

การสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตัดแบบแห้ง



นายสมชาติ อารยพิทยา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

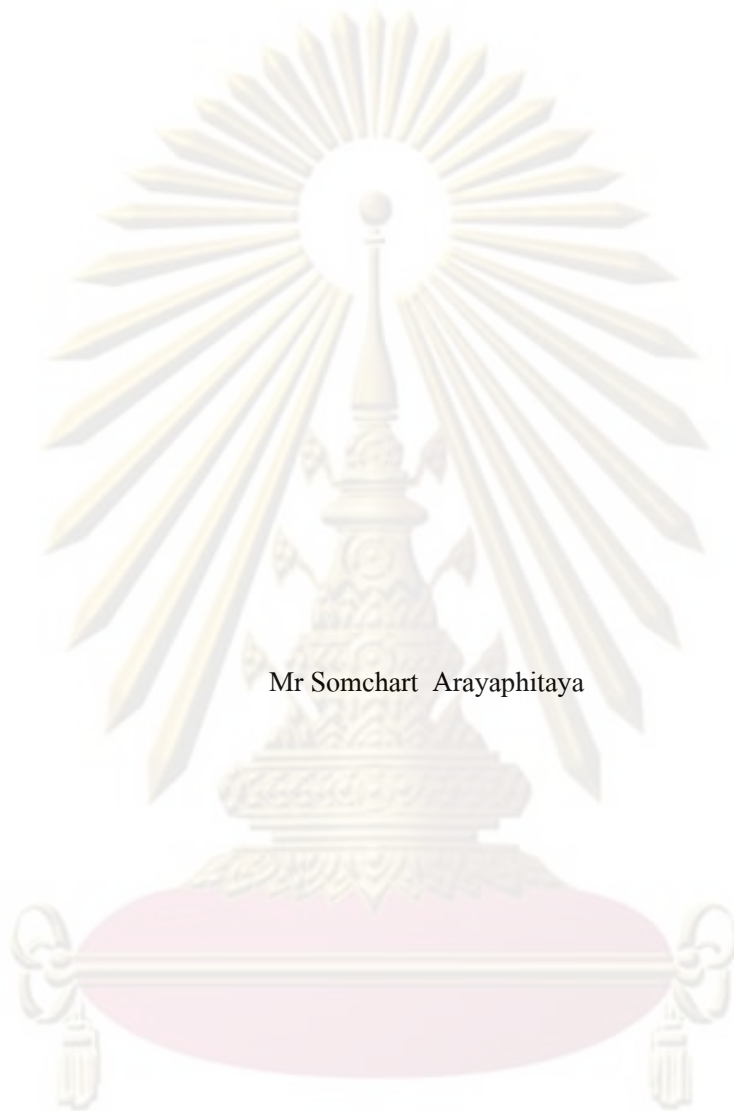
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INVESTIGATION OF SUITABLE CUTTING CONDITIONS FOR DRY METAL CUTTING



Mr Somchart Arayaphitaya

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

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตัดแบบแห้ง

โดย

นายสมชาติ อารยพิทยา

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาโท

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ชรรมาภรณ์พิลาศ)

.....
(รองศาสตราจารย์ จรุง มหิตทาพงศ์)

สมชาติ อารยพิทยา : การศึกษาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการตัดแบบแห้ง (INVESTIGATION OF SUITABLE CUTTING CONDITIONS FOR DRY METAL CUTTING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ ,174 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันโดยศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของมีดตัด ความเรียบผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาถึงค่าตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการตัด ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง แรงตัดและอุณหภูมิในการตัด ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการตรวจติดตามในกระบวนการตัด โดยโคนาโมมิเตอร์และPyrometer ซึ่งติดตั้งบนเครื่องซีเอ็นซีเพื่อใช้วัดแรงและอุณหภูมิในขณะตัด

การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับหารูปแบบสมการแบบจำลองซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ในการตัด โดยแสดงในเทอมของค่าพารามิเตอร์ในการตัด ซึ่งได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อน และความลึกในการตัด เพื่อพยากรณ์ถึงความหยาบผิวที่น้อยที่สุด จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนตัดส่งผลมากที่สุดต่อความหยาบผิว โดยใช้เทคนิคพื้นผิวผลตอบ แบบ Box-Behnken Design ทำให้ได้สมการถดถอยของพารามิเตอร์ความหยาบผิวเฉลี่ย $R_a = 10.3042 - 0.0129570v - 147.417f + 8.03630d - 0.0000158954(v^2) + 525.4(f^2) - 1.69720(d^2) + 0.125340(v.f) + 0.00217600(v.d) - 33.0560(f.d)$ สัดส่วนแรงตัด $F_t/F_c = 3.371 - 0.00383v - 22.652f + 0.6935d + 0.000031(v^2) + 47.27(f^2) + 0.2498(d^2) + 0.01199(v.f) + 0.000166(v.d) + 2.2616(f.d)$ และอุณหภูมิในการตัด $T = -3.21875 + 0.2075v + 3640f + 278d - 0.000113v^2 - 7400f^2 - 174d^2 - 0.90(v.f) + 0.18(v.d) - 480(f.d)$

จากผลการทดลองพบว่าด้วยความเชื่อมั่นที่ระดับ 95% อัตราป้อนตัดและความเร็วตัด มีผลต่อผลตอบทั้ง3ตัว ซึ่งได้แก่ความหยาบผิวชิ้นงาน สัดส่วนแรงตัด และอุณหภูมิในการตัด ส่วนความลึกตัดไม่มีผลต่อผลตอบทั้ง3 ตัว เงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุด คือ ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตรและสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองนี้ใช้เป็นแนวทางในการประยุกต์ต่อไป โดยใช้กำหนดค่าของปัจจัยต่างๆของกระบวนการกลึงจากสมการความสัมพันธ์นี้ เพื่อควบคุมความหยาบผิวของชิ้นงานให้ได้ตามเป้าหมายที่กำหนด

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อนิสิต..... สมชาติ อารยพิทยา
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก..... Sukh
ปีการศึกษา 2552.....

5071449221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : DRY CUTTING / RESPONSE SURFACE / CUTTING FORCE / SURFACE ROUGHNESS

SOMCHART ARAYAPHITAYA: INVESTIGATION OF SUITABLE CUTTING CONDITIONS FOR DRY METAL CUTTING. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, Ph.D., 174 pp.

The aim of this research is to investigate and prediction of surface roughness model in order to obtain the proper cutting condition for plain carbon steel (S45C) with the coat carbide tools under various cutting conditions. The cutting force and temperature are utilized to monitor the cutting process. The dynamometer and pyrometer are employed and installed on the turret of CNC turning machine in order to measure the in-process cutting force and cutting temperature.

Box-Behnken design was employed in developing the surface roughness model in relation to primary cutting parameters for minimizing the surface roughness. The surface roughness (R_a) were found to be fitted by a regression model $R_a = 10.3042 - 0.0129570v - 147.417f + 8.03630d - 0.0000158954(v^2) + 525.4(f^2) - 1.69720(d^2) + 0.125340(v.f) + 0.00217600(v.d) - 33.0560(f.d)$, Cutting force Ratio $F_y / F_z = 3.371 - 0.00383v - 22.652f + 0.6935d + 0.000031(v^2) + 47.27(f^2) + 0.2498(d^2) + 0.01199(v.f) + 0.000166(v.d) + 2.2616(f.d)$ and Temperature $T = -3.21875 + 0.2075v + 3640f + 278d - 0.000113(v^2) - 7400(f^2) - 174(d^2) - 0.90(v.f) + 0.18(v.d) - 480(f.d)$

From the experimental at 95% confident level, the proper cutting condition obtained at the cutting speed 350 m/min, the feed rate 0.15 mm/rev and the depth of cut 0.5 mm. From the experimental results, the model of relation between effective factors and response variables can be used for the continuous improvement by using the defined factors in turning process to control the surface roughness.

Department : Industrial Engineering

Student's Signature

สมชาติ อารายพิทยา

Field of Study : Industrial Engineering

Advisor's Signature

สมชาติ อารายพิทยา

Academic Year : 2009

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ คำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย ประธานการสอบ วิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ชรรมาภรณ์พิลาศ และรองศาสตราจารย์ จรุงญ มหิตทา พองกุล กรรมการสอบ ที่กรุณาให้คำแนะนำข้อเสนอแนะสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านผู้ประสทาวิชาแก่ผู้วิจัยให้ได้รับความรู้และมีความสามารถในการศึกษาและขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัว รวมถึงเพื่อนๆ น้องๆ นิสิตทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ คำติชม ความรู้ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนข้อแนะนำต่างๆ แก่ผู้วิจัย ตลอดการศึกษา จนสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี และอุปกรณ์ต่างๆ ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ และสถานที่ สำหรับในการทดลองครั้งนี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 แนวทางการศึกษา.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.2 การพัฒนาการของเครื่องจักรกล ซีเอ็นซี	16
2.3 การประยุกต์ใช้งานของซีเอ็นซี.....	19
2.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการขึ้นรูปทางกล.....	20
2.5 แรงตัดของเครื่องมือ.....	20
2.6 ความเรียบผิว.....	23
2.7 อินเสิร์ตคาร์ไบด์และการเลือกใช้.....	29
2.8 เครื่องมือตัดสำหรับงานกลึง.....	31
2.9 การกำหนดรูปพรรณของอินเสิร์ตชนิดถอดเปลี่ยนได้.....	32
2.10 วัสดุที่ใช้สำหรับทำอินเสิร์ต.....	41
2.11 กำหนดชื่อเรียกเครื่องมือตัด.....	43

	หน้า
2.12 อุปกรณ์หักเศษตัดและการเกิดเศษตัด.....	44
2.13 การสึกหรอของเครื่องมือตัด.....	46
2.14 การเสียหายของเครื่องมือ.....	47
2.15 อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด.....	51
2.16 การควบคุมลักษณะการทำงานในการตัดโลหะ.....	51
2.17 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม.....	53
2.18 การวิเคราะห์ผล.....	69
2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	72
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	80
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	80
3.2 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	80
3.3 ข้อจำกัดในการวิจัย.....	81
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	81
3.5 ขั้นตอนดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล.....	89
3.6 ขั้นตอนการทำการทดลอง.....	90
3.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการตัดแบบแห้ง.....	92
3.8 การออกแบบการทดลอง.....	93
3.9 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	97
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	99
4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	99
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นจากการทดลอง.....	108
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	115
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าP.....	122
4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	125
4.6 ความเรียบผิว.....	125
4.7 การหาสภาวะที่เหมาะสม.....	126

	หน้า
4.8 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีต่อผลตอบ.....	127
4.9 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง.....	129
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	134
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	134
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	135
5.3 อุปสรรคปัญหาในงานวิจัย.....	136
รายการอ้างอิง.....	137
ภาคผนวก.....	141
ภาคผนวก ก. ภาพแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	142
ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูปMinitab รวมถึงกราฟ ต่าง ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป.....	155
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	174



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่าความเร็วตัดและอัตราการป้อนในงานกลึงสำหรับวัสดุชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า	13
2.2	กระบวนการตัดแบ่งประเภทเป็นการตัดแบบหยาบและการตัดแบบละเอียด.....	14
2.3	แสดงการเปรียบเทียบมาตรฐานการกำหนดสัญลักษณ์ความหยาบผิว.....	28
2.4	การกำหนดเกรดของผู้ผลิต.....	30
2.5	แสดงการจำแนกชนิดของการสึกหรอที่แนะนำจากผู้ผลิต.....	49
2.6	แสดงวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นของงานกลึงซึ่งแนะนำจากผู้ผลิต.....	50
2.7	การออกแบบบ็อกซ์-เบห็นเคน.....	67
3.1	แสดงขนาดเม็ดมีดที่ใช้ในการทดลอง.....	83
3.2	แสดงขนาดค้ำมีดและส่วนประกอบต่างๆ.....	84
3.3	แสดงระดับของปัจจัยและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห็นเคน.....	94
3.4	เมทริกซ์การออกแบบการทดลองพร้อมการสุ่มลำดับการทำการทดลอง.....	95
4.2	แสดงความสัมพันธ์ของผลตอบระหว่าง Ra กับ Rz.....	109
4.3	แสดงความสัมพันธ์ของความหยาบผิวเฉลี่ยที่ปริมาตรการกลึงต่างๆ.....	111
4.4	แสดงความสัมพันธ์ของความหยาบผิวเฉลี่ยที่ปริมาตรการกลึงเหล็กที่ 1,000 ถึง 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร.....	112
4.5	ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร.....	113
4.6	แสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จาก Regression Coefficients for Ra.....	122
4.7	แสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จาก Regression Coefficients for Fy/Fz.....	123
4.8	แสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จาก Regression Coefficients for Temperature.....	124
4.9	สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ.....	125
4.10	สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการกลึง.....	126
4.11	ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบต่างๆกัน.....	128
4.12	ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการกลึง.....	130

สารบัญภาพ

รูป ที่		หน้า
2.1	กระบวนการตัดต่างๆที่เป็นพื้นฐานสำคัญ.....	6
2.2	แสดงประเภทของงานกลึง.....	7
2.3	แสดงปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในการกลึงปอก.....	8
2.4	ปัจจัยต่างๆในการตัด	12
2.5	แสดง เครื่องกลึง.....	15
2.6	แสดงส่วนประกอบของเครื่องมือตัด.....	15
2.7	แสดงลักษณะมุมของเครื่องมือตัดที่เหมาะสมในการกลึง.....	16
2.8	แสดงเครื่องกลึงผิวโลหะหน้าตัดกลมในช่วงต้นๆ.....	17
2.9	แสดงแรงที่กระทำบนมีดกลึงระหว่างการกลึงกับแรงลัพท์ที่เกิดขึ้น.....	20
2.10	แสดงส่วนประกอบของแรง สำหรับงานกลึง.....	21
2.11	แสดงตัวอย่างไดนาโมมิเตอร์ 3 แกน สำหรับงานกลึง.....	21
2.12	แสดงมุมคายเศษค่าบวกและค่าลบ.....	21
2.13	แสดงแรงเฉือน แรงเสียดทาน และความเร็ว สำหรับตัวอย่างง่ายๆกรณีที่มีมุมคายเศษ 0	22
2.14	แผนภาพแสดงลักษณะความหยาบผิวเทียบกับมาตรฐาน.....	24
2.15	แสดงรูปแบบเรขาคณิตของผิว.....	24
2.16	แสดงความหยาบผิวที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ.....	25
2.17	แสดงมาตรฐานการกำหนดสัญลักษณ์ความหยาบผิว.....	26
2.18	แสดงอินเสิร์ตสำหรับงานกลึง.....	29
2.19	ตัวอย่างเครื่องมือตัดสำหรับงานขึ้นรูปภายนอกชิ้นงาน.....	31
2.20	ตัวอย่างเครื่องมือตัดสำหรับงานขึ้นรูปภายในชิ้นงาน	32
2.21	แสดงตัวอย่างระบบของการกำหนดอินเสิร์ตชนิดถอดเปลี่ยนได้ตามมาตรฐาน ANSI.....	32
2.22	ตัวอย่างการกำหนดรูปพรรณของอินเสิร์ตชนิดถอดเปลี่ยนได้.....	33
2.23	ตัวอย่างรูปทรงของอินเสิร์ตชนิดต่างๆ แสดงดังรูป	34
2.24	แสดงตัวอย่างลักษณะงานในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบต่างๆกัน โดยใช้อินเสิร์ตชนิด ถอดได้.....	35

	หน้า
2.25 แสดงตัวอย่างการอ่านค่าตัวแปรและเลือกใช้งานเม็ดมิด (Insert Geometry) สำหรับเม็ดมิด เกรด KC9110 อ้างอิงจากตารางที่ผู้ผลิตแนะนำ.....	36
2.26 แสดงมาตรฐานหลักเทียบเท่า.....	37
2.27 แสดงตัวอย่างการเลือกใช้ ความเร็วตัด จากตารางที่ผู้ผลิตแนะนำ.....	37
2.28 แสดงรหัสมาตรฐานของอินเสิร์ตที่มีดกึ่ง และด้ามจับ (มาตรฐาน ISO 1832-1991)	38
2.29 แสดงคำอธิบายรหัสมาตรฐานของอินเสิร์ตที่มีดกึ่ง และด้ามจับ (มาตรฐาน ISO 1832-1991)	39
2.30 แสดงประเภทของด้ามมีดกึ่งและอินเสิร์ต.....	40
2.31 แสดงส่วนประกอบของด้ามมีดกึ่งและอินเสิร์ต	40
2.32 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งของวัสดุที่นำมาทำเครื่องมือตัด.....	42
2.33 แสดงส่วนประกอบของเครื่องมือตัด.....	44
2.34 แสดงอุปกรณ์หักเศษตัดโดยการเอียงและมุมในการตัด.....	44
2.35 แสดงรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัด.....	45
2.36 แสดงอุปกรณ์หักเศษตัดและแสดงลักษณะการเกิดเศษตัด.....	46
2.37 แสดงเศษหักที่มันยาวและเศษหักที่สั้น.....	46
2.38 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เทียบกับเวลา.....	53
2.39 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป.....	57
2.40 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลโดยไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	60
2.41 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลโดยมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	60
2.42 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ.....	63
2.43 กราฟเส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบ.....	63
2.44 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ	64
2.45 วิธีการสถิติเพสแอสเกนท์	65
2.46 รูปแบบทางเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน.....	67
2.47 รูปแบบทางเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลองแบบ CCD.....	68
3.1 แสดงหลักที่ใช้ในการทดลอง.....	82
3.2 แสดงหลักที่ใช้ในการวัดความหยาบผิว.....	82
3.3 แสดงเม็ดมิดที่ใช้ในการทดลอง.....	82
3.4 แสดงด้ามมีดที่ใช้ในการทดลอง.....	84

	หน้า
3.5 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Pyrometer)	85
3.6 แสดงเครื่องกลึง CNC ที่ใช้ในการทดลอง.....	85
3.7 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)	86
3.8 ชาร์จแอมป์รีไฟเออร์ (Charge amplifier)	86
3.9 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)	87
3.10 เครื่องวัดความเรียบผิว (Roughness tester)	87
3.11 เครื่องวัดความลึกหรือของมีคม (Microscope)	88
3.12 เครื่องวัดขนาดของชิ้นงาน (Vernier Calipers)	88
3.13 ไฟฉายของ Mag-Lite (Mag-Lite Flashlight)	89
3.13 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง.....	91
3.14 แสดงตำแหน่งจุดที่วัดอุณหภูมิ.....	92
3.15 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน.....	92
3.16 รูปแบบเลขาคณิตของแผนการทดลอง Box-Behnken ที่ใช้ในการทดลอง.....	93
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Ra กับ Rz.....	110
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่า Ra กับ ปริมาตรการกลึง.....	111
4.3 Normal Probability Plot ของข้อมูลความหยาบผิวเฉลี่ย.....	115
4.4 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟีดสำหรับค่าความหยาบผิว.....	116
4.5 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลความหยาบผิวกับลำดับการทดลอง.....	117
4.6 Normal Probability Plot ของข้อมูล Cutting Force Ratio(Fy/Fz).....	118
4.7 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟีดสำหรับค่าข้อมูล Cutting Force Ratio (Fy/Fz).....	118
4.8 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูล Cutting Force Ratio(Fy/Fz)กับลำดับการทดลอง..	119
4.9 Normal Probability Plot ของข้อมูลอุณหภูมิ.....	120
4.10 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างค่าที่ถูกฟีดสำหรับค่าอุณหภูมิ (C°)	121
4.11 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอุณหภูมิ (C°) กับลำดับการทดลอง.....	121
4.12 พื้นผิวผลตอบของความหยาบผิว.....	125
4.13 สภาวะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการกลึง.....	126
4.14 เปรียบเทียบความหยาบผิวระหว่างค่าที่วัดกับค่าที่ทำนายจากผลการทดลอง.....	132
4.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างค่าที่วัดกับค่าที่ทำนายจากผลการทดลอง.....	132

4.16 เปรียบเทียบCutting Force Ratioระหว่างค่าที่วัดกับค่าที่ทำนายจากผลการทดลอง..... 133



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มอุตสาหกรรมยานยนต์และกลุ่มอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอะไหล่ยานยนต์ ความต้องการยานยนต์ในการเดินทางและขนส่งก็มีมากขึ้น จึงทำให้ตลาดความต้องการของชิ้นส่วนยานยนต์ในประเทศเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งการขยายตัวของอุตสาหกรรมเหล่านี้มีผลโดยตรงต่ออุตสาหกรรม รัฐได้ให้การส่งเสริมลงทุนอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ ทำให้มีการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ในเชิงอุตสาหกรรมมากขึ้น ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตของอุตสาหกรรมใหญ่ในภูมิภาค เช่นการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ การผลิตชิ้นส่วนจักรกล อาทิเช่น ชิ้นส่วนเพลลา ข้อต่อส่งกำลังหรือ อุปกรณ์ทางกลต่างๆที่ใช้โลหะเป็นส่วนประกอบ กระบวนการตัด (Machining) จึงเป็นกระบวนการที่สำคัญในการตัดขึ้นรูป วัสดุประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการนำมาใช้ผลิตชิ้นส่วนในเครื่องจักรต่างๆ กระบวนการกลึง (Turning Process) ก็นับเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการตัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดในการผลิตชิ้นส่วนทางกลนี้

อุตสาหกรรมการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยกระบวนการตัดนั้น มีความพยายามอย่างมากในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆให้ได้ทั้งผลิตภาพและคุณภาพที่สูง แต่เนื่องจากความต้องการในการกำจัดเนื้อโลหะที่รวดเร็วจะทำให้เกิดความร้อนสูงในระหว่างกระบวนการตัดโลหะ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้มีดตัดสึกหรอเร็วขึ้น ปัญหาการสึกหรอของมีดตัดเป็นปัญหาสำคัญในกระบวนการกลึงเพราะจะทำให้ความเรียบผิวของชิ้นงานไม่ได้ตามข้อกำหนดด้านขนาดและความเรียบผิว แต่การเปลี่ยนมีดตัดบ่อยนอกจากจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับมีดตัดเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้เสียเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่ ปัญหาการสึกหรอของมีดตัดที่เร็วกว่ากำหนดจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อผลิตภาพของกระบวนการตัด [1]

สารหล่อเย็น (Cutting Fluid) เป็นส่วนประกอบหนึ่งที่ใช้มากและบ่อยที่สุด โดยหน้าที่หลักของสารหล่อเย็นก็เพื่อที่จะลดความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน โดยดูดซับและระบายความร้อนออกจากพื้นที่ตัดของชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยยืดอายุของมีดตัด ความเรียบผิว รูปร่างของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังช่วยทำให้เศษตัดหลุดออกง่าย

ปัญหาหลักทางด้านสิ่งแวดล้อมในกระบวนการกลึงคือการใช้สารหล่อเย็นซึ่งเกิดขึ้นโดยตรงกับกระบวนการผลิต ผู้ที่ปฏิบัติงานกับกระบวนการเหล่านี้เหล่านี้ก็มีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคผิวหนัง การหายใจ และเพิ่มความเสี่ยงในการเกิดโรคมะเร็ง อันเนื่องมาจากสารหล่อเย็นเหล่านี้สาเหตุหนึ่งอันเนื่องมาจากส่วนประกอบทางเคมี และความร้อนซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิต นอกจากนี้แล้วการสูดดมของสารหล่อเย็นเกิดขึ้นตลอดเวลาในหลายๆกระบวนการผลิต เช่นจากการกลึงระหว่างเศษโลหะกับชิ้นงาน สูดดมจากการไหลตามอุปกรณ์ท่อ วาล์วต่างๆ เช่นระบบความดัน นอกจากนี้การอุดตันตามท่อต่างๆจะมีการล้างทำความสะอาดก่อนที่จะผ่านไปยังกระบวนการถัดไป และกระบวนการล้างนี้เป็นการเพิ่มงานที่ไม่มีคุณค่าและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมาตลอดจนค่าใช้จ่ายทางด้านสารหล่อเย็น ของค่าใช้จ่ายในการกระบวนการกลึง การจำกัดการใช้สารหล่อเย็นจึงเป็นสิ่งสำคัญและเป็นประโยชน์ที่จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต อาทิเช่น ค่าใช้จ่ายในการตัด การบำรุงรักษาและ การใช้พลังงานไฟฟ้าของปั๊มสารหล่อเย็น และการบำบัดสารหล่อเย็นที่ผ่านจากกระบวนการในกระบวนการกลึงสารหล่อเย็น สารเคมีบางตัวที่ผสมในสารหล่อเย็นก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมและการกำจัดทำลาย สารหล่อเย็นสามารถเป็นอันตรายกับสุขภาพผู้ปฏิบัติงานเนื่องจากการเกิดขึ้นของละออง และควัน ละอองของเหลวนี้อาจจะเป็นอันตรายกับผิวหนังและระคายเคืองต่อกระบวนการหายใจ

ดังนั้นในการวิจัยจึงได้ศึกษาปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องในการตัด เช่นการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วตัดต่างๆ อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด โดยศึกษาถึงแรงตัด ความหยาบผิว การสึกหรอของมีดตัด และอุณหภูมิในการตัด โดยกำหนดให้ความเรียบผิวสูงสุด(Rz) ต้องไม่เกิน 12.5 ไมโครเมตร (12.5 Z) ตามมาตรฐาน JIS B0601 (1982) หรือเทียบเท่ากับค่าความเรียบผิวเฉลี่ย(Ra) ต้องไม่เกิน 3.125 ไมโครเมตร ถ้าเกินจะถือว่ามีความหยาบผิวเกินอายุการใช้งาน โดยเงื่อนไขที่ทำให้กระบวนการตัดแบบแห้ง อย่างน้อยที่สุด ปริมาณการตัดเดียวกัน อายุการใช้งานเท่ากัน และคุณภาพผิวชิ้นงานดีกว่าจะเป็นการตัดที่ดีที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวภายใต้เงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดโดยการใช้การตัดแบบแห้ง ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของมีดตัด ความเรียบผิวของชิ้นงาน แรงตัดที่เกิดขึ้นโดยพิจารณาถึงค่าตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการตัด ด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. พารามิเตอร์ของกระบวนการกลึง คือ ความเร็วในการตัด อัตราการป้อนตัด ความลึกในการตัด

2. ศึกษาเฉพาะในกระบวนการกลึงปอกด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีเท่านั้น

3. ตัวชี้วัดผลลัพธ์ วัดจากความเรียบผิวของชิ้นงาน ความลึกหรือของมีดตัด แรงตัด และ อุณหภูมิในการตัด

4. ทำการออกแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ Design and Analysis of Experiment (DOE) โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken Design โดยที่ความหยาบผิว (Surface Roughness) ที่ศึกษา คือ ความหยาบผิวเฉลี่ย (Roughness Average): $Ra=3.125$ ไมโครเมตร หรือ $Rz=12.5$ ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน JIS B0601'94

5. ปัจจัยที่กำหนดเป็นตัวแปรอิสระในกระบวนการกลึง และหาความสัมพันธ์ ที่มีผลต่อความหยาบผิว คือ ความเร็วรอบ อัตราการป้อน และ ความลึกตัด โดยแต่ละปัจจัยกำหนดเป็น 3 ระดับ โดยกำหนดช่วงระดับจากคู่มือของผู้ผลิต (Kennametal Catalog)

6. ผลของการศึกษาในการวิจัยในครั้งนี้ มาจากการศึกษาการตัดโลหะเหล็กกล้าคาร์บอน S45 C เท่านั้น

1.4 แนวทางการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ความสัมพันธ์และพฤติกรรมกระบวนการตัด

2. ค้นคว้างานวิจัยและสำรวจงานวิจัยต่างๆที่มีลักษณะใกล้เคียงกันกับการวิจัยเพื่อเป็น

แนวทางประกอบการวิจัย

3. ศึกษาเครื่องมือ วิธีการติดตั้งอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการกลึง ขั้นตอนการทำงาน ต่างๆเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐาน ในการทำวิจัย

4. ออกแบบการทดลองโดยใช้ การทดลองแบบ Box Behnken Design

5. ทำการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูลตามแผนการทดลองที่วางไว้

6. วัดความเรียบผิวของชิ้นงานและตรวจสอบการสึกหรอของมีดตัด

7. วัดแรงตัดและอุณหภูมิในการตัด

8. อภิปรายและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab 14 วิเคราะห์ โดยใช้ Response Surface Methodology (RSM)

9. สรุปผลที่ได้จากการวิจัยและข้อเสนอแนะ

10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ลดการใช้สารหล่อเย็นซึ่งเป็นอันตรายกับสิ่งแวดล้อม เกิดผลดีทั้งต่อผู้ปฏิบัติงานและสิ่งแวดล้อม
2. พัฒนาความสามารถในการตัดเหล็กกล้าคาร์บอน S45C โดยใช้การตัดแบบแห้ง
3. เพิ่มผลผลิตของกระบวนการตัดโดยไม่ใช้สารหล่อเย็น โดยคงไว้ซึ่งคุณภาพของผิวชิ้นงาน
4. เป็นแนวทางในการลดต้นทุนในส่วนเครื่องมือนัด สารหล่อเย็น การบำบัดน้ำเสีย ลดการบำรุงรักษา ป้อนสารหล่อเย็น ตลอดจนลดต้นทุนการใช้พลังงานไฟฟ้าในส่วนของป้อนสารหล่อเย็น
5. สามารถนำหลักการและความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับงานกลึงโดยไม่ใช้สารหล่อเย็นซึ่งเป็นกระบวนการที่มีตรกับสิ่งแวดล้อม
6. สามารถเข้าใจถึงกระบวนการกลึง CNC การเลือกใช้เม็ดมิด การใช้เครื่องมือวัด ตลอดจนการใช้โปรแกรมทางสถิติในการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ปัญหา

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 ทฤษฎีการตัด [2]

การทำงานของเครื่องมือตัด ไม่ว่าจะเป็นมีดกลึงหรือเครื่องมือกลใดๆจะอยู่ภายใต้พื้นฐานของทฤษฎีอันเดียวกัน จุดประสงค์ของการทำงานใดๆก็คือต้องการให้ได้มาซึ่งผลงานที่ดี งานเสร็จด้วยระยะเวลาอันสั้น ใช้ความพยายามไม่มากและต้นทุนต่ำสุด

ความต้องการให้ได้การใช้งานที่ยาวที่สุดจากเครื่องมือก่อนที่จะต้องมีการเจียรระไนใหม่ ความต้องการอันนี้เป็นวัตถุประสงค์อย่างหนึ่งของเทคโนโลยีเครื่องมือกล สมมติฐานว่าเครื่องมือกลได้ออกแบบและทำขึ้นอย่างถูกต้องแล้ว ความเสียหายของเครื่องมือจะเกิดจากการที่คมตัดเกิดการสึกหรอ การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของเครื่องมือก็จะเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงรูปทรงทางเรขาคณิตของเครื่องมือโดยทั่วไปก็คือการเปลี่ยนแปลงคมมีด ความเรียบ และมุมของมันเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ก็จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ซึ่งความร้อนอันนี้ทำให้ความแข็งแรงของเครื่องมือลดลง การเปลี่ยนแปลงอันนี้ไม่ได้หมายความว่าเครื่องมืออ่อน แต่หมายความว่าประสิทธิภาพในการกัดของเครื่องมือบนชิ้นงานลดลง ด้วยความสัมพันธ์ ของการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเพื่อกัด กลึง ไส เจาะมากเกินไป ส่วนที่กัดเนื้อชิ้นงานจะเกิดการสึกและหน้าสัมผัสกับชิ้นงานก็จะเพิ่มขึ้นทำให้เกิดความร้อนสูง ดังนั้นก็จะยิ่งทำให้คมของมันมีขนาดใหญ่ขึ้น การเกิดการอ่อนของเครื่องมือและการหักสึกของคมเครื่องมือจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเครื่องมือหักออกจากกัน

ด้วยเหตุนี้การหล่อลื่นหรือการระบายความร้อนที่ถูกต้อง รูปทรงเครื่องมือ มุมที่ถูกต้อง หน้าตัดของ อัตราการป้อนที่เหมาะสม ความเร็วที่ถูกต้อง และการตั้งเครื่องมือให้เหมาะสมกับผิวของงาน ทั้งหมดจะช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้น และยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือ อายุของเครื่องมือนิยามเป็นความยาวนานของเวลาในการใช้งานของเครื่องมือ จนกระทั่งเกิดการเสียหายขึ้น สาเหตุอื่นๆของการเสียหายของเครื่องมือเป็นผลมาจากเกิดความเค้นสูง โดยเครื่องมือและชิ้นงานกระทำต่อกัน หากโลหะเกิดความแข็งเนื่องจากการใช้งาน (Work Harden) ขึ้น จะทำให้ต้องใช้แรงอย่างมากในการที่มีดกัดหรือเครื่องมือกลจะปลอกเนื้อโลหะออกมาได้ วัสดุบางชนิด (Stainless Steel 18.8) มักเกิดความแข็งเนื่องจากการใช้งานขึ้นมากกว่าวัสดุอื่นซึ่งเป็นตัวประกอบสำคัญในกระบวนการตัด

2.1.2 กระบวนการตัด (Machining Process) [1]

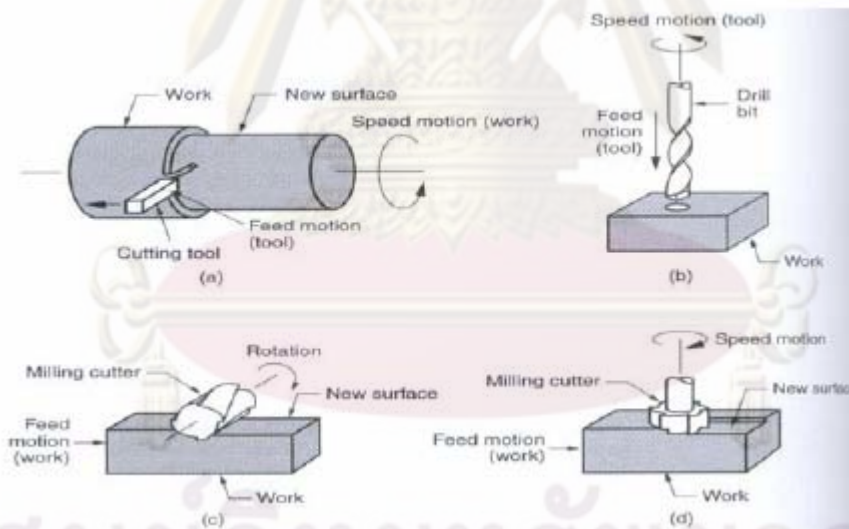
กระบวนการตัดหมายถึงการกำจัดเนื้อวัสดุออก การกำจัดเศษโลหะออก การใช้เครื่องมือตัดเพื่อกำจัดส่วนเกินของเนื้อวัสดุเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการกระบวนการตัดเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญทั้งเชิงพาณิชย์และเทคโนโลยีเนื่องจากมีข้อดีคือ

1. ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท
2. สร้างชิ้นงานขนาดและรูปร่างต่างๆ ได้
3. มีความแม่นยำสูง
4. ผิวงานสุดท้ายมีคุณภาพดี

แต่มีข้อเสียคือ

1. มีเศษวัสดุที่ต้องทิ้งเยอะ
2. ใช้เวลาในการตัดนาน

รูปที่ 2.1 แสดงถึง กระบวนการตัดที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ 3 อย่าง คือ การกลึง การเจาะ และการกัด



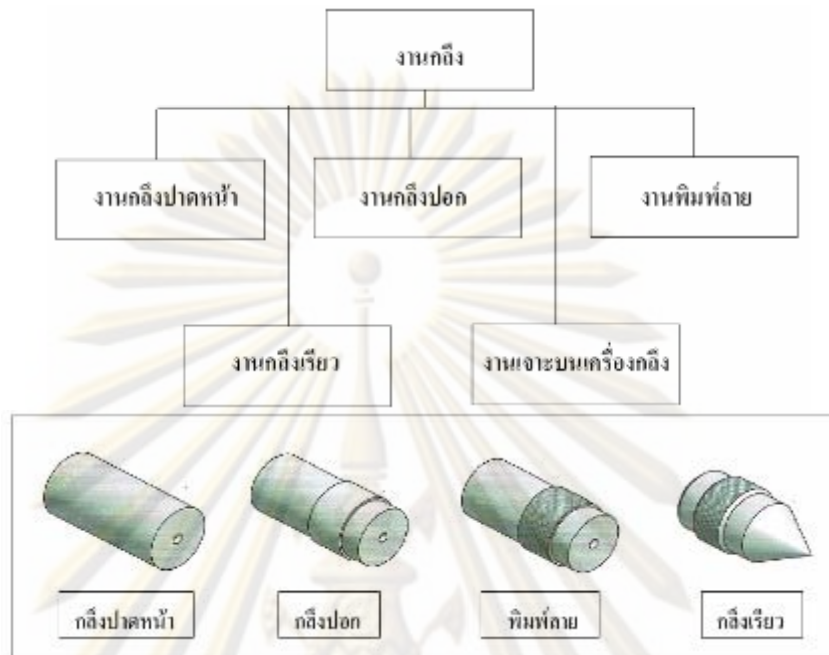
รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดต่างๆที่เป็นพื้นฐานสำคัญ[1]

2.1.3 กระบวนการกลึง (Turning Process)

งานกลึง คือ การตัดโลหะโดยให้ชิ้นงาน(Work piece) หมุนรอบตัวเอง โดยมีดกลึงเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน การกลึงมีสองลักษณะใหญ่คือ

การกลึงปาดหน้า คือ การตัดโลหะโดยให้มิดตัดชิ้นงานไปตามแนวขวาง (Across the work)

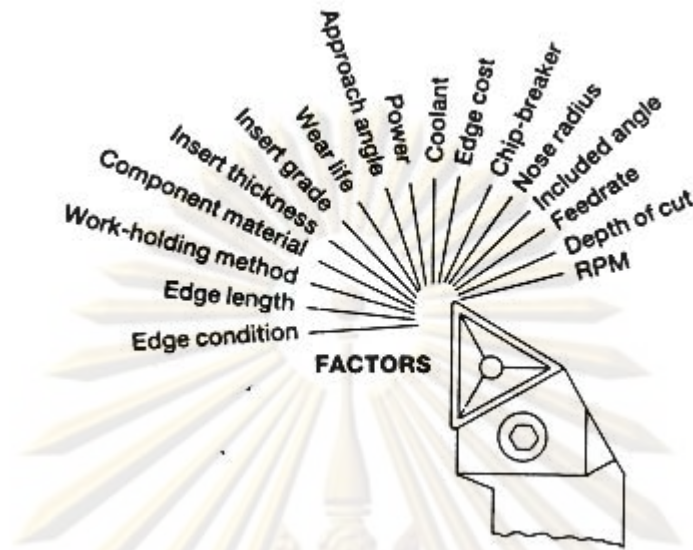
การกลึงปอก คือ การตัดโลหะโดยให้มิดตัดเคลื่อนที่ตัดชิ้นงานไปตามแนวนานกับแนวแกนของชิ้นงาน รูปที่ 2.2 แสดงถึงประเภทของงานกลึงแบบต่างๆกัน



รูปที่ 2.2 แสดงประเภทของงานกลึง [3]

ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการของการกลึงปอกคืออัตราป้อน (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ระยะป้อนลึก (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเนื้อ (Workpiece) และเมื่อมีกระบวนการในการกลึงปอกเกิดขึ้น ผลที่จะเกิดขึ้นตามมาก็คือขนาดของชิ้นงาน (Workpiece Dimension) ความละเอียดของผิวชิ้นงาน (Surface Roughness) เศษกลึง (Chip) การสึกหรอของมีดกลึง (Tool Wear) ปัจจัยที่สำคัญของงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเดร็ท

ตามที่กล่าวไว้แล้วว่าปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดกระบวนการ ของการกลึงปอก คือ อัตราป้อน (Feed Rate) ความเร็วตัด (Cutting Speed) ระยะป้อนลึก (Depth of Cut) มีดกลึง (Cutting Tool) และ ชิ้นงานที่ต้องการทำการตัดเนื้อ (Workpiece) ในการกลึงปอกด้วยมีดกลึง



รูปที่ 2.3 แสดงปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในการกลึงปอก [3]

รูปที่ 2.3 แสดงปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ท อินเสิร์ทที่จะต้องประกอบด้วยปัจจัยหลัก 5 ปัจจัยนี้เช่นเดียวกัน นอกจากนี้แล้วในการกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ทยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่สำคัญซึ่งควรนำมาพิจารณา ปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดที่ใช้ในงานกลึงปอกด้วยมีดกลึงอินเสิร์ทที่แสดงในรูปที่ 2.3 มีดังต่อไปนี้

เงื่อนไขของคมตัด (Edge Condition)

ความยาวของคมตัด (Edge Length)

วิธีการจับยึดชิ้นงาน (Work Holding Method)

ส่วนประกอบของวัสดุ (Component Material)

ความหนาของเม็ดมีด (Insert Thickness)

เกรดของเม็ดมีด (Insert Grade)

อายุของการสึกหรอ (Wear Lift)

มุมตัด (Approach Angle)

กำลัง (Power)

น้ำหล่อเย็น (Coolant)

ต้นทุนของคมตัด (Edge Cost)

การหักเศษ (Chip Breaker)

รัศมีปลายมีด (Nose Radius)

มุมประกอบของใบมีดกลึง (Included Angle)

อัตราป้อน (Feed Rate)

ระยะป้อนลึก (Depth of Cut)

ความเร็วรอบ (RPM)

2.1.3.1 ความเร็วตัด (Cutting Speed) คือความเร็วที่คมมีดกลึงตัด หรือปาดผิวโลหะ ออก เมื่อโลหะหมุนครบ 1 รอบคมมีดกลึงก็จะตัดโลหะเป็นแนวตัดยาวเท่าเส้นรอบวงพอดี ความเร็วตัดมีหน่วยเป็น เมตร/นาที หลักเกณฑ์การเลือกใช้ความเร็วตัดมีดังนี้ คือ

1. วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Tools) ที่ทำมาจากเหล็กความเร็วสูง (High Speed Steel) สามารถใช้ความเร็วตัดเป็น 2 เท่า ของความเร็วตัดของมีดที่ทำมาจากวัสดุเหล็กคาร์บอน ส่วนวัสดุคมตัดที่มีส่วนผสมพิเศษออกไปสามารถใช้ความเร็วตัดได้สูงกว่าเหล็กความเร็วสูง
2. ชนิดของวัสดุ (Material) ที่จะนำมาทำการตัดเฉือน โดยทั่วไปวัสดุงานที่แข็งมากจะใช้ความเร็วตัดช้ากว่าวัสดุที่อ่อนกว่า
3. รูปร่างของคมตัด (Form Cutting Tool) มีผลต่อการทำงานมาก เช่น มีดตัดงานขนาดจะใช้ความเร็วรอบต่ำกว่ามีดกลึงปอกผิว
4. ความลึกในการตัด (Depth of Cut) ถ้าป้อนตัดลึกจะใช้ความเร็วรอบน้อยกว่าป้อนตัดตื้น
5. อัตราป้อน (Rate of Feed) ในการป้อนตัดงานหยาบ เช่น อัตราป้อน 3 มิลลิเมตร ความเร็วที่ใช้ในการตัดจะต่ำกว่าการป้อนตัดขั้นสุดท้าย เช่น อัตราป้อนตัด 0.13 มิลลิเมตร เป็นต้น จะใช้ความเร็วรอบได้สูง
6. การระบายความร้อน (Cutting Lubricant) ความเร็วตัดของวัสดุบางชนิด อาจเพิ่มให้สูงขึ้นได้เมื่อมีการระบายความร้อนที่ถูกต้อง ซึ่งสารระบายความร้อนนี้ จะช่วยรักษาอุณหภูมิของคมตัดไม่ให้ร้อนสูงเกินไปขณะทำงาน
7. การจับงานให้มั่นคงแข็งแรง (Rigidity of the Work) ในกรณีงานที่ถูกจับด้วยหัวจับ โผล่ออกมาสั้นๆจะใช้ความเร็วได้สูงกว่างานที่ถูกจับโผล่ออกมายาวๆ
8. ความสามารถของสภาพเครื่อง เครื่องที่แข็งแรงมีกำลังสูง สามารถใช้ความเร็วตัดได้

กฎทั่วไปในการใช้ความเร็วตัด และอัตราป้อน

ถ้า Feed อัตราป้อน (มิลลิเมตร/รอบ) เพิ่ม Speed ความเร็ว (รอบ/นาที) ต้องลดลงเมื่อ ความลึกของการตัดคงที่

ถ้า Speed ความเร็ว เพิ่ม Feed อัตราป้อน ต้องลดลง เมื่อความลึกของการตัดคงที่

ถ้าความลึกในการตัดเพิ่มขึ้น Speed ต้องลดลงเมื่อ Feed คงที่

ผลกระทบของความเร็วตัดที่มีต่ออายุการใช้งานของมีดกลึง (Effect of Cutting Speed)

ในการตัดเฉือนชิ้นงาน ถ้าใช้ความเร็วตัดที่ไม่เหมาะสมกับสภาพเงื่อนไขของงานซึ่งได้แก่ วัสดุงาน วัสดุมีด ขนาดของชิ้นงาน ฯลฯ ก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำงานเพิ่มขึ้นได้ เช่นถ้าใช้ความเร็วตัดสูงเกินไปก็จะทำให้มีดกลึงสึกหรอได้เร็วกว่าปกติ นั่นก็คืออายุการใช้งานของมีดกลึงสั้นลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่จะต้องลับมีดบ่อยๆ ทำให้เสียเวลาในการทำงาน คือเสียเวลาในการลับมีด และเสียเวลาในการติดตั้งมีดใหม่อีกด้วย ซึ่งเป็นการลดความสามารถ และจำนวนผลิตชิ้นงาน เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการทำงานโดยใช่เหตุ

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและอายุการใช้งานของมีดกลึงนั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้ ขณะที่ใช้ความเร็วตัดต่ำๆ การสึกหรอของมีดจะเป็นไปอย่างช้าๆ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิจากการเสียดสีระหว่างมีดกลึงกับชิ้นงานจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าใช้ความเร็วตัดสูงขึ้นความร้อนระหว่างผิวมีดกลึงกับชิ้นงาน และเศษตัดจะเกิดมากขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้เกิดการสึกหรอที่บริเวณผิวของมีดกลึงกับชิ้นงานที่เสียดสีกัน ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของมีดกลึงสั้น โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดและอายุการใช้งานของมีดกลึงได้โดยสมการของ Taylor

2.1.3.2 อัตราการป้อน (Feed Rate) อัตราป้อนหมายถึง ระยะทางการเดินป้อนของมีดไปตามความยาวของชิ้นงาน ในแต่ละรอบของการหมุนของเพลลาของเครื่องหรือการป้อนตัด อาจพิจารณาจากความหนาของเศษตัด (Chips) การป้อนตัด 0.5 มิลลิเมตรหมายถึง มีดตัดเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 0.5 มิลลิเมตร ตามความยาวของชิ้นงานขณะที่ชิ้นงานหมุน 1 รอบ

การกลึงหยาบ ใช้อัตราป้อนที่สูง มีดตัดชิ้นงานได้ปริมาณเศษมากผิวงานออกมาไม่เรียบ

การกลึงละเอียด อัตราป้อนที่น้อย ทำให้ผิวงานเรียบ ส่วนมากจะใช้กลึงในขั้นสุดท้ายจะได้ผิวเรียบและขนาดถูกต้องในทางปฏิบัติที่ดีที่สุด

การเลือกใช้ความลึกในการตัดปานกลางขณะทำการป้อนตัดหนักๆและใช้ความเร็วตัดให้ถูกต้อง เมื่อกลึงงานหยาบ ถ้าต้องการให้กลึงงานผิวเรียบในขั้นสุดท้ายให้เพิ่มความเร็วตัดมากขึ้น การป้อนกินลึกน้อยลง พร้อมกับให้อัตราการป้อนตัดละเอียดให้สัมพันธ์กัน ในกรณีที่ใช้ความลึกในการตัดมาก และอัตราการป้อนตัดน้อยๆจะดีกว่าการใช้ความลึกในการตัดเท่ากับอัตราป้อนตัด ถึงแม้ว่าอัตราการไหลของเศษโลหะจะเท่ากัน

ผลกระทบของอัตราป้อนและความลึกในการตัด

อัตราป้อนตัดและความลึกในการตัดมีผลต่อแรงตัดเฉือนและอุณหภูมิในการทำงาน โดยจะเกิดแรงกระทำกับมีดกลึงและเกิดอุณหภูมิในการตัดเฉือนสูงถ้าให้อัตราป้อนตัดและความลึกในการตัดสูงๆ นอกจากนี้ยังส่งผลให้มีดกลึงเกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว ซึ่งถ้าต้องการให้อายุการใช้งาน

ของมีดกลึงสูงขึ้น ก็จะต้องเลือกใช้ความเร็วตัดต่างๆ การเพิ่มอัตราการป้อนจะส่งผลให้ต้องลดค่าความเร็วตัด มากกว่าการเพิ่มความลึกในการตัด (เพื่ออายุการใช้งานของมีดกลึงที่) นั่นคือการเพิ่มอัตราการป้อนจะทำให้มีดกลึงสึกหรอได้มากกว่า การเพิ่มความลึกในการตัด ซึ่งในการพิจารณาจะต้องพิจารณาถึงแรงที่กระทำบนมีดกลึง ต่อความยาวสันคมตัด สำหรับในกรณีนี้เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัด ความยาวสันคมตัดที่รับแรงกระทำก็ยังคงเท่าเดิม แต่ความหนาของเศษตัดจะเพิ่มขึ้น

2.1.3.3 ความลึกในการตัด (Depth of Cut)

ความลึกในการตัดทำให้เศษโลหะไหลออกมา ทุกครั้งที่ทำการกลึงหยาบในการตั้งความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการรับได้ของมีดตัด และเครื่องที่จะทนได้หลักเกณฑ์การพิจารณาเลือกใช้ความลึกในการตัดสำหรับงานปกติทั่วไปควรพิจารณาดังนี้

1. ขนาดความโตของชิ้นงานก่อนทำการตัดเฉือน (โตกว่าขนาดงานสำเร็จ) ควรจะโตกว่าประมาณ 3.18 มิลลิเมตร
2. ถ้าคำนวณความเร็วรอบอยู่ในช่วงกลางของค่าสองค่า ให้เลือกใช้ความเร็วรอบในขั้นต่ำ ถ้าหากสภาพของเครื่อง มีดกลึง และชิ้นงานเหมาะสม อาจจะเลือกใช้ความเร็วรอบในขั้นสูงได้ แต่ถ้าความเร็วรอบที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับค่าในช่วงสูง ให้เลือกความเร็วรอบในช่วงสูงได้
3. ความลึกในการกลึงหยาบควรป้อนลึกและหยาบมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เหลือไว้ประมาณ 0.76 มิลลิเมตรสำหรับขนาดความโตของชิ้นงาน ก่อนจะกลึงผิวสุดท้าย
4. ในการกลึงเหล็กหล่อ หรือ โลหะอื่นๆ ซึ่งผิวรอบๆ ชิ้นงานจะเป็นสะเก็ด ความลึกในการกลึงครั้งแรก การป้อนมีดกินลึกจะต้องให้คมตัดของมีดกลึงตัดให้ลึกพอ ที่จะให้ส่วนผิวเปลือกแข็งหลุดออกไปให้หมด เพราะผิวเปลือกแข็งนี้จะทำให้มีดสึกหรอเร็ว

2.1.4 เงื่อนไขการตัด (Cutting Process) [1]

การกลึงเป็นกระบวนการตัดที่ใช้มีดตัดคมเดียวในการกำจัดวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากผิวชิ้นงานซึ่งมีรูปร่างทรงกระบอก หมุนในแนวแกนของชิ้นงาน มีดตัดจะถูกป้อนในทิศทางขนานแกนหมุนชิ้นงาน ความเร็วรอบในการกลึงจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วตัดดังสมการที่ 2-1

$$N = V/\pi D_0 \quad (2-1)$$

โดยที่ N (Rotation Speed) = ความเร็วรอบในการหมุน(รอบ/นาที)

V (Cutting Speed) = ความเร็วตัด (เมตร/นาที หรือ ฟุต/นาที)

D_0 (Diameter of Workpiece) = เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (เมตร หรือ ฟุต)

การกลึงชิ้นงานจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานลดลงจาก D_0 เหลือ D_f เส้นผ่านศูนย์กลางที่ลดลงแสดงถึงความลึกในการตัด (Depth of Cut, d) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2-2)

$$D_0 - D_f = 2d \quad (2-2)$$

ส่วนอัตราการป้อนมีดสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตร/นาที หรือ นิ้ว/นาที ได้ดังสมการที่ 2-3

$$f_r = Nxf \quad (2-3)$$

โดยที่ f_r (feed rate) = อัตราป้อนตัดมีดเชิงเส้น มิลลิเมตร/นาที หรือ นิ้วต่อนาที

f (feed) = อัตราการป้อนมีด มิลลิเมตร/รอบ หรือ นิ้วต่อรอบ

อัตราการกำจัดวัสดุ (Material Removal Rate , MRR) บ่งบอกถึงปริมาณของวัสดุชิ้นงานที่ถูกกลึงออกไปต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที หรือ ลูกบาศก์มิลลิเมตรนิ้ว/นาที จะคำนวณได้จากสมการที่ (2-4)

$$MRR = vxfxd \quad (2-4)$$

หรือเราสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-5) ต่อไปนี้คือ

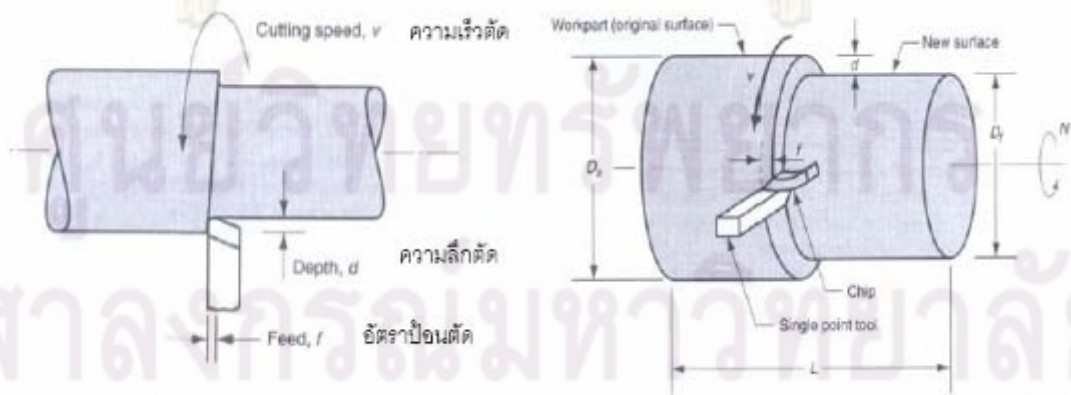
$$MRR = \pi(D^2 - d^2)f_r N/4 \quad (2-5)$$

เมื่อ D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานก่อนกลึง

d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานหลังกลึง

f_r = อัตราป้อน (นิ้ว / รอบ)

N = ความเร็วรอบ



รูปที่ 2.4 ปัจจัยต่างๆในการตัด [1]

ความเร็วตัดและอัตราการป้อน การคำนวณหาความเร็วตัดสามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ระบบนิ้ว

$$V = \pi DN/12 \quad (2-6)$$

เมื่อ D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (นิ้ว)

ระบบเมตริก

$$V = \pi DN/1000 \quad (2-7)$$

เมื่อ D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

โดยปกติแล้วค่าความเร็วตัดและอัตราการป้อนนั้นเรามักจะใช้ค่าจากตารางคู่มือมาตรฐาน ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุชิ้นงานและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด ตัวอย่างค่าความเร็วตัดและอัตราการป้อนในงานกลึงแสดงในตารางที่ 2.1

ชนิดของเหล็กกล้า	ความแข็ง (BHN)	มีดเหล็กกล้าอบสูง (HSS)		มีดเหล็กคาร์ไบด์ (Carbide)	
		ความเร็วตัด (SFPM)	อัตราการป้อน (IPR)	ความเร็วตัด (SFPM)	อัตราการป้อน (IPR)
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำทั่วไป	170-190	190	0.012	625	0.015
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางทั่วไป	200-230	140	0.012	420	0.012
เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำผ่านการอบคลาย (annealed)	110-165	140	0.012	525	0.015
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางผ่านการอบคลาย	120-185	100	0.012	475	0.015
เหล็กกล้าคาร์บอนสูงผ่านการอบคลาย	170-200	90	0.012	425	0.012
เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางผ่านการอบคืนตัว	210-250	80	0.010	400	0.012
เหล็กกล้าคาร์บอนสูงผ่านการอบคืนตัว	320-375	50	0.010	225	0.010
เหล็กกล้าผสมผ่านการอบคลาย	150-240	80-110	0.010	300-425	0.020

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความเร็วตัดและอัตราการป้อนในงานกลึง สำหรับวัสดุชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า [4]

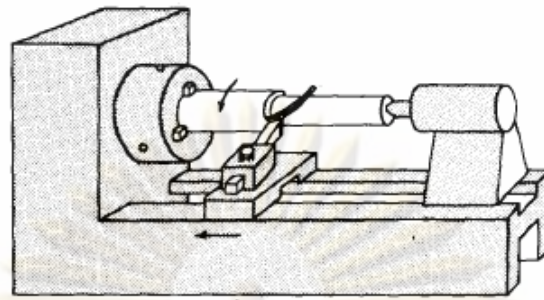
ประเภทการตัดตาม วัตถุประสงค์	ความเร็วในการป้อน	ความลึกในการตัด	ความเร็ว ในการตัด
การตัดแบบหยาบ	สูง (0.4-1.25 มิลลิเมตร/รอบ) (0.015-0.050 นิ้ว/รอบ)	สูง (2.5-20 มิลลิเมตร) (0.100-0.750 นิ้ว/รอบ)	ต่ำ
การตัดแบบละเอียด	ต่ำ (0.125-0.40 มิลลิเมตร/รอบ) (0.005-0.015 นิ้ว/รอบ)	ต่ำ (0.75-2.0 มิลลิเมตร) (0.030-0.075 นิ้ว)	สูง

ตารางที่ 2.2 กระบวนการตัดแบ่งประเภทเป็นการตัดแบบหยาบและการตัดแบบละเอียด [1]

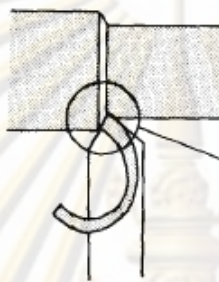
2.1.5 ประโยชน์ของเครื่องมือตัด [5]

ประโยชน์ประการแรกของเครื่องมือตัดที่ใช้กับเครื่องจักรถูกพัฒนาโดย วิลกินสัน (Wilkinson) เมื่อเขาได้พัฒนาเครื่องจักรที่ใช้คว้านรูงานของเขา และสามารถทำเครื่องจักรสำเร็จได้ใน ปี ค.ศ. 1775 เครื่องจักรไอน้ำของวัตต์ ในปี ค.ศ.1800 มาร์ดเลย์ (Mardslay) พัฒนาการกลึงสกรูขึ้น ภายหลังจากนั้นก็มีการประดิษฐ์ เครื่องไส เครื่องกัด และเครื่องเจาะ เกิดขึ้นตามมา

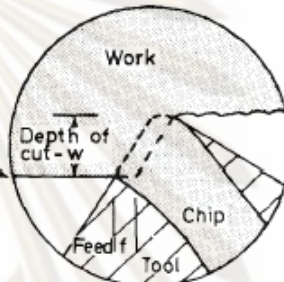
จุดมุ่งหมายของเครื่องมือตัดคือการเอาโลหะออกจากผิวได้เงื่อนไขที่ถูกควบคุมสภาพการทำงาน ดังนั้นเครื่องมือตัดแข็งกว่าวัสดุคัตที่มันตัดอย่างแน่นอน ความต้องการอย่างที่สอง คือความต้องการของชิ้นงานที่มีความสามารถในการตกแต่งด้วยเครื่องมือ การต้านทานในที่นี่จะถูกใช้ประโยชน์จากแรงที่เกิดจากการตัด ที่เป็นไปได้ในการตัดของเครื่องมือ ภายได้เงื่อนไขเหล่านี้ชิ้นงานจะเกิดแรงอัดและการไหลตัวและขาดแยกออกจากกันจากชิ้นงานเดิมประสิทธิภาพของเครื่องมือตัดจะเอาผิวของโลหะออกจากชิ้นงานเดิมคือหน้าที่ของความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงระหว่างชิ้นงานและวัสดุที่ทำเครื่องมือตัด ความคมของเครื่องมือตัด รูปทรงทางเรขาคณิตของเครื่องมือตัด แรงที่ใช้ในการตัดจะได้อีกกล่าวถึงต่อไป



(a)

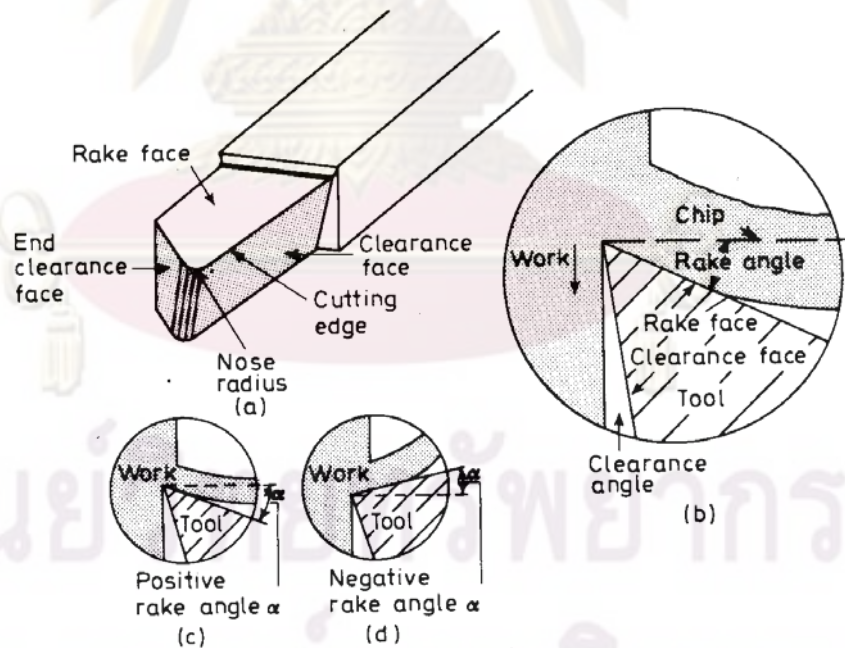


(b)



(c)

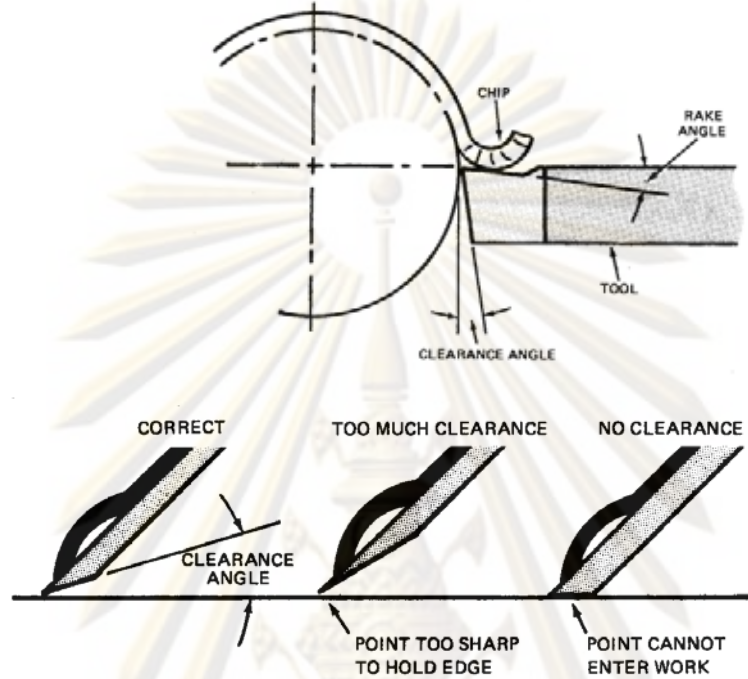
รูปที่ 2.5 แสดง เครื่องกลึง [6]



รูปที่ 2.6 แสดง ส่วนประกอบของ เครื่องมือตัด [6]

เครื่องมือตัดแบบคมตัดเดี่ยวถูกทำขึ้นแบบง่ายๆเพื่อให้ได้คมตัดเดี่ยวในการตัดเฉือนเหมือนเครื่องกลึงหรือเครื่องไส ในบางตัวอย่างหลายๆอันเครื่องมือตัดแบบคมตัดเดี่ยวจะถูกติดตั้งในแกน

ของเครื่องคว้านรู ในกรณีอื่นเครื่องมือเหล่านี้จะถูกต้องตั้งอยู่บนงานหมุนเหมือนในใบมีดตัดกัด
แน่นอนในขั้นถัดไป คือ มีดกัดที่มีฟันที่มีคมตัดหลายฟันและการผลิตใบมีดจากงาน 1 งาน



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะมุมของเครื่องมือตัดที่เหมาะสมในการกลึง[7]

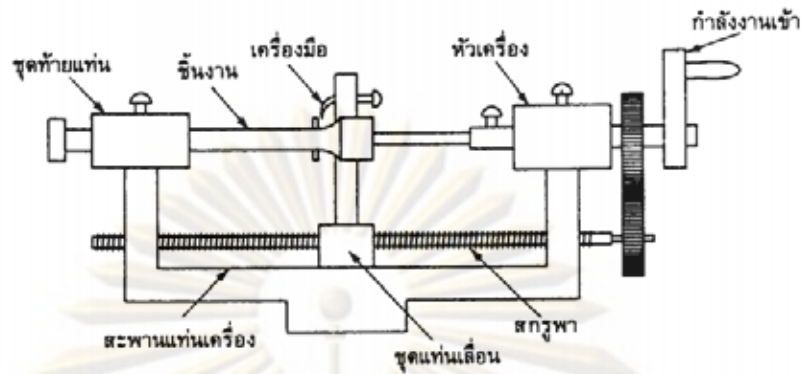
2.2 การพัฒนาการของเครื่องจักรกล ซีเอ็นซี [2]

2.2.1 ประวัติความเป็นมา

ความต้องการเครื่องจักรอัตโนมัติที่จะช่วยการผลิตที่มีจำนวนมากๆและแม่นยำสูง ตลอดจน
การแข่งขันทางการตลาด ความต้องการเหล่านี้เป็นแรงผลักดันให้เราต้องค้นหาหนทางในการผลิต
ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถของเครื่องจักรมากกว่าความสามารถของคน

ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเครื่องกลึงผิวโลหะหน้าตัดกลมขึ้นมาในช่วงต้นๆดังแสดงในรูปที่ 2.8
ช่วงต้นศตวรรษที่ 18 จอห์น วิลเคนสัน (John Wilkenson) ได้สร้างเครื่องจักรสำหรับคว้านรู และเจคค
วอร์ด (Jacquard) สร้างและนำกลไกมาประกอบเป็นเครื่องทอผ้าชนิดหนึ่งที่สามารถแก้ไขหรือ
ควบคุมรูปแบบของลายผ้าได้โดยใช้การ์ดเจาะรูในการควบคุม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 แสดงเครื่องกลึงผิวโลหะหน้าตัดกลมในช่วงต้นๆ[2]

ในกลางศตวรรษที่ 18 จอห์น พาร์สันส์ (John Parsons) สร้างเปียโนอัตโนมัติ เครื่องนี้ใช้กระดาษม้วนเจาะรูเอาไว้ และใช้โบลว์โวกเป่าลมผ่านรู แล้วทำให้คีย์ทำงาน ทำให้เกิดเสียงดนตรีขึ้น ปัจจุบันจะใช้แสงผ่านรูกระดาษทำให้สวิทช์ต่อวงจร และให้เซอร์โวมอเตอร์ทำงานและควบคุมความเร็วอัตราป้อนของส่วนต่างๆของเครื่องจักรหรือเครื่องมือ (มีการประยุกต์ใช้กับเครื่องจักร)

ต่อมาเครื่องมือตัดถูกควบคุมด้วยลูกเบี้ยวและไฮดรอลิกแทรกเซอร์ (Hydraulic Tracer) ก็ได้มีการคิดค้นมาใช้งานควบคุมกับกับความต้องการผลิตจำนวนมาก และมีความแม่นยำสูง ต่อมาไม่นานก็ได้มีการประกอบขึ้นส่วนอย่างอัตโนมัติ และมีหลายคนที่พยายามที่จะสร้างเครื่องจักรที่ทำงานได้โดยอัตโนมัติซึ่งเป็นผลให้ผลิตและความแม่นยำสูงขึ้น

ในต้นปี ค.ศ. 1940 ความต้องการของกองทัพอากาศสหรัฐอเมริกาในเรื่องของความแม่นยำที่สูงในการผลิตทางด้านอากาศยาน ซึ่งมียุ่งยากและต้องใช้ความเชี่ยวชาญสูง ไม่เฉพาะจำนวนของการผลิตเท่านั้น แต่ความแม่นยำก็มีความจำเป็นอย่างมากกับงานที่มีทั้งความยากและสลับซับซ้อนนี้ ซึ่งเกินความสามารถของโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปจะทำได้ เพื่อที่จะให้บรรลุความต้องการอันนี้ กองทัพสหรัฐอเมริกาที่ได้ว่าจ้างจอห์น พาร์สันส์ ในความร่วมมือของสถาบันเทคโนโลยีแห่งแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology) สร้างระบบควบคุมโดยโปรแกรมซึ่งอยู่ในเทปเจาะรู เครื่องจักรเหล่านี้ต่อมาเรียกว่า นิวเมอริคอลลคอนโทรล Numerical Control (NC) ใช้การควบคุมที่สลับซับซ้อน ระบบควบคุมประกอบด้วยท่อและอุปกรณ์ทางกลจำนวนมาก

เมื่อมีการเริ่มต้น การพัฒนาปรับปรุงก็จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ท่อสุญญากาศก็ถูกเปลี่ยนมาใช้ อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์แทน มีการเปลี่ยนแปลงมาใช้อุปกรณ์วงจรสำเร็จรูป (Solid State Circuitry) และมีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ ในระบบของการเก็บข้อมูลลงในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์แล้วส่งไปยังเครื่อง CNC (Computer Numerical Control) ความสามารถในการเก็บข้อมูล

เป็นบล็อกต่างๆในหน่วยความจำและรับคำสั่งตามลำดับ สามารถที่จะแก้ไขหรือป้อนเข้าไปใหม่ซึ่งทำให้ลดจำนวนของการเกิดข้อผิดพลาดในการเจาะรูที่เทปกระดาษ

การพัฒนาของไมโครโปรเซสเซอร์และไมโครคอมพิวเตอร์ได้ช่วยให้ลดขนาดของเครื่องควบคุม เพิ่มขนาดหน่วยความจำ และมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น เพิ่มความจุในการเก็บข้อมูลได้อย่างมาก การแก้ไขและการเรียกโปรแกรมมาคสามารถทำได้ด้วยการเรียกดูทางจอภาพ มีระบบเตือนภัยอย่างเช่น ระบบป้องกันเครื่องมือตัดจากการกระทบที่อาจจะเกิดขึ้น นอกจากนี้อัตราการป้อนและความเร็ว ตำแหน่งเครื่องมือ และการเคลื่อนที่สามารถที่จะเปลี่ยนและควบคุมได้

ในยุคแรกทำได้เฉพาะการเคลื่อนที่เชิงเส้นและการเคลื่อนที่แบบวงกลม ใช้แกน X, Y และ Z และใช้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinates) ต่อมาก็มีระบบพิกัดโพลาร์ (Polar Coordinate) ในการกำหนดการเคลื่อนที่ของเครื่องมือเพิ่มขึ้น ปัจจุบันไดเรกนิวเมอริคอล คอนโทรล (Direct Numerical Control) ตัวนิวเมอริคอลคอนโทรลจะต่อสายจากคอมพิวเตอร์ตรงไปยังเครื่องมือกลหรือเครื่องจักร อาจจะหนึ่งตัวหรือหลายตัวก็ได้ เจ้าหน้าที่จะทำการป้อนโปรแกรมสู่คอมพิวเตอร์ ต่อจากนั้นจะทำการโหลดโปรแกรมลงในหน่วยความจำของเครื่องจักร ซึ่งทำให้เครื่องพร้อมที่จะทำงาน

บับเบิลเมโมรีทำจากการใช้การ์เน็ตคริสตอล (Garnet Crystal) เพื่อเก็บข้อมูลซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถเก็บข้อมูลได้มากกว่าวัสดุอื่น ๆ รวมทั้งการเข้าถึงหน่วยความจำ และนำข้อมูลออกมาใช้ได้เร็วกว่าอีกด้วย มีช่องเก็บข้อมูลที่มาก ทำให้สามารถจัดเก็บข้อมูลได้มาก และมีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ดี ซึ่งจะมีผลทำให้การตัดและค่าของการชดเชยรัศมีของเครื่องมือในการเคลื่อนที่ การตรวจสอบ และการตรวจจับข้อผิดพลาดมีความแม่นยำและเป็นไปได้มากขึ้น

2.2.2 ข้อดีและข้อจำกัดของระบบซีเอ็นซี [2]

ข้อดีและข้อจำกัดระบบซีเอ็นซีเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยมือมีดังนี้คือ

ข้อดี

1. มีความเที่ยงตรงสูงและได้ชิ้นงานที่มีความคงที่สม่ำเสมอ
2. ผลผลิตเพิ่มขึ้นแต่ใช้เวลาน้อยลง
3. ค่าใช้จ่ายในการผลิตลดลง
4. ลดจำนวนเครื่องมือและอุปกรณ์จับยึดชิ้นงาน
5. ไม่จำเป็นต้องใช้คนงานที่มีทักษะและประสบการณ์สูงในการควบคุมเครื่องจักร ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย

6. การตรวจสอบคุณภาพทำได้ง่ายโดยที่ไม่จำเป็นต้องตรวจสอบคุณภาพทุกชั้นตอน

7. มีความคล่องตัวและความยืดหยุ่นในการทำงานสูง การแก้ไขหรือเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานนั้นทำได้โดยการแก้ไขโปรแกรมสั่งงานเท่านั้น

8. ลดเวลาในการปรับตั้งเครื่องหรือการเปลี่ยนเครื่องมือ

ข้อจำกัด

1. เครื่องจักรในระบบซีเอ็นซีมีราคาสูง ทำให้ค่าลงทุนในการผลิตช่วงต้นๆสูงตามไปด้วย

2. การบำรุงรักษายุ่งยากและค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูง

3. จำเป็นต้องใช้คนงานที่มีความรู้และทักษะสูงในการเขียนโปรแกรมสั่งงาน

4. จำเป็นต้องมีการฝึกอบรมให้กับคนงานในกรณีที่น่าระบบซีเอ็นซีไปใช้ทดแทนเครื่องจักรกลเดิม

2.3 การประยุกต์ใช้งานของซีเอ็นซี (Application of CNC) [4]

ในปัจจุบันเทคโนโลยีซีเอ็นซีได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหลายชนิดด้วยกัน

1. งานตัดเฉือนผิวโลหะ (Metal Cutting) เป็นประเภทที่นำระบบซีเอ็นซีมาใช้งานมากที่สุด คือ ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลการสำรวจของหนังสือ Guidebook to CNC Technology ในปี ค.ศ. 1992 ที่ได้สำรวจการใช้เครื่องจักรซีเอ็นซีในโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศสหรัฐอเมริกา จะประกอบด้วยเครื่องแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ (Machining Center) 25 เปอร์เซ็นต์ เครื่องกลึงซีเอ็นซี 27 เปอร์เซ็นต์ เครื่องกัดซีเอ็นซี 12 เปอร์เซ็นต์ และเครื่องซีเอ็นซีแบบกลึง-กัด ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

2. งานเจียรระไน (Grinding) เป็นงานอีกประเภทหนึ่งที่นำระบบซีเอ็นซีมาใช้งานมากรองจากงานตัดเฉือนผิวโลหะ คือประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด

3. งานขึ้นรูปด้วยวิธีพิเศษ (Unconventional Machining) เป็นลักษณะการขึ้นรูปที่ไม่เหมือนกับเครื่องซีเอ็นซีที่ใช้สำหรับงานตัดเฉือนผิวโลหะ ยกตัวอย่างเช่น เครื่องกัดโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า (EDM) เครื่องตัดโลหะโดยใช้ลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Machining) เครื่องตัดโลหะด้วยเลเซอร์ (Laser Cutting Machining)

4. งานตัดเจาะและพับขึ้นรูป (Fabrication) เป็นการนำระบบซีเอ็นซีมาใช้สำหรับงานตัดเจาะและพับขึ้นรูปในงานโลหะแผ่น คือประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมด

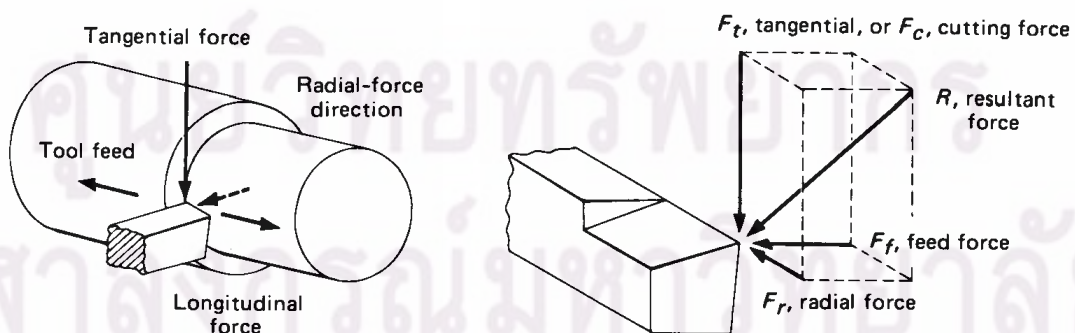
5. งานประยุกต์ใช้สำหรับงานพิเศษหรืองานเฉพาะอย่าง (Special-Purpose Application) เป็นการนำระบบซีเอ็นซีมาใช้กับงานที่มีลักษณะพิเศษและเป็นงานเฉพาะอย่าง ยกตัวอย่างเช่น เครื่องวัดจุดโคออร์ดิเนต (Coordinate Measurement Machines:CMM) งานประกอบชิ้นส่วน (Assembly) และงานขนถ่ายวัสดุ (Material Handling)

2.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการขึ้นรูปทางกล [4]

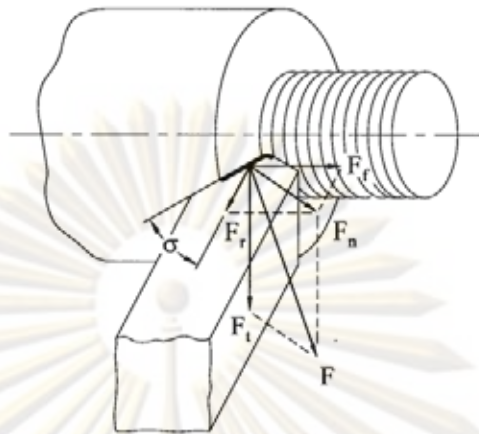
ค่าตัวแปรที่ถูกลำเอียงมาพิจารณาในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซีมากที่สุดคือความเที่ยงตรง (Accuracy) และสมรรถภาพ (Efficiency) ของเครื่องจักร โดยที่ความเที่ยงตรงนี้จะหมายถึงความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงาน ซึ่งต้องอาศัยค่าตัวแปรที่สำคัญ 2 ประการคือ ความเที่ยงตรงแม่นยำของโปรแกรมและความเที่ยงตรงของเครื่องจักรที่เกิดจากระบบการวัดหรือระบบควบคุมขับเคลื่อน ส่วนสมรรถภาพของเครื่องจักรนั้นจะสัมพันธ์กับอัตราของการผลิตชิ้นงาน ซึ่งหมายถึงเวลาที่ใช้ในการผลิตนั่นเอง

ในการเขียนโปรแกรมเอ็นซีจำเป็นจะต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์หรือข้อมูลในการตัดเฉือนที่สำคัญ 3 ค่าตัวแปร คือ ความเร็วตัด (Cutting Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกของการตัดเฉือน (Depth of Cut) โดยที่ค่าตัวแปรทั้ง 3 นี้จะเป็นตัวชี้วัดสมรรถนะของกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงาน ดังนั้นในการพิจารณาเลือกค่าตัวแปรทั้งสามนี้ควรคำนึงถึงความสามารถในการตัดเฉือนของเครื่องมือตัด กำลังม้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องตัด ความแข็งแกร่ง (Rigidity) ของชิ้นงานและอุปกรณ์จับยึดด้วย

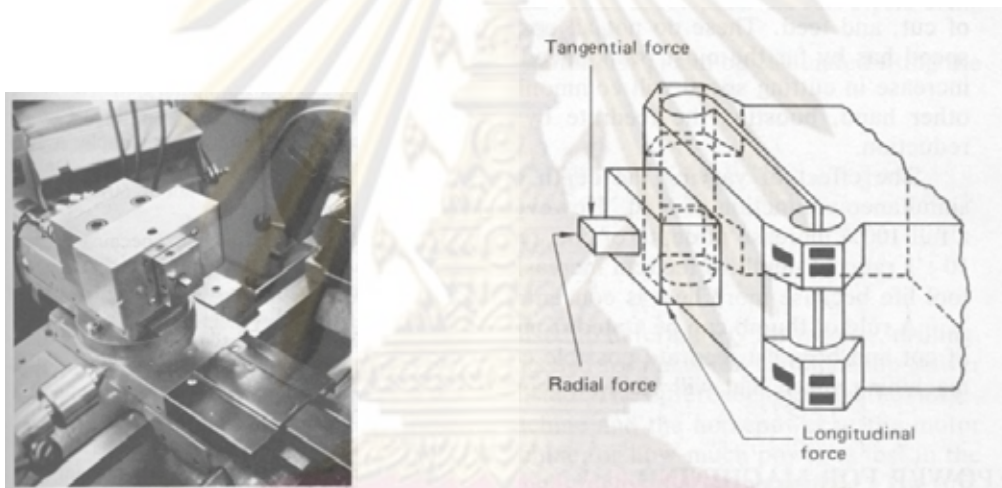
2.5 แรงตัดของเครื่องมือ



รูปที่ 2.9 แสดงแรงที่กระทำบนมีดกลึงระหว่างการกลึงกับแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้น [8]



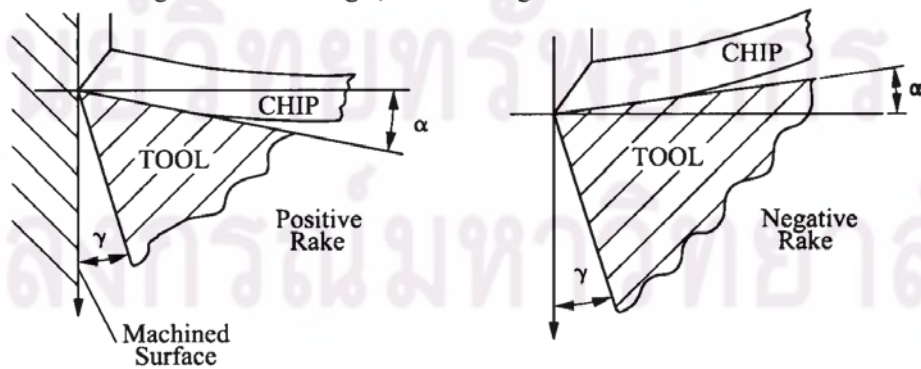
รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของแรง สำหรับงานกลึง [9]



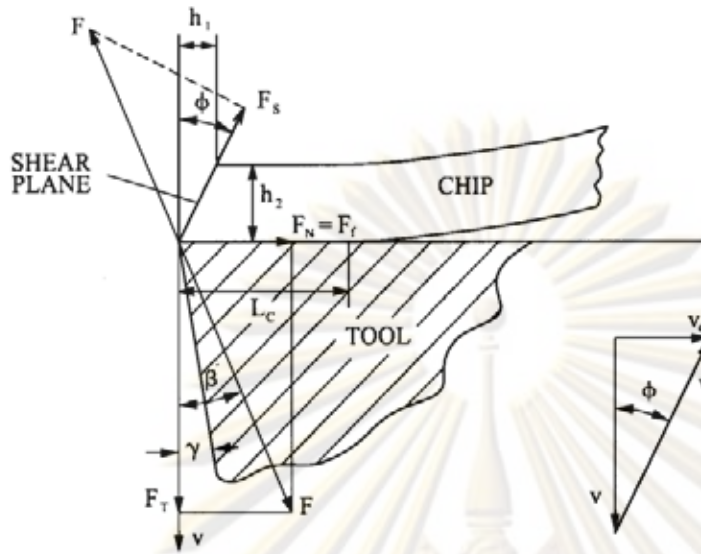
รูปที่ 2.11 แสดงตัวอย่างไดนาโมมิเตอร์ 3 แกน สำหรับงานกลึง [8]

ORTHOGONAL CUTTING (2D)

Tool wedge α : rake angle, γ : relief angle



รูปที่ 2.12 แสดงมุมคานพิเศษค่าบวกและค่าลบ [9]



รูปที่ 2.13 แสดงแรงเฉือน แรงเสียดทาน และความเร็ว สำหรับตัวอย่างง่าย ๆ
กรณีที่มีมุมคายเศษเท่ากับศูนย์ [9]

สูตรการคำนวณอย่างง่าย [9]

แสดงลักษณะรูปทรงทางเรขาคณิตของการกลึงและสูตรการคำนวณแรงอย่างง่าย ในทางปฏิบัติ ขึ้นอยู่กับวัสดุชิ้นงานและวัสดุที่ใช้ทำมีดกลึง มุมคายเศษบวกหรือลบจะถูกนำไปใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ส่วนมากแล้วจะเลือกในช่วง $\pm 8^\circ$ เพื่อให้ง่ายกำหนด $\alpha = 0^\circ$ สามารถวาดผังของแรงได้ดังรูปที่ 2.13 แรงตัด F ภายใต้มุม β ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการตัด V สามารถแตกแรงได้ 2 ส่วนคือ F_T และ F_N สำหรับแรง F_N จะอยู่ในรูปของแรงเสียดทาน F_f ระหว่างเศษกลึงและมีดกลึง เศษกลึงนี้ขึ้นรูปโดยแรงเฉือนในระนาบที่ทำมุม ϕ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการตัด V โดยที่ $\phi = \tan^{-1}(h_1/h_2)$ ซึ่ง (h_1/h_2) คือ Plastic Strain ของเศษกลึง กำหนดให้แรงที่กระทำกับชิ้นงานอยู่ในทิศตรงกันข้ามของมีดกลึง เราจะแตกแรงเฉือน F_s ของแรงโดยการฉายแรง F บนระนาบเฉือน (Shear Plane) เศษตัดจะสัมผัสกับมีดกลึงด้วยความยาว L_c ความเร็วเฉือน V_s ได้จากกราฟล่างขวาดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงความเร็วตัด V เปลี่ยนเป็นความเร็วของเศษตัด V_c

แรง Tangential F_T ได้มาจาก หน้าตัดของเศษกลึง (Chip Cross Section) โดยใช้ K_s (Specific Force) $F_T = K_s \cdot b \cdot h_1$ โดยที่ h_1 ความหนาของเศษกลึงส่วนที่ไม่ตัด (Uncut Chip) และ b คือความกว้างของเศษกลึง สมมุติว่าเรารู้ค่าของมุม β และ ϕ .ต่อไปนี้จะแสดงการคำนวณที่เป็นไปได้ของแรงเฉือน (Shearing Force) , ความเร็ว และ กำลังตัด และความเสียดทาน

$$F_s = F \cdot \cos(\phi + \beta) \cdot V_s = \frac{V}{\cos \phi} \tag{2-8}$$

$$\text{กำลังตัดเฉือน คือ } P_s = F_s \cdot V_s \tag{2-9}$$

$$F_f = F_T \cdot \tan \beta \quad (2-10)$$

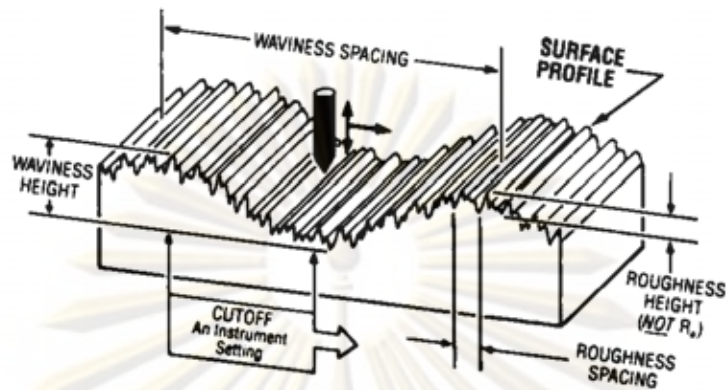
$$V_f = V_c = V \cdot \tan \phi \quad (2-11)$$

$$\text{กำลังเสียดทาน คือ } P_f = F_f \cdot V_c \quad (2-12)$$

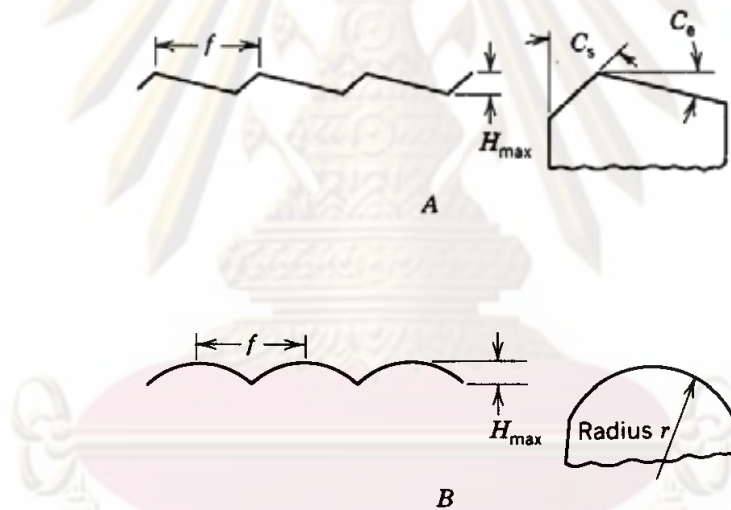
2.6 ความเรียบผิว (Surface Finish) [1]

ลักษณะของความเรียบผิว (Surface Finish) จะแสดงในรูปของคุณสมบัติของผิวชิ้นงานที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

1. ความขรุขระ (Roughness) จะประกอบไปด้วยช่องขนาดเล็กและละเอียดที่ซิดกันหลายๆช่อง สาเหตุหลักเกิดจากรอยที่เหลือไว้จากการทำดำเนินด้วย Cutting Tool ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยถูกวัดโดยกำหนดช่วงความยาวหนึ่งเรียกว่า “Cutoff Length” หรือ “Roughness Sampling Length”
2. รอยคลื่น (Waviness) ประกอบไปด้วยรอยขรุขระบนชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า Roughness Sampling Length (ประมาณ 1 ไมโครเมตร) สาเหตุเกิดจากการสั่นหรือมีรอยตำหนิบนชิ้นงานหรือ มีดตัดที่เกิดจากการรับภาระในการตัดมากและอุณหภูมิในการตัด
3. รอยตำหนิยาว (Lay) เป็นรอยตำหนิที่เป็นทิศทางยาว มักจะขึ้นกับทิศทางของชิ้นงานและมีดตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและ Tool
4. รอยตำหนิส้ม (Surface Flow) เป็นรอยตำหนิที่เกิดขึ้นแบบส้ม สาเหตุเกิดมาจากรอยตำหนิที่มีมาแต่แรกแล้ว เช่นรอยร้าว ฟองอากาศ
5. ความเรียบผิว (Surface Finish) มีความสำคัญต่อการสวมประกอบและการจัดวางของชิ้นงาน การสวมประกอบและการจัดวางต่างๆจะเกิดขึ้นได้ก็ต้องอาศัยการทาสีหรือทำดำเนินเข้าช่วย บางทีก็ใช้เป็นลักษณะกำซหรือของไหลผ่าน บางทีก็ใช้สายคาดุโดยอาศัยความมันวาวของชิ้นงาน บางทีก็ใช้แสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนได้สูง



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงลักษณะความหยาบผิวเทียบกับมาตรฐาน [8]



รูปที่ 2.15 แสดง รูปแบบเรขาคณิตของผิว [10]

รูป A ความหยาบผิวสูงสุดกำหนดโดย

$$H_{max} = \frac{f}{\tan C_s + \cos C_e} \quad (2-13)$$

โดย f = อัตราการป้อน in. (mm)

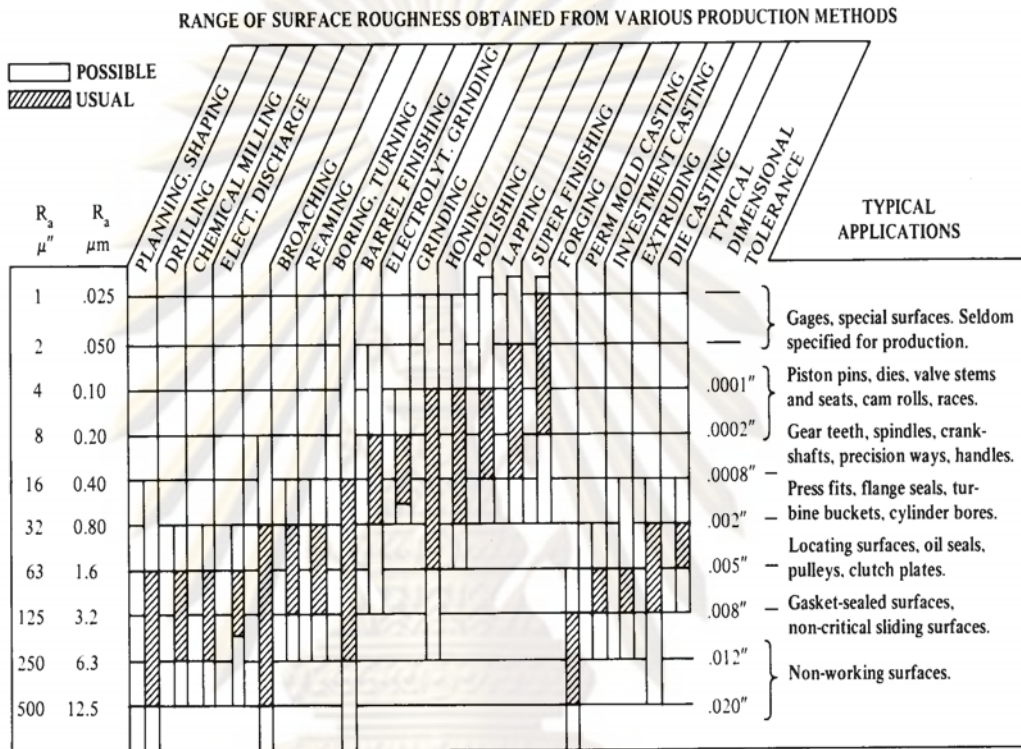
C_s = มุมด้านข้าง องศา (°)

C_e = มุมด้านปลาย องศา (°)

รูป B ความหยาบผิวสูงสุดกำหนดโดย

$$H_{\max} = \frac{f^2}{8.r} \tag{2-14}$$

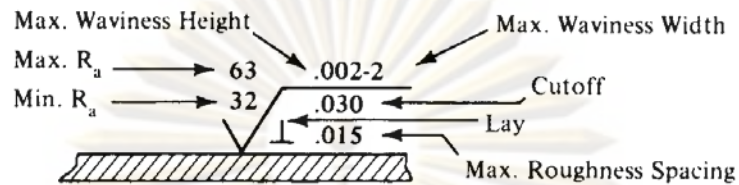
โดย r= รัศมีของมีดกลึง in.



รูปที่ 2.16 แสดงความหยาบผิวที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ [8]

SYMBOLS FOR SPECIFICATIONS AND DRAWINGS

In this example, all values are in inches except R_a values, which are in microinches (millionths of an inch). Metric values (millimeters and micrometers, respectively) are used on metric drawings.



- ✓ Surface may be produced by any method
- ✓ Material removal by machining is required; material must be provided for that purpose
- .001 ✓ Material removal allowance in inches (or millimeters)
- ✓ Material removal prohibited

- Symbols indicating direction of lay
- = Parallel to the boundary line of the nominal surface indicated by the symbol
 - ⊥ Perpendicular to the boundary line of the nominal surface indicated by the symbol
 - X Angular in both directions to the boundary line of the nominal surface indicated by the symbol
 - M Multidirectional
 - C Approximately circular relative to the center of the nominal surface indicated by the symbol
 - R Approximately radial relative to the center of the nominal surface indicated by the symbol

รูปที่ 2.17 แสดงมาตรฐานการกำหนดสัญลักษณ์ความหยาบผิว [8]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Explanation of Surface Characteristics · Standards >>>

Comparison of national standards of surface texture measurement

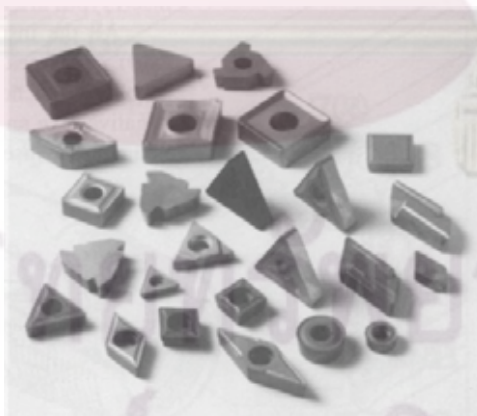
Specification	ID. of national standard country	JIS B0601-'82 JIS B0031-'82	ANSI B46.1-'85	NF E05-015('84) NF E05-016('78) NF E05-017('72)	ISO468-'82 ISO4287/1-'84 ISO4288-'85 ISO1302-'78
		former Japan	former U.S.A.	former France	former ISO
Primary profile P	Profile format	Analog signal without filtering	Analog signal with low pass filtering	Analog signal without filtering	Analog signal without filtering
	Evaluation length	1 sampling length 0.25, 0.6, 2.5, 8, & 25	—	not defined	—
P profile parameter	Maximum height	R _{max} (S indication)	—	P ₁	—
	Ten point height	R _z (Z indication)	—	—	—
	Other P parameters	—	—	P _p , P _a , (T _p) _c	—
	Motif parameters	—	—	R, AR, K, W, W _{max} , W ₁ , AW, Kw	—
	Indication of maximum height < 1.5 μm	$\sqrt{R_{max}=1.6}$ $R_{max}=0.8$	—	P ₁ 0.8 - 0.8	—
Roughness profile R	Unit of height	μm	μm or μin.	μm	μm
	Unit of length	mm	mm or in.	mm	mm
	Filter	2RC	2RC	2RC	2RC
	Long cutoff	λ _c	λ _B	λ _c	λ _c
	Short cutoff	—	cutoff value 2.5 μm	—	—
	Sampling length	L=3 × λ _c or over	L: 1.3-5mm @ λ _B 0.25 L: 2.4-8mm @ λ _B 0.8 L: 5-15mm @ λ _B 2.5	λ	λ
	Evaluation length	TL=L-3 × λ _c or over	—	L = n × λ	λ n = n × λ
R profile Height parameter	Maximum height	—	Peak-to-Valley Height (R _{max} , R _v)	R _y	R _y
	Maximum peak to valley height	—	—	R _{max}	R _y max
	Ten point height	—	(R _z)	R _z	R _z
	Average peak to valley height	—	—	—	R _y 5
	Other peak height parameters	—	(R _p)	R _p	R _p , R _p max, R _p 5, R _m , R _q
λ _r & λ _c for peak height parameter	0.25mm	R _{max} , R _z ≤ 0.8 μm	—	not defined	0.1 < R _y ≤ 0.5 μm
	0.8mm	0.8 < R _{max} , R _z ≤ 6.3 μm	—	not defined	0.5 < R _y ≤ 10 μm
	2.5mm	6.3 < R _{max} , R _z ≤ 25 μm	—	not defined	10 < R _y ≤ 50 μm
	Indication of Maximum height in case of R _z < 1.5 μm	—	—	R _{max} 1.6	$\sqrt{R_y = 1.6}$
R profile averaging parameter	Arithmetic average	R _a (a indication)	R _a	R _a	R _a
	root mean square	—	(R _q)	R _q	R _q
	Skewness, kurtosis	—	(Skewness, Kurtosis)	Sk, Ek	Sk
λ _r & λ _c for R _a on non-periodic profile	0.25mm	optional	0.0063 < S _m ≤ 0.05 μm	not defined	0.02 < R _a ≤ 0.1 μm
	0.8mm	R _a ≤ 12.5 μm	0.02 < S _m ≤ 0.16 μm	not defined	0.1 < R _a ≤ 2 μm
	2.5mm	12.5 < R _a ≤ 100 μm	0.063 < S _m ≤ 0.5 μm	not defined	2 < R _a ≤ 10 μm
	Indication of R _a in case of 1.5 < R _a < 3.1 μm	$\frac{3.2}{1.6}$	$\frac{125}{63}$	R _a 1.6 - 3.2	$\frac{3.2}{1.6}$ $\frac{N8}{N7}$
R profile other parameter	Mean spacing	—	Roughness spacing	S _m	S _m
	RMS slope	—	—	Δ _q	Δ _q
	material ratio	—	(t _p)	—	t _p
	Other parameters	—	(Peak count P _c)	S, Δ _s , λ _s , λ _q	S, Δ _s , λ _s , λ _q , Lo, D
Comparison rules of measured value with tolerance limits	Average	average value of all sampling lengths	average value of all sampling lengths	not defined	—
	10% rule	—	—	not defined	10% rule default
	Maximum rule	—	—	not defined	Max rule for parameter with suffix "max"

BS1134 part 1-'88 BS1134 part 2-'90 former U.K.	DIN4768-'90 DIN4771-'77 DIN4775-'82 DIN4776-'90 DIN4777-'90 former Germany	JIS B0601-'94 JIS B0031-'94 former Japan	ASME B46.1-'95 U.S.A.	ISO4287:'97 (JIS B0601:'01) ISO4288:'96 (JIS B0633:'01) ISO12085:'96 (JIS B0631:'00) ISO13565'a, (JIS B0671'a) ISO1302:'02 EU, U.K. & Japan
Analog signal without filtering	Digital data without filtering	Digital data without filtering	Digital data with λ_s filter	Digital data with λ_s filter
—	0,5, 1,5, 5, 15 & 50mm	—	—	= 1 sampling length = Length of the measured feature
—	Pt	—	—	Pt, Pz(=Pt)
—	—	—	—	—
—	—	—	—	Pp, Pv, Pc, Pa, Pq, Psk, Pku, PSm, PΔq, Pmr(c), Pσc, Pmr, Ppq, Pvq, Pmq
—	—	—	—	R, AR, Rx, W, AW, Wx, Wte
—	$\sqrt{15 / Pt 1,6}$	—	—	$\sqrt{U 0.008- / Pt 1.5}$
$\mu\text{m} (\mu\text{in})$	μm	μm	μm (or $\mu\text{in.}$)	μm
mm (inch)	mm	mm	mm (or in.)	mm
2RC	Phase correct	Phase correct	Phase correct (or 2RC)	Phase correct
λ_b	λ_c	λ_c	λ_c	λ_c
—	—	—	λ_s	λ_s
δr	δc	δr	Cutoff length : δ	δr
$\delta e = 5 \times \delta r$	$5 \times \delta c$	$\delta e = 5 \times \delta r$	$L = 5 \times \delta$	$\delta e = 5 \times \delta r$ Calculate for each sampling length δr
—	Rt	Maximum height Ry in 1 δr	Rt	Maximum height Rz in 1 δr or total height Rt in 1 δe
Ry	Maximum two point height Rmax	—	Rmax	Rz max
Rz	—	Ten point height Rz	—	—
—	Ten point height Rz	Maximum height Ry	Rz	Average method Rz
—	—	—	Rp, Rpm, Rv	Rp, Rv, Rc
$0,1 < Rz \leq 0,5 \mu\text{m}$	$0,1 < Rz \leq 0,5 \mu\text{m}$	$0,1 < Rz, Ry \leq 0,5 \mu\text{m}$	$0,02 < Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$	$0,1 < Rz \leq 0,5 \mu\text{m}$
$0,5 < Rz \leq 10 \mu\text{m}$	$0,5 < Rz \leq 10 \mu\text{m}$	$0,5 < Rz, Ry \leq 10 \mu\text{m}$	$0,1 < Ra \leq 2 \mu\text{m}$	$0,5 < Rz \leq 10 \mu\text{m}$
$10 < Rz \leq 50 \mu\text{m}$	$10 < Rz \leq 50 \mu\text{m}$	$10 < Rz, Ry \leq 50 \mu\text{m}$	$2 < Ra \leq 10 \mu\text{m}$	$10 < Rz \leq 50 \mu\text{m}$
$\sqrt{Ry = 1,6}$	$\sqrt{Rmax = 1,6}$	$\sqrt{Ry 1,6-0,8 / \lambda_c 0,25}$	$\sqrt{Rmax = 1,6}$	$\sqrt{U 0.008-2,5/Rz 1,5 / L -0,25/Rz 0,7}$
Ra	Ra	Ra	Ra	Ra
—	—	—	Rq	Rq
—	—	—	Rak, Rku	Rak, Rku
$0,02 < Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$	$0,02 < Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$	$0,02 < Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$	$0,02 < Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$	$0,02 < Ra \leq 0,1 \mu\text{m}$
$0,1 < Ra \leq 2 \mu\text{m}$	$0,1 < Ra \leq 2 \mu\text{m}$	$0,1 < Ra \leq 2 \mu\text{m}$	$0,1 < Ra \leq 2 \mu\text{m}$	$0,1 < Ra \leq 2 \mu\text{m}$
$2 < Ra \leq 10 \mu\text{m}$	$2 < Ra \leq 10 \mu\text{m}$	$2 < Ra \leq 10 \mu\text{m}$	$2 < Ra \leq 10 \mu\text{m}$	$2 < Ra \leq 10 \mu\text{m}$
$\sqrt{3,2 / 1,6}$ N8 / N7	$\sqrt{3,2 / 1,6}$	$\sqrt{1,6-3,2}$	$\sqrt{3,2 / 1,6}$	$\sqrt{U^*2RC^* -0,8/Ra75 3,1 / L^*2RC^* -0,8/Ra75 1,5}$
Sm	—	Sm	Sm	RSm
—	—	—	Δq	RΔq
tp	—	tp	tp	Rmr(c)
S	—	S	Htp, Δa, SAE Peak PPI, Peak density Pc	Rσc, Rmr, Rpk, Rvk, Rk, Mr1, Mr2, Rpq, Rvq, Rmq
—	—	average value of all sampling lengths	not defined	average value of all sampling lengths
16% rule	16% rule for Ra, Rz	—	not defined	16% rule default
Max rule for parameter with suffix "max"	Max rule for Rmax	—	not defined	Max rule for parameter with suffix "max"

2.7 อินเสิร์ตคาร์ไบด์และการเลือกใช้ [2]

อินเสิร์ตคาร์ไบด์มีการผลิตขึ้นมาหลายใช้หลายชนิดและหลายเกรด ชนิดของอินเสิร์ตก็จะแบ่งตามรูปร่างของอินเสิร์ต รูปทรงทั่วไปมีทั้งชนิดสามเหลี่ยมมุมฉาก เพชรมุม 80 องศา เพชรมุม 55 องศา และชนิดกลม เกรดของอินเสิร์ตจะแบ่งตามค่าความแข็งของอินเสิร์ต และการนำไปใช้งานที่เฉพาะขึ้นมา คนเขียนโปรแกรมจะต้องตระหนักถึงชนิดและเกรดของอินเสิร์ตเมื่อต้องการเลือกเครื่องมือมาใช้งาน อินเสิร์ตแต่ละชนิดจะกำหนดโดยมีรหัสกำกับในระบบ ในการให้รหัสกับอินเสิร์ตนั้นมีหลายชนิดตามแต่บริษัทผู้ผลิตจะกำหนดขึ้น รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการให้รหัสกับเครื่องมือ

รูปที่ 2.1.3.4.2 แสดงคาร์ไบด์เกรดระดับหนึ่งที่มีใช้และงานที่นำมาใช้ เกรดแต่ละเกรดจะใช้สัญลักษณ์ของ ANSI “C” แล้วตามด้วยตัวเลขตั้งแต่ C-1 ถึง C-8 นอกเหนือจากนี้คาร์ไบด์แต่ละเกรดยังแบ่งตาม ISO รหัส ISO จะใช้ตัว K หรือ P ขึ้นอยู่กับความแข็งของอินเสิร์ตในอเมริกาจะใช้ ANSI ในประเทศอื่นๆ อาจใช้ระบบ ISO นอกจากนี้ทางบริษัทผู้ผลิตอินเสิร์ตได้คิดระบบในการให้เกรดของตัวเองขึ้นมาโดยเทียบกับมาตรฐาน ANSI หรือ ISO อย่างเช่น C-2 ANSI จะเรียกว่า CQ ซึ่งเรียกโดยบริษัท RWT Corporation บริษัท Kennametal Inc. จะเรียกว่า K1 และบริษัท Valenite GTE Inc. จะเรียกว่า VC-1 ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่ผู้ใช้และนักโปรแกรมจะต้องปรึกษากับบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือเพื่อให้ได้เครื่องมือตามเกรดที่ต้องการ



รูปที่ 2.18 แสดงอินเสิร์ตสำหรับงานกลึง [9]

การกำหนดเกรดของผู้ผลิต

ชั้น ANSI	ชั้น ISO	มาตรฐานคาร์บอน ลอย	ไอร์การ์	เคนเนเมนทอล	แซนวิก	วาเลนไนต์
C-8	P-01 P-05	210	IC-80t	K7H	F02	VC-8
C-7	P-10 P-25	350	IC-70	K45	S1P	VC-7
C-6	P-25 P-35	370	IC-50	KC850	S4	VC-55
C-5	P-40 P-50	518	IC-54	-	S35	VC-5
C-4	K-01 K-05	999	IC-4	K11	-	VC-4
C-3	K-10 K-15	905	IC-20	K68	H10	VC-3
C-2	K-20 K-25	883	IC-2	K6	H02	VC-2
C-1	K-30 K-20	820	IC-28	K1	H	VC-1

หมายเหตุ : ผู้ผลิตส่วนมากจะผลิตอินเต็รท์มากกว่าหนึ่งเกรดต่อคลาส ให้ดูจากแคตตาล็อกผู้ผลิต

ตารางที่ 2.4 การกำหนดเกรดของผู้ผลิต [2]

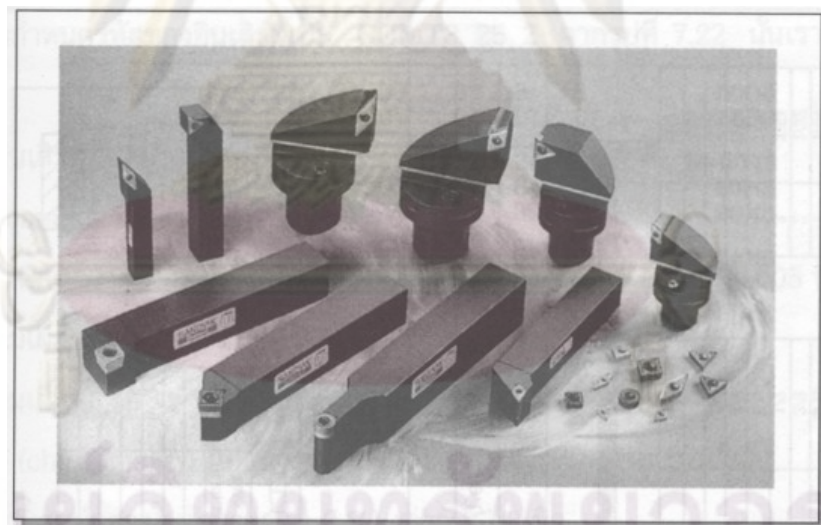
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8 เครื่องมือตัดสำหรับงานกลึง [2]

เครื่องมือตัดที่ใช้สำหรับงานกลึงซีเอ็นซีส่วนมากจะใช้อินเสิร์ตคาร์ไบด์หรือเซรามิกชนิดที่สามารถถอดเปลี่ยนได้ในการพิจารณาเลือกใช้เครื่องมือตัดสำหรับงานกลึงนั้นมืองค์ประกอบพื้นฐานที่สำคัญ 3 ประการคือ

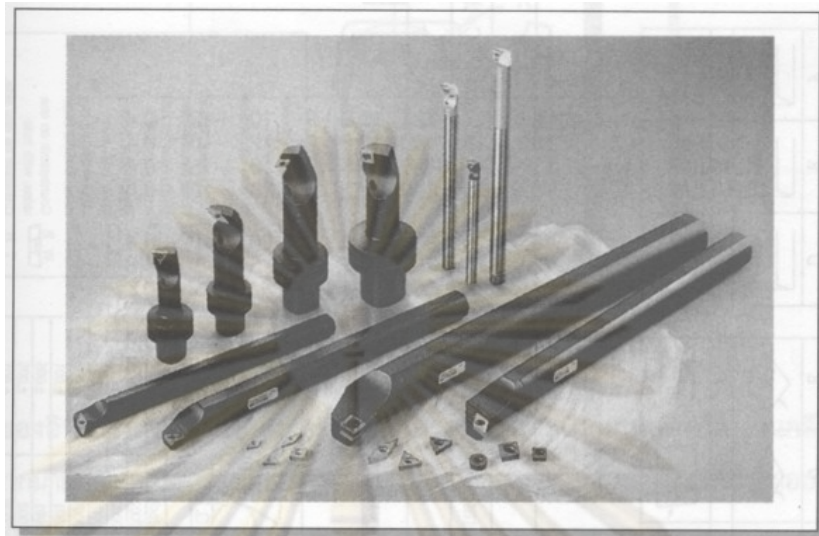
1. เกรดของเครื่องมือ
2. การปรับตั้งเครื่องมือ
3. คุณสมบัติของเครื่องมือตัด เช่น ตำแหน่งของขอบคมตัด ความเที่ยงตรงของปลายคมตัด ซึ่งใช้กำหนดด้านอ้างอิง (Datum) บนอุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ

สำหรับกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซีนั้น เราสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ งานขึ้นรูปภายนอกและงานขึ้นรูปภายในชิ้นงาน โดยที่งานที่ขึ้นรูปภายนอกชิ้นงานนั้นจะประกอบไปด้วยงานกลึงปอก งานกลึงปาด งานตัดเกลียวนอก งานกลึงตกร่อง และงานกลึงขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ ตัวอย่างเครื่องมือตัดสำหรับงานขึ้นรูปภายนอกชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างเครื่องมือตัดสำหรับงานขึ้นรูปภายนอกชิ้นงาน [2]

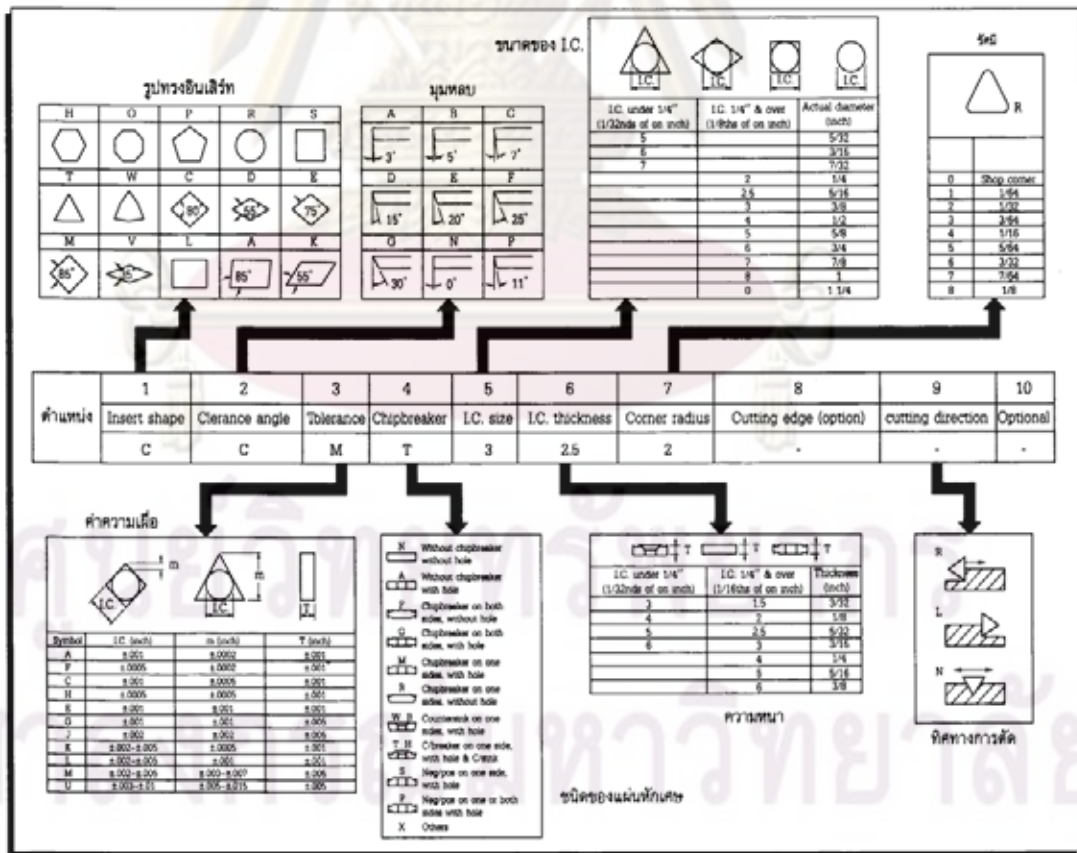
ส่วนงานขึ้นรูปภายในชิ้นงาน เช่น งานเจาะ งานคว้าน งานกลึงตกร่อง งานตัดเกลียวใน เป็นต้น ตัวอย่างเครื่องมือตัดสำหรับงานขึ้นรูปภายในชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างเครื่องมือตัดสำหรับงานขึ้นรูปภายในชิ้นงาน[2]

2.9 การกำหนดรูปพรรณของอินเสิร์ตชนิดถอดเปลี่ยนได้ [2]

ตามมาตรฐานของ ANSI ได้มีการกำหนดรูปพรรณและข้อมูลรายละเอียดต่างๆของอินเสิร์ตไว้ โดยใช้รหัสของข้อมูลทั้งหมด 10 ตำแหน่ง ดังตัวอย่างที่แสดงรูปที่ 2.21

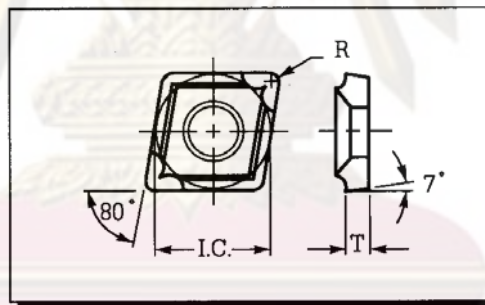


รูปที่ 2.21 แสดงตัวอย่างระบบของการกำหนดอินเสิร์ตชนิดถอดเปลี่ยนได้ตามมาตรฐาน ANSI [2]

ถ้ากำหนดรหัสของอินเสิร์ตที่เป็น CCMT3252 จากรูปที่ 2.21 นั้นเราสามารถที่จะอธิบายรหัสต่างๆ ได้ดังนี้คือ

1. มุมไคมอนอินเสิร์ต 80 องศา
2. มุมหลบ (Clearance Angle) ของอินเสิร์ต 7 องศา
3. การให้ขนาดพิคัดความเผื่อของวงกลมใน (Incribed Circle : I.C.) $\pm 0.002-0.005$ นิ้ว
4. ค่าพิคัดความเผื่อของ M เท่ากับ $\pm 0.003-0.007$ นิ้ว
5. ค่าพิคัดความเผื่อของ T เท่ากับ ± 0.005 นิ้ว
6. ส่วนหักเศษ (Chip Breaker) อยู่ด้านเดียวและเป็นรูเจาะชนิดผายปากเอียง
7. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในของวงกลม (I.C.) เท่ากับ $3/8$ นิ้ว
8. ความหนาของอินเสิร์ตเท่ากับ $5/32$ นิ้ว
9. ขนาดรัศมีส่วนโค้งของคมตัดเท่ากับ $1/32$ นิ้ว

จากตัวอย่างที่ 2.22 รูปพรรณของอินเสิร์ต CCMT3 25 2 จะได้ดังรูป

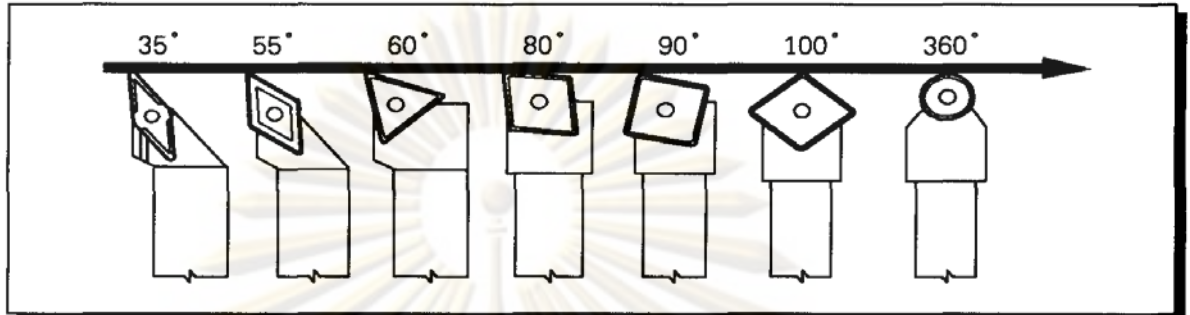


รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการกำหนดรูปพรรณของอินเสิร์ตชนิดถอดเปลี่ยนได้ [2]

รูปทรงของอินเสิร์ต (Insert Shape) อินเสิร์ตชนิดถอดเปลี่ยนได้ที่ใช้ในงานกลึงซีเอ็นซีนั้นมีรูปทรงที่แตกต่างกันออกไปมากมายหลายชนิด ดังนั้นในการเลือกใช้อินเสิร์ตจะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบที่สำคัญๆ ซึ่งอิทธิพลต่อกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานดังนี้คือ

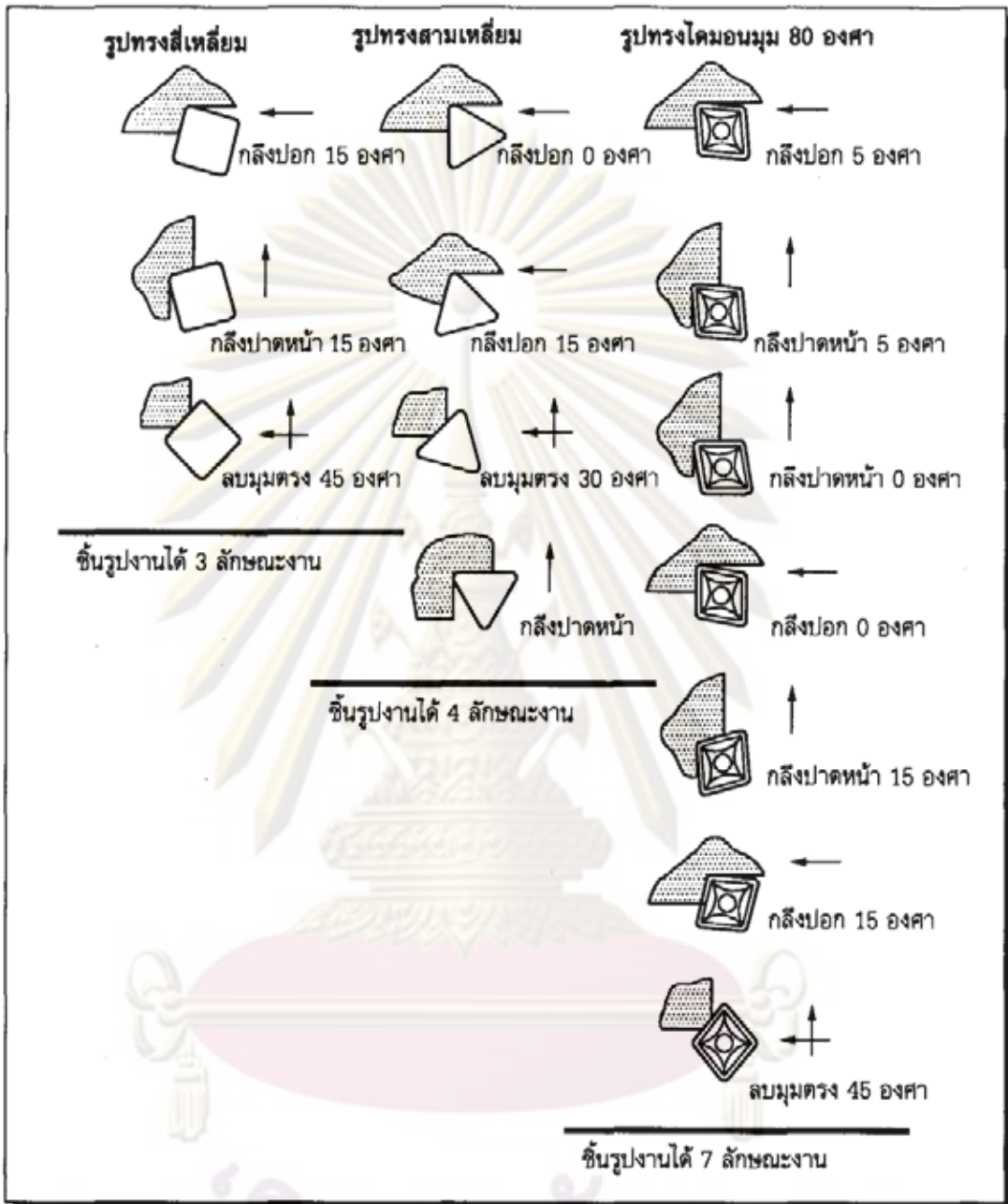
1. รูปร่างลักษณะของชิ้นงานเป็นอย่างไร
2. มุมหลบด้านข้างหรือมุมนำ (Lead Angle) ของอินเสิร์ตที่ต้องการใช้
3. ลำดับขั้นการปฏิบัติงาน
4. ความเร็วตัดสูงสุดที่ต้องใช้
5. ความแข็งแรงและความสามารถในการขึ้นรูปของชิ้นงาน

6. ขนาดรัศมีของคมตัด



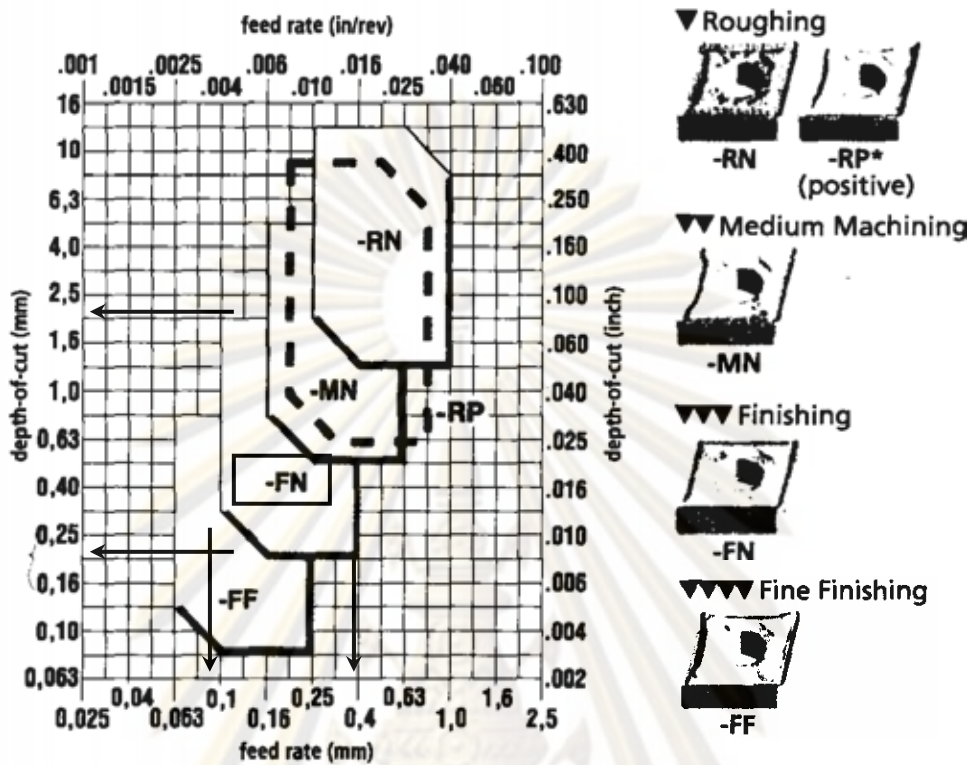
รูปที่ 2.23 ตัวอย่างรูปทรงของอินเสิร์ตชนิดต่างๆ แสดงดังรูป [2]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างลักษณะงานในการขึ้นรูปชิ้นงานแบบต่างๆกัน โดยใช้อินเสิร์ตชนิดถอดได้ [2]

ศูนย์วิจัยทรัพย์สินทางปัญญา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Cutting Condition	Negative Insert Geometry				
	-FF	-FN	-MN	-RN	-RP
heavily interrupted cut	⚙️	⚙️	⚙️	⚙️	⚙️
lightly interrupted cut	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙
varying depth of cut, casting or forging skin	⊙ → KT315	⊙ → KC9110	⊙	⊙	⊙
smooth cut, pre-turned surface	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙

รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างการอ่านค่าตัวแปรและเลือกใช้งานเม็ดมีด (Insert Geometry) สำหรับเม็ดมีดเกรด KC9110 อ้างอิงจากตารางที่ผู้ผลิตแนะนำ [12]

การเลือกใช้งานเม็ดมีด (Insert) กรณีนี้เป็นเม็ดมีด มุมค่าลบ (Negative) เกรดเม็ดมีด KC9110 ใช้สำหรับงานกลึงที่ต้องการผิวละเอียด (Finishing: FN)ซึ่งใช้งานได้ดีหลายๆความลึกตัด หรือผิวงานที่เป็นเหล็กหล่อ (Casting) หรือผิวงานฟอร์จจิ้ง (Forging) ระยะป้อนตัดที่แนะนำคือ 0.1-0.4 มิลลิเมตร/รอบ ที่ความลึกตัด 0.205 -2.05 มิลลิเมตร

Mat. Group	Mat. No.	Germany DIN	France AFNOR	Great Britain BS	Italy UNI	Sweden SS	Spain UNE	U.S.A. AISI/SAE UNS	Japan JIS
Plain Steel, Cast Steel, Free-Machining Steel									
P1	1.0332	St14		14491CR		1447		1008	
P1	1.1121	St10	CC10	040A10		1264		1010	S10C
P1	1.0721	10S20		210M15				1108	
P1	1.0401	C15	CC12	080M15	C15C16	1350	F.111	1015	S15C
P1	1.0402	C22	CC20	050A20	C20C21	1450	F.112	1020	S20C,S22C
P1	1.1141	St15	XC12	080M15	C16	1370	C15K	1015	S15C
P1	1.0036	US137-3			FE378FU				
P1	1.0715	95Mn28	S250	230M07	CF95Mn28	1912	115Mn28	1213	SUM22
P1	1.0718	95MnPb28	S250Pb		CF95MnPb28	1914	115MnPb28	1213	SUM22L
P2	1.0501	C35	CC35	060A35	C35	1550	F.113	1035	S35C
P2	1.0503	C45	CC45	080M46	C45	1650	F.114	1045	S45C
P2	1.1158	St25	XC25	070M25	C25			1025	S25C
P2	1.1183	St35	XC38TS	060A35	C36	1572		1035	S35C
P2	1.1191	St45	XC42	080M46	C45	1672	C45K	1045	S45C

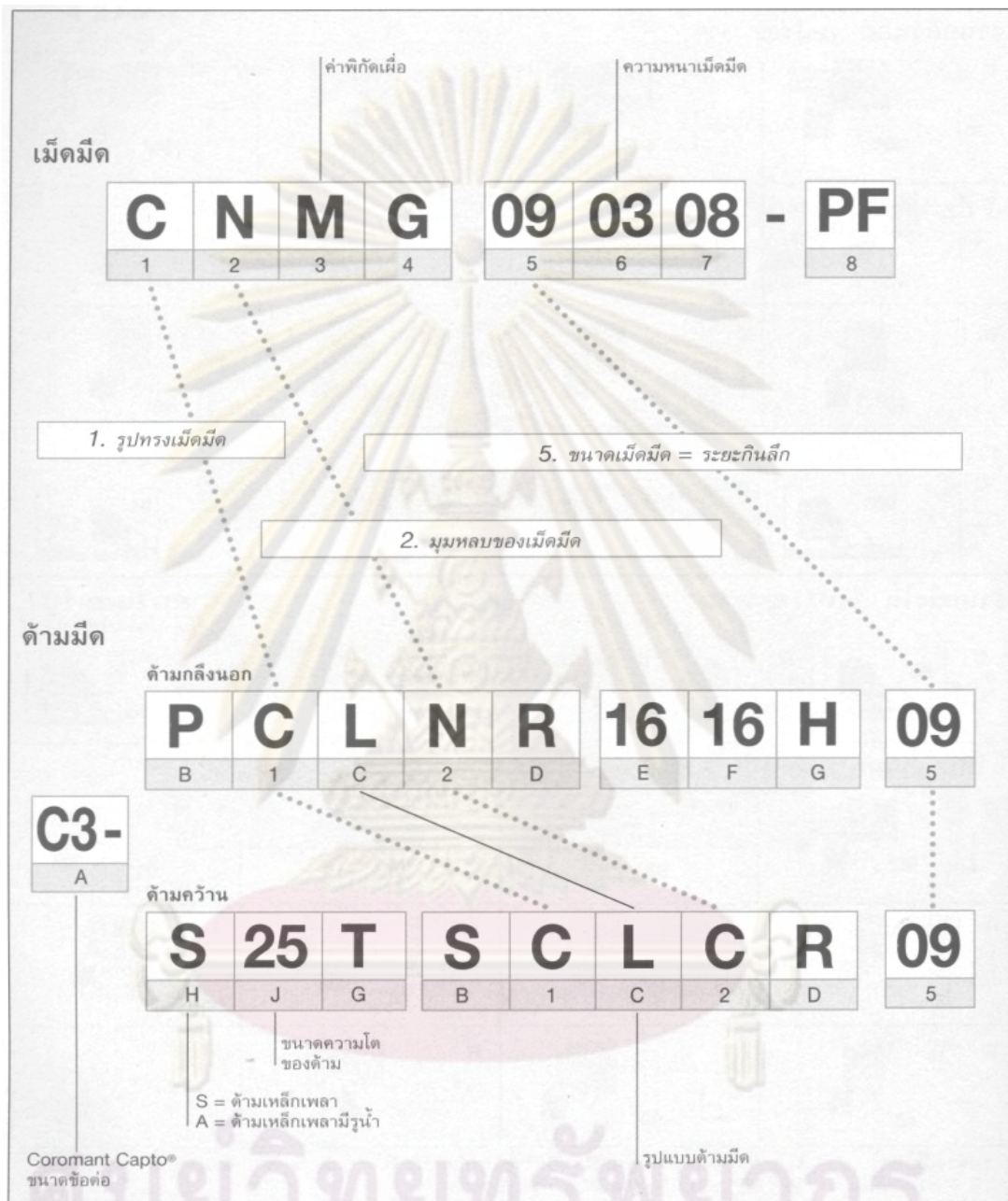
รูปที่ 2.26 แสดงมาตรฐานเหล็กเทียบเท่า [12]

รูปที่ 2.26 แสดงเกรดเหล็กมาตรฐานเหล็กเทียบเท่า เช่น เกรดเหล็กมาตรฐานของประเทศญี่ปุ่น(Japan : JIS) คือเกรดเหล็ก S45C ถ้าเทียบกับมาตรฐานเกรดเหล็กของประเทศอเมริกา(U.S.A : AISI/SAE/UNS) คือ เกรดเหล็ก 1045

Medium- and High-Carbon Steels (> 0,3% C)										
KENNA PERFECT Material Group	grade	Speed - m/min (sfm)							Starting Conditions ◊	
		135 (450)	180 (600)	225 (750)	275 (900)	320 (1050)	360 (1200)	410 (1350)	m/min	sfm
P 2	KT315								270	880
	KC9110/KC9315								250	800
	KC9125/KC9225/KC5010								200	650
	KC9040*/KC9240/KC8050								150	500

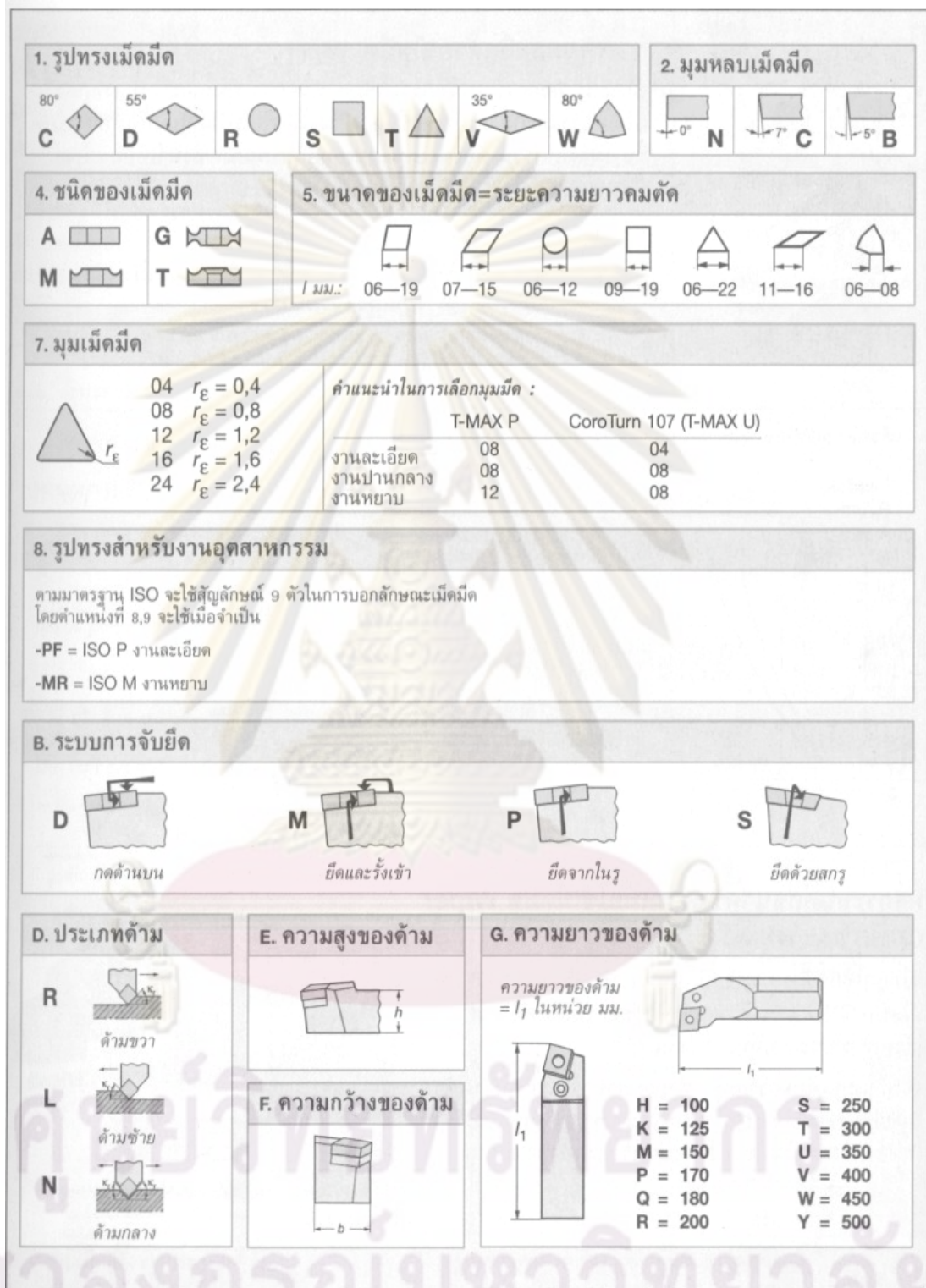
รูปที่ 2.27 แสดงตัวอย่างการเลือกใช้ ความเร็วตัด จากตารางที่ผู้ผลิตแนะนำ[12]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



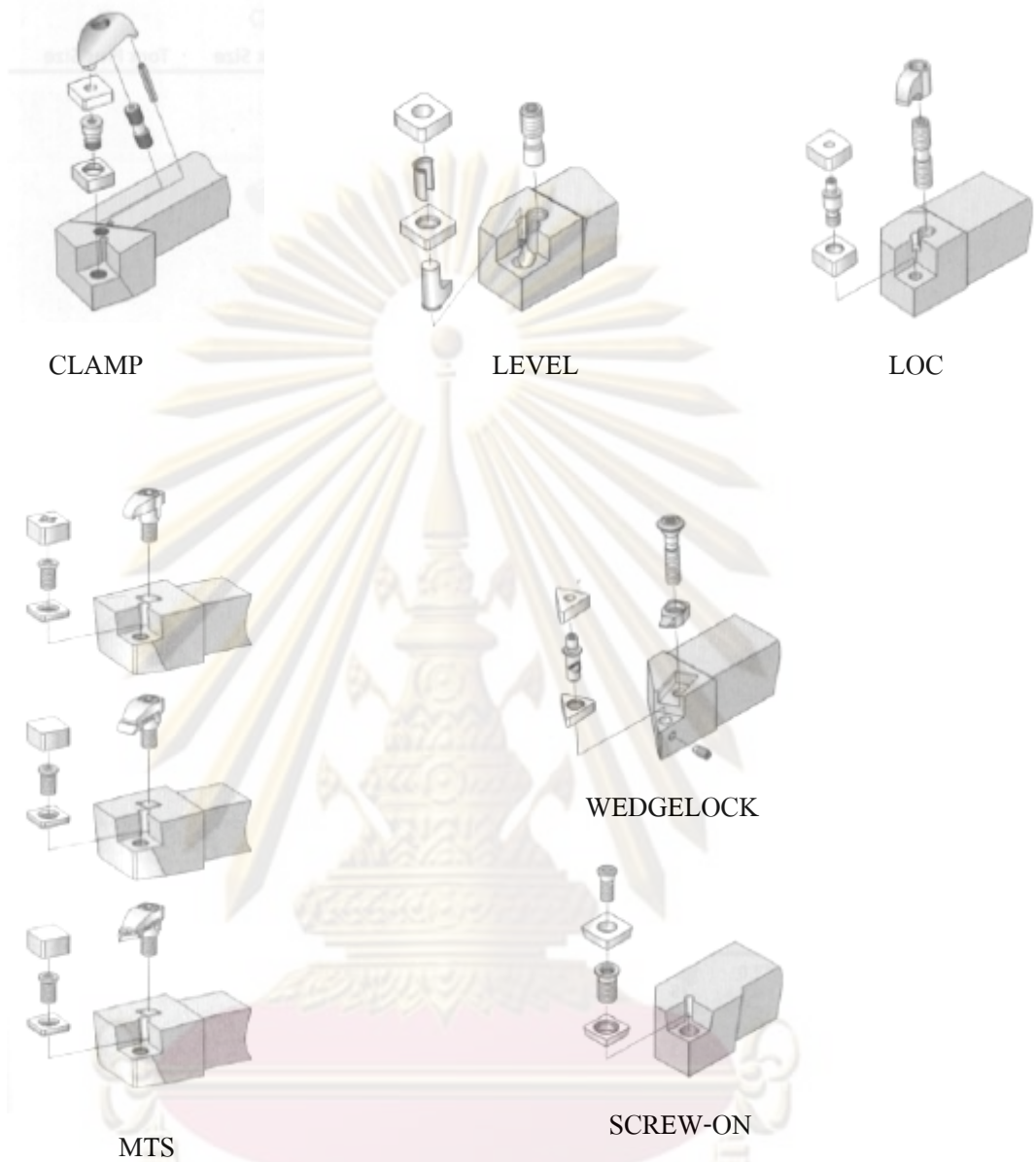
รูปที่ 2.28 แสดงรหัสมาตรฐานของอินเล็ร์ที่มีดกึ่ง และด้ามจับ (มาตรฐาน ISO 1832-1991) [13]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

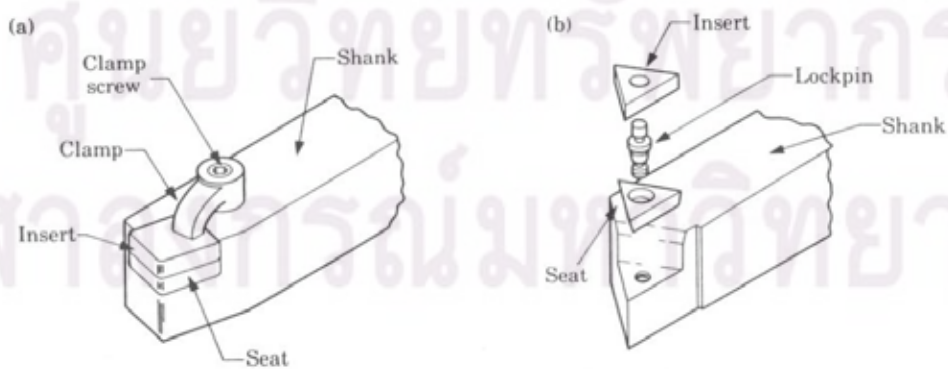


รูปที่ 2.29 แสดงคำอธิบายรหัสมาตรฐานของอินเสิร์ตมีดกลึง และด้ามจับ

(มาตรฐาน ISO 1832-1991) [13]



รูปที่ 2.30 แสดงประเภทของด้ามมีดกึ่งและอินเสิร์ท [12]



รูปที่ 2.31 แสดงส่วนประกอบของด้ามมีดกึ่งและอินเสิร์ท [12]

2.10 วัสดุที่ใช้สำหรับทำอินเสิร์ต [14]

ในงานอุตสาหกรรมสมัยใหม่เครื่องจักรกลได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงขึ้น ทำให้อัตราการผลิต และความเที่ยงตรงของขนาดชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นด้วยดังนั้นการใช้เครื่องมือตัดสมัยเก่าจึงไม่เหมาะสมกับการผลิตในปัจจุบันนี้มากนัก เพราะต้องเสียเวลาในการถอดมาปรับแต่งลับคม ซึ่งในการลับคมแต่ละครั้งก็เป็นการยากที่จะควบคุมให้ได้มุมและความคมเท่าเดิมทำให้งานที่ได้มาไม่ได้มาตรฐาน ดังนั้นมีดกลึงสำ เร็งรูปที่เป็นมาตรฐานในรูปของอินเสิร์ต(Indexable Insert) ที่ถอดเปลี่ยนง่ายและรวดเร็วจึงเข้ามาแทนที่มีดกลึงแบบเดิม

ทางด้านวัสดุที่ใช้สำหรับทำ อินเสิร์ตก็ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้มีหลายประเภทตามลักษณะการใช้งานที่เหมาะสม ในตอนแรกเริ่มจากการนำ เหล็กกลุ่มที่มีธาตุผสมสูงโดยเฉพาะ ทังสเตนและโมลิบดีนัมและธาตุโลหะตัวอื่นๆ ที่จะทำ ให้คุณสมบัติของวัสดุผสมนี้ดีขึ้นซึ่งได้แก่มีความทนทาน ต่อการสั่นสะเทือนสูงด้านทานการอ่อนตัวเนื่องจากความร้อนได้ดีรวมทั้งใช้เทคนิคการชุบแข็งอินเสิร์ตเพื่อเพิ่มความทนทาน จนต่อมาก็ได้ค้นพบวิธีการเคลือบผิวอินเสิร์ต โดยธาตุโลหะผสมบางตัวเพื่อให้สามารถทนการสึกหรอได้เพิ่มขึ้น โดยที่วัสดุต่างๆ ที่นิยมนำ มาใช้ทำ อินเสิร์ตได้แก่

1. ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cemented Carbide) ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผง มีทังสเตนคาร์ไบด์เป็นองค์ประกอบและโคบอลต์เป็นตัวประสาน คุณสมบัติมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิปกติและความแข็งแรงไม่ลดต่ำลงมากที่อุณหภูมิสูง มีความต้านทานแรงกดสูง แต่มีความต้านทานแรงดึงต่ำกว่า เหล็กกล้ามีดคาร์ไบด์เป็นที่นิยมใช้กันกว้างขวาง เพราะมีรูปร่างให้เลือกมากมาย ทั้งแบบคมตัดเดียวและหลายคมตัดมักใช้ในงานกลึง งานกัด งานปาดหน้า เป็นต้น

2. คาร์ไบด์ชนิดเคลือบ (Coated Carbide) ทำจากทังสเตนคาร์ไบด์ซึ่งมีคุณสมบัติทนทานต่อการสึกหรอ เมื่อเคลือบผิวด้วยสารประกอบเช่น ไททาเนียมคาร์ไบด์ (TiC) ไททาเนียมไนไตรด์ (TiN) หรือไดออกซิเดียมไนโตรออกไซด์ (Al_2O_3) ทำให้มีความสามารถตัดเนื้อโลหะได้มากกว่าเดิม 5 เท่าซึ่งมีทั้งชนิดที่เคลือบชั้นเดียวและหลายชั้นแต่ไม่เหมาะที่จะใช้กับงาน โลหะพินิชซึ่ง (Light Finishing) งานที่ผิวชิ้นงานขรุขระมีทรายฝังอยู่หรือผิวมีเกล็ด รวมทั้งไม่เหมาะกับการกัดหรือปลอกโลหะนอกกลุ่มเหล็กเช่นเดียวกับมีดตัดคาร์ไบด์ธรรมดา

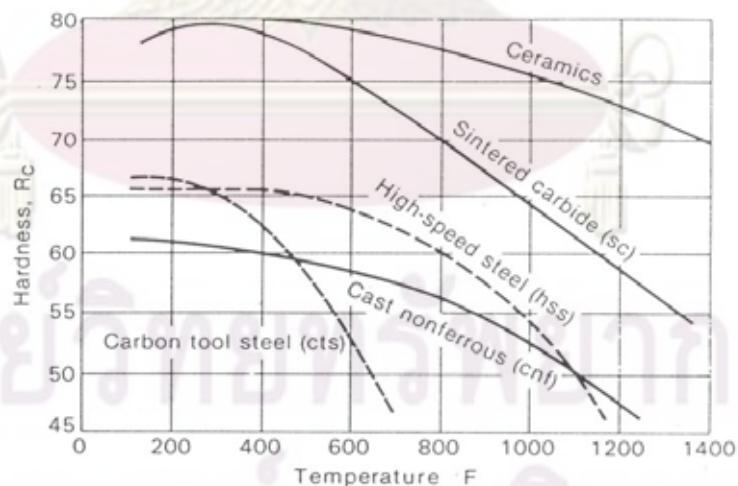
3. เซรามิก แบ่งออกเป็นสองชนิดคืออลูมินาบริสุทธิ์ (Al_2O_3) และคอมโพสิต มีความแข็งแรงสามารถปลอกเนื้อโลหะได้เร็วกว่ามีดชนิดอื่นๆ ทนความร้อนสูงจึงทำให้ยังคงแข็งแรงแม้จะใช้งานในที่อุณหภูมิสูง ทนการสึกหรอ และนำ ความร้อนต่ำ สามารถปฏิบัติงานด้วยความเร็วสูง

ติดต่อกันได้นาน และมีความเที่ยงตรงในการขึ้นรูป แต่มีความเปราะ จึงต้องระวังไม่ให้เกิดความร้อนหรือแรงกระแทกในทันทีทันใด (Thermal and Mechanical Shock)

4. ไททาเนียมคาร์ไบด์หรือเซอร์เมท (TiC, Cermet) มีไททาเนียมและคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ โดยมีนิกเกิลและโมลิบดีนัมเป็นตัวประสาน ถือเป็นคาร์ไบด์ที่มีความแข็งที่สุด มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเซรามิก ใช้สำหรับกลึงงานละเอียด ลักษณะเด่นของเซอร์เมท คือทนการสึกหรอแบบเป็นหลุม (Crater Wear) ได้ดีมาก ไม่ทำให้เกิดการเกาะตัวของเศษโลหะที่มุมมีด (Build Up Edge) ได้ง่าย และให้คุณภาพของผิวงานดีมาก

5. เพชรแบบโพลีคริสตัลไลน์ (Polycrystalline Diamond) เป็นวัสดุกลุ่มอโลหะที่มีความแข็งมากอีกประเภทหนึ่ง เหมาะสำหรับใช้ปลอกวัสดุโลหะ หรือโลหะนอกกลุ่มเหล็ก แต่ไม่เหมาะกับงานปลอกเหล็ก เพราะจะทำให้ปฏิกิริยากับเหล็กได้ในที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากมีราคาสูงจึงไม่นิยมใช้กันแพร่หลายนัก มักจะใช้กับงานปลอกกราไฟต์พลาสติก และแก้วเสริมพลาสติก

6. กิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic Boron Nitride, CBN) เป็นวัสดุแข็งมาก (Super Hard Material) ซึ่งมีเซรามิกเป็นตัวประสาน ใช้ตัดเหล็กแข็งได้ดีมาก เหมาะสำหรับใช้ในงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง จึงมักที่จะนำมาใช้ในขั้นตอนสุดท้าย (Finishing) ทำให้สามารถลดขั้นตอนการเจียรไนลงไปได้ เนื่องจากมีความแข็งมากทนการสึกหรอได้ดีมาก ทำให้ขนาดและผิวที่ออกมาแน่นอนและสวยงาม สามารถใช้ความเร็วตัดได้สูงกว่าทั้งสแตนคาร์ไบด์หลายเท่า

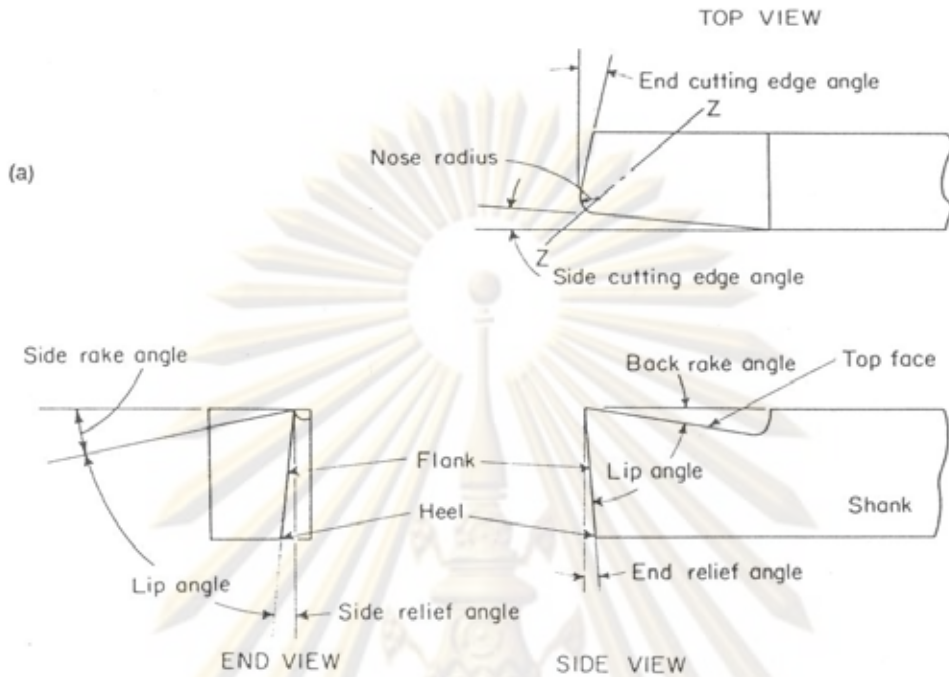


รูปที่ 2.32 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความแข็งของวัสดุที่นำมาทำ เครื่องมือตัด [14]

2.11 กำหนดชื่อเรียกเครื่องมือตัด

ส่วนประกอบของเครื่องมือแสดงในรูป และถูกให้คำจำกัดความดังต่อไปนี้

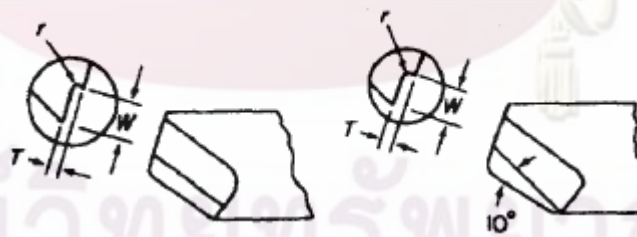
1. ขนาด ของเครื่องมือถูกให้โดยการเสนอว่าความกว้างของเครื่องมือในหน่วยนิ้ว (W) ความสูง (H) และความยาวทั้งหมด (L) ดังนั้น $\frac{3}{4} W \times \frac{1}{2} H \times 6 L$
2. ด้ามจับ คือส่วนหนึ่งของเครื่องมือที่ถูกจับในที่จับ มันคือส่วนของเครื่องมือที่สำคัญ
3. ฐาน คือส่วนล่างของด้ามจับ ที่จะเกิดแรงต้านจากการตัดเฉือน
4. ความสูงคมตัด คือส่วนหน้าของช่องว่างด้านหน้าของเครื่องมือตัดกับส่วนฐานและด้านข้าง
5. ผิวหน้า คือผิวหน้าของเครื่องมือที่เสียดจะเคลื่อนที่ผ่านและถูกแยกออกจากงานบางครั้งพื้นที่สันและมนที่บริเวณคมตัดของผิวหน้า มุมหลบของผิวหน้าอาจมากกว่าพื้นที่ของมุมหลบบน บางครั้งมุมหลบบนจะเป็นค่าลบ (-4 องศา) และมุมหลบหน้า คือ (15 องศา) ในกรณีนี้มุมควรอยู่ที่ -4 ที่เสนอ 15 องศา
6. คมตัด ของเครื่องมือตัดคือทุกส่วนของเครื่องมือที่มีความคมและมีคมตัดที่ขอบและที่ใต้ของคมตัดผิวหน้า
7. ขอบคมตัด คือขอบของผิวหน้าที่ทำให้เกิดเศษคมตัดจากชิ้นงานมันจะประกอบด้วยด้านของขอบคมตัด จมูก และปลายของคมตัด
8. จมูก คือมุมหรือส่วนโค้ง หรือลบมุม ที่ซึ่งมีการต่อกันระหว่าง ด้านของการตัดและปลายของคมตัด
9. ผิวด้านข้างของเครื่องมือ คือผิวใต้ของคมตัด
10. คอ คือด้านหน้าตัดที่เล็กของด้ามจับด้านหลังคมตัดเครื่องมือคว้านจะมีหน้าที่ตัดที่เล็กลงหลังจากพื้นที่คมตัด
11. มุมของเครื่องมือตัด แสดงในรูป กำหนดโดยสมาคมมาตรฐานแห่งชาติชาวอเมริกันรัศมีปลายคมตัด



รูปที่ 2.33 แสดงส่วนประกอบของเครื่องมือตัด [14]

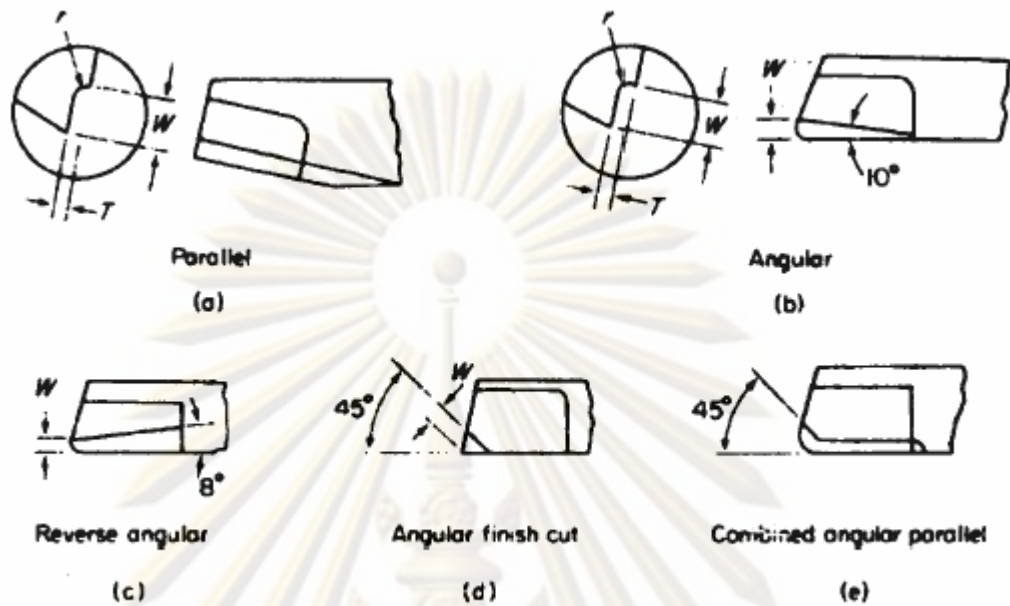
2.12 อุปกรณ์หักเศษตัดและการเกิดเศษตัด

ยิ่งกว่านั้นการควบคุมการไหลของเศษตัดโดยการเอียงและมุมในการตัด เป็นไปได้ที่จะใช้สำหรับการหักเศษตัด นี่คือการเจียรไนให้เป็นรูปร่างในส่วนของด้านหน้าของเครื่องมือตัดหรือการผูกชิ้นงานเหล็กกล้า



รูปที่ 2.34 แสดงอุปกรณ์หักเศษตัดโดยการเอียงและมุมในการตัด [5]

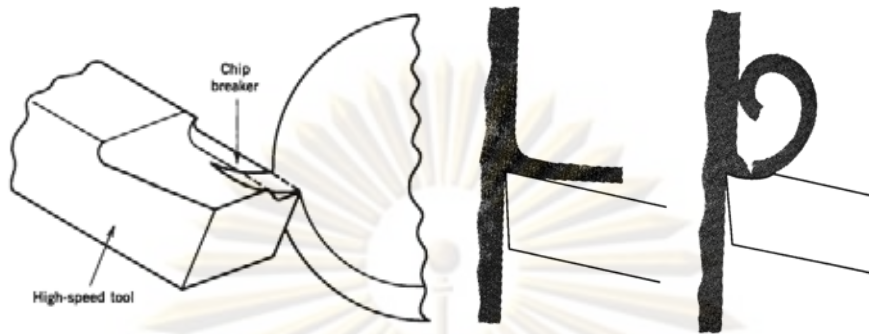
การป้อนตัดคือส่วนประกอบหนึ่งเดียวที่สำคัญที่สุดในการกำหนดผลภายหลังการหักของเศษตัด ถ้าการป้อนตัดเพิ่มขึ้นแรงที่ใช้ในการหักเศษก็จะมากและเมื่อการป้อนตัดลดลงแรงในการหักเศษก็น้อยลง รัศมี R จะทำให้เกิดการกระทำความแข็งแรงในการหักเศษตัด ประสิทธิภาพมากของการหักเศษตัดขึ้นอยู่กับป้อนตัดและรัศมีของการเคลื่อนที่ของเศษตัด ในท้ายที่สุดในการป้อนตัดที่แตกต่างกัน ตัวหักเศษตัดแบบต่างๆ สามารถทำขึ้นมาเพื่อให้ได้เศษตัดแตกต่างกัน



รูปที่ 2.35 แสดงรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัด [5]

การเกิดเศษตัด รูปแบบของการเกิดเศษตัดเป็นผลมาจากรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือ อัตราป้อนตัด ความเร็วตัด วัสดุที่ทำเครื่องมือ สาเหตุเหล่านี้โดยรวมอยู่ในตัวของการทำงานเองหรือรวมกัน อาจมีผลจากแรงม้าที่ต้องการ กำลังในการตัด อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด การสึกหรอของเครื่องมือ การเกิดความร้อนและเสถียรภาพของขนาดชิ้นงานถูกกำหนดไว้อย่างง่าย เครื่องมือตัดต้องมีความแข็งแรงกว่าชิ้นงานในขณะที่เกิดทำการตัดเฉือน มีการต่อต้านการตัดและมีการเคลื่อนที่เครื่องมืออย่างแน่นอน โดยเฉพาะชิ้นงาน

มีรูปแบบเศษตัดที่เป็นพื้นฐานอยู่ 3 แบบ อย่างต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่องและแบบยึดติด แสดงเศษตัดแบบอย่างต่อเนื่องในรูป a เมื่อทำการตัดโลหะเหนียวเศษตัดเปลี่ยนรูปร่างอย่างรุนแรง เพราะว่าการกระทำของการตัด การก่อ การเกิดระนาบเลื่อน ความต้านทานของการเลื่อนไถลจะเพิ่มขึ้นในส่วนของการลาดชัน ทำให้ส่วนนี้เรียกว่าความแข็งแรงของงานรูปแบบต่อเนื่องของระนาบเลื่อนใหม่และส่งผลไปสู่ระนาบเลื่อนซึ่งเป็นผลทำให้ชิ้นงานเกิดความแข็งแรงขึ้น เศษตัดทำให้งานแข็งแรงและเพราะว่าเกิดจากระนาบเลื่อนจะส่งผลให้เศษตัดสั้นกว่าความยาวของวัตถุดิบเมื่อมันถูกทำให้เกิดเศษตัดจากวัตถุดิบพื้นฐาน นอกจากนี้เศษตัดจะเปราะกว่าวัตถุชิ้นงานเริ่มแรกเนื่องจากมันทำให้ชิ้นงานเกิดความแข็งแรง อย่างไรก็ตามปริมาณของวัตถุดิบที่ถูกเอาออกงานของเศษตัดจะยังคงดำรงอยู่เช่นเดิมเหมือนกัน ดังนั้นตั้งแต่ความยาวของเศษตัดสั้น และถ้าความกว้างเปลี่ยนไป ความหนาต้องขยายออกเพื่อคงปริมาณเนื้อวัสดุไว้ภายหลังจากการตัด



รูปที่ 2.36 แสดงอุปกรณ์หักเศษตัดและแสดงลักษณะการเกิดเศษตัด [15]



รูปที่ 2.37 แสดงเศษหักที่ม้วนยาวและเศษหักที่สั้น [15]

2.13 การสึกหรอของเครื่องมือตัด [14]

การทำงานของเครื่องมือตัดที่ไม่สมบูรณ์จะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น ส่วนใหญ่แล้วเป็นผลเนื่องมาจากการสึกหรอของคมมีดตัด ซึ่งเมื่อคมตัดสึกหรอถึงจุดหนึ่งแทนที่จะทำให้เกิดการตัดวัสดุขึ้นกลับกลายเป็นว่าจะเกิดการขัดถูกันระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัดเท่านั้นเอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้แรงในการทำงานเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เกิดความร้อนและอุณหภูมิสูงขึ้นตามมา ชิ้นงานที่ได้จึงมีคุณภาพต่ำทั้งผิวของชิ้นงานขนาดและความเรียบผิว

การสึกหรอของเครื่องมือตัดเป็นปรากฏการณ์ที่มีความละเอียดซับซ้อนเป็นผลอันเนื่องมาจากหลายปัจจัย ได้แก่

1. การสึกหรอเนื่องมาจากการเสียดสี (Abrasion Wear) เมื่อการเศษโลหะ (Chip) ขึ้นระหว่างที่โลหะสองชนิดกำลังขัดสีกันอยู่ เศษโลหะนั้นบางส่วนจะเคลื่อนที่ผ่านมีดถึงและเกิดการ

เสียดสีขึ้นระหว่างเศษโลหะและเม็ดคอลลอยด์ ถึงแม้ว่าแรงที่เกิดขึ้นในการเสียดสีจะมีไม่มากแต่ก็ทำให้เกิดการเสียดรูปร่างแบบพลาสติกได้ (Plastic Deformation) ทำให้เม็ดคอลลอยด์เกิดการสึกหรอขึ้น

2. การสึกหรอเนื่องมาจากการเกาะติด (Adhesion Wear) เมื่อเกิดการขัดสีกันระหว่างโลหะสองชนิดเข้าไปซึ้เข้ามบนผิวสัมผัสเดิมในกรณีที่มีแรงมากกระทำ สูงมากพอ จะทำให้โลหะที่อ่อนกว่าส่วนหนึ่งเกิดการหลอมละลายไปติดกับโลหะที่แข็งกว่าซึ่งในที่นี้ก็คือเม็ดคอลลอยด์ ทำให้โลหะที่แข็งกว่าเกิดเป็นปุ่มนูนขึ้น ซึ่งปุ่มนูนนั้นจะหลุดออกไปเพราะเกิดแรงกระแทกขึ้นบริเวณปุ่มนูนในระหว่างที่โลหะทั้งสองทำการขัดสีกันต่อ ทำให้ผิวหน้าเดิมของโลหะที่แข็งกว่าเกิดรอยฉีกขึ้นเป็นผลให้โลหะที่แข็งกว่าเกิดการสึกกร่อน

3. การสึกหรอเนื่องมาจากการแพร่ (Diffusion Wear) เกิดจากการแพร่ของอะตอมที่ผิวหน้าของโลหะที่เกิดการขัดสีกัน การแพร่จะเกิดได้มากขึ้นเมื่อบริเวณที่เกิดการสัมผัสมีอุณหภูมิสูงและมีความเร็วต่ำ เมื่ออะตอมของธาตุบางอย่างในเม็ดคอลลอยด์แพร่ออกไป จึงทำให้คุณสมบัติของเม็ดคอลลอยด์เปลี่ยนแปลงไป อาจทำให้เม็ดคอลลอยด์มีความแข็งแรงลดลง และในทางกลับกันบางทีอะตอมที่แพร่ออกไปนั้นทำให้วัสดุชิ้นงานที่คอลลอยด์อยู่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น จึงทำให้เม็ดคอลลอยด์เกิดการสึกหรอขึ้น

4. ปัจจัยอื่นๆ เช่น ความล้า (Fatigue) การสึกหรอเนื่องมาจากการกัดเซาะ (Erosive Wear) เมื่อทำการตัดโดยมีของเหลวเป็นส่วนประกอบ การสึกหรอเนื่องมาจากการกัดกร่อน (Corrosive Wear) เป็นผลมาจากปฏิกิริยาเคมีที่ผิวสัมผัส การสึกหรอเนื่องมาจากการแตกหัก (Fracture Wear) เมื่อเกิดเศษโลหะขึ้นที่ผิวหน้าของวัสดุเพราะ

2.14 การเสียหายของเครื่องมือ [5]

การเสียหายของเครื่องมือน่าจะเกิดเพราะว่าโครงสร้างของที่จับใบมีด ที่จับงานเครื่องจักร หรือความต้องการในการผลิต อาจจะทำให้เกิดความเสียหายจากรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัดหรือน่าจะเกิดจากการสึกหรอของเครื่องมือ ความเสียหายอาจจะเกิดในช่วงเวลาที่เครื่องมือหยุดการผลิต ชิ้นงานที่ตามความต้องการของแบบพิมพ์

ข้อบกพร่องจากโครงสร้างของเครื่องมือตัด ถ้าเครื่องมือตัดเสียหายเป็นผลมาจากข้อบกพร่องจากโครงสร้าง ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่มั่นคงแข็งแรงของตัดจับเครื่องมือ อุปกรณ์จับยึดเครื่องจักร หรือชิ้นงาน ภายใต้เงื่อนไขไม่ดีเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการแตกหัก ภายใต้เงื่อนไขเหมาะสม ถ้าควบคุมไม่ได้การสะเทือน (รอย) คงจะเกิดผิวที่ไม่ดีและทำให้ขนาดรูเปลี่ยนแปลงไป การเพิ่มปริมาณของอุปกรณ์จับยึดหรือการรับรองเครื่องมือตัดจะช่วยลดการสั่นสะเทือนได้

ลักษณะปัญหา	สาเหตุ	แนวทางการแก้ไข
 <p>รอยแตกร้าวเนื่องจากอุณหภูมิ-รอยแตกร้าวที่ตั้งฉากกับขอบคมตัดทำให้เกิดการสัดที่ขอบมีด และผิวของขอบไม่ดี</p>	<p>-รอยแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสาเหตุจาก</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.การหยุดเป็นช่วงๆ 2.การเปลี่ยนสารหล่อเย็นหลายๆแบบ 	<p>-เลือกเม็ดมีดที่เหนียวขึ้นและทนต่อความร้อนที่สูงขึ้น</p>
 <p>เม็ดมีดแตก อันตรายไม่ได้เกิดเฉพาะเม็ดมีดแต่ จะเกิดขึ้นกับ แผ่นรองและชิ้นงานด้วย</p>	<p>-เกรดเม็ดมีดแตกง่าย</p> <p>-มีภาระที่มากเกินไปบนเม็ดมีด</p> <p>-รูปทรงเม็ดมีดไม่เหมาะสม</p> <p>-ขนาดเม็ดมีดเล็กเกินไป</p>	<p>-เลือกเกรดเม็ดมีดที่เหนียว</p> <p>-ลดอัตราการป้อนหรือระยะลึกลง</p> <p>-เลือกรูปทรงเม็ดมีดที่แข็งแรงขึ้น</p> <p>-เลือกเม็ดมีดที่หนาหรือใหญ่กว่า</p>
 <p>การแตกร้าวเป็นแผ่นบาง-เม็ดมีดเซรามิก</p>	<p>-แรงกระทำมากเกินไป</p>	<p>-ลดอัตราการป้อนลง</p> <p>-เลือกเกรดเม็ดมีดที่เหนียวขึ้น</p> <p>-เลือกเม็ดมีดที่มีมุมตัดต่ำกว่า (Small Chamfer)</p>

ลักษณะปัญหา	สาเหตุ	แนวทางการแก้ไข
 <p>Built-up edge (B.U.E.)</p> <p>เศษพอกติดปลายมีด-ทำให้ผิวงานไม่สวยและเกิดรอยลึกที่ขอบคมตัดเมื่อเศษพอกที่ปลายมีดถูกกำจัดออก</p>	<p>-ชิ้นงานถูกเชื่อมติดกับเม็ดมีดเนื่องจาก</p> <p>-ความเร็วตัดต่ำ</p> <p>-ใช้รูปทรงค่าลบ (Negative Cutting Geometry)</p>	<p>-เพิ่มความเร็วตัด</p> <p>-เลือกรูปทรงที่เป็นค่าบวก (Positive Geometry)</p>
 <p>Chip hammering</p> <p>ส่วนของขอบตัดถูกทำให้เสียหายโดยเศษตัดรบกวน ทั้งตัวยึดเม็ดมีดก็จะเสียหายด้วย</p>	<p>-เศษตัดโค้งงอชนกับขอบตัด</p>	<p>-เปลี่ยนอัตราป้อนตัด</p> <p>-เลือกรูปทรงเม็ดมีดอื่น</p>
 <p>Frittering</p> <p>การสึกที่ขอบมีด-การแตกเล็กน้อยที่ขอบทำให้ผิวงานไม่สวยและเกิดการสึกหรอที่รวดเร็ว</p>	<p>-เกรดเม็ดมีดเปราะแตกง่ายเกินไป</p> <p>-รูปทรงเม็ดมีดไม่ดี</p> <p>-เศษพอกติดปลายมีด</p>	<p>-เลือกเกรดเม็ดมีดที่เหนียวขึ้น</p> <p>-เลือกเม็ดมีดที่มีรูปทรงแข็งแรงขึ้น (หรือมุมตัดที่ใหญ่ขึ้นสำหรับเม็ดมีดเซรามิก)</p> <p>-เพิ่มความเร็วตัดหรือเลือกรูปทรงที่เป็นบวก</p>

ตารางที่ 2.5 แสดงการจำแนกชนิดของการสึกหรอที่แนะนำจากผู้ผลิต [13]

	ลดความเร็วตัด	เพิ่มความเร็วตัด	ลดอัตราการป้อน	เพิ่มอัตราการป้อน	ลดระยะกินลึก	เพิ่มระยะกินลึก	เลือกเกรดของเม็ดมีดที่ทนต่อการเสียด	เลือกเกรดของเม็ดมีดที่มีความเหนียว	เลือกมุมเม็ดมีดที่เล็กลง	ลดความเร็วตัด
ขอบสี	X						X			
รอยบาก	X						X			
รอยสีที่เนินหลุมบนใบมีด	X		X				X			X
การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง	X		X				X			
เศษพอกติดบนปลายมีด		X								X
รอยร้าวบนเม็ดมีด								X		
มุมตัดแตก (frittering)		X						X		X
เม็ดมีดแตก			X		X			X		
เศษขาม้วนตัว				X		X			X	
สันสะท้อน	X			X	X				X	X

ตารางที่ 2.6 แสดงวิธีการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นของงานกลึงซึ่งแนะนำจากผู้ผลิต [13]

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.15 อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด [5]

ความสามารถในการตัดเฉือน อ่างอิงอย่างง่าย ซึ่งจะแตกต่างกันตามชนิดของวัสดุที่อาจถูกตัดเฉือน เมื่อดูความสัมพันธ์ของเหล็ก AISI B112 ริดเย็น หรือดิ่งเย็น เหล็กกล้าและเมื่อทำการตัดเฉือนด้วยเครื่องมือตัดที่เป็นเหล็กกล้ารอบสูง อัตราการตัดที่เกิดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้ววัสดุจะมีอัตราความสามารถในการตัดเฉือนอยู่ประมาณ 50% เมื่อทำการตัดเฉือน เมื่อต้องการทำการตัดเฉือนที่ความเร็วตัดรวดเร็ว รอบครั้งในวัสดุเดียวกันจะอยู่ในอัตรา 100 % ที่จะรักษาอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดไว้ได้

2.16 การควบคุมลักษณะการทำงานในการตัดโลหะ

ในการใช้เครื่องจักรกลและวัตถุดิบในงานตัดโลหะให้เกิดประโยชน์สูงสุด จึงควรที่จะต้องมีการวางแผนการทำงานขึ้นมาเสียก่อน จากการศึกษาถึงการตัดโลหะสามารถจำแนกสิ่งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตัดออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกคือปัจจัยในเรื่องของลักษณะการทำงาน (Process Performance Parameters) กลุ่มที่สองคือตัวแปรของการตัด (Cutting Variables) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.16.1 ปัจจัยในเรื่องของลักษณะการทำงาน ค่าปัจจัยต่างๆ ที่จะบ่งบอกถึงคุณภาพหรือความสามารถในการผลิต ได้แก่

1. แรงในการตัด
2. ความเรียบของพื้นผิวสำเร็จ ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเที่ยงตรง (Accuracy) และขนาดความผิดพลาดที่ยอมรับได้ (Tolerance)
3. อายุการใช้งานของเครื่องมือตัด
4. อุณหภูมิของใบมีดและชิ้นงาน
5. ค่าดัชนีทางเศรษฐศาสตร์ ซึ่งประกอบด้วย อัตราการผลิตต่อหน่วยเวลา ต้นทุนการผลิตต่อชิ้น และอัตรากำไรต่อหน่วยเวลา

2.16.2 ตัวแปรในการตัด (Cutting Variables) ปัจจัยต่างๆ ที่อยู่ภายใต้สภาวะการตัดโลหะที่สามารถควบคุมได้ ได้แก่

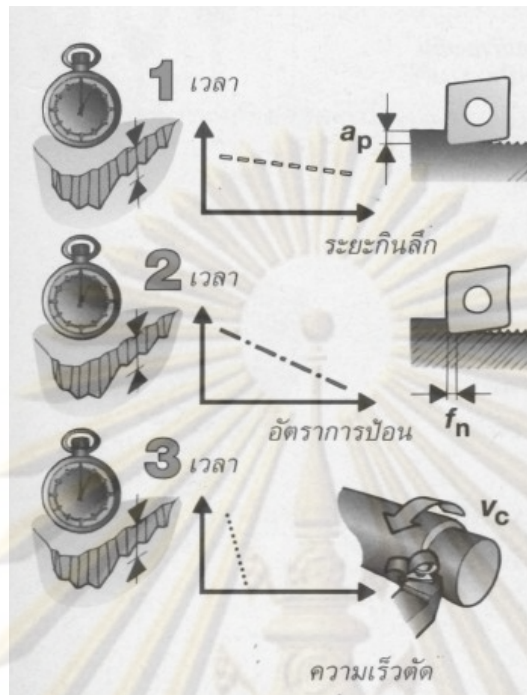
1. คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นชิ้นงาน
2. คุณสมบัติของวัสดุที่เป็นเครื่องมือตัด
3. ลักษณะทางเรขาคณิตของเครื่องมือตัด
4. ความเร็วในการตัด

5. อัตราการป้อนตัด
6. ระยะเวลาของการตัด
7. น้ำยาหล่อเย็นและอัตราการฉีด
8. สภาพของเครื่องจักรกล

2.16.3 ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการกระบวนการกลึงวัสดุ

ตัวแปรที่มีผลต่อการกลึงวัสดุ ใช้ควบคุมคุณสมบัติด้านอื่นๆ เช่น อายุการใช้งานมีดตัวแปรที่มีผลต่อการกลึงวัสดุ ใช้ควบคุมคุณสมบัติด้านอื่นๆ เช่น อายุการใช้งานมีดกลึงคุณภาพผิวของชิ้นงาน แรงที่ใช้ในการกลึง เวลาที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ประกอบด้วย

1. ความเร็วตัด (Cutting Speed) หมายถึงความยาวของเนื้อโลหะชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือนผ่านปลายคมตัด ในระยะเวลาที่กำหนด โดยทั่วไปมักกำหนดให้อยู่ในหน่วยเมตรต่อวินาที หรือ เมตรต่อนาที
2. อัตราป้อน (Feed Rate) หมายถึงระยะทางที่เครื่องมือตัดเคลื่อนไปตามความยาวของชิ้นงานในแต่ละรอบการหมุนของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อรอบ
3. ความลึกในการตัด (Depth of Cut) หมายถึงความหนาของวัสดุที่ถูกเฉือนออกมาจากชิ้นงานวัดในทิศทางของรัศมีชิ้นงาน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของชิ้นงานจะลดลงเป็นสองเท่าของความลึกในการตัด มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร



รูปที่ 2.38 แสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ เทียบกับเวลา [13]

ตัวแปรทั้งสามที่กล่าวมาแล้วนั้นมีความสัมพันธ์กันในการทำงาน กล่าวคือถ้าต้องการงานในลักษณะหยาบๆ จะใช้อัตราป้อนที่สูง ความลึกในการตัดมาก ในขณะที่ความเร็วในการตัดต่ำ ส่วนในงานที่ต้องการความละเอียดจะใช้อัตราป้อนต่ำ ความลึกในการตัดน้อยความเร็วในการตัดสูง

2.17 การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม [16]

หลักการพื้นฐาน

ถ้าต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด เราจะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง คำว่า “การวางแผนการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่เราสนใจนั้นเกี่ยวข้องกับ ความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่ง

ศาสตร์ทั้งสองมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เพลลิเคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และ บล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้เรากำหนดให้ว่าเพลลิเคชัน หมายถึงการทดลองซ้ำ เพลลิเคชัน มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเพลลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ย (ตัวอย่างเช่น y) ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเพลลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้นี้ ตัวอย่างเช่น ถ้า σ^2 คือความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละตัว และมี n เพลลิเคต ดังนั้นค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของตัวอย่างนี้คือ

$$\sigma_y^2 = \sigma_n^2 \quad (2-14)$$

แรนดอมไมเซชัน เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง แรนดอมไมเซชัน หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การที่เราแรนดอมไมซ์การทดลอง ทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

บล็อกกิง เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิง

หลักการพื้นฐานทั้งสามที่กล่าวมานี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการทดลองทุกๆชนิด ดังนั้นเราอาจจะต้องกล่าวถึงหลักการทั้งสามนี้บ่อยครั้ง เพื่อเป็นการแสดงและเน้นให้ประโยชน์ของหลักการดังกล่าว

2.17.1 แนวทางในออกแบบการทดลอง

1. เลือกปัจจัยและระดับของปัจจัยการเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัยเพื่อนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง โดยต้องพิจารณาด้วยว่า จะสามารถควบคุมระดับของปัจจัยที่กำหนดได้อย่างไรและจะสามารถวัดผลได้อย่างไร และจำเป็นต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดมานั้นมีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ การกรองปัจจัย (Screening) ควรกำหนดระดับต่างๆที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ และเลือกขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงให้มีความกว้างมากๆ แผนการออกแบบการทดลองที่นิยมใช้ในกรณีนี้คือ 2^k แฟรคชันนัลแฟคตอเรียล (Two-Level Fractional Factorial Designs) ซึ่งเป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อผลตอบสนอง (Screening Experiment) ซึ่งจะเป็นการลดความเสี่ยงในเรื่องความผิดพลาดในการทดลองเบื้องต้นเพื่อกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อผลตอบสนอง และเมื่อทราบว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด จึงลดขอบเขตให้แคบ

2. การเลือกตัวแปรตอบสนอง นอกจากตัวแปรอิสระที่ต้องพิจารณาแล้ว ตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนองยังต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระหรือปัจจัย ตัวแปรตอบสนองสามารถมีได้มากกว่าหนึ่งตัวโดยแต่ละตัวจะต้องมีความเป็นอิสระต่อกัน

3. การเลือกการออกแบบการทดลอง (Select Design) สิ่งที่ต้องพิจารณาคือ การกำหนดขนาดตัวอย่าง ซึ่งจำนวนซ้ำจะต้องทำอย่างเป็นอิสระต่อกัน ประโยชน์ของการทำซ้ำคือทำให้รู้ค่าประมาณที่เกิดความผิดพลาดจากการทดลองเป็นผลให้ผู้ทำการทดลองใช้เป็นเครื่องมือในการสรุปผลความแตกต่างในเชิงสถิติได้ การเลือกการออกแบบการทดลองจำเป็นต้องคำนึงถึงหลักการเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง นั่นคือ

การจัดกลุ่ม (Blocking)

การสุ่มตัวอย่าง (Randomization)

การกำหนดขนาดตัวอย่าง (Sample Size or Number of Replicates)

การเลือกการออกแบบการทดลองขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนอง เช่น ถ้าจำนวนปัจจัยเป็นหนึ่ง การออกแบบการทดลองที่ใช้คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนที่เป็นทางเดียว (One Way Analysis of Variance) ถ้าจำนวนของปัจจัยมีมากกว่าหนึ่งแต่ไม่เกินห้า ควรใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคตอเรียล (Factorial Design) หรือถ้าจำนวนปัจจัยมีมากกว่าห้า ควรใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟรคชันนัลแฟคตอเรียล (Fractional Factorial Design) เป็นต้น

4. การทำการทดลอง (Perform Experiment) เมื่อเริ่มทำการทดลองควรพิจารณาถึงเหตุการณ์การทดลองอย่างระมัดระวังเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องแม่นยำ ถ้าเป็นไปได้

ควรมีการศึกษาในห้องปฏิบัติการต้นแบบ (Pilot Plant) ซึ่งจะให้ข้อมูลด้านวัสดุการทดลอง ระบบการวัดการทดลอง และเป็นการลดความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นขณะทำการทดลอง

5. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of the Data) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้สามารถทำการวิเคราะห์ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป เช่น Design Expert, SAS, Minitab, SPSS เป็นต้น

6. การสรุปผลการทดลองและเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations) หลังจากทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว ผู้ทำการทดลองควรสรุปผลการทดลองและสามารถนำผลไปทำการปรับปรุงหรือเสนอแนะในการทดลองครั้งต่อไปได้ ผู้ทำการทดลองควรมีวิธีเสนอผลสรุปโดยใช้กราฟเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ นอกจากนี้การทำการทดลองเพื่อยืนยันผล ควรทำขึ้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

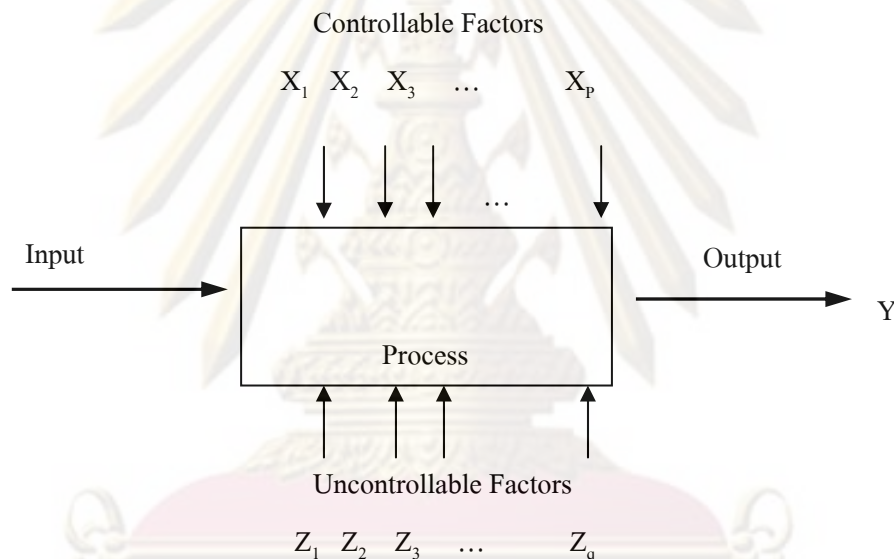
7. สรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เรานำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นด้วย

2.17.2 หลักการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าเราสามารถหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองก็คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ โดยจะพบว่าในงานวิจัยต่าง ๆ การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) นั้นจะช่วยให้ผู้วิจัยสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับปัญหา ซึ่งจะนำไปสู่การหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาต่อไป

กระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการและทรัพยากรอื่นๆเข้าด้วยกัน เมื่อมีสิ่งป้อนเข้า (Input) เข้าสู่กระบวนการจะถูกเปลี่ยนเป็นผลลัพธ์ที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่ง หรือมากกว่านอกจากนี้ในกระบวนการยังประกอบด้วยปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ (Controllable Factor) และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor)

ระบบการออกแบบการทดลองทั่วไปจะประกอบด้วยทำให้ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลองแก่กระบวนการทดลองนั้นๆ และจะได้ผลผลิตออกมา ทรัพยากรที่จำเป็นในการทดลองเป็นปัจจัยที่มีผลต่อผลผลิตที่ได้ ซึ่งมีความจำเป็นที่ต้องควบคุมให้ได้ในระดับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือยากต่อการควบคุมยังมีผลรบกวนต่อระบบการทดลองซึ่งเป็นผลให้ได้ผลผลิตออกมามีความคลาดเคลื่อน



รูป 2.39 รูปแบบระบบการทดลองทั่วไป[17]

2.17.3 วัตถุประสงค์ของการทดลอง

1. หาดัชนีแปรที่มีผลมากที่สุดต่อค่าตอบสนอง y
2. กำหนดค่าของ x ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y เพื่อให้ค่า y อยู่ในค่าที่ต้องการ
3. กำหนดค่าของ x ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y เพื่อให้ค่า y มีค่าน้อย
4. กำหนดค่าของ x ที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y เพื่อให้ค่า y ให้ผลตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

2.17.4 หลักสำคัญในการวางแผนการทดลอง มีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน ดังนี้

1. การทำซ้ำ (Replication) หมายถึง การที่ทริทเมนต์หนึ่งๆ ปรากฏในหน่วยทดลองมากกว่า 1 ครั้ง เพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงและแน่นอนของการทดลอง ทำให้สามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้ และทำให้สรุปผลการทดลองได้กว้างขึ้น

2. การสุ่ม (Randomization) หมายถึง การจัดทริทเมนต์ให้แก่หน่วยทดลอง โดยมีหลักว่า แต่ละหน่วยทดลองมีโอกาสเท่าๆ กัน ที่จะได้รับทริทเมนต์ใดก็ได้

3. การบล็อก (Blocking) คือ การควบคุมความคลาดเคลื่อนโดยการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลหน่วยการทดลอง ซึ่งจะช่วยให้ทราบแหล่งความแปรปรวน แล้วแยกออกเพื่อให้เหลือเฉพาะความคลาดเคลื่อนของการทดลองที่แท้จริง

2.17.5 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง [16]

การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design)

การออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวจะต้องเก็บข้อมูลโดยระดับของปัจจัย เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆ มีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

1.1 การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD)

เป็นแผนการทดลองที่ง่ายที่สุด โดยที่สิ่งทดลองถูกสุ่มจัดลงในหน่วยการทดลอง เป็นแผนที่มีประสิทธิภาพดีถ้าหน่วยของการทดลองมีความสม่ำเสมอ และประยุกต์ใช้ในงานพัฒนาสูตร การพัฒนากรรมวิธีการผลิต การศึกษาอายุการเก็บ การทดสอบทางประสาทสัมผัส การสุ่มไม่จำเป็นต้องทำซ้ำเท่ากัน แต่เพื่อความสะดวกนิยมใช้เท่ากัน การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว โดยที่ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากสิ่งทดลองเท่านั้น

ข้อดีของการวางแผนแบบ CRD

1. คำนวณง่ายไม่สลับซับซ้อน
2. วางแผนการทดลองง่าย
3. ความแม่นยำสูงกว่าวิธีการอื่นๆ เพราะความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน (mean square error) มีขนาดใหญ่

4. จำนวนครั้งหรือซ้ำ ที่เก็บข้อมูลของตัวแปร ค่าไม่จำเป็นต้องเท่ากัน

ข้อเสียของการวางแผนแบบสุ่มโดยสมบูรณ์

1. ต้องสามารถควบคุมปัจจัยอื่นๆ ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ตัวอย่างที่ทำการศึกษาคือต้องไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลอื่นๆ (ปัจจัยภายนอก) ยกเว้นปัจจัยที่ทำการศึกษา หากไม่สามารถควบคุมปัจจัยภายนอกแล้วผลการวิเคราะห์จะมีความผิดพลาดมากกว่ารูปแบบการวิเคราะห์

อื่นๆ

2.ศึกษาได้เพียงปัจจัยเดียว เป็นแผนการทดลองที่มีลักษณะง่าย สะดวกในการปฏิบัติและวิเคราะห์ข้อมูล เหมาะสำหรับหน่วยทดลองที่มีความสม่ำเสมอมาก หน่วยทดลองมีโอกาสได้รับทริทเมนต์ใดทริทเมนต์หนึ่งเท่านั้นแผนการทดลองเช่นนี้นิยมใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการหรือเรือนทดลอง

1.2 การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomized Block Design, RBD) เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวนที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง ซึ่งต้องทำการกำจัดผลที่เกิดจากปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้ง โดยการใช้วิธีการบล็อก

1.3 การทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูง โดยจะสนใจปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป เป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมของระดับของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น โดยมุ่งศึกษาอิทธิพลของปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อม ๆ กัน และสนใจที่อิทธิพลร่วมของปัจจัยซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลให้กับตัวแปรตอบสนองอาจกล่าวได้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลาย ๆ ปัจจัย

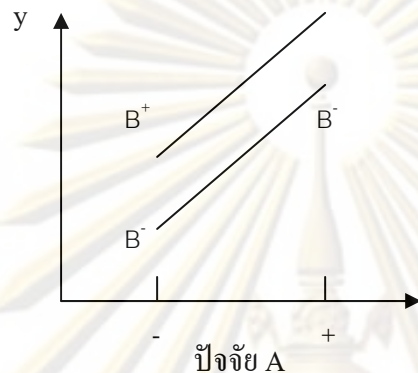
ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลีเคต จะประกอบด้วยการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crosses) ซึ่งกันและกัน วิธีการนี้ทำให้ได้ศึกษาตัวแปรหลายตัวในการทดลองเดียวกัน และยังสามารถทำการศึกษาและทดสอบปฏิกริยาโต้ตอบ (Interaction)

รูปแบบการทดลอง (Treatment Combination) แบ่งได้ 2 ประเภท คือ

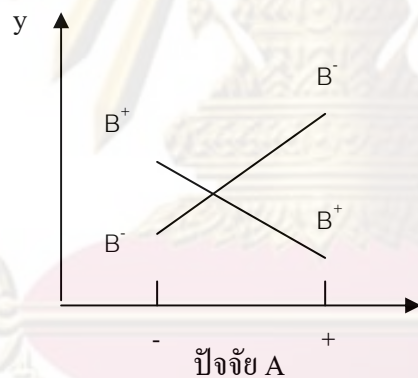
1. อิทธิพลหลัก (Main Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น
2. อิทธิพลร่วม (Interaction Effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน

ในการประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและผลตอบสนอง หรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น บางครั้งอาจพบว่าปัญหาที่สนใจประกอบไปด้วยปัจจัยที่เข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องจำนวนมากกว่าหนึ่งปัจจัยขึ้นไป ตัวแบบความสัมพันธ์ หรือตัวแบบถดถอยสำหรับกรณีปัญหาดังกล่าวจึงถูกเรียกว่า “ตัวแบบความสัมพันธ์พหุคูณ หรือการออกแบบการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Model)”

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบ (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) และหากความแตกต่างของผลตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่างๆของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่นๆ ซึ่งเรียกว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 2.40 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลโดยไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย



รูปที่ 2.41 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลโดยมีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 2.40 และ 2.41 จะเห็นว่า ในกรณีที่ปัจจัยทั้งสองไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกัน ลักษณะกราฟของเส้น B^+ และ B^- จะขนานกัน และในกรณีที่ปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาระหว่างกัน ลักษณะกราฟของเส้น B^+ และ B^- จะไม่ขนานกัน

รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการทดลองแบบแฟกทอเรียลกรณีที่มี 2 ปัจจัยคือ ปัจจัย A มี a ระดับ และปัจจัย B มี b ระดับและทดลอง n ครั้ง คือ

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b \quad k = 1, 2, \dots, n$$

แฟกทอเรียล รูปแบบของการออกแบบทดลองแบบแฟกทอเรียลที่สำคัญ ได้แก่

2.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k ใช้กับการทดลองหลายปัจจัยที่กำหนดระดับของปัจจัยเพียงแค่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 ในปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการช่วยกรองปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกก่อนสำหรับการทดลองที่มีหลายปัจจัย

2.2 การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k เมื่อจำนวนปัจจัยในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k เพิ่มขึ้น จำนวนการทดลองสำหรับเรฟลิคที่บริบูรณ์จะเพิ่มมากขึ้นด้วย บางครั้งมากกว่าทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ ถ้าผู้ทดลองสามารถตั้งสมมติฐานอย่างมีเหตุผลได้ว่า อันตรกิริยาขั้นสูงบางตัวสามารถละเลยได้ การทดลองจะน้อยลงโดยใช้การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k เนื่องจากโดยมากแล้วจะมีปัจจัยจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะเป็นปัจจัยที่มีผลน้อยหรือไม่มีผลตอบสนองต่อสิ่งที่พิจารณาอยู่ ดังนั้นการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลเชิง 2^k ถูกนำมาใช้มากในการกรองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลและช่วยในการหาแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการด้วย หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป

3.การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง 3^k เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ใช้กับการทดลองที่มีหลายปัจจัย ระดับของปัจจัย 3 ระดับ ใน k ปัจจัย คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลเชิง 3^k เหมาะสมกับผู้ทดลองที่สนใจกับผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

3.1 การออกแบบการทดลองแบบอื่นๆ

3.2 การออกแบบการทดลองแบบเนสต์เต็ด (Nested Design)

3.3 การออกแบบการทดลองแบบสปลิตพล็อต (Split-Plot Design)

3.4 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

2.17.5 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology ,RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวแปร และเรามีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ตัวอย่างเช่น สมมุติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (X_1) และความดัน (X_2) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$y = f(X_1, X_2) + \varepsilon \quad (2-15)$$

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากทดลอง ถ้าเรากำหนดว่า $E(y) = f(X_1, X_2) = f(X_1, X_2)$ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(X_1, X_2) \quad (2-16)$$

ซึ่งเราจะเรียกว่า พื้นผิวดตอบ (Response Surface)

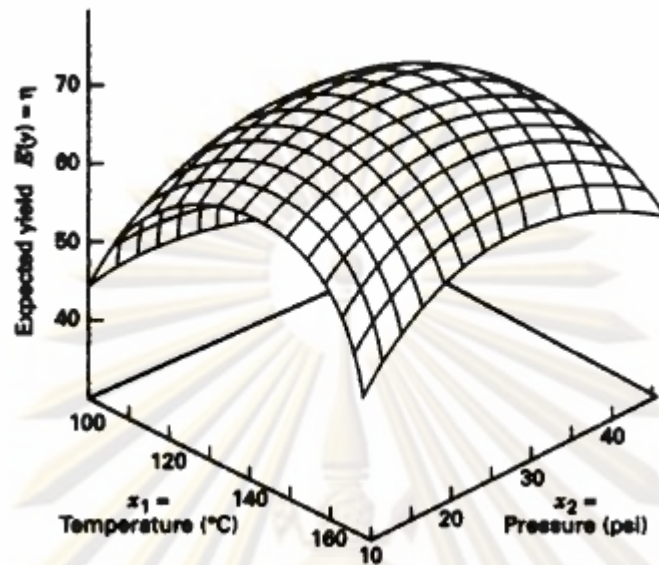
โดยมากแล้วเราจะแสดงพื้นผิวดตอบในรูปแบบของกราฟฟิก ตัวอย่างในรูป โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ X_1 และ X_2 เพื่อที่จะช่วยให้เรามองรูปร่างของพื้นผิวดตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยมากแล้วเราจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Control Plot) ของพื้นผิวดตอบดังแสดงในรูป ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ X_1 และ X_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวดตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวดตอบส่วนมาก เราจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรกก็คือ เราจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วเราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

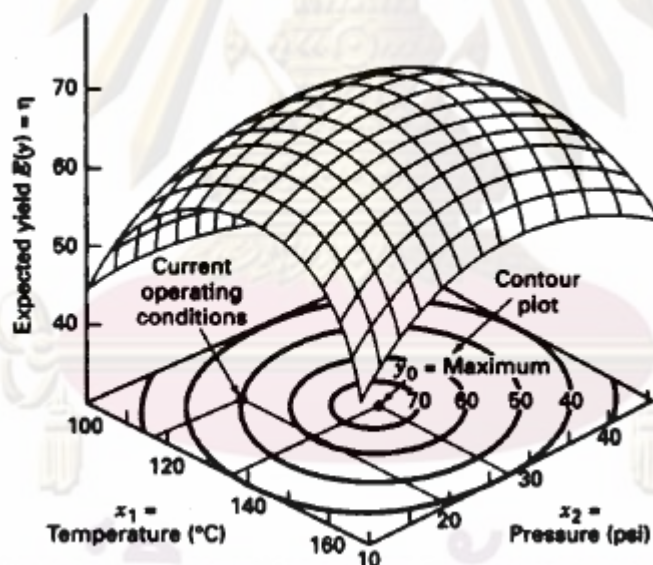
$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2-17)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ เราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (2-18)$$



รูปที่ 2.42 พื้นผิวผลตอบแทนแบบสามมิติ[18]

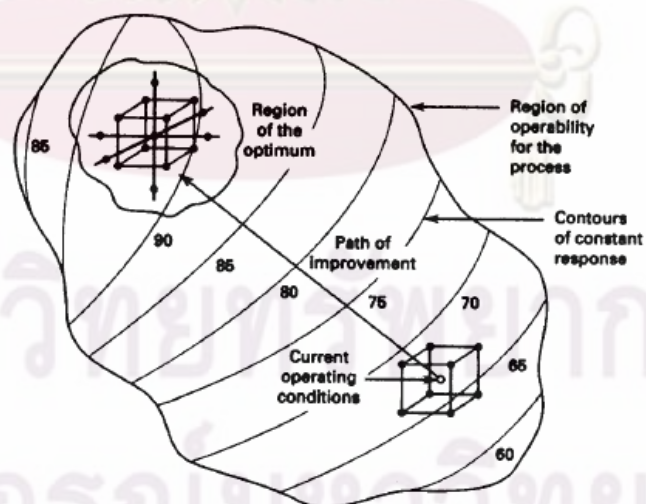


รูปที่ 2.43 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแทน [18]

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวดตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมานี้ แน่แน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้จะไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ทว่าถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองแบบพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้จะสามารถที่จะถูกประมาณได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวตอบเรียกว่าการออกแบบพื้นผิวตอบ (Response Surface Design)

การวิเคราะห์พื้นผิวเช่นเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่เราอยู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่นที่เงื่อนไขการทำงานในปัจจุบันในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะพบว่าผลตอบของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้งและแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ววัตถุประสงค์ของเราคือการนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดและอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อที่จะไปใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อเราพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว เราจะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น เช่นแบบจำลองกำลังสอง เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้เราสามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากรูปที่ 2.8 เราพบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบเปรียบเสมือนกับการปีนภูเขา ซึ่งยอดของมันจะเป็นจุดที่มีผลตอบสูงสุด หรือถ้าหากค่าที่ดีที่สุดคือค่าที่ต่ำที่สุด ในที่นี้เราอาจจะคิดเสมือนว่า เรากำลังเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบก็คือ การหาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจ



รูปที่ 2.44 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ[18]

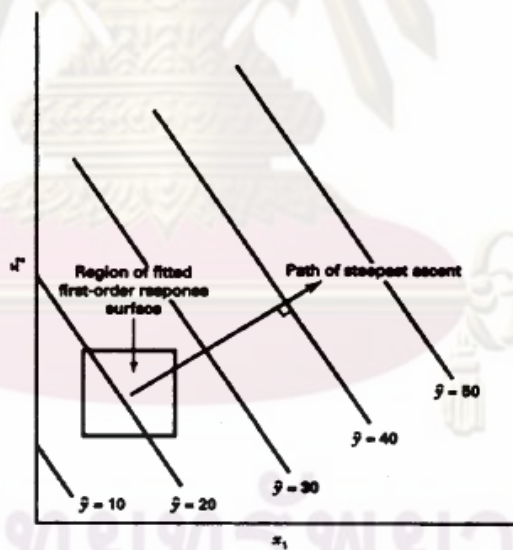
2.17.6 วิธีการสตีพเพสแอสเซนท์ (Steepest Ascent Method) [18]

โดยทั่วไปสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด (สูงที่สุด) ของระบบในช่วงเริ่มต้นจะอยู่ห่างจากสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของระบบ ดังนั้นเป้าหมายของผู้ทำการทดลองคือการเคลื่อนที่เข้าไปใกล้บริเวณของสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดอย่างรวดเร็วและถูกต้อง โดยใช้วิธีการทดลองที่ไม่ยุ่งยาก ประหยัด และมีประสิทธิภาพ ซึ่งในขณะที่สภาวะการทำงานในช่วงเริ่มต้นอยู่ห่างจากสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุดที่แท้จริงของระบบ จะสามารถใช้รูปแบบของสมการลำดับที่ 1 ในการประมาณพื้นผิวที่แท้จริง (True Surface) ในช่วงของ x ที่ไม่กว้างนัก

วิธีการสตีพเพสแอสเซนท์เป็นวิธีการเคลื่อนที่อย่างเป็นลำดับไปในทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นมากที่สุดของผลตอบสนอง (Maximal Increase in the Response) โดยในกรณีที่เป็นปัญหาเกี่ยวกับการหาค่าน้อยที่สุด (Minimisation Problem) วิธีการนี้จะเรียกว่า สตีพเพสดีเซนท์ (Steepest Descent) จากรูปแบบของสมการลำดับที่ 1

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2-19)$$

จะได้ว่าพื้นผิวสะท้อนหรือเส้นระดับ (Control) ของ y คือ ชุดของเส้นขนานดังรูป



รูปที่ 2.45 วิธีการสตีพเพสแอสเซนท์ [18]

โดยทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นมากที่สุดของผลตอบสนอง (Direction of Steepest Ascent) คือ ทิศทางที่ค่าของ y เพิ่มขึ้นมากที่สุด โดยทิศทางนี้จะขนานกับเส้นตั้งฉากของพื้นผิวสะท้อน โดยทั่วไปเส้นทางของสตีพเพสแอสเซนท์ คือ เส้นตรงซึ่งผ่านจุดศูนย์กลางของบริเวณที่สนใจและตั้งฉากกับพื้นผิวสะท้อน

โดยขนาดของช่วงในการเคลื่อนที่ (Step Size) ในเส้นทางของสถิติเพสแอสเกนท์จะเป็นสัดส่วนกับสัมประสิทธิ์ของการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Coefficient หรือ β_i) โดยขนาดของช่วงในการเคลื่อนที่จะถูกกำหนดโดยผู้ทำการทดลองซึ่งขึ้นอยู่กับความรู้ในกระบวนการผลิตและความสะดวกในการปฏิบัติ

2.17.7 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) [16]

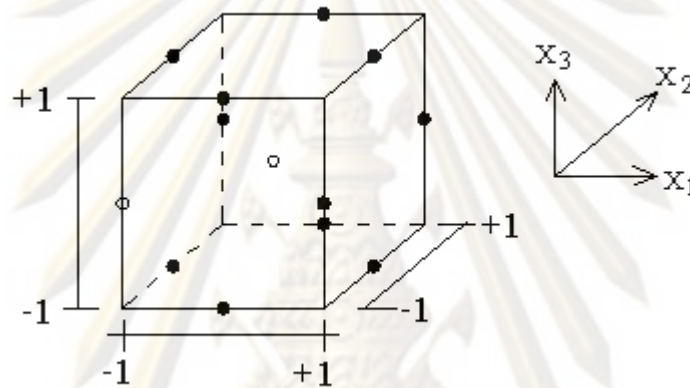
การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิดพื้นผิวตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^K กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัว รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.10 สังเกตว่า การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลม ที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนี้ การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ

Run	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1

13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

ตารางที่ 2.7 การออกแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน



รูปที่ 2.46 รูปแบบทางเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน [16]

2.17.8 การออกแบบ Central Composite [16]

การออกแบบ Central Composite เป็นการออกแบบที่มีความยืดหยุ่นมากในด้านความสามารถในการทำให้เกิดการบล็อก ถ้า k มีค่าใหญ่พอ ส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบจะสามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 บล็อกหรือมากกว่าได้ (จำนวนของบล็อกแฟกทอเรียลจะต้องมีค่าเป็นกำลังสองโดยที่ส่วนในแนวแกนจะทำให้เกิดบล็อกขึ้นหนึ่งบล็อก)

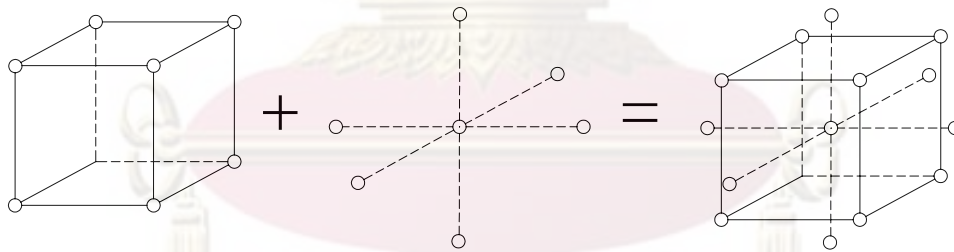
มี 2 ประเด็นที่สำคัญเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความแปรปรวนเมื่อการออกแบบพื้นผิวตอบถูกรันในบล็อก ประการแรกเกี่ยวกับการใช้จุดศูนย์กลางเพื่อคำนวณตัวประมาณของค่าความผิดพลาดบริสุทธิ์เฉพาะจุดศูนย์กลางที่ถูกรันในบล็อกเดียวกันเท่านั้นที่สามารถถูกนำมาพิจารณาว่าเป็นเรพลิเคตได้ ดังนั้นพจน์ของค่าความผิดพลาดบริสุทธิ์จะถูกคำนวณได้ภายในบล็อกเท่านั้น ถ้าความแปรปรวนมีความอยู่กับร่องกับรอยตลอดทั้งบล็อกแล้ว ตัวประมาณค่าผิดพลาดบริสุทธิ์เหล่านี้จะสามารถถูกนำมารวมกลุ่ม (Pooled) กันได้ ประการที่สองเกี่ยวกับผลของบล็อก ถ้าการออกแบบมีการบล็อกอย่างเชิงตั้งฉากใน m บล็อกแล้ว ผลรวมกำลังสองสำหรับบล็อกจะมีค่าเท่ากับ

$$SS_{Blocks} = \sum_{b=1}^m \frac{B_b^2}{n_b} \frac{G^b}{N} \tag{2-20}$$

โดยที่ B_b คือ ผลรวมทั้งหมดของ n_b ค่าสังเกตในบล็อกที่ b และ G คือค่าผลรวมทั้งหมดของ N ค่าสังเกตใน m บล็อกทั้งหมด เมื่อบล็อกไม่ได้เป็นแบบเชิงตั้งฉากตรงๆแล้ว เราสามารถนำเอาการทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอยแบบทั่วไปมาใช้ได้

การควบคุมผลการทดลองที่ดีนั้นจะต้องมีกระบวนการออกแบบการทดลองที่มีการควบคุมให้ได้ผลการทดลองที่ได้รับความน่าเชื่อถือที่สุด การพิจารณาค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของผลการทดลองที่ได้จากกระบวนการทดลองจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้การควบคุมอย่างดี

การหาผลที่ดีที่สุด หลังจากทำการหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนองแล้ว การหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนั้นๆ สามารถหาได้จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนอง ซึ่งอยู่ในรูปแบบคณิตศาสตร์ การวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมที่สุดสามารถใช้หลักการของแผนภาพของผลตอบสนอง (Response Surface Plot) และโครงร่างของผลตอบสนอง (Contour Plot) หรือ ใช้หลักการหาโดยเทคนิคของการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization)



Factorial
Points
(8 Run)

Center Points & Axial Point
(6 + 6 runs)
 $n_c = 4\sqrt{n_f + 1} - 2k$
 $n_a = 2k$

Central Composite
(Box-Wilson) Design
(20 runs)

รูปที่ 2.47 รูปแบบทางเรขาคณิตสำหรับแผนการทดลอง CCD [16]

2.18 การวิเคราะห์ผล [16]

2.18.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA)

เทคนิคในการจัดสรรความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในกลุ่มของข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยต่างๆ ตามแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรปรวน สมการเบื้องต้นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน คือ

$$\text{ความแปรผันทั้งหมด} = \text{ความแปรผันจากปัจจัย} + \text{ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล}$$

สมการดังกล่าว ได้จากข้อคิดที่ว่าความแตกต่างกันของข้อมูลอาจมีมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล (หรือความผิดพลาดแบบสุ่ม) เพียงอย่างเดียว หรืออาจมาจากการที่ปัจจัยหนึ่งปัจจัยใดหรือหลาย ๆ ปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ทำให้สามารถสร้างสมการได้ 4 ลักษณะ

1. ถ้าความแปรผันในข้อมูลนั้น เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ จะได้สมการ

$$Y_i = \mu + \varepsilon_i \quad (2-21)$$

ค่า Y_i จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร μ ด้วยค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ε_i

2. ถ้าจากการทดลองหรือการเก็บรวบรวมข้อมูล พบว่าความแปรผันของข้อมูลมาจากปัจจัยตัวหนึ่ง จะได้สมการ

$$Y_{ij} = \mu + T_j + \varepsilon_{ij} \quad (2-22)$$

ค่า Y_i จะแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของประชากร μ ด้วยความแปรผันจากปัจจัย T และค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม ε_i

3. ถ้าจากการทดลองพบว่า ความแปรผันของข้อมูลเกิดจากปัจจัย n ตัวที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + \dots + \varepsilon_{ijk} \quad (2-23)$$

4. ถ้าความแปรผันของข้อมูล เนื่องมาจากปัจจัย 2 ปัจจัยและอิทธิพลร่วมกันของปัจจัย จะได้สมการ

$$Y_{ijk} = \mu + T_j + N_k + TN_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (2-24)$$

สมการ Y เป็น รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการทดลองซึ่งได้จากการจัดสรรความแปรผันออกเป็น ส่วน ๆ ตามที่มาของแหล่งที่ทำให้เกิดความแปรผัน

จากรูปแบบของ Y การวิเคราะห์กระทำโดยการหาขนาดของความแปรผันของปัจจัยในรูปของผลบวกกำลังสอง (Sum of Square) เทียบกับขนาดของความผิดพลาดแบบสุ่มในรูปของผลบวกกำลังสอง เพื่อพิจารณาว่าขนาดของความแปรผันของปัจจัยนั้น ๆ มีนัยสำคัญทางสถิติที่จะยอมรับว่าปัจจัยนั้น ๆ มีอิทธิพลที่ทำให้เกิดความแปรผันในข้อมูลจริง ๆ โดยใช้สถิติในการทดสอบคือ ตัวสถิติ F โดยที่

$$F = \frac{\text{ผลบวกกำลังสองของปัจจัย} / \text{องศาความอิสระของปัจจัย}}$$

$$\frac{\text{ผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม} / \text{องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม}}$$

เปรียบเทียบค่า F ที่คำนวณได้กับค่า $F_{\alpha, a, b}$ จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบ F โดยที่ α = ระดับนัยสำคัญ a = องศาความอิสระของปัจจัย b = องศาความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

ถ้า $F > F_{\alpha, a, b}$ ยอมรับอิทธิพลของปัจจัย และถ้า $F \leq F_{\alpha, a, b}$ ปฏิเสธอิทธิพลของปัจจัย

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อทดสอบสมมติฐานทางสถิติในการทดลองที่มีปัจจัยที่เราสนใจ ศึกษา 2 ตัว คือ A และ B เราต้องการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ 3 อย่าง คือ

1 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย A คือ

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลหลักของปัจจัย B คือ

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

3 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับอิทธิพลร่วมของ 2 ปัจจัย คือ

$$H_0: (\tau\beta)_{ij} = 0 \text{ ทุก } i, j$$

$$H_1: (\tau\beta)_{ij} \neq 0 \text{ อย่างน้อย 1 ค่า}$$

2.18.2 การหาค่า P (P Value)

โดยทั่วไป เมื่อต้องการสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้น สิ่งที่น่าสนใจ คือ สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) จะถูกยอมรับหรือปฏิเสธ ถ้าถูกยอมรับ หมายถึง สมมติฐานเป็นจริง และถ้าถูกปฏิเสธ หมายถึง สมมติฐานนั้นไม่เป็นจริง จึงมีการกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ เพื่อที่จะบอกยอมรับหรือปฏิเสธ Null Hypothesis เราเรียกว่า Probability Value (P-Value) ค่า P - Value นี้จะอ้างอิงอยู่กับ α โดยที่ P-Value คือค่าจริง(Actual)ของProbability ซึ่งได้จากการคำนวณ ส่วน α คือเส้นกำหนดหรือจุดแบ่งระหว่างการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานหลัก ซึ่งก็คือ Probability เหมือนกัน โดยจะยอมรับสมมติฐานหลัก ถ้า P-Value มากกว่า α และปฏิเสธ ถ้า P-Value เท่าหรือน้อยกว่า

2.18.3 การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน (Residual Analysis)

สำหรับการศึกษาอิทธิพลของปัจจัย 2 ปัจจัย และผลจากการทดสอบอิทธิพลร่วมพบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยนั้น จึงเขียนตัวแบบสถิติของการทดลองนี้ซึ่งไม่มีอิทธิพลร่วม คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \epsilon_{ijk} \quad (2-25)$$

เมื่อ y_{ijk} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของปัจจัย

ϵ_{ijk} คือ ค่าที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

ก่อนที่จะสรุปผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ควรตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบสถิตินี้ ก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบก็คือการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนคือ การคำนวณค่าประมาณของความคลาดเคลื่อนของตัวแบบการทดลองแฟคทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย และ 2 ปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลร่วมกันคือ

$$e_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk} \quad \text{เมื่อ} \quad \hat{y}_{ijk} = \bar{y}_{i..} + \bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..} \quad (2-26)$$

2.19 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.19.1 ชีรเดช เรืองศรี [19]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์กล่อบรรจุภัณฑ์ เพื่อลดการเกิดปริมาณของเสีย โดยใช้หลักการควบคุมคุณภาพและการออกแบบการทดลองมาใช้ในการพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์ การดำเนินงานวิจัย ในส่วนแรกเป็นการพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการควบคุมการพิมพ์เพื่อลดจำนวนของเสีย โดยจัดทำใบตรวจสอบคุณภาพวัตถุดิบและความพร้อมพิมพ์ แบบฟอร์มการบำรุงรักษาเครื่องจักรและจัดทำขั้นตอนการปฏิบัติงาน ส่วนที่สองเป็นการลดความสูญเปล่าโดยพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการพิมพ์โดยการออกแบบการทดลอง ซึ่งใช้การทดลองเชิง แฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อรองรับปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัย คือ จำนวนกระดาษซ้อมสีก่อนพิมพ์ ค่า pH น้ำยาฟาว์นเทน ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์นเทน ระยะห่างโมและความเร็วการพิมพ์ จากการศึกษาเหลือปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการพิมพ์เพียง 3 ปัจจัย คือ ค่า pH น้ำยาฟาว์นเทน ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์นเทนและระยะห่างโม

จากนั้นนำปัจจัยทั้ง 3 มาวิเคราะห์เชิงแฟกทอเรียลแบบเพิ่มจุดศูนย์กลางของปัจจัยเพื่อหาสถานะที่เหมาะสม โดยผลที่ได้ คือ น้ำยาฟาว์นเทนมีค่า pH เท่ากับ 4.5 ปริมาณแอลกอฮอล์ในน้ำยาฟาว์นเทนเท่ากับ 25% และระยะห่างโมเท่ากับ 0.075 มิลลิเมตร ภายหลังจากการพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์ทั้ง 2 ส่วน ได้นำขั้นตอนการปฏิบัติงานและระดับปัจจัยที่เหมาะสมไปใช้กับกระบวนการพิมพ์จริงพบว่า จำนวนของเสียลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากจำนวนของเสียเฉลี่ยเดิม 8,469 แผ่นต่อเดือน เหลือจำนวนของเสียเฉลี่ย 5,274 แผ่นต่อเดือน และสามารถลดค่าใช้จ่ายจากของเสียลงได้เท่ากับ 180,198 บาทต่อปี

2.19.2 พงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์ และ นพดล ฉิ่งทอง [20]

งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับปรุงขนาดของรูรีมเมอร์ (Reamer Hole) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม โดยพิจารณาปัจจัยที่น่าสนใจจำนวน 3 ปัจจัย คือ อัตราป้อนของดอกกรีต (Feed; m/min) ความเร็วรอบ (Speed; rpm) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนการคว้านรูเรียบ (Diameter Before Reaming; mm) การกำหนดระดับเบื้องต้นของปัจจัยใช้วิธี OVAT (One Variable at the Time) และวิธีเชิงแฟกทอเรียล k ปัจจัยชนิดสองระดับ (2^k Factorial Design) นอกจากนี้ยังทำปรับปรุงกระบวนการผลิตทั้งวิธีเชิงแฟกทอเรียลชนิดสองระดับ และวิธีสเต็ปเดสเซนท์ (Steepest Descent) โดยผลการทดลองพบว่าในครั้งแรกของการพัฒนาให้

ผลตอบสนองที่ดีขึ้นกับทุกชนิดของเหล็กและสารหล่อเย็น อย่างไรก็ตามผลการปรับปรุงด้วยกระบวนการในครั้งที่สองไม่มีการพัฒนาที่ดีขึ้น โดยพบว่าค่าของผลตอบสนอง

ที่ได้จากวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k ครั้งที่สอง และวิธีสถิติเพสเคสเซนซ์ยังไม่สามารถที่จะสรุปได้ว่าควรปรับระดับของปัจจัยทั้งสามปัจจัยที่ค่าเท่าใด โดยอาจเกิดจากระหว่างการทดลองการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k ครั้งที่สอง ได้มีการปรับค่าระดับของปัจจัยทั้งสามปัจจัยมากเกินไป จึงทำให้ค่าผลตอบสนองที่ได้เกินค่าผลตอบสนองที่ควรจะได้รับ นอกจากนี้ในการทดลองด้วยวิธีสถิติเพสเคสเซนซ์ได้มีการกำหนดค่า a ที่มาก จึงทำให้การปรับค่าระดับของปัจจัยทั้งสามปัจจัยมากเกินไป ค่าผลตอบสนองที่ได้จึงเกินค่าผลตอบสนองที่ควรจะได้รับ

ในการใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k เป็นแนวทางในการหาค่าผลตอบสนองที่ดีที่สุด ควรปรับระดับของปัจจัยให้มีค่าลดลงมาเพื่อให้ค่าผลตอบสนองอยู่ในช่วงที่ต้องการ การที่จะใช้วิธีสถิติเพสเคสเซนซ์ เป็นแนวทางในการหาค่าผลตอบสนองที่ดีที่สุดนั้น ในการทดลองครั้งนี้ ไม่สัมฤทธิ์ผลซึ่งอาจเกิดจากหลายๆ สาเหตุ ดังนั้นจึงควรกำหนดค่า a ให้มีค่าน้อยลงในการกำหนดค่าจุดกึ่งกลางใหม่เพื่อให้ค่าผลตอบสนองอยู่ในช่วงที่ต้องการ

2.19.3 ไสว สุขวิทยาวงศ์ [21]

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุดระหว่างมิดตัด 2 ประเภทคือ มิดตัดคาร์ไบด์และมิดตัดโค้ด โดยทดลองกับวัสดุชิ้นงานเหล็ก AISI 1045 ด้วยวิธีการ Optimum Gradient Method โดยได้ศึกษาถึงการสึกหรอและอายุการใช้งานมิดตัดเพื่อใช้คำนวณหาค่าใช้จ่ายในการตัดต่อชิ้นงาน จนกระทั่งสามารถกำหนดสภาวะการตัดที่เหมาะสมและมีค่าใช้จ่ายในการตัดต่ำ ซึ่งการทดลองนี้ แสดงให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับมิดตัดคาร์ไบด์คือ ความเร็วในการตัด 172 เมตร/นาที และอัตราการป้อนตัด 0.5146 มิลลิเมตร/รอบ และสำหรับมิดตัดโค้ดความเร็วในการตัด 185 เมตร/นาที และอัตราการป้อนตัด 0.4994 มิลลิเมตร/รอบ โดยมีค่าใช้จ่ายในการตัด 9.39 บาท/ชิ้น และ 8.83 บาท/ชิ้น สำหรับมิดตัดคาร์ไบด์และมิดตัดโค้ดตามลำดับ.

2.19.4 สมเกียรติ ตั้งจิตสถิตเจริญ [22]

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงการใช้มิดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวในการกลึงชิ้นส่วนของปั้มน้ำรถยนต์ (Water Pump Center) ซึ่งมีคุณสมบัติตามมาตรฐาน JIS G5501(1989) ซึ่งมีสัญลักษณ์คือ FC25 เนื่องจากปัญหาว่ามิดตัดที่ใช้ในกระบวนการกลึงปาดหน้าและปอกผิวชิ้นส่วนของปั้มน้ำรถยนต์ซึ่ง

ได้จากการหล่อ มีดตัดมีการสึกหรอหรือไหม้บ่อยมาก และไม่ได้รับความเรียบผิวที่ถูกค่าต้องการซึ่งห้ามเกิน 12.5 ไมโครเมตร จึงทำให้เปลี่ยนมีดตัดบ่อย

ในการทดลองได้ใช้มีดตัดคาร์ไบด์ 5 ชนิด โดยคงที่อัตราป้อนและความลึกตัดเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร/รอบและ 2 มิลลิเมตรตามลำดับ แต่จะเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ 3 ค่า คือ 600, 800 และ 1,000 รอบ/นาที จากผลการทดลองพบว่า มีดตัดชนิดที่ 1 คือ DNMG150408 A ดีกว่ามีดตัด 4 ชนิดที่เหลือ ทั้งในแง่ของราคามีดตัด อายุของมีดตัด ค่าใช้จ่ายในการกลึงต่ำสุด ตลอดจนอัตราการผลิตสูงสุดด้วย

2.19.5 ปิยะ ศิริธรรมปิติ [1]

งานวิจัยนี้ต้องการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด S45C กับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว โดยใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี 4 แกน ซึ่งติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อใช้วัดแรงในขณะ โดยการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด ได้แก่ การตัดแบบเปียก การใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็น และการตัดแบบแห้ง โดยคำนึงถึงต้นทุนของมีดตัด และสารหล่อเย็นในกระบวนการตัด แรงตัดถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการตรวจติดตามในกระบวนการตัดโดยไดนาโมมิเตอร์ได้ถูกติดตั้งบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อใช้วัดแรงในขณะตัดชิ้นงาน และแรงตัดที่วัดได้ถูกนำมาช่วยวิเคราะห์ความสามารถในการตัดชิ้นงานที่เงื่อนไขการตัดที่ต่างกัน

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึง ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดความสึกหรอของมีดตัดและความ ขลุระของผิวชิ้นงาน มีความสอดคล้องเป็นไปในทิศทางเดียวกัน แรงตัดที่วัดได้จากผลการทดลองสามารถนำมาอธิบายความขลุระของผิวชิ้นงาน และการสึกหรอของมีดตัดได้อย่างดี

จากผลการทดลองเปรียบเทียบอายุของมีดตัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ สามารถสรุปได้ว่า เงื่อนไขการตัดที่ให้อายุของมีดตัดยาวนานที่สุด โดยใช้สารหล่อเย็นที่น้อยที่สุดซึ่งจะถือว่าเป็น เงื่อนไขการตัดที่ดีที่สุด ซึ่งผลการทดลองที่ดีที่สุดคือ เงื่อนไขการตัดแบบแห้ง ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/ นาที ที่อัตราป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/ รอบ ความลึกการตัด 0.5 มิลลิเมตร

2.19.6 สัตยญา พิพัฒพรณวงศ์ [14]

งานวิจัยนี้ต้องการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของเหล็กกล้าคาร์บอน S45C โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์หาความเร็วตัดที่เหมาะสม โดยแสดงออกมาในรูปของ สมการอายุการใช้งานเครื่องมือตัดของเทอร์ อีกส่วนหนึ่งหาความเร็วตัดภายใต้เงื่อนไขด้วย หลักการทางเศรษฐศาสตร์ จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราป้อนและความลึกตัดทำให้อัตราผลกำไรสูงสุดเพิ่มขึ้น การทดลองนี้ใช้สภาวะการทดลองให้อยู่ในช่วงการใช้งาน ตามมาตรฐานของ

บริษัทผู้ผลิตมีดกลึง กล่าวคือใช้อัตราป้อน ระหว่าง 0.20-0.55 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด ระหว่าง 0.7 -6.0 มิลลิเมตร

2.19.7 สมหมาย สารมาท [23]

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแตกร้าวในแนวเชื่อม สำหรับการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เอสเคดี 11 เพื่อหารูปแบบและข้อกำหนดวิธีปฏิบัติในกระบวนการเชื่อมแบบ GTAW ซึ่งพบปัญหาการรอยแตกร้าวภายหลังจากการเชื่อมเพื่อซ่อมแซม โดยนำเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบเต็มจำนวน 2^4 เพื่อรองรับปัจจัย 4 ปัจจัย คือกระแสไฟเชื่อม ความเร็วในการเชื่อม มุมแกนลวดทั้งสแตนเลสเหล็กโทรด และอุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อม โดยมีผลตอบเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์การแตกร้าว จากนั้นใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์ - เบห์นเคนในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาค่าระดับที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัยผลการศึกษาพบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เอสเคดี 11 ที่สามารถควบคุมการแตกร้าวในแนวเชื่อมได้ คือ การปรับค่ากระแสไฟเชื่อมที่ 175 แอมแปร์ความเร็วในการเชื่อมที่ 200 เซนติเมตรต่อ นาที อุณหภูมิอุ่นชิ้นงานก่อนการเชื่อมที่ 450 องศาเซลเซียส และในส่วนของมุมแกนลวดทั้งสแตนเลสเหล็กโทรดไม่มีผลต่อการแตกร้าวในแนวเชื่อมอย่างมีนัยสำคัญ

2.19.8 วิรุทธ์ ลิ้มเสมอ [24]

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโฟลว์ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ (ตัวเก็บประจุชนิดแทนทาลัม) โดยการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) โดยมีตัวแปรตอบสนองที่สนใจ 2 ตัวคือ เวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิจากการใช้แผ่นฟังก้างปลาและการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) พบว่าปัจจัยที่ถูกเลือกและใช้ในการทดลองเบื้องต้น โดยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k มี 5 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 1 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 2 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 และ ความเร็วของสายพาน

จากการทดลองข้างต้นพบว่าปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองโดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3^k มี 3 ปัจจัย ได้แก่อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 3 อุณหภูมิของฮีตเตอร์ตัวที่ 4 และ ความเร็วของสายพาน ผลจากการทดลองสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่คงอยู่และอุณหภูมิสูงสุดได้ และสามารถสรุปการตั้งค่าเครื่องรีโฟลว์ใหม่โดยการกำหนดความเร็วของสายพานที่ระดับสูงสุดคือ 1.0 เมตรต่อนาที อุณหภูมิ

ของสปีดเตอร์ตัวที่ 3 เปลี่ยนจาก 225°C เป็น 255°C และอุณหภูมิของสปีดเตอร์ตัวที่ 4 เปลี่ยนจาก 260°C เป็น 265°C เมื่อได้ประยุกต์ใช้การตั้งค่าของเครื่องรีโพลีเมอร์ สามารถลดเวลาในการผลิตตัวเก็บประจุ โดยรวมได้ 11.6 % และสามารถเพิ่มกำลังการผลิตรวมเพิ่มขึ้น

2.19.9. Anselmo Eduardo Diniz and Ricardo Micaroni [25]

ได้ชี้ให้เห็นว่าเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัดซึ่งเป็นเป้าหมายอย่างหนึ่งซึ่งได้มีการศึกษาวิจัยมากในหลายๆบริษัทอุตสาหกรรม, เนื่องจากเหตุผลทางนิเวศวิทยาและปัญหาสุขภาพของมนุษย์มาจากสารหล่อเย็น แต่อย่างไรก็ตามสารหล่อเย็นยังจะช่วยยืดอายุของมีดตัดสำหรับในกระบวนการกลึงหลายๆประเภท ในที่นี้จะศึกษากระบวนการกลึงโลหะโดยใช้มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ก็เพื่อที่จะหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมสำหรับการตัดแบบแห้ง ตัวอย่างเช่นเงื่อนไขที่ทำให้ยืดอายุมีดตัดในการตัดแบบแห้งที่ใกล้เคียงกับการตัดแบบเปียก โดยไม่ทำให้ความเรียบผิวของผิวชิ้นงานเสียหายและไม่เพิ่มการใช้พลังงานในการตัดในกระบวนการ เพื่อให้ถึงเป้าหมายต่างๆเหล่านี้ จึงมีการทดลองต่างๆมากมายโดยเปลี่ยนแปลงความเร็วตัด อัตราการป้อน และรัศมีจุมกมีดทั้งที่ใช้และไม่ใช้สารหล่อเย็น

บทสรุปหลักของงานวิจัยนี้คือการไม่ใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการกลึง โดยไม่เป็นอันตรายกับอายุการใช้งานของมีดตัด เวลาที่ใช้ในการตัด ปรับปรุงความเรียบผิว และการใช้พลังงาน จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะเพิ่มอัตราป้อนและเพิ่มขนาดของรัศมีจุมกมีด และ ลดความเร็วในการตัดลง

จำนวนการใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการกลึงมีปริมาณลดลงเมื่อไม่นานมานี้เนื่องจากเหตุผลทางสิ่งแวดล้อมและปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตามในหลายกระบวนการยังคงใช้สารหล่อเย็นเพื่อยืดอายุของมีดตัดและทำให้กระบวนการมีราคาถูกลง ดังนั้นการทดลองเพื่อการใช้สารหล่อเย็นน้อยที่สุดระหว่างกระบวนการที่ใช้และไม่ใช้ เพื่อที่จะใช้การตัดแบบแห้งในแนวทางที่เป็นไปได้

ชิ้นงานในการทดลองนี้ใช้เหล็กเกรด 1045 ซึ่งมีความแข็งอยู่ระหว่าง 55 และ 59 และขนาดตัดลดลงจาก 98 มิลลิเมตร ถึง 70 มิลลิเมตร ความยาวที่ใช้คือ 250 มิลลิเมตร

มีดตัดที่ใช้คือ TNMG 160404-PF และ TNMG 160408-PF (ISO P15) เหล็กคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วย TiC, Al₂O₃ และ TiN ความแตกต่างระหว่างมีดตัดทั้งสองแบบคือ รัศมีจุมกมีด อันแรกมีรัศมีจุมกมีด $r_c = 0.4$ มิลลิเมตร อันที่สองมีรัศมีจุมกมีด $r_c = 0.8$ มิลลิเมตร สารหล่อเย็นที่ใช้เป็นน้ำมันสังเคราะห์ที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบความเข้มข้น 6% อัตราการไหลของสารหล่อเย็น 4.2 ลิตร/นาที ซึ่งสารหล่อเย็นนี้แนะนำให้ใช้กับงานกลึงที่ไม่หนัก การทดลองใช้ เครื่องกลึง CNC

ขนาด 22 KW การสึกหรอของมีดตัดจะใช้กล้องกำลังขยาย ความเร็วผิวจะใช้มิเตอร์วัดความเร็วผิวแบบพกพา ในการทดลองครั้งนี้ได้วัด 9 จุด ตลอดชิ้นงาน ค่าต่างๆที่แสดงในตารางนี้เป็นค่าเฉลี่ย (กระแสไฟฟ้าที่ใช้ของมอเตอร์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังไฟฟ้าของ เครื่องกลึงนี้ใช้มอเตอร์ DC ซึ่งค่าแรงบิดคงที่)

การทดลองนี้จะกลึงชิ้นงานจนได้การสึกหรอ (Flank Wear) $V_b = 3$ มิลลิเมตร ค่านี้จะพิจารณาถึงอายุของมีดตัด ตารางนี้แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองนี้ ความลึกตัด (a_p) 1 มิลลิเมตรในแต่ละการทดลองจะทำซ้ำ 2 ครั้ง ความเร็วในการตัด $V_c = 0$ เมตร/ นาที คือความเร็วที่แนะนำโดยผู้ผลิต สำหรับงานกลึงเหล็ก 1045 ด้วย P15 เหล็กหล่อผิว และ อัตราป้อน $f = 0.1$ มิลลิเมตร/รอบ

2.19.10 J.D.KIM and O.B. KWEUN [26]

งานวิจัยนี้กล่าวว่าความน่าเชื่อถือได้ของกระบวนการกลึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอุตสาหกรรมระบบอัตโนมัติสมัยใหม่ ในกรณีของกระบวนการกลึงในส่วนของเศษตัดมันยาวนั้นเป็นอุปสรรคสำคัญหลักในกระบวนการผลิต ความน่าเชื่อถือได้นี้แสดงถึงการควบคุมเศษตัดนี้จึงเป็นประเด็นสำคัญ การควบคุมเศษหักในกระบวนการกลึงนี้ยากในกรณี Mild Steel เพราะเศษตัดเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นการพัฒนาของอุปกรณ์หักเศษตัดสำหรับ Mild Steel จึงเป็นหัวข้อสำคัญในกระบวนการกลึง งานวิจัยนี้แสดงถึงรูปแบบของกระบวนการไหลของเศษตัดด้วยการใช้เม็ดเม็ดแบบมุมแตกต่างกันและนำไปสู่ตัวแปรลักษณะสำคัญในการควบคุมเศษตัดนี้ งานวิจัยนี้ได้มุ่งถึงการออกแบบอุปกรณ์หักเศษตัด Chip Breaker และทดลองการกลึงเหล็ก Mild steel ด้วยการใช้อุปกรณ์หักเศษตัดนี้ สำหรับ Mild Steel คำนึงถึง ความเร็วในการตัด ความลึกตัด และอัตราการป้อน ถูกนำมาวิเคราะห์จากผลการทดลอง

2.19.11 Klocke, F. and Eisenblatter, G [27]

งานวิจัยนี้กล่าวว่าปัญหาหลักใหญ่ของกระบวนการตัด ก็จะต้องมีการระบายความร้อนและการหล่อลื่นด้วยการใช้สารหล่อเย็น (CL) ที่ดี แต่ในแง่ของราคาของการกำจัดที่เพิ่มขึ้นนั้น หลายๆ บริษัทในปัจจุบันเริ่มสนใจที่จะลดการใช้สารหล่อเย็นนี้ในกระบวนการผลิต ตัววัดที่สมเหตุสมผลที่ดีที่สุดสามารถจะช่วยกำจัดปัญหาเหล่านี้ที่เกี่ยวข้องกับการใช้สารหล่อเย็น (CL) คือการตัดแบบแห้ง แต่อย่างไรก็ตาม กระบวนการตัดที่ไม่ต้องใช้สารหล่อเย็นจะยอมรับเฉพาะเมื่อเป็นไปได้ที่จะรับประกันว่าคุณภาพของชิ้นส่วนและเวลาในการตัดเท่ากับการตัดแบบเปียกหรือ

มากกว่านั้น เทคนิคที่จะแนะนำในกระบวนการตัดแบบแห้งอาจจะรวมถึงการใช้ปริมาณการใช้สารหล่อเย็นน้อยที่สุด (MQL) งานวิจัยนี้จึงสนใจการพัฒนาในกระบวนการตัดแบบแห้งใหม่

2.19.12 N.H. Elmagrabi , C.H. Che Haron , Jaharah A.Ghani and Gusri .A.I ,Yasir [28]

งานวิจัยนี้กล่าวถึงสิ่งใหม่ที่ทำภายในกระบวนการตัดคือการใช้ความเร็วตัดที่สูงเพื่อเพิ่มผลิตภาพในกระบวนการผลิต นี่เป็นเหตุผลหลักที่สำคัญทำให้มีดตัดสึกหรอเร็วขึ้น แต่ปัญหาจะยังมีความรุนแรงมากขึ้นสำหรับไททานเนียมอัลลอยด์ เนื่องจากคุณสมบัติในการนำความร้อนต่ำ (ประมาณ $6.6 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) วิธีในการระบายความร้อนเพื่อที่จะลดการสึกหรอนี้ใช้สารหล่อเย็น สารหล่อเย็นนี้จะช่วยหล่อลื่นและระบายความร้อนระหว่างการตัด การใช้สารหล่อเย็นสามารถเพิ่มความเร็วในการตัดได้ถึง 30% โดยไม่มีผลต่ออายุมีดตัด แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารหล่อเย็นให้ผลลบในแง่ของค่าใช้จ่าย สิ่งแวดล้อมและสุขภาพ ในบางกรณี การตัดโดยปราศจากสารหล่อเย็น (การตัดแบบแห้ง) สามารถประยุกต์ใช้ได้ดีในโรงงานอุตสาหกรรม การตัดแบบแห้งส่งผลกระทบต่อนิเวศน์วิทยาและค่าใช้จ่าย ในการวิจัยนี้ กระบวนการกัดได้ถูกนำมาทดสอบสำหรับไททานเนียมอัลลอยด์ (Ti-6Al-4V) ทั้งมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวและไม่เคลือบผิว การทดลองกระทำที่หลายระดับความเร็ว 50 , 80 และ 105 เมตร/ นาที ความลึกตัด 1 , 1.5 และ 2 มิลลิเมตร อัตราการป้อน 0.1 , 0.15 และ 0.20 มิลลิเมตร/ ฟัน ตามลำดับ ด้วยวิธีการพื้นผิวผลตอบ (RSM) ได้ถูกใช้ในการหาอายุมีดตัดที่เหมาะสมสำหรับมีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวภายใต้การตัดแบบแห้ง ด้วยการทดลองพบว่า มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิวให้อายุของมีดตัดที่ยาวนานที่สุดถึง 11.5 นาที โดยสมการอายุมีดตัดที่ได้คือ

$$TL = 39.253 - 0.320V - 192.84f - 1.845D + 0.001V^2 + 400.28f^2 + 1.926D^2 + 0.651Vf - 0.031VD - 17.88fD$$

โดยไม่คิดเทอมที่มีนัยสำคัญ จะได้สมการที่ลดรูปเป็น $TL = 39.253 - 0.320V - 192.84f + 0.001V^2 + 400.28f^2 + 0.651Vf$

2.19.13 Raviraj Shetty, Raghuvir Pai , Srikanth S. Rao and Vasanth Kamath [29]

งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้หลักการ การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง เพื่อศึกษาความหยาบผิวในการกลึงต่ำสุดสำหรับกระบวนการกลึง Discontinuously Reinforced Aluminium Composites (DRACs) ซึ่งประกอบด้วยอลูมิเนียมอัลลอยด์ 6061 และซิลิคอนคาร์ไบด์ 15% โดยปริมาตร การทดลองกระทำที่หลายระดับความเร็ว 45 , 73 และ 101 เมตร/ นาที ความลึกตัด 0.25 , 0.50 และ 0.75 มิลลิเมตร อัตราการป้อน 0.11, 0.18 และ 0.25 มิลลิเมตร/ รอบ ตามลำดับ โดยใช้เทคนิควิธี

ทากุชิ และ พื้นผิวผลตอบ (RSM) จาก ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวแปรที่สำคัญที่สุดต่อความ
 หยาบผิวในกระบวนการกลึงคือ อัตราการป้อน ตามด้วยความเร็วตัด สมการที่ได้จากการทดลองคือ

$$R_a = 8.17546 - 0.0596633A - 42.2636B - 0.863964C + 0.000394133 A^2 + 118.878 B^2 - 4.55200$$

$$C^2 - 0.0331633AB + 0.0105357AC + 26.0714BC$$

2.19.14 V.Derflinger ,H.Brandle and H.Zimmermann [30]

งานวิจัยนี้กล่าวถึงกระบวนการตัดแบบแห้งซึ่งกำลังเป็นหัวข้อที่พูดถึงมากที่สุดในวิศวกรรม
 การผลิต สำหรับเทคโนโลยีนี้จะมีจุดแข็งในแง่ของสิ่งแวดล้อมและการประหยัด ทั้งการใช้สารหล่อ
 เย็น การบำรุงรักษา และการกำจัดทำลายสารหล่อเย็นซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงมาก หลายๆนักวิจัยชี้ให้เห็นว่า
 ค่าใช้จ่ายสำหรับสารหล่อเย็นนี้สูงมากกว่าหลายเท่าเช่นค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ตัด ในงานวิจัยเน้นไปที่
 วัสดุเคลือบผิวที่ทนต่อการสึกหรอซึ่งป้องกันการเกิด ออกซิเดชัน เช่น PVD TiAlN ได้ถูกนำมา
 พิจารณาสำหรับกระบวนการตัดแบบแห้งสำหรับเหล็กหล่อและเหล็กอัลลอยด์ สำหรับกระบวนการ
 เจาะและตัดปเกลียวแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นโดยใช้วัสดุที่ประกอบด้วยชั้นของสารหล่อลื่น WC/C
 (สำหรับ Lubricant Layer) เคลือบผิวด้านบนด้วยชั้นของวัสดุเคลือบที่แข็ง TiAlN (สำหรับ Hard
 Layer) การเคลือบทั้ง 2 แบบนี้ช่วยในเรื่องความประหยัดและกระบวนการผลิต.

2.19.15 W.H.Yang and S. Tarng [31]

ในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีของ Tagushi Design ซึ่งเป็นเครื่องมือทางคุณภาพที่มีประสิทธิภาพซึ่งถูก
 นำมาใช้ในการออกแบบการทดลองสำหรับการปรับตั้งค่าตัวแปรให้อยู่ในจุดที่ดีที่สุด (Optimum)
 สำหรับกระบวนการกลึง Orthogonal Array อัตราส่วน Signal-to-Noise (S/N) และการวิเคราะห์
 ความแปรปรวน (ANOVA) ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะการตัดของแท่งเหล็ก S45C
 โดยใช้มีดตัดคาร์ไบด์เคลือบผิว งานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่การออกแบบสำหรับการปรับตั้งค่าตัวแปรที่ดี
 ที่สุด แต่และยังสามารถพบปัจจัยหลักในการตัดที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการตัด ผลจากการทดลอง
 ยืนยันถึงประสิทธิผลของงานวิจัย

Symbol	Cutting Parameter	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
A	Cutting Speed	m min ⁻¹	135	210 ^a	285
B	Feed Rate	mm rev ⁻¹	0.08	0.20 ^a	0.32
C	Dept of Cut	mm	0.6	1.1 ^a	1.6

^a Initial Cutting Parameter.

ตารางที่ 2.8 เงื่อนไขการตัดและระดับที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการวิจัยคือการศึกษาและพัฒนารัตตัดให้ดีขึ้น โดยการประยุกต์ใช้การตัดแบบแห้งและเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดจากการตัดแบบแห้ง ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของมีดตัด ความเรียบผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ดังนั้นในการทดลองจะทำการแปรผันปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน ความสึกหรอของมีดตัด แรงตัด และอุณหภูมิในการตัด การออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการกลึงปอกผิวชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด S45C เพื่อควบคุมความหยาบผิวให้ได้ตามค่าที่กำหนด

3.2 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวชิ้นงาน

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน ความสึกหรอมีดและแรงตัดสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ปัจจัยหลักๆซึ่งได้แก่

1. ปัจจัยเนื่องจากคน (Man)
2. ปัจจัยเนื่องจากเครื่องจักร (Machine)
3. ปัจจัยเนื่องจากวัตถุดิบ (Material)
4. ปัจจัยเนื่องจากวิธีการ (Method)
5. ปัจจัยเนื่องจากสิ่งแวดล้อม (Environment)

งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ปัจจัยเนื่องจาก คน เครื่องจักร วัตถุดิบ และสิ่งแวดล้อมคงที่สามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้ ทั้งนี้เพื่อทำการศึกษาถึงปัจจัยเนื่องจากวิธีการเป็นหลัก ซึ่งเป็นตัวแปรหลักสำคัญในการออกแบบการทดลอง สอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวข้องในการกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง(Cutting Parameter)

3.2.2 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย

จากการคัดเลือกปัจจัยเนื่องจากวิธีการ พบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน ความสึกหรอของมีดและแรงตัด ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการกลึงชิ้นงาน (Cutting Condition) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์การกลึงชิ้นงานสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. อัตราการป้อนตัด
2. ความเร็วตัด
3. ความลึกตัด

3.2.3 การกำหนดระดับของปัจจัย

การกำหนดระดับของปัจจัย (Level) จะกำหนดเป็นแบบคงที่ โดยอาศัยข้อมูลเชิงเทคนิคของบริษัทผู้ผลิตมีดตัดที่แนะนำจากคู่มือการใช้งานมีดตัดโดยกำหนดให้

- 1 อัตราป้อนตัดจะทำการวิจัย 3 ค่า ดังนี้ 0.15 , 0.175 , 0.20 มิลลิเมตรต่อรอบ
- 2 ความเร็วรอบจะทำการวิจัย 3 ค่า ดังนี้ 150 , 250 , 350 เมตรต่อนาที
- 3 ความลึกในการตัดจะทำการวิจัย 2 ค่า ดังนี้ 0.5 , 0.75 , 1.0 มิลลิเมตร

3.3 ข้อจำกัดในการวิจัย

ในการทดลองจำเป็นต้องใช้เหล็กก้อนและมีดตัดเป็นจำนวนมาก ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการทดลองสูง ใน 1 การทดลองจะต้องเสียค่าใช้จ่ายหลักคือเหล็กก้อน และมีดตัด ซึ่งคิดเป็น 3000 บาท/ก้อน และ 100 บาท/คมมีด คิดเป็นเงินประมาณ 3100 บาท/การทดลอง และเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทดลองในครั้งนี้ซึ่งคือ การศึกษาพารามิเตอร์ในการตัดที่เหมาะสมโดยประยุกต์วิธีการตัดแบบแห้ง ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ผู้ทำการวิจัยจะไม่ทำการทดลองในแต่ละเงื่อนไขซ้ำ

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece Material) ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน S45C มีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร และยาว 300 มิลลิเมตร สำหรับตัดให้ได้ปริมาตรตามที่ต้องการโดยทำการกลึงปอกผิวส่วนที่มีความแข็งส่วนนอกออก



รูปที่ 3.1 แสดงเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

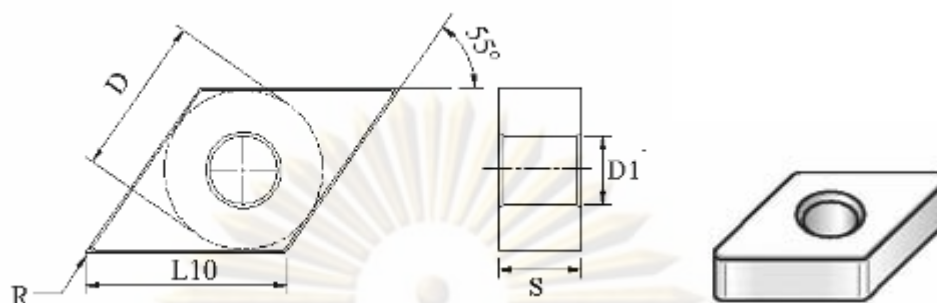
3.4.2 วัสดุชิ้นงาน (Workpiece material) ชิ้นงานทดสอบเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน S45C มีลักษณะทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร และยาว 300 มิลลิเมตร สำหรับวัดความหยาบผิวเมื่อครบที่ปริมาตรหนึ่งๆ



รูปที่ 3.2 แสดงเหล็กที่ใช้ในการวัดความหยาบผิว

3.4.3 เม็ดมีดกลึง (Insert) เม็ดมีดที่ใช้ในการทดลองเป็นของ Kennametal รุ่น DNMG144FNKC9110 เป็นมีดกลึงสำหรับกลึงละเอียด





รูปที่ 3.3 แสดงเม็ดมิดที่ใช้ในการทดลอง

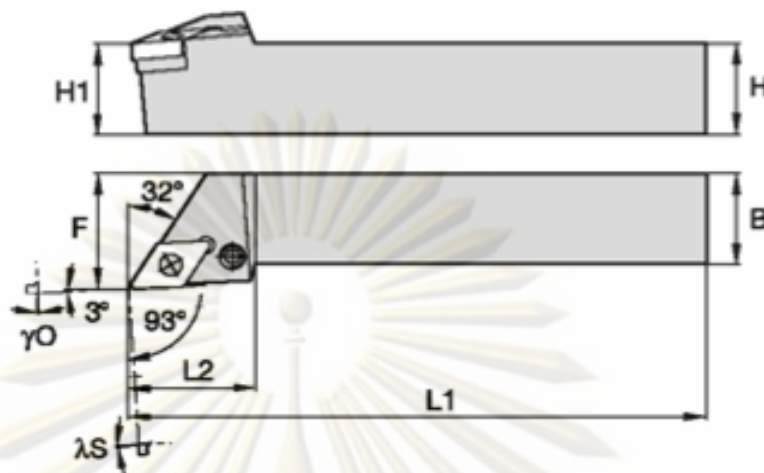
ISO Catalog Number	ANSI Catalog Number	Dimensions									
		D		L10		S		R		D1	
		inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm
DNMG150604	DNMG441	1/2	12.70	0.61	15.50	1/4	6.35	1/64	0.4	0.203	5.16
FN	FN										

ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดเม็ดมิดที่ใช้ในการทดลอง

3.4.4 ด้ามมิด (Tool Holder) ที่ใช้ในการทดลองเป็นของ Kennametal รุ่น

PDJNR2525M15











รูปที่ 3.4 แสดงค้ำมิดที่ใช้ในการทดลอง

KENLEVER Toolholders/ Kenloc Insert

Catalog Number (Right hand/ Left hand)	H= H1	B	F	L1	L2	FA	L1A	λS°	$\gamma 0^\circ$
PDJNR2525M15	25	25	32,0	150	36,0	-	-	-7,0	-6,0

						
Gage Insert	Shim	Shim Pin	Pin Punch	Lever	Lever Screw	Torx Plus
DN..150608	512.153	513.023	515.018	511.024	514.128	15 IP

ตารางที่ 3.2 แสดงขนาดค้ำมิดและส่วนประกอบต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.5 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Pyrometer, Raytek :RAYFA2BCF13)



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Pyrometer)

3.4.6 เครื่องจักรและอุปกรณ์วัดแรงตัดที่ใช้ในการทดลอง

(อธิบายเพิ่มเติมในภาคผนวก ก.)

3.4.6.1 เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning Machine) ของ Mazak รุ่น Quick Turn

Nexus200MY



รูปที่ 3.6 แสดงเครื่องกลึง CNC ที่ใช้ในการทดลอง

3.4.6.2 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ของ Kister รุ่น 9720 สำหรับวัดแรงตัด

ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ของ Kister สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด



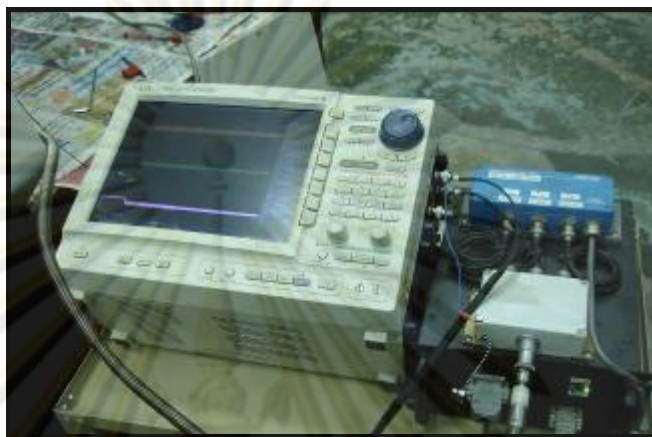
รูปที่ 3.7 ไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer)



รูปที่ 3.8 ชาร์จแอมป์ไฟเออร์ (Charge Amplifier)

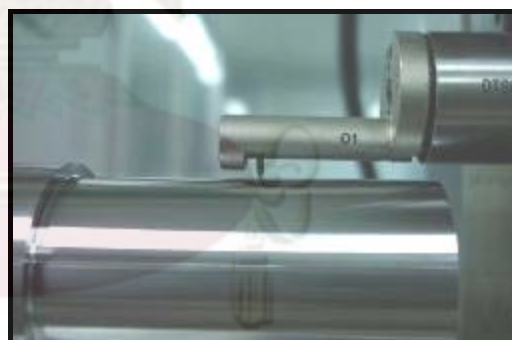
ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.6.3 ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ของ Yokokawa สำหรับแสดงผล
สัญญาณแรงตัด



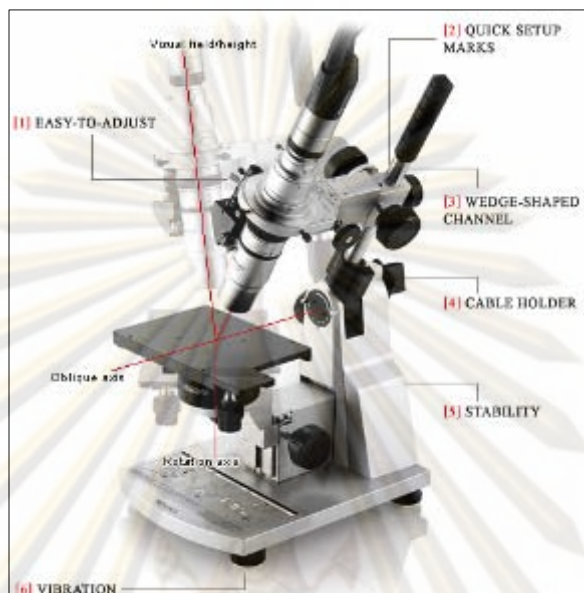
รูปที่ 3.9 ออสซิลโลสโคป(Oscilloscope)

3.4.7 เครื่องวัดความเรียบผิว (Roughness Tester)



รูปที่ 3.10 เครื่องวัดความเรียบผิว (Roughness Tester)

3.4.8 ไมโครสโคป (Microscope) สำหรับวัดความลึกหรือของเม็ดมีด



รูปที่ 3.11 เครื่องวัดความลึกหรือของเม็ดมีด (Microscope)

3.4.9 เครื่องมือวัดขนาดชิ้นงาน (Vernier Calipers)



รูปที่ 3.12 เครื่องวัดขนาดของชิ้นงาน (Vernier Calipers)

3.4.10 ไฟฉายของ Mag-Lite (Mag-Lite Flashlight)



รูปที่ 3.13 ไฟฉายของ Mag-Lite (สำหรับปรับตั้งระยะโฟกัสของเครื่องวัดอุณหภูมิ)

3.5 ขั้นตอนดำเนินการทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล

การทดลองเพื่อหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุด คือการหาเงื่อนไขการตัดที่ให้ความหยาบผิว (Rz) ชิ้นงานมีค่าต่ำ ไม่เกิน 12.5 ไมโครเมตร หรือ (Ra) ชิ้นงานมีค่าต่ำ ไม่เกิน 3.125 ไมโครเมตร ตาม JIS B0601 (1982) ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความเรียบผิวก็คือ Roughness Tester โดยการใช้เครื่อง CNC Turning แล้วหาเงื่อนไขการตัดที่สามารถตัดเหล็กได้นานที่สุดโดยที่ความหยาบผิวชิ้นงานสูงสุดไม่เกินค่ากำหนด แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านวัสดุดิบ และอุปกรณ์ในการวัดชิ้นงาน ซึ่งไม่สามารถวัดความหยาบผิวชิ้นงานได้ตลอดปริมาตรการตัด ทำให้ผู้วิจัยต้องทำการวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานทุกๆ ปริมาตรการกลึง 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วทำการหาช่วงปริมาตรการตัดที่เหมาะสม และนำแต่ละเงื่อนไขการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้

ในการวิเคราะห์เบื้องต้นก่อนจะนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วย Anova จึงทำการหาปริมาตรการกลึงเพื่อที่จะนำข้อมูลผลตอบต่างที่ปริมาตรการกลึงหนึ่งๆ มาทำการวิเคราะห์โดยเลือกปริมาตรการกลึง (Chip Volume) ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลทางสถิติ โดยการสังเกตค่าความหยาบผิวเฉลี่ยจากกราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect Plot) หลังที่เลือกปริมาตรการกลึง (Chip Volume) ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแล้ว ก็จะนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยการออกแบบการทดลอง

3.6 ขั้นตอนการทำการทดลอง

1 การเตรียมชิ้นงาน (Workpiece) นำเหล็กท่อน (Ingot) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร ยึดจับด้วยปากจับ (Chuck) ยันศูนย์กลางชิ้นงานแล้วทำการปกฝิวนอกที่มีความแข็งแรงกว่าปกติทิ้งไป

2. การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง (Dynamometer) และเครื่องวัดอุณหภูมิ (Pyrometer)

2.1 การติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง

- ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง (Dynamometer) เข้ากับชุดป้อมมีด (Turret) ของเครื่องกลึง

- เชื่อมต่อสายเซนเซอร์วัดแรงติดเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) เพื่อทำการขยายสัญญาณ จากนั้นต่อเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องออสซิลอสโคป (Oscilloscope)

- ติดตั้งเม็ดมีดเข้ากับด้ามมีดแล้วนำไปจับยึดเข้ากับชุดจับยึดที่ออกแบบมาเพื่อติดตั้งกับเซนเซอร์วัดแรงตัด

- การปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลอสโคป ให้ใช้ค่า Low-Pass Filter 50 KHz , Sampling Rate 100 Ks/s และ Record Length 1M และจากข้อมูลที่อ่านได้จากการทดลอง ซึ่งอยู่ในหน่วยโวลต์ ต้องนำมาทำการแปลงหน่วยในส่วนของสัญญาณแรงตัด

- แรงตัดในแนวรัศมี (Radial Force) = V_x (Volt) x 600 (N/Volt)

- แรงตัดในแนวรัศมี (Feed Force) = V_y (Volt) x 600 (N/Volt)

- แรงตัดหลัก (Main Force) = V_z (Volt) x 1,200 (N/Volt)

2.2 การติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ

- ทำการติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิ (Pyrometer) ยึดด้วยน็อตหกเหลี่ยมเข้ากับชุดจับยึดของไดนาโมมิเตอร์ที่ได้ติดตั้งอยู่ก่อนหน้านี้

- ทำการปรับตั้งระยะโฟกัสของเครื่องวัดอุณหภูมิ ซึ่งมีค่าระยะ 102 มิลลิเมตร. โดยใช้หลอดไฟฉายของ Mag-Lite ซึ่งมีความเข้มของแสงไฟที่สูงในการปรับตั้งระยะอุณหภูมิให้ใช้ส่วนที่เป็นหลอดไฟ (Lamp) โดยถอดฝาครอบท้ายออก (การปรับตั้งระยะให้ดูระยะ โฟกัสที่ภาคผนวกแนบท้าย)

- เนื่องขนาดของโฟกัส (Focussed Spot Size) มีขนาดเล็กมาก กล่าวคือ 3 มิลลิเมตร ที่ระยะคงที่ 102 มิลลิเมตร (Fixed Focus) การปรับตั้งระยะแต่ละครั้งก่อนข้างจะต้องใช้ความละเอียดของผู้ใช้งานเป็นหลัก (ดูรายละเอียดที่ภาคผนวก)

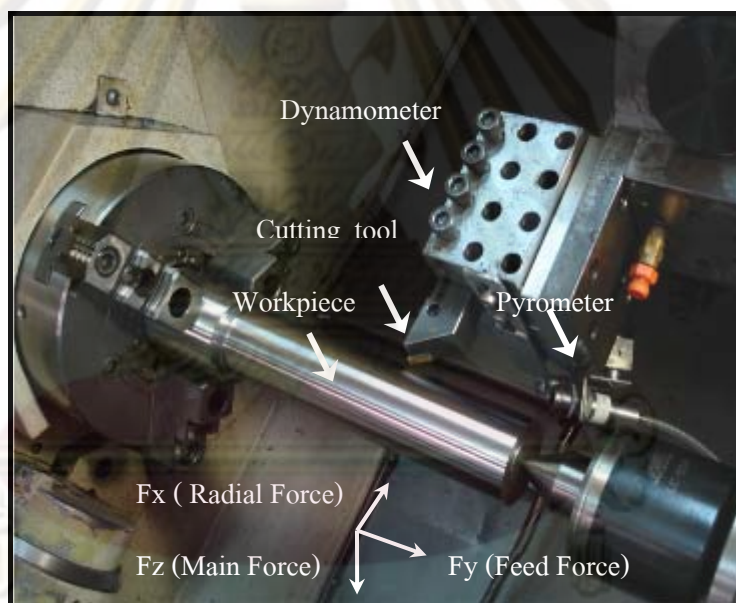
3 เมื่อขึ้นชิ้นงานเรียบร้อยแล้วจึงทำการเขียนโปรแกรมลงบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีเพื่อตัดชิ้นงานให้ได้ปริมาตรที่ต้องการ แล้วจึงติดตั้งมิดตัด

4 ทำการกลึงปอกผิวด้วยเงื่อนไขการตัดในตารางที่ 3.1

5 ทุกๆการตัดที่ปริมาตร 0, 500, 1,000, 1,500 และ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรจะทำการวัดความสึกหรอของมิดตัด ความหยาบผิวของชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

5 เมื่อกลึงชิ้นงานจนถึงปริมาตร 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร หรือมิดตัดสึกหรอจนไม่สามารถใช้งานได้ก็จะทำการเปลี่ยนมิดตัดและทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดต่อไป

6 บันทึกผลการทดลองในตารางที่ 3.2 เขียนกราฟระหว่างปริมาตรการตัดกับผลตอบต่างๆ คือความสึกหรอของมิดตัด ความเรียบผิวชิ้นงาน แรงตัด ที่เงื่อนไขการทดลองต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการตัดด้วยเงื่อนไขต่างๆ



รูปที่ 3.14 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลอง



รูปที่ 3.15 แสดงตำแหน่งจุดที่วัดอุณหภูมิ

3.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการตัดแบบแห้ง



รูปที่ 3.16 รูปแสดงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน[27]

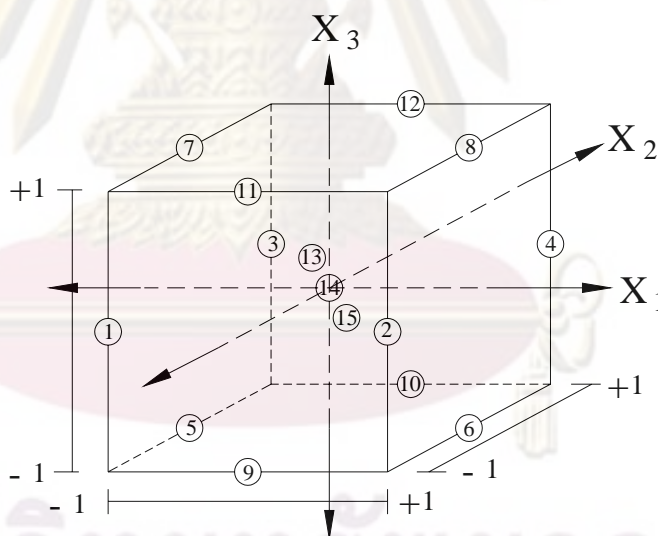
จากรูปแสดงให้เห็นถึงว่าในกระบวนการตัดแบบแท่งนั้นมีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณาประกอบซึ่งมีความสำคัญเชื่อมโยงกับกระบวนการ เจื่อนไขการตัด วัสดุชิ้นงานทดสอบ มีดตัด เป็นต้น

3.8 การออกแบบการทดลอง

เมื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษากลับแล้ว นำไปออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้รูปแบบของการทดลองดังนี้

3.8.1 การทดลองแบบ Box- Behnken Design

การทดลองนี้เป็นการทดลองปัจจัยที่ 3 ระดับ (3-Level Design) ในการสร้างสมการตัวแบบโดยใช้หลักการของการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 2^2 ผสมกับจุดกึ่งกลาง (Central Point)



ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 3.17 รูปแบบเลขาคณิตของแผนการทดลอง Box-Behnken ที่ใช้ในการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปัจจัย/หน่วย	ระดับการตั้งค่า			สัญลักษณ์
	ต่ำ (-1)	กลาง (0)	สูง (1)	
1.ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	150	250	350	X_1
2.อัตราป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)	0.15	0.175	0.20	X_2
3. ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	0.5	0.75	1.0	X_3

ตารางที่ 3.3 แสดงระดับของปัจจัยและสัญลักษณ์ที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นนี้ ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ชื่อ Minitab Release 14 เป็นเครื่องมือในการออกแบบการทดลองแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ไม่มีการทำซ้ำเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านทรัพยากร และเป็นการทำแบบสุ่มตามตารางที่ 3.4 ซึ่งมีจำนวนครั้งในการทำการทดลองทั้ง 15 การทดลอง โดยในแต่ละการทดลอง มีการบันทึกผลค่าความหยาบผิว โดยแต่ละค่าของความหยาบผิวที่ได้ในตารางมาจากการเฉลี่ยการวัด 10 ค่า แรงที่ใช้ในการตัด การสึกหรอของชิ้นงาน อุณหภูมิที่ใช้ในการตัด ทุกๆ ปริมาณการตัด 4 ระดับ คือ ที่ปริมาตร 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 เมทริกซ์สำหรับการออกแบบการทดลองพร้อมการสุ่มลำดับการทำการทดลอง

Std Order	Run Order	Machining Factor			Ra (μm)	Rz (μm)	Vba (mm)	Vbm (mm)
		Speed (X_1)	Feed Rate (X_2)	Depth of Cut (X_3)				
1	8	-1	-1	0				
2	13	1	-1	0				
3	4	-1	1	0				
4	1	1	1	0				
5	2	-1	0	-1				
6	6	1	0	-1				
7	3	-1	0	1				
8	10	1	0	1				
9	5	0	-1	-1				
10	14	0	1	-1				
11	7	0	-1	1				
12	12	0	1	1				
13	15	0	0	0				
14	9	0	0	0				
15	11	0	0	0				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 เมทริกซ์การออกแบบการทดลองพร้อมการสุ่มลำดับการทำการทดลอง (ต่อ)

Std Order	Run Order	Machining Factor			Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fy/Fz	Temp (°C)
		Speed (X ₁)	Feed Rate (X ₂)	Depth of Cut (X ₃)					
1	8	-1	-1	0					
2	13	1	-1	0					
3	4	-1	1	0					
4	1	1	1	0					
5	2	-1	0	-1					
6	6	1	0	-1					
7	3	-1	0	1					
8	10	1	0	1					
9	5	0	-1	-1					
10	14	0	1	-1					
11	7	0	-1	1					
12	12	0	1	1					
13	15	0	0	0					
14	9	0	0	0					
15	11	0	0	0					

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.9 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.9.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมีกันด้วยหลายชนิด แต่ผู้วิจัยเลือกใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab Release 14 เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ได้เป็นอย่างดี สำหรับการออกแบบการทดลองโดยวิธีพินิจผลตอบ และใช้กันกันแพร่หลายในงานวิจัยประเภทต่างๆ

3.9.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการออกแบบการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการออกแบบการทดลอง จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองจะ ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Anova) ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่า P-Value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P-Value นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่า P-Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแต่ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่ามากกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองโดยในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05 ทั้งนี้การพิจารณาทั้ง อิทธิพลหลัก (Main Effect) และ ปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction Effect) ว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นหรือไม่

3.9.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ ซึ่งทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งค่าส่วนตกค้างแต่ละค่าควรเป็นอิสระซึ่งกันและกันทั้งนี้ต้องได้จากการทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม โดยจะทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ถ้าหากข้อมูลมีความเป็นอิสระ รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไปไม่เป็นแนวโน้ม (Trend) นั่นก็หมายความว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

3.9.3 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ

โดยการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นการพล็อตค่าส่วนตกค้าง ลงบนกราฟที่เรียกว่า Normal Probability Paper ซึ่งพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่า

ความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (K-1/2)^n$ โดย $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วน
 ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน

3.9.4 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยทำการพล็อต
 กราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกน
 ตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความ
 สม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือ
 โครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยทำการ
 พล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่
 บนแกนตั้ง และระดับของปัจจัยอยู่บนแกนนอน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน
 หรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก
 แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับ (Megaphone) แสดงว่าข้อมูล
 นั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทั้งนี้
 เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยการตัด (อัตราป้อนตัด ความเร็วตัด ความลึกตัด) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการตัด (ความลึกหรือมีดตัด ความหยาบผิวชิ้นงาน แรงตัด และอุณหภูมิในการตัด) จะแยกวิเคราะห์เป็นหัวข้อต่างๆตามพารามิเตอร์ในการตัดต่อผลตอบดังนี้

4.1 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 โดยมีปัจจัยและผลตอบที่ทำการพิจารณาดังต่อไปนี้

ปัจจัยในการตัด

1. ปัจจัย f คือ อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)
2. ปัจจัย v คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)
3. ปัจจัย d คือ ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

ผลตอบของการตัด

1. ผลตอบ R_a คือ ความหยาบผิวชิ้นงานเฉลี่ย (ไมโครเมตร)
2. ผลตอบ R_z คือ ความหยาบผิวชิ้นงานสูงสุด (ไมโครเมตร)
3. ผลตอบ F_y/F_z คือ สัดส่วนแรงตัด
4. ผลตอบ T คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลบซม.

No.	Name of Cutting condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	Ra (μm)	Rz (μm)	Vba (mm)	Vbm (mm)
1	150_0.150_0.75_0	2.2334	9.4044	0.0000	0.0000
	150_0.150_0.75_500	2.4424	11.1698	0.05834	0.09467
	150_0.150_0.75_1000	1.6776	9.5118	0.11188	0.11954
	150_0.150_0.75_1500	2.3103	11.2144	0.11234	0.13540
	150_0.150_0.75_2000	N/A	N/A	N/A	N/A
2	350_0.150_0.75_0	2.2665	9.5703	0.0000	0.0000
	350_0.150_0.75_500	2.9871	10.2255	0.14918	0.15206
	350_0.150_0.75_1000	2.5981	10.1893	0.18360	0.19702
	350_0.150_0.75_1500	1.9419	9.2034	0.21033	0.24098
	350_0.150_0.75_2000	2.3069	9.2574	0.23239	0.26680
3	150_0.20_0.75_0	3.5913	14.5798	0.0000	0.0000
	150_0.20_0.75_500	3.7229	16.0793	0.0641	0.0803
	150_0.20_0.75_1000	3.7653	15.9534	0.1014	0.1109
	150_0.20_0.75_1500	3.7495	14.6960	0.1272	0.1463
	150_0.20_0.75_2000	3.6009	13.4272	0.1970	0.1597
4	350_0.20_0.75_0	5.3386	20.3050	0.0000	0.0000
	350_0.20_0.75_500	3.4471	8.4336	0.1607	0.1798
	350_0.20_0.75_1000	3.8336	20.000	0.1846	0.1941
	350_0.20_0.75_1500	4.6345	13.1508	0.2190	0.2687
	350_0.20_0.75_2000	9.5456	29.6602	0.4036	0.4810
5	150_0.175_0.50_0	3.2924	14.3880	0.0000	0.0000
	150_0.175_0.50_500	2.7411	11.6800	0.1511	0.1558

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลบซม.

No.	Name of Cutting condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	Ra (μm)	Rz (μm)	Vba (mm)	Vbm (mm)
	150_0.175_0.50_1000	2.6678	12.4840	0.1577	0.1690
	150_0.175_0.50_1500	2.2421	10.3360	0.1720	0.1735
	150_0.175_0.50_2000	2.0345	10.0760	0.1859	0.1901
6	350_0.175_0.50_0	2.9461	12.9440	0.0000	0.0000
	350_0.175_0.50_500	1.9386	11.3960	0.1901	0.1965
	350_0.175_0.50_1000	2.5959	12.7120	0.2163	0.2220
	350_0.175_0.50_1500	2.9403	13.7440	0.2897	0.3481
	350_0.175_0.50_2000	N/A	N/A	N/A	N/A
7	150_0.175_1.00_0	2.7695	14.6520	0.0000	0.0000
	150_0.175_1.00_500	2.8256	14.1440	0.0921	0.0970
	150_0.175_1.00_1000	2.6209	12.1200	0.1120	0.1309
	150_0.175_1.00_1500	2.4001	12.7010	0.1897	0.1943
	150_0.175_1.00_2000	2.4515	13.8760	0.1976	0.2011
8	350_0.175_1.00_0	2.8239	14.9720	0.0000	0.0000
	350_0.175_1.00_500	2.1701	12.6800	0.1976	0.2019
	350_0.175_1.00_1000	2.2826	11.0840	0.2080	0.2128
	350_0.175_1.00_1500	3.3159	17.8520	0.2584	0.2705
	350_0.175_1.00_2000	N/A	N/A	N/A	N/A
9	250_0.15_0.50_0	1.8259	8.2200	0.0000	0.0000
	250_0.15_0.50_500	1.8080	8.4040	0.1279	0.1471
	250_0.15_0.50_1000	1.8107	8.8640	0.1721	0.1833

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลบชม.(ต่อ)

No.	Name of Cutting condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	Ra (μm)	Rz (μm)	Vba (mm)	Vbm (mm)
	250_0.15_0.50_1500	1.8960	10.0115	0.1977	0.2016
	250_0.15_0.50_2000	1.1888	8.6840	0.2023	0.2038
10	250_0.20_0.50_0	3.6128	15.0745	0.0000	0.0000
	250_0.20_0.50_500	3.9089	16.5144	0.1272	0.1741
	250_0.20_0.50_1000	4.5323	10.0802	0.1320	0.1874
	250_0.20_0.50_1500	4.5449	9.4898	0.1598	0.1951
	250_0.20_0.50_2000	4.3764	17.7857	N/A	N/A
11	250_0.15_1.00_0	2.1314	10.1533	0.0000	0.0000
	250_0.15_1.00_500	1.9647	9.4933	0.0900	0.1102
	250_0.15_1.00_1000	2.0966	10.6853	0.1130	0.1353
	250_0.15_1.00_1500	2.2921	11.6453	0.1356	0.1578
	250_0.15_1.00_2000	1.7082	9.2680	0.1526	0.1839
12	250_0.20_1.00_0	3.9056	16.3486	0.0000	0.0000
	250_0.20_1.00_500	3.7750	14.9047	0.1167	0.1415
	250_0.20_1.00_1000	3.9397	14.3039	0.1913	0.2142
	250_0.20_1.00_1500	4.1146	14.4412	0.2066	0.2419
	250_0.20_1.00_2000	3.7902	15.9976	0.2152	0.2620
13	250_0.175_0.75_0	2.9133	13.660	0.0000	0.0000
	250_0.175_0.75_500	2.6066	10.7250	0.1310	0.1623
	250_0.175_0.75_1000	2.8895	14.3066	0.1855	0.2143
	250_0.175_0.75_1500	2.8669	17.9993	0.2018	0.2439
	250_0.175_0.75_2000	3.3593	13.6258	0.2162	0.2592

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลบชม.(ต่อ)

No.	Name of Cutting Condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	Ra (μm)	Rz (μm)	Vba (mm)	Vbm (mm)
14	250_0.175_0.75_0	3.1053	13.6600	0.0000	0.0000
	250_0.175_0.75_500	3.2250	12.6610	0.1290	0.1234
	250_0.175_0.75_1000	2.9637	11.6835	0.1482	0.1817
	250_0.175_0.75_1500	3.1063	11.8960	0.1673	0.1960
	250_0.175_0.75_2000	3.2608	13.4010	0.1711	0.2018
15	250_0.175_0.75_0	3.3154	13.4725	0.0000	0.0000
	250_0.175_0.75_500	3.2250	11.4543	0.1082	0.1421
	250_0.175_0.75_1000	3.1637	11.7535	0.1343	0.1653
	250_0.175_0.75_1500	2.9956	12.5427	0.1532	0.1786
	250_0.175_0.75_2000	3.2608	13.3019	0.1712	0.2121

หมายเหตุ 1) N/A: Not Available หมายถึงไม่มีค่า เนื่องจากมีดตัดชำรุดจนไม่สามารถตัดได้

2) Name of Cutting Condition เรียงตามลำดับดังนี้ ความเร็วตัด (เมตร/นาที) _ อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ) _ ความลึกตัด (มิลลิเมตร) _ ปริมาณการตัดโลหะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3) F_x = แรงตัดในแนวแกน (Feed Force) F_y =แรงตัดในแนวรัศมี(Radial Force) และ F_z =แรงตัดหลัก (Main Force)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดคปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลบซม.(ต่อ)

No.	Name of Cutting Condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fy/Fz	Temperature (°C)
1	150_0.150_0.75_0	138	195	310	0.629032	438.2
	150_0.150_0.75_500	128	175	300	0.583333	458.2
	150_0.150_0.75_1000	138	195	310	0.629032	478.2
	150_0.150_0.75_1500	130	189	276	0.684783	457.0
	150_0.150_0.75_2000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
2	350_0.150_0.75_0	123	156	299	0.521739	487.0
	350_0.150_0.75_500	156	153	290	0.527586	491.6
	350_0.150_0.75_1000	166	165	286	0.576923	496.2
	350_0.150_0.75_1500	123	156	299	0.521739	484.1
	350_0.150_0.75_2000	208	199	306	0.650327	511.7
3	150_0.20_0.75_0	164	216	393	0.549618	435.6
	150_0.20_0.75_500	162	210	388	0.541237	425.4
	150_0.20_0.75_1000	156	208	411	0.506083	421.7
	150_0.20_0.75_1500	164	216	393	0.549618	497.3
	150_0.20_0.75_2000	165	210	411	0.510948	521.8
4	350_0.20_0.75_0	150	193	372	0.518817	444.4
	350_0.20_0.75_500	175	205	381	0.538058	417.3
	350_0.20_0.75_1000	209	199	382	0.520942	507.8
	350_0.20_0.75_1500	150	193	381	0.506561	515.4
	350_0.20_0.75_2000	536	467	549	0.850638	545.9
5	150_0.175_0.50_0	165	139	276	0.503622	446.6
	150_0.175_0.50_500	149	147	289	0.508651	460.5

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลบซม (ต่อ)

No.	Name of Cutting Condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _y /F _z	Temperature (°C)
	150_0.175_0.50_1000	161	148	297	0.498316	452.7
	150_0.175_0.50_1500	111	123	226	0.544248	474.1
	150_0.175_0.50_2000	136	118	239	0.493724	478.2
6	350_0.175_0.50_0	283	268	283	0.946997	489.8
	350_0.175_0.50_500	149	142	264	0.537879	499.4
	350_0.175_0.50_1000	232	166	270	0.614815	490.5
	350_0.175_0.50_1500	133	130	240	0.541667	494.3
	350_0.175_0.50_2000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
7	150_0.175_1.00_0	168	249	466	0.534335	452.7
	150_0.175_1.00_500	149	244	441	0.553287	468.2
	150_0.175_1.00_1000	152	240	452	0.530973	474.4
	150_0.175_1.00_1500	151	256	449	0.570156	461.0
	150_0.18_1.00_2000	161	237	448	0.529018	457.6
8	350_0.175_1.00_0	475	384	466	0.824034	487.9
	350_0.175_1.00_500	190	262	465	0.563441	469.4
	350_0.175_1.00_1000	274	270	440	0.613637	485.7
	350_0.175_1.00_1500	134	211	383	0.550914	499.0
	350_0.175_1.00_2000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
9	250_0.15_0.50_0	152	108	205	0.526829	452.2
	250_0.15_0.50_500	132	117	204	0.573529	467.0
	250_0.15_0.50_1000	140	125	223	0.560538	472.1
	250_0.15_0.50_1500	122	110	187	0.588235	479.0

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลบซม (ต่อ)

No.	Name of Cutting Condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _y /F _z	Temperature (°C)
	250_0.15_0.50_2000	143	108	204	0.529412	465.2
10	250_0.20_0.50_0	176	129	257	0.501946	487.4
	250_0.20_0.50_500	161	131	258	0.507752	494.2
	250_0.20_0.50_1000	192	143	266	0.537594	519.5
	250_0.20_0.50_1500	138	123	249	0.493976	496.3
	250_0.20_0.50_2000	168	130	266	0.488722	512.7
11	250_0.15_1.00_0	124	237	403	0.588089	410.4
	250_0.15_1.00_500	125	221	389	0.568123	425.6
	250_0.15_1.00_1000	124	231	398	0.580402	454.1
	250_0.15_1.00_1500	130	223	386	0.577720	467.2
	250_0.15_1.00_2000	109	204	376	0.542553	486.2
12	250_0.20_1.00_0	251	313	574	0.545296	434.5
	250_0.20_1.00_500	184	264	491	0.537678	453.9
	250_0.20_1.00_1000	249	265	477	0.555556	464.1
	250_0.20_1.00_1500	148	243	450	0.540000	472.0
	250_0.20_1.00_2000	233	259	478	0.541841	467.1
13	250_0.175_0.75_0	199	188	358	0.525140	448.2
	250_0.175_0.75_500	199	202	343	0.588921	450.5
	250_0.175_0.75_1000	223	191	344	0.555233	467.2
	250_0.175_0.75_1500	135	177	340	0.520588	491.6
	250_0.175_0.75_2000	217	192	354	0.542373	512.7

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 2,000 ลบซม.(ต่อ)

No.	Name of Cutting condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)	F _y /F _z	Temperature (°C)
14	250_0.175_0.75_0	135	177	332	0.533133	481.7
	250_0.175_0.75_500	147	170	340	0.500000	481.7
	250_0.175_0.75_1000	131	130	407	0.319410	492.4
	250_0.175_0.75_1500	131	160	327	0.489297	493.6
	250_0.175_0.75_2000	122	150	327	0.458716	518.9
15	250_0.175_0.75_0	128	149	327	0.455657	495.9
	250_0.175_0.75_500	147	170	340	0.500000	481.7
	250_0.175_0.75_1000	131	130	407	0.319410	492.4
	250_0.175_0.75_1500	133	165	327	0.504587	498.3
	250_0.175_0.75_2000	122	150	327	0.458716	518.8

หมายเหตุ 1) N/A: Not Available หมายถึงไม่มีค่า เนื่องจากมีดตัดชำรุดจนไม่สามารถตัดได้

2) Name of Cutting Condition เรียงตามลำดับดังนี้ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)_ อัตราการป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)_ ความลึกตัด (มิลลิเมตร)_ ปริมาตรการตัดโลหะ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

3) F_x = แรงตัดในแนวแกน (Feed Force) F_y =แรงตัดในแนวรัศมี(Radial Force) และ F_z=แรงตัดหลัก (Main Force)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความหยาบผิวที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

เนื่องจากตัวแปรผลตอบของค่าความหยาบผิวมีอยู่ด้วยกัน 2 ค่า จึงทำการวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ของผลตอบว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยสามารถดูได้จากค่า R-Sq ถ้าค่า R-Sq มีค่าสูงแสดงว่าค่า Rz และ Ra มีความสัมพันธ์กัน ไม่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ค่าผลตอบของความหยาบผิวทั้งสองค่า และถ้าค่า R-Sq มีค่าต่ำแสดงว่าค่า Rz และค่า Ra ไม่มีความสัมพันธ์กันจะต้องนำผลตอบทั้งสองมาวิเคราะห์

No	Ra	Rz	No	Ra	Rz
1	2.2334	9.4044	37	2.7411	11.6800
2	2.4424	11.1698	38	2.6678	12.4840
3	1.6776	9.5118	39	2.2421	10.3360
4	2.3103	11.2144	40	2.0345	10.0760
5	2.2665	9.5703	41	2.9461	12.9440
6	2.9871	10.2255	42	1.9386	11.3960
7	2.5981	10.1893	43	2.5959	12.7120
8	1.9419	9.2034	44	2.9403	13.7440
9	2.3069	9.2574	45	2.7695	14.6520
10	3.5913	14.5798	46	2.8256	14.1440
11	3.7229	16.0793	47	2.6209	12.1200
12	3.7653	15.9534	48	2.4001	12.7010
13	3.7495	14.6960	49	2.4515	13.8760
14	3.6009	13.4272	50	2.8239	14.9720
15	5.3386	20.3050	51	2.1701	12.6800
16	3.4471	8.4336	52	2.2826	11.0840
17	3.8336	20.000	53	3.3159	17.8520
18	4.6345	13.1508	54	1.8259	8.2200
19	9.5456	29.6602	55	1.8080	8.4040
20	3.2924	14.3880	56	1.8107	8.8640

21	1.8960	10.0115		57	3.7902	15.9976
22	1.1888	8.6840		58	2.9133	13.660
23	3.6128	15.0745		59	2.6066	10.7250
24	3.9089	16.5144		60	2.8895	14.3066
25	4.5323	10.0802		61	2.8669	17.9993
26	4.5449	9.4898		62	3.3593	13.6258
27	4.3764	17.7857		63	3.1053	13.66
28	2.1314	10.1533		64	3.225	12.661
29	1.9647	9.4933		65	2.9637	11.6835
30	2.0966	10.6853		66	3.1063	11.896
31	2.2921	11.6453		67	3.2608	13.401
32	1.7082	9.2680		68	3.3154	13.4725
33	3.9056	16.3486		69	3.225	11.661
34	3.7750	14.9047		70	3.1637	11.7535
35	3.9397	14.3039		71	2.9956	12.5427
36	4.1146	14.4412		72	3.2608	13.3019

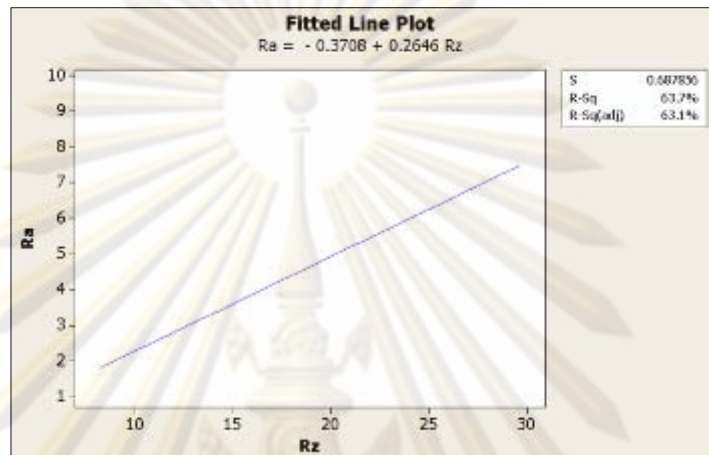
ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ของผลตอบระหว่าง R_a กับ R_z

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The regression equation is

$$Ra = - 0.3708 + 0.2646 Rz$$

$$S = 0.687856 \quad R\text{-Sq} = 63.7\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 63.1\%$$

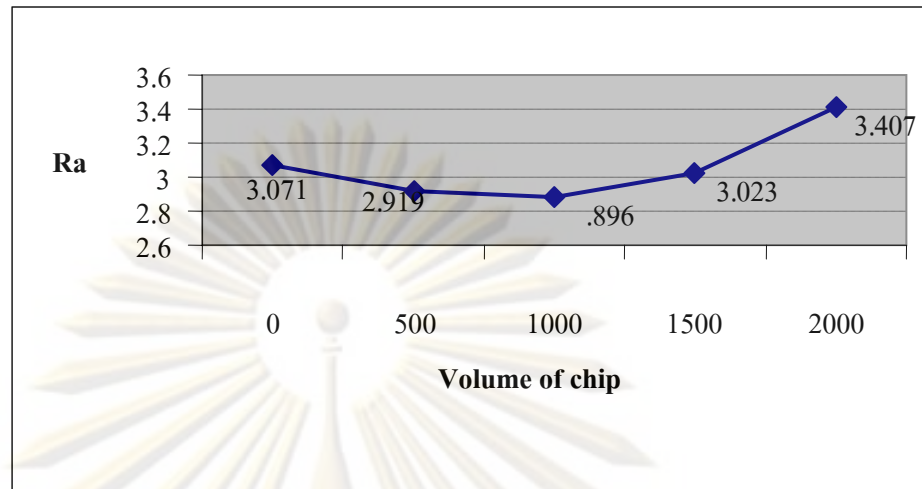


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ของค่า Ra กับ Rz

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ra และ Rz มีความสัมพันธ์กัน โดยดูจากค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 63.1% นั้นหมายความว่า ถ้าค่า Rz หรือ Ra มีการเปลี่ยนแปลงไป ก็จะส่งผลให้ Ra หรือ Rz มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์ผลตอบทั้งสอง ทำการวิเคราะห์แค่ผลตอบตัวใดตัวหนึ่งก็จะสามารถอธิบายผลตอบอีกตัวได้

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะใช้ค่า Ra มาพล็อตเพื่อดูอิทธิพลเนื่องจากปริมาณการกลิ้งตั้งแต่ 0 ลูกบาศก์เซนติเมตร จนถึง 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.2 ในส่วนของความหยาบผิวเฉลี่ยกับปริมาณเหล็กที่ตัด จะพบว่าความหยาบผิวเฉลี่ยเริ่มต้นที่ปริมาตร 0 ลูกบาศก์เซนติเมตรอยู่ที่ 3.07143 ไมโครเมตร หลังจากตัดเหล็กไป 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยลดลงเหลือ 2.91921 ไมโครเมตรและ ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยยังคงลดลงเหลือ 2.88253 ไมโครเมตรที่ปริมาตรการกลิ้ง 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรและเมื่อนำมีดตัดไปกลิ้งชิ้นงานต่ออีกจะพบว่าความหยาบผิวเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นเป็น 3.18920 ไมโครเมตร ที่ปริมาตรกลิ้งชิ้นงานที่ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรและเป็น 3.02340 ไมโครเมตร ที่ปริมาตรกลิ้งชิ้นงานที่ 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเป็น 3.40699 ไมโครเมตร ที่ปริมาตรกลิ้งชิ้นงานที่ 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหยาบผิวเฉลี่ย(Ra) กับ ปริมาตรการกลึง

ปริมาตรการกลึง Volume of Chip (cm ³)	ความหยาบผิวเฉลี่ย Average of Ra (μm)
0	3.07143
500	2.91921
1,000	2.89586
1,500	3.02340
2,000	3.40699

ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความหยาบผิวเฉลี่ยที่ปริมาตรการกลึงต่างๆ

จากผลความหยาบผิวชิ้นงานที่ปริมาตรการกลึงต่างๆกัน แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีดกลึงใหม่จะให้ความหยาบผิวที่สูง และเมื่อกลึงไปสักระยะ ความหยาบผิวชิ้นงานจะลดลง และเมื่อกลึงไปสักระยะหนึ่ง จะทำให้รัศมีงูมูกมีคตัดเพิ่มขึ้น ทำให้ลรอยที่เกิดที่จากการป้อนมีดลดลง ส่งผลให้ความหยาบผิวชิ้นงานลดลงในระยะแรก เมื่อกลึงชิ้นงานต่อไปมีดตัดจะเริ่มสึก จนทำให้ความหยาบผิวชิ้นงานกลับมาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

การใช้งานของมีดตัดกลึงชิ้นงานจะดูจากความหยาบผิวชิ้นงานเป็นหลัก เมื่อกลึงชิ้นงานไป ความหยาบผิวชิ้นงานสูงสุด Rz เท่ากับ 12.5 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นมาตรฐานของความ

หยาบผิวชิ้นงานสูงสุดที่สามารถยอมรับได้ ก็จะหยุดกลึงและเปลี่ยนมีดตัดใหม่ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า Ra และ Rz สมการถดถอยคือ $Ra = -0.3708 + 0.2646 Rz$ ความหยาบผิวเฉลี่ยที่ทำให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานสูงสุด Rz เท่ากับ 12.5 ไมโครเมตรคือ Ra เท่ากับ 2.9367 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นปริมาณการกลึงเหล็กบริเวณ 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.4

การบอกอายุของมีดตัด นอกจากจะกำหนดจากค่า Ra แล้วยังสามารถประมาณค่าได้จากความสึกหรอของมีดตัด โดยการประมาณค่าจากผลตอบที่ปริมาตรการกลึงเหล็กที่ 1,000 ถึง 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนี้

ปริมาตรการกลึง (V ; cm ³)	ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra ; μm)	การสึกหรอของมีดตัดเฉลี่ย (Vba ; mm)
1,000	2.88253	0.156792
1,192.27	2.93670	0.168297
1,500	3.02340	0.186711

ตารางที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของความหยาบผิวเฉลี่ยที่ปริมาตรการกลึงเหล็กที่ 1,000 ถึง 1,500 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 1,500 ลบซม.

No.	Name of Cutting Condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	Ra (μm)	Rz (μm)	Vba (mm)	Vbm (mm)
1	150_0.150_0.75_1500	2.3103	11.2144	0.11234	0.13540
2	350_0.150_0.75_1500	1.9419	9.2034	0.21033	0.24098
3	150_0.20_0.75_1500	3.7495	14.6960	0.1272	0.1463
4	350_0.20_0.75_1500	4.6345	13.1508	0.2190	0.2687
5	150_0.175_0.50_1500	2.2421	10.3360	0.1720	0.1735
6	350_0.175_0.50_1500	2.9403	13.7440	0.2897	0.3481
7	150_0.175_1.00_1500	2.4001	12.7010	0.1897	0.1943
8	350_0.175_1.00_1500	3.3159	17.8520	0.2584	0.2705
9	250_0.15_0.50_1500	1.8960	10.0115	0.1977	0.2016
10	250_0.20_0.50_1500	4.5449	9.4898	0.1598	0.1951
11	250_0.15_1.00_1500	2.2921	11.6453	0.1356	0.1578
12	250_0.20_1.00_1500	4.1146	14.4412	0.2066	0.2419
13	250_0.175_0.75_1500	2.8669	17.9993	0.2018	0.2439
14	250_0.175_0.75_1500	3.1063	11.8960	0.1673	0.1960
15	250_0.175_0.75_1500	2.9956	12.5427	0.1532	0.1786

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองที่เงื่อนไขการตัดต่างๆตลอดปริมาตรเหล็กที่กลึงครบ 1,500 ลบซม. (ต่อ)

No.	Name of Cutting Condition (Cutting Speed_Feed rate_Depth of Cut)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fy/Fz	Temperature (°C)
1	150_0.150_0.75_1500	130	189	276	0.684783	457.0
2	350_0.150_0.75_1500	123	156	299	0.521739	484.1
3	150_0.20_0.75_1500	164	216	393	0.549618	497.3
4	350_0.20_0.75_1500	150	193	381	0.506561	515.4
5	150_0.175_0.50_1500	111	123	226	0.544248	474.1
6	350_0.175_0.50_1500	133	130	240	0.541667	494.3
7	150_0.175_1.00_1500	151	256	449	0.570156	461.0
8	350_0.175_1.00_1500	134	211	383	0.550914	499.0
9	350_0.175_1.00_1500	134	211	383	0.550914	499.0
10	250_0.20_0.50_1500	138	123	249	0.493976	496.3
11	250_0.15_1.00_1500	130	223	386	0.577720	467.2
12	250_0.20_1.00_1500	148	243	450	0.540000	472.0
13	250_0.175_0.75_1500	135	177	340	0.520588	491.6
14	250_0.175_0.75_1500	131	160	327	0.489297	493.6
15	250_0.175_0.75_1500	133	165	327	0.504587	498.3

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

หลังจากคัดเลือกช่วงปริมาตรการกลึงที่จะให้นำมาวิเคราะห์ผลการทดลองแล้ว จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยจะทำการวิเคราะห์ผลตอบต่างๆตามลำดับต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ผลตอบความหยาบผิวชิ้นงานเฉลี่ย R_a
2. การวิเคราะห์ผลตอบสัดส่วนแรงตัด F_y/F_z
3. การวิเคราะห์ผลตอบอุณหภูมิ T

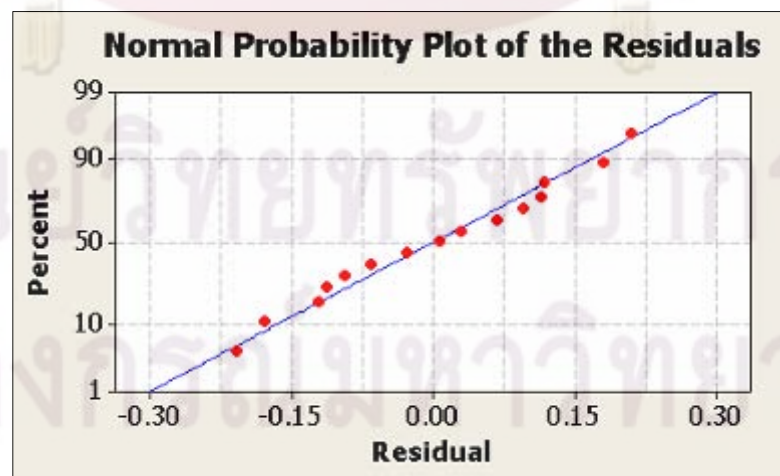
4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความหยาบผิวเฉลี่ย (R_a)

การวิเคราะห์ผลการทดลองของความหยาบผิวเฉลี่ย ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความหยาบผิวเฉลี่ย

4.3.1.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution หรือไม่) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.3 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ



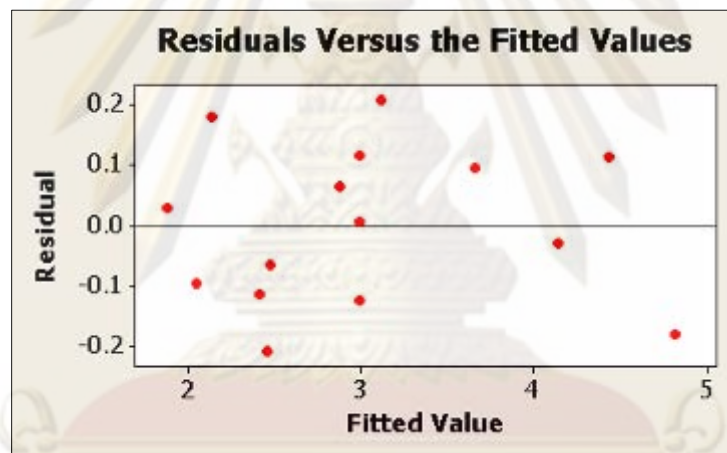
S = 0.2163 R-Sq = 97.9% R-Sq(adj) = 94.2%

รูปที่ 4.3 Normal Probability Plot ของข้อมูลความหยาบผิวเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.3 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลความหยาบผิวเฉลี่ย มีลักษณะประมาณเกือบเป็นเส้นตรง และค่า R-Sq มีค่าสูง แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

4.3.1.2 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าความหยาบผิว (Ra) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.4 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



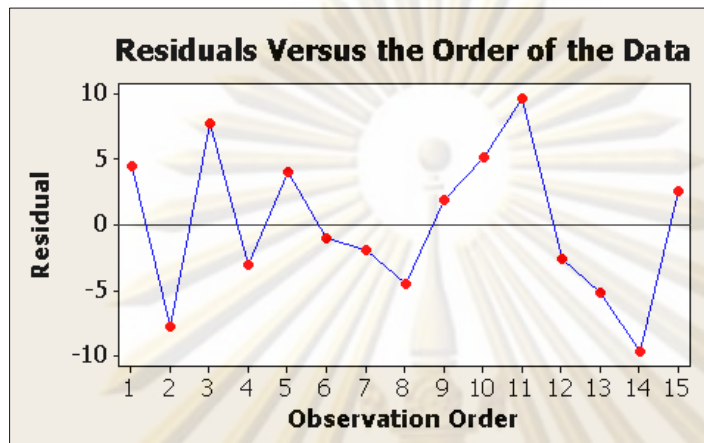
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าความหยาบผิว

จากรูปที่ 4.4 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.1.3 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูป จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะ

เพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลความหยابผิวกับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจาย แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

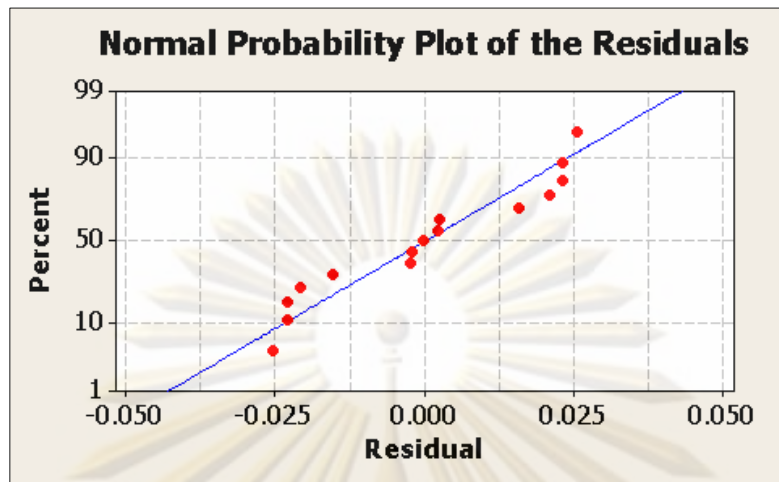
4.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของสัดส่วนแรงตัด (F_y/F_z)

การวิเคราะห์ผลการทดลองของความหยابผิวเฉลี่ย ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

4.3.2.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution หรือไม่) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.6 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ



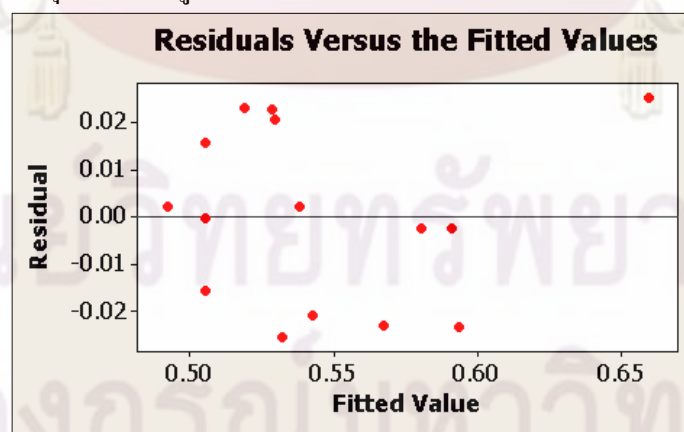
$S = 0.03091$ $R\text{-Sq} = 85.6\%$ $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 59.7\%$

รูปที่ 4.6 Normal Probability Plot ของข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z)

มีลักษณะประมาณเกือบเป็นเส้นตรง และค่า R-Sq มีค่าสูง แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติและเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้

4.3.2 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าความหยาบผิว (R_a) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.7 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



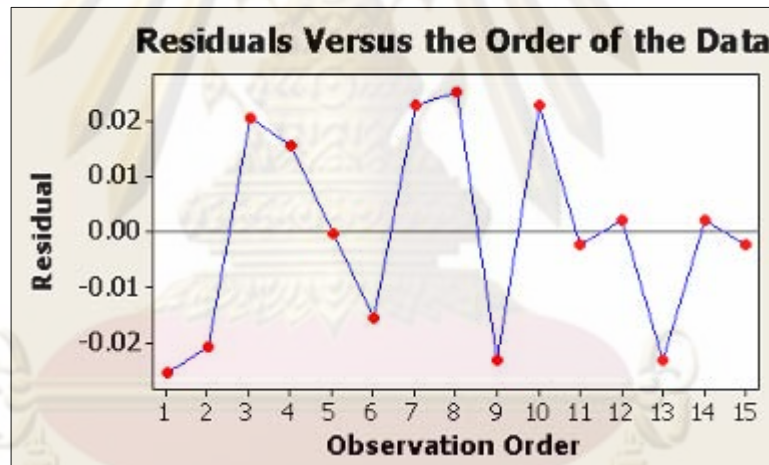
รูปที่ 4.7 ค่า Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตสำหรับค่าข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z)

จากรูปที่ 4.7 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit Value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.3 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูป จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z) กับลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูล Cutting Force Ratio (F_y/F_z) กับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการจัดกระจาย แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของสัดส่วนแรงตัด (T)

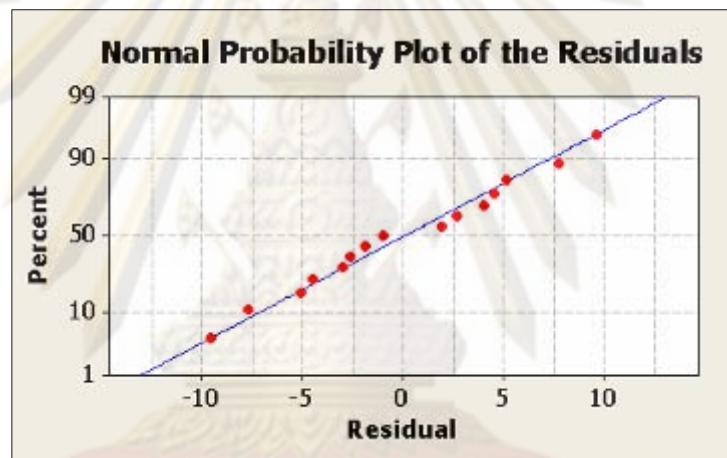
การวิเคราะห์ผลการทดลองของอนุกรม ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

- การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของอุณหภูมิ

4.3.2.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ (Normality)

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution หรือไม่) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.9 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

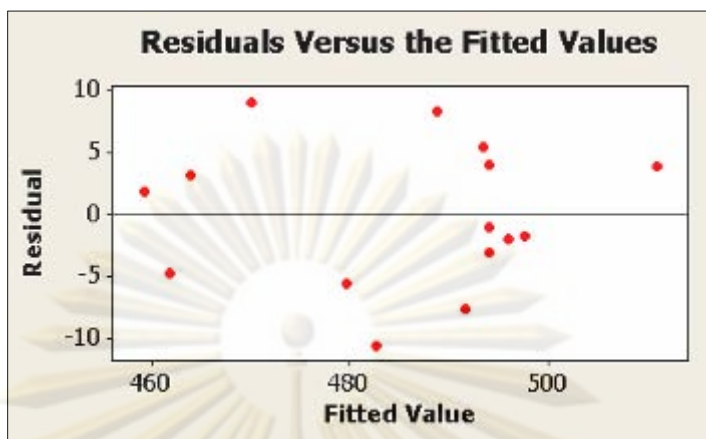


S = 9.437 R-Sq = 88.0% R-Sq(adj) = 66.5%

รูปที่ 4.9 Normal Probability Plot ของข้อมูลอุณหภูมิ(C°)

4.3.2 การทดสอบความเสถียรของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าอุณหภูมิ (T) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.10 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



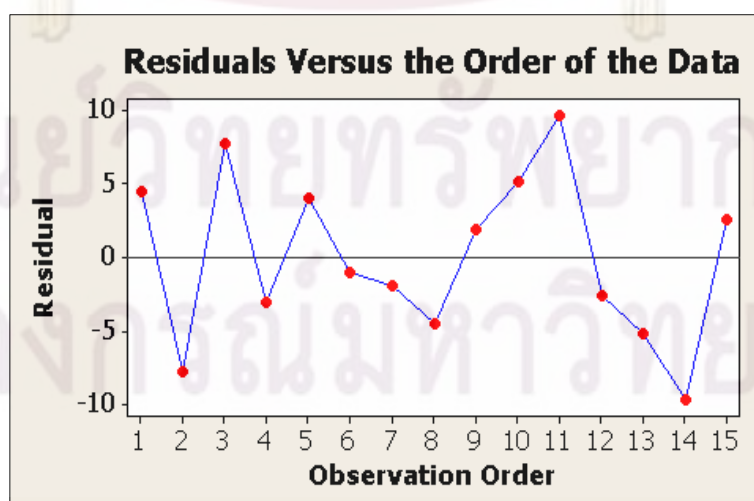
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ Residual ของค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตสำหรับค่าอุณหภูมิ(C°)

จากรูปที่ 4.10จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออกและไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่า ข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.3 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูป จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่ามีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นรอบ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอุณหภูมิ(C°) กับลำดับการทดลอง ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ Residual ของข้อมูลอุณหภูมิ(C°)กับลำดับการทดลอง

จากรูปจะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจัดกระจาย แสดงว่า ข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์ค่า P

4.4.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของความหยาบผิว

1. วิเคราะห์จาก Regression Coefficients for Ra ใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์หาค่า P ของปัจจัยต่างๆ ค่า P ที่ได้ จากโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.4

ปัจจัย	ค่า P
Constant	0.000
Cutting speed	0.018
Feed rate	0.000
Depth of cut	0.451
Cutting speed*Cutting speed	0.217
Feed rate*Feed rate	0.033
Depth of cut*Depth of cut	0.389
Cutting speed*Feed rate	0.034
Cutting speed*Depth of cut	0.636
Feed rate*Depth of cut	0.114

ตารางที่ 4.6 แสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จาก Regression Coefficients for Ra

จากตารางที่ 4.6 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อความหยาบผิว คือ

1. ความเร็วตัด (Cutting Speed)
2. อัตราการป้อนตัด (Feed Rate)
3. อันตรกิริยาระหว่างความเร็วตัด (Cutting Speed) กับ อัตราการป้อนตัด (Feed Rate)

ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อความหยาบผิว เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆดังนี้

1. ความลึกตัด (Depth of cut)
2. อันตรกิริยาระหว่างความเร็วตัด (Cutting Speed) กับ ความลึกตัด (Depth of Cut)

3. อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนตัด (Feed Rate) กับ ความลึกตัด (Depth of Cut)

4.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของสัดส่วนแรงตัด (Fy/Fz)

1. วิเคราะห์จาก Regression Coefficients for Ra ใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์หาค่า P ของปัจจัยต่างๆ ค่า P ที่ได้ จากโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.4

ปัจจัย	ค่า P
Constant	0.000
Cutting speed	0.048
Feed rate	0.023
Depth of cut	0.456
Cutting speed*Cutting speed	0.109
Feed rate *Feed rate	0.126
Depth of cut*Depth of cut	0.376
Cutting speed*Feed rate	0.110
Cutting speed*Depth of cut	0.798
Feed rate*Depth of cut	0.402

ตารางที่ 4.7 แสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จาก Regression Coefficients for Fy/Fz

จากตารางที่ 4.7 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อค่าสัดส่วนแรงตัด คือ

1. ความเร็วตัด (Cutting Speed)
2. อัตราการป้อนตัด (Feed Rate)

ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่อสัดส่วนแรงตัด (Fy/Fz) เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆดังนี้

1. ความลึกตัด (Depth of cut)
2. อันตรกิริยาระหว่างความเร็วตัด (Cutting Speed) กับ ความลึกตัด (Depth of cut)
3. อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนตัด (Feed Rate) กับ ความลึกตัด (Depth of cut)

4.4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองของอุณหภูมิ

1. วิเคราะห์จาก Regression Coefficients for Temperature ใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์หาค่า P ของปัจจัยต่างๆ ค่า P ที่ได้ จากโปรแกรม Minitab แสดงดังตารางที่ 4.4

ปัจจัย	ค่า P
Constant	0.000
Cutting speed	0.012
Feed rate	0.018
Depth of cut	0.160
Cutting speed*Cutting speed	0.828
Feed rate *Feed rate	0.390
Depth of cut*Depth of cut	0.078
Cutting speed*Feed rate	0.654
Cutting speed*Depth of cut	0.384
Feed rate*Depth of cut	0.553

ตารางที่ 4.8 แสดงค่า P ที่วิเคราะห์ได้จาก Regression Coefficients for Temperature

จากตารางที่ 4.4 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คือ ค่า P น้อยกว่า 0.05 แสดงว่า ปัจจัยนั้นมีผลกระทบต่อค่าสัดส่วนแรงตัด คือ

1. ความเร็วตัด (Cutting Speed)
2. อัตราการป้อนตัด (Feed Rate)

ปัจจัยที่เหลือไม่มีผลพอที่จะสรุปว่าเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลหรือมีผลกระทบต่ออุณหภูมิ เนื่องจากค่า P ที่ได้จากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่า 0.05 ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยต่างๆดังนี้

1. ความลึกตัด (Depth of cut)
2. อันตรกิริยาระหว่างความเร็วตัด (Cutting Speed) กับ ความลึกตัด (Depth of Cut)
3. อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนตัด (Feed Rate) กับ ความลึกตัด (Depth of Cut)

4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

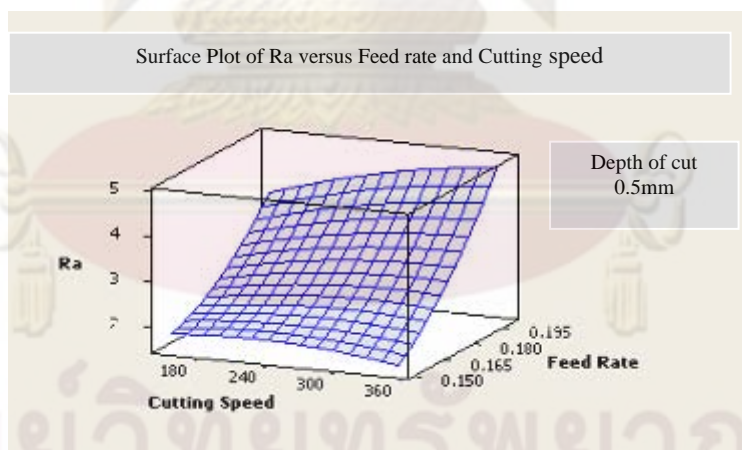
จากผลการทดสอบทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนในหัวข้อที่ 4.3- 4.4 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ

ปัจจัย \ ผลตอบ	ความหยาบผิวเฉลี่ย	สัดส่วนแรงตัด	อุณหภูมิในการตัด
อัตราป้อนตัด	มีผล	มีผล	มีผล
ความเร็วตัด	มีผล	มีผล	มีผล
ความลึกตัด	ไม่มีผล	ไม่มีผล	ไม่มีผล

ตารางที่ 4.9 สรุปได้ว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบคืออัตราการป้อนตัดและความเร็วตัด ปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อผลตอบใดๆคือ ความลึกตัด ซึ่งสาเหตุที่ในแต่ละปัจจัยส่งผลหรือไม่ส่งผลต่อผลตอบนั้นจะวิเคราะห์เพิ่มเติมในหัวข้อ 4.6

4.6 ความเรียบผิว

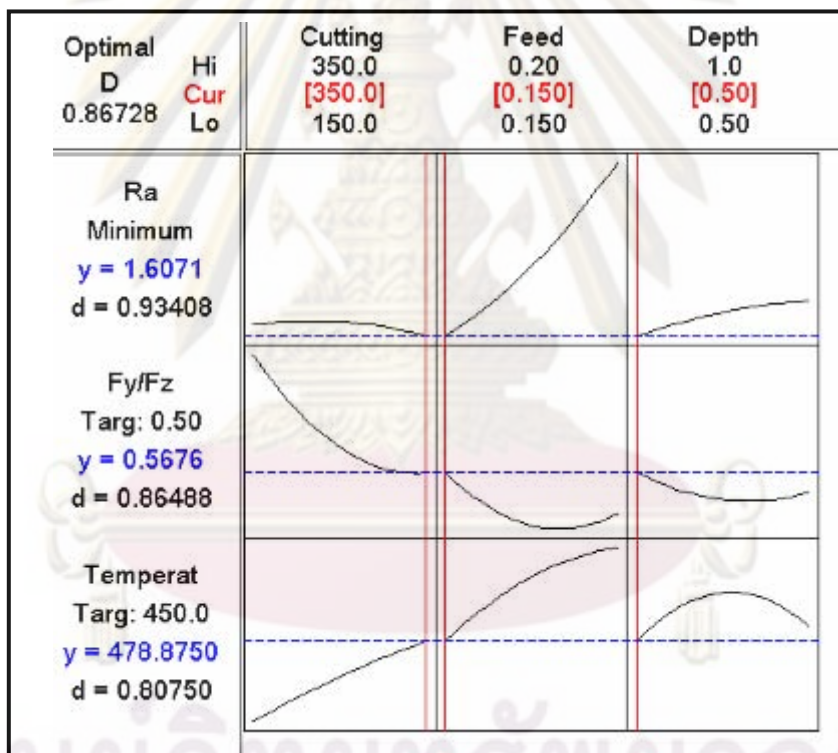


รูปที่ 4.12 พื้นผิวผลตอบของความหยาบผิว

จากรูปแสดงพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิว(Response)กับความเร็วตัด(Cutting Speed)กับอัตราการป้อนตัด(Feed Rate)ที่ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่า ความหยาบผิวแปรผันตรงกับอัตราการป้อนตัดซึ่งสอดคล้องกับสมการความหยาบผิวทางทฤษฎี $Ra = f^2/8r_c$

4.7 การหาสถานะที่เหมาะสม

โดยการใช้ส่วน โปรแกรมย่อย Response Optimizer ของโปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ หาระดับปัจจัยที่เหมาะสม ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน โดยจะพิจารณาที่ผลลัพธ์ ของตัวแปรตอบสนองRaเป็นหลัก ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ควรจะเป็นค่าที่ต่ำที่สุด เนื่องจากเราต้องการความ หยาบผิวที่น้อยที่สุด ซึ่งในการพิจารณาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมนี้จะพิจารณาผลลัพธ์ของตัวแปร ตอบสนองสัดส่วนแรงตัด(Fy/Fz) และ ผลลัพธ์ของตัวแปรตอบสนอง อุณหภูมิ(T)ประกอบไปด้วยดัง แสดงดังรูปที่4.13 ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้ข้อมูลอยู่ที่ประมาณ 1.6071 ไมโครเมตร ที่ความเร็วตัดสูงสุด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนต่ำสุด 0.15 มิลลิเมตร/รอบและระยะลึกตัดต่ำสุด 0.5 มิลลิเมตร โดยมี ระดับความพึงพอใจ (Desirable)อยู่ที่ 93.408%



รูปที่ 4.13 สถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการกลึง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ค่าที่เหมาะสม
ความเร็วตัด (เมตร/นาที)	A	350
อัตราการป้อนตัด(มิลลิเมตร/รอบ)	B	0.150
ระยะลึกตัด (มิลลิเมตร)	C	0.5

ตารางที่ 4.10 สถานะที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยในกระบวนการกลึง

ความเร็วตัดที่เหมาะสมคือความเร็วตัด 350 เมตร/นาที เนื่องจากอุณหภูมิในการตัดที่สูงกว่าค่าคือ $478.875\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้วัสดุมีความอ่อนนุ่มและง่ายต่อการตัด ใช้แรงตัดน้อยโดยสัดส่วนแรงตัดในแนวอัตราการป้อน(F_y) กับแรงตัดหลัก(F_z) มีค่าน้อยตามไปด้วย

4.8 ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบ

ความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบ(Response) โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ จากการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปMinitabเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยวิเคราะห์จากปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทุกตัวที่มีผลต่อความหยาบผิวอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น95%จะได้สัมประสิทธิ์ของปัจจัยต่างๆดังนี้

ปัจจัย	ผลตอบ (Response)		
	ความหยาบผิว Ra (μm)	อัตราส่วนแรงตัด (F_y/F_z)	อุณหภูมิ T($^{\circ}\text{C}$)
Constant	10.3042	3.37098	-3.21875
Cutting Speed	-0.0129570	-0.00382508	0.207500
Feed Rate	-147.417	-22.6522	3640.00
Depth of cut	8.03630	-0.693543	278.000
Cutting Speed*Cutting Speed	-1.58925E-05	3.13073E-06	-1.12500E-04
Feed Rate*Feed Rate	525.400	47.2706	-7400.00
Depth of cut*Depth of cut	-1.69720	0.249836	-174.000
Cutting Speed*Feed Rate	0.125340	0.0119987	-0.90000
Cutting Speed*Depth of cut	0.00217600	-1.66609E-04	0.180000
Feed Rate*Depth of cut	-33.0560	2.26157	-480.000
Constant	10.3042	3.37098	-3.21875
Cutting Speed	-0.0129570	-0.00382508	0.207500
Feed Rate	-147.417	-22.6522	3640.00

Depth of cut	8.03630	-0.693543	278.000
Cutting Speed*Cutting Speed	-1.58925E-05	3.13073E-06	-1.12500E-04

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงสัมประสิทธิ์ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบต่างๆกัน

สมการแสดงความสัมพันธ์ที่มีผลต่อความหยาบผิว คือ

$$Ra = 10.3042 - 0.0129570v - 147.417f + 8.03630d - 0.0000158954(v^2) + 525.4(f^2) - 1.69720(d^2) + 0.125340(v.f) + 0.00217600(v.d) - 33.0560(f.d) \quad (4-1)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

f คือ อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

d คือ ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

เมื่อลดรูปสมการ โดยการตัดตัวแปรส่วนที่ไม่มีนัยสำคัญออก จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ที่มีผลต่อความหยาบผิว คือ

$$Ra = 17.1416 - 0.01927v - 182.809f + 555.686(f^2) + 0.1253(v.f) \quad (4-2)$$

หลังจากทดสอบด้วยการแทนค่าตัวเลขในสมการลดรูปกับสมการเต็มรูปในสมการที่ 4.1 และ 4.2 เช่น ที่ความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 จะได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย $Ra = 2.104435$ ไมโครเมตร ส่วนสมการที่ 4.1 จะได้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย $Ra = 1.85125$ ไมโครเมตร โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากผลการทดลองซึ่งได้ความหยาบผิวเฉลี่ย $Ra = 1.8525$ ไมโครเมตร ซึ่งค่าที่ได้จากผลการทดลองมีความใกล้เคียงกับสมการเต็มรูปที่ 4.1 มากกว่าสมการลดรูป และค่า $R-Sq(adj) = 94.2\%$ ของสมการเต็มรูป มีค่ามากกว่าสมการลดรูป ซึ่งมีค่า $R-Sq(adj) = 92.9\%$ จึงใช้สมการเต็มรูปในการพิจารณา

สมการแสดงความสัมพันธ์ที่มีผลต่อ อัตราส่วนแรงตัด(Cutting Force Ratio) คือ

$$F_y / F_z = 3.371 - 0.00383v - 22.652f + 0.6935d + 0.000031(v^2) + 47.27(f^2) + 0.2498(d^2) + 0.01199(v.f) + 0.000166(v.d) + 2.2616(f.d) \quad (4-3)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

f คือ อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

d คือ ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

สมการแสดงความสัมพันธ์ที่มีผลต่อ อุณหภูมิในการตัด (Temperature) คือ

$$T = -3.21875 + 0.2075v + 3640f + 278d - 0.000113(v^2) - 7400(f^2) - 174(d^2) - 0.90(v.f) + 0.18(v.d) - 480(f.d)$$

(4-4)

เมื่อ v คือ ความเร็วตัด (เมตร/นาทีก)

f คือ อัตราการป้อน (มิลลิเมตร/รอบ)

d คือ ความลึกตัด (มิลลิเมตร)

4.9 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

หลังจากได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากสมการที่ทำนายคือ ความเร็วในการตัด 350 เมตร/นาทีก อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร แล้วนำค่าปัจจัยทั้งสามที่ได้ไปทำการทดลอง ซึ่งทำการทดลองจำนวน 3 การทดลองได้ผลดังตารางที่ 4.12

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการกลึง

No.	Name of Cutting condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	Ra (μm)	Rz (μm)	Vba (mm)	Vbm (mm)
1	350_0.15_0.50_0	2.0369	8.6727	0.0000	0.0000
	350_0.15_0.50_500	1.2891	5.7967	0.1539	0.1721
	350_0.15_0.50_1000	1.3259	5.9056	0.1789	0.1960
	350_0.15_0.50_1500	1.5388	7.0481	0.1846	0.2238
	350_0.15_0.50_2000	1.9003	7.5013	0.2430	0.3290
2	250_0.15_0.50_0	1.8525	8.5134	0.0000	0.0000
	250_0.15_0.50_500	2.8103	11.0489	0.1080	0.1205
	250_0.15_0.50_1000	1.9923	8.5412	0.1253	0.1425
	250_0.15_0.50_1500	2.0304	8.4457	0.1367	0.1587
	250_0.15_0.50_2000	1.6927	7.9042	0.1396	0.1655
3	150_0.15_0.50_0	2.5574	11.2434	0.0000	0.0000
	150_0.15_0.50_500	2.1243	10.7466	0.1436	0.1576
	150_0.15_0.50_1000	2.0432	10.4357	0.1349	0.1456
	150_0.15_0.50_1500	1.7908	10.1451	0.1784	0.2141
	150_0.15_0.50_2000	2.0210	8.932	0.1934	0.2453

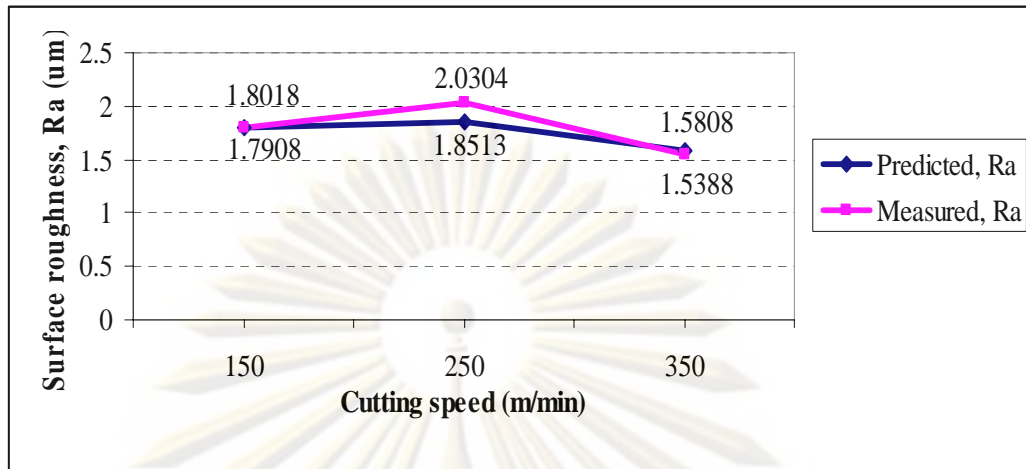
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

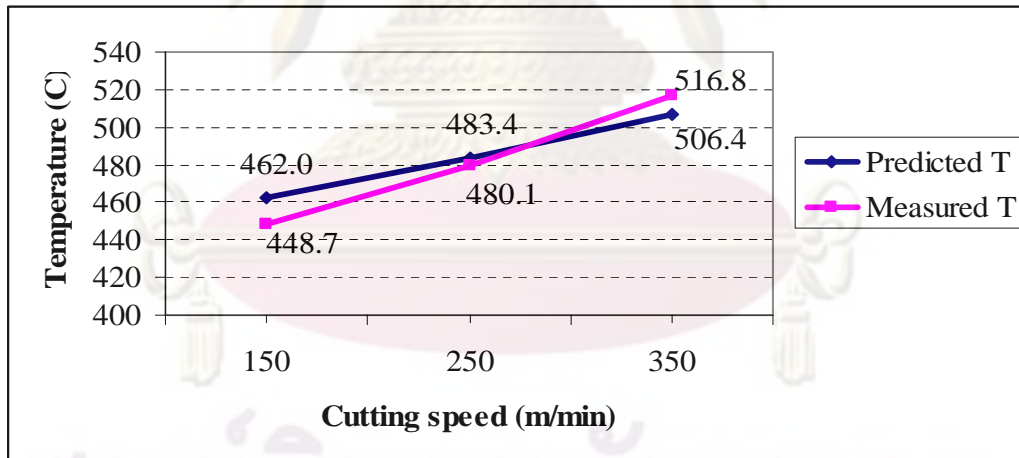
ตารางที่ 4.12 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อยืนยันผลของกระบวนการกลึง(ต่อ)

No.	Name of Cutting condition (Cutting Speed_Feed Rate_Depth of Cut)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fy/Fz	Temperature (°C)
1	350_0.15_0.50_0	122	119	208	0.572115	484.3
	350_0.15_0.50_500	182	138	225	0.613333	493.7
	350_0.15_0.50_1000	184	142	235	0.604255	513.3
	350_0.15_0.50_1500	169	129	224	0.575893	516.8
	350_0.15_0.50_2000	189	231	248	0.931452	522.6
2	250_0.15_0.50_0	116	115	209	0.550239	495.5
	250_0.15_0.50_500	124	119	220	0.540909	481.4
	250_0.15_0.50_1000	123	143	221	0.506787	487.1
	250_0.15_0.50_1500	131	113	223	0.506726	480.05
	250_0.15_0.50_2000	116	113	242	0.466942	482.1
3	150_0.15_0.50_0	143	122	276	0.442029	426.3
	150_0.15_0.50_500	153	132	265	0.498100	439.7
	150_0.15_0.50_1000	134	114	243	0.469100	442.4
	150_0.15_0.50_1500	124	172	248	0.690977	448.7
	150_0.15_0.50_2000	121	110	232	0.474138	471.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



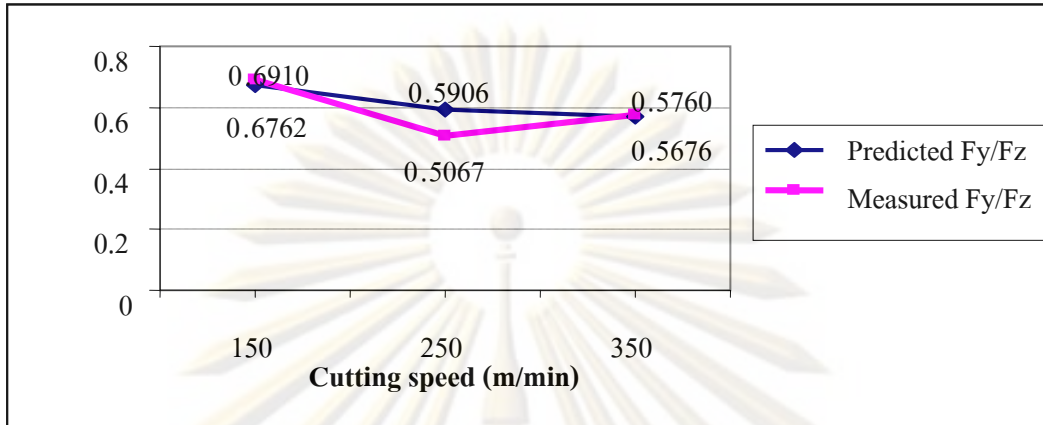
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความหยาบผิวระหว่างค่าที่วัดกับค่าที่ทำนายจากผลการทดลอง จากรูปแสดงให้เห็นว่าที่ความเร็วตัดสูงขึ้นความหยาบผิวเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเช่นที่ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที กับ 150 เมตร/นาที เนื่องจากอุณหภูมิในการตัด มีค่าเหมาะสม (ดังรูป ที่ 4.15) ทำให้ชิ้นงานอ่อนนุ่มและง่ายต่อการตัด สัดส่วนแรงตัดมีค่าลดลง (ดังรูปที่ 4.16) ความหยาบผิวที่ได้จึงลดลง เมื่อดูจากสมการที่ได้ ค่าที่ทำนายจะมีค่าใกล้เคียงกับ ค่าที่ได้จากการวัด



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างค่าที่วัดกับค่าที่ทำนายจากผลการทดลอง จากรูปแสดงให้เห็นว่า ที่ความเร็วตัดค่าสูง จะให้อุณหภูมิในการตัดที่สูงกว่า และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Cutting Force Ratio (F_y/F_z)



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบ Cutting Force Ratio ระหว่างค่าที่วัดกับค่าที่ทำนายจากผลการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและสืบหาเงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมที่สุดของ เหล็กกล้าคาร์บอน S45C โดยที่ความหนาผิวน้อยที่สุดและหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อความ หนาผิวโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ โดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเรียบของผิวงาน ความลึกหรือมุมและแรงตัด จะเลือกปัจจัยเนื่องจาก วิธีการเป็นหลัก ได้แก่ ความเร็วตัด อัตราการป้อนตัด และระยะลึกตัด โดยกำหนดให้ปัจจัยเนื่องจาก คน เครื่องจักร วัสดุคืบ และสิ่งแวดล้อมคงที่สามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ สรุปผลที่ได้จากการ ทดลองได้ดังนี้

1. การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบแบบ Box-Behnken Design ใช้ในการหาสมการความ หนาผิว จากผลการทดลองแสดงด้วยฟังก์ชันกำลังสอง แสดงให้เห็นว่าอัตราการป้อนตัดส่งผลมาก ที่สุดต่อความหนาผิว รองลงมาด้วยความเร็วตัด โดยความหนาผิวจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราการป้อน ตัดให้สูงขึ้น เช่น จากสมการความหนาผิว ที่ความเร็วในการตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร จะได้ความหนาผิวเฉลี่ย 1.85125 ไมโครเมตร แต่ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนตัดเป็น 0.20 มิลลิเมตร/รอบ (เพิ่มขึ้น 33.33%) โดยปัจจัยความเร็ว ในการตัดและความลึกในการตัดคงที่ จะได้ความหนาผิวเฉลี่ย 4.41475 ไมโครเมตร (ซึ่งเพิ่มขึ้น 138.47%) หรือ ที่ปัจจัยในการตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึก ในการตัด 0.5 มิลลิเมตร จะได้ความหนาผิวเฉลี่ย 1.58075 ไมโครเมตร แต่ถ้าเพิ่มอัตราการป้อนตัด เป็น 0.20 มิลลิเมตร/รอบ (ซึ่งเพิ่มขึ้น 33.33%) โดยปัจจัยความเร็วในการตัดและความลึกในการตัดคงที่ จะได้ความหนาผิวเฉลี่ย 4.77075 ไมโครเมตร (เพิ่มขึ้น 201.80%) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราป้อนตัด ส่งผลมากที่สุดต่อความหนาผิว

2. จากผลการทดลองแนวโน้มน้ำมีดตัดใหม่จะให้ความหนาผิวชิ้นงานค่าหนึ่ง เมื่อใช้ไป ซักระยะหนึ่งความหนาผิวชิ้นงานจะเริ่มลดลงจนเมื่อใช้ไปอีกระยะความหนาผิวชิ้นงานจะกลับมา เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น จากการทดลองยืนยันผลที่ความเร็วในการตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อน

ตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกในการตัด 0.5 มิลลิเมตร ที่ปริมาตรการกลึงเริ่มต้น จะให้ความหนาผิวเฉลี่ย 2.0369 ไมโครเมตร แต่ถ้ากลึงต่อไปจนถึงปริมาตรการกลึง 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาผิวเฉลี่ยที่ได้ลดลงเป็น 1.2891 ไมโครเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เหมาะสมในการตัดด้วย

3. ความหนาผิวจะดีที่สุดเมื่อความเร็วตัดสูงเพียงพอที่ไม่ทำให้เศษพอกติดปลายมีด (Built-up Edge) นอกจากนี้ ชิ้นงานมีความอ่อนนุ่มและง่ายต่อการตัดเนื่องจากอุณหภูมิในการตัดที่สูง จากความเร็วตัดที่มากขึ้นดังกราฟที่ 4.14 -4.16 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วในการตัด 250 เมตร/นาที กับ 350 เมตร/นาที อุณหภูมิในการตัดที่ความเร็วตัดค่าสูงคือ $516.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งมากกว่าความเร็วตัดค่าต่ำ คือ $483.4\text{ }^{\circ}\text{C}$

4. พิจารณาสัดส่วนแรงตัดรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มลดลงกล่าวคือการตัดที่ใช้แรงในการตัดน้อยแสดงให้เห็นว่าการตัดนั้นเป็นไปได้ง่ายจึงเกิดผิวชิ้นงานที่ดีตามไปด้วย ในทางตรงกันข้าม ถ้าการตัดที่มากนั้นแสดงว่าการตัดที่ตัดได้ยากหรือบางครั้งอาจเกิดการสั่นขึ้น และเมื่อพิจารณาผลการทดลองประกอบที่ ความเร็วตัด 350 เมตร/นาทีจะได้ค่าสัดส่วนแรงตัด 0.5760 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ ความเร็วตัด 150 เมตร/นาทีจะได้ค่าสัดส่วนแรงตัด 0.6910

5.เงื่อนไขการตัดโลหะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองคือ อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้งเพื่อให้ผลการศึกษาน่าเชื่อถือได้มากขึ้น และเพื่อทำการศึกษาผลจากอัตราที่เกิกระหว่างปัจจัยในการตัด

2. สำหรับการวัดอุณหภูมิเพื่อให้ผลการศึกษาน่าเชื่อถือได้มากขึ้นควรมีการวัดอุณหภูมิด้วยวิธีการอื่นเปรียบเทียบกับผลที่ได้ เช่น ใช้เทอร์โมคัปเปิล (Thermo Coupler) ช่วยวัดอุณหภูมิเปรียบเทียบกับผลที่ได้กับเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Pyrometer)

3. ในบางการทดลองอาจมีเศษกลึง (Chip) ม้วนยาว ควรจะต้องมีความระมัดระวังเป็นพิเศษในการใช้งานของเครื่องมือต่างๆ เช่น สายของเครื่องวัดอุณหภูมิ สายของ Force Sensor.

4. ใส่อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยทุกครั้ง เช่น ถุงมือที่ทนความร้อน ปลั๊กอุดหู ผ้าปิดจมูก เป็นต้น

5. ในการทดลองควรมีการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรมด้วยทั้งในแง่การสึกหรอของมีดตัด ความหนาผิวเฉลี่ย ราคาของมีดตัดที่ใช้ เวลาในการใช้ต่อรอบ (Cycle Time) ตลอดจนพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ เพื่อจะได้เปรียบเทียบกับต้นทุนต่อหน่วยที่ใช้ในการเลือกปัจจัยที่เหมาะสมต่อไป

6.ใส่อุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยทุกครั้ง เช่นถุงมือที่ทนความร้อน ปลั๊กอุดหู ผ้าปิดจมูก เป็นต้น

5.3อุปสรรคปัญหาในงานวิจัย

1. การวัดอุณหภูมิ เนื่องจาก Spot Sizeของเครื่องมือวัดอุณหภูมิคือ 3.0มิลลิเมตรที่ระยะ 102 มิลลิเมตรซึ่งมีขนาดเล็กและระยะ โฟกัสที่จำกัด ดังนั้น การปรับตั้ง จิ๊ก/ฟิกซ์เจอร์ จึงมีความสำคัญ

2. ต้นทุนในการทดลองต่อ 1 ผลการทดลองมีค่าใช้จ่ายสูงถึง 3100 บาท/การทดลอง ซึ่งถือว่ามีความสูงมาก ดังนั้นจึงไม่มีการทดลองซ้ำในแต่ละการทดลอง

5.4ข้อจำกัดในงานวิจัย

1.ในงานวิจัยนี้สภาวะของกระบวนการกลึงที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอน S45C ด้วยมีดตัดและเม็ดมีดที่ผู้วิจัยใช้อยู่ในปัจจุบันเท่านั้น หากมีการปรับเปลี่ยนชนิดของมีดตัดและเม็ดมีดใหม่ จำเป็นต้องมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกลึงใหม่ เนื่องจากรูปทรงและลักษณะทางเรขาคณิต จะมีค่าแตกต่างกัน ทำให้สภาวะของการกลึงงานต่างกัน ความหยาบผิว แรงตัด และอุณหภูมิแตกต่างกัน

2.ผลของการศึกษาในการวิจัยในครั้งนี้มาจากการศึกษาเหล็กกล้าคาร์บอนS45Cเท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] ปิยะ ศิริธรรมปิติ. การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2550.
- [2] สมเกียรติ บุรณัฏเจริญ. ทฤษฎีและการใช้งาน CNC Computer Numerical Control . กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2537.
- [3] Turning Operation [Online] http://www.pteonline.org/img-lib/staff/file/komson_000176.doc
[2010, Mar 13]
- [4] อำนาจ ทองแสน. ทฤษฎีและการเขียนโปรแกรม CNC สำหรับการควบคุมเครื่องจักรกลด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control) .กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2544.
- [5] เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์ และพิพัฒน์ สุจิตธรรมกุล. วิศวกรรมเครื่องมือ. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, 2548.
- [6] Trent. E.M. Metal Cutting. Butterworth Heinemann. 1991
- [7] Bruce, R. G., Tomovic, M. M., Neely, J. E. and Kibbe, R.R. Modern materials and manufacturing Process : 1998
- [8] Lindberg, R. A. Processes and materials of manufacture .Allyn and bacon, 1983.
- [9] Tlusty, Jiri . Manufacturing process and equipment. New Jersey : Prentice Hall ,1999.
- [10] Ostwald, P.F., and Munoz, J. Manufacturing Process and systems. 9th ed. John Wiley & Sons , 1996.
- [11] Comparison of national standards of surface texture measurement. ID. of national standard ... former Japan. ANSI B46.1-'85 former U.S.A.. NF E05-015('84). [Online]. Available from : [http:// www.accretech.jp/english/pdf/measuring/sfexplain_e.pdf](http://www.accretech.jp/english/pdf/measuring/sfexplain_e.pdf)
[2008, Feb 23]
- [12] Kennametal Inc. Lathe tooling Catalog.2004: A54-A55.
- [13] CoroKey คู่มือเพิ่มผลผลิต. พิมพ์ครั้งที่ 1. แชนด์วิคไทย, 2543.
- [14] สัณญา พิพัฒพรณวงษ์. คอมพิวเตอร์ช่วยการวิเคราะห์หาความเร็วตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปฏิบัติงานกลึง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2543.

- [15] Wright, R. T., and Jensen, T. R. Manufacturing, 1997.
- [16] ปารเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [17] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และจันทนา จันทโร. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
- [18] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร :สำนักพิมพ์ท็อป, 2551.
- [19] ชีรเดช เรืองศรี. การพัฒนากระบวนการควบคุมการพิมพ์กล่องบรรจุภัณฑ์เพื่อลดความสูญเสียกรณีศึกษา:โรงงานผลิตกล่องบรรจุภัณฑ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2550.
- [20] พงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์ และนพดล นิ่งทอง. การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการปรับปรุงขนาดของรูรีเมอร์ โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 2550.
- [21] ไสว สุขวิทยาวงษ์. การศึกษาสภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุดระหว่างมีดตัดคาร์ไบด์และมีดตัดโค๊ต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2534.
- [22] สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ. อิทธิพลของความเร็วตัดที่มีต่ออายุของมีดตัดคาร์ไบด์สำหรับชิ้นส่วนของปั้มน้ำรถยนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2541.
- [23] สมหมาย สารมาท. การวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อกำหนดวิธีปฏิบัติในการเชื่อมแบบทังสเตนอาร์คเพื่อลดการแตกร้าว สำหรับเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น เอสเคดี 11. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2548.
- [24] วิรุทธิ์ สิมเสมอ . การปรับปรุงกำลังการผลิตของเครื่องรีโฟลว์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2549

- [25] Anselmo, E. D.; and Ricardo, M. Cutting conditions for finish turning process aiming : the use of dry cutting . International Journal of Machine Tool & Manufacture 42 (2002) :899- 904.
- [26] Kim, J.D.; and Kweun, O.B. A Chip-Breaking System For Mild Steel In turning . Institute of J. Mach. Tools Manufacture (1997): 607-617 .
- [27] Klocke, F. and Eisenblattere, G. 1997. DRY Cutting. Annals of the CIRP : 519 -526.
- [28] Elmagrabi, NH., et al. Dry machining of titanium alloys and its impact on the environment and tool life. International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT) , pp.773-777. 2008.
- [29] Raviraj, S., Raghuvir, P., Srikanth, SR., and Vasanth, K. Machinability study on discontinuously reinforced aluminium composites (DRACs) using response surface methodology and taguchi's design of experiments under dry cutting condition. Mj.Int.J.Sci.Tech. 2 (2008): 227-239.
- [30] Derflinger, V., Bradle, H. and Zimmermann, H. New hard/lubricant coating for dry machining. Surface and Coating Technology 113 (1999): 286-292.
- [31] Young, P.; Byrne, G.; and Cotterell, M. Manufacturing and the Environment. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (1997): 488-493.
- [32] The Virtual Industrial Exhibition.[Online]. Available from:<http://www.directindustry.com/product/mazak/4-axis-cnc-turning-center-22113-421841.html> [2010, Feb 8]
- [33] Box, GEP.; Behnken, DW. Some new three level designs for the study of quantitative variables. Technometrics 2(4)(1960): 455-475.
- [34] Douglass, C.M. Design and Analysis of Experiment. 6th ed. John Wiley and Sons, 2005.
- [35] Mendenhall, W. Introduction to Probability and Statistics. 12nd edition. CA: Thomson, 2006.
- [36] Moriwaki, T.; Shibasaki, T.; and Somkiat, T. 2004. Development of in-process tool wear monitoring system for CNC turning. International Journal of Japan Society of Mechanical Engineers Series C 47(3): 933-938.
- [37] Somkiat, T. In-process investigation of turning process applied with and without cutting fluid. Journal of Mechanical Engineering 6 (2009): 85-102.

- [38] Sullivan, D.O., and Cotterrell, M. Temperature measurement in single point turning. Journal of Materials Processing Technology 118 (2001): 301-308.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

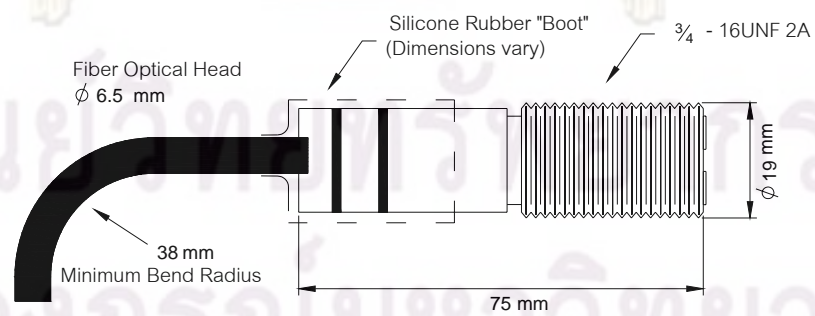
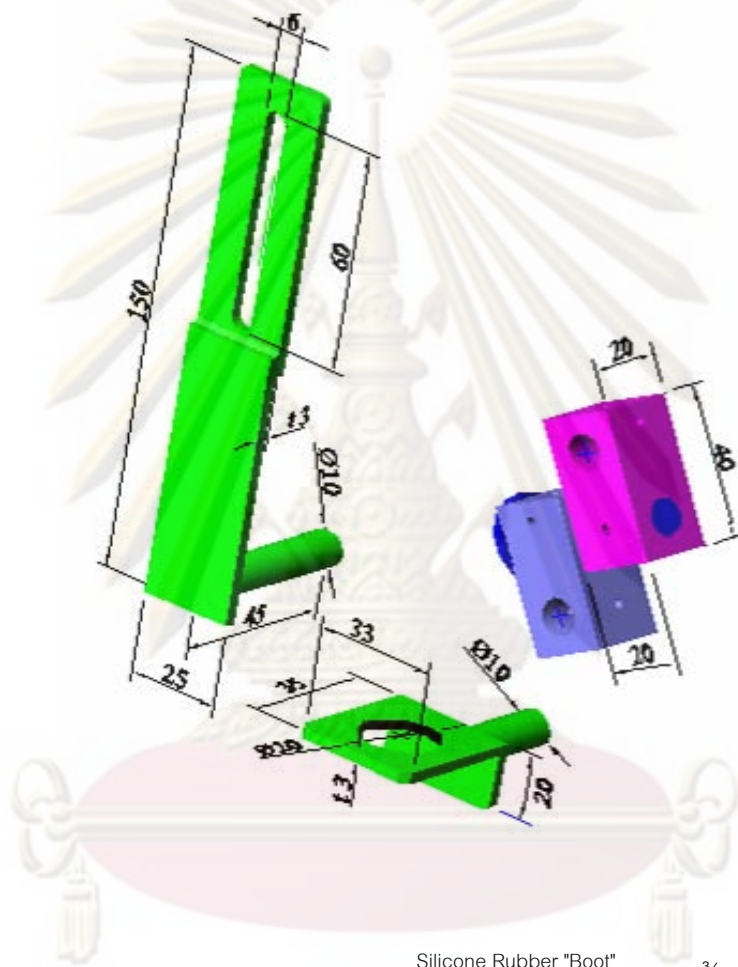


ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ภาพแสดงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 1 แสดงแบบ Fixture ตัวยึดหัววัดอุณหภูมิ Pyrometer :mm.

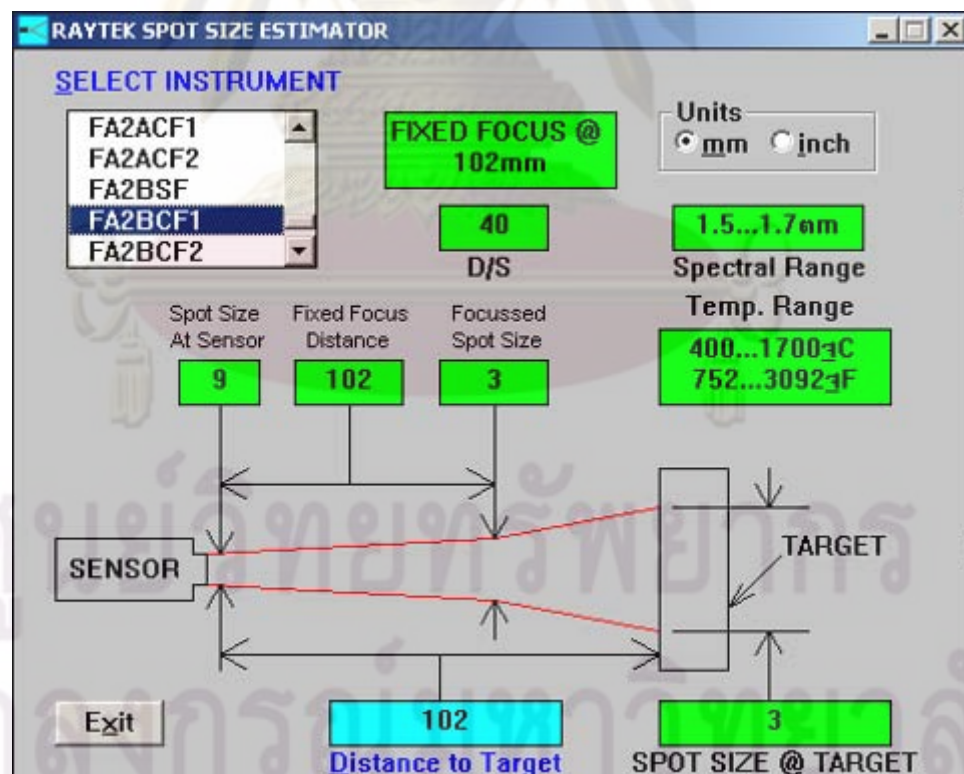
Measurement	
Model	FA2B
Spectral Response/Detector	1.6 μ m (InGaAs detector)
Fiber Cable Length	3m (10')
Accuracy	\pm (0.3%Tmeas+2 $^{\circ}$ C
Repeatability	\pm 1 $^{\circ}$ C
Temperature Resolution	\pm 0.05 $^{\circ}$ C
Response Time	10 mSec ; average selectable to 10 Sec
Emissivity	0.1 to 1.0 in 0.01 increments
Signal Processing	Peak Hold, Valley Hold, Averaging
Optical	
Model (D:S)*	Focus Distance (CF2)
FA2B (40)	2.5mm @ 102mm (0.1" @ 4")
Electrical	
Outputs	0/4-20 mA; RS-485, 2-wire/4-Wire, networkable to 32sensors; Relay (SPST 48V, 300 mA , response time < 2mSec
Power requirements	24 VDC, 250 mA , \pm 20%

ตารางที่ 1 แสดง Specification ของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Pyrometer)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



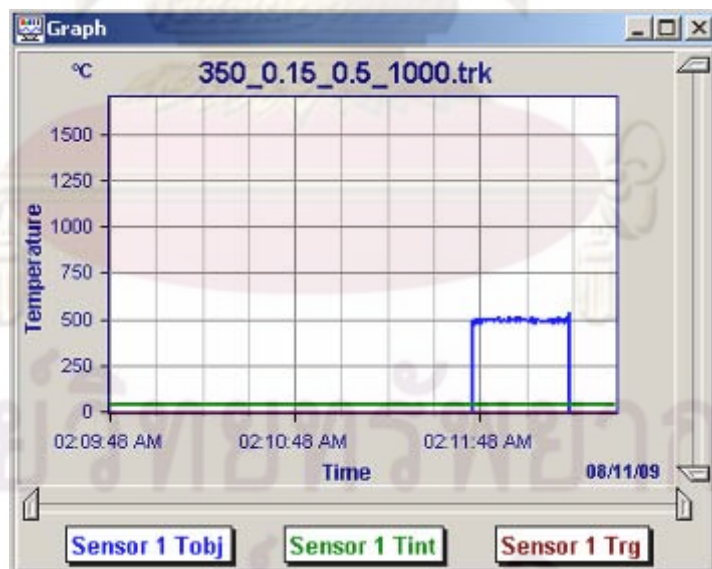
รูปที่ 2 แสดงเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส (Pyrometer)



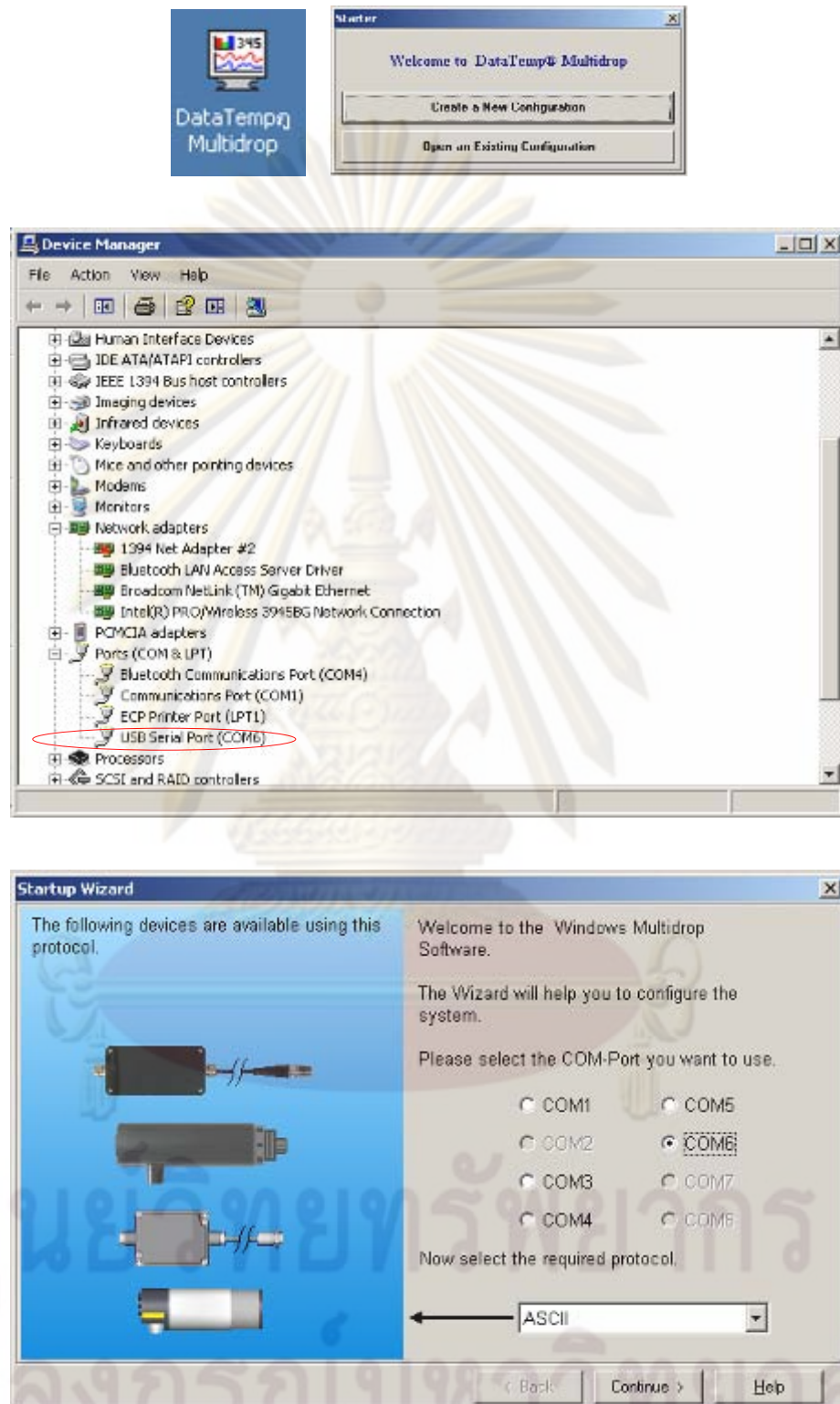
รูปที่ 3 ระยะ Spot Size

Sensor Setup FA - Device 1 : Sensor 1																																																													
<table border="0"> <tr> <td colspan="2">Sensor Constants</td> <td colspan="2">Sensor Data</td> </tr> <tr> <td>Serial Number:</td> <td>031405</td> <td>Object Temperature:</td> <td>-999.2 °C</td> </tr> <tr> <td>Device Type:</td> <td>FA2</td> <td>Internal Temperature:</td> <td>37.0 °C</td> </tr> <tr> <td>Model Lower Limit:</td> <td>400.0 °C</td> <td>Output Current:</td> <td>Min mA</td> </tr> <tr> <td>Model Upper Limit:</td> <td>1700 °C</td> <td>Percent of Range:</td> <td>-107.63 %</td> </tr> <tr> <td>Firmware Revision:</td> <td>1B</td> <td>Trigger Status:</td> <td>inactive</td> </tr> <tr> <td>Communication Mode:</td> <td>4-Wire</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Sensor Constants		Sensor Data		Serial Number:	031405	Object Temperature:	-999.2 °C	Device Type:	FA2	Internal Temperature:	37.0 °C	Model Lower Limit:	400.0 °C	Output Current:	Min mA	Model Upper Limit:	1700 °C	Percent of Range:	-107.63 %	Firmware Revision:	1B	Trigger Status:	inactive	Communication Mode:	4-Wire																																		
Sensor Constants		Sensor Data																																																											
Serial Number:	031405	Object Temperature:	-999.2 °C																																																										
Device Type:	FA2	Internal Temperature:	37.0 °C																																																										
Model Lower Limit:	400.0 °C	Output Current:	Min mA																																																										
Model Upper Limit:	1700 °C	Percent of Range:	-107.63 %																																																										
Firmware Revision:	1B	Trigger Status:	inactive																																																										
Communication Mode:	4-Wire																																																												
<table border="0"> <tr> <td colspan="2">Signal Processing Setup</td> <td colspan="2">Output Signal Setup</td> </tr> <tr> <td>Mode:</td> <td>Off</td> <td>Emissivity:</td> <td>0.92 Ap</td> </tr> <tr> <td>Hold Time:</td> <td>..... s</td> <td>Average Time:</td> <td>..... s</td> </tr> <tr> <td>Hold Threshold Temp:</td> <td>..... °C</td> <td>Ambient Control:</td> <td>Internal</td> </tr> <tr> <td>Hold Hysteresis:</td> <td>..... °C</td> <td>Ambient Temperature:</td> <td>..... °C</td> </tr> <tr> <td>Hold Decay:</td> <td>..... °C/s</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Maintenance</td> <td colspan="2">Temperature Unit:</td> </tr> <tr> <td>Polling Address:</td> <td>0</td> <td>Baud Rate:</td> <td>38400</td> </tr> <tr> <td>Switch Panel Lock:</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>Output Range:</td> <td>4...20mA</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Upper Range Limit:</td> <td>1700 °C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Lower Range Limit:</td> <td>400 °C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Alarm Mode:</td> <td>Failsafe N.O.</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Upper Alarm Limit:</td> <td>..... °C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Lower Alarm Limit:</td> <td>..... °C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>DeadBand:</td> <td>..... °C</td> </tr> </table>		Signal Processing Setup		Output Signal Setup		Mode:	Off	Emissivity:	0.92 Ap	Hold Time: s	Average Time: s	Hold Threshold Temp: °C	Ambient Control:	Internal	Hold Hysteresis: °C	Ambient Temperature: °C	Hold Decay: °C/s			Maintenance		Temperature Unit:		Polling Address:	0	Baud Rate:	38400	Switch Panel Lock:	<input type="checkbox"/>	Output Range:	4...20mA			Upper Range Limit:	1700 °C			Lower Range Limit:	400 °C			Alarm Mode:	Failsafe N.O.			Upper Alarm Limit: °C			Lower Alarm Limit: °C			DeadBand: °C
Signal Processing Setup		Output Signal Setup																																																											
Mode:	Off	Emissivity:	0.92 Ap																																																										
Hold Time: s	Average Time: s																																																										
Hold Threshold Temp: °C	Ambient Control:	Internal																																																										
Hold Hysteresis: °C	Ambient Temperature: °C																																																										
Hold Decay: °C/s																																																												
Maintenance		Temperature Unit:																																																											
Polling Address:	0	Baud Rate:	38400																																																										
Switch Panel Lock:	<input type="checkbox"/>	Output Range:	4...20mA																																																										
		Upper Range Limit:	1700 °C																																																										
		Lower Range Limit:	400 °C																																																										
		Alarm Mode:	Failsafe N.O.																																																										
		Upper Alarm Limit: °C																																																										
		Lower Alarm Limit: °C																																																										
		DeadBand: °C																																																										
<table border="0"> <tr> <td>OK</td> <td>Cancel</td> <td>Save</td> <td>Load</td> <td>Help</td> </tr> </table>		OK	Cancel	Save	Load	Help																																																							
OK	Cancel	Save	Load	Help																																																									

รูปที่ 4 แสดงตัวแปรต่างๆและค่าที่ได้ปรับตั้งไว้ของเครื่องวัดอุณหภูมิแบบไม่สัมผัส



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างกราฟที่ได้จากเครื่องอ่านอุณหภูมิที่ ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที่ อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ในช่วงการตัด 1 รอบที่ปริมาตร 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร



รูปที่ 6 แสดงส่วนหนึ่งการเชื่อมต่อเครื่องวัดอุณหภูมิโดย Port จะต้องตรงกันระหว่าง Device กับ COM-Port โปรแกรมจึงจะสามารถทำงานได้



รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างกราฟแรงตัดที่อ่านได้จากเครื่องออสซิลอโคป โดยเรียงลำดับดังนี้

F_x = แรงตัดในแนวแกน (Feed Force) : เส้นสีเขียว F_y = แรงตัดในแนวรัศมี(Radial Force) : เส้นสีชมพู และ F_z =แรงตัดหลัก (Main Force) :เส้นสีฟ้า


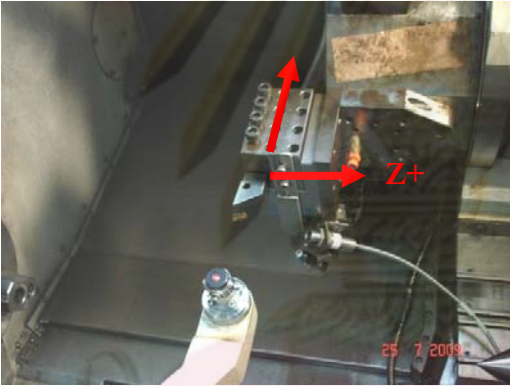


UNo.	RAT	OD-MAX	ID-MIN	LENGTH	RPM	FIN-X	FIN-Z	WORK FACE		
01	STL	116.1	0.	298.	3500	0.				
UNo.	UNIT	#	CPT-X	CPT-Z	RV	FV	R-FEED	R-DEP.	R-TOOL	F-TOOL
	LBAR	OUT	1	111.6	0.	250	0.175	0.75	2	
SEQ	SHP	S-CMR	SPT-X	SPT-Z	FPT-X	FPT-Z	F-CMR/4	RADIUS/ch.	RGH	
	1	LIN			110.1	232.			9	
UNo.	UNIT	COUNTER	RETURN	WK.No.	CONT.	NUM.	SHIFT			

รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างหน้าจอ ณ ขณะป้อนตัวแปรต่างๆในการกลึงปอกชิ้นงานที่ความเร็วตัด (RV) 250 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนตัด(R-FEED)0.175 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด (R-DEP) 0.75 มิลลิเมตร

ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
	<p>แสดงเครื่องกลึงที่ใช้ในการทดลอง</p>
	<p>เปิดสวิตช์ปั๊มลมและสวิตช์อุปกรณ์ ระบายความร้อน</p>

ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
	เปิดเบรกเกอร์เครื่องกลึงซีเอ็นซี
	เปิดวาล์วลมแล้วตรวจสอบค่าความดันลมอยู่ที่ 0.5 Mpa หรือไม่

ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
	<p>ปรับแรงดันลมสำหรับ CHUCK ยึด ชิ้นงาน</p>
	<p>เปิดสวิทช์คอมพิวเตอร์ด้านหน้าเครื่อง</p>
	<p>การกลับไปยังจุดศูนย์ของเครื่อง (Home) -กดปุ่มเลือกไปที่Position จะปรากฏ หน้าจอดังรูป -กดปุ่ม Home ที่แผงควบคุม -กดปุ่มปรับระยะทางแกน X, Y และ Z โดยกดค้างไว้สักครู่แล้วปล่อย จากนั้น รอนจนกระทั่งตำแหน่งแกนต่างๆเป็น ศูนย์</p>

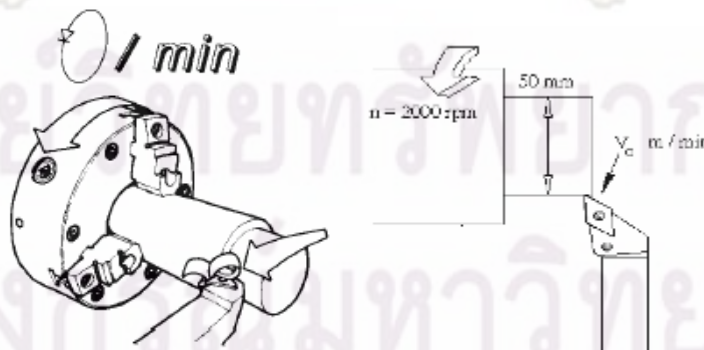
ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
	<p>การเซ็ตตำแหน่งของปลายมีด</p> <p>- กดปุ่มเลือกไปที่ TOOL DATA จากนั้นMSR UNIT ON (เซ็นเซอร์จะเลื่อนออกมา)</p>
  	<p>ในการเลื่อนปลายมีดสามารถทำได้โดยเลือกแกน Axis Select ก่อน จากนั้นหมุนที่ปุ่มปรับเพื่อเลื่อนทิศทางปลายมีดไปตามที่ต้องการ</p>

ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
  	<p>กดปุ่ม Toolset Measure จากนั้นเลื่อนปลายมีดมาแตะที่เซ็นเซอร์โดยใช้ปุ่มควบคุม จนมีเสียงดัง แล้วจึงเลื่อนปลายมีดออก (ทั้งแกน X และแกน Z)</p> <p>* ในการเลื่อนปลายมีดควรใช้ปุ่มควบคุมเท่านั้น เพื่อป้องกันการชนของปลายมีดกับตัวเซ็นเซอร์</p> <p>* ต้องกดปุ่ม Toolset Measure ก่อนทำการเลื่อนปลายมีดไปแตะที่เซ็นเซอร์ทุกครั้ง</p>
 	<p>การใส่ชิ้นงาน</p> <ul style="list-style-type: none"> -กดปุ่ม MPI ที่แผงควบคุมพร้อมกับ C-AX CONNECT -คลายปากจับ (Chuck) ทั้ง 3 ด้านออก ให้มีขนาดเล็กกว่าชิ้นงานที่ต้องการใส่เล็กน้อย

ขั้นตอนการใช้งาน	หมายเหตุ
  	<p>การโปรแกรมการกลึง</p> <ul style="list-style-type: none"> -กดปุ่ม PROGRAM -ทำการโปรแกรมการตัดการตัดตามที่ต้องการ -กด Tool Path แล้วกด Check Continue หรือ Check Step * หน่วยของระยะต่างๆเป็นมิลลิเมตร * ตรวจสอบโปรแกรมว่าถูกต้องตามต้องการหรือไม่
  	<p>การกลึงชิ้นงาน</p> <ul style="list-style-type: none"> -กดปุ่ม Memory จากนั้นควรปรับ Rapid ที่แผงวงจรควบคุมลงจาก 100% เป็นประมาณ 25% (เป็นความเร็วในการเคลื่อนที่โดยที่มีดกลึงไม่สัมผัสชิ้นงาน) *ป้องกันการเคลื่อนที่ของมีดกลึงเร็วเกินไป -ปิดกุญแจ Program ที่แผงควบคุมจาก Enable ไปที่ Lock -กดปุ่ม Cycle Start เพื่อเริ่มกระบวนการกลึงชิ้นงาน -กดปุ่ม Coolant Stop เพื่อไม่ใช้สารหล่อเย็น

รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างลำดับขั้นตอนในการใช้เครื่องกลึงซีเอ็นซี

ชิ้นงาน/ ขนาดความ โต Ø (mm)	ความเร็วตัด (V_c), ม./ นาที										
	30	40	50	100	150	200	300	400	500	600	700
12	795	1060	1326	2652	3979	5305	7957	10610	13262		
16	597	795	995	1989	2984	3978	5968	7957	9947	11936	
20	477	637	796	1591	2387	3183	4774	6366	7957	9549	11140
25	382	509	637	1273	1910	2546	3819	5092	6366	7639	8912
32	298	398	497	994	1492	1989	2984	3978	4973	5968	6963
40	239	318	398	795	1194	1591	2387	3183	3978	4774	5570
50	191	255	318	636	955	1272	1909	2546	3183	3819	4456
63	151	202	253	505	758	1010	1515	2021	2526	3031	3536
80	119	159	199	397	597	795	1193	1591	1989	2387	2785
100	95	127	159	318	477	636	952	1273	1591	1909	2228
125	76	109	124	255	382	509	764	1018	1237	1527	1782
160	60	80	99	198	298	397	596	795	994	1193	1392
175	55	71	91	182	273	363	544	727	909	1091	1273
200	48	64	80	160	239	318	476	636	795	954	1114



$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \text{ (m/min) ie } D_1 = 50 \text{ mm, } V_c = \frac{\pi \times 50 \times 2000}{1000} = 314 \text{ (m/min)}$$

รูปที่ 10 ตารางแสดงค่าความเร็วตัด-ความเร็วรอบ

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรมสำเร็จรูปMinitab รวมถึงกราฟต่างๆที่ได้จาก
โปรแกรมสำเร็จรูป

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลความหยาบผิวสำหรับกระบวนการกลึง

Response Surface Regression: Ra versus Cutting Speed, Feed Rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Ra

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.98960	0.12489	23.938	0.000
Cutting Speed	0.26633	0.07648	3.482	0.018
Feed Rate	1.07540	0.07648	14.061	0.000
Depth of cut	0.06242	0.07648	0.816	0.451
Cutting Speed*Cutting Speed	-0.15892	0.11257	-1.412	0.217
Feed Rate*Feed Rate	0.32838	0.11257	2.917	0.033
Depth of cut*Depth of cut	-0.10607	0.11257	-0.942	0.389
Cutting Speed*Feed Rate	0.31335	0.10816	2.897	0.034
Cutting Speed*Depth of cut	0.05440	0.10816	0.503	0.636
Feed Rate*Depth of cut	-0.20660	0.10816	-1.910	0.114

S = 0.2163 R-Sq = 97.9% R-Sq(adj) = 94.2%

Analysis of Variance for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	11.0021	11.0021	1.22246	26.13	0.001
Linear	3	9.8505	9.85049	3.28350	70.17	0.000
Square	3	0.5763	0.57629	0.19210	4.11	0.081
Interaction	3	0.5753	0.57532	0.19177	4.10	0.081
Residual Error	5	0.2340	0.23396	0.04679		

Lack-of-Fit	3	0.2053	0.20525	0.06842	4.77	0.178
Pure Error	2	0.0287	0.02871	0.01436		
Total	14	11.2361				

Estimated Regression Coefficients for Ra using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	10.3042
Cutting Speed	-0.0129570
Feed Rate	-147.417
Depth of cut	8.03630
Cutting Speed*Cutting Speed	-1.58925E-05
Feed Rate*Feed Rate	525.400
Depth of cut*Depth of cut	-1.69720
Cutting Speed*Feed Rate	0.125340
Cutting Speed*Depth of cut	0.00217600
Feed Rate*Depth of cut	-33.0560

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล Cutting Force Ratio (Fy/Fz) สำหรับกระบวนการกลึง

Response Surface Regression: Fy/Fz versus Cutting Spee, Feed Rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fy/Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.504824	0.01784	28.290	0.000
Cutting Speed	-0.028490	0.01093	-2.607	0.048
Feed Rate	-0.035290	0.01093	-3.229	0.023
Depth of cut	0.008833	0.01093	0.808	0.456
Cutting Speed*Cutting Speed	0.031307	0.01609	1.946	0.109
Feed Rate*Feed Rate	0.029544	0.01609	1.837	0.126
Depth of cut*Depth of cut	0.015615	0.01609	0.971	0.376

Cutting Speed*Feed Rate	0.029997	0.01545	1.941	0.110
Cutting Speed*Depth of cut	-0.004165	0.01545	-0.270	0.798
Feed Rate*Depth of cut	0.014135	0.01545	0.915	0.402

S = 0.03091 R-Sq = 85.6% R-Sq(adj) = 59.7%

Analysis of Variance for Fy/Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.028377	0.028377	0.003153	3.30	0.101
Linear	3	0.017081	0.017081	0.005694	5.96	0.042
Square	3	0.006828	0.006828	0.002276	2.38	0.186
Interaction	3	0.004468	0.004468	0.001489	1.56	0.309
Residual Error	5	0.004777	0.004777	0.000955		
Lack-of-Fit	3	0.004287	0.004287	0.001429	5.84	0.150
Pure Error	2	0.000490	0.000490	0.000245		
Total	14	0.033153				

Estimated Regression Coefficients for Fy/Fz using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	3.37098
Cutting Speed	-0.00382508
Feed Rate	-22.6522
Depth of cut	-0.693543
Cutting Speed*Cutting Speed	3.13073E-06
Feed Rate*Feed Rate	47.2706
Depth of cut*Depth of cut	0.249836
Cutting Speed*Feed Rate	0.0119987
Cutting Speed*Depth of cut	-1.66609E-04
Feed Rate*Depth of cut	2.26157

Response Surface Regression: Temperature versus Cutting Speed, Feed Rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Temperature

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	494.000	5.448	90.671	0.000
Cutting Speed	12.875	3.336	3.859	0.012
Feed Rate	11.625	3.336	3.484	0.018
Depth of cut	-5.500	3.336	-1.649	0.160
Cutting Speed*Cutting Speed	-1.125	4.911	-0.229	0.828
Feed Rate*Feed Rate	-4.625	4.911	-0.942	0.390
Depth of cut*Depth of cut	-10.875	4.911	-2.214	0.078
Cutting Speed*Feed Rate	-2.250	4.718	-0.477	0.654
Cutting Speed*Depth of cut	4.500	4.718	0.934	0.384
Feed Rate*Depth of cut	-3.000	4.718	-0.636	0.553

S = 9.437 R-Sq = 88.0% R-Sq(adj) = 66.5%

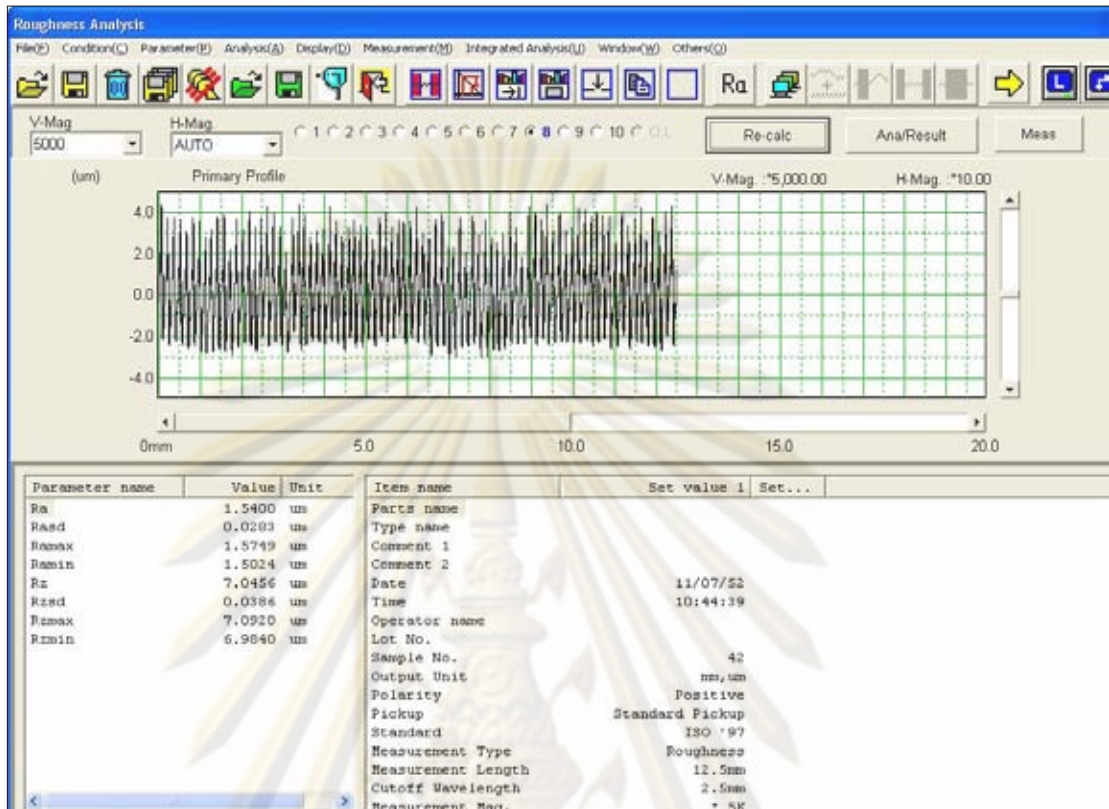
Analysis of Variance for Temperature

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	3276.48	3276.48	364.05	4.09	0.068
Linear	3	2649.25	2649.25	883.08	9.92	0.015
Square	3	489.98	489.98	163.33	1.83	0.258
Interaction	3	137.25	137.25	45.75	0.51	0.690
Residual Error	5	445.25	445.25	89.05		
Lack-of-Fit	3	419.25	419.25	139.75	10.75	0.086
Pure Error	2	26.00	26.00	13.00		
Total	14	3721.73				

Estimated Regression Coefficients for Ra using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-3.21875
Cutting Speed	0.207500
Feed Rate	3640.00
Depth of cut	278.000
Cutting Speed*Cutting Speed	-1.12500E-04
Feed Rate*Feed Rate	-7400.00
Depth of cut*Depth of cut	-174.000
Cutting Speed*Feed Rate	-0.90000
Cutting Speed*Depth of cut	0.180000
Feed Rate*Depth of cut	-480.000

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6 แสดงผลที่ได้จากเครื่องวัดความเรียบผิว (RoughnessTester) ณ ปริมาณการกลึง 1,500 ลบ.ซม. ที่ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มม.ต่อรอบ และความลึกตัด 0.5 มม.

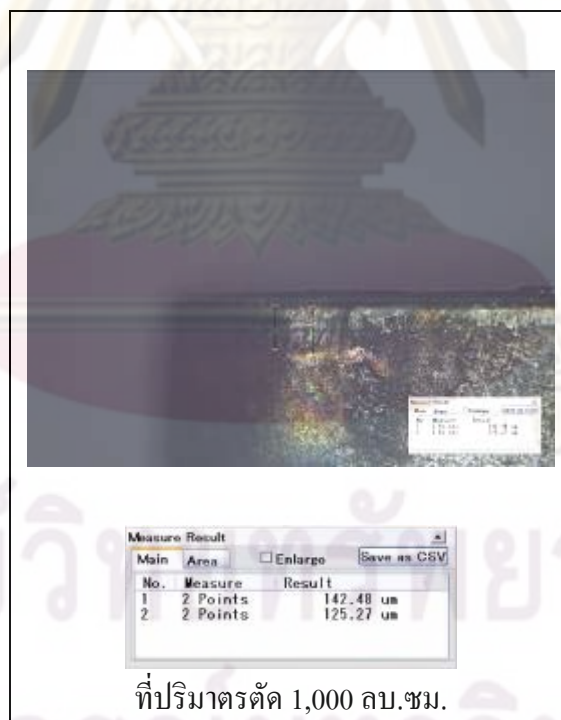
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



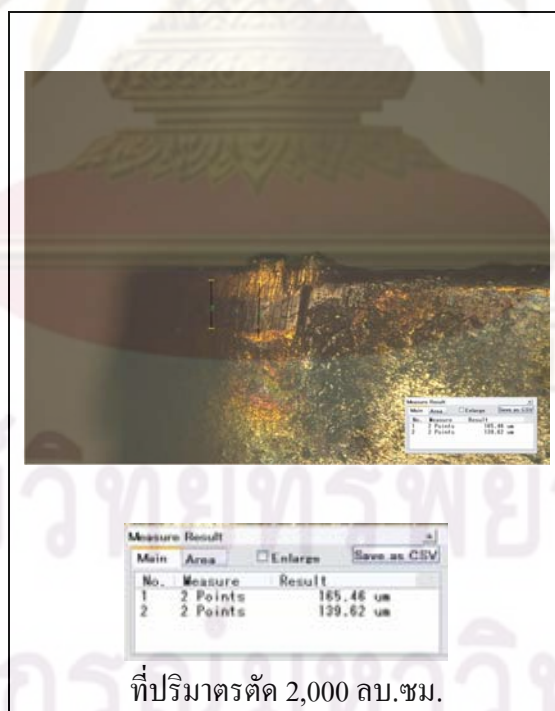
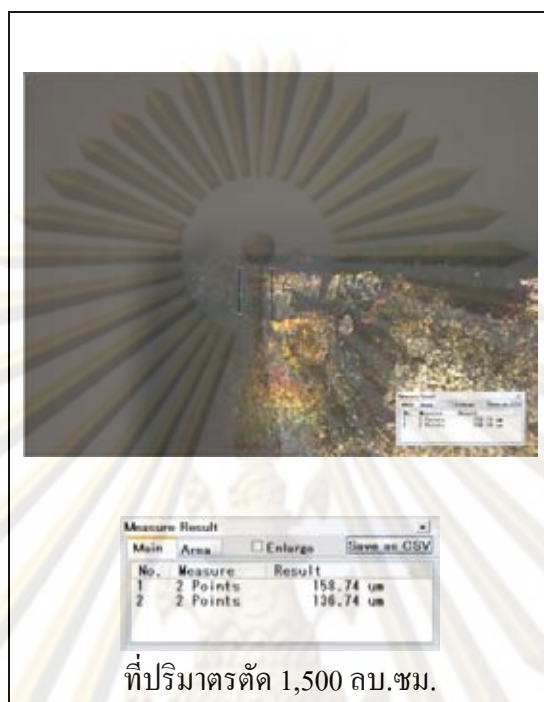
รูปที่ 7 ตัวอย่างแสดงเปรียบเทียบการสึกหรอของเม็ดมิดที่ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราเร็วป้อน ตัด 0.15 มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรที่แต่ละปริมาตรการกลึงตัด



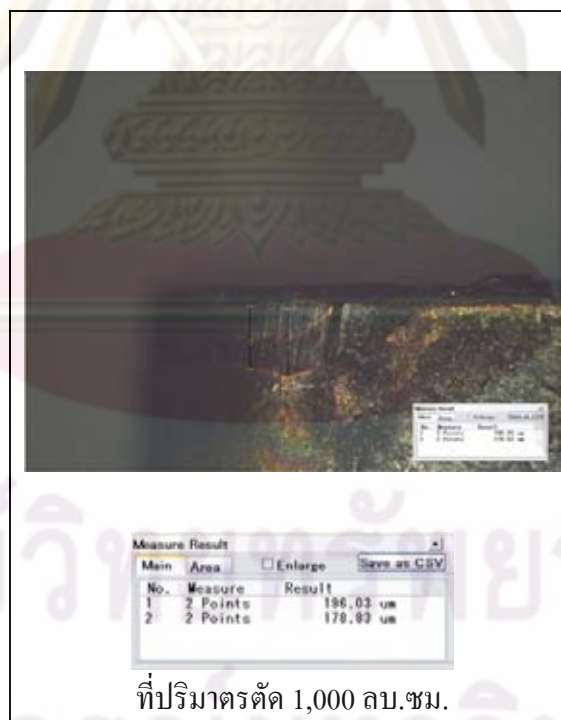
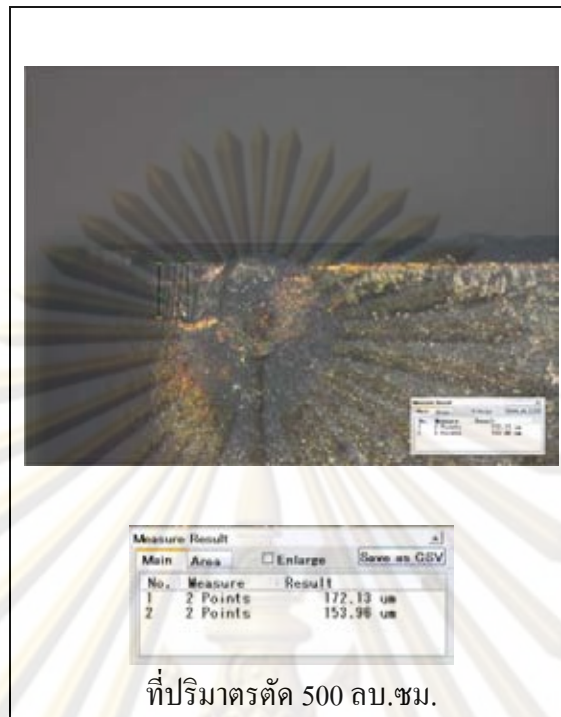
รูปที่ 8 ตัวอย่างแสดงเปรียบเทียบการสึกหรอของเม็ดเม็ดที่ความเร็วตัด 250เมตร/นาที อัตราเร็วป้อน
ตัด 0.15มิลลิเมตร/รอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรที่แต่ละปริมาตรการกลึงตัด



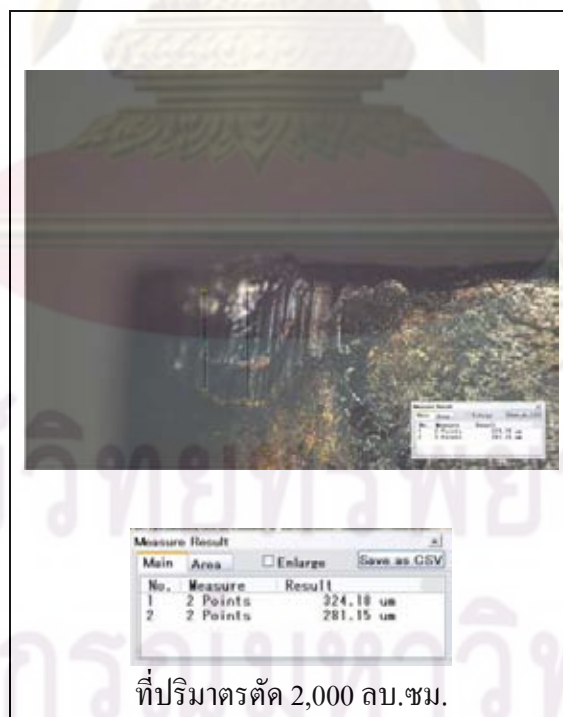
รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างการสึกหรอบนผิวหลบ(Flank Wear)ที่ปริมาตรการกลึงตัดที่แตกต่างกัน ของ ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร /รอบ และ ความลึกในการตัด 0.50 มิลลิเมตร



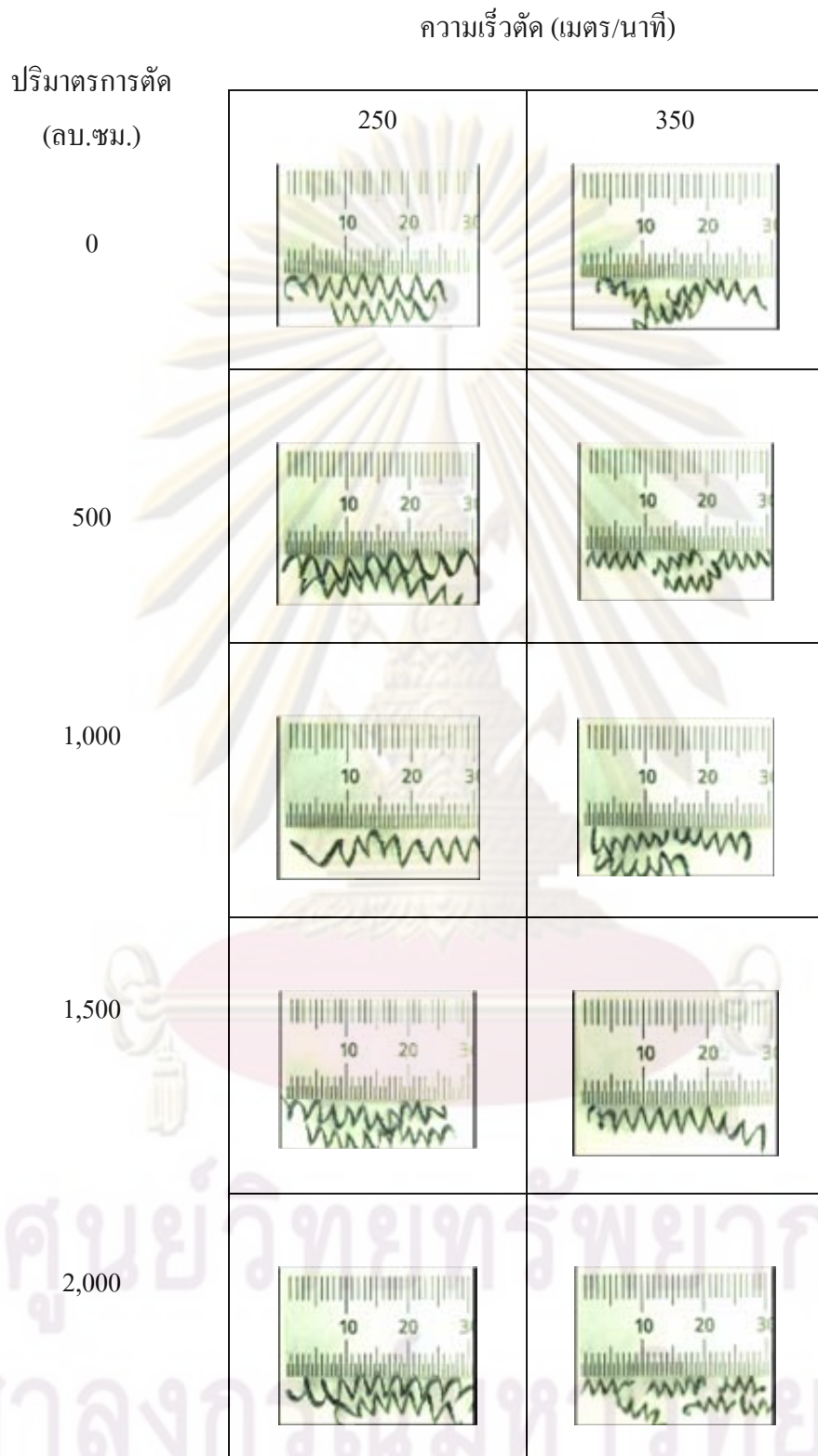
รูปที่ 9 (ต่อ) แสดงตัวอย่างการสึกหรอบนผิวหอบ (Flank Wear) ที่ปริมาตรการกลึงตัดที่แตกต่างกัน ของความเร็วตัด 250 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร /รอบ และ ความลึกในการตัด 0.50 มิลลิเมตร



รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างการสึกหรอบนผิวหอบ (Flank Wear) ที่ปริมาตรการกลึงตัดที่แตกต่างกัน ของ ความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร /รอบ และ ความลึกในการตัด 0.15 มิลลิเมตร

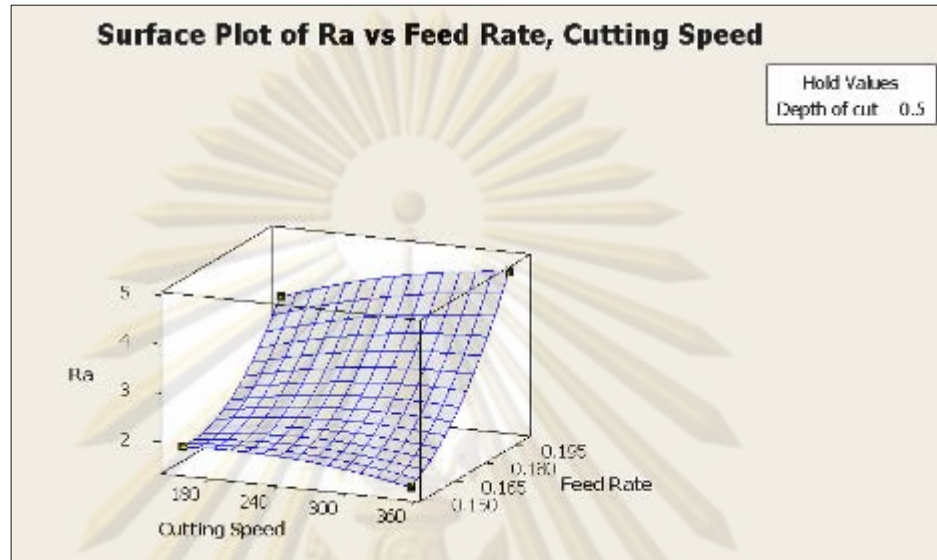


รูปที่ 10 (ต่อ)แสดงตัวอย่างการสึกหรอบนผิวหอบ(Flank Wear)ที่ปริมาตรการกัดตัดที่แตกต่างกัน ของความเร็วตัด 350 เมตร/นาที อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร /รอบ และ ความลึกในการตัด 0.15 มิลลิเมตร

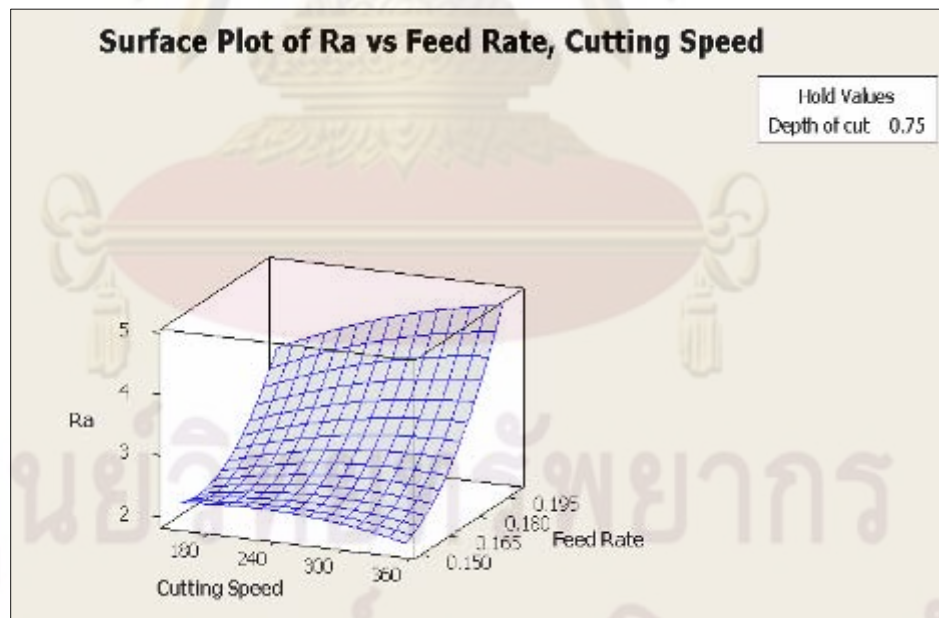


รูปที่ 11 แสดงขนาด รูปร่างเศษกลึงที่เกิดขึ้นจากการตัดแบบแห้ง
ที่อัตราการป้อนตัด 0.15 มิลลิเมตร /รอบ และความเร็วในการตัด 0.5 มิลลิเมตร.

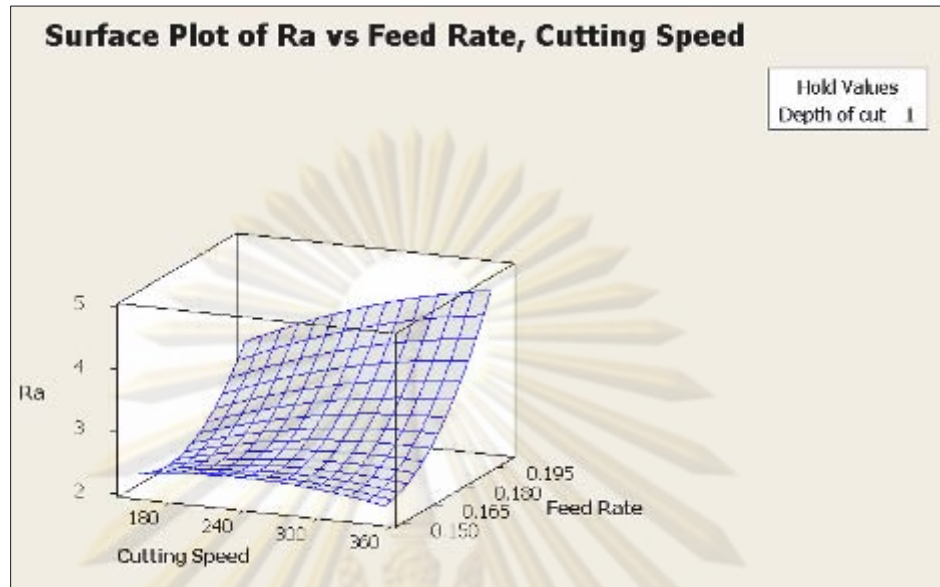
รูปพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวและปัจจัยต่างๆ



รูปที่ 12 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดที่ระยะลึกกัด 0.5 มม.

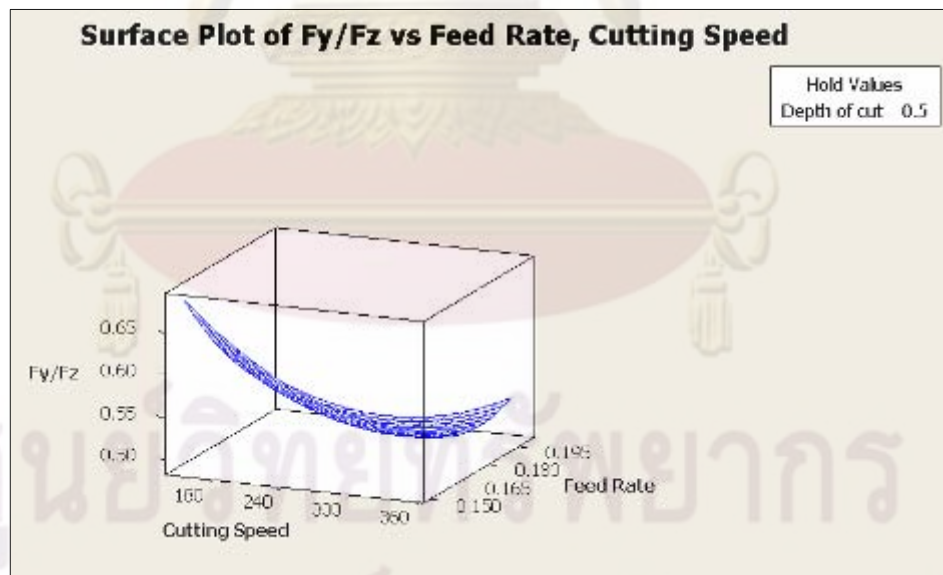


รูปที่ 13 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดที่ระยะลึกกัด 0.75 มม.

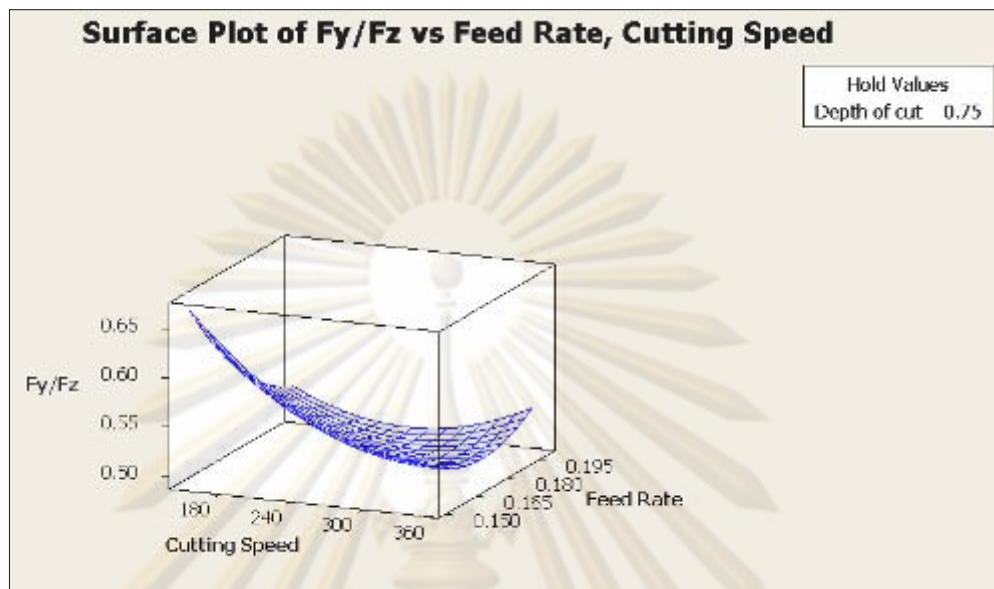


รูปที่ 14 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดที่ระยะลึกตัด 1.0 มม.

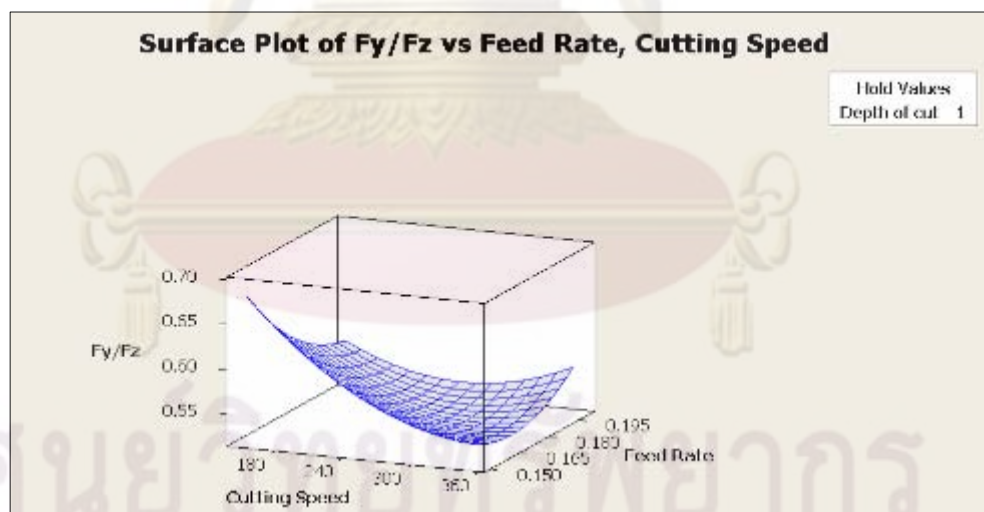
รูปพื้นผิวผลตอบ Cutting Force Ratio และปัจจัยต่างๆ



รูปที่ 15 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดที่ระยะลึกตัด 0.5 มม.

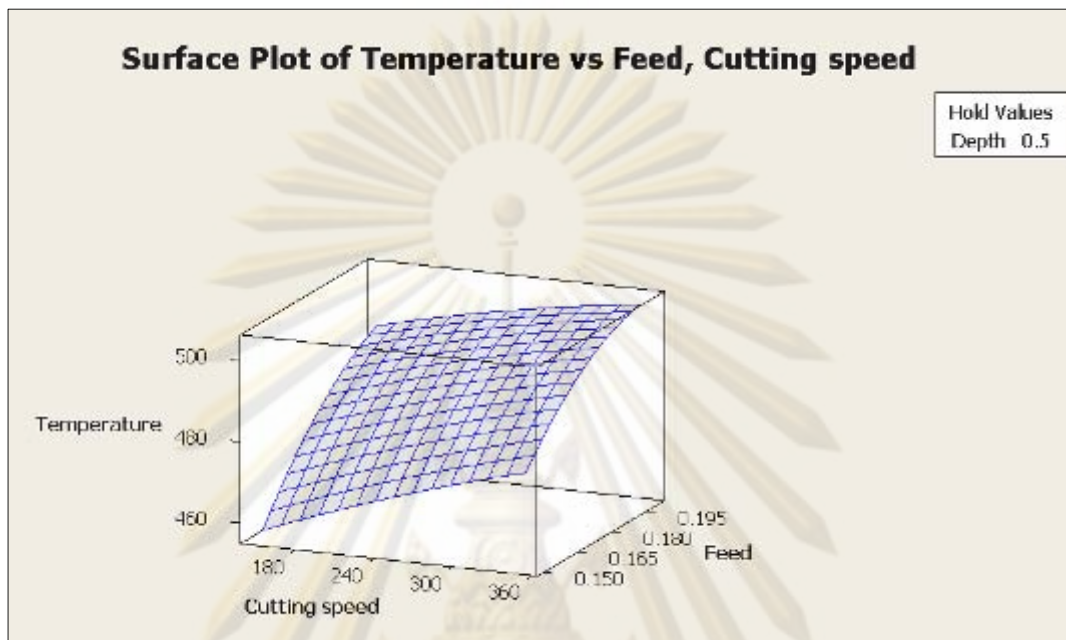


รูปที่ 16 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดที่ระยะลึกกัด 0.75 มม.

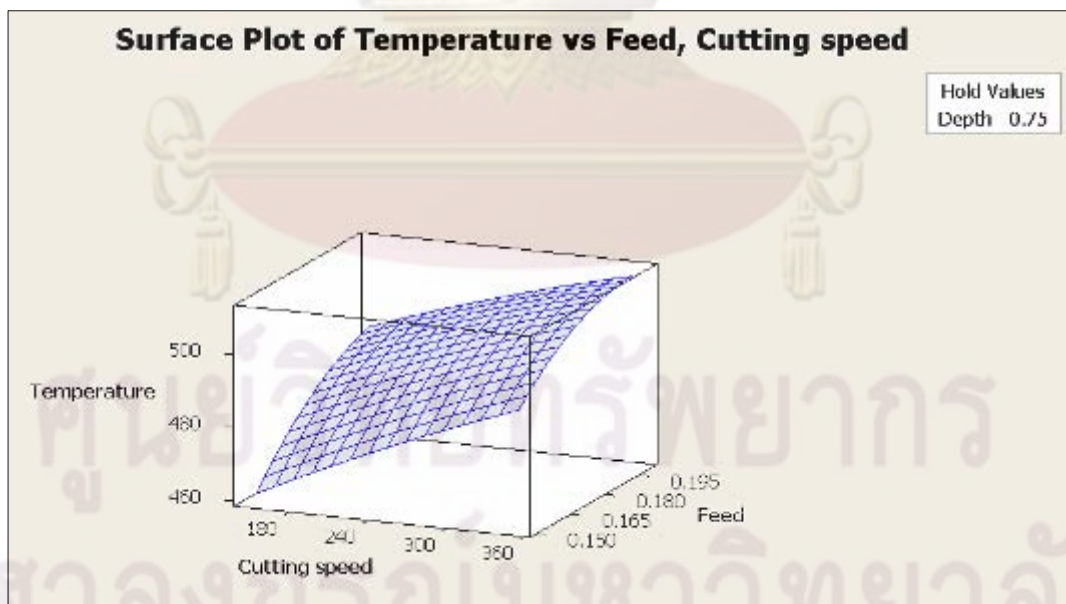


รูปที่ 17 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดที่ระยะลึกกัด 1.0 มม.

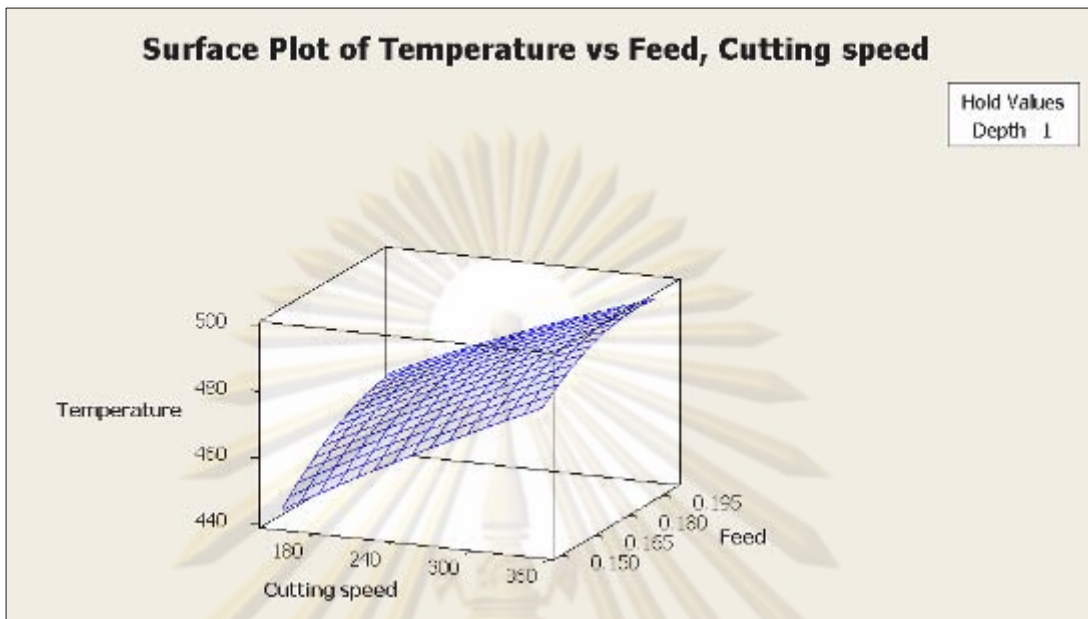
รูปพื้นผิวผลตอบของอุณหภูมิและปัจจัยต่างๆ



รูปที่ 18 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดที่ระยะลึกตัด 0.5 มม



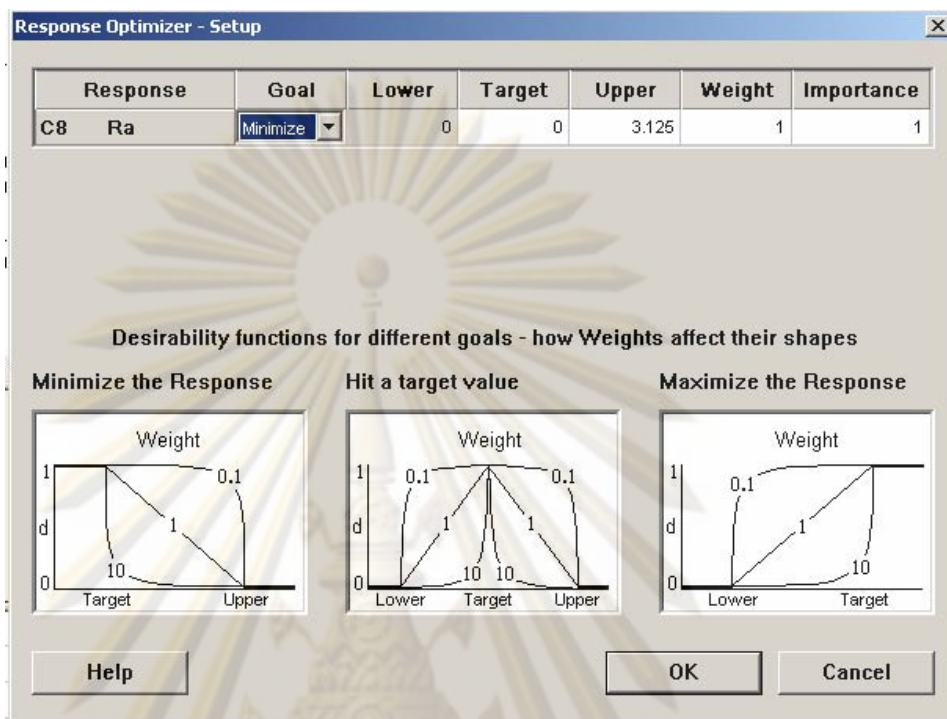
รูปที่ 19 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดที่ระยะลึกตัด 0.75 มม



รูปที่ 20 แสดงพื้นผิวผลตอบระหว่างความเร็วตัดและอัตราการป้อนตัดที่ระยะลึกตัด 1.0 มม.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

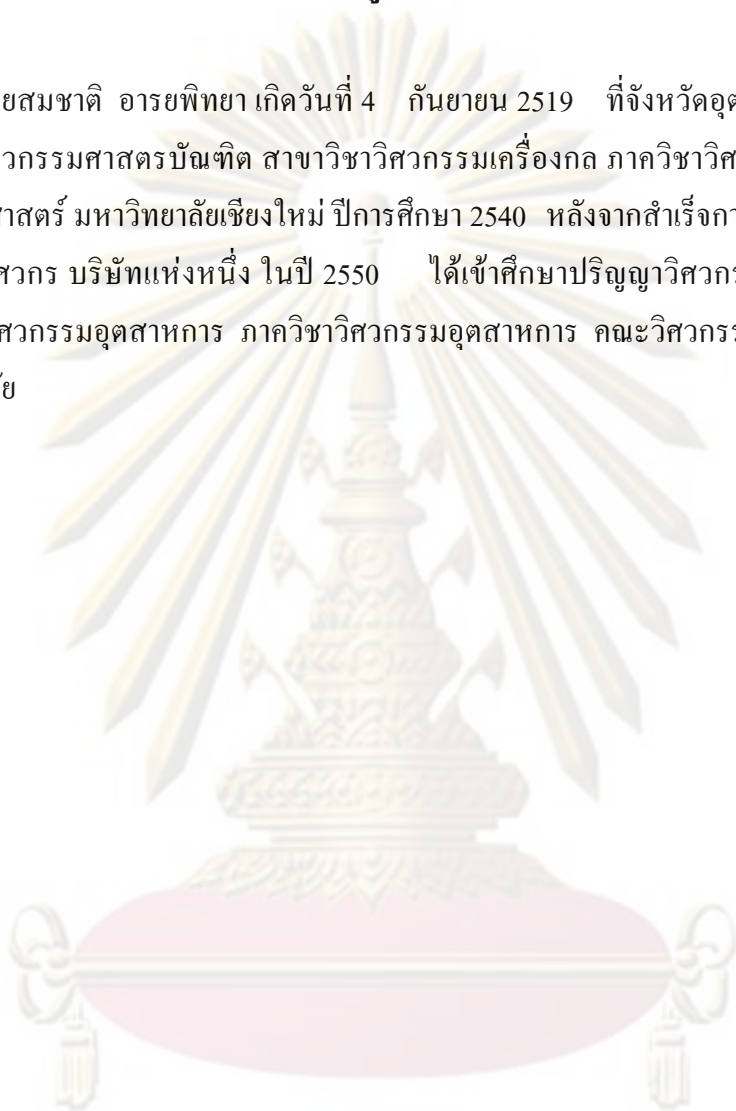


รูปที่ 21 แสดงตัวอย่างการแทนค่าใน Response Optimizer สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย Ra

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสมชาติ อารยพิทยา เกิดวันที่ 4 กันยายน 2519 ที่จังหวัดอุดรดิตถ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2540 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร บริษัทแห่งหนึ่ง ในปี 2550 ได้เข้าศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย