉื่อยมีค่าประมาณ 1000 วัตต์ (รูป ก) และมีความเร็วรอบของล้อหินขัด ประมาณ 4540 รอบต่อนาที (รูป ค) ณ เวลา 3.3 วินาที ชิ้นงานเริ่มปะทะกับล้อหินขัดทำให้ กำลังที่ใช้ในการเฉื่อย แรงกดปกติและแรงในแนวเส้นสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น (รูป ก ข และ ฉ ตามลำดับ) ส่วน ความเร็วรอบล้อหินขัดจะลดความเร็วลงไปเหลือ 4470 รอบต่อนาที เป็นต้น



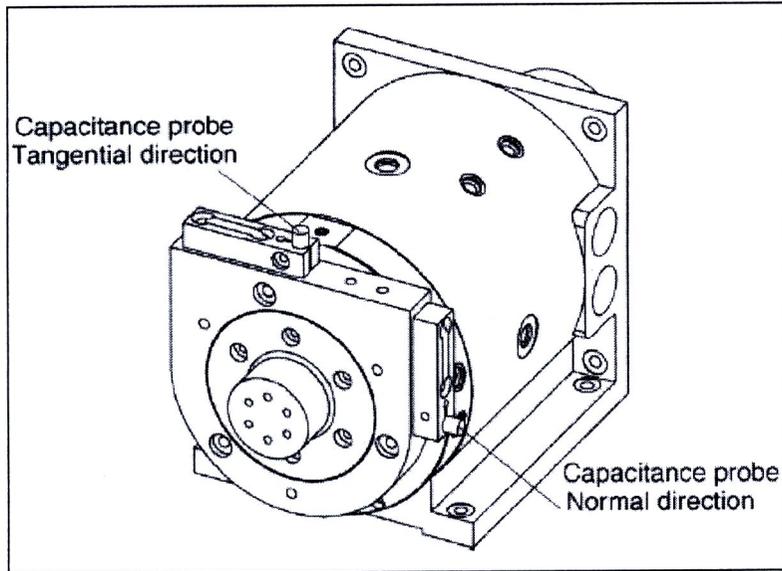
รูปที่ 2.25 ข้อมูลของตัวแปรที่เกิดขึ้นระหว่างการเจียร

Couey, J. A., 2005 ได้ใช้ตัวรับรู้ชนิดวัดการกระจัดชนิด Capacitance probe (Capacitive displacement sensor) ที่มีความไวสูง และสามารถตรวจจับได้ถึงระดับ มิลลินิวตัน (milli-Newton) มาติดตั้งกับกระสวยอากาศสถิต (Aerostatic spindle) โดยไม่ต้องทำการดัดแปลงเครื่องมือ โดยใช้เครื่อง CNC-Moore 450 ดังรูปที่ 2.26 ในการเจียรชิ้นงานทรงกระบอกความเที่ยงสูง เป็นการวัดความสัมพันธ์ระหว่างโรเตอร์ (Rotor) และ สเตเตอร์ (Stator) ทำการติดตั้งหัววัด (Probe) แรงในแนวเส้นสัมผัสและแรงกดปกติ ดังรูปที่ 2.27 ทำให้ค่าที่วัดได้มีความเที่ยง เสถียร และสามารถวัดค่าได้ถึงแม้ว่าแรงที่เกิดขึ้นมีน้อยก็ตาม แสดงค่าของแรงในแนวเส้นสัมผัส และแรงกดปกติที่วัดได้ในรูปที่ 2.28

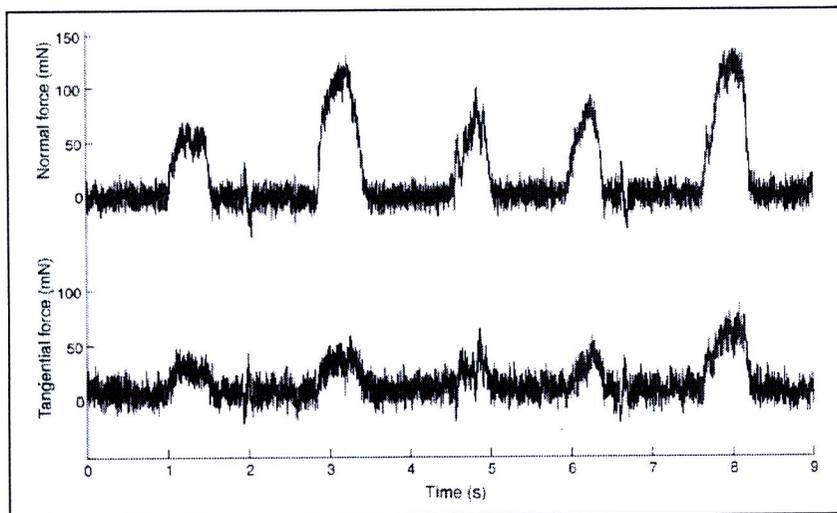
จากงานวิจัยนี้มีข้อดี คือ ทำให้ทราบการเกิดสภาวะ ที่ความเหมาะสมของกระบวนการ สามารถปรับปรุงกระบวนการ และผลิตชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงได้



รูปที่ 2.26 เครื่องซีเอ็นซี (Moore 450) ที่นำตัวรับรู้มาประยุกต์ติดตั้ง

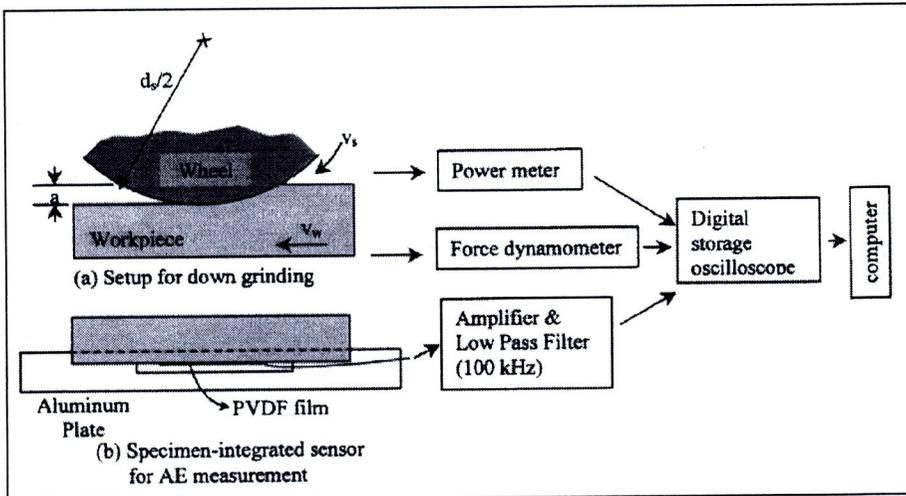


รูปที่ 2.27 การประยุกต์ติดตั้งตัวรับรู้นบนโรเตอร์



รูปที่ 2.28 แรงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเจียร

Hwang, T. W., 2000 ได้ทำการใช้ตัวรับรู้นประเภทรับค่าด้วยเสียง (Acoustic emission: AE) ในการเฝ้าสังเกตการเจียรซิลิคอนไนไตรด์ (Silicon nitride) ด้วยความเร็วสูง (14,000 รอบต่อนาที) และได้ติดตั้งไดนามิเตอร์ (Dynamometer: Kister 9257A) ในการวัดแรงเจียรในแนวเส้นสัมผัส (tangential grinding force) โดยตัวรับรู้นที่ใช้ คือ फिल्मแปลงสัญญาณชนิด polyvinylidene fluoride piezoelectric (PVDF) ซึ่งได้ความเข้มสัญญาณสูง ช่วงกว้าง กะทัดรัด ติดตั้งได้ง่าย และราคาถูก แสดงการติดตั้งในรูปที่ 2.29



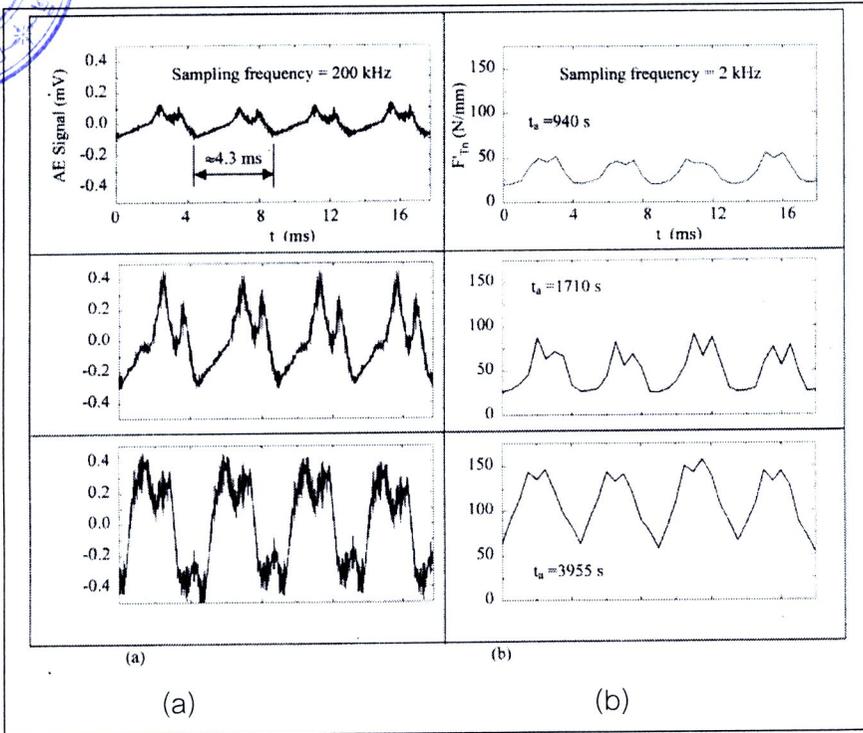
รูปที่ 2.29 การติดตั้งตัวรับรู้และวิธีการทดลอง

จากรูปที่ 2.29 (a) การเจียรชิ้นงานซิลิคอนไนไตรด์ ความลึกตัด $a=25.4 \mu\text{m}$ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v_w = 42.3 \text{ mm/s}$ เข้าสู่ล้อหินขัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $d_s = 203.2 \text{ mm}$ ที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v_s = 149 \text{ m/s}$ โดยมีการวัดการใช้กำลังและแรงในการเจียรที่เกิดขึ้นด้วยมิเตอร์วัดกำลัง (Power meter) และไดนามิเตอร์ (Kistler 9257A) ตามลำดับ ส่งสัญญาณไปให้ออสซิลโลสโคป และเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล

จากรูปที่ 2.29 (b) ติดตั้งฟิล์ม PVDF ไว้ใต้ชิ้นงาน ซึ่งจับยึดด้วยแผ่นอะลูมิเนียม เมื่อทำการเจียร ฟิล์ม PVDF จะแปลงสัญญาณเสียงที่ได้รับ ส่งเข้าสู่เครื่องขยายและกรองสัญญาณความถี่ต่ำ ส่งสัญญาณเข้าสู่ออสซิลโลสโคป และคอมพิวเตอร์ ตามลำดับ

สิ่งสำคัญของการเฝ้าสังเกตที่จะต้องพิจารณา คือ การเลือกใช้ชนิดตัวรับรู้ที่เหมาะสมกับตำแหน่งที่ต้องการติด กระบวนการในการประมวลผลข้อมูล และ สารสนเทศที่ต้องการ

จากรูปที่ 2.30 จากการเฝ้าสังเกตสัญญาณและแรงที่เกิดขึ้น ณ เวลา $t_s = 940$ 1710 และ 3955 วินาที ดังรูปที่ 2.30 (a) พบว่า สัญญาณ AE มีการเกิดเป็นคาบสัญญาณประมาณ 4.3 ms ซึ่งสอดคล้องกับความถี่รอบหินขัด 14000 รอบต่อนาที (233 Hz) และเมื่อเวลาเจียรเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดของสัญญาณ AE เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยมีทิศทางเดียวกับการเพิ่มขึ้นของการสึกของล้อหินขัด ซึ่งวัดค่าแรงกดปกติได้ในรูปที่ 2.30 (b) ดังนั้น จึงสามารถเฝ้าสังเกตสัญญาณ AE สำหรับการเจียรด้วยความเร็วสูงได้ ทำให้ได้ทราบถึงข้อมูลที่มีประโยชน์ เช่น การสึกของล้อหินขัด และ โพรไฟล์ของล้อ ซึ่งนำไปใช้สำหรับการพยากรณ์ความเสียหายของล้อหินขัดได้



รูปที่ 2.30 (a) สัญญาณเสียง AE ที่ได้รับ เทียบกับ (b) แรงกดปกติที่เกิดขึ้นในขณะเจียร

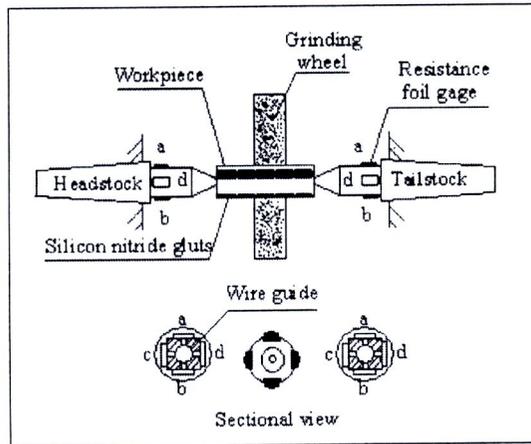
Li, Z., 2002 ระบุว่า การตรวจวัดแรงที่แม่นยำ (Accurate measurement) นั้นส่งผลให้เกิดคุณค่าต่อการวิจัย และมีนัยสำคัญในการศึกษาในเรื่องการเจียร ดังนั้นเพื่อที่จะศึกษาลึกลงไป ในกระบวนการเจียรนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการติดตั้งระบบการตรวจวัด (Measurement system) เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงเจียรที่เกิดขึ้นในระหว่างการเจียร โดยทั่วไปแล้ว การตรวจวัดจะประกอบไปด้วย ตัวตรวจจับ (Sensor) เครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) เครื่องแสดงผลและบันทึกข้อมูล (Oscilloscope) และ คอมพิวเตอร์ (Computer)

หลายบทความได้ระบุว่า แรงเจียรเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดของกระบวนการเจียร โดยสามารถบอกได้ถึงค่าและความเป็นไปของกระบวนการเจียรทั้งหมด โดยทั่วไปนั้นสามารถแบ่งแรงเจียรออกได้เป็น 3 ส่วนดังนี้ คือ

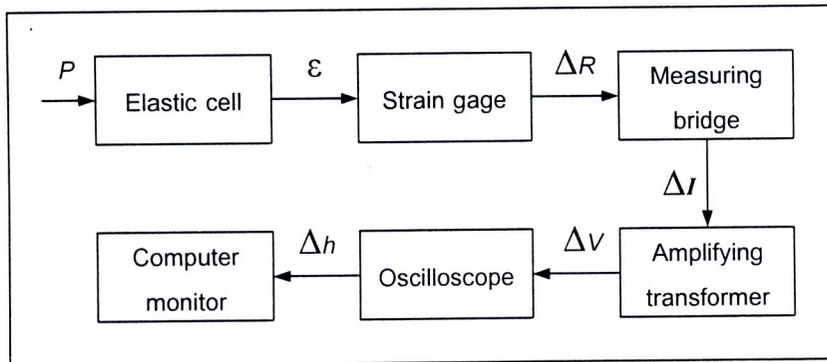
1. แรงเจียรกดปกติ (Normal grinding Force; F_n) หรือ แรงกดปกติ (Normal Force) เป็นแรงที่มีผลต่อการเปลี่ยนรูปของผิวชิ้นงาน (Surface deformation) และ ความหยาบของผิวชิ้นงาน (Roughness)
2. แรงเจียรในแนวเส้นสัมผัส (Tangential grinding Force; F_t) หรือ (Tangential Force) เป็นแรงที่มีผลต่อกำลังที่ใช้ในการเจียร (Power consumption) และ อายุการใช้งาน (Service life) ของล้อหินขัด

3. แรงป้อน (Feed Force) เป็นแรงที่เกิดขึ้นตามแนวทิศทางของการป้อน (Longitudinal feed) ซึ่งมีค่าน้อย

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ตัวรับรู้ชนิด Strain gage โดยมีการติดตั้งดังรูปที่ 2.31 เพื่อศึกษาแรงเฉื่อย โดย แรงกดปกติ จะมีผลต่อรูปทรงของผิวชิ้นงานและความเรียบผิว ขณะที่ แรงในแนวเส้นสัมผัส จะมีผลต่อการใช้กำลังและอายุการใช้งานของล้อขัด



รูปที่ 2.31 การติดตั้งระบบวัดแรงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.32 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงและส่งผ่านข้อมูลสัญญาณ

จากรูปที่ 2.32 เมื่อเซลล์ยืดหยุ่น (Elastic cell) ได้รับแรงกระทำ P ก็ได้เปลี่ยนแรงเป็นความเครียด (Strain; ϵ) ส่งเข้าสู่ Strain gage แปลงสัญญาณเป็นส่วนต่างความต้านทาน (ΔR) ส่งไปให้ Measuring bridge เพื่อแปลงส่วนต่างความต้านทานให้เป็นส่วนต่างกระแสไฟฟ้า (ΔI) เข้าสู่ Amplifying transformer โดยส่งค่าออกเป็นส่วนต่างความต่างศักย์ (ΔV) เข้าสู่ออสซิลโลสโคป เพื่อแสดงผลสู่จอคอมพิวเตอร์