

ผลของวิธีการใช้สารหล่อเย็นของกระบวนการตัดเหล็กกล้าโดยใช้ใบมีดกัดหัวบอล



นายชาญณรงค์ รุ่งเรือง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CUTTING FLUID APPLICATIONS ON MILD STEEL MACHINING USING
BALL END MILLING CUTTER

Mr. Channarong Rungruang



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของวิธีการใช้สารหล่อเย็นของกระบวนการตัดเหล็กกล้า

โดยใช้ใบมีดกัดหัวบอล

โดย

นายชาญณรงค์ รุ่งเรือง

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพ็ชร์)

ชาญณรงค์ รุ่งเรือง : ผลของวิธีการใช้สารหล่อเย็นของกระบวนการตัดเหล็กกล้าโดย
ใช้ไม้มัดกัดหัวบอล. (EFFECTS OF CUTTING FLUID APPLICATIONS ON MILD
STEEL MACHINING USING BALL END MILLING CUTTER) อ. ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ, 165 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัด
จากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น ที่มีผลต่อความลึกหรือของมีดกัดหัวบอล ความเรียบ
ผิวชิ้นงาน และแรงตัด และศึกษาหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัด
เหล็กกล้าด้วยมีดกัดหัวบอลกับการใช้สารหล่อเย็นโดยการใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ
ด้วยเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน และจากผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความลึก
หรือของมีดกัด, ความเรียบผิวชิ้นงาน, และแรงตัด สำหรับการตัดด้วยเงื่อนไขการตัดทั้ง 3
รูปแบบ คือ การตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น คือ อัตราการ
ป้อนตัดมีอิทธิพลสูงสุด รองลงมาคือ ความลึกตัด และความเร็วตัด ตามลำดับ โดยการ
ประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นจะช่วยให้การยืดอายุการใช้งานของมีดกัดให้ยาวนานขึ้น

จากการใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบในการสร้างสมการลำดับที่สองของความเรียบ
ผิวชิ้นงาน, ความลึกหรือของมีดกัด, และสัดส่วนแรงตัด พบว่า สมการสามารถนำไปพยากรณ์
ผลตอบดังกล่าวได้ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% และได้เงื่อนไขการตัดที่สภาวะเหมาะสมของ
เงื่อนไขการตัดแบบเปียก คือ ความเร็วตัด 189 เมตรต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.02
มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร ด้วยระดับความพึงพอใจรวม 84.21% การ
ตัดแบบแห้ง คือ ความเร็วตัด 151 เมตรต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ,
และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร ด้วยระดับความพึงพอใจรวม 75.97% และการใช้สเปรย์สาร
หล่อเย็น คือ ความเร็วตัด 179 เมตรต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, และ
ความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร ด้วยระดับความพึงพอใจรวม 85.65%

ภาควิชา...วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา...วิศวกรรมอุตสาหกรรม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2553.....

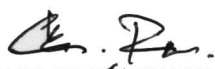
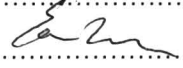
5170286121 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : BALL END MILLING / TOOL WEAR / SURFACE ROUGHNESS / CUTTING FORCE / RESPONSE SURFACE ANALYSIS / BOX-BEHNKEN DESIGN

CHANNARONG RUNGRUANG : EFFECTS OF CUTTING FLUID APPLICATIONS ON MILD STEEL MACHINING USING BALL END MILLING CUTTER. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.SOMKIAT TANGJITSITCHAROEN, D.Eng, 165 pp.

The objectives of this research are to study the relations of the cutting conditions with the various cooling methods as wet, dry, and mist cutting that affect the tool wear, the surface roughness, and the cutting force, and to find the suitable cutting condition for the mild steel with the ball end milling by utilizing the response surface analysis with the Box-Behnken technique. The experimentally obtained results show that the feed rate is the most significant effect on the response, following by the depth of cut and the cutting speed, respectively. The applications of cutting fluids help to extend the life of cutting tool.

A second-order model of the responses has been developed from the experimental data. The predicted model can be used to predict the response with 95% confident level. The response optimization of the cutting conditions are the cutting speed of 189 m/min, the feed rate of 0.02 mm/rev, and the depth of cut of 0.3 mm with the composite desirability of 84.21% for the wet cutting, the cutting speed of 151 m/min, the feed rate of 0.05 mm/rev, and the depth of cut of 0.3 mm with the composite desirability of 75.97% for the dry cutting, and the cutting speed of 179 m/min, the feed rate of 0.02 mm/rev, and the depth of cut 0.3 mm with the composite desirability of 85.65% for the mist cutting.

Department : .. Industrial Engineering	Student's Signature..... 
Field of Study : .. Industrial Engineering	Advisor's Signature..... 
Academic Year : 2010	

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเสียสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนข้อคิดต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการจัดทำงานวิจัย และเนื่องจากงานวิจัยนี้ ได้รับการอนุเคราะห์เครื่องขยายสัญญาณแรงตัดจากคุณ ธมลวรรณ คัญชิตากร ในนามของบริษัท Kistler จำกัด จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ อ.ดร. ณัฐชา ทวีแสงสกุลไทย รองศาสตราจารย์ สมชาย พวงเพิกคี่ก กรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม ที่เป็นประโยชน์ในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือ รวมถึงขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบคุณ พี่น้องๆ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่มีได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	8
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	8
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	9
1.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย	9
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	44
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	44
3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	44
3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	45
3.4 วิธีการทดลอง	48
3.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล	50
3.6 การออกแบบการทดลอง.....	53
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	58
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	60

4.1 ผลการทดลอง	60
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความหยابผิวที่ได้จากการทดลอง.....	60
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	66
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองการตัดด้วยเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ.....	93
4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	99
4.6 เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม.....	103
4.7 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง.....	107
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	111
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	111
5.2 อภิปรายผลการวิจัย	112
5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย	113
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	113
รายการอ้างอิง.....	115
ภาคผนวก.....	118
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ.....	119
ภาคผนวก ข ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ.....	139
ภาคผนวก ค กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบของการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ.....	158
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	165

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	รูปแบบการชำรุดเสียหายของมิดตัด.....	16
ตารางที่ 2.2	กลไกการสึกหรอของมิดตัด.....	16
ตารางที่ 2.3	การออกแบบบอกรูปแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร.....	36
ตารางที่ 3.1	ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	54
ตารางที่ 3.2	เมตริกซ์การออกแบบการทดลองสำหรับการตัดแบบเปียก.....	55
ตารางที่ 3.3	เมตริกซ์การออกแบบการทดลองสำหรับการตัดแบบแห้ง.....	56
ตารางที่ 3.4	เมตริกซ์การออกแบบการทดลองสำหรับการตัดแบบสเปรย์สารหล่อเย็น.....	57
ตารางที่ 4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกัดกับความเรียบผิวสูงสุด.....	62
ตารางที่ 4.2	ผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบเปียก.....	63
ตารางที่ 4.3	ผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแห้ง.....	64
ตารางที่ 4.4	ผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบสเปรย์สารหล่อเย็น.....	65
ตารางที่ 4.5	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย.....	69
ตารางที่ 4.6	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสึกหรอมิดกัด.....	72
ตารางที่ 4.7	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด.....	75
ตารางที่ 4.8	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย.....	78
ตารางที่ 4.9	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสึกหรอมิดกัด.....	81
ตารางที่ 4.10	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด.....	84
ตารางที่ 4.11	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย.....	87
ตารางที่ 4.12	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสึกหรอมิดกัด.....	90
ตารางที่ 4.13	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด.....	93
ตารางที่ 4.14	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ.....	94
ตารางที่ 4.15	TWO-SAMPLE T-TEST ของเงื่อนไขการตัดแบบแห้งกับการตัดแบบเปียก.....	94
ตารางที่ 4.16	TWO-SAMPLE T-TEST ของเงื่อนไขการตัดแบบแห้งกับการใช้ สเปรย์สารหล่อเย็น.....	95
ตารางที่ 4.17	TWO-SAMPLE T-TEST ของเงื่อนไขการตัดแบบเปียกกับการใช้ สเปรย์สารหล่อเย็น.....	95
ตารางที่ 4.18	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ.....	96
ตารางที่ 4.19	TWO-SAMPLE T-TEST ของเงื่อนไขการตัดแบบแห้งกับการตัดแบบเปียก.....	97

ตารางที่ 4.20	TWO-SAMPLE T-TEST ของเงื่อนไขการตัดแบบแห้งกับการใช้ สเปร์ยสารหล่อเย็น.....	97
ตารางที่ 4.21	TWO-SAMPLE T-TEST ของเงื่อนไขการตัดแบบเปียกกับการใช้ สเปร์ยสารหล่อเย็น.....	97
ตารางที่ 4.22	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ.....	99
ตารางที่ 4.23	ผลตอบของสมการเต็มรูปแบบเปรียบเทียบกับสมการลดรูปของ การตัดแบบเปียก	100
ตารางที่ 4.24	ผลตอบของสมการเต็มรูปแบบเปรียบเทียบกับสมการลดรูปของ การตัดแบบแห้ง	100
ตารางที่ 4.25	ผลตอบของสมการเต็มรูปแบบเปรียบเทียบกับสมการลดรูปของการใช้ สเปร์ยสารหล่อเย็น.....	101
ตารางที่ 4.26	สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ ของการตัดแบบเปียก	102
ตารางที่ 4.27	สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ ของการตัดแบบแห้ง	102
ตารางที่ 4.28	สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ ของการตัดโดยใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น	103
ตารางที่ 4.29	ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของ การตัดแบบเปียก	107
ตารางที่ 4.30	ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของ การตัดแบบแห้ง.....	108
ตารางที่ 4.31	ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของการตัดโดย ใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น	108
ตารางที่ 4.32	ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของการตัดด้วย เงื่อนไขต่างๆ.....	109
ตารางที่ 4.33	ผลการทดสอบด้วย T-TEST ของปัจจัยการตัดของการตัดด้วยเงื่อนไขต่างๆ..	109
ตารางที่ 4.34	ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของผลตอบ	109

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 1.1	การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล	4
รูปที่ 1.2	ต้นทุนกระบวนการผลิตในกระบวนการตัดแบบเปียก.....	6
รูปที่ 1.3	ประโยชน์ของการตัดแบบแห้ง.....	6
รูปที่ 1.4	ระบบของปริมาณสารหล่อลื่นหล่อเย็นน้อยที่สุด (MQCL).....	7
รูปที่ 1.5	ความแตกต่างระหว่างปริมาณสารหล่อลื่นน้อยที่สุด (MQL) และปริมาณสาร หล่อเย็นน้อยที่สุด (MQC).....	8
รูปที่ 2.1	กระบวนการตัดแบบต่างๆ	11
รูปที่ 2.2	กระบวนการตัดฉาก (ORTHOGONAL CUTTING)	12
รูปที่ 2.3	กระบวนการตัดเฉียง (OBLIQUE CUTTING).....	12
รูปที่ 2.4	ประเภทของเครื่องกัด.....	12
รูปที่ 2.5	การประยุกต์ใช้งานเครื่องกัดและลักษณะงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด	13
รูปที่ 2.6	เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์.....	13
รูปที่ 2.7	รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ.....	15
รูปที่ 2.8	บริเวณการเฉือนลำดับที่ 1 และบริเวณการเฉือนลำดับที่ 2	15
รูปที่ 2.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด	18
รูปที่ 2.10	ผลกระทบของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงในการตัดต่อการสึกหรอบนผิวหลบ โดยให้เกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอบนผิวหลบเป็น 0.5 มิลลิเมตร....	18
รูปที่ 2.11	รายละเอียดของผิวชิ้นงาน	21
รูปที่ 2.12	ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป	27
รูปที่ 2.13	การออกแบบส่วนประสมกลาง.....	35
รูปที่ 2.14	การออกแบบบอกรูปแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร	37
รูปที่ 3.1	วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	45
รูปที่ 3.2	คุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง	45
รูปที่ 3.3	มีดกัดแบบหัวบอล ยี่ห้อ 7-LEADERS	46
รูปที่ 3.4	เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ออร์ซนิต 5 แกน	46
รูปที่ 3.5	ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด	47
รูปที่ 3.6	ชาร์จแอมป์ลิไฟเออร์สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด	47
รูปที่ 3.7	ออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด.....	47

รูปที่ 3.8	ไมโครสโคปสำหรับวัดขนาดความลึกหรือ.....	48
รูปที่ 3.9	เครื่องวัดความเรียบผิวชิ้นงาน.....	48
รูปที่ 3.10	ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	49
รูปที่ 3.11	คุณสมบัติของสารหล่อเย็นที่ใช้ในการทดลอง.....	49
รูปที่ 3.12	ลักษณะการหล่อเย็นของการตัดแบบเปียก.....	50
รูปที่ 3.13	ลักษณะการหล่อเย็นของการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็น.....	50
รูปที่ 3.14	การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรง.....	51
รูปที่ 3.15	การเชื่อมต่อสายไดนาโมวัดแรงเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณและ เครื่องออสซิลโลสโคป.....	52
รูปที่ 3.16	การเตรียมชิ้นงานและชิ้นงานที่ผ่านการปาดหน้าเรียบร้อยแล้ว.....	52
รูปที่ 3.17	การวัดขนาดความลึกหรือของมีดกัด.....	53
รูปที่ 4.1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง RA กับ RZ.....	61
รูปที่ 4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบผิวสูงสุดกับระยะเวลาการตัด.....	62
รูปที่ 4.3	NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย.....	67
รูปที่ 4.4	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย.....	67
รูปที่ 4.5	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย.....	68
รูปที่ 4.6	NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลความลึกหรือของมีดกัด.....	70
รูปที่ 4.7	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกหรือของมีดกัด.....	70
รูปที่ 4.8	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกหรือของมีดกัด.....	71
รูปที่ 4.9	NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด.....	73
รูปที่ 4.10	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด.....	73
รูปที่ 4.11	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด.....	74
รูปที่ 4.12	NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย.....	76
รูปที่ 4.13	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย.....	76
รูปที่ 4.14	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย.....	77
รูปที่ 4.15	NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลความลึกหรือของมีดกัด.....	79
รูปที่ 4.16	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกหรือของมีดกัด.....	79
รูปที่ 4.17	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกหรือของมีดกัด.....	80
รูปที่ 4.18	NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด.....	82
รูปที่ 4.19	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด.....	82
รูปที่ 4.20	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด.....	83

รูปที่ 4.21	NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย	85
รูปที่ 4.22	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย	85
รูปที่ 4.23	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย.....	86
รูปที่ 4.24	NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลความสึกหรอของมีดกัด	88
รูปที่ 4.25	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความสึกหรอของมีดกัด	88
รูปที่ 4.26	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความสึกหรอของมีดกัด	89
รูปที่ 4.27	NORMAL PROBABILITY PLOT ของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด	91
รูปที่ 4.28	การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด	91
รูปที่ 4.29	กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด	92
รูปที่ 4.30	กราฟแสดงความสึกหรอของมีดกัดเมื่อระยะเวลาเปลี่ยนแปลง.....	98
รูปที่ 4.31	OPTIMIZATION PLOT ของเงื่อนไขการตัดแบบเปียก.....	104
รูปที่ 4.32	OPTIMIZATION PLOT ของเงื่อนไขการตัดแบบแห้ง.....	105
รูปที่ 4.33	OPTIMIZATION PLOT ของเงื่อนไขการตัดโดยใช้สเปรย์สารหล่อเย็น.....	106
รูปที่ 4.34	ลักษณะการสึกหรอของมีดกัดด้วยเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ	106

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตของประเทศไทยกำลังพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเพิ่มขึ้นอีกด้วย อันเนื่องมาจากประเทศไทยเป็นฐานการผลิตที่สำคัญในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากประเทศไทยมีแรงงานฝีมือที่มีคุณภาพและมีค่าจ้างที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับประเทศอื่นๆ จึงทำให้เป็นข้อได้เปรียบในส่วนนี้ และนอกจากนี้ประเทศไทยยังมีอุตสาหกรรมหลักๆ ที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศได้แก่ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ และอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้จำเป็นต้องใช้วัตถุดิบเป็นปัจจัยพื้นฐานในการผลิต โดยวัตถุดิบสำคัญที่ใช้เป็นปัจจัยในการผลิตคือ วัสดุประเภทเหล็กซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (Plain carbon steel)

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุประเภทโลหะ ที่ถูกนำมาเป็นวัสดุพื้นฐานสำหรับอุตสาหกรรมการผลิต และเป็นที่ยอมรับอย่างมากในการนำมาใช้ผลิตเป็นชิ้นส่วนในเครื่องจักรกลต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ เป็นต้น กระบวนการกัดเป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง ที่นำมาใช้ในการขึ้นรูปวัสดุต่างๆ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ ในปัจจุบันจึงมีการนำเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเข้ามาช่วยในการผลิต โดยเฉพาะเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่ง เซ็นเตอร์เป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง เพราะเครื่องจักรประเภทนี้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อนได้ดี และสามารถทำงานได้รวดเร็ว ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราการผลิตให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้งานเครื่องจักรกลซีเอ็นซีให้เกิดประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการป้อนตัดชิ้นงาน ความเร็วตัด ความลึกตัด ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน

ปัจจัยทางด้านเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ ต้นทุนของเครื่องมือตัดและสารหล่อเย็น และทางด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ สภาพแวดล้อมในพื้นที่การทำงานและการกำจัดสารหล่อเย็น ปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ส่งผลให้เกิดความพยายามในการลดปริมาณการใช้น้ำยาหล่อเย็น [1,2] จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวความคิดในการประยุกต์ใช้ปริมาณสารหล่อเย็นที่น้อยที่สุด (Minimal Quantity Lubrication, MQL) มาใช้ในกระบวนการผลิตด้วยเครื่องจักรกลซีเอ็นซี ประโยชน์หลักๆ ที่เห็นได้จากแนวความคิดนี้คือ สามารถลดต้นทุนในกระบวนการตัดและลดปริมาณการทิ้งสาร

หล่อเย็นได้ วิธีการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด จะทำให้ปริมาณสารหล่อเย็นสามารถเข้าถึงบริเวณการตัดได้ดี จึงทำให้การระบายความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างปลายมีดตัดกับผิวของชิ้นงาน ซึ่งบริเวณดังกล่าวจะเกิดความร้อนสูง ดังนั้นสารหล่อเย็นจึงช่วยในการถ่ายเทความร้อนจากมีดตัดไปยังสารหล่อเย็นได้ดีขึ้น [3,4] อัตราการสึกหรอของมีดตัดจึงลดลง ทำให้ผลิตภาพและคุณภาพของชิ้นงานสูงขึ้น

กระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการใช้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีนั้น ในปัจจุบันนั้นได้มีความพยายามอย่างมากในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ให้ได้ทั้งผลิตภาพและคุณภาพที่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชิ้นส่วนแม่พิมพ์ซึ่งเป็นชิ้นส่วนพื้นฐานที่จะนำไปผลิตชิ้นงานอื่นๆต่อไป ซึ่งขนาดและความเรียบผิวของชิ้นงานจะต้องได้ตามที่กำหนด และเครื่องมือตัดที่นิยมใช้ในการผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ส่วนใหญ่จะเป็นมีดตัดแบบหัวบอล ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมีดตัดหัวบอลจะมีราคาที่สูงและเหมาะสำหรับการกำจัดเนื้อวัสดุออกทีละน้อยๆ แต่เนื่องจากความต้องการในการกำจัดเนื้อวัสดุที่รวดเร็วจะทำให้เกิดความร้อนสูงในระหว่างกระบวนการตัด จึงเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้มีดตัดสึกหรอเร็วขึ้น และส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนของเครื่องมือตัดสูงตามไปด้วย ปัญหาการสึกหรอของมีดตัดเป็นปัญหาสำคัญในการบวนการกัด เพราะจะทำให้ผิวสำเร็จของชิ้นงานไม่ได้ตามข้อกำหนดด้านขนาดและความเรียบผิว จึงส่งผลให้มีการเปลี่ยนมีดตัดบ่อย การเปลี่ยนมีดตัดบ่อยนอกจากจะทำให้เสียค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับมีดตัดเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้เสียเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรใหม่อีกด้วย ปัญหาการสึกหรอของมีดตัดที่เร็วกว่ากำหนดจึงมีผลกระทบโดยตรงต่อผลิตภาพของกระบวนการตัด [5]

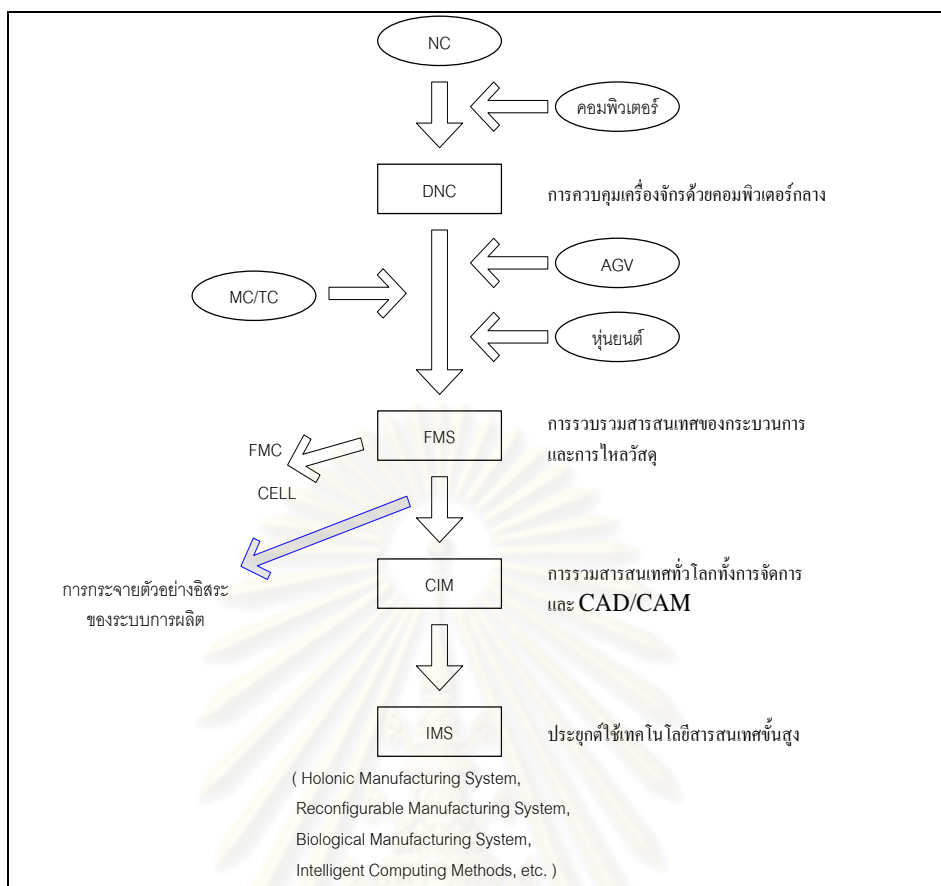
อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพผลของการใช้สารหล่อเย็นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง เช่น เงื่อนไขในการตัด ชนิดของมีดตัด ประเภทของกระบวนการตัด ชนิดของวัสดุ และวิธีการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น การพัฒนาเทคโนโลยีในกระบวนการตัดด้วยวิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด [3-4,6-10] จึงได้ถูกนำไปทดสอบความสามารถในการตัดเหล็กกล้าบนเงื่อนไขการตัดต่างๆ เพื่อที่จะลดอัตราการสึกหรอของมีดตัด ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัด และการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกัดเหล็กกล้าด้วยมีดกัดหัวบอลโดยการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นบนเครื่องซีเอ็นซีแม่ขึ้นนิ่งเซ็นเตอร์ และมีการตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นจากการตัดด้วยไดนามิเตอร์ เพื่อติดตามความสามารถในการตัดเหล็กกล้าในขณะตัดจริง

1.1.1 ภาพรวมของสภาวะการผลิต

ปัจจุบันการแข่งขันทางธุรกิจมีแนวโน้มที่จะทวีความรุนแรงเพิ่มสูงขึ้น เพื่อที่จะให้ธุรกิจสามารถแข่งขันกับคู่แข่งได้ ดังนั้นการผลิตสินค้าจึงไม่ได้คำนึงถึงปริมาณเป็นหลักเพียงอย่างเดียว แต่จะต้องเป็นการผลิตที่ได้คุณภาพ มีความเที่ยงตรง และส่งมอบให้ทันเวลาที่กำหนดด้วย

จากการศึกษาพบว่าประเทศอุตสาหกรรมชั้นนำของโลกได้หันมาลงทุนในประเทศไทยเพื่อเป็นฐานการผลิต ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วน อุตสาหกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และรวมถึงอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ก็ยิ่งมีการเจริญเติบโตขึ้นเรื่อยๆ ดังจะเห็นได้จากยอดการส่งออกชิ้นส่วนยานยนต์ของประเทศไทยที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมต้นน้ำสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ซึ่งโดยปกติแล้วการผลิตแม่พิมพ์จะใช้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีซึ่งช่วยในการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่งเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์จะถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเครื่องจักรกลประเภทนี้มีความยืดหยุ่นในการทำงานที่สูงมาก และประกอบกับโดยส่วนใหญ่แล้วแม่พิมพ์จะมีรูปร่างที่ซับซ้อนถ้าจะขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรกลทั่วไปไม่สามารถทำได้ และเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ก็สามารถทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ดี ซึ่งการผลิตแม่พิมพ์นั้นโดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้มีดตัดชนิดดอกกัดแบบหวับอลเป็นหลัก เพราะสามารถตัดชิ้นงานตามรูปทรงที่ต้องการ ดังนั้นดอกกัดแบบหวับอลจึงมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันกระบวนการผลิตมักพบเจอกับความต้องการที่มีมากยิ่งขึ้นในด้านต่างๆ เช่น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ วงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ที่สั้นลง ความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ การผลิตที่ต้องการให้มีต้นทุนที่ลดลงเพื่อให้สามารถแข่งขันกับคู่แข่งได้ การมีส่วนร่วมของลูกค้า และการแข่งขันในตลาดโลกที่มีความรุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ผู้ผลิตจึงหันมาใช้ระบบอัตโนมัติในการผลิตมากยิ่งขึ้น

เนื่องจากสภาวะแวดล้อมต่างๆ ทางธุรกิจที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดเวลา ดังนั้นระบบการผลิตในอนาคตควรมีคุณลักษณะความเป็นอัจฉริยะ การตอบสนองที่รวดเร็ว สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูง รองรับการผลิตปริมาณน้อยแต่มีความหลากหลายได้ และตระหนักถึงสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เพื่อที่จะให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าวข้างต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ และในขณะเดียวกันก็ยังรักษาหรือเพิ่มความสามารถในการแข่งขันโดยรวมขององค์กรไว้ได้ เพื่อให้มีความเข้าใจในประวัติของการพัฒนาของกระบวนการผลิตจากในอดีตไปจนถึงกระบวนการผลิตที่จะเกิดขึ้นในอนาคต [11] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 การพัฒนาเทคโนโลยีของระบบการผลิตเชิงกล

การผลิตเชิงกลด้วยระบบอัตโนมัติ มีจุดเริ่มต้นจากเครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลข (Numerical Control) ต่อมาถูกพัฒนามาเป็นระบบการควบคุมเชิงตัวเลขทางตรง (Direct NC, DNC) โดยเครื่องจักรที่ควบคุมเชิงตัวเลขหลายๆ เครื่องจะถูกควบคุมโดยคอมพิวเตอร์กลาง โดยระบบดีเอ็นซีที่ถูกบ่งชี้ในรูปของผลลัพธ์ของไหลของสารสนเทศในระบบการผลิต ซึ่งก็คือระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible Manufacturing System, FMS) โดยชิ้นงานและเครื่องมือต่างๆ ได้ถูกขนส่งระหว่างคลังสินค้ากับเครื่องจักรอย่างอัตโนมัติโดยรถเอจีวี (Automated Guide Vehicles, AGVs) และทำการขนถ่ายโดยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและอื่นๆ ซึ่งระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นจะก่อให้เกิดการกระจายตัวอย่างอิสระของระบบการผลิต แต่อย่างไรก็ตาม ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นต้องใช้การลงทุนสูงในการติดตั้งระบบ และในขณะเดียวกันก็ไม่ง่ายที่จะปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อที่จะจัดการกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณการผลิตและชนิดของผลิตภัณฑ์ ด้วยเหตุนี้ระบบการผลิตแบบเซลล์ (Flexible Manufacturing Cell, FMC) จึงเข้ามาแทนที่ระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น ซึ่งระบบการผลิตแบบเซลล์เป็นที่นิยมมากกว่า และบางครั้งการตรวจสอบชิ้นงานอัตโนมัติด้วยระบบการผลิตแบบเซลล์นั้นมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น

นอกจากนี้ยังเดินเครื่องได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นมากกว่าที่จะจัดการกับความเปลี่ยนแปลงของการสั่งซื้อของลูกค้า

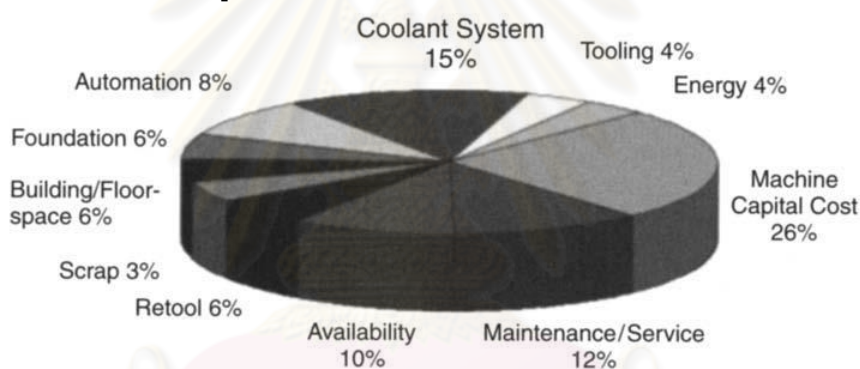
การผลิตแบบผสมผสานด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Integrated Manufacturing, CIM) เป็นการนำความสามารถของคอมพิวเตอร์มาช่วยในการการประมวลผลสารสนเทศของระบบการผลิต โดยเพิ่มเข้ามาในขอบเขตของกิจกรรมการผลิตอันได้แก่ การตลาด การจัดการ การควบคุมกระบวนการผลิต และการบริการ แต่อย่างไรก็ตาม ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำมาซึ่งความยืดหยุ่นและความสามารถในการผลิตที่เพิ่มขึ้นในการผลิตจริง ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น มีความคาดหวังว่าระบบการผลิตที่แจกจ่ายได้ด้วยตัวเอง (Autonomous distributed manufacturing systems) ที่ประกอบกับเทคโนโลยีสารสนเทศขั้นสูงจะเป็นคำตอบของการผลิตในอนาคตที่สามารถผลิตสินค้าที่มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ใหม่ได้มากขึ้นอันเนื่องมาจากอุปสงค์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาจากลูกค้า ระบบนี้มีชื่อวาระบบการผลิตอัจฉริยะ (Intelligent Manufacturing System, IMS) เพื่อตอบสนองต่อระบบการผลิตอัจฉริยะ ดังนั้นเครื่องจักรกลอัจฉริยะจึงได้ถูกวิจัยและพัฒนาขึ้น โดยเครื่องจักรกลที่มีความอัจฉริยะอยู่ภายในจะสามารถทำงานได้ด้วยตัวเอง สามารถทำงานร่วมกับเครื่องจักรอื่นๆ และสิ่งอำนวยความสะดวกทางการผลิต

เทคโนโลยีควบคุมเครื่องจักรกลซีเอ็นซีได้ถูกพัฒนาไปอย่างมาก ซึ่งเครื่องจักรกลเชิงปัญญาถูกคาดหวังอย่างมากในอนาคต ในเรื่องความสามารถตัดสินใจแทนผู้ปฏิบัติงานและเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการตัดให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของการตัดได้โดยอัตโนมัติ ในขณะที่เครื่องจักรกลปัจจุบันจะต้องกำหนดเงื่อนไขการตัดให้แน่นอนก่อนที่จะเริ่มทำการตัด เครื่องจักรกลควบคุมเชิงตัวเลขนั้นมีความสามารถมากกว่าเครื่องจักรกลแบบธรรมดา อัตราผลิตภาพจะเพิ่มขึ้นอย่างมากด้วยการลดเวลาที่ไม่ได้ผลิต (Non-productive time) ในวัฏจักรการผลิตลง เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่ซับซ้อนหลายเครื่องได้ถูกพัฒนา และนำมาใช้ในทางปฏิบัติเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ซึ่งเครื่องจักรกลซีเอ็นซีสมัยใหม่นี้ได้มีการติดตั้งชุดเปลี่ยนเครื่องมืออัตโนมัติ ทำให้ช่วยลดเวลาการเปลี่ยนเครื่องมือตัดลงได้มาก ความก้าวหน้าที่สำคัญของเครื่องจักรกลซีเอ็นซีคือ การควบคุมที่สามารถปรับได้ (Adaptive control, AC) กระบวนการตัดได้ถูกรวมอยู่ในวงจรการควบคุมแบบป้อนกลับของเครื่องจักร เช่นเซอร์หลายรูปแบบได้ถูกพัฒนาและนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับเครื่องจักรกลซีเอ็นซีเพื่อตรวจจับสถานะของการตัดเพื่อที่จะป้อนกลับสารสนเทศต่างๆ ด้วย

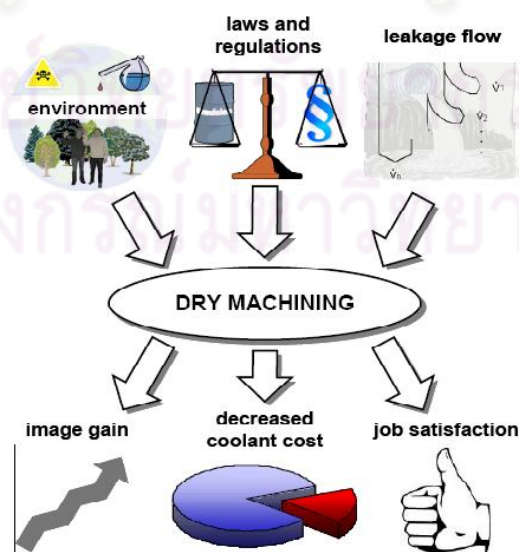
1.1.2 ภาพรวมของกระบวนการตัดในปัจจุบัน

กระบวนการตัดสมัยใหม่ต้องเผชิญกับความกดดันทางด้านต้นทุนการผลิตและความคาดหวังในเรื่องของคุณภาพที่สูง เพื่อรักษาสถานะภาพในการแข่งขันองค์กรจะต้องสร้างโอกาสในการลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงการผลิตอย่างต่อเนื่อง

การตระหนักถึงสิ่งแวดล้อมและความกดดันในเรื่องต้นทุนการผลิตในสภาวะปัจจุบัน ทำให้มีการพิจารณาถึงเรื่องการหล่อลื่นและหล่อเย็นในกระบวนการตัด (Machining process) มากขึ้น โดยทั่วไปพบว่าต้นทุนที่เกี่ยวข้องกับสารหล่อเย็น (Cutting fluid) จะมีค่าประมาณ 7-17% [2] ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชิ้นงานที่ต้องการผลิต โครงสร้างการผลิต และทำเลที่ตั้ง การใช้เทคโนโลยีการตัดแบบแห้งหรือการตัดแบบปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด (Minimum quantity lubricant, MQL) แทนแบบดั้งเดิม (Conventional or flooding application) จะช่วยทำให้ลดต้นทุนลงได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้วิธีดังกล่าวจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแล้ว ยังช่วยสร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่เป็นมิตรและเสริมสร้างภาพลักษณ์ที่ดีขององค์กรอีกด้วย [6] ดังแสดงในรูปที่ 1.3



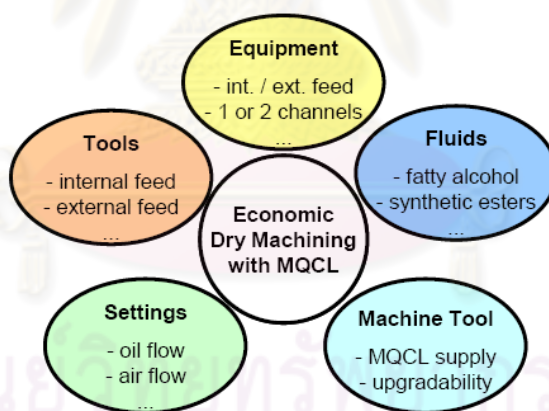
รูปที่ 1.2 ต้นทุนกระบวนการผลิตในกระบวนการตัดแบบเปียก



รูปที่ 1.3 ประโยชน์ของการตัดแบบแห้ง

การวิเคราะห์และทำความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกของกระบวนการตัดเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนาระบบการตัดแบบแห้งให้เหมาะสมทั้งทางด้านเศรษฐศาสตร์และความปลอดภัย การรับเอาเทคโนโลยีการตัดแบบใหม่นี้มาประยุกต์ใช้ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพิจารณาถึงความสามารถของเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องควบคู่กันไปด้วย สารหล่อเย็นจะช่วยให้การลดแรงเสียดทานในขณะตัด ทำให้ลดความร้อนและถ่ายเทความร้อนจากมีดตัด นอกจากนี้ยังช่วยเป่าเศษโลหะให้หลุดออกจากมีดตัดและชิ้นงาน และช่วยให้การกระจายตัวของอนุกรมิมส์มาเสมอตลอดทั้งชิ้นงานซึ่งจะช่วยให้คุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปได้ตามข้อกำหนดที่ต้องการ

ในกระบวนการตัดหลายๆ กระบวนการพบว่า ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการตัดแบบแห้งให้ประสบความสำเร็จ [6] การที่จะนำวิธีดังกล่าวไปใช้ในการตัดจริงได้ ผู้รับเอาเทคโนโลยีไปใช้จะต้องมีความเข้าใจในเรื่องระบบปริมาณสารหล่อลื่นหล่อเย็นน้อยที่สุด (MQCL) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ได้แก่ เทคโนโลยีการจ่ายสารหล่อลื่นหล่อเย็น ตัวกลางปริมาณสารหล่อลื่นหล่อเย็นน้อยที่สุด การกำหนดปัจจัยต่างๆ ในการทำงานร่วมกันของเครื่องมือและเครื่องจักร การพิจารณาองค์ประกอบต่างๆ ในระบบปริมาณสารหล่อลื่นหล่อเย็นน้อยที่สุดอย่างเข้าใจจะทำให้สามารถบรรลุผลลัพธ์ที่ต้องการได้อย่างเหมาะสมทั้งทางด้านเทคโนโลยีและด้านเศรษฐศาสตร์



รูปที่ 1.4 ระบบของปริมาณสารหล่อลื่นหล่อเย็นน้อยที่สุด (MQCL)

หน้าที่หลักของสารหล่อเย็นในกระบวนการตัดแบบเปียก (Wet cutting) คือ การหล่อเย็นและให้การหล่อลื่นบริเวณการผิวสัมผัสของเครื่องมือตัดกับชิ้นงาน และช่วยในการกำจัดเศษโลหะออก โดยทั่วไปแล้วจะใช้พวกน้ำมันเข้มข้น (Straight oils) หรือพวกอิมัลชัน (Emulsion) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตและกระบวนการตัดที่เกี่ยวข้อง อิมัลชันจะมีคุณสมบัติเด่นคือถ่ายเทความร้อนได้ดีเนื่องจากมีส่วนผสมหลักคือน้ำ ส่วนน้ำมันจะใช้เมื่อมีความต้องการด้านการหล่อลื่นสูง สารหล่อเย็นทั้งสองชนิดมีความสามารถในการกำจัดเศษโลหะออกได้ดี ส่วนกรณีของ

การใช้อากาศอัดแทนสารหล่อเย็น จะทำให้คุณสมบัติด้านการหล่อลื่นหล่อเย็นรวมทั้งการกำจัดเศษโลหะลดลง

การประยุกต์ใช้ปริมาณสารหล่อลื่นหล่อเย็นน้อยที่สุด สารหล่อเย็นที่ใช้มักจะเป็นพวกน้ำมัน แต่ในบางครั้งก็จะเป็นพวกน้ำหรืออิมัลชัน สารหล่อเย็นเหล่านี้จะถูกฉีดไปยังเครื่องมือตัดในปริมาณน้อยๆ ทั้งนี้อาจใช้อากาศอัดเพิ่มแรงดันเพื่อให้ตัวกลางดังกล่าวแตกตัวในหัวฉีด เพื่อให้ขนาดของหยดสารตัวกลางเล็กลง สภาวะการตัดแบบแห้งในเทอมของปริมาณสารหล่อลื่นหล่อเย็นน้อยที่สุด โดยทั่วไปแล้วจะหมายถึง การฉีดสารหล่อเย็นในรูปของอนุภาคแอโรซอล (Aerosol) เข้าไปยังบริเวณการตัด (Cutting zone) ความแตกต่างระหว่างปริมาณสารหล่อลื่นน้อยที่สุด (Minimum quantity lubricant, MQL) กับปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด [6] (Minimum quantity cooling, MQC) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1.5

Minimal Quantity Cooling Lubrication (MQCL) normal consumption per machine hour: 10 – 50 ml MQCL medium			
Minimal Quantity Cooling (MQC)		Minimal Quantity Lubrication (MQL)	
Emulsion (Water+Oil) Water $c_{p,water} = 4.18 \text{ kJ/kgK}$ Air $c_{p,air} = 1.04 \text{ kJ/kgK}$		Oil $c_{p,oil} = 1.92 \text{ kJ/kgK}$	
Medium	Cooling	Lubrication	Chip removal
Emulsion	excellent	good	excellent
Oil	good	excellent	good
Air pressure	little	no	little

รูปที่ 1.5 ความแตกต่างระหว่างปริมาณสารหล่อลื่นน้อยที่สุด (MQL) และปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด (MQC)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดจากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของใบมีดกัดหัวบอล ความเรียบผิวชิ้นงาน และแรงตัดที่เกิดขึ้น
2. เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตัดเหล็กกล้าด้วยใบมีดกัดหัวบอลกับการใช้สารหล่อเย็น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. การทดลองการตัดแบบเปียก (Wet Cutting) การตัดแบบแห้ง (Dry Cutting) และการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น (Mist Cutting) ที่ความเร็วรอบการตัด ที่ระดับ 8,000 10,000 และ

- 12,000 รอบต่อนาที หรือความเร็วตัดที่ 151 189 และ 226 เมตรต่อนาที ตามลำดับ อัตราการป้อนตัด ที่ 0.02 0.04 และ 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ และที่ความลึกตัด 0.3 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X
2. การใช้สเปรย์สารหล่อเย็นใช้แรงดันลม 0.5 MPa หัว Nozzle มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ระยะห่างจากมีดกัด 25 มิลลิเมตร ทำมุม 30 องศา กับแนวราบ
 3. สารหล่อเย็นที่ใช้คือ Castrol clearedge EP 690 ที่ความเข้มข้น 6%
 4. วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) ขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร ซึ่งมีความแข็งไม่เกิน 235 HB
 5. มีดตัดที่ใช้เป็นมีดกัดแบบหัวบอล (Ball End Milling) ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วย ไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร
 6. อายุการใช้งานของมีดกัดจะกำหนดจากการสึกหรอบนผิวหลบ (Flank wear) ที่ขนาดของการสึกหรอ 0.2 มิลลิเมตร โดยทำการตัดจนกว่ามีดกัดจะสึกหรอถึงค่าที่กำหนดจึงหยุดและเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด
 7. ตัวชี้วัดผลลัพธ์วัดจาก ความเร็วป้อนชิ้นงาน ความสึกหรอของมีดตัด และแรงตัดที่วัดด้วยไดนาโมมิเตอร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาความสามารถในกระบวนการตัดเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C) บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ด้วยใบมีดกัดหัวบอล
2. เพิ่มผลผลิตของกระบวนการตัด ลดต้นทุนมีดตัด ลดเวลาในปรับตั้งเครื่องจักร
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาเป็นเครื่องจักรกลซีเอ็นซีอัจฉริยะในอนาคต

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมสำหรับการตัดเหล็กกล้าด้วยใบมีดกัดหัวบอลกับการใช้สารหล่อเย็น

1.6 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและสำรวจงานวิจัยต่างๆ รวมถึงตรวจสอบปัจจัยในกระบวนการกัดเหล็กกล้าที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน

2. ออกแบบการทดลองและกำหนดเงื่อนไขในการตัดที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน เหล็กกล้ารวมถึงการออกแบบติดตั้งเครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์
3. ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยและวิเคราะห์ผลการตัดสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบเปียก (Wet cutting) บนเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนึงเซ็นเตอร์สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้า
4. ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยและวิเคราะห์ผลการตัดสำหรับเงื่อนไขการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็น (Mist cutting) และเงื่อนไขการตัดแบบแห้ง (Dry cutting) บนเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนึง เซ็นเตอร์สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้า
5. ตรวจสอบผิวสัมผัสของชิ้นงานและการสึกหรอของมีดตัด
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยหลักการวิธีพื้นผิวผลตอบ
7. สรุปผลที่ได้จากงานวิจัยและข้อเสนอแนะ
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

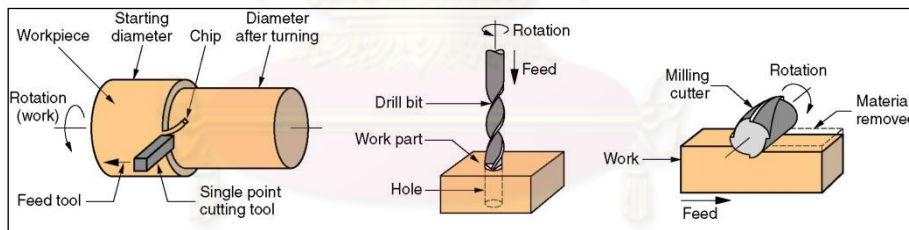
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 กระบวนการตัด (Machining Process)

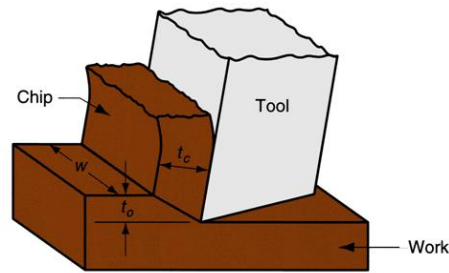
กระบวนการตัดหมายถึง กระบวนการขจัดเนื้อวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากชิ้นงาน ในรูปของเศษโลหะ ถ้าชิ้นงานเป็นโลหะแล้วกระบวนการนั้นมักจะถูกเรียกว่ากระบวนการตัดโลหะ โดยการใช้เครื่องมือตัดเพื่อกำจัดส่วนเกินของเนื้อวัสดุ เพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการ กระบวนการตัดมีข้อดี คือ ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท สร้างชิ้นงานให้มีขนาดและรูปทรงต่างๆ ได้ มีความแม่นยำสูง และผิวสำเร็จของชิ้นงานมีคุณภาพดี เป็นต้น แต่กระบวนการตัดก็มีข้อเสียคือ เศษตัดที่ต้องทิ้งเยอะและใช้เวลาในการตัดนาน เป็นต้น รูปที่ 2.1 แสดงถึงกระบวนการตัดที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ [12]

ในปัจจุบันกระบวนการตัดได้พัฒนาไปอย่างมากทั้งทางด้านเครื่องมือกล วัสดุ และการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทำให้ปัจจุบันสามารถผลิตชิ้นงานในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างแพร่หลายจนแทบจะกล่าวได้ว่าสิ่งของที่ผลิตขึ้นมาเกือบทั้งหมดจะต้องผ่านหรือมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการตัด

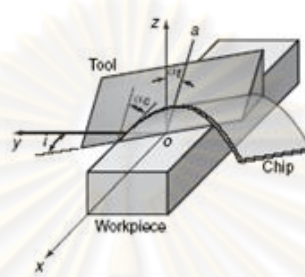


รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดแบบต่างๆ

นอกจากนี้ กระบวนการตัดสามารถแบ่งตามชนิดของเครื่องมือตัดได้เป็น การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดคมตัดเดียว การตัดที่ใช้เครื่องมือตัดหลายคมตัด และการตัดที่ใช้ล้อหินเจียร และกระบวนการตัดยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามลักษณะของกระบวนการ คือ กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting) ซึ่งหมายถึงกระบวนการตัดที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ของเศษวัสดุตั้งฉากกับคมตัด [6] และกระบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting) การเคลื่อนที่ของเศษวัสดุจะทำมุมกับคมตัด [2] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ



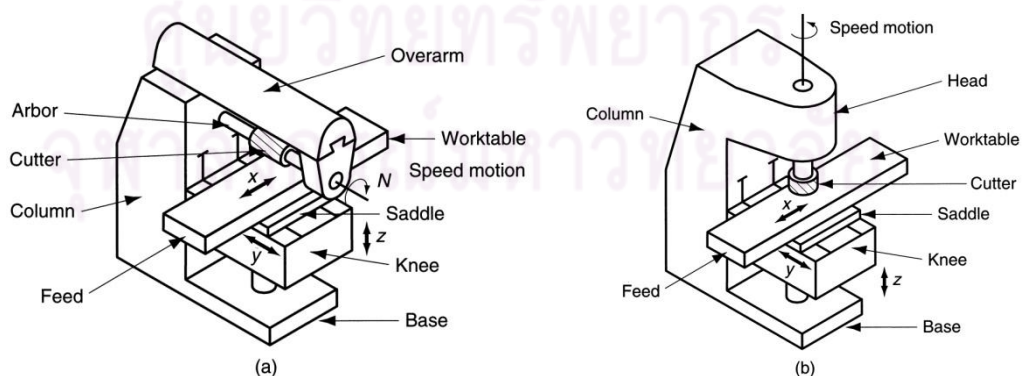
รูปที่ 2.2 กระบวนการตัดฉาก (Orthogonal Cutting)



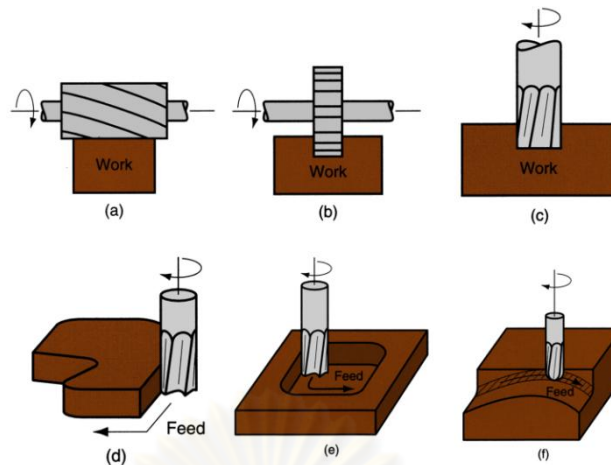
รูปที่ 2.3 กระบวนการตัดเฉียง (Oblique Cutting)

2.1.2 เครื่องกัดและกระบวนการกัด (Milling machine and milling process)

เครื่องกัดเป็นเครื่องมือกลพื้นฐานที่สำคัญชนิดหนึ่งในงานขึ้นรูปชิ้นงาน ซึ่งเครื่องกัดได้ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานต่างๆ จึงทำให้เครื่องกัดมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันอย่างมาก [2,12] อย่างไรก็ตามหากจะแบ่งประเภทของเครื่องกัดตามลักษณะแกนหมุนจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องกัดแนวนอน (Horizontal milling machine) และเครื่องกัดแนวตั้ง (Vertical milling machine) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเครื่องกัดทั้งสองชนิดนี้มีความเหมาะสมกับประเภทของงานที่ต่างกัน รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของงานที่สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเครื่องกัด

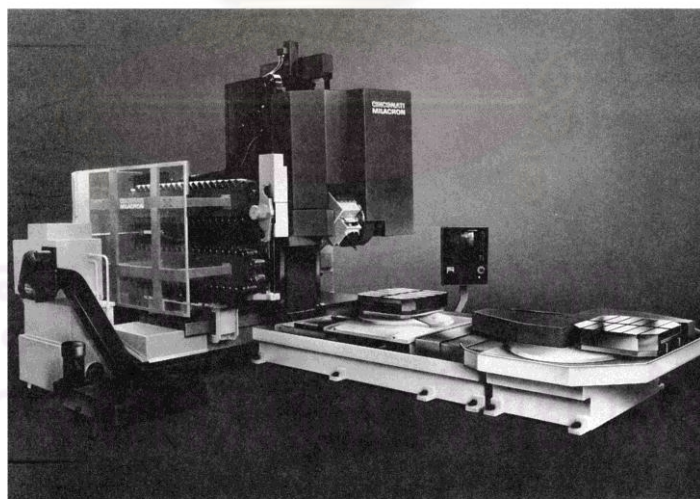


รูปที่ 2.4 ประเภทของเครื่องกัด (a) เครื่องกัดแนวนอน (b) เครื่องกัดแนวตั้ง



รูปที่ 2.5 การประยุกต์ใช้งานเครื่องกัดและลักษณะงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด

ในปัจจุบันนี้งานด้านเทคโนโลยีการผลิตได้ก้าวหน้าไปอย่างมาก เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในด้านการผลิตซึ่งต้องการปริมาณการผลิตสูงๆ ในระยะเวลาอันสั้น และการผลิตขึ้นส่วนที่มีความซับซ้อน จึงมีการพัฒนาเครื่องกัดให้มีความยืดหยุ่นในการผลิตโดยการพัฒนาเป็นเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (CNC machining center) ซึ่งสามารถทำงานได้หลากหลายมากขึ้น และช่วยลดรอบระยะเวลาในการผลิตให้สั้นลง [2] เนื่องจากการจับยึดชิ้นงานเพียงครั้งเดียวสามารถทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จหรือเกือบสำเร็จได้เลย ซึ่งในส่วนนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการจับยึดชิ้นงานลงได้ เครื่องซีเอ็นซีแมชีนนิ่งเซ็นเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องซีเอ็นซีแมชีนนิ่งเซ็นเตอร์

2.1.3 เงื่อนไขการตัดในกระบวนการกัด (Cutting conditions in milling process)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น เครื่องกัดเป็นเครื่องมือกลพื้นฐานที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในงานอุตสาหกรรม หากจะแบ่งประเภทของเครื่องกัดตามลักษณะแกนหมุนจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องหมุนกัดแนวนอน (Horizontal milling machine) และเครื่องหมุนกัดแนวตั้ง

(Vertical milling machine) ซึ่งเครื่องกัดทั้งสองชนิดนี้ มีความเหมาะสมกับประเภทของงานที่ต่างกัน ความเร็วตัดสำหรับงานกัดในกรณีดอกกัดหัวบอล (Ball-nose end milling) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-1 [13]

$$N = \frac{1,000 \times V_c}{\pi \times D} \quad (2-1)$$

โดยที่	N = ความเร็วรอบ	(รอบ/นาที)
	D = เส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกัด	(มิลลิเมตร)
	V_c = ความเร็วตัด	(เมตร/นาที)

ส่วนอัตราป้อนชิ้นงานสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นอัตราเร็วเชิงเส้นในหน่วย มิลลิเมตร/นาที ได้ดังสมการที่ 2-2

$$V_f = f_z \times Z \times N \quad (2-2)$$

โดยที่	V_f = อัตราป้อนชิ้นงาน	(มิลลิเมตร/นาที)
	f_z = อัตราป้อนมีดตัด	(มิลลิเมตร/ฟัน)
	Z = จำนวนฟัน	
	N = ความเร็วรอบ	(รอบ/นาที)

อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ (Material removal rate, MRR) บ่งบอกถึงปริมาตรของวัสดุชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือน (กัด) ออกไปต่อหน่วยเวลา มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-3

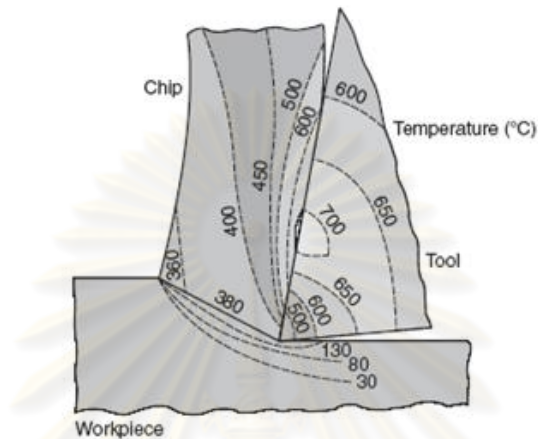
$$MRR = 0.001 \times a_r \times a_a \times V_f \quad (2-3)$$

โดยที่	MRR = อัตราการกำจัดเนื้อวัสดุ	(ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที)
	V_f = อัตราป้อนชิ้นงาน	(มิลลิเมตร/นาที)
	a_r = ความกว้างตัด	(มิลลิเมตร)
	a_a = ความลึกตัด	(มิลลิเมตร)

2.1.4 อุณหภูมิการตัด (Cutting Temperature)

เนื่องจากแหล่งความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดโลหะจะไปรวมกันที่บริเวณการเฉือนลำดับที่ 1 (Primary shear zone) และที่บริเวณการสัมผัสกันของเครื่องมือตัดและเศษตัด ซึ่งทำให้คาดหมายได้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงของอุณหภูมิบริเวณการตัดเฉือน

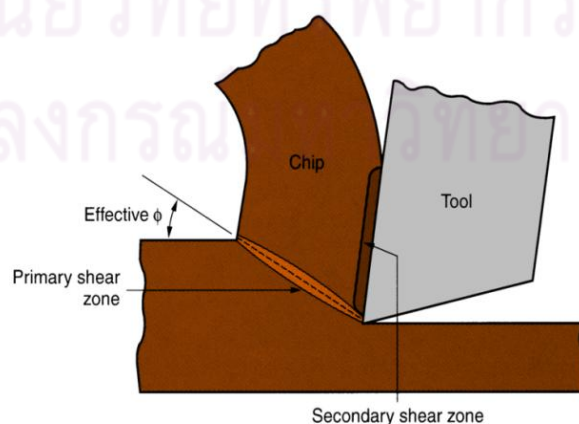
รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 2.7 ข้อสังเกตของการเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรุนแรงของอุณหภูมิ อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะเกิดบริเวณกึ่งกลางของบริเวณการสัมผัสกันของเครื่องมือตัดและเศษตัด [1] แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่างที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงาน และเงื่อนไขการตัดรวมถึงชนิดของสารหล่อเย็นที่ใช้ในระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 2.7 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิ

2.1.5 การเกิดเศษโลหะ (Chip Formation)

ในการเกิดเศษโลหะจริงในการตัดจะแตกต่างจากการตัดแบบอโทโกนอล เพราะว่ากระบวนการการเปลี่ยนรูปแบบเฉือนไม่ได้เกิดตามแนวระนาบ แต่จะเกิดเป็นบริเวณ (Zone) และยังมีการเฉือนอื่นๆ ที่เกิดขึ้นในเศษโลหะ ซึ่งถูกอ้างอิงเป็นแรงเฉือนในบริเวณการเฉือนลำดับที่ 2 ที่เกิดจากความเสียดทานระหว่างเศษโลหะและมิดตัดตามที่เศษโลหะที่เลื่อนไปตามแนวของผิวคายของมิดตัด [12] โดยบริเวณการเฉือนลำดับที่ 1 (Primary shear zone) และบริเวณการเฉือนลำดับที่ 2 (Secondary shear zone) แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 บริเวณการเฉือนลำดับที่ 1 และบริเวณการเฉือนลำดับที่ 2

2.1.6 การสึกหรอของมีดตัด (Tool Wear)

ในการตัดชิ้นงาน มีดตัดจะต้องทนต่อแรงและอุณหภูมิที่สูงในระหว่างการตัด ถ้าแรงในการตัดมากเกินไปจะทำให้มีดตัดหักได้ หรือถ้าอุณหภูมิตัดสูงเกินไปก็จะทำให้มีดตัดอ่อนและเสื่อมได้เร็วเช่นเดียวกัน เทคโนโลยีด้านมีดตัดจะให้ความสำคัญกับประเด็นหลัก 2 ประการคือเรื่องวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดและรูปร่างของมีดตัด ทั้งนี้เพื่อให้อายุการใช้งานของมีดตัดนานขึ้น ในด้านวัสดุของมีดตัดนั้นจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรง อุณหภูมิ และการสึกหรอในกระบวนการตัด ส่วนในด้านรูปทรงของเครื่องมือตัดจะพัฒนาเกี่ยวกับการหารูปทรงที่เหมาะสมของมีดตัดสำหรับวัสดุของมีดตัด และสำหรับกระบวนการตัดความเสียหายของมีดตัดเกิดขึ้นได้ด้วยสาเหตุหลักๆ 3 อย่าง ดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้ว การสึกหรอของมีดตัดจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear) ซึ่งกลไกต่างๆที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษกลึงโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดเสียหายของมีดตัด

รูปแบบการเสียหาย	สาเหตุ	ผลลัพธ์
1. Fracture failure	แรงในการตัดมากเกินไป	เครื่องมือตัดแตกทันที
2. Temperature failure	อุณหภูมิในการตัดสูง	เครื่องมือตัดจะอ่อนและเสียรูป จนทำให้ความคมของมีดตัดลดลง
3. Gradual wear	เกิดการสึกหรอของคมตัด	เนื้อมีดตัดจะหายไปบางส่วน ทำให้ประสิทธิภาพในการตัดลดลง เกิดการสึกหรออย่างรวดเร็ว สุดท้ายแล้วความเสียหายก็จะคล้ายกับความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ

กลไกต่างๆ ที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งกลไกการสึกหรอทั้ง 5 แบบจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นในสภาวะที่ใช้ความเร็วในการตัดสูงๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลไกการสึกหรอแบบ Diffusion และ Chemical reaction จะยิ่งเกิดง่ายที่อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมีดตัด

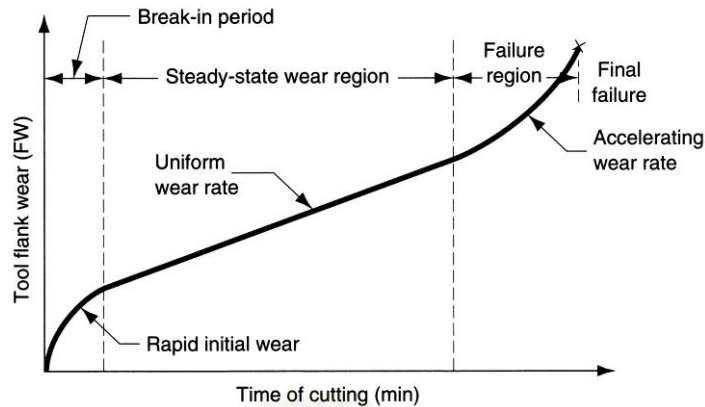
กลไกการสึกหรอ	สาเหตุ	ผลลัพธ์
การขูดขีด (Abrasion)	อนุภาคที่แข็งของชิ้นงานจะทำให้บางส่วน เครื่องมือตัดค่อยๆ หลุดติดออกมา	ทำให้เกิดรอยสึกหรอบนผิว หลบและผิวคาย
การยึดติด (Adhesion)	โลหะสองอย่างถูกทำให้ติดกันภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย

การแพร่ (Diffusion)	เกิดการแลกเปลี่ยนกันระหว่างผิวหน้าของวัสดุ 2 ชนิด อะตอมของมีดตัดจะหายไป ความแข็งแรงลดลง ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก abrasion และ adhesion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
ปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction)	ความเร็วตัดสูงและอุณหภูมิที่สูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เครื่องมือตัดอ่อนลง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
การเสียรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation)	เกิดอุณหภูมิที่สูงบริเวณคมตัด คมตัดจะเริ่มเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก abrasion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวหลบ

2.1.7 อายุของเครื่องมือตัด (Tool life)

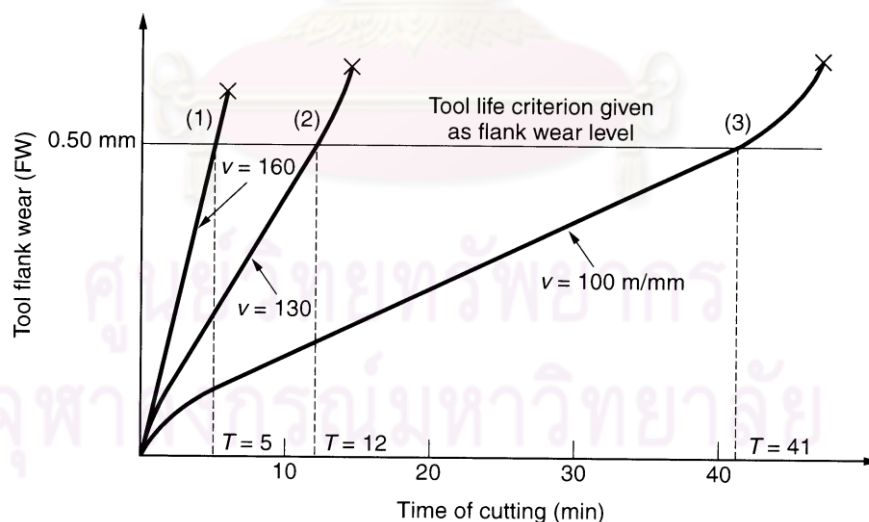
อายุเครื่องมือตัด หมายถึง เวลาตัดโดยนับจากเครื่องมือเริ่มต้นใช้งานโดยที่เครื่องมือตัดไม่เคยใช้งานมาก่อนบนชิ้นงานชนิดเดียวและในสภาวะเดียวกัน จนกระทั่งไม่สามารถใช้เครื่องมือตัดนั้นต่อไปได้ ในขณะที่กำลังทำการตัดจะเกิดกลไกการสึกหรอต่างๆ บนมีดตัด ซึ่งจะมียัตราที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของมีดตัดกับระยะเวลาในการตัดแสดงดังรูปที่ 2.9 ซึ่งความสัมพันธ์ในรูปจะแสดงถึงรอยสึกหรอบนผิวหลบ (Flank wear) ส่วนรอยสึกหรอบนผิวคาย (Crater wear) ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน [12,18] และนอกจากนี้การสึกหรอของมีดกัดชนิดหัวบอลยังมีการสึกหรอที่เรียกว่า central wear อีกด้วย ซึ่งการสึกหรอดังกล่าวจะส่งผลต่อผิวสำหรับโดยตรง โดยช่วงของการสึกหรอสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังรูป

ในกระบวนการตัดจะพบว่าการใช้เครื่องมือตัดไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเสียหายแล้วค่อยนำกลับมาลับคมตัดใหม่เป็นสิ่งที่ไม่สมควรทำ เพราะถ้ามีดตัดแตกแล้วการลับคมตัดให้คมเหมือนเดิมจะทำได้ยากกว่าปกติ และคุณภาพของชิ้นงานก็จะออกมาไม่ดีด้วย ดังนั้นจึงได้ใช้เกณฑ์ในการตัดไว้ดังนี้คือ



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด

ความชันของเส้นโค้งของการสึกหรอในช่วงที่ 2 จะขึ้นอยู่กับวัสดุของชิ้นงานและเงื่อนไขของการตัด โดยวัสดุของชิ้นงานที่แข็งกว่าจะทำให้เกิดอัตราการสึกหรอที่สูงกว่าในวัสดุชิ้นงานที่อ่อน และในทำนองเดียวกัน ความเร็วในการตัด, อัตราป้อนตัด และความลึกตัดที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้อัตราการสึกหรอที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยความเร็วจะส่งผลต่อการสึกหรอมากที่สุด และถ้านำเส้นโค้งของการสึกหรอมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการตัดเทียบกับเวลาจะได้อผลดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจากกราฟจะเห็นว่าความเร็วในการตัดที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้นด้วยและทำให้ระดับของการสึกหรอถึงค่า 0.5 มิลลิเมตรซึ่งเป็นเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอบนผิวหลบเร็วกว่าของความเร็วในการตัดที่ต่ำกว่า



รูปที่ 2.10 ผลกระทบของความเร็วที่เปลี่ยนแปลงในการตัดต่อการสึกหรอบนผิวหลบ โดยให้เกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดในการสึกหรอบนผิวหลบเป็น 0.5 มิลลิเมตร

อายุการใช้งานของมีด (Tool life) ถูกกำหนดเป็นระยะเวลาของการตัดที่มีมีดตัดสามารถใช้งานได้ หรือระยะเวลาที่มีมีดตัดเริ่มใช้จนกระทั่งมีมีดตัดเสียหายอย่างมากจนไม่สามารถ

ใช้งานได้ แต่อย่างไรก็ตามในการผลิตจริงนั้น ไม่สามารถใช้งานมีดตัดจนกระทั่งมีดตัดเสียหายได้ เนื่องจากความยากในการลับคมมีดตัดใหม่, ปัญหาในเรื่องคุณภาพของชิ้นงาน และปัญหาในเรื่องของความยากในการวัดระดับการสึกหรอรวมถึงเวลาที่ใช้ในการวัด ดังนั้นจึงได้มีการนำเสนอทางเลือกในการกำหนดเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัด (Tool life criterion) ขึ้นมา 9 ทางเลือกซึ่งมีความเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตมากกว่า ดังนี้

1. มีดตัดถูกใช้งานจนกระทั่งคมตัดเสียหาย (การเสียหายแบบแตกหัก, การเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ หรือการสึกหรอจนกระทั่งมีดตัดไม่สามารถใช้งานต่อไปได้
2. พนักงานใช้สายตาในการตรวจสอบการสึกหรอที่เกิดขึ้น ซึ่งเกณฑ์การหมดอายุของมีดตัดถูกกำหนดโดยขึ้นอยู่กับการตัดสินใจและความสามารถของพนักงานแต่ละคน
3. พนักงานใช้เล็บมือในการตรวจสอบคมตัดของมีดตัด
4. พนักงานตัดสินใจจากเสียงของกระบวนการผลิตที่เปลี่ยนไป
5. เศษโลหะเริ่มพันกันเป็นสายยาวและยากต่อการจัดการ
6. พื้นผิวสุดท้ายของงานมีคุณภาพลดลง
7. การใช้พลังงานในการตัดเพิ่มขึ้น โดยวัดจากมิเตอร์ที่ต่ออยู่กับเครื่องจักร
8. การนับจำนวนชิ้นงาน โดยพนักงานจะทำการวัดจำนวนชิ้นงานที่ทำได้ และทำการเปลี่ยนมีดตัดเมื่อถึงจำนวนที่กำหนดไว้
9. การนับเวลาที่ใช้ในการตัดทั้งหมด ซึ่งหลักการคล้ายกันกับการวัดจำนวนชิ้นงาน

2.1.8 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting Material)

มีดตัดในทางอุดมคตินั้นจะต้องมีความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง (Hot hardness) เป็นความสามารถของวัสดุที่จะยังคงความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง รับแรงกระแทกได้ดี มีความแข็งแรงและความเหนียว (Toughness) และการต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ซึ่งจะส่งผลให้มีดตัดมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน แต่ในความเป็นจริงแล้วคุณสมบัติดังกล่าวไม่สามารถพบได้ในมีดตัดชนิดเดียว โดยวัสดุที่ใช้ในการทำมีดตัดที่ต่างกันจะมีการรวมกันของคุณสมบัติในแต่ละด้านในระดับที่แตกต่างกัน [1,14]

1. เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium-alloy steels) เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดและใช้มากในงานเจาะรู ตีแปปเกลียว มีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าผสมปานกลางจะมีอายุมีดตัดจะนานกว่า ถึงแม้ว่าวัสดุนี้จะมีราคาถูกและลับให้คมได้ง่าย แต่ความแข็งแรงและการทนต่อการสึกหรอต่ำ การทนทานต่ออุณหภูมิสูงไม่เพียงพอสำหรับการตัดที่ความเร็วสูง มีดตัดชนิดนี้จึงใช้กับงานตัดที่ความเร็วรอบต่ำ

2. เหล็กกล้าความเร็วสูง (High-speed steels) การพัฒนาในการตัดที่ความเร็วรอบสูง ส่วนมากจะเป็นเหล็กหล่อผสมสูงใช้มากในงานตัดความเร็วรอบสูง ทนต่อการสึกหรอ และราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของมีดตัด เนื่องจากวัสดุประเภทนี้ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ดังนั้นจึงมักใช้ในงานตัดที่มีการสั่นสะเทือนได้ดี

3. โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys) มีความแข็งสูง (58-64 HRC) สามารถทนต่อการสึกหรอได้ดีและสามารถทนทานกับอุณหภูมิได้สูง มีความแข็งสูงแม้ว่าอุณหภูมิใช้งานจะสูงตาม วัสดุจะไม่เหนียวเหมือนเหล็กความเร็วรอบสูง วัสดุนี้ทนแรงกระแทกได้น้อย จึงไม่เหมาะจะใช้กับงานตัดรอบสูง ส่วนใหญ่ใช้กับงานตัดหยาบ

4. คาร์ไบด์ (Cemented or Sintered carbide) มีความแข็งสูงทุกๆ อุณหภูมิ มีค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นและนำความร้อนสูง ไม่แพร่ความร้อน แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ การผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่จะลดความแข็งและการทนต่อการสึกหรอ สามารถเพิ่มความแข็งและการทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม วัสดุประเภทนี้เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ เพราะไม่เหมาะต่อการสั่น มีดตัดชนิดนี้ใช้กับการตัดแบบแห้งได้

5. เครื่องมือเคลือบผิว (Coated tools) การเคลือบผิวของเครื่องมือตัดจะสามารถทำให้ใช้กับการตัดแบบอัตราการตัดที่สูงๆได้ ใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงานและลดต้นทุนในการตัด การเคลือบผิวของเครื่องมือตัดจะทำให้ลดเวลาการตัดลงได้ถึง 4 เท่า นอกจากนี้การเคลือบผิวเครื่องมือตัดจะทำให้อายุมีดตัดนานกว่ามีดตัดที่ไม่ได้เคลือบสารถึง 10 เท่า ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารเคลือบที่ใช้กันได้แก่ ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) เคลือบแล้วจะมีความเสียดทานต่ำ มีความแข็งสูง ด้านทานอุณหภูมิที่สูง และเป็นสารที่มีความเหนียว การเคลือบผิวมีดตัดด้วยสารจะสามารถใช้ในการตัดที่อัตราการตัดสูง และไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiC) เคลือบอยู่บนทั้งสแตนคาร์ไบด์ จะทำให้สามารถต้านทานการสึกหรอของ หน้าหลอมตัวได้สูง

6. เซรามิกเคลือบอลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) สามารถทนอุณหภูมิได้สูง มีอัตราการนำความร้อนที่ต่ำ และสามารถต้านทานการสึกหรอที่ผิวหยาบและผิวคายได้ดี และไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เพราะมีสารเคลือบเป็นพวกออกไซด์

7. เซรามิก (Ceramics) ทำจากอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความละเอียดและความบริสุทธิ์สูง วัสดุนี้ทนต่อการขัดสีได้สูง ทนความร้อนได้ดี ลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงานได้ ผิวชิ้นงานหลังตัดมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือมีดตัดชนิดนี้ไม่ทนต่อการกระแทก สามารถทนแรงดันสูงและอุณหภูมิสูงได้ดี อย่างไรก็ตาม เซรามิกไม่มีความเหนียว ผลของการตัดอาจจะเกิดความผิดพลาดถ้าเกิดเศษของมีดตัดหักออกไปในการตัด มีประสิทธิภาพในความเร็วการตัดที่สูงมาก ตลอดการตัดของการตัดสุดท้าย หรือเกือบสุดท้ายของงานกลึง

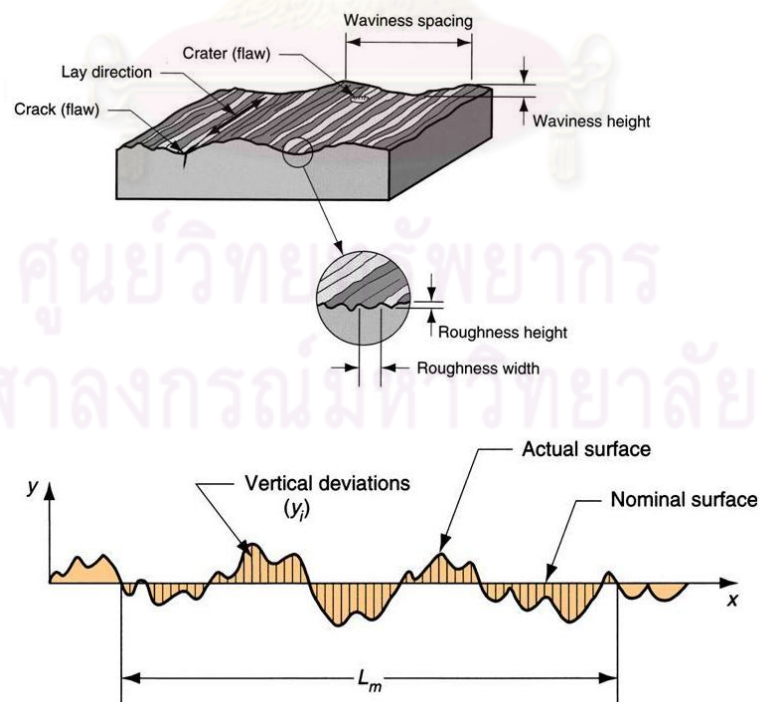
8. คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride : CBN) เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุดในด้านการสึกหรอและมีคมตัดที่แข็งแรง แต่เปราะ จึงไม่เหมาะต่องานที่มีการสั่นสะเทือน เหมาะต่อการตัดเหล็กที่มีความแข็งสูง จะสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ชั้น CBN จะทนการขัดถูที่สูงมากและมีค่าความเค้นของมุมมีดตัดสูง มีดตัด CBN จะผลิตให้ขนาดเล็ก เพราะมีดตัด CBN จะแตกง่าย แข็งเกร็งจึงเป็นปัจจัยสำคัญของเครื่องมือตัด

9. ซิลิกอนไนไตรด์ (SiN) เป็นวัสดุที่ทำมีดตัดที่ประกอบด้วยซิลิกอนไนไตรด์ พื้นฐานแล้วมีการเติมพวก อลูมิเนียมออกไซด์ , ยึดเทียมออกไซด์ และไททาเนียมไนไตรด์เพิ่มเข้าไป มีดตัดชนิดนี้มีความเหนียวสูง ความทนต่อความร้อนสูง และต้านทานการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างรวดเร็วได้ดี

10. เพชร (Diamond) ทนต่อการสึกหรอได้ดี มีความเสียดทานต่ำ ลับคมได้ง่ายใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง และรูปทรงของมุมมีดตัด ไม่เปลี่ยนแปลงแล้วให้ผิวงานสำเร็จที่ดี มีความถูกต้องของขนาดสูงในการตัด

2.1.9 ความเรียบผิวสำเร็จ (Surface Finish)

ผิวสำเร็จไม่เพียงแต่จะมีอิทธิพลต่อความถูกต้องแม่นยำของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปเท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติและสมรรถนะในด้านการบำรุงรักษาอีกด้วย [2,12,14] ลักษณะของผิวสำเร็จจะแสดงในรูปของคุณสมบัติที่จะกล่าวดังต่อไปนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รายละเอียดของผิวขึ้นงาน

1. ความเรียบหรือความขรุขระ (Roughness) จะประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็ก และละเอียดที่ติดกันหลายๆช่อง สาเหตุหลักเกิดจากรอยที่เหลือไว้จากการตัด ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยบนชิ้นงานซึ่งแสดงถึงความขรุขระผิวถูกวัดจากการกำหนดช่วงความยาวหนึ่งที่เรียกว่า “cutoff length” หรือ “ roughness sampling length”

2. รอยคลื่น (Waviness) ประกอบไปด้วยรอยขรุขระบนชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า roughness sampling length (ประมาณ 1 ไมครอน) สาเหตุเกิดจากการสั่นหรือมีรอยตำหนิบนชิ้นงานที่เกิดจากรับภาระในการตัดและอุณหภูมิในการตัดมากเกินไป

3. รอยตำหนิยาว (Lay) เป็นรอยตำหนิที่เป็นทิศทางยาว มักจะขึ้นในทิศทางของชิ้นงานมีดตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือ

4. ตำหนิผิวหน้า (Surface Flaw) เป็นรอยตำหนิที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม สาเหตุเกิดมาจาก รอยตำหนิที่มีมาแต่แรกแล้ว เช่น รอยร้าว ฟองอากาศ

5. ผิวสำเร็จ (Surface finish) มีความสำคัญต่อการสวมประกอบและการจัดวางของชิ้นงาน การสวมประกอบและการจัดวางต่างๆ จะเกิดขึ้นได้ก็ต้องอาศัยการทาสีหรือทำตำหนิเข้าช่วย บางทีก็ใช้เป็นลักษณะกะชหรือของไหลไหลผ่าน บางทีก็ใช้สายตาดูโดยอาศัยความมันวาวของชิ้นงาน บางทีก็ใช้แสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนได้สูง

ความเรียบผิวสำเร็จมีผลมาจากพารามิเตอร์ในการตัดหลายอย่างซึ่งรวมถึงรูปทรงของมีดตัด รูปทรงของชิ้นงาน ความแข็งแรงของเครื่องจักร วัสดุชิ้นงาน ปัจจัยในการตัด และวัสดุมีดตัด

2.1.10 สารหล่อเย็น (Cutting Fluid)

จุดประสงค์ของการตัดคือ การตัดได้ชิ้นงานที่มีขนาดถูกต้องและความเรียบผิวสำเร็จที่ดี สารหล่อเย็นนอกจากจะช่วยในเรื่องดังกล่าวแล้ว ยังช่วยในเรื่องของความประหยัดอีกด้วย เนื่องจากสารหล่อเย็นช่วยในการยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดหรือมีดตัด เมื่ออายุการใช้งานของเครื่องมือตัดยาวนานขึ้น [12,14] ก็ส่งผลให้ต้นทุนของเครื่องมือตัดลดลง สารหล่อเย็นเป็นได้ทั้งของเหลวและก๊าซ สารหล่อเย็นจะช่วยขจัดปัญหาหลักๆ 2 ประการ คือปัญหาความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการตัดและแรงเสียดทานที่เกิดระหว่างผิวสัมผัสของมีดตัดกับเศษโลหะและ มีดตัดกับชิ้นงาน นอกจากสารหล่อเย็นจะช่วยกำจัดความร้อนและแรงเสียดทานแล้ว สารหล่อเย็นยังช่วยขจัดเศษโลหะที่เกิดระหว่างการตัด ช่วยลดอุณหภูมิของชิ้นงานขณะตัด ช่วยลดแรงและกำลังในการตัด ช่วยเพิ่มคุณภาพของชิ้นงานให้มีความเรียบและขนาดได้ตามต้องการ ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้สารหล่อเย็นมีดังนี้

1. เพิ่มอายุของมีดตัด เนื่องจากผลของการหล่อเย็นและหล่อเย็น
2. เพิ่มความเรียบผิวของชิ้นงาน

3. กำจัดเศษออกไปได้ง่ายขึ้น
4. ลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานเนื่องจากผลของการหล่อเย็น
5. ลดแรงที่ใช้ในการตัด (cutting forces) และยังลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก

แม้ว่าสารหล่อเย็นจะมีผลประโยชน์มากมายตามที่ได้กล่าวไปแล้ว สารหล่อเย็นบางชนิดอาจจะทำให้ผลเสียต่อผิวของชิ้นงานและเป็นอันตรายต่อพนักงานที่อยู่หน้างานได้

1. การใช้สารหล่อเย็นจะทำให้เกิดไอที่เป็นพิษซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของพนักงาน และยังทำให้เกิดกลิ่นเหม็น ทำร้ายสิ่งแวดล้อมและบรรยากาศในการทำงาน สารหล่อเย็นบางชนิดทำให้พนักงานเกิดอาการแพ้ได้ ถ้าไปสัมผัสโดน

2. สารหล่อเย็นอาจทำร้ายผิวของชิ้นงานได้ โดยผลจากปฏิกิริยาทางเคมีและการเกิดคราบ และอาจจะส่งผลต่อบริเวณรอบข้างรวมทั้งเครื่องจักรอีกด้วย

3. สารหล่อเย็นบางชนิดเป็นสารไวไฟ

4. ถ้าสารหล่อเย็นปะปนอยู่ในบรรยากาศ อาจทำให้เกิดการทำให้เกิดการย่อยสลายหรือเปื้อนและทำให้เกิดความเสียหายต่อ เครื่องสูบน้ำและระบบหมุนเวียนได้

เพื่อที่จะให้เกิดผลประโยชน์โดยไม่ส่งผลเสียตามที่ได้กล่าวมานั้น จำเป็นที่จะต้องมีการเลือกสารหล่อเย็นให้ถูกต้องและเหมาะสม คุณสมบัติที่พึงปรารถนาของสารหล่อเย็นมีดังนี้

1. เป็นสารหล่อเย็นที่ดี
2. มีความสามารถในการดูดซับความร้อนเอาไว้ได้สูง
3. ไม่ทำให้เกิดควันพิษในขณะที่โดนความร้อน
4. มีความเสถียรสูง
5. จุดวาบไฟสูง
6. ไม่ทำให้ผิวชิ้นงานเสียหาย

2.1.11 การประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น (Methods of Applying Cutting Fluids)

วิธีการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นเป็นสิ่งที่สำคัญมาก ถ้าจะกล่าวถึงในแง่ของประโยชน์ของการใช้และการลดประมาณของเสียอย่างเต็มที่ [14] เครื่องจักรส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยเครื่องสูบน้ำที่ติดตั้งบนถังที่บรรจุสารหล่อเย็นทางออกหรือด้านจ่ายของเครื่องสูบน้ำจะมีหัวฉีดติดตั้งอยู่ โดยผ่านท่อที่ยืดหยุ่นสามารถปรับได้ หัวฉีดสามารถปรับให้เกิดลำของสารหล่อเย็นเพื่อที่จะฉีดไปบริเวณพื้นที่ตัด

1. การหล่อเย็นแบบเปียก (Flood application) ใช้อัตราการไหลตั้งแต่ 10 ลิตรต่อนาที สำหรับมีดคมตัดเดี่ยว จนถึง 225 ลิตรต่อนาที สำหรับมีดตัดหลายคมตัด

2. การหล่อเย็นแบบสเปรย์สารหล่อเย็น (Mist application) โดยสารหล่อเย็นจะถูกจ่ายโดยหัวฉีดที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ เพื่อจะทำให้เกิดในรูปของละอองขนาดเล็กๆ ที่ละเอียด ประมาณ 5-25 ไมครอน ละอองนี้จะถูกฉีดเข้าไปด้วยความเร็วสูงตรงบริเวณพื้นที่ตัด วิธีนี้มีจุดเด่นตรงที่สามารถฉีดไปยังบริเวณที่สารหล่อเย็นเข้าถึงได้ยาก และยังทำให้สามารถเห็นชิ้นงานขณะทำการตัดได้ชัดเจนอีกด้วย การหล่อเย็นด้วยวิธีนี้มีข้อได้เปรียบกว่าการหล่อเย็นแบบเปียก เพราะช่วงที่เกิดละออง อุณหภูมิของสารหล่อเย็นจะลดลงเนื่องจากการขยายตัว ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับเอาความร้อนมาได้มากขึ้น เนื่องจากวิธีนี้จะฉีดสารหล่อเย็นเข้าไปโดยตรงด้วยความเร็วสูงจึงทำให้มีผลการหล่อเย็นที่ดีกว่า ในกระบวนการตัดโลหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้มีดตัดคาร์ไบด์ในการตัด การหล่อเย็นแบบเปียกอาจทำให้มีดตัดเกิดรอยแตกกร้าวได้ ในกรณีนี้การหล่อเย็นแบบละอองจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการยืดอายุของมีดตัด

3. วิธีลำน้ำความดันสูง (High-jet method) วิธีนี้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Pigott และ Colwell และต่อมาก็กลายมาเป็นหัวข้อสำคัญในหลายๆ คนที่สนใจ วิธีนี้จะอาศัยลำขนาดเล็กที่มีความเร็วสูงฉีดไปยังผิวหลบของมีดตัด ซึ่งของเหลวที่ใช้เป็นได้ทั้งสารจำพวกน้ำและน้ำมัน

2.1.12 การออกแบบการทดลอง

เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือของผลการทดลอง และให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงต้องมีการนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนทดลอง คำว่า “การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment)” หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลอง เพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อมูลสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น [15,16] ถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่เรามีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลอง ก็คือการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้ หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ เพลลิเคชัน (Replication) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) และ บล็อกกิง (Blocking) ในที่นี้เรากำหนดให้ว่า

1. เพลลิเคชัน (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ เพลลิเคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเพลลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลอง ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ย ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิด

จากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี

2. แรนดอมไมเซชัน (Randomization) เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบทดลอง แรนดอมไมเซชัน หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลอง และลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมุติฐานนี้เป็นจริง การที่เราแรนดอมไมซ์การทดลอง ทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3. บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง หลักการพื้นฐานทั้งสามที่กล่าวมานี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการทดลองทุกๆ ชนิด ดังนั้นเราอาจจะต้องกล่าวถึงหลักการทั้งสามนี้บ่อยครั้ง เพื่อเป็นการแสดงและเน้นให้เห็นถึงประโยชน์ของหลักการดังกล่าว

2.1.13 แนวทางการดำเนินโครงการตามวิธีการออกแบบการทดลอง

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องในการทดลองจะต้องมีความเข้าใจอย่างถ่องแท้ล่วงหน้าว่าเรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินการอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้ [15]

1. การทำความเข้าใจถึงปัญหา (Problem Recognition & Statement) บางคนอาจคิดว่าขั้นตอนนี้ง่ายและตรงไปตรงมา แต่ในความเป็นจริงแล้วขั้นตอนนี้ไม่ได้ง่ายอย่างที่คิด ในขั้นตอนนี้เราจะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลอินพุตจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น แผนกวิศวกรรมแผนกประกันคุณภาพ แผนกผลิต แผนกการตลาด ผู้บริหาร ลูกค้าและแผนกบุคคล ถ้อยแถลงของปัญหาที่มีความชัดเจนจะมีผลอย่างมากต่อความเข้าใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์และคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ด้วยเหตุนี้เองการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรมีการทำงานเป็นทีม

2. การเลือกตัวแปรผลตอบ (Choice of Response) ในการเลือกตัวแปรผลตอบ ผู้ทดสอบควรจะแน่ใจว่า ตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรผลตอบ เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจจะมีผลตอบหลายตัวและมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้อง

กำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

3. การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีบล็อก หรือใช้การแรนดอมไมเซชันอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบ เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อผลตอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

4. การทำการทดลอง (Performing the Experiment) เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับวิธีการทดลองในขั้นตอนนี้ จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

5. การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต (Choice of Factors and Levels) ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดให้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมากซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดนี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) เราควรจะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรจะเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมาก ๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตลงมาให้แคบลงได้

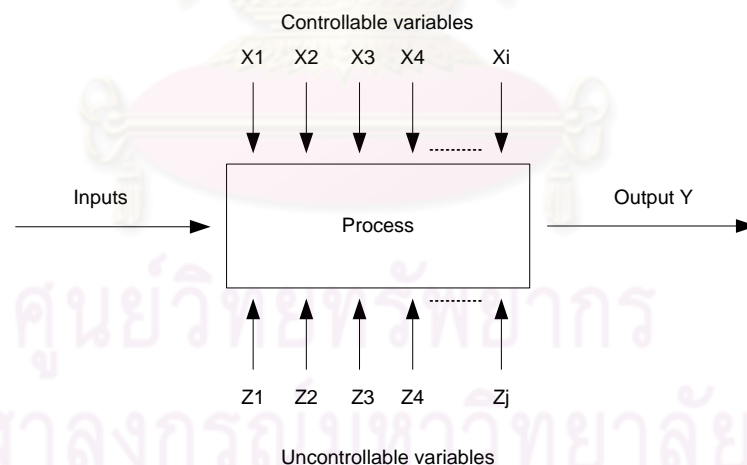
6. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistical Analysis) เราควรจะนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติคือ ทำให้ผู้ที่มีอำนาจในการตัดสินใจมีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอา

วิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรมความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ และสามัญสำนึก จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

7. การสรุปและการทดสอบเพื่อยืนยันผล (Conclusion and Confirmation Tasting) เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางกิจกรรมที่จะเกิดขึ้น ในขั้นตอนนี้เราจะนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วการทำการทดสอบเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำการขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

2.1.14 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นการทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable variables or factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ [16] เรียกว่า ตัวแปรหรือปัจจัยที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or noise variables or factors) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบหรือกระบวนการที่ใช้ในการทดลองโดยทั่วไป

การควบคุมตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบของแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักแล้ว ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวนมักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เนื่องจากการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งผลถึงต้นทุน

ค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น แหล่งที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม คุณภาพที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ดังนั้นในภาพรวมของการออกแบบการทดลอง จึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะในส่วนของ การออกแบบกระบวนการ ในด้านการกำหนด ค่าพารามิเตอร์หรือเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการ [15] ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลองจึงเกี่ยวข้องกับ

- 1) หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบ Y
- 2) หาวิธีการตั้งค่าของ X ที่มีผลต่อค่าผลตอบ Y เพื่อให้ Y อยู่ที่ค่าที่ต้องการ
- 3) หาวิธีการตั้งค่าของ X ที่มีผลต่อค่าผลตอบ Y เพื่อให้ Y มีค่าน้อย
- 4) หาวิธีการตั้งค่าของ X ที่มีผลต่อค่าผลตอบ Y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

โดยส่วนใหญ่แล้วการทดลองส่วนมากจะเกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายตัว และ วัตถุประสงค์ของผู้ทำการทดลองก็คือ หาผลกระทบของปัจจัยเหล่านี้กับผลตอบของระบบ เรียกว่า การวางแผนและการดำเนินการทดลองว่า กลยุทธ์ของการทดลอง (Strategy of experimentation) ซึ่งมีหลายกลยุทธ์ที่ผู้ทดลองสามารถนำไปใช้ได้ เช่น แบบหนึ่งปัจจัยต่อครั้ง (One-factor-at-a-time) หรือการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial design) เป็นต้น

2.1.15 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ในกรณีที่น่าสนใจที่จะศึกษาเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป และ ต้องการทดสอบเพียงครั้งเดียว สามารถที่จะทำการวิเคราะห์ได้โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ ความแปรปรวน ซึ่งจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการทำการทดสอบทีละคู่ การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) จัดเป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่า ตอบสนองหรือลักษณะทางคุณภาพ สนใจศึกษาผลลัพธ์จากระบบหรือกระบวนการ ในการวิเคราะห์จะแยกสาเหตุของความแตกต่างออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

1. ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained variation) คือ ความแตกต่างหรือ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัยหรือวิธีปฏิบัติ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง บางครั้งอาจถูก เรียกว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between group variation)

2. ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากขาดความรู้ หรือความรู้เกี่ยวกับ ระบบยังไม่มากพอ ซึ่งในบางครั้งอาจเกิดจากกรณีที่ผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึง

ความแตกต่างในส่วนนี้ในรูปของความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error or residual) ถ้าผู้ทดลองมีความรู้หรือความสามารถในการควบคุมการทดลองมากขึ้น ความผิดพลาดส่วนนี้ก็จะลดลง

2.1.15.1 การทดลองอย่างสุ่มสมบูรณ์หรือการจำแนกทางเดียว (Complete Randomized Design, CRD)

เป็นการสนใจศึกษาปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว ซึ่งจำนวนระดับที่สนใจศึกษาของปัจจัยนี้เท่ากับ n ระดับ เพื่อดูว่าระดับที่แตกต่างกันของปัจจัยนั้นจะมีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง (Y) อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่อย่างไร เป็นแผนการทดลองที่ง่ายที่สุดโดยที่สิ่งทดลองถูกสุ่มจัดลงในหน่วยการทดลอง เป็นแผนที่มีประสิทธิภาพดีมากถ้าหน่วยของการทดลองมีความสม่ำเสมอ [17] การสุ่มไม่จำเป็นต้องทำซ้ำเท่ากัน แต่เพื่อความสะดวกนิยมใช้เท่ากัน การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว โดยที่ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจะเกิดจากสิ่งทดลองเท่านั้น

2.1.15.2 การทดลองบล็อกเชิงสุ่มอย่างสมบูรณ์หรือการจำแนกสองเดียว (Randomized Complete Block Design, RBD)

เป็นการสนใจศึกษาผลกระทบของปัจจัยสองปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองที่ระดับต่างกัน การทดลองมีการแบ่งออกเป็นหน่วยทดลองเรียกว่า บล็อก โดยให้แต่ละบล็อกมีทรีตเมนต์กระจายโดยรอบ การกระจายทรีตเมนต์ในแต่ละบล็อกจะทดลองเช่นเดียวกับการทดลองแบบจำแนกทางเดียว คือ การใส่ทรีตเมนต์ลงในบล็อกแบบสุ่ม ซึ่งค่าสังเกตของแต่ละทรีตเมนต์ในบล็อกที่วัดนั้นจะเป็นค่าเดียวหรือหลายค่าก็ได้ [17]

ข้อดีของการทดลองบล็อกเชิงสุ่มอย่างสมบูรณ์

- 1) การทดลองแบบบล็อกเชิงสุ่มอย่างสมบูรณ์นี้เหมาะสำหรับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าเฉลี่ยผลการทดลองของทรีตเมนต์จำนวน t ทรีตเมนต์ ในสภาวะการวัดที่สามารถควบคุมความแปรปรวนของสิ่งแวดล้อมให้เหมือนกันได้
- 2) การวิเคราะห์ทางสถิติทำได้โดยง่าย
- 3) สามารถสร้างรูปแบบการทดลองง่าย
- 4) สามารถใส่ทรีตเมนต์หลายทรีตเมนต์ได้ในบล็อกแบบไม่จำกัด

ข้อเสียของการทดลองบล็อกเชิงสุ่มอย่างสมบูรณ์

- 1) เนื่องจากสภาพภายในบล็อกจะต้องมีสภาวะการวัดเหมือนกัน เพื่อให้การวัดผลมีประสิทธิภาพและสามารถวัดผลกระทบที่

เกิดจากทรีตเมนต์ได้อย่างเด่นชัด ดังนั้น รูปแบบการทดลองนี้ จะเหมาะกับการทดลองที่มีจำนวนทรีตเมนต์ไม่มากนัก

- 2) การทดลองนี้ควบคุมสภาวะการรันของแต่ละบล็อก ดังนั้น หากใช้บล็อกหลายบล็อกจะทำให้ค่าความแปรปรวนระหว่างบล็อกสูง ซึ่งส่งผลให้การวัดผลกระทบจากทรีตเมนต์จริงเป็นไปได้ยาก
- 3) หากการเก็บค่าสังเกตเพื่อการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการใช้ค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตทั้งหมดภายใต้ทรีตเมนต์หนึ่งๆ ที่เก็บได้ภายในบล็อกจะส่งผลให้ผลการทดลองที่ได้จะเป็นเพียงผลที่ได้จากค่าโดยประมาณจากแต่ละทรีตเมนต์ภายในบล็อกเท่านั้น

2.1.16 การทดสอบสมมติฐาน

การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis) เป็นกระบวนการตัดสินใจเพื่อยืนยันความเชื่ออย่างใดอย่างหนึ่งเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่อธิบายสภาวะที่เกิดขึ้นจริง [15] และเรียกข้อความที่แสดงถึงการแจ่มแจ้งความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มที่หมายถึงสภาวะที่เกิดขึ้นจริงว่า สมมติฐานเชิงสถิติ (Statistical Hypothesis) ได้แก่ สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis : H_0) และสมมติฐานอื่น (Alternative Hypothesis : H_1) โดยสมมติฐานหลัก คือ สมมติฐานที่เชื่อว่าเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นจริง และต้องทำการทดสอบเพื่อที่จะปฏิเสธสมมติฐานนี้ ส่วนสมมติฐานอื่นคือ สภาวะที่ต้องการยืนยันด้วยเหตุผลการตัดสินใจแบบทดสอบสมมติฐานนี้มีโอกาสในการผิดพลาดได้ 2 ชนิด คือ

1. ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error): การปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทั้งที่ในความเป็นจริงสมมติฐานหลักถูกต้องอยู่แล้ว มักเรียกความผิดพลาดชนิดนี้ว่า ระดับนัยสำคัญ (Significant Level) แทนด้วยสัญลักษณ์ α โดยที่ $\alpha = P$ (ปฏิเสธ H_0 โดยที่ H_0 เป็นจริง)

2. ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II Error): การไม่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก ทั้งที่ในความเป็นจริงสมมติฐานหลักไม่ถูกต้อง แทนด้วยสัญลักษณ์ β และ $1 - \beta$ คืออำนาจในการทดสอบ (Power of Test) โดยที่ $\beta = P$ (ยอมรับ H_0 โดยที่ H_0 ไม่เป็นจริง)

ในการทดสอบสมมติฐานนั้นต้องออกแบบวิธีการตัดสินใจให้มีระดับนัยสำคัญคงที่ และมีค่าต่ำๆ เช่น 0.05 หรือ 0.10 และให้อำนาจในการทดสอบมีค่าสูงที่สุด ทั้งนี้เพื่อให้การตัดสินใจเลือก H_1 ต้องกระทำอย่างมีเหตุผลรองรับที่ชัดเจนจริงๆ ซึ่งเรียกว่า การตัดสินใจแบบยืนยัน (Strong Conclusion) ในการตัดสินใจโดยการทดสอบสมมติฐาน สามารถดำเนินการได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตั้งสมมุติฐานตามสิ่งที่ต้องการทดสอบ
2. กำหนดวิธีการตัดสินใจ ด้วยการพิจารณาถึงตัวสถิติสำหรับการทดสอบ พารามิเตอร์รวมถึงการแจกแจงของตัวสถิติดังกล่าว ซึ่งอธิบายขนาดความผันแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ระหว่างเงื่อนไขของการทดลอง (Reproducibility) และกำหนดช่วงการปฏิเสธ และการยอมรับ ภายใต้ค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด
3. ออกแบบการทดลอง ด้วยการกำหนดขนาดตัวอย่าง โดยให้อำนาจในการทดสอบอยู่ในระดับที่ยอมรับได้
4. ดำเนินการทดลองตามที่ออกแบบไว้
5. ตัดสินใจตามวิธีการตัดสินใจที่กำหนดไว้ โดยหากข้อมูลอยู่ในช่วงการยอมรับให้สรุปว่าไม่มีเหตุผลในการปฏิเสธสมมุติฐาน เนื่องจากข้อมูลอยู่ในช่วงความผันแปรที่เกิดจากสาเหตุธรรมชาติ แต่หากข้อมูลอยู่ในช่วงการปฏิเสธให้ทำการปฏิเสธสมมุติฐาน

2.1.17 การทดสอบโคลโมโกรอฟ-สไมร์นอฟ (The Kolmogorov-Sminov test)

การทดสอบโคลโมโกรอฟ-สไมร์นอฟ เป็นการทดสอบภาวะสารูปสนิทธิเช่นเดียวกับการทดสอบไคสแควร์ คือ เป็นการทดสอบว่าข้อมูลมีการแจกแจงสอดคล้องกับการแจกแจงตามที่คาดไว้หรือไม่ เช่น เป็นการทดสอบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ เป็นต้น การทดสอบภาวะสารูปสนิทธิของโคลโมโกรอฟได้รับความนิยมมากกว่าการทดสอบของไคสแควร์ เมื่อจำนวนของตัวอย่างมีขนาดเล็กเพราะให้ผลลัพธ์ที่แท้จริง ในขณะที่การทดสอบไคสแควร์ต้องการจำนวนตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ เพื่อที่จะทำให้สามารถใช้การแจกแจงไคสแควร์ประมาณการแจกแจงของสถิติทดสอบได้ดีพอ การทดสอบของโคลโมโกรอฟบางทีจะมีอำนาจการทดสอบมากกว่าการทดสอบไคสแควร์ในหลายๆ สถานการณ์ เมื่อข้อมูลเป็นข้อมูลแบบอันดับ

การทดสอบโคลโมโกรอฟจะใช้ความถี่สัมพัทธ์สะสม หรือฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม ($F(x)$) ในการวิเคราะห์ โดยหลักการคือจะเป็นการทดสอบว่าความถี่สัมพัทธ์สะสมของค่าสังเกตแตกต่างจากค่าความถี่สัมพัทธ์สะสมตามที่คาดไว้หรือไม่ ซึ่งหมายความว่า ถ้าสุ่มตัวอย่างจากประชากรที่ไม่ทราบฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม ($F(x)$) สามารถจะสรุปได้หรือไม่ว่า $F(x) = F_0(x)$ สำหรับทุก ๆ ค่าของ x เมื่อ $F_0(x)$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมที่ทราบการแจกแจง การทดสอบโคลโมโกรอฟ-สไมร์นอฟ จะมีประสิทธิภาพมากกว่าการทดสอบไคสแควร์ และสามารถใช้ได้กับข้อมูลทุกกรณีแม้ว่าข้อมูลจะมีความถี่เท่ากับศูนย์และตัวอย่างมีขนาดเล็กก็ตาม

2.1.18 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation)

ความเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นค่าวัดการกระจายที่ใช้กันมาก ซึ่งเป็นรากที่สองของความแปรปรวน หากมีการนำสิ่งตัวอย่างไปอนุมานประชากรแล้ว ค่าที่ควรจะเป็นก็จะ หมายถึงค่าที่ควรจะเป็นของประชากร (μ) ดังนั้น

$$SS = \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \quad (2-4)$$

แต่โดยที่ μ เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า จึงต้องทำการประมาณค่าด้วยค่าเฉลี่ยจากสิ่งตัวอย่าง (\bar{y}) ซึ่งจะทำให้สูญเสียความเป็นอิสระของตัวแปรสุ่มในการประมาณค่าครั้งนี้ไปเท่ากับ 1 ตัว เนื่องจาก

$$\hat{\mu} = \bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{10}}{10} = \text{ค่าคงที่} \quad (2-5)$$

จากสมการที่ (2-5) จะพบว่า y_1 ถึง y_{10} มีค่ามากมายหลายค่าตามกฎแห่งโอกาส จึงอาจสรุปได้ว่า หากมีข้อมูลจำนวน n ตัว จะมีข้อมูลที่มีอิสระเพียง $n-1$ ตัวเท่านั้น และจะเรียกจำนวนข้อมูลที่มีอิสระนี้ว่า องศาแห่งความอิสระ (Degree of freedom) ซึ่งหมายถึงจำนวนข้อมูลที่มีสารสนเทศในการอนุมานค่าความเบี่ยงเบนของประชากรได้

ดังนั้น จึงอาจนิยามตัวสถิติสำหรับวัดค่าการกระจายต่อหน่วยในประชากร คือ

$$\text{ความแปรปรวน (Variance)} = \frac{\text{ผลรวมกำลังสอง (SS)}}{\text{องศาแห่งความอิสระ (df)}} \quad (2-6)$$

ในกรณีคิดผลรวมกำลังสองของความเบี่ยงเบนรอบค่าที่ควรจะเป็นของประชากรแล้ว จะได้ผลว่า

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (2-7)$$

แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความแปรปรวนที่ได้จะมีค่ามากกว่าความเป็นจริงเนื่องมาจากการยกกำลังสองของค่าความเบี่ยงเบน ดังนั้นจึงสามารถหาความเบี่ยงเบนที่แท้จริงได้ด้วยการถอดรากที่สองของความแปรปรวน และจะเรียกค่านี้ว่า ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) แทนด้วย S ซึ่งเป็นค่าที่ใช้อนุมานความเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร ดังนั้น

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (2-8)$$

2.1.19 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีการรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่งคือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด วิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้

อย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยาก P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่จะทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง [15] ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ก็ได้

โดยปกติแล้วนิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญ เมื่อรู้ค่า P-Value แล้ว ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณค่าข้อมูลมีนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

2.1.20 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ

วิธีการทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่นิยมใช้มี 3 วิธี [16] คือ

2.1.20.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination: R^2)

เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่ามีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ จึงใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน

2.1.0.2 การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit test; LOF)

การทดสอบนี้จะทำขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลซ้ำ แต่ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ โดนพิจารณาจากค่า P-Value ของ LOF ถ้ามีค่ามากกว่าค่า α ที่กำหนดแล้ว สมการมีความเหมาะสม

2.1.20.3 การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยและการประมาณค่าแบบช่วง (Hypothesis testing for regression coefficients and interval estimation)

การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยจัดได้ว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่จะนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์ โดยจะทำการประมาณค่าพยากรณ์ที่ต้องการโดยใช้ค่าประมาณแบบจุดและช่วงต่อไป เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้เมื่อทราบค่าประมาณความแปรปรวนของตัวประมาณดังกล่าวแล้ว จะสามารถดำเนินการทดสอบสมมติฐาน และการประมาณแบบช่วงได้ โดยทั่วไปมักนิยมทดสอบสมมติฐาน

เฉพาะค่าสมประสิทธิ์ในสมการถดถอยซึ่งจะทำให้ทราบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะสามารถลดรูปลงอีกได้หรือไม่ สำหรับการประมาณแบบช่วงมักจะทำขึ้นเพื่อประโยชน์การพยากรณ์ กรณีสมการถดถอยอย่างง่ายมักจะทำการสร้างช่วงสำหรับค่าความชัน

2.1.21 พื้นผิวผลตอบ

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ [15] ซึ่งส่วนมากปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบมักจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้นจึงต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสม เพื่อจะใช้เป็นตัวแทนในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและเซตของตัวแปรอิสระ ตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 2-4

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2-4)$$

โดยที่	y	คือ ผลตอบที่ได้จากการสังเกตในแต่ละการทดลอง	
	x_{ij}	คือ ค่าสังเกตตัวที่ i th หรือระดับของตัวแปร x_j	โดยมีค่าพารามิเตอร์ β เป็นสัมประสิทธิ์ในแต่ละเทอมของแต่ละตัวแปรซึ่งมี k ตัว
	ε	คือ ค่าความคลาดเคลื่อน	

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ 2-5

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2-5)$$

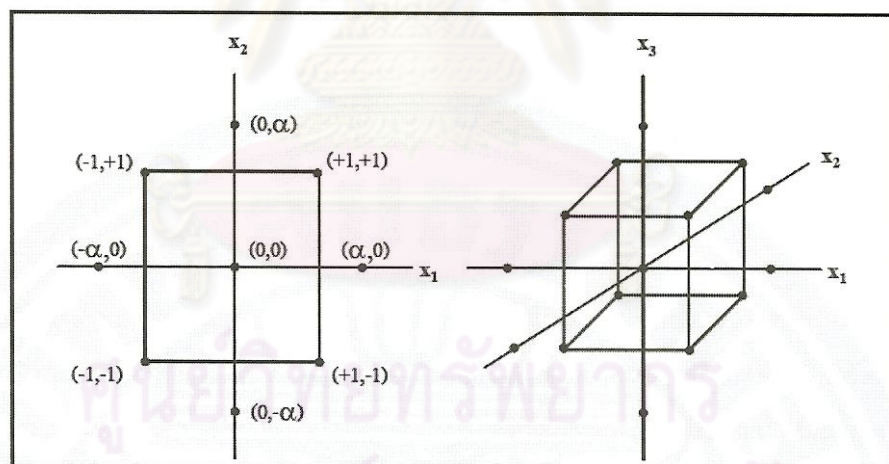
อย่างไรก็ตาม ผลตอบทุกค่าไม่จำเป็นต้องใช้สมการลำดับที่สองในการหาคำตอบเสมอไป ซึ่งโดยปกติจะถูกนำมาใช้เมื่อการหาคำตอบโดยสมการกำลังหนึ่งในขั้นตอนแรกถูกหยุด เนื่องจากไม่สามารถปรับปรุงค่าของผลตอบได้อีก

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมา แต่อย่างไรก็ตาม แบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้จะไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ทว่าถ้าพื้นผิวที่สนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้วแบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองแบบพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้อย่างดีเพียงพอ ดังนั้น การวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมาจะสามารถประมาณได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณได้เป็นอย่างดี ถ้าทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบเรียกว่า การออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response surface design)

2.1.21.1 วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

วิธีการออกแบบส่วนประสมกลางหรือ CCD เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากในการฟิตแบบจำลองลำดับที่สอง ซึ่งวิธีการนี้มักถูกนำมาใช้เมื่อคำตอบที่ได้จากการฟิตแบบจำลองลำดับที่หนึ่งไม่มีหลักฐานเพียงพอที่จะถูกพัฒนาต่อไปได้ โดยวิธีการออกแบบส่วนประสมกลางนี้จะต้องมีการออกแบบพารามิเตอร์ 2 ตัวในการออกแบบ นั่นคือ ระยะทาง (α) ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนจุดศูนย์กลาง (n_c) รูปแบบการออกแบบส่วนประสมกลาง แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การออกแบบส่วนประสมกลาง

สำหรับการออกแบบสมการพื้นผิวผลตอบลำดับที่สองนั้น ควรจะมีความสามารถในการหมุน (Rotatable) ซึ่งหมายความว่าจุด X ทุกจุดจะมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน โดยการออกแบบ CCD นี้สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ α

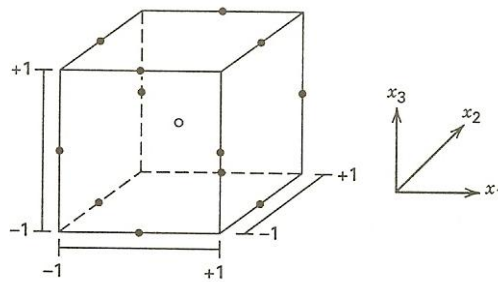
2.1.21.2 วิธีการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

การออกแบบแบบออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับพิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

ตารางที่ 2.3 การออกแบบแบบออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร

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

จากตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ที่มีตัวแปร 3 ตัวแปร (ดังรูปที่ 2.14) รูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบแสดงให้เห็นถึงการออกแบบแบบออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี $\sqrt{2}$ นอกจากนั้น การออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมของปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลอง เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกายภาพของกระบวนการ



รูปที่ 2.14 การออกแบบบ็อกซ์-เบ้นเคนแบบ 3 ตัวแปร

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Tangjitsitcharoen (2009) [3] ได้ทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมสำหรับการกลึงเหล็กกล้า (Plain carbon steel) ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์ โดยการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์เพื่อตรวจวัดแรงตัดภายในกระบวนการตัด ด้วยการประยุกต์ใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดในสภาวะการตัดแบบต่างๆ จากผลการศึกษาพบว่า ความเรียบผิวและการสึกหรอของมีดตัดสามารถอธิบายได้ด้วยแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยอธิบายว่าความเรียบผิวที่มีค่าน้อยแสดงว่าชิ้นงานตัดเนียนได้ง่ายทำให้เกิดแรงตัดต่ำ และการสึกหรอของมีดตัดสามารถพิจารณาจากแรงตัดที่เกิดขึ้นได้ เพราะถ้ามีดตัดมีการสึกหรอที่สูงก็จะส่งผลให้แรงตัดสูงตามไปด้วย

Thepsonthi, Hamdi, and Mitsui (2009) [4] ทำการศึกษารากัดชิ้นงานเหล็กเครื่องมือที่ผ่านการชุบแข็ง เพื่อศึกษาถึงผลลัพธ์ของการใช้วิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกและการตัดแบบแห้ง โดยใช้ ball end mill ชนิด insert carbide จากการศึกษาพบว่าการตัดโดยใช้วิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกและการตัดแบบแห้ง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) ประสิทธิภาพของวิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกและการตัดแบบแห้ง ในเทอมของผิวงานสำเร็จและการสึกหรอของเครื่องมือตัด กล่าวคือ วิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet จะให้ผิวงานสำเร็จที่เรียบกว่าการวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกและการตัดแบบแห้ง ในขณะที่อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดก็ยาวนานกว่าด้วย
- (2) วิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบสูง (High speed end milling) เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้ของวิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียกและแบบแห้งที่ความเร็วตัดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเทอมของการสึกหรอของเครื่องมือตัด

- (3) วิธีการหล่อเย็นแบบเป็ยกส่งผลกระทบทางด้านลบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด เนื่องจากสารหล่อเย็นไม่สามารถเข้าถึงพื้นที่ที่ตัดเฉือนได้ดีเช่นเดียวกับวิธีการหล่อเย็นแบบ pulse-jet เนื่องจากมีแรงดันต่ำ จึงทำให้เกิดการหล่อเย็นต่ำ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการหล่อเย็นแบบเป็ยกให้ผลลัพธ์ของความเรียบผิวที่ดี

Dhar, Kamruzzaman, and Ahmed (2006) [7] ทำการศึกษาบทบาทของการกลึงเหล็กกล้า AISI-4340 ด้วยวิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดต่อการสึกหรอของมีดตัดคาร์ไบด์ชนิดมีเคลือบผิว (Uncoated carbide insert) และความเรียบผิวของชิ้นงานที่ความเร็วการตัดและอัตราการป้อนชิ้นงานต่างๆ กัน โดยการเปรียบเทียบกับวิธีการตัดแบบแห้งและแบบเป็ยก ผลจากการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดสามารถลดอัตราการสึกหรอของมีดตัดและความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณการตัดได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- (1) สมรรถนะของการตัดด้วยวิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด (MQL) ดีกว่าวิธีการตัดแบบแห้งและแบบเป็ยก เพราะการตัดด้วยวิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดสามารถลดอุณหภูมิขณะตัดได้ดีกว่า ซึ่งทำให้คมตัดของมีดตัดที่เสียดสีกับเศษโลหะสึกหรอได้ช้าลง
- (2) วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด ช่วยลดการสึกหรอของมีดตัดและเพิ่มอายุของมีดตัด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการตัดแบบแห้งและแบบเป็ยก เนื่องจากวิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดสามารถลดอุณหภูมิการตัดเฉลี่ยอยู่ได้ประมาณ 5-10% ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของกระบวนการ
- (3) วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดทำให้คุณภาพของชิ้นงานสำเร็จดีขึ้น เนื่องจากการสึกหรอของมีดตัดลดลง อัตราการสึกหรอของมีดตัดลดลงนอกจากจะทำให้อายุของมีดตัดเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้ผลผลิตของการกลึงเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสามารถตัดชิ้นงานด้วยความเร็วมากขึ้น

Dhar, Islam, Isla, and Mithu (2006) [8] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของวิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะตัด รูปร่างของเศษโลหะและความเรียบผิวของชิ้นงานในกระบวนการกลึงเหล็กกล้า AISI-1040 ด้วยมีดมีดคาร์ไบด์ (Uncoated carbide insert) โดยการเปรียบเทียบกับวิธีการตัดแบบแห้งและแบบเป็ยกด้วยน้ำมันหล่อเย็น พบว่าผลจากการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดสามารถลดอุณหภูมิขณะตัด เพิ่มความเรียบผิวของชิ้นงานได้ ทั้งนี้ขึ้นกับความเร็วรอบการตัดและอัตราการป้อนชิ้นงาน ดังนั้น การใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดอย่างถูกวิธี นอกจากจะช่วยเพิ่มความสามารถในการตัดแล้วยังช่วยสร้างสภาพแวดล้อมที่ดีในการทำงานด้วย

Kelly and Cotterell (2002) [9] ได้ทำการทดสอบวิธีการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นด้วยวิธีต่างๆ เพื่อหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเจาะชิ้นงานประเภทอลูมิเนียมหล่อ โดยได้แนะนำว่าการหล่อเย็นระหว่างการเจาะควรใช้แบบปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด (MQL) ด้วยแรงตัดลม 6 บาร์ และอัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ปริมาณสารหล่อเย็นที่ใช้ในกระบวนการเจาะด้วยวิธีนี้จะใช้ปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับการหล่อเย็นแบบเปียก จากงานวิจัยพบว่า การจัดวางตำแหน่งของหัวฉีด ปริมาณสารหล่อเย็น และความดันของสารหล่อเย็นที่เหมาะสมจะทำให้อายุการใช้งานของมีดตัดยาวนานขึ้น ประมาณ 64% เมื่อเทียบกับการตัดแบบแห้ง

Dolinlek, Sustarsic, and Kopac (2001) [18] ได้ทำการศึกษากลไกการสึกหรอของเครื่องมือตัดในกระบวนการตัดความเร็วสูง ด้วยการตัดเหล็กกล้าที่ผ่านการชุบแข็งที่มีความแข็งมากกว่า 50 HRC. พบว่ากระบวนการเกิดออกไซด์ของสารเคลือบผิวและชิ้นงานเป็นหนึ่งในกลไกหลักที่เป็นสาเหตุของการสึกหรอของมีดกัด และการหลอมติดกันระหว่างเศษตัดกับผิวหอบของมีดตัดเป็นสาเหตุของการสึกหรอของผิวหอบของมีดตัด เมื่อสารเคลือบที่ปลายมีดตัดถูกทำลายการสึกหรอก็ยิ่งเพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันก็ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน

Ozcelik and Sustarsic (2006) [20] ได้ทำการศึกษารูปแบบทางสถิติเพื่อนำมาประมาณค่าความเรียบผิวในงานกัด ภายใต้สภาวะการตัดแบบเปียก โดยการพิจารณาตัวแปรของความเร็วรอบ อัตราการป้อนตัด ความลึกตัด และความกว้างตัด แบบจำลองอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สองถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาผลลัพธ์ของการทดลอง ด้วยการใช้ออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) จากการศึกษาพบว่าปัจจัยสำคัญของอันดับที่ได้เป็น ระยะเวลาทำงานรวมจะมีค่าสูงสุด และตามด้วยความลึกตัด ความกว้างตัด ความเร็วรอบ ตามลำดับ โดยที่อัตราป้อนมีอันดับต่ำสุด

Ginta, Amin, Radzi, and Lajis (2009) [21] ศึกษาการพยากรณ์อายุของมีดตัดด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบในงานกัดไทเทเนียมอัลลอย ด้วยมีดตัดคาร์ไบด์ชนิดไม่เคลือบผิว (Uncoated carbide insert) ภายใต้สภาวะการตัดแบบแห้ง โดยการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลางขนาดเล็ก ในแบบจำลองของอายุของมีดตัดเพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ของความเร็วตัด ความลึกตัด และอัตราป้อนตัด โดยการใช้การสึกหรอของผิวหอบเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาอายุของมีดตัด จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

- (1) วิธีวิธีการออกแบบส่วนประสมกลางขนาดเล็ก สามารถใช้เป็นเทคนิคในการประเมินค่าอายุของมีดตัดในงานกัดไทเทเนียมอัลลอย ภายใต้สภาวะการตัดแบบแห้งได้ดี

- (2) ในแบบจำลองอายุของมีดตัด พบว่าความเร็วตัดเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออายุของมีดตัด ตามด้วยอัตราป้อนตัด และความลึกตัด ตามลำดับ เมื่อปัจจัยต่างๆ เหล่านี้มีค่าเพิ่มขึ้น จะทำให้อายุของมีดตัดลดลง
- (3) จากแบบจำลองอายุของมีดตัดลำดับที่หนึ่ง พบว่าความเร็วตัดจะส่งผลต่ออายุมีดตัดมากที่สุด กล่าวคือ เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น อายุของมีดตัดก็จะสั้นลง
- (4) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองลำดับที่สอง แสดงให้เห็นว่าอันตรกิริยาและค่ากำลังสองมีนัยสำคัญทางสถิติ

Davidson, Balasubraanian, and Tagore (2008) [22] ทำการศึกษาผลของเงื่อนไขการขึ้นรูปชิ้นงานท่อของวัสดุชิ้นงาน AA6061 ที่จะส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน ซึ่งปัจจัยที่นำมาใช้ในการศึกษาได้แก่ ความเร็ว อัตราป้อนตัด และปริมาณของน้ำหล่อเย็น โดยการใช้การออกแบบการทดลองด้วยการวิเคราะห์พื้นผิวตอบด้วยเทคนิคของบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-behnken design) จากผลการศึกษาทำให้ได้สมการสำหรับการพยากรณ์ความเรียบผิวของชิ้นงานได้ ซึ่งพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานมากที่สุดได้แก่ อัตราป้อน

Wang and Feng (2002) [23] ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาตัวแบบสำหรับการพยากรณ์ความเรียบผิวของชิ้นงานในงานกลึง ปัจจัยที่นำมาพิจารณาได้แก่ ความแข็งของชิ้นงาน อัตราป้อนตัด มุมมีด ความลึกตัด ความเร็วรอบ และเวลาในการตัด โดยการศึกษาผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานจะไม่พิจารณาอันตรกิริยาที่ระดับสูงๆ คือตั้งแต่ระดับ 3 ขึ้นไป เนื่องจากที่อันตรกิริยาที่ระดับสูงๆ โดยปกติแล้วในทางปฏิบัติเกือบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะเกิดขึ้น จากการวิจัยพบว่าสมการตัวแบบความเรียบผิวที่ได้มีความแม่นยำกว่าสมการความเรียบผิวที่ใช้กันอยู่โดยทั่วไป

Kadirgama, Abou-El-Hossein, Mohammad, and Habeeb (2007) [24] ศึกษาเพื่อพัฒนาตัวแบบทางสถิติของการพยากรณ์ความเรียบผิวของโลหะผสม Hastelloy ชนิด C ด้วยกรรมวิธีการกัด โดยการประยุกต์วิธีพื้นผิวผลตอบด้วยเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานคือ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด การศึกษาจะเป็นการเปรียบเทียบเม็ดมีดกัดที่ใช้วิธีเคลือบผิวที่แตกต่างกันคือ การเคลือบผิวแบบ PVD และการเคลือบผิวแบบ CVD จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองกำลังหนึ่ง สามารถที่จะใช้ในการอธิบายผลกระทบต่างๆ ของปัจจัยที่ทำการศึกษาต่อความเรียบผิวของชิ้นงานได้ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคือ อัตราป้อนตัด รองลงมาคือ ความลึกตัด และความเร็วตัด ตามลำดับ เม็ดมีดที่เคลือบผิวแบบ PVD จะให้ความเรียบผิวของชิ้นงานดีกว่าเม็ดมีดที่เคลือบผิวแบบ CVD เนื่องจากเม็ดมีดแบบ CVD จะเกิดเศษโลหะแบบต่อเนื่อง จึงส่งผลให้ผิวชิ้นงานเกิดรอยในขณะทำการตัด ส่งผลให้ความเรียบผิวที่มีคุณภาพต่ำ

Noordin, Venkatesh, Sharif, Elting, and Abdulah (2004) [25] ศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบเพื่ออธิบายประสิทธิภาพของเม็ดเม็ดแบบเคลือบผิวบนกระบวนการกลึงเหล็กกล้า ด้วยการตัดแบบแห้ง ปัจจัยที่ใช้ในการพิจารณาได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และมุมมีด แรงตัดหลักและความเรียบผิวเป็นผลตอบที่ต้องการศึกษา โดยการประยุกต์เทคนิควิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อแรงตัดหลักและความเรียบผิวมากที่สุดคือ อัตราป้อนตัด และนอกจากนี้ยังมีผลของอันตรกิริยาระหว่างมุมมีดกับอัตราป้อนตัดที่ส่งผลต่อผลตอบดังกล่าว

Abou-El-Hossein, Kadrigama, Hamdi, and Benyounis (2007) [26] ทำการศึกษาการพยากรณ์แรงตัดในกระบวนการกัดบนเหล็กกล้าชนิด AISI P20 เพื่ออธิบายตัวแบบสมการกำลังหนึ่งและสองสำหรับพยากรณ์แรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด โดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบ ปัจจัยที่ใช้พิจารณาได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด ความกว้างตัด และความลึกตัด จากการศึกษาพบว่า ตัวแบบสมการกำลังหนึ่ง ปัจจัยที่มีผลต่อแรงตัดมากที่สุดคือ อัตราป้อนตัด ตามด้วยความลึกตัด และความกว้างตัด ตามลำดับ ส่วนตัวแบบสมการกำลังสองพบว่าเมื่ออัตราป้อนตัดสูงขึ้นแรงตัดก็จะสูงตามไปด้วย แต่แรงตัดจะลดลงเมื่อลดความเร็วตัดจากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า

- (1) วิธีการพื้นผิวผลตอบได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถใช้ได้ดีในการพยากรณ์แรงตัดตามแนวแกน (Longitudinal) ที่เกิดขึ้นกับการกัด สำหรับเหล็กกล้าชนิด AISI P20
- (2) สมการกำลังหนึ่งและสองที่พัฒนาขึ้นโดยวิธีพื้นผิวผลตอบสามารถที่จะให้ความแม่นยำในการพยากรณ์ค่าของแรงตัดที่เกิดขึ้น
- (3) สมการที่ได้ชี้ให้เห็นว่าอัตราป้อนตัดเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้นตามด้วย ความลึกตัด ความกว้างตัด และความเร็วตัด ตามลำดับ โดยที่แรงตัดจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัดและความลึกตัดให้สูงขึ้น แต่แรงตัดจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วตัด

Khaidar, Mohamed, Tarek and Jean-Francois (2010) [27] ทำการวิเคราะห์เชิงสถิติสำหรับความเรียบผิวชิ้นงานและแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยการประยุกต์ใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบในกระบวนการกลึงเหล็กกล้า AISI 52100 ปัจจัยที่นำมาพิจารณาได้แก่ ความเร็วตัด อัตราป้อนตัด และความลึกตัด ซึ่งทำการศึกษาที่ค่าความแข็งของชิ้นงานที่แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งของชิ้นงานเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้นมากกว่าความเร็วตัด เมื่อเพิ่มอัตราป้อนตัดและความลึกตัดจะส่งผลให้แรงตัดสูงขึ้น ในขณะที่ความเร็วที่สูงขึ้นจะทำให้แรงตัดลดลง ความลึกตัดจะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อแรงตัดที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับอัตราป้อนตัดและความเร็วตัด

สำหรับความเรียบผิวพบว่าอัตราป้อนตัดมีผลมากที่สุด นั่นคือ เมื่ออัตราป้อนตัดสูงขึ้น ความเรียบผิวจะสูงตามไปด้วย ในขณะที่ความเร็วตัดจะส่งผลตรงกันข้ามคือ เมื่อความเร็วตัดเพิ่ม ความเรียบผิวจะต่ำ และความลึกตัดไม่มีผลต่อความเรียบผิว

จากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นไปทางด้านกระบวนการกลึงเป็นหลัก และจะมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการบวนการกัดเป็นรองลงมา อย่างไรก็ตาม การศึกษาการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นเกี่ยวกับงานกัดยังมีค่อนข้างน้อย ซึ่งในส่วนของงานกัดนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่จะเน้นการศึกษาเกี่ยวกับมีดกัดเอ็นมิลล์ จะพบว่ามีดกัดหีบอบยังมีค่อนข้างน้อย ทั้งที่ในความเป็นจริงแล้วมีดกัดหีบอบนั้นเป็นเครื่องมือตัดที่นิยมใช้กันมากในการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความซับซ้อน ซึ่งงานวิจัยที่มีค่อนข้างน้อยนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากการที่มีดกัดแบบหีบอบมีราคาค่อนข้างจะสูงกว่ามีดกัดเอ็นมิลล์หรือเม็ดมีดกลึง จึงทำให้เป็นข้อจำกัดในการทำวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวกับงานกัดที่มีการนำหลักการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมก็ยังมีไม่มากนักและส่วนใหญ่ที่มีก็จะเป็นมีดกัดเอ็นมิลล์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วผลตอบทำการศึกษาก็จะเป็นการศึกษาในเรื่องของความเรียบผิวของชิ้นงานรวมถึงผลตอบในเรื่องของการสึกหรอของเครื่องมือตัดเป็นหลัก ซึ่งเราจะพบว่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัดเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่สำคัญมากที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยต่างๆ ในการตัด แต่งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ในงานกัดด้วยมีดกัดหีบอบยังไม่ค่อยมีการพิจารณาถึงแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัดว่าแรงตัดนั้นมีความสัมพันธ์อย่างไรกับปัจจัยหรือเงื่อนไขในการตัด

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นสำหรับงานการกัดด้วยมีดกัดหีบอบ ด้วยการนำหลักการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบด้วยเทคนิคการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) มาช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมในการตัดแบบเปียก การตัดแบบแห้ง และการใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น ซึ่งวิธีการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นวิธีที่ให้จำนวนของการทดลองที่น้อยกว่าวิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนและเวลาในการทดลองลงได้เป็นอย่างมาก

ผลตอบที่ใช้ในการศึกษาคือ ความเรียบผิวของชิ้นงาน ความสึกหรอของมีดกัด และแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างการตัด ซึ่งแรงตัดที่เกิดขึ้นจะพิจารณาในรูปของสัดส่วนแรงตัด เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำเอาสัดส่วนแรงตัดมาพิจารณา ยังมีค่อนข้างน้อยสำหรับกระบวนการกัด เพราะสัดส่วนแรงตัดจะไม่มีหน่วยจึงทำให้สามารถลดตัวแปรในการพิจารณาลงได้ ทำให้ช่วยลดความยุ่งยากในการวิเคราะห์ผลลงได้ และยังสามารถใช้งานได้ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดหรือวัสดุชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไป สัดส่วนแรงตัดที่เลือกใช้ในงานวิจัยเป็นแรงในแนวแกน X (F_x) และแรง

ตัดในแนวแกน Z (F_z) เนื่องจากแรงตัดในแนวแกนทั้งสองเป็นแรงตัดในแนวสัมผัส (Tangential force) และแรงตัดตามแนวแกน (Axial force) ตามลำดับ ซึ่งเป็นแรงหลักที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย คือ เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดจากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น ที่มีผลต่ออัตราการสึกหรอของใบมีดกัดห้วงบอล ความเรียบผิวชิ้นงาน และแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด และศึกษาหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดเหล็กกล้าด้วยใบมีดกัดห้วงบอลกับการใช้สารหล่อเย็น ดังนั้นการทดลองจะมีการแปรผันปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อผลตอบที่ต้องการศึกษา คือ ความเรียบผิวชิ้นงาน การสึกหรอของใบมีดกัด และแรงตัด โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อกำหนดสภาวะการตัดที่เหมาะสมในกระบวนการกัดชิ้นงานเหล็กกล้าคาร์บอน

3.2 การกำหนดปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

เนื่องจากการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ในกระบวนการกัดนั้น ปัจจัยที่สำคัญที่ใช้ในการพิจารณาคุณภาพของชิ้นงานคือ ความเรียบผิวของชิ้นงาน ซึ่งความเรียบผิวของชิ้นงานจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสึกหรอของมีดกัด และแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด ดังนั้น ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน ความสึกหรอมีดกัด และแรงตัดสามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ปัจจัยหลักๆ ได้แก่

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

งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ปัจจัยเนื่องจาก คน เครื่องจักร วัตถุดิบ และสิ่งแวดล้อม เป็นปัจจัยคงที่ที่สามารถควบคุมปัจจัยดังกล่าวได้ ทั้งนี้เพื่อทำการศึกษาถึงปัจจัยเนื่องจากวิธีการเป็นหลัก ซึ่งเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบการทดลองซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องในการกำหนดตัวแปรสำหรับการทดลอง(Cutting Parameter) ในกระบวนการกัดนั้นมีเงื่อนไขของการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน ก็คือ ความเร็วรอบ, ความลึกในการตัด และอัตราการป้อนตัด โดยเงื่อนไขหลักทั้ง 3 เงื่อนไขดังกล่าวจะส่งผลโดยตรงต่อ ความเรียบผิว

ของชิ้นงาน ความลึกหรือของมีดกัด และแรงตัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เงื่อนไข/ปัจจัยดังที่กล่าวมาทำการศึกษา

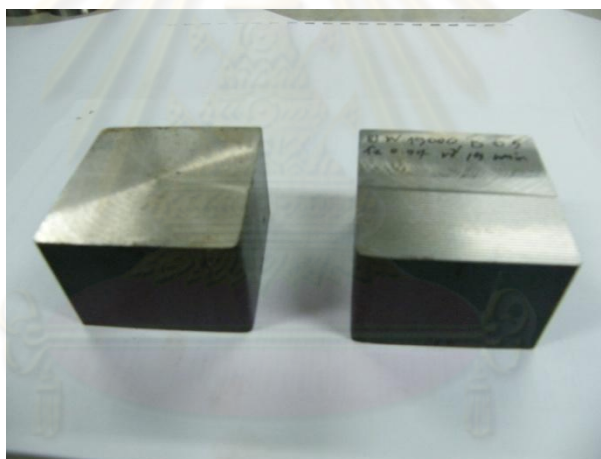
3.2.2 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

การกำหนดระดับของปัจจัย (Level) จะกำหนดเป็นแบบค่าคงที่ ซึ่งในแต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ โดยอาศัยข้อมูลทางด้านเทคนิคของบริษัทผู้ผลิตมีดตัดที่แนะนำจากคู่มือการใช้งานมีดตัดโดยกำหนดให้

1. ความเร็วรอบ เลือกใช้ที่ระดับ 8,000 10,000 และ 12,000 รอบต่อนาที
2. ความลึกกัด เลือกใช้ที่ระดับ 0.3, 0.5 และ 0.7 มิลลิเมตร
3. อัตราการป้อนตัด เลือกใช้ที่ระดับ 0.02, 0.04 และ 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ

3.3 วัสดุและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. วัสดุชิ้นงาน ที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กกล้าคาร์บอน (S50C/AISI1050) ซึ่งมีขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.1 วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองจะกำหนดให้มีค่าความแข็งเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาถึงค่าความแข็งของชิ้นงาน เพื่อเป็นการลดปัจจัยการศึกษาของคุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

ส่วนผสมทางเคมี (%wt.)	C	Mn	Si	P	S
	0.47-0.55	0.60-0.90	≤0.40	≤0.030	≤0.035
AISI	1050				
JIS	S50C				
DIN	1.1206 (Ck 50/C 50 E)				
สภาพจำหน่าย	อบปกติ ความแข็งไม่เกิน 235 HB				
สภาพหลังชุบ	ชุบแข็งด้วยน้ำ ความแข็ง 58-60 HRC				

รูปที่ 3.2 คุณสมบัติของวัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

2. มีดกัด เป็นมีดกัดแบบหัวบอล (Ball End Milling) ชนิดคมมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวด้วยไทเทเนียมอลูมิเนียมไนไตรด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร



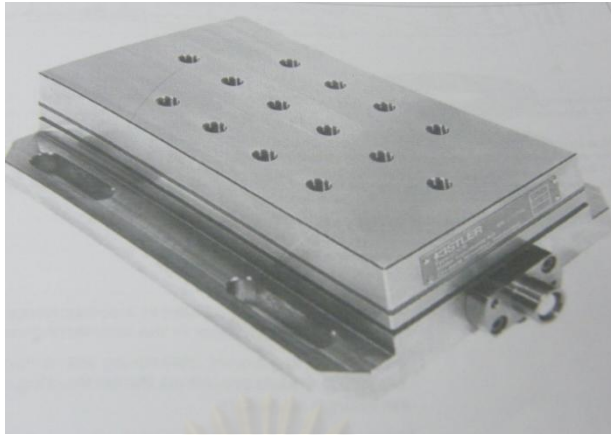
รูปที่ 3.3 มีดกัดแบบหัวบอล ยี่ห้อ 7-Leaders

3. เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ Mazak รุ่น Variaxis 500-5X ใช้ในการทำการทดลองตัดชิ้นงาน



รูปที่ 3.4 เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน

4. ไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงตัด (Dynamometer or Force sensor) ยี่ห้อ Kister รุ่น 9257B สำหรับวัดแรงตัด ชาร์จแอมพลิไฟเออร์ (Charge Amplifier) ยี่ห้อ Kister type 5073 สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด



รูปที่ 3.5 ไดนาโมมิเตอร์สำหรับวัดแรงตัด



รูปที่ 3.6 ชาร์จแอมพลิไฟเออร์สำหรับขยายสัญญาณแรงตัด

5. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL 750 ใช้สำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด



รูปที่ 3.7 ออสซิลโลสโคปสำหรับแสดงผลและบันทึกค่าแรงตัด

6. ไมโครสโคป (Microscope) ยี่ห้อ Keyence รุ่น VHX 600 ใช้สำหรับวัดขนาดความลึกหรือของมีดกัด



รูปที่ 3.8 ไมโครสโคปสำหรับวัดขนาดความลึกหรือ

7. เครื่องวัดความเรียบผิวชิ้นงาน (Roughness tester) ยี่ห้อ TSK รุ่น Surfcom 1400D ใช้สำหรับวัดค่าความเรียบผิวชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความเรียบผิวชิ้นงาน

3.4 วิธีการทดลอง

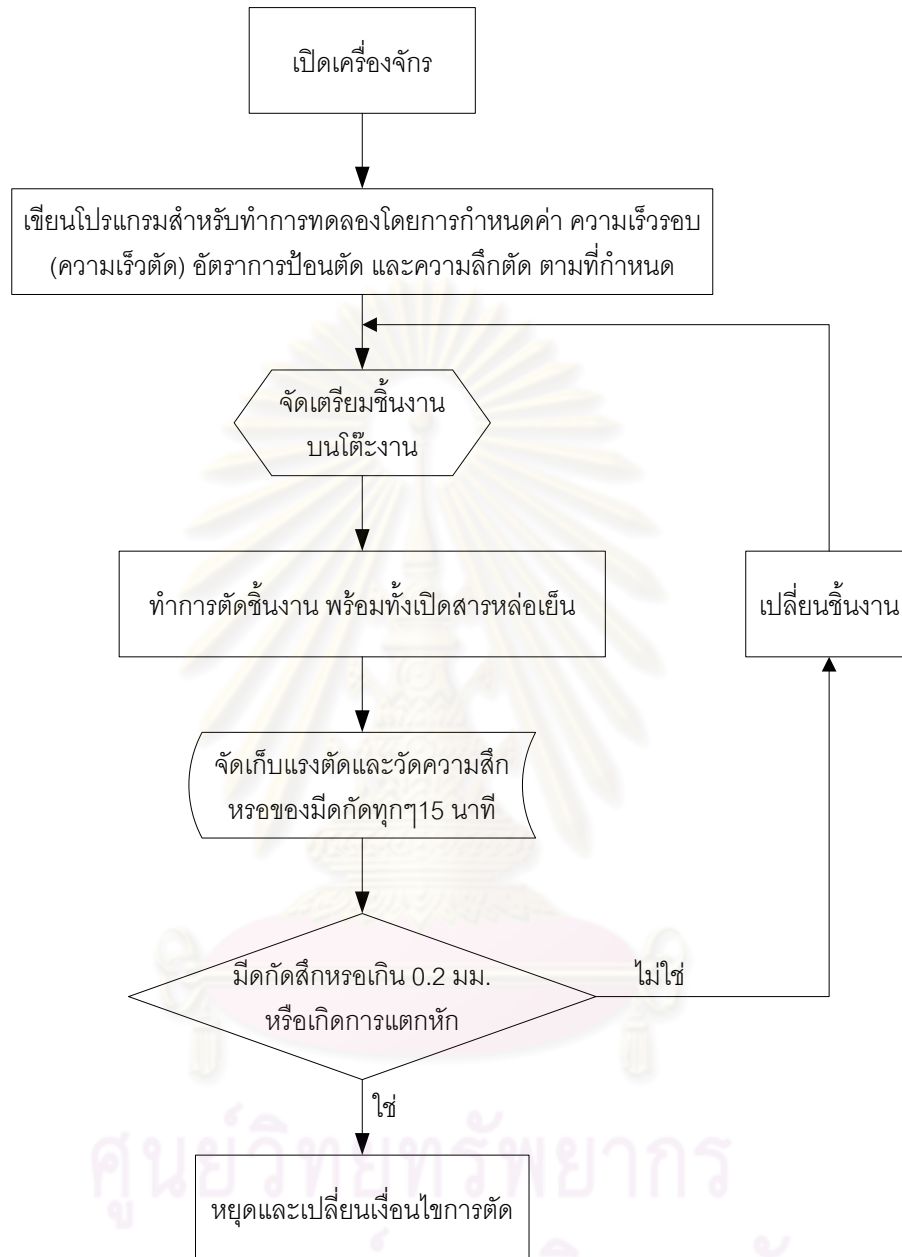
ขั้นตอนการทดลองของวิธีดำเนินการวิจัยในแต่ละเงื่อนไขการตัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่

3.10 สำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแห้งจะไม่การใช้สารหล่อเย็นหรือลมเป่าช่วยในการทดลอง

เงื่อนไขการตัดแบบเปียกและการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น จะใช้สารหล่อเย็นยี่ห้อ Castrol Clearedge EP 690 ที่ระดับความเข้มข้น 6% (คำแนะนำของผลิตภัณฑ์) ซึ่งมีคุณสมบัติดังรูปที่

3.11 เงื่อนไขการตัดแบบเปียกสารหล่อเย็นจะไหลผ่านท่อสารหล่อเย็นของเครื่องจักร ด้วยอัตราการไหล 16 ลิตรต่ออนาที (รูปที่ 3.12) ส่วนการใช้สเปรย์สารหล่อเย็นสารหล่อเย็นจะไหลผ่านหัว nozzle ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มิลลิเมตร ด้วยแรงดันลม 0.5 MPa ซึ่งหัว nozzle อยู่ห่างจาก

ปลายมีดกัดประมาณ 25 มิลลิเมตร และทำมุม 30 องศา กับแนวราบ อัตราการไหลของสารหล่อเย็นจะอยู่ที่ 90 มิลลิเมตรต่อนาที (แสดงดังรูปที่ 3.13)



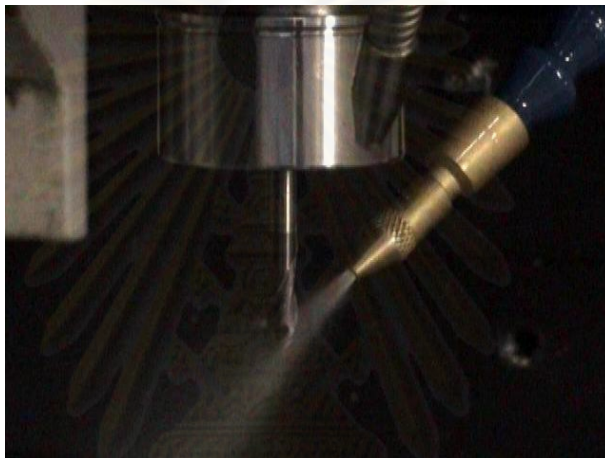
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

Castrol	Clearedge® EP690
Appearance of Concentrate	Blue / Green
Appearance of Emulsion	Translucent Blue
Density @ 20°C	0.972
pH of Emulsion @ 3%	10.0
Nitrites	Nil
Refractive Index	1.0

รูปที่ 3.11 คุณสมบัติของสารหล่อเย็นที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.12 ลักษณะการหล่อเย็นของการตัดแบบเปียก



รูปที่ 3.13 ลักษณะการหล่อเย็นของการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็น

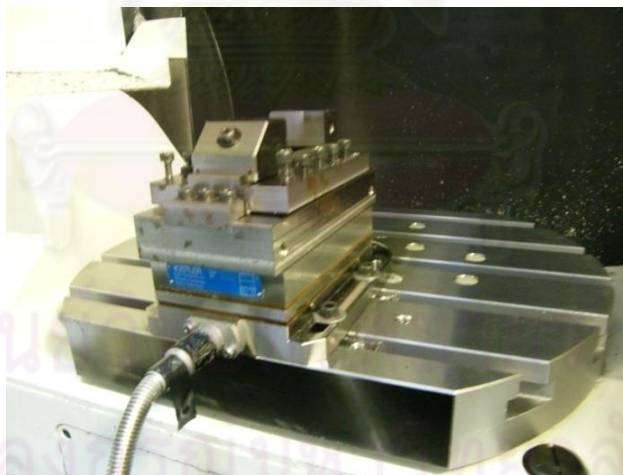
3.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

เนื่องจากการศึกษาเป็นการทดลองตัดชิ้นงานจนกว่ามีดกัดจะสึกหรือถึงค่าที่กำหนด โดยทำการเก็บค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน ความสึกหรอของมีดกัด และแรงตัด ทุกๆ 15 นาทีของการตัดในแต่ละเงื่อนไข ไม่ได้เป็นการพิจารณาหรือกำหนดค่าความเรียบผิวของชิ้นงานก่อนแล้วจึงทำการตัดจนกระทั่งได้ความเรียบผิวของชิ้นงานตามที่กำหนด แล้วจึงเก็บค่าความสึกหรอของมีดกัด และแรงตัด ณ ตำแหน่งนั้น แต่จะเป็นการหาค่าของความเรียบผิว ความสึกหรอของมีดกัด และแรงตัด ที่เหมาะสมภายหลังจากทำการตัดเสร็จสิ้น และทำการหาความสัมพันธ์ของผลตอบเพื่อหาช่วงระยะเวลาที่เหมาะสม โดยการพิจารณาจากความสัมพันธ์ของค่าความเรียบผิว Ra กับ Rz เมื่อได้สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้งสองแล้วก็ทำการกำหนดค่าความเรียบผิวชิ้นงาน Ra เพื่อทำการเลือกช่วงเวลาที่เหมาะสมที่จะนำไปทำการศึกษาต่อ แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ไปทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติเพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม คือ การหาเงื่อนไขการตัดที่ให้ค่าความเรียบผิวชิ้นงาน (Ra) มีค่าไม่เกิน 1.2 ไมโครเมตร ตามมาตรฐาน ISO 4287-1997 ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความเรียบผิวก็คือ เครื่องวัดความเรียบผิวชิ้นงาน (Roughness tester) โดยการใช้อุปกรณ์ซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกนทำการกัดชิ้นงาน แล้วหาเงื่อนไขการตัดที่สามารถตัดเหล็กได้นานที่สุดโดยที่ความเรียบผิวชิ้นงานสูงสุดไม่เกินค่าที่กำหนด แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านวัสดุดิบ และอุปกรณ์ในการวัดชิ้นงาน ซึ่งไม่สามารถวัดความเรียบผิวชิ้นงานได้ตลอดเวลาของการตัด ทำให้ต้องทำการวัดค่าความเรียบผิวชิ้นงานทุกๆ ระยะเวลา 15 นาทีของการตัด และทำการตัดจนกว่ามีดกัดจะเกิดการสึกหรอเกินค่าที่กำหนด คือ 0.2 มิลลิเมตร หรือมีดกัดเกิดการแตก (Chipping) จึงจะทำการหยุดการกัดหรือสิ้นสุดเงื่อนไขการตัดนั้นๆ แล้วทำการหาช่วงเวลาการตัดที่เหมาะสม ซึ่งจะนำแต่ละเงื่อนไขการทดลองมาเปรียบเทียบกันได้

ในการวิเคราะห์เบื้องต้นก่อนจะนำไปสู่การวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จึงทำการหาระยะเวลาการกัดเพื่อที่จะนำข้อมูลผลตอบที่ระยะเวลาที่ได้มาทำการวิเคราะห์โดยเลือกระยะเวลาการกัดที่เหมาะสมที่ระยะเวลาเดียวกันในแต่ละเงื่อนไขการตัดมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเปรียบเทียบกัน โดยมีขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลดังนี้

1. ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงเพื่อใช้ในการวัดแรงตัดในขณะที่ทำการกัดชิ้นงานบนโต๊ะงานของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (แสดงดังรูปที่ 3.14)



รูปที่ 3.14 การติดตั้งไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรง

2. เชื่อมต่อสายไดนาโมมิเตอร์หรือเซ็นเซอร์วัดแรงเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณ (Charge Amplifier) เพื่อทำการขยายสัญญาณของแรงตัดที่ได้ จากนั้นต่อสายเครื่องขยายสัญญาณเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) (แสดงดังรูปที่ 3.15)

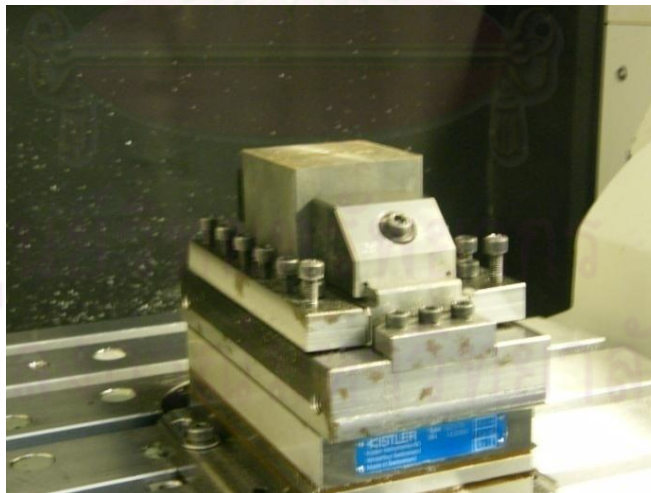


รูปที่ 3.15 การเชื่อมต่อสายไดนาโมวัตต์แรงเข้ากับเครื่องขยายสัญญาณและเครื่องออสซิลโลสโคป

3. ปรับตั้งค่าเครื่องออสซิลโลสโคป โดยตั้งค่าต่างๆ ดังนี้

- Low-pass filter = 500 Hz.
- Sampling rate = 1 kS/s
- Record length = 100 K

4. การเตรียมชิ้นงาน นำชิ้นงานซึ่งมีขนาดความกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และสูง 45 มิลลิเมตร จับยึดบนปากกาซึ่งยึดอยู่บนโต๊ะงานของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่ง เซ็นเตอร์ และทำการปาดหน้าชิ้นงานเพื่อให้ชิ้นงานได้ระนาบและมีความเรียบ (แสดงดังรูปที่ 3.16)



รูปที่ 3.16 การเตรียมชิ้นงานและชิ้นงานที่ผ่านการปาดหน้าเรียบร้อยแล้ว

5. เมื่อทำการกัดครบทุกๆ 15 นาทีของการกัด จะทำการวัดความลึกหรือของมีดกัดด้วยเครื่องไมโครสโคป ดังรูปที่ 3.15 พร้อมทั้งวัดแรงตัดที่เกิดขึ้น และทำการกัดต่อไปเรื่อยๆ จนกว่ามีดกัดจะมีความลึกหรือเกิน 0.2 มิลลิเมตร หรือมีดกัดเกิดการแตกหักก็จะทำการ

เปลี่ยนมีดกัดและทดลองด้วยเงื่อนไขการกัดอื่นต่อไป ซึ่งการตัดแต่ละเงื่อนไขการตัดจะเป็นไปตามการออกแบบการทดลอง (แสดงดังตารางที่ 3.1)



รูปที่ 3.17 การวัดขนาดความสึกหรอของมีดกัด

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งอยู่ในหน่วยโวลต์ ต้องนำมาทำการแปลงหน่วยในส่วน ของสัญญาณแรงตัด ตามค่า sensitivity ได้ดังนี้

- แรงตัดในแนวสัมผัส (Tangential Force, F_x (N)) = V_x (Volt) x 50 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวรัศมี (Radial Force, F_y (N)) = V_y (Volt) x 50 (N/Volt)
- แรงตัดในแนวแกน (Axial Force, F_z (N)) = V_z (Volt) x 50 (N/Volt)

3.6 การออกแบบการทดลอง

เมื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษากลับแล้ว ก็นำปัจจัยดังกล่าวไปออกแบบการทดลอง แบบพื้นผิวผลตอบ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ช่วยในการออกแบบการทดลอง ซึ่งได้ รูปแบบของการทดลองดังนี้

3.6.1 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box- Behnken Design)

การทดลองนี้เป็นการออกแบบสามระดับ (3-Level Design) สำหรับฟิตพื้นผิว ผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นมาจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบ บล็อกไม่บริบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของรันที่ต้องการ

3.6.2 ระดับของปัจจัยในการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองเบื้องต้นนี้ ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Minitab เป็นเครื่องมือช่วยในการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่ง ประกอบด้วยปัจจัยหลัก 3 ปัจจัย ในแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ (แสดงดังตารางที่ 3.1) ไม่มีการทำซ้ำ เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านทรัพยากร และเป็นการทำแบบสุ่มตามตารางที่ 3.2 ถึง 3.4 ซึ่งเป็น

ตารางเงื่อนไขการตัดแบบแบบเป็ยก, การตัดแบบแห้ง, และการใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น ตามลำดับ โดยมีจำนวนครั้งในการทำการทดลองทั้ง 15 การทดลอง โดยในแต่ละการทดลอง มีการบันทึกผล ค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน, แรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการกัด, และค่าความลึกหยอของมีดกัด

ตารางที่ 3.1 ระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย			สัญลักษณ์
	ต่ำ(-1)	กลาง (0)	สูง (1)	
1.ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที) (ความเร็วตัด (เมตรต่อนาที))	8,000 (151)	10,000 (189)	12,000 (226)	X_1
2.อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	0.02	0.04	0.06	X_2
3.ความลึกกัด (มิลลิเมตร)	0.3	0.5	0.7	X_3

ตารางที่ 3.2 เมตริกซ์การออกแบบการทดลองสำหรับการตัดแบบเปียก

Std Order	Run Order	Spindle speed (Cutting speed) (X_1)	Feed rate (X_2)	Depth of cut (X_3)	Ra	Vb	Fx	Fy	Fz	Fx/Fz
12	1	0	1	1						
14	2	0	0	0						
4	3	1	1	0						
15	4	0	0	0						
11	5	0	-1	1						
13	6	0	0	0						
1	7	-1	-1	0						
3	8	-1	1	0						
5	9	-1	0	-1						
8	10	1	0	1						
6	11	1	0	-1						
9	12	0	-1	-1						
7	13	-1	0	1						
10	14	0	1	-1						
2	15	1	-1	0						

หมายเหตุ:

เมื่อ Ra คือ ค่าความเรียบผิวชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)

Vb คือ ความลึกหระของมีดกัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

Fx คือ แรงตัดในแนวสัมผัส มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Fy คือ แรงตัดในแนวรัศมี มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Fz คือ แรงตัดในแนวแกน มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Fx/Fz คือ สัดส่วนแรงตัด

ตารางที่ 3.3 เมตริกซ์การออกแบบการทดลองสำหรับการตัดแบบแห้ง

Std Order	Run Order	Spindle speed (Cutting speed) (X_1)	Feed rate (X_2)	Depth of cut (X_3)	Ra	Vb	Fx	Fy	Fz	Fx/Fz
8	1	1	0	1						
10	2	0	1	-1						
2	3	1	-1	0						
6	4	1	0	-1						
7	5	-1	0	1						
13	6	0	0	0						
4	7	1	1	0						
9	8	0	-1	-1						
1	9	-1	-1	0						
11	10	0	-1	1						
12	11	0	0	1						
5	12	-1	1	-1						
14	13	0	0	0						
15	14	0	0	0						
3	15	-1	1	0						

หมายเหตุ:

เมื่อ Ra คือ ค่าความเรียบผิวชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)

Vb คือ ความลึกหระของมีดกัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

Fx คือ แรงตัดในแนวสัมผัส มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Fy คือ แรงตัดในแนวรัศมี มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Fz คือ แรงตัดในแนวแกน มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Fx/Fz คือ สัดส่วนแรงตัด

ตารางที่ 3.4 เมตริกซ์การออกแบบการทดลองสำหรับการตัดแบบสเปร์ยสารหล่อเย็น

Std Order	Run Order	Spindle speed (Cutting speed) (X_1)	Feed rate (X_2)	Depth of cut (X_3)	Ra	Vb	Fx	Fy	Fz	Fx/Fz
7	1	-1	0	1						
1	2	-1	-1	0						
12	3	0	1	1						
2	4	1	-1	0						
11	5	0	-1	1						
13	6	0	0	0						
3	7	-1	1	0						
10	8	0	1	-1						
4	9	1	1	0						
9	10	0	-1	-1						
5	11	-1	0	-1						
6	12	1	0	-1						
15	13	0	0	0						
14	14	0	0	0						
8	15	1	0	1						

หมายเหตุ:

เมื่อ Ra คือ ค่าความเรียบผิวชิ้นงาน มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร (μm)

Vb คือ ความลึกหระของมีดกัด มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร (mm)

Fx คือ แรงตัดในแนวสัมผัส มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Fy คือ แรงตัดในแนวรัศมี มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Fz คือ แรงตัดในแนวแกน มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

Fx/Fz คือ สัดส่วนแรงตัด

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.7.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล

โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลมีกันด้วยหลายชนิด โดยผู้วิจัยเลือกใช้ โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab เนื่องจากสามารถตอบสนองต่อการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ได้เป็นอย่างดี สำหรับการออกแบบการทดลองโดยวิธีพินผิวผลตอบ และใช้กันกันแพร่หลายในงานวิจัยประเภทต่างๆ

3.7.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการออกแบบการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการออกแบบการทดลอง จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่า P-Value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P-Value นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่า P-Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่ามากกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05 ทั้งนี้การพิจารณาทั้ง อิทธิพลหลัก (Main Effect) และ อันตรกิริยา (Interaction Effect) ว่ามีผลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นหรือไม่

3.7.3 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

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

3.7.4 การตรวจสอบการแจกแจงความเป็นปกติของข้อมูล

โดยการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นการพล็อตค่าส่วนตกค้าง ลงบนกราฟที่เรียกว่า Normal Probability Paper ซึ่งพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (K-1/2)/n$ โดย $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วน ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน

3.7.5 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งค่าส่วนตกค้าง

อยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกพิตอยู่บนแกนนอน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน หรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัยซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และระดับของปัจจัยอยู่บนแกนนอน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับ (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ปัจจัยการตัด (ความเร็วรอบ อัตราป้อนตัด ความลึกตัด) ที่ส่งผลต่อความสามารถในการตัด (ความสึกหรอมีดตัด ความเรียบผิวชิ้นงาน และแรงตัด) จะแยกวิเคราะห์เป็นหัวข้อต่างๆตามพารามิเตอร์ในการตัดต่อผลตอบดังนี้

4.1 ผลการทดลอง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.2 ถึง 4.4 เป็นผลการทดลองของเงื่อนไขการตัดแบบแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น ตามลำดับ โดยเป็นผลการทดลองที่เลือกมาจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงในตารางภาคผนวก ก. โดยมีปัจจัยในการทดลองและผลตอบที่ทำการพิจารณาดังต่อไปนี้

ปัจจัยในการทดลอง

1. ความเร็วรอบ (n) หน่วย รอบต่อนาที
2. อัตราป้อน (f) หน่วย มิลลิเมตรต่อรอบ
3. ความลึกตัด (d) หน่วย มิลลิเมตร

ผลตอบในการทดลอง

1. ความเรียบผิวชิ้นงาน (Ra) หน่วย ไมโครเมตร
2. ความสึกหรอของมีดกัด (Vb) หน่วย มิลลิเมตร
3. อัตราส่วนแรงตัด (Fx/Fz)

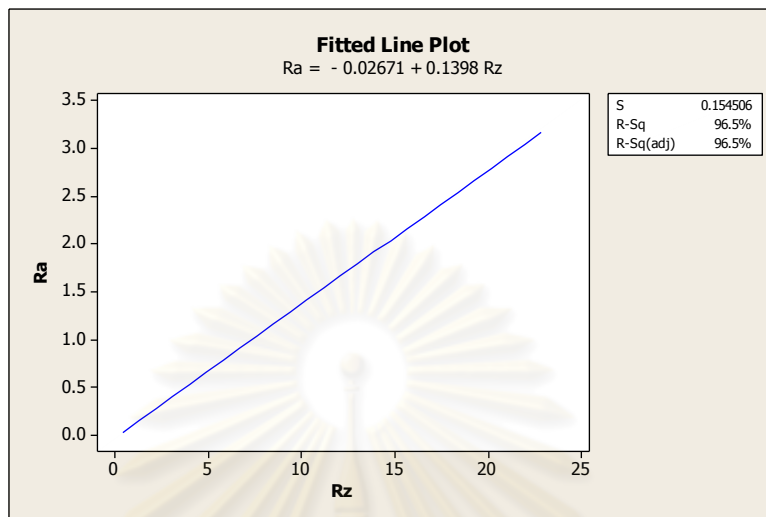
4.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความหยาบผิวที่ได้จากการทดลอง

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

The regression equation is

$$Ra = - 0.02671 + 0.1398 Rz$$

$$S = 0.154506 \quad R\text{-Sq} = 96.5\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 96.5\%$$

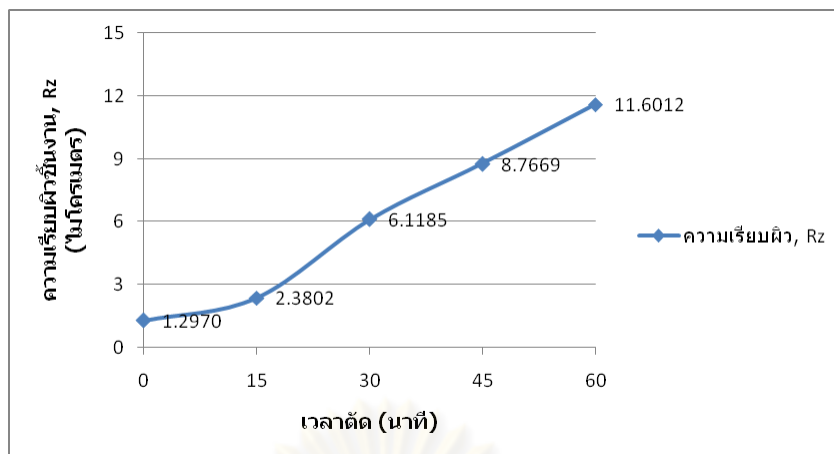


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ra กับ Rz

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Ra และ Rz สามารถอธิบายได้ว่า Ra กับ Rz มีความสัมพันธ์กัน โดยดูจากค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 96.5% นั้นหมายความว่า ถ้าค่า Rz หรือ Ra มีการเปลี่ยนแปลงไป ก็จะส่งผลให้ Ra หรือ Rz มีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องวิเคราะห์ผลตอบทั้งสอง ทำการวิเคราะห์แค่ผลตอบตัวใดตัวหนึ่งก็จะสามารถอธิบายผลตอบอีกตัวได้

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะใช้ค่า Rz มาพล็อตเพื่อดูอิทธิพลเนื่องจากระยะเวลาการตัดที่เปลี่ยนแปลงไปที่ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.2 ในส่วนของความเรียบผิวกับระยะเวลาการตัดของการตัดด้วยเงื่อนไขการตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น จะพบว่าความเรียบผิวสูงสุดของชิ้นงานเฉลี่ยเริ่มต้นที่เวลา 0 นาทีในกรณีนี้หมายถึงมีดกัดใหม่ จะมีค่าเฉลี่ยที่ประมาณ 1.2790 ไมโครเมตร และเมื่อระยะเวลาในการตัดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเรียบผิวสูงสุดของชิ้นงานสูงขึ้นตามไปด้วย สาเหตุของค่าความเรียบผิวของชิ้นงานที่มีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการตัดเพิ่มขึ้นสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อระยะเวลาการตัดยาวนานขึ้นทำให้การสึกหรอของมีดกัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเมื่อการสึกหรอของมีดกัดเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ค่าความเรียบผิวของชิ้นงานสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเรียบผิวสูงสุดกับระยะเวลาการตัด

การใช้งานของมีดกัดจะดูจากการสึกหรอเป็นหลัก เมื่อกัดชิ้นงานไปจนกระทั่งความสึกหรอของมีดกัดเกิน 0.2 มิลลิเมตรหรือมีดกัดเกิดการแตกหัก ก็จะหยุดทำการกัดชิ้นงานและเปลี่ยนมีดกัดใหม่ จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า Ra และ Rz สมการถดถอยคือ $Ra = -0.02671 + 0.1398 Rz$ จากความสัมพันธ์ของสมการถดถอยดังกล่าวสามารถหาช่วงระยะเวลาในการตัดที่จะนำมาวิเคราะห์ผลทางสถิติได้ เมื่อกำหนดให้ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยของชิ้นงาน (Ra) ที่ต้องการมีค่าเท่ากับ 1.2 ไมโครเมตร จะได้ค่าความเรียบผิวสูงสุดเท่ากับ 8.8892 ไมโครเมตร ซึ่งค่าความเรียบผิวสูงสุดดังกล่าวจะอยู่ในช่วงของระยะเวลาการกัดในนาทีที่ 45 (แสดงผลดังตารางที่ 4.1) ดังนั้นจึงนำช่วงระยะเวลาการกัดในนาทีที่ 45 มาทำการวิเคราะห์ผลต่อไป ซึ่งสามารถคัดแยกข้อมูลในช่วงระยะเวลาดังกล่าวได้ดังตารางที่ 4.2 ถึง 4.4

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการกัดกับความเรียบผิวสูงสุด

ระยะเวลาการกัด (นาที)	ความเรียบผิวสูงสุด, Rz (ไมโครเมตร)
0	1.2970
15	2.3802
30	6.1185
45	8.7669
60	11.6012

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบเปียก

Std Order	Run Order	$n (X_1)$	$f (X_2)$	$d (X_3)$	Ra	Vb	Fx	Fy	Fz	Fx/Fz
12	1	10000	0.06	0.7	0.7961	0.08	60.01	9.40	95.47	0.628574
14	2	10000	0.04	0.5	0.3783	0.09	37.20	5.23	66.42	0.560072
4	3	12000	0.06	0.5	1.5139	0.08	52.07	3.40	94.25	0.552467
15	4	10000	0.04	0.5	0.4054	0.08	44.11	2.39	80.99	0.544635
11	5	10000	0.02	0.7	0.4092	0.11	40.61	1.77	87.02	0.466674
13	6	10000	0.04	0.5	0.2747	0.08	44.87	5.06	75.13	0.597231
1	7	8000	0.02	0.5	0.6561	0.13	16.28	1.72	38.43	0.423627
3	8	8000	0.06	0.5	1.1771	0.08	49.78	7.08	90.08	0.55262
5	9	8000	0.04	0.3	0.3471	0.09	39.29	2.51	85.03	0.462072
8	10	12000	0.04	0.7	0.5948	0.10	43.52	6.48	72.05	0.604025
6	11	12000	0.04	0.3	0.2978	0.09	25.46	2.19	55.82	0.456109
9	12	10000	0.02	0.3	0.3316	0.12	15.91	0.29	81.43	0.195383
7	13	8000	0.04	0.7	0.4402	0.09	63.10	4.03	126.89	0.497281
10	14	10000	0.06	0.3	0.6659	0.07	51.45	4.47	95.03	0.541408
2	15	12000	0.02	0.5	1.1319	0.12	16.32	1.23	52.24	0.312404

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบแห้ง

Std Order	Run Order	$n (X_1)$	$f (X_2)$	$d (X_3)$	Ra	Vb	Fx	Fy	Fz	Fx/Fz
8	1	12000	0.04	0.7	3.5796	0.11	45.94	7.87	61.67	0.744933
10	2	10000	0.06	0.3	1.2335	0.10	22.80	4.54	39.76	0.573441
2	3	12000	0.02	0.5	3.8691	0.14	23.18	5.64	50.99	0.454599
6	4	12000	0.04	0.3	2.4571	0.14	51.27	7.03	101.85	0.503387
7	5	8000	0.04	0.7	1.1884	0.14	34.50	7.28	57.20	0.603147
13	6	10000	0.04	0.5	2.8944	0.14	30.38	8.95	48.05	0.632258
4	7	12000	0.06	0.5	2.1993	0.11	35.95	7.23	50.50	0.711881
9	8	10000	0.02	0.3	3.6822	0.18	28.01	5.27	86.85	0.32251
1	9	8000	0.02	0.5	1.3471	0.18	38.92	8.24	88.29	0.44082
11	10	10000	0.02	0.7	3.0499	0.14	45.94	8.79	80.19	0.572889
12	11	10000	0.06	0.7	1.7253	0.14	62.11	10.3	85.16	0.729333
5	12	8000	0.04	0.3	1.9080	0.12	32.11	6.08	62.48	0.513924
14	13	10000	0.04	0.5	2.1005	0.14	21.51	5.70	41.77	0.514963
15	14	10000	0.04	0.5	2.5773	0.13	24.37	6.54	49.06	0.496739
3	15	8000	0.06	0.5	0.6441	0.11	30.62	8.39	54.67	0.560088

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบสเปรย์สารหล่อเย็น

Std Order	Run Order	n (X ₁)	f (X ₂)	d (X ₃)	Ra	Vb	Fx	Fy	Fz	Fx/Fz
7	1	8000	0.04	0.7	0.5126	0.09	43.93	6.98	68.73	0.639212
1	2	8000	0.02	0.5	0.5417	0.08	17.12	0.96	43.16	0.396629
12	3	10000	0.06	0.7	0.8121	0.09	30.11	6.53	61.47	0.489748
2	4	12000	0.02	0.5	0.6195	0.09	14.27	1.47	36.38	0.392141
11	5	10000	0.02	0.7	0.3931	0.08	30.03	1.83	69.54	0.431763
13	6	10000	0.04	0.5	0.1634	0.10	28.48	3.82	53.98	0.527553
3	7	8000	0.06	0.5	0.6398	0.11	53.84	5.30	98.53	0.546437
10	8	10000	0.06	0.3	0.3950	0.13	50.93	1.52	107.18	0.475224
4	9	12000	0.06	0.5	0.7329	0.09	40.94	5.13	66.57	0.615112
9	10	10000	0.02	0.3	0.2585	0.09	16.31	0.03	80.34	0.203014
5	11	8000	0.04	0.3	0.3576	0.12	22.66	1.06	61.01	0.371386
6	12	12000	0.04	0.3	0.2986	0.13	28.63	0.39	51.71	0.553677
15	13	10000	0.04	0.5	0.3413	0.11	30.40	7.25	64.33	0.472615
14	14	10000	0.04	0.5	0.2121	0.09	26.98	3.13	49.74	0.542364
8	15	12000	0.04	0.7	0.4770	0.10	33.77	4.40	58.22	0.580055

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

หลังจากคัดเลือกช่วงระยะเวลาการกักที่เหมาะสมที่จะใช้นำมาวิเคราะห์ผลการทดลองแล้ว จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยจะทำการวิเคราะห์ผลตอบต่างๆ ของการตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น ตามลำดับดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานเฉลี่ย Ra
2. การวิเคราะห์ผลตอบความลึกหรือของมีดกัด Vb
3. การวิเคราะห์ผลตอบสัดส่วนแรงตัด Fx/Fz

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลต่างๆ เป็นการนำเสนอเพียงบางส่วนที่สำคัญ ซึ่งข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ จะแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

4.3.1 การตัดแบบเปียก

4.3.1.1 การวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานเฉลี่ย Ra

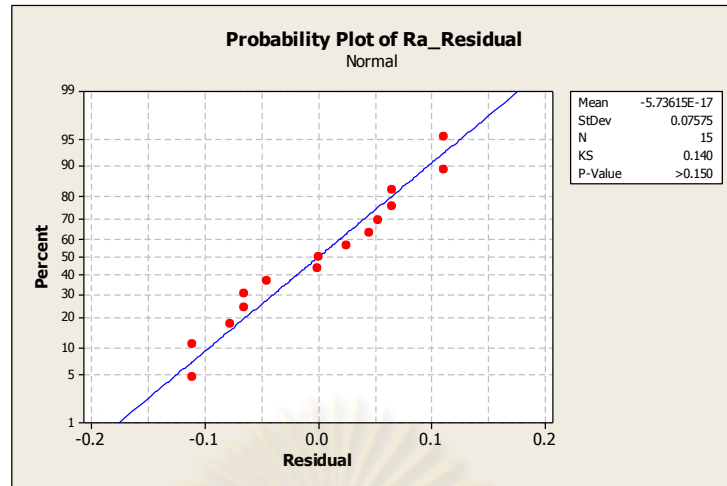
การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบผิวเฉลี่ย ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความหยาบผิวเฉลี่ย

4.3.1.1.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

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

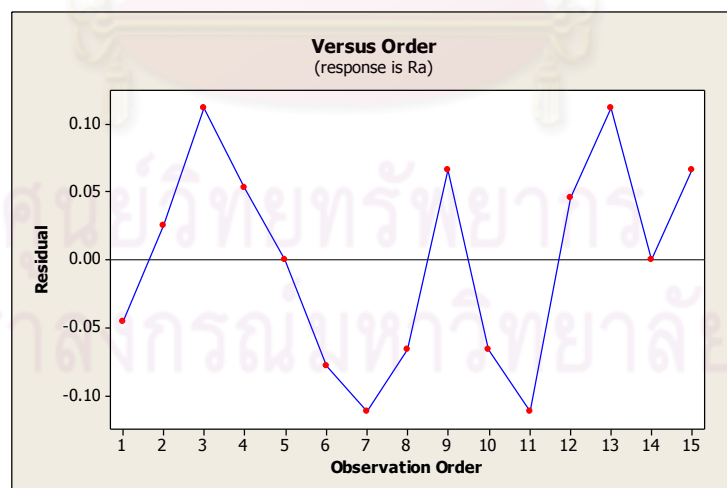
จากรูปที่ 4.3 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.3 Normal Probability Plot ของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย

4.3.1.1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.4 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

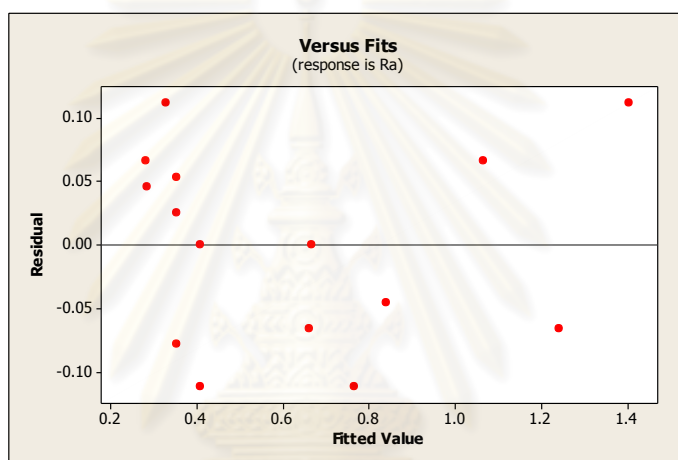


รูปที่ 4.4 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจัดกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.1.1.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าความหยาบผิว (Ra) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของความเรียบผิวเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 4.5 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่ามีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.5 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.5 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.1.1.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของความเรียบผิวเฉลี่ย Ra

โดยการพิจารณาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความเรียบผิวเฉลี่ย ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลลัพธ์จากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

Analysis of Variance for Ra						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1.88715	1.88715	0.209683	13.05	0.006
Linear	3	0.47976	0.47976	0.159919	9.95	0.015
Square	3	1.39148	1.39148	0.463825	28.87	0.001
Interaction	3	0.01592	0.01592	0.005305	0.33	0.805
Residual Error	5	0.08034	0.08034	0.016067		
Lack-of-Fit	3	0.07082	0.07082	0.023607	4.96	0.172
Pure Error	2	0.00952	0.00952	0.004758		
Total	14	1.96748				

S = 0.126757 PRESS = 1.15453
R-Sq = 95.92% R-Sq(adj) = 88.57%

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนใด ซึ่งมีค่า R-Sq = 95.92% แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมมาก

4.3.1.2 การวิเคราะห์ผลตอบความสึกหรอของมีดกัด Vb

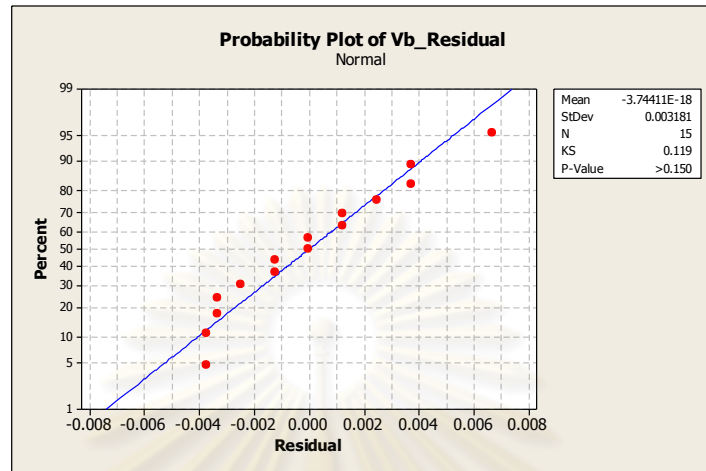
การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบผิวเฉลี่ย ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความสึกหรอของมีดกัด

4.3.1.2.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

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

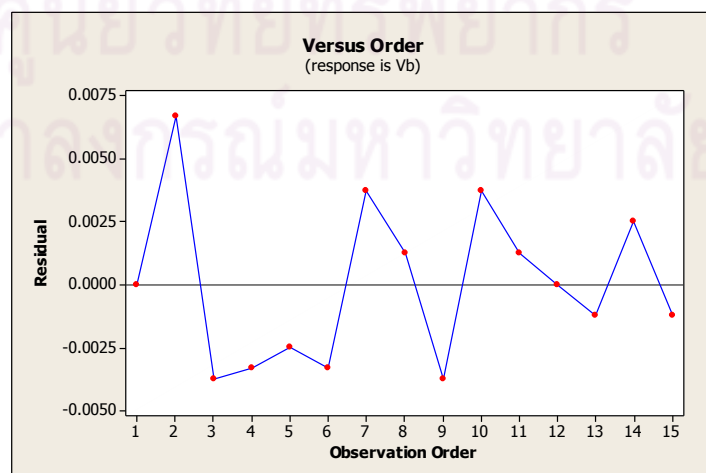
จากรูปที่ 4.6 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลความลึกหรือของมีดกัด มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.6 Normal Probability Plot ของข้อมูลความลึกหรือของมีดกัด

4.3.1.2.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการนำค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกหรือของมีดกัดแสดงดังรูปที่ 4.7 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

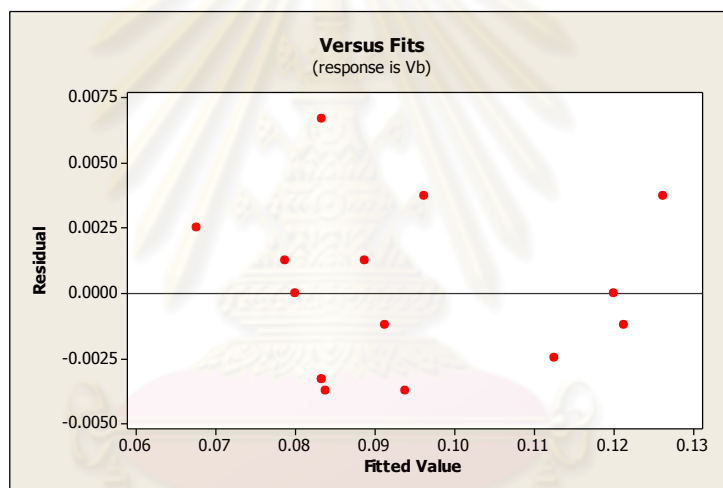


รูปที่ 4.7 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความลึกหรือของมีดกัด

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจัดกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.1.2.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกหอยของมิดกัด

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าความลึกหอยของมิดกัด (V_b) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของความลึกหอยของมิดกัดแสดงดังรูปที่ 4.8 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.8 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกหอยของมิดกัด

จากรูปที่ 4.8 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.1.2.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของความลึกหอยของมิดกัด V_b

โดยการพิจารณาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความลึกหอยมิดกัด ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลลัพธ์จากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความลึกหรือมีดกัด

Analysis of Variance for Vb						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.004418	0.004418	0.000491	17.33	0.003
Linear	3	0.003625	0.003625	0.001208	42.65	0.001
Square	3	0.000643	0.000643	0.000214	7.57	0.026
Interaction	3	0.000150	0.000150	0.000050	1.76	0.270
Residual Error	5	0.000142	0.000142	0.000028		
Lack-of-Fit	3	0.000075	0.000075	0.000025	0.75	0.615
Pure Error	2	0.000067	0.000067	0.000033		
Total	14	0.004560				

S = 0.00532291 PRESS = 0.00135
R-Sq = 96.89% R-Sq(adj) = 91.30%

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนใด ซึ่งมีค่า R-Sq = 96.89% แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมมาก

4.3.1.3 การวิเคราะห์ผลตอบสัดส่วนแรงตัด Fx/Fz

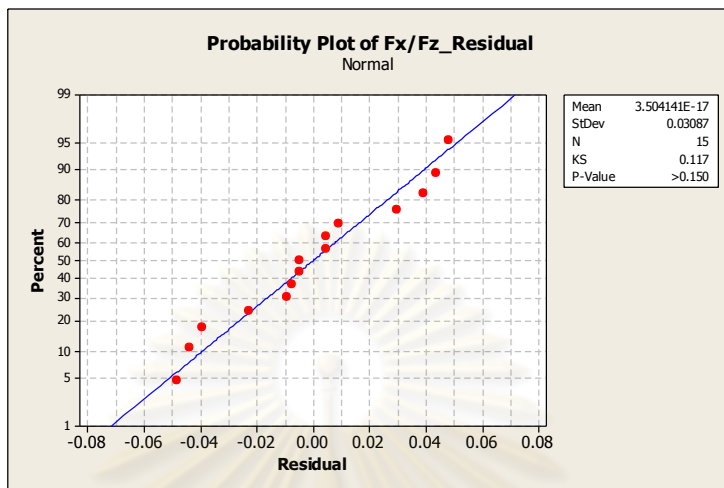
การวิเคราะห์ผลการทดลองของสัดส่วนแรงตัด ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

4.3.1.3.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

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

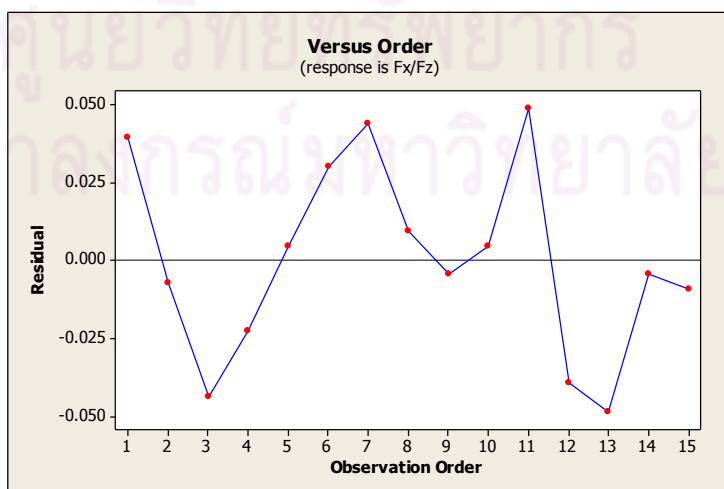
จากรูปที่ 4.9 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลสัดส่วนแรงตัด มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.9 Normal Probability Plot ของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด

4.3.1.3.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลสัดส่วนแรงตัดแสดงดังรูปที่ 4.10 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

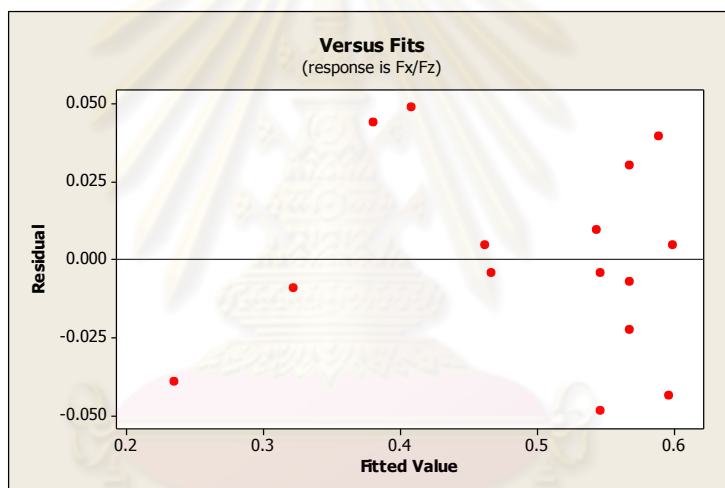


รูปที่ 4.10 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจายตัวกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.1.3.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือ สัดส่วนแรงตัด F_x/F_z ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของสัดส่วนแรงตัดแสดงดังรูปที่ 4.11 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่ามีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.11 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.11 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.1.3.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของสัดส่วนแรงตัด F_x/F_z

โดยการพิจารณาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสัดส่วนแรงตัด ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลลัพธ์จากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

Analysis of Variance for Fx/Fz						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.173861	0.173861	0.019318	7.24	0.021
Linear	3	0.132815	0.132815	0.044272	16.59	0.005
Square	3	0.026311	0.026311	0.008770	3.29	0.116
Interaction	3	0.014735	0.014735	0.004912	1.84	0.257
Residual Error	5	0.013341	0.013341	0.002668		
Lack-of-Fit	3	0.011880	0.011880	0.003960	5.42	0.160
Pure Error	2	0.001462	0.001462	0.000731		
Total	14	0.187203				

S = 0.0516556 PRESS = 0.193364
R-Sq = 92.87% R-Sq(adj) = 80.05%

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนใด ซึ่งมีค่า R-Sq = 92.87% แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมมาก

4.3.2 การตัดแบบแห้ง

4.3.2.1 การวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานเฉลี่ย Ra

การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบผิวเฉลี่ย ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

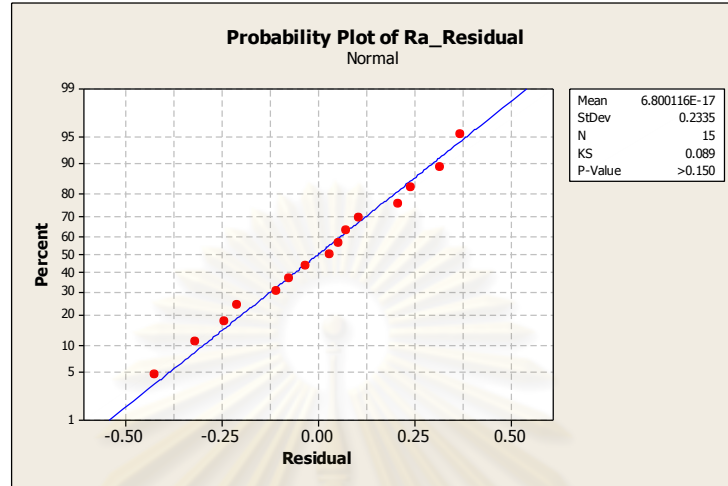
- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความหยาบผิวเฉลี่ย

4.3.2.1.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

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

4.12 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

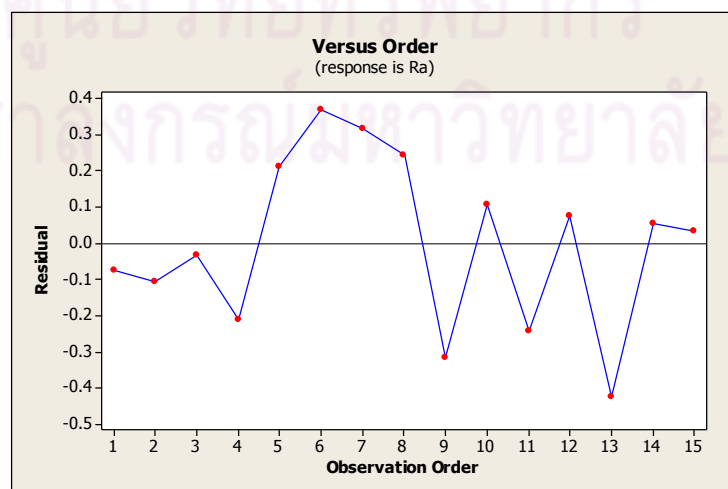
จากรูปที่ 4.12 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.12 Normal Probability Plot ของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย

4.3.2.1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.13 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

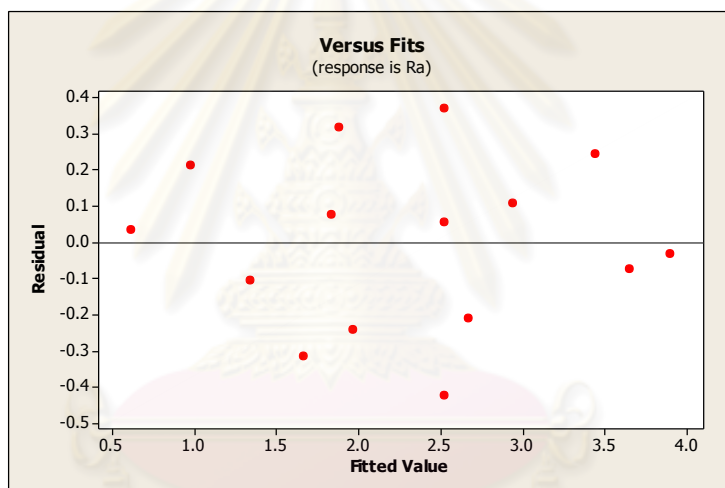


รูปที่ 4.13 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจายตัว แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.1.1.3 การทดสอบความสม่าเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

เป็นการทดสอบความสม่าเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าความหยาบผิว (R_a) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของความเรียบผิวเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 4.14 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่าเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.14 กราฟทดสอบความสม่าเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.14 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่าเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.1.1.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของความเรียบผิวเฉลี่ย R_a

โดยการพิจารณาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความเรียบผิวเฉลี่ย ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลลัพธ์จากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

Analysis of Variance for Ra						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	12.8210	12.8210	1.4246	9.33	0.012
Linear	3	10.8861	10.8861	3.6287	23.78	0.002
Square	3	0.5370	0.5370	0.1790	1.17	0.407
Interaction	3	1.3979	1.3979	0.4660	3.05	0.130
Residual Error	5	0.7630	0.7630	0.1526		
Lack-of-Fit	3	0.4437	0.4437	0.1479	0.93	0.557
Pure Error	2	0.3194	0.3194	0.1597		
Total	14	13.5840				

S = 0.390651 PRESS = 7.81708
R-Sq = 94.38% R-Sq(adj) = 84.27%

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนใด ซึ่งมีค่า R-Sq = 94.38% แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมมาก

4.3.2.2 การวิเคราะห์ผลตอบความสึกหรอของมีดกัด Vb

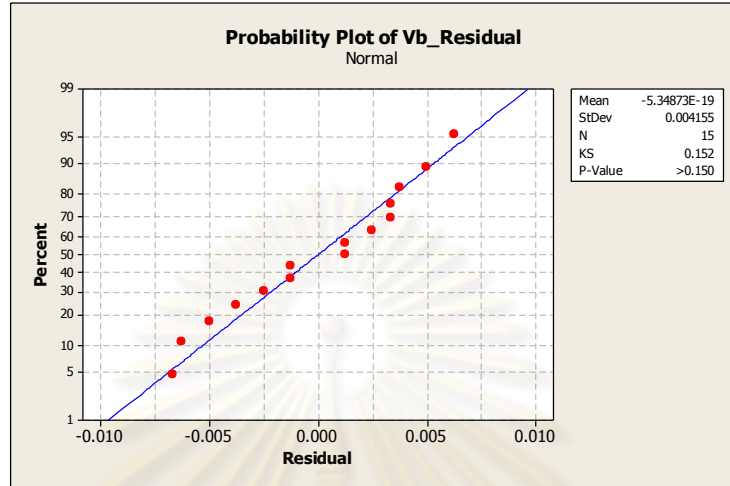
การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบผิวเฉลี่ย ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความสึกหรอของมีดกัด

4.3.2.2.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง การทดสอบการกระจายแบบปกติของความสึกหรอของมีดกัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

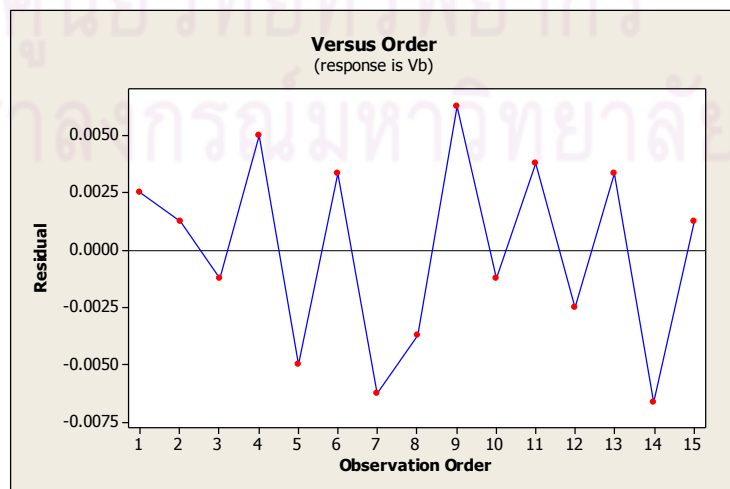
จากรูปที่ 4.15 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลความถี่หรือของมีดกัด มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.15 Normal Probability Plot ของข้อมูลความถี่หรือของมีดกัด

4.3.2.2.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความถี่หรือของมีดกัดแสดงดังรูปที่ 4.16 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

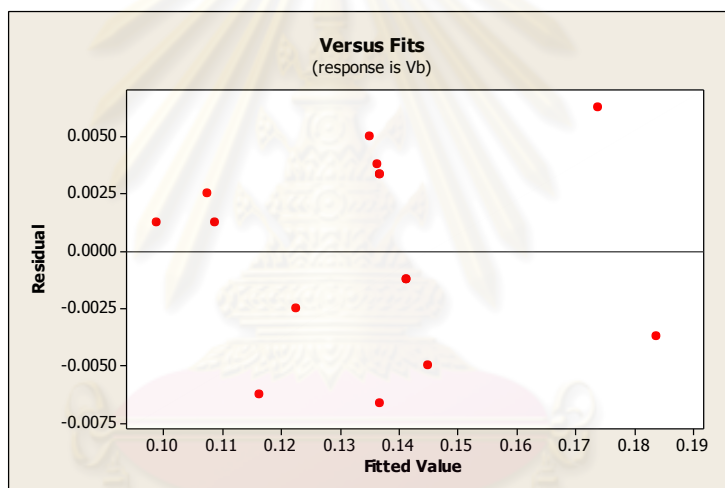


รูปที่ 4.16 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความถี่หรือของมีดกัด

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจายตัว แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.2.2.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกหอยของมิดกัต

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าความลึกหอยของมิดกัต (V_b) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของความลึกหอยของมิดกัตแสดงดังรูปที่ 4.17 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่ามีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.17 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกหอยของมิดกัต

จากรูปที่ 4.17 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.2.2.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของความลึกหอยของมิดกัต V_b

โดยการพิจารณาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความลึกหอยมิดกัต ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลลัพธ์จากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความลึกหรือมีดกัด

Analysis of Variance for Vb						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.007332	0.007332	0.000815	16.85	0.003
Linear	3	0.004375	0.004375	0.001458	30.17	0.001
Square	3	0.000332	0.000332	0.000111	2.29	0.196
Interaction	3	0.002625	0.002625	0.000875	18.10	0.004
Residual Error	5	0.000242	0.000242	0.000048		
Lack-of-Fit	3	0.000175	0.000175	0.000058	1.75	0.384
Pure Error	2	0.000067	0.000067	0.000033		
Total	14	0.007573				

S = 0.00695222 PRESS = 0.00295
R-Sq = 96.81% R-Sq(adj) = 91.07%

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนใด ซึ่งมีค่า R-Sq = 96.81% แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมมาก

4.3.2.3 การวิเคราะห์ผลตอบสัดส่วนแรงตัด Fx/Fz

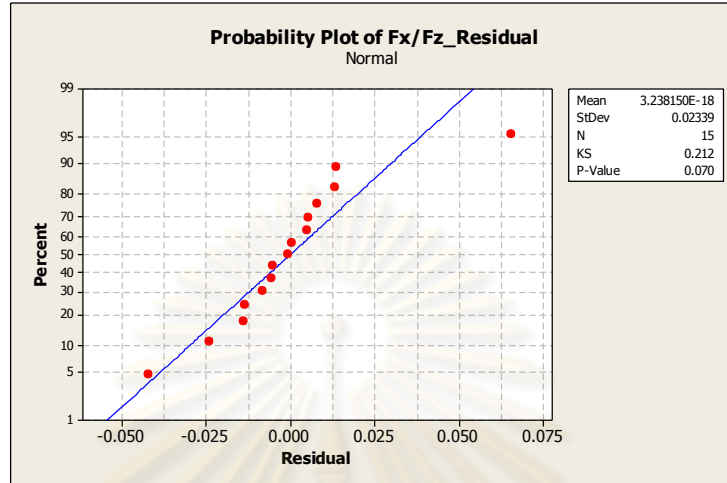
การวิเคราะห์ผลการทดลองของสัดส่วนแรงตัด ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

4.3.2.3.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามากกับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง การทดสอบการกระจายแบบปกติของสัดส่วนแรงตัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่ค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงพอจะสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

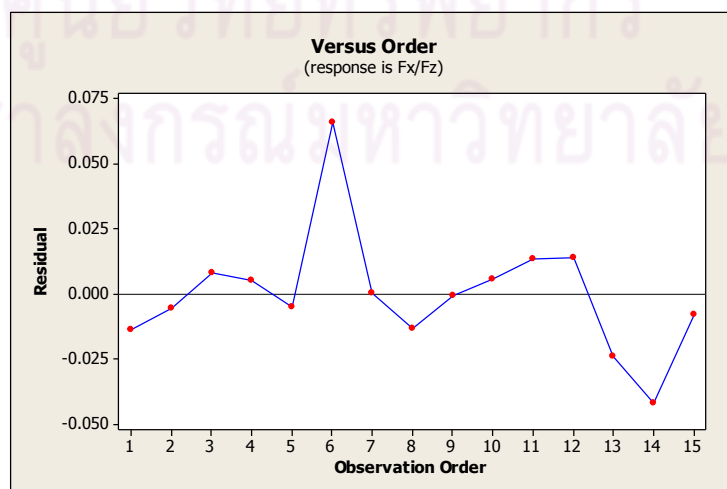
จากรูปที่ 4.18 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลสัดส่วนแรงตัด มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่าข้อมูลค่อนข้างจะมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.18 Normal Probability Plot ของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด

4.3.2.3.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลสัดส่วนแรงตัดแสดงดังรูปที่ 4.19 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

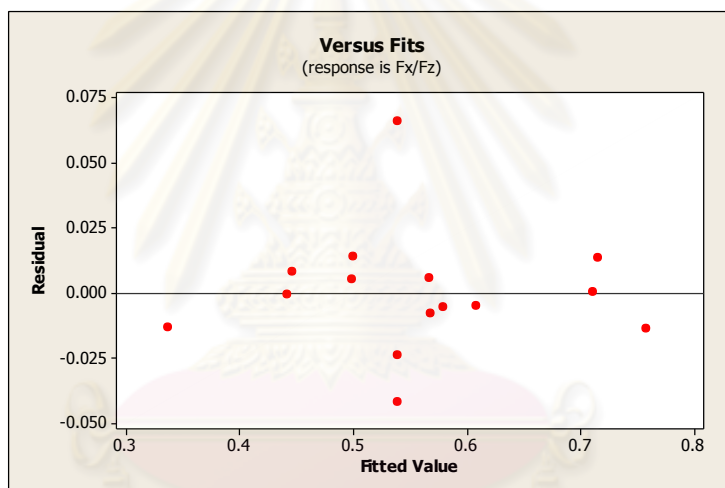


รูปที่ 4.19 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.19 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจายตัวกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.2.3.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือ สัดส่วนแรงตัด F_x/F_z ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของสัดส่วนแรงตัดแสดงดังรูปที่ 4.20 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่ามีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และค่อนข้างจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.20 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.20 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลค่อนข้างมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.2.3.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของสัดส่วนแรงตัด F_x/F_z

โดยการพิจารณาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสัดส่วนแรงตัด ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลลัพธ์จากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

Analysis of Variance for Fx/Fz						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.175378	0.175378	0.019486	12.72	0.006
Linear	3	0.155733	0.155733	0.051911	33.89	0.001
Square	3	0.006850	0.006850	0.002283	1.49	0.324
Interaction	3	0.012795	0.012795	0.004265	2.78	0.149
Residual Error	5	0.007658	0.007658	0.001532		
Lack-of-Fit	3	0.000979	0.000979	0.000326	0.10	0.954
Pure Error	2	0.006679	0.006679	0.003340		
Total	14	0.183036				

S = 0.0391350 PRESS = 0.0306862
R-Sq = 95.82% R-Sq(adj) = 88.29%

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนใด ซึ่งมีค่า R-Sq = 95.82% แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมมาก

4.3.3 การตัดแบบการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น

4.3.3.1 การวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานเฉลี่ย Ra

การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบผิวเฉลี่ย ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

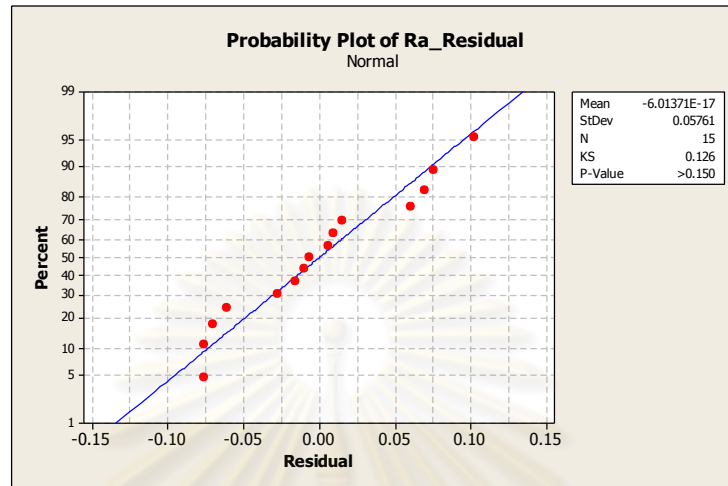
- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความหยาบผิวเฉลี่ย

4.3.3.1.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามากกับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง การทดสอบการกระจายแบบปกติของความหยาบผิวเฉลี่ยแสดงได้ดังรูปที่

4.21 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

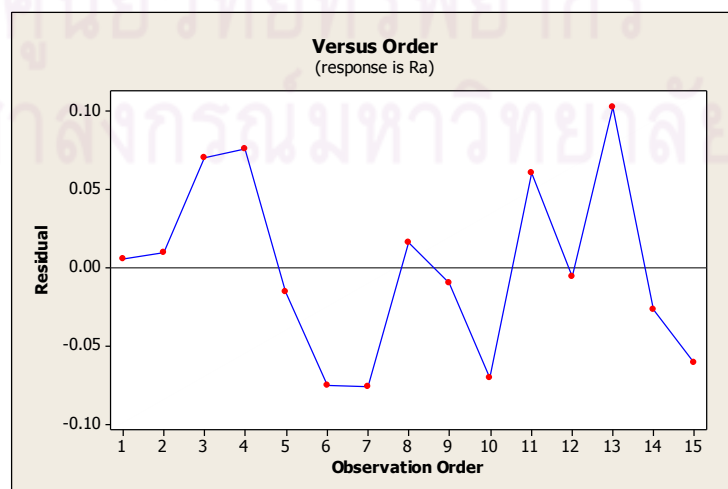
จากรูปที่ 4.21 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.21 Normal Probability Plot ของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย

4.3.3.1.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลแสดงดังรูปที่ 4.22 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

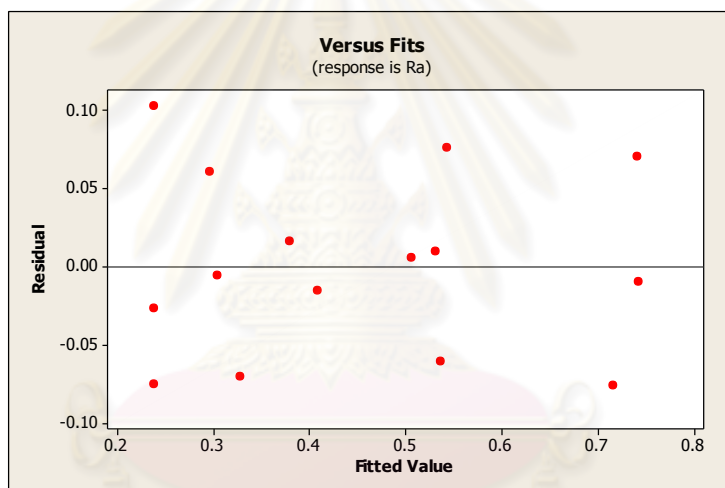


รูปที่ 4.22 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความเรียบผิวเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.22 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจายตัว แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.3.1.3 การทดสอบความสม่าเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

เป็นการทดสอบความสม่าเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าความหยาบผิว (R_a) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของความเรียบผิวเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 4.23 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่าเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.23 กราฟทดสอบความสม่าเสมอของความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

จากรูปที่ 4.23 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่าเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.3.1.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของความเรียบผิวเฉลี่ย R_a

โดยการพิจารณาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความเรียบผิวเฉลี่ย ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลลัพธ์จากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเรียบผิวเฉลี่ย

Analysis of Variance for Ra						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.46744	0.46744	0.051938	5.59	0.036
Linear	3	0.17219	0.17219	0.057396	6.18	0.039
Square	3	0.27510	0.27510	0.091701	9.87	0.015
Interaction	3	0.02015	0.02015	0.006716	0.72	0.580
Residual Error	5	0.04646	0.04646	0.009293		
Lack-of-Fit	3	0.02956	0.02956	0.009853	1.17	0.493
Pure Error	2	0.01690	0.01690	0.008452		
Total	14	0.51390				

S = 0.0963996 PRESS = 0.510997
R-Sq = 90.96% R-Sq(adj) = 74.68%

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนใด ซึ่งมีค่า R-Sq = 90.96% แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมมาก

4.3.3.2 การวิเคราะห์ผลตอบความสึกหรอของมีดกัด Vb

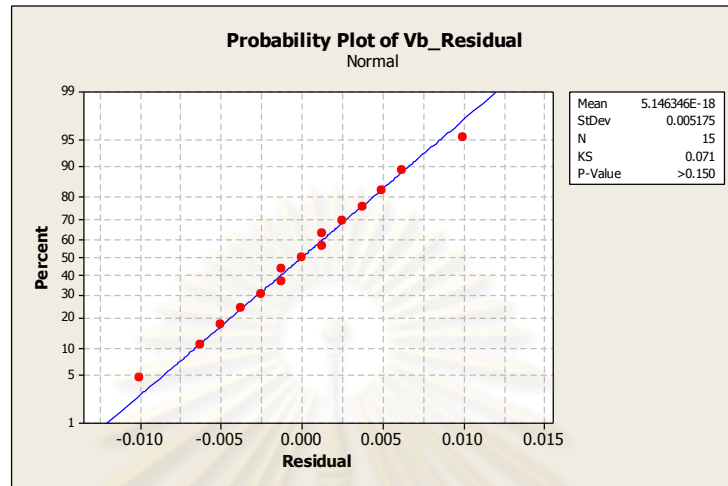
การวิเคราะห์ผลการทดลองของความเรียบผิวเฉลี่ย ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความสึกหรอของมีดกัด

4.3.3.2.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง การทดสอบการกระจายแบบปกติของความสึกหรอของมีดกัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.24 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

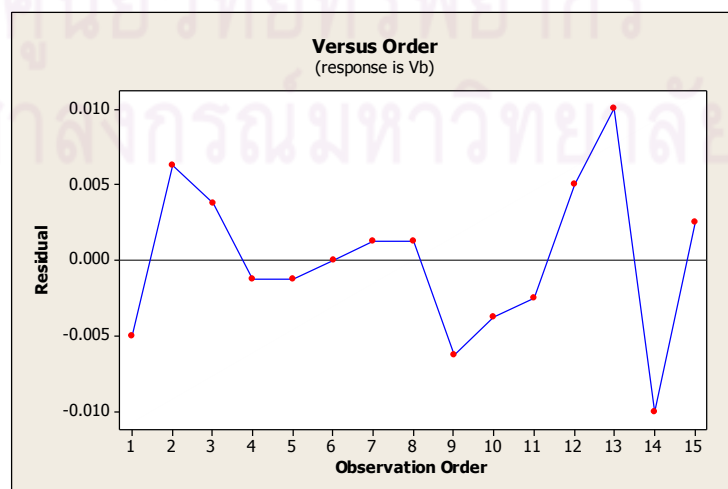
จากรูปที่ 4.24 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลความถี่หรือของมีดกัด มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.24 Normal Probability Plot ของข้อมูลความถี่หรือของมีดกัด

4.3.3.2.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความถี่หรือของมีดกัดแสดงดังรูปที่ 4.25 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

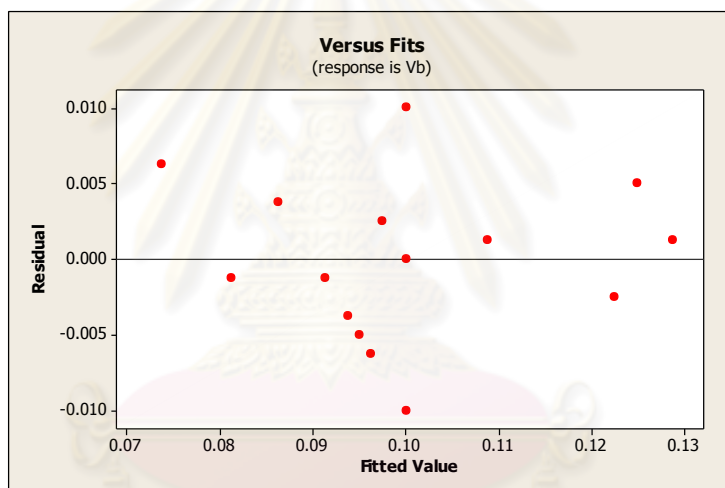


รูปที่ 4.25 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลความถี่หรือของมีดกัด

จากรูปที่ 4.25 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจายตัวกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.3.2.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกหรือของมิดกัต

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือค่าความลึกหรือของมิดกัต (V_b) ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของความลึกหรือของมิดกัตแสดงดังรูปที่ 4.26 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.26 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของความลึกหรือของมิดกัต

จากรูปที่ 4.26 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.3.2.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของความลึกหรือของมิดกัต V_b

โดยการพิจารณาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของความลึกหรือของมิดกัต ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลลัพธ์จากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความลึกหรือมิดกัต

Analysis of Variance for Vb						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.003425	0.003425	0.000381	5.07	0.044
Linear	3	0.002325	0.002325	0.000775	10.33	0.014
Square	3	0.000650	0.000650	0.000217	2.89	0.142
Interaction	3	0.000450	0.000450	0.000150	2.00	0.233
Residual Error	5	0.000375	0.000375	0.000075		
Lack-of-Fit	3	0.000175	0.000175	0.000058	0.58	0.681
Pure Error	2	0.000200	0.000200	0.000100		
Total	14	0.003800				

S = 0.00866025 PRESS = 0.00325
R-Sq = 90.13% R-Sq(adj) = 72.37%

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนใด ซึ่งมีค่า R-Sq = 90.13% แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมมาก

4.3.3.3 การวิเคราะห์ผลตอบสัดส่วนแรงตัด Fx/Fz

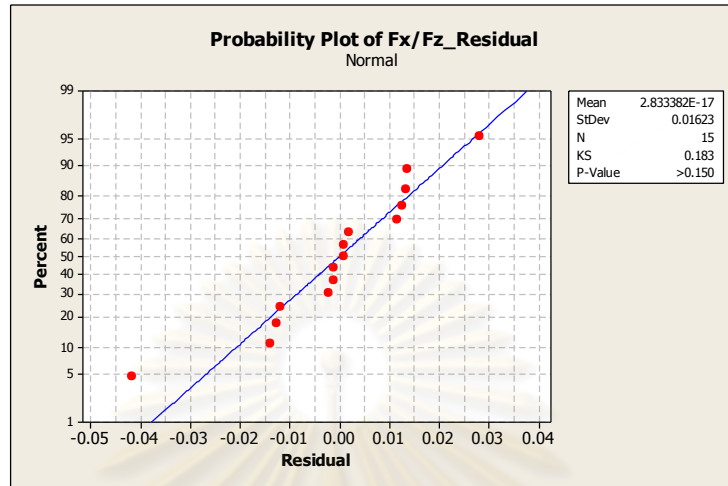
การวิเคราะห์ผลการทดลองของสัดส่วนแรงตัด ด้วย ANOVA จะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมของข้อมูลก่อน ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) การทดสอบการกระจายแบบปกติ
- 2) การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล
- 3) การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

4.3.3.3.1 การทดสอบการกระจายแบบปกติ

การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้างกับความน่าจะเป็นสะสม โดยที่ค่าความน่าจะเป็นสะสมอยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง การทดสอบการกระจายแบบปกติของสัดส่วนแรงตัดแสดงได้ดังรูปที่ 4.27 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรงดี ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

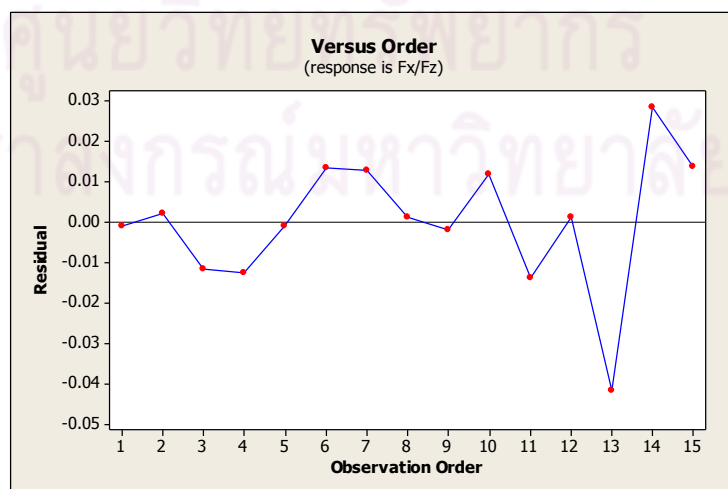
จากรูปที่ 4.27 กราฟที่ได้จากการพล็อตข้อมูลสัดส่วนแรงตัด มีลักษณะค่อนข้างที่จะเป็นเส้นตรง และค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเป็นข้อมูลที่เชื่อถือได้



รูปที่ 4.27 Normal Probability Plot ของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด

4.3.3.3.2 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดลองถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลสัดส่วนแรงตัดแสดงดังรูปที่ 4.28 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลนี้ ไม่พบว่าค่าส่วนตกค้างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงหรือมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักร ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป

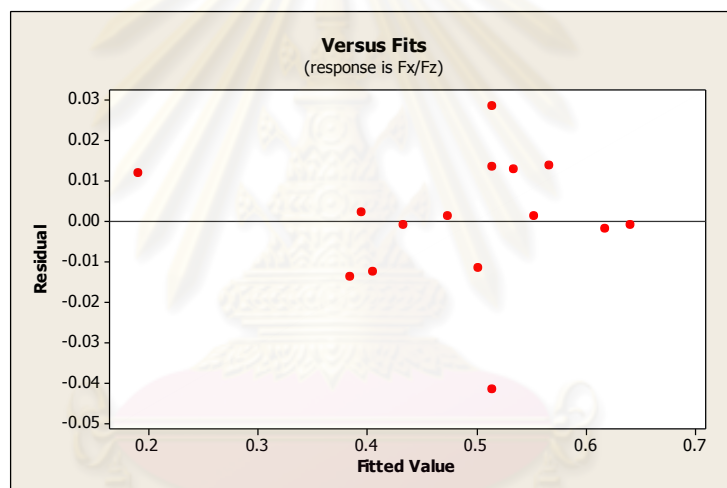


รูปที่ 4.28 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูลสัดส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.28 จะเห็นว่า กราฟของ Residual ไม่มีรูปแบบแน่นอนหรือมีการกระจายตัวกระจาย แสดงว่าข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

4.3.3.3 การทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ในที่นี้คือ สัดส่วนแรงตัด F_x/F_z ที่ถูกทำนาย (Predicted Response) มาสร้างแผนภูมิ ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้งและค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน การทดสอบความเป็นอิสระของสัดส่วนแรงตัดแสดงดังรูปที่ 4.29 จากการพิจารณาค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตนี้ไม่พบว่ามีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาที่คงอยู่ที่ถูกทำนาย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความแปรปรวนคงตัวเพียงพอที่จะทำการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.29 กราฟทดสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

จากรูปที่ 4.29 จากการพิจารณาค่า Residual และ Fit value พบว่า กราฟไม่มีลักษณะของการลู่เข้าหรือลู่ออก และไม่มีรูปแบบปรากฏให้เห็น แสดงว่าข้อมูลค่อนข้างจะมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของข้อมูล

4.3.1.3.4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลของสัดส่วนแรงตัด F_x/F_z

โดยการพิจารณาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของสัดส่วนแรงตัด ซึ่งใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ผลลัพธ์จากโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของสัดส่วนแรงตัด

Analysis of Variance for Fx/Fz						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.171518	0.171518	0.019058	25.85	0.001
Linear	3	0.102268	0.102268	0.034089	46.24	0.000
Square	3	0.041864	0.041864	0.013955	18.93	0.004
Interaction	3	0.027386	0.027386	0.009129	12.38	0.009
Residual Error	5	0.003686	0.003686	0.000737		
Lack-of-Fit	3	0.000985	0.000985	0.000328	0.24	0.862
Pure Error	2	0.002701	0.002701	0.001350		
Total	14	0.175204				

S = 0.0271519 PRESS = 0.0218413
R-Sq = 97.90% R-Sq(adj) = 94.11%

จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value มากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Sq) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าของผลตอบหรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนใด ซึ่งมีค่า R-Sq = 97.90% แสดงว่าสมการมีความเหมาะสมมาก

4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองการตัดด้วยเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ

การเปรียบเทียบผลทดลองการตัดด้วยเงื่อนไขการตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็น โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยการพิจารณาผลตอบของความเรียบผิวของชิ้นงาน, ความสึกหรอของมีดกัด, และอัตราส่วนแรงตัด ซึ่งผลการวิเคราะห์สามารถอธิบายได้ดังนี้

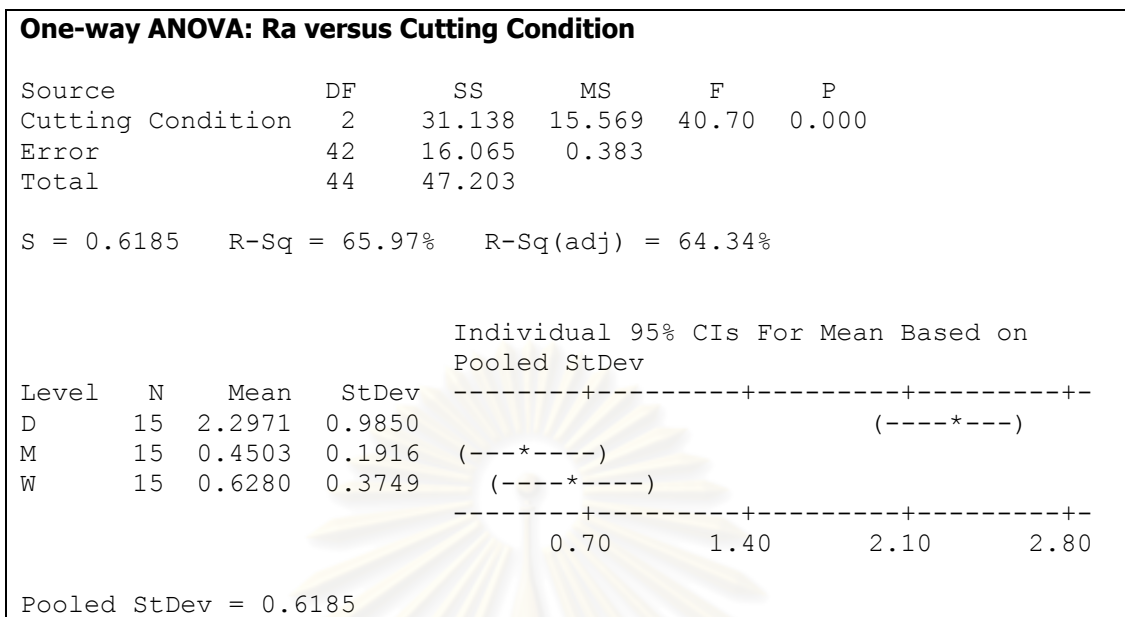
4.4.1 ความเรียบผิวของชิ้นงาน

ในการเปรียบเทียบผลการทดลองของความเรียบผิวของชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ นั้น สามารถอธิบายได้โดยตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งมีข้อสมมติฐานดังนี้

H_0 : เงื่อนไขการตัดไม่มีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

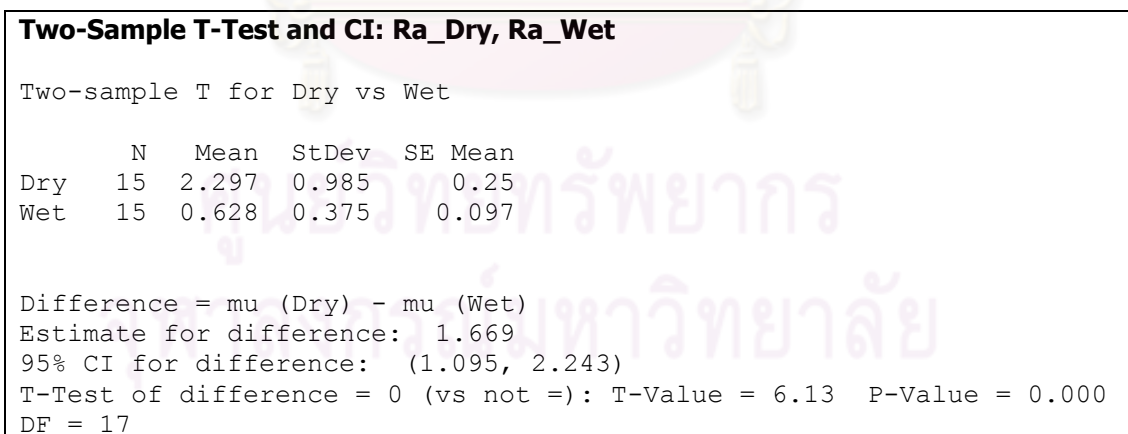
H_1 : เงื่อนไขการตัดมีผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

ตารางที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ



จากตารางที่ 4.14 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ จะมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ามีอย่างน้อยหนึ่งเงื่อนไขการตัดที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบความเรียบผิวของชิ้นงาน ดังนั้นเพื่อตรวจสอบว่าเงื่อนไขการตัดใดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องทำการทดสอบทางสถิติแบบ Two-Sample T-Test ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.15-4.16

ตารางที่ 4.15 Two-Sample T-Test ของเงื่อนไขการตัดแบบหนึ่งกับการตัดแบบเป็ยก



ตารางที่ 4.16 Two-Sample T-Test ของเงื่อนไขการตัดแบบแห้งกับการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น

Two-Sample T-Test and CI: Ra_Dry, Ra_Mist				
Two-sample T for Dry vs Mist				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Dry	15	2.297	0.985	0.25
Mist	15	0.450	0.192	0.049
Difference = mu (Dry) - mu (Mist)				
Estimate for difference: 1.847				
95% CI for difference: (1.294, 2.399)				
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 7.13 P-Value = 0.000				
DF = 15				

ตารางที่ 4.17 Two-Sample T-Test ของเงื่อนไขการตัดแบบเปียกกับการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น

Two-Sample T-Test and CI: Ra_Wet, Ra_Mist				
Two-sample T for Wet vs Mist				
	N	Mean	StDev	SE Mean
Wet	15	0.628	0.375	0.097
Mist	15	0.450	0.192	0.049
Difference = mu (Wet) - mu (Mist)				
Estimate for difference: 0.178				
95% CI for difference: (-0.049, 0.404)				
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 1.63 P-Value = 0.118				
DF = 20				

จากตารางที่ 4.15-4.17 สามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขการตัดแบบแห้งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการตัดแบบเปียกและการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็นต่อผลตอบความเรียบผิวของชิ้นงาน (P-Value < 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) และเงื่อนไขการตัดแบบเปียกกับการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็นไม่มีผลพอกที่สรุปได้ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบความเรียบผิวของชิ้นงาน

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น สามารถอธิบายอิทธิพลของสารหล่อเย็นที่มีต่อความเรียบผิวของชิ้นงานได้ว่า สารหล่อเย็นสามารถช่วยให้ความเรียบผิวของชิ้นงานในการกัดด้วยมีดกัดหวับลมีความเรียบผิวที่ดีกว่าการกัดแบบแห้ง โดยการพิจารณาจากค่าความเรียบผิวเฉลี่ยของการตัดแบบเปียกมีค่า 0.628 ไมโครเมตร, การตัดโดยการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็นมีค่า 0.450 ไมโครเมตร, และการตัดแบบแห้งมีค่า 2.297 ค่าไมโครเมตร เนื่องจากสารหล่อเย็นสามารถช่วยในการลดอุณหภูมิบริเวณที่ทำการตัดเฉือน ทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิในการตัดที่เหมาะสม [11,27] ส่งผลให้การสึกหรอของมีดกัดต่ำทำให้ความเรียบผิวของชิ้นงานสูงขึ้น และนอกจากนี้สารหล่อเย็นยังช่วยในการยืดอายุการใช้งานของมีดกัด ทำให้สามารถลดต้นทุนของมีดกัดลงได้ด้วย

ในขณะที่การรูปแบบการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นแบบเปียกและสเปรย์ของสารหล่อเย็นไม่มีผลพอที่จะสรุปได้ว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

4.4.2 ความสึกหรอของมีดกัด

ในการเปรียบเทียบผลการทดลองของความเรียบผิวของชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ นั้น สามารถอธิบายได้โดยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งมีข้อสมมติฐานดังนี้

H_0 : เงื่อนไขการตัดไม่มีผลต่อความสึกหรอของมีดกัด

H_1 : เงื่อนไขการตัดมีผลต่อความสึกหรอของมีดกัด

ตารางที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ

One-way ANOVA: Vb versus Cutting Condition					
Source	DF	SS	MS	F	P
Cutting Condition	2	0.014458	0.007229	19.06	0.000
Error	42	0.015933	0.000379		
Total	44	0.030391			

S = 0.01948 R-Sq = 47.57% R-Sq(adj) = 45.08%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
D	15	0.13467	0.02326
M	15	0.10000	0.01648
W	15	0.09400	0.01805

0.096 0.112 0.128 0.144

Pooled StDev = 0.01948

จากตารางที่ 4.18 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ จะมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ามีอย่างน้อยหนึ่งเงื่อนไขการตัดที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบความสึกหรอของมีดกัด ดังนั้นเพื่อตรวจสอบว่าเงื่อนไขการตัดใดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงต้องทำการทดสอบทางสถิติแบบ Two-Sample T-Test ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.19-4.21

ตารางที่ 4.19 Two-Sample T-Test ของเงื่อนไขการตัดแบบแห้งกับการตัดแบบเปียก

Two-Sample T-Test and CI: Vb_Dry, Vb_Wet

Two-sample T for Dry vs Wet

	N	Mean	StDev	SE Mean
Dry	15	0.1347	0.0233	0.0060
Wet	15	0.0940	0.0180	0.0047

Difference = mu (Dry) - mu (Wet)
 Estimate for difference: 0.04067
 95% CI for difference: (0.02504, 0.05629)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 5.35 P-Value = 0.000
 DF = 26

ตารางที่ 4.20 Two-Sample T-Test ของเงื่อนไขการตัดแบบแห้งกับการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น

Two-Sample T-Test and CI: Vb_Dry, Vb_Mist

Two-sample T for Dry vs Mist

	N	Mean	StDev	SE Mean
Dry	15	0.1347	0.0233	0.0060
Mist	15	0.1000	0.0165	0.0043

Difference = mu (Dry) - mu (Mist)
 Estimate for difference: 0.03467
 95% CI for difference: (0.01951, 0.04982)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 4.71 P-Value = 0.000
 DF = 25

ตารางที่ 4.21 Two-Sample T-Test ของเงื่อนไขการตัดแบบเปียกกับการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น

Two-Sample T-Test and CI: Vb_Wet, Vb_Mist

Two-sample T for Wet vs Mist

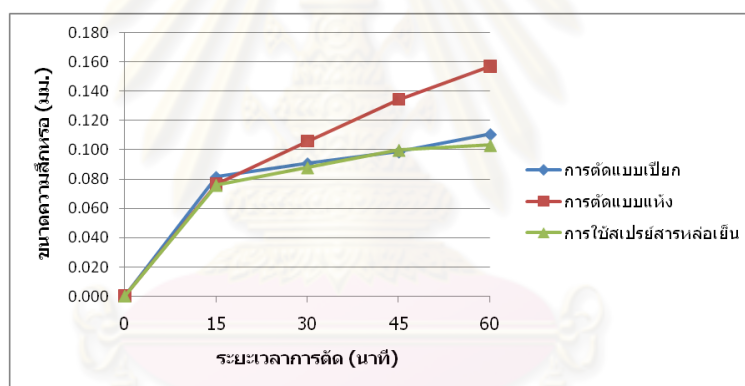
	N	Mean	StDev	SE Mean
Wet	15	0.0940	0.0180	0.0047
Mist	15	0.1000	0.0165	0.0043

Difference = mu (Wet) - mu (Mist)
 Estimate for difference: -0.00600
 95% CI for difference: (-0.01895, 0.00695)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -0.95 P-Value = 0.350
 DF = 27

จากตารางที่ 4.19-4.21 สามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขการตัดแบบแห้งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการตัดแบบเปียกและการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็นต่อผลตอบความสึกหรอของมีดกัด (P-Value < 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) และเงื่อนไขการตัดแบบเปียกกับการใช้สเปรย์ของ

สารหล่อเย็นไม่มีผลพอที่จะสรุปได้ว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบความสึกหรอของมีดกัด ($P\text{-Value} > 0.05$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)

จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวข้างต้น สามารถอธิบายอิทธิพลของสารหล่อเย็นที่มีต่อความสึกหรอของมีดกัดได้ว่า ในกรณีของการตัดแบบแห้ง การสึกหรอของมีดกัดมีค่าสูงเนื่องจากบริเวณที่ทำการตัดเฉือนเกิดความร้อนสูง ส่งผลให้ผิวเคลือบของมีดกัดเสียหายเร็วขึ้น จึงทำให้อัตราการสึกหรอของมีดกัดสูงขึ้น เมื่อมีสารหล่อเย็นเข้ามาช่วยในการตัดแบบเปียกและการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็นสามารถช่วยในการลดอุณหภูมิบริเวณที่ทำการตัดเฉือนลงได้ ทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิในการตัดที่เหมาะสม ทำส่งผลให้การสึกหรอของมีดกัดต่ำ ซึ่งสามารถพิจารณาจากค่าความสึกหรอของมีดกัดของการตัดแบบเปียกมีค่า 0.0940 มิลลิเมตร, การตัดโดยการใช้น้ำสเปรย์ของสารหล่อเย็นมีค่า 0.1000 มิลลิเมตร, และการตัดแบบแห้งมีค่า 0.1347 มิลลิเมตร ในขณะที่การรูปแบบการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นแบบเปียกและสเปรย์ของสารหล่อเย็นไม่มีผลพอที่จะสรุปได้ว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความสึกหรอของมีดกัด



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสึกหรอของมีดกัดเมื่อระยะเวลาเปลี่ยนแปลง

รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดของความสึกหรอของมีดกัดกับระยะเวลาการตัดที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อระยะเวลาในการตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสึกหรอของมีดกัดสูงขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ช่วง 15 นาทีแรกของการตัดจะมีอัตราความสึกหรอที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากมีดกัดยังเป็นมีดใหม่อยู่เมื่อเริ่มตัดจึงมีอัตราความสึกหรอที่ค่อนข้างจะสูง และเมื่อระยะเวลาที่ยาวนานขึ้นอัตราความสึกหรอก็ค่อยๆ ลดลง

เมื่อเปรียบเทียบความสึกหรอของการตัดแบบเปียก แบบแห้ง และการใช้น้ำสเปรย์สารหล่อเย็น จะพบว่าขนาดความสึกหรอของการตัดแบบแห้งจะสูงกว่าการตัดแบบเปียกและการใช้น้ำสเปรย์สารหล่อเย็น ในขณะที่การตัดแบบเปียกและการใช้น้ำสเปรย์สารหล่อเย็นจะไม่แตกต่างกันมากนัก สามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากผลของการหล่อเย็นและการลดความร้อนของสารหล่อเย็น จึงทำให้ช่วยลดความสึกหรอของมีดกัดลงได้

4.4.3 สัดส่วนแรงตัด Fx/Fz

ในการเปรียบเทียบผลการทดลองของความเรียบผิวของชิ้นงานด้วยเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ นั้น สามารถอธิบายได้โดยตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งมีข้อสมมติฐานดังนี้

H_0 : เงื่อนไขการตัดไม่มีผลต่อสัดส่วนแรงตัด

H_1 : เงื่อนไขการตัดมีผลต่อสัดส่วนแรงตัด

ตารางที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ

One-way ANOVA: Fx/Fz versus Cutting Condition					
Source	DF	SS	MS	F	P
Cutting Condition	2	0.0481	0.0241	1.85	0.169
Error	42	0.5454	0.0130		
Total	44	0.5936			

S = 0.1140 R-Sq = 8.11% R-Sq(adj) = 3.73%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	CI
D	15	0.5565	0.1143	(-----*-----)
M	15	0.4825	0.1119	(-----*-----)
W	15	0.4930	0.1156	(-----*-----)

0.450 0.500 0.550 0.600

Pooled StDev = 0.1140

จากตารางที่ 4.22 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ จะมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าไม่มีผลพอกที่สรุปได้ว่าปัจจัยทั้งสามแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสัดส่วนของแรงตัดไม่มีความแตกต่างกันในการตัดด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน นั่นคือ สัดส่วนของแรงตัดสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ได้ดีถึงแม้ว่าเงื่อนไขของการตัดจะเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสัดส่วนแรงตัดเป็นการนำแรงตัดในแนวแกนมาเป็นสัดส่วนกัน ดังนั้นจึงได้ค่าคงที่ค่าหนึ่ง ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดหรือความแข็งของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไป แต่สัดส่วนของแรงตัดก็จะไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นสัดส่วนแรงตัดจะยังคงใช้งานได้คืออยู่

4.5 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน

เนื่องจากตัวแบบสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติยังมีปัจจัยที่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงต้องมีการลดรูปสมการหรือตัดปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อผลตอบ เพื่อให้สมการมีความกระชับหรือมีความสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งผลตอบของสมการลดรูป

เปรียบเทียบกับสมการเต็มรูปของเงื่อนไขการตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการตัดโดยใช้สเปรย์สารหล่อเย็น ซึ่งเงื่อนไขการตัดแบบเปียกที่เลือกใช้คือ ความเร็วรอบ (n) 10,000 รอบต่อนาที (หรือความเร็วตัด (v) 189 เมตรต่อนาที), อัตราการป้อนตัด (f) 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด (d) 0.7 มิลลิเมตร การตัดแบบแห้งเลือกใช้ความเร็วรอบ (n) 12,000 รอบต่อนาที (หรือความเร็วตัด (v) 226 เมตรต่อนาที), อัตราการป้อนตัด (f) 0.04 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด (d) 0.7 มิลลิเมตร และการตัดโดยใช้สเปรย์สารหล่อเย็นเลือกใช้ ความเร็วรอบ (n) 10,000 รอบต่อนาที (หรือความเร็วตัด (v) 189 เมตรต่อนาที), อัตราการป้อนตัด (f) 0.06 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด (d) 0.7 มิลลิเมตรสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.23-4.25 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.23 ผลตอบของสมการเต็มรูปเปรียบเทียบกับสมการลดรูปของการตัดแบบเปียก

		Predicted	Actual	%Error	R-sq	R-sq(adj)
Ra	Full Model	0.841624	0.796100	-5.718427	95.92%	88.57%
	Reduced Model	0.828487	0.796100	-4.068258	95.11%	91.44%
Vb	Full Model	0.079999	0.080000	0.001379	96.89%	91.30%
	Reduced Model	0.079615	0.080000	0.481050	96.29%	92.58%
Fx/Fz	Full Model	0.589301	0.628574	6.247925	92.87%	80.05%
	Reduced Model	0.589296	0.628574	6.248688	89.53%	79.06%

ตารางที่ 4.24 ผลตอบของสมการเต็มรูปเปรียบเทียบกับสมการลดรูปของการตัดแบบแห้ง

		Predicted	Actual	%Error	R-sq	R-sq(adj)
Ra	Full Model	3.653768	3.579600	-2.071975	94.38%	84.27%
	Reduced Model	3.615219	3.579600	-0.995042	90.15%	82.76%
Vb	Full Model	0.107501	0.110000	2.271925	96.81%	91.07%
	Reduced Model	0.108461	0.110000	1.398727	96.60%	92.06%
Fx/Fz	Full Model	0.716051	0.744933	3.877157	95.82%	88.29%
	Reduced Model	0.749723	0.744933	-0.642993	93.84%	87.68%

ตารางที่ 4.25 ผลตอบของสมการเต็มรูปแบบเปรียบเทียบกับสมการลดรูปของการใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น

		Predicted	Actual	%Error	R-sq	R-sq(adj)
Ra	Full Model	0.461177	0.512600	10.031734	90.96%	74.68%
	Reduced Model	0.511712	0.512600	0.173234	90.92%	84.11%
Vb	Full Model	0.095000	0.090000	-5.555556	90.13%	76.97%
	Reduced Model	0.093846	0.090000	-4.273456	89.52%	79.05%
Fx/Fz	Full Model	0.640213	0.639212	-0.156668	97.90%	94.11%
	Reduced Model	0.640208	0.639212	-0.155779	97.13%	93.31%

จากตารางข้างต้น การพิจารณาเลือกใช้ตัวแบบสมการจะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดของค่าผลตอบที่มีค่าต่ำ ในกรณีที่ค่าความผิดพลาดที่ไม่แตกต่างกันจะพิจารณาจากค่า R-Sq(adj) ที่มีค่าสูงกว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทำให้ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบด้วยเงื่อนไขการตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการตัดโดยใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น ดังต่อไปนี้

การตัดแบบเปียก;

$$Ra = 7.36602 + (-0.00153319)n + (-79.6162)f + 6.64713d + (7.95281 \times 10^{-8})n^2 + 1122.09f^2 + (-6.27344)d^2 \quad (4-1)$$

$$Vb = 0.460833 + (-4.72917 \times 10^{-5})n + (-4.47917)f + (-0.127083)d + (2.08333 \times 10^{-9})n^2 + 27.0833f^2 + 0.0208333d^2 + (6.25 \times 10^{-5})nf + (6.25 \times 10^{-6})nd + 1.25fd \quad (4-2)$$

$$\frac{Fx}{Fz} = -0.676981 + (8.67777 \times 10^{-5})n + 19.6827f + 0.90327d + (-7.2142 \times 10^{-9})n^2 + (-192.369)f^2 + (-0.808887)d^2 + 0.000694188nf + (7.0442 \times 10^{-5})nd + (-11.5078)fd \quad (4-3)$$

การตัดแบบแห้ง;

$$Ra = -3.63284 + 0.0015166n + (-0.156587)f + (-11.3491)d + (-8.26832 \times 10^{-8})n^2 + (-478.207)f^2 + 0.00115131nd \quad (4-4)$$

$$Vb = 0.10774 + (3.71154 \times 10^{-5})n + (-7.24038)f + 0.10625d + (-1.73077 \times 10^{-9})n^2 + 13.9423f^2 + 0.00025nf + (-3.125 \times 10^{-5})nd + 5fd \quad (4-5)$$

$$\frac{Fx}{Fz} = 1.53162 + (-1.8314 \times 10^{-4})n + (-3.72638)f + (-1.28171)d + (5.97936 \times 10^{-9})n^2 + 0.790343d^2 + 0.00086259nf + (9.52019 \times 10^{-5})nd \quad (4-6)$$

การตัดโดยใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น;

$$Ra = 5.23502 + (-8.47808 \times 10^{-4})n + (-48.7825)f + (-0.153063)d + (4.26288 \times 10^{-8})n^2 + 559.351f^2 + 17.6563fd \quad (4-7)$$

$$Vb = 0.00206731 + (8.125 \times 10^{-6})n + (5.35096)f + (-0.176442)d + (-25.4808)f^2 + 0.182692d^2 + (-1.875 \times 10^{-4})nf + (-1.875)fd \quad (4-8)$$

$$\frac{Fx}{Fz} = -0.130481 + (-1.86709 \times 10^{-4})n + 27.3624f + 3.20225d + (1.36934 \times 10^{-8})n^2 + (-203.429)f^2 + (-0.821712)d^2 + (-1.50905 \times 10^{-4})nd + (-13.3891)fd \quad (4-9)$$

ผลการทดสอบทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองที่ส่งผลต่อผลตอบของความเรียบผิวชิ้นงาน, ความสึกหรอของมีดกัด, และแรงในระหว่างการตัด ของเงื่อนไขการตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการตัดโดยใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.26-4.28 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.26 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ ของการตัดแบบเปียก

	ความเรียบผิว	ความสึกหรอ	แรงตัด
ความเร็วรอบ (ความเร็วตัด)	มีผล	มีผล	ไม่มีผล
อัตราการป้อนตัด	มีผล	มีผล	มีผล
ความลึกตัด	มีผล	ไม่มีผล	มีผล

ตารางที่ 4.27 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ ของการตัดแบบแห้ง

	ความเรียบผิว	ความสึกหรอ	แรงตัด
ความเร็วรอบ (ความเร็วตัด)	มีผล	มีผล	มีผล
อัตราการป้อนตัด	มีผล	มีผล	มีผล
ความลึกตัด	ไม่มีผล	ไม่มีผล	มีผล

ตารางที่ 4.28 สรุปผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างผลตอบและปัจจัยต่างๆ ของการตัดโดยใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น

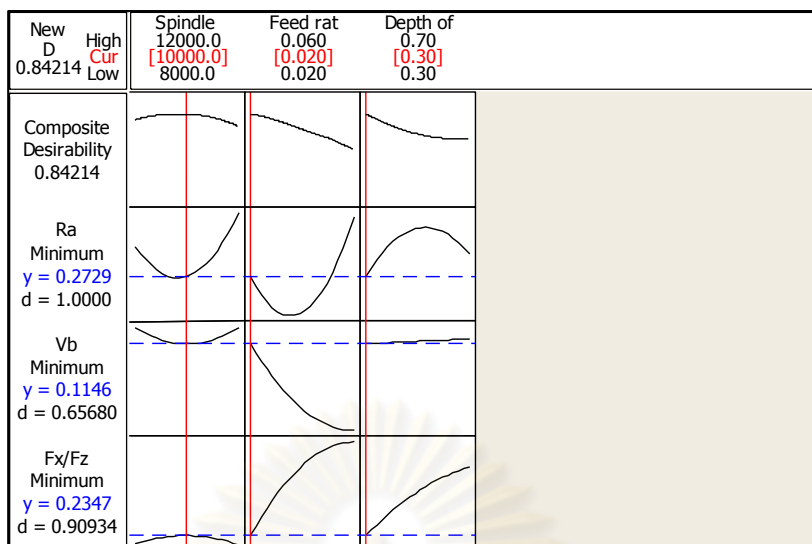
	ความเรียบผิว	ความสึกหรอ	แรงตัด
ความเร็วรอบ (ความเร็วตัด)	มีผล	ไม่มีผล	มีผล
อัตราการป้อนตัด	มีผล	มีผล	มีผล
ความลึกตัด	มีผล	มีผล	มีผล

4.6 เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม

ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ในการตัดด้วยเงื่อนไขแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการตัดโดยใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น ที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบที่ทำการศึกษา สามารถอธิบายได้โดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยและเป็นฟังก์ชันที่ใช้วัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability; D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ซึ่งถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ โดยในการพิจารณาเลือกเงื่อนไขการตัดจะเลือกจากเงื่อนไขที่ให้ค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสูงสุด และความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบในการตัดด้วยเงื่อนไขแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการตัดโดยใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น จะแสดงด้วยกราฟในภาคผนวก ค.

4.6.1 การตัดแบบเปียก

รูปที่ 4.31 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดกับผลตอบที่ทำการศึกษา ค่าความพึงพอใจรวมของผลตอบอยู่ที่ระดับ 84.21% ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่สูงพอสมควร ระดับความพึงพอใจดังกล่าวทำให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที (หรือความเร็วตัด 189 เมตรต่อนาที), อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร



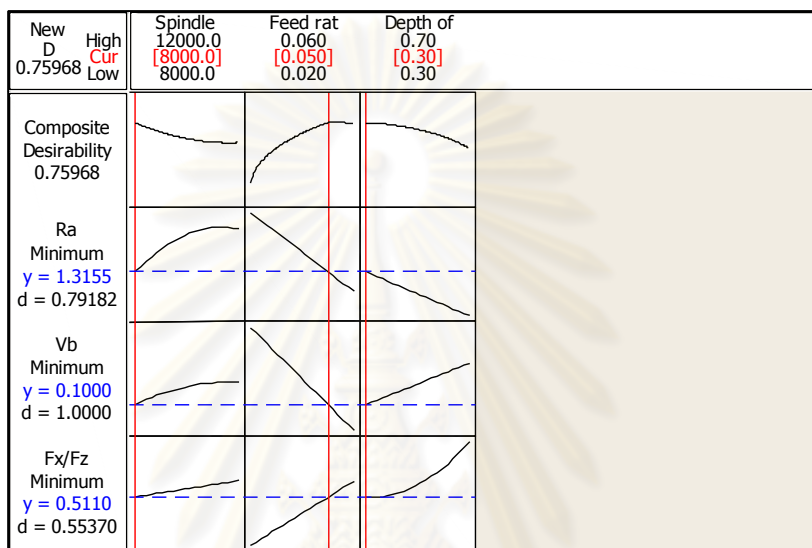
รูปที่ 4.31 Optimization plot ของเงื่อนไขการตัดแบบเปียก

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบที่ทำการศึกษ สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยได้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบหรือความเร็วตัด, อัตราการป้อนตัด, และความลึกตัดให้สูง จะทำให้ความเรียบผิวของชิ้นงานมีค่าสูงหรือชิ้นงานมีความหยาบผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีความเรียบเรียบผิวที่ว่า เมื่ออัตราการป้อนตัดสูงขึ้น จะทำให้ความหยาบผิวของชิ้นงานสูงขึ้น และที่ความเร็วรอบหรือความเร็วตัดสูงๆ จะทำให้อัตราการสึกหรอของมีดกัดสูงขึ้น เนื่องจากที่ความเร็วรอบหรือความเร็วตัดสูงจะเกิดความร้อนสูงบริเวณพื้นที่ตัดเฉือน ทำให้ผิวเคลือบของมีดกัดถูกทำลายไป ส่งผลให้เกิดการสึกหรอสูง

ในขณะที่ความลึกตัดไม่ส่งผลต่อความสึกหรอของมีดกัด และความเร็วรอบหรือความเร็วตัดไม่ส่งผลต่อสัดส่วนแรงตัด แต่อัตราการป้อนตัดและความลึกตัดที่สูงขึ้นจะทำให้สัดส่วนแรงตัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการป้อนตัดและความลึกตัดที่สูงจะทำให้พื้นที่การตัดเฉือนมีมากขึ้น จะทำให้เกิดแรงตัดในบริเวณดังกล่าวสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการป้อนตัดที่ต่ำจะทำให้ความสามารถในการระบายความร้อนของเศษโลหะไม่ดี ส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่สูงกว่าอัตราการป้อนตัดที่สูง เพราะอัตราการป้อนตัดสูงจะทำให้ขนาดของเศษโลหะมีขนาดใหญ่ทำให้การพาความร้อนออกจากบริเวณตัดเฉือนได้ดีกว่า [28] และรวมถึงอิทธิพลของสารหล่อเย็นที่ช่วยในการระบายความร้อนบริเวณพื้นที่ตัดเฉือนจึงทำให้อัตราการสึกหรอของมีดกัดลดลง และความสึกหรอที่สูงจะทำให้สัดส่วนแรงตัดมีค่าลดลง เนื่องจากแรงตัดที่นำมาสัดส่วนกันเป็นแรงตัดในแนวแกน X และแรงตัดในแนวแกน Z ซึ่งแรงตัดจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสึกหรอของมีดกัด ดังนั้นเมื่อความสึกหรอเพิ่มขึ้นก็จะทำให้แรงตัดเพิ่มตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงตัดในแนวแกน Z จะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่มากกว่าแรงตัดในแนวแกน X เพราะฉะนั้นเมื่อแรงตัดในแนวแกน Z เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่สูงกว่าแรงตัดในแนวแกน X จึงทำให้สัดส่วนของแรงตัดลดลง

4.6.2 การตัดแบบแห้ง

รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดกับผลตอบที่ทำการศึกษา ค่าความพึงพอใจรวมของผลตอบอยู่ที่ระดับ 75.97% ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ค่อนข้างจะสูง ณ ระดับความพึงพอใจดังกล่าวทำให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที (หรือความเร็วตัด 151 เมตรต่อนาที), อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร



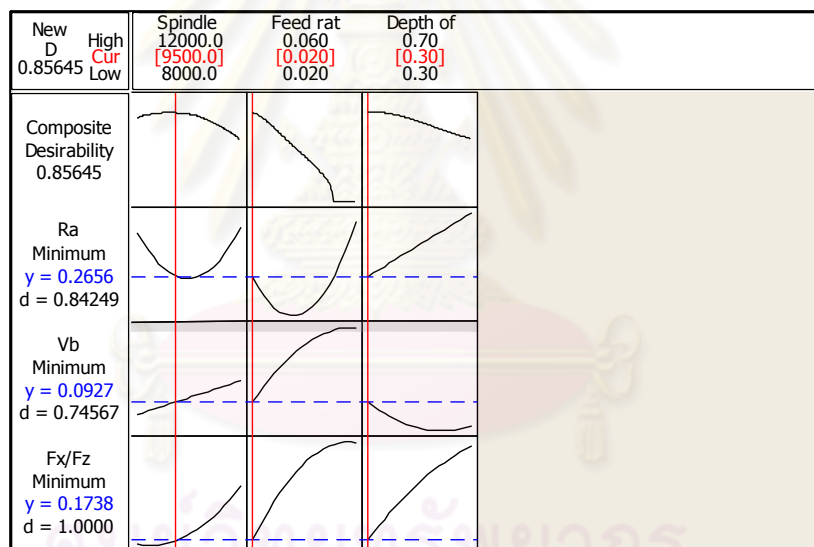
รูปที่ 4.32 Optimization plot ของเงื่อนไขการตัดแบบแห้ง

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบที่ทำการศึกษาสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยได้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วรอบหรือความเร็วตัดให้สูงจะทำให้ความเรียบผิวของชิ้นงานมีค่าสูงหรือชิ้นงานมีความหยาบผิวเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และที่ความเร็วรอบหรือความเร็วตัดสูงๆ จะทำให้อัตราการสึกหรอของมีดกัดสูงขึ้น เนื่องจากที่ความเร็วรอบหรือความเร็วตัดสูงจะเกิดความร้อนสูงบริเวณพื้นที่ตัดเฉือน ทำให้ผิวเคลือบของมีดกัดถูกทำลายไปส่งผลให้เกิดการสึกหรอสูง ในขณะที่เมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้นความเรียบผิวของชิ้นงานกลับลดลงหรือความหยาบผิวลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับทฤษฎีความเรียบเรียบผิวซึ่งได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ว่า ค่าความเรียบผิวของชิ้นงานที่ทำการขึ้นรูปด้วยมีดกัดหัวบอลจะมีอิทธิพลมากจากความสึกหรอของมีดกัดที่เรียกว่า Central wear [18] มากกว่าอัตราการป้อนตัด ซึ่งลักษณะการสึกหรอของมีดกัดหัวบอล แสดงดังรูปที่ 4.34 ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลตอบของความเรียบผิวควบคู่ไปกับความสึกหรอของมีดกัดที่ปัจจัยของอัตราการป้อนตัด พบว่าเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความสึกหรอของมีดกัดลดลง ดังนั้นเมื่อความสึกหรอลดลงจึงทำให้ได้ความเรียบผิวหรือความหยาบผิวของชิ้นงานลดลงตามไปด้วย ซึ่งสาเหตุของความสึกหรอของมีดกัดที่ลดลงเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้นได้อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้

ในขณะที่ความลึกตัดเพิ่มขึ้นจะทำให้ความเรียบผิวของชิ้นงานมีค่าลดลงหรือผิวชิ้นงานเรียบขึ้น เนื่องจากที่ความลึกตัดที่สูงกว่าจะเกิดความร้อนที่มากกว่าเพราะมีพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานสูงกว่า เมื่อความร้อนเกิดขึ้นสูงก็ส่งผลให้ชิ้นงานมีความอ่อนตัวทำให้การตัดเฉือนทำได้ง่าย จึงทำให้ได้ความเรียบผิวที่ดีกว่าที่ความลึกตัดต่ำ แต่ในขณะเดียวกัน ความลึกตัดที่สูงก็จะทำให้เกิดการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยและเมื่อความสึกหรอของมีดกัดสูงก็ทำให้สัดส่วนแรงตัดสูงขึ้นด้วยเช่นเดียวกับอัตราการป้อนตัดที่สูงขึ้น

4.6.3 การตัดโดยใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น

รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดกับผลตอบที่ทำการศึกษา ค่าความพึงพอใจรวมของผลตอบอยู่ที่ระดับ 85.65% ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่สูงพอสมควร ณ ระดับความพึงพอใจดังกล่าวทำให้ได้เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมคือ ความเร็วรอบ 9,500 รอบต่อนาที (หรือความเร็วตัด 179 เมตรต่อนาที), อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.33 Optimization plot ของเงื่อนไขการตัดโดยใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น



ก)

ข)

ค)

รูปที่ 4.34 ลักษณะการสึกหรอของมีดกัดด้วยเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ ก) การตัดแบบเปียก ข) การตัดแบบแห้ง และ ค) การใช้สเปร์ยสารหล่อเย็น

เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบที่ทำการศึกษสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยได้ว่า ปัจจัยต่างๆ จะส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานในลักษณะเช่นเดียวกับการตัดแบบเปียกซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากอิทธิพลของสารหล่อเย็น และอีกกรณีหนึ่งคือ เมื่อความลึกตัดเพิ่มขึ้นทำให้มีดกัดและชิ้นงานมีโอกาสในการสั่นมากขึ้น จึงทำให้ผิวชิ้นงานออกมาไม่ดี

ในขณะที่ความเร็รรอบหรือความเร็วตัดจะไม่มีอิทธิพลต่อความสึกหรอของมีดกัดและความสึกหรอของมีดกัดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนตัดสูงขึ้น เนื่องจากอัตราการป้อนตัดที่สูงจะทำให้พื้นที่การตัดเฉือนของมีดกัดกับชิ้นงานมีมากขึ้น จึงส่งผลให้ต้องใช้แรงในการตัดเฉือนสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้มีโอกาสของการสึกหรอสูงตามไปด้วย แต่ในขณะเดียวกัน เมื่อความลึกตัดสูงขึ้นจะทำให้ความสึกหรอของมีดกัดลดลงอันเป็นผลมาจากความสามารถในการระบายความร้อนของละอองสารหล่อเย็น ทำให้ความร้อนไม่สูงจนเกินไปส่งผลให้ความสึกหรอลดลง และเมื่อเพิ่มปัจจัยต่างๆ ของการตัดก็จะส่งผลให้สัดส่วนของแรงตัดสูงขึ้นด้วย ซึ่งเหตุผลได้อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้

4.7 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลอง

เมื่อได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมจากสมการที่ทำนายได้แก่ เงื่อนไขการตัดแบบเปียกคือ ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที (หรือความเร็วตัด 189 เมตรต่อนาที), อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร

การตัดแบบแห้งคือ ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที (หรือความเร็วตัด 151 เมตรต่อนาที), อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร,

การตัดโดยใช้สเปรย์สารหล่อเย็นคือ ความเร็วรอบ 9,500 รอบต่อนาที (หรือความเร็วตัด 179 เมตรต่อนาที), อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบและความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร นำเงื่อนไขดังกล่าวไปทำการตัดเพื่อยืนยันผลการทดลองโดยการทดลองซ้ำเงื่อนไขละ 5 การทดลอง ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.29-4.31

ตารางที่ 4.29 ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของการตัดแบบเปียก

การทดลองครั้งที่	Ra	Vb	Fx/Fz
1	0.2320	0.11	0.237429
2	0.2760	0.11	0.260542
3	0.2710	0.09	0.257453
4	0.2595	0.09	0.270100
5	0.2460	0.1	0.182382

ตารางที่ 4.30 ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของการตัดแบบแห้ง

การทดลองครั้งที่	Ra	Vb	Fx/Fz
1	1.3471	0.14	0.564196
2	1.6715	0.08	0.495411
3	1.4370	0.09	0.540749
4	1.1134	0.10	0.474523
5	1.2358	0.13	0.572394

ตารางที่ 4.31 ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของการตัดโดยใช้สเปรย์สารหล่อเย็น

การทดลองครั้งที่	Ra	Vb	Fx/Fz
1	0.2886	0.11	0.224045
2	0.2640	0.10	0.202979
3	0.2534	0.11	0.187847
4	0.2515	0.08	0.166651
5	0.2565	0.08	0.186610

จากการทดลองยืนยันผลของการทดลองตัดเพื่อยืนยันผลการทดลองเมื่อนำมาทดสอบทางสถิติด้วยผลตอบที่ได้จากสมการทำนาย ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.32 มาทดสอบ T-test ซึ่งค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ได้จากการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบที่ได้จากสมการทำนายจะต้องไม่มีความแตกต่างกัน นั่นคือต้องยอมรับสมมติฐานหลัก ด้วยนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ภายใต้สมมติฐานที่ว่า

H_0 : ค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ได้จากการทดลองไม่แตกต่างกับค่าของผลตอบจากสมการทำนาย

H_1 : ค่าเฉลี่ยของผลตอบที่ได้จากการทดลองแตกต่างกับค่าของผลตอบจากสมการทำนาย

ตารางที่ 4.32 ผลตอบของการทดลองด้วยเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของการตัดด้วยเงื่อนไขต่างๆ

	Ra	Vb	Fx/Fz
Wet	0.2729	0.11	0.234700
Dry	1.3155	0.10	0.511000
Mist	0.2656	0.09	0.173800

จากผลการทดสอบ T-test ผลลัพธ์แสดงได้ดังตารางที่ 4.33 ซึ่งจากตารางสามารถสรุปได้ว่า ค่าเฉลี่ยของผลตอบของปัจจัยการตัดของการตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น ที่ได้จากการทดลองไม่แตกต่างกับค่าของผลตอบที่ได้จากสมการทำนาย ที่ระดับนัยสำคัญ 95% และด้วยนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 เนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05

ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบด้วย T-test ของปัจจัยการตัดของการตัดด้วยเงื่อนไขต่างๆ

เงื่อนไขการตัด	ผลตอบ	N	Mean	StDev	SE Mean	T	P
การตัดแบบเปียก	Ra	5	0.2569	0.01809	0.00809	-1.98	0.119
	Vb	5	0.1000	0.0100	0.0045	-2.24	0.089
	Fx/Fz	5	0.2416	0.0352	0.0157	0.44	0.684
การตัดแบบแห้ง	Ra	5	1.3610	0.2118	0.0947	0.48	0.656
	Vb	5	0.1080	0.0259	0.0116	0.69	0.528
	Fx/Fz	5	0.5295	0.0429	0.0192	0.96	0.390
การใช้สเปรย์สารหล่อเย็น	Ra	5	0.2628	0.0152	0.0068	-0.41	0.701
	Vb	5	0.0960	0.0152	0.0068	0.88	0.426
	Fx/Fz	5	0.1936	0.0214	0.0096	2.08	0.106

ตารางที่ 4.34 ค่าความผิดพลาดของค่าพยากรณ์กับค่าจริงของผลตอบ

เงื่อนไขการตัด	ความเรียบผิว		% ความผิดพลาด	ความลึกหรือของมีดกัด		% ความผิดพลาด	สัดส่วนแรงตัด		% ความผิดพลาด
	ค่าพยากรณ์	ค่าจริง		ค่าพยากรณ์	ค่าจริง		ค่าพยากรณ์	ค่าจริง	
Wet	0.2729	0.2569	-6.23	0.11	0.1	-10.0	0.2347	0.2416	2.86
Dry	1.3155	1.3610	3.34	0.10	0.11	9.10	0.5110	0.5295	3.49
Mist	0.2656	0.2628	-1.07	0.09	0.1	7.30	0.1738	0.1936	10.2

ตารางที่ 4.34 แสดงค่าความผิดพลาดระหว่างค่าพยากรณ์กับค่าจริงที่ได้จากการทดลองตัด
ซ้ำด้วยเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ ซึ่งค่าจริงเป็นค่าเฉลี่ยของการตัดซ้ำจำนวน 5 การทดลอง พบว่า
ค่า % ค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างต่ำ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดจากการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น ที่มีผลต่อความสึกหรอของใบมีดกัดหัวบอล ความเรียบผิวชิ้นงาน และแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัด และศึกษาหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกัดเหล็กกล้าด้วยใบมีดกัดหัวบอลกับการใช้สารหล่อเย็นโดยการใช้วิธีการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบด้วยเทคนิคบ็อกซ์-เบห์นเคน

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการตัดโดยการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น ซึ่งทำการศึกษา 3 รูปแบบ คือ การตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น ที่มีอิทธิพลต่อความสึกหรอของใบมีดกัด ความเรียบผิวของชิ้นงาน และแรงตัด โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ความเร็วรอบในการตัด, อัตราการป้อนตัด, และความลึกตัด สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อผลตอบความสึกหรอของมีดกัด, ความเรียบผิวชิ้นงาน, และแรงตัด สำหรับการตัดด้วยเงื่อนไขการตัดทั้ง 3 รูปแบบ คือ การตัดแบบเปียก, การตัดแบบแห้ง, และการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น คือ อัตราการป้อนตัดมีอิทธิพลสูงสุด รองลงมาคือ ความลึกตัด และความเร็วรอบตามลำดับ โดยการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นจะช่วยในการยืดอายุการใช้งานของมีดกัดให้ยาวนานขึ้น

การตัดแบบเปียกและการใช้สเปรย์สารหล่อเย็นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลตอบที่ทำการศึกษา แต่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับการตัดแบบแห้ง ด้วยระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 และที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากการใช้วิธีการพื้นผิวผลตอบในการสร้างสมการกำลังสองของความเรียบผิวชิ้นงาน, ความสึกหรอของมีดกัด, และสัดส่วนแรงตัด พบว่า สมการมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปพยากรณ์ผลตอบดังกล่าวได้ด้วยระดับความเชื่อมั่น 95% และได้เงื่อนไขการตัดที่สภาวะเหมาะสมของเงื่อนไขการตัดแบบเปียก คือ ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร การตัดแบบแห้ง คือ ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.05 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร และการใช้สเปรย์สารหล่อเย็น คือ ความเร็วรอบ 9,500 รอบต่อนาที, อัตราการป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ, และความลึกตัด 0.3 มิลลิเมตร โดยการพิจารณาจากเงื่อนไขที่มีค่าระดับความพึงพอใจรวมสูงสุดของผลตอบในแต่ละเงื่อนไขการตัด ซึ่งเงื่อนไขการตัดแบบเปียกมีค่าความพึงพอใจรวมของผลตอบอยู่ที่ระดับ 84.21% การตัดแบบแห้งมีค่าความพึงพอใจรวมของผล

ตอบอยู่ที่ระดับ 75.97% และการใช้สเปร์ยสารหล่อเย็นมีค่าความพึงพอใจรวมของผลตอบอยู่ที่ระดับ 85.65%

จากผลการวิเคราะห์ทางสถิติ สามารถอธิบายอิทธิพลของสารหล่อเย็นที่มีต่อความเรียบผิวของชิ้นงานได้ว่า สารหล่อเย็นสามารถช่วยให้ความเรียบผิวของชิ้นงานในการกัดด้วยมีดกัดหัวบอลมีความเรียบผิวที่ดีกว่าการกัดแบบแห้ง โดยการพิจารณาจากค่าความเรียบผิวเฉลี่ยของการตัดแบบเปียกมีค่า 0.628 ไมโครเมตร, การตัดโดยใช้สเปร์ยของสารหล่อเย็นมีค่า 0.450 ไมโครเมตร, และการตัดแบบแห้งมีค่า 2.297 ค่าไมโครเมตร เนื่องจากสารหล่อเย็นสามารถช่วยในการลดอุณหภูมิบริเวณที่ทำการตัดเฉือน ทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิในการตัดที่เหมาะสมส่งผลให้การสึกหรอของมีดกัดต่ำทำให้ความเรียบผิวของชิ้นงานสูงขึ้น และนอกจากนี้สารหล่อเย็นยังช่วยในการยืดอายุการใช้งานของมีดกัด ทำให้สามารถลดต้นทุนของมีดกัดลงได้ด้วย ในขณะที่การรูปแบบการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นแบบเปียกและสเปร์ยของสารหล่อเย็นไม่มีผลพอที่จะสรุปได้ว่ามีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

การเลือกใช้วัสดุส่วนแรงตัดมาเป็นปัจจัยในการศึกษาเนื่องจากวัสดุส่วนแรงตัดยังคงสามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ถึงแม้ว่าเงื่อนไขการทดลองจะเปลี่ยนแปลงไปหรือความแข็งของชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงไป และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของวัสดุส่วนแรงตัดต่อเงื่อนไขการตัดแบบต่างๆ พบว่าถึงแม้ว่าเงื่อนไขการตัดจะเปลี่ยนแปลงไปแต่วัสดุของแรงตัดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และการเลือกใช้แรงตัดในแนวแกน X กับแรงตัดในแนวแกน Z มาใช้ในการศึกษา เนื่องจากแรงตัดในแนวแกนทั้งสองเป็นแรงตัดหลักที่ส่งผลต่อความเรียบของชิ้นงานโดยตรง

ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ความแปรปรวนของเงื่อนไขการตัดแบบเปียกกับการใช้สเปร์ยของสารหล่อเย็นจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อผลตอบที่ทำการศึกษา แต่มีพิจารณาถึงการทำงานจริงพบว่า การใช้สเปร์ยสารหล่อเย็นจะก่อให้เกิดมลภาวะในพื้นที่ทำงานที่สูงกว่าการตัดแบบเปียก เนื่องจากสเปร์ยของสารหล่อเย็นจะฟุ้งกระจายไปทั่วพื้นที่ทำงาน

เนื่องจากการทดลองเป็นการตัดชิ้นงานจนกว่ามีดกัดจะสึกหรอถึงค่าที่กำหนด ซึ่งเป็นวิธีที่ทำให้ง่ายในทางปฏิบัติ โดยการตัดชิ้นงานจนมีดกัดสึกหรอถึงค่าที่กำหนดหรือเกิดการแตกหัก ก็ จะทำการเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด เมื่อทำการทดลองตัดจนครบจำนวนการออกแบบการทดลอง แล้วทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของความเรียบผิว R_a กับ R_z เมื่อได้ความสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยจึงกำหนดค่าความเรียบผิวที่ต้องการ เพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับนำไปวิเคราะห์ผล ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะทำให้เสียเวลากว่าการกำหนดความเรียบผิวก่อน แล้วทำการทดลองตัด

ชิ้นงานเมื่อได้ค่าความเรียบผิวที่ต้องการแล้วจึงเปลี่ยนเงื่อนไขการตัด และนำผลที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์ผลต่อ ซึ่งหลักการดังกล่าวนี้สามารถช่วยลดเวลาในการทดลองลงได้

5.3 ข้อจำกัดและอุปสรรคในงานวิจัย

1. เนื่องจากมีดกัดห้วงบอลและชิ้นงานที่ใช้ทดลองนั้นมีราคาต่อหน่วยค่อนข้างที่จะสูงมาก ทำให้เงื่อนไขของการตัดที่เลือกมาในงานวิจัยนี้จึงอาจจะไม่ครอบคลุม
2. เงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่วิเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้ เป็นสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกัดเหล็กกล้าคาร์บอน S50C ด้วยมีดกัดห้วงบอลชนิดเคลือบผิวด้วยไทเทเนียม อลูมิเนียมไนไตรด์เท่านั้น หากมีการเปลี่ยนแปลงชนิดของมีดกัดหรือผิวเคลือบของมีดกัด จำเป็นต้องมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกัดใหม่ เนื่องจากชนิดของมีดกัด และการเคลือบผิวของมีดกัด จะมีความแตกต่างกันในด้านคุณสมบัติ ทำให้สภาวะของการกัดงานต่างกันออกไป ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อผลตอบที่ต้องการศึกษา

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ปัญหาของการปรับตั้งค่าเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง เนื่องจากเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่ง เซ็นเตอร์มีผู้ใช้งานหลายคนทำให้ต้องมีการปรับเปลี่ยนค่าในแต่ละครั้งแตกต่างกัน ดังนั้นในการเริ่มใช้งานใหม่ทุกครั้งควรมีการตรวจสอบการปรับตั้งค่าต่างๆ ว่าถูกต้องตามเงื่อนไขการทำงานหรือไม่ เพราะถ้าไม่มีการตรวจสอบจะทำให้เกิดความผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนของค่าวัดต่างๆ ได้
2. ในการวัดสัญญาณควรมีการลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นโดยการต่อสายดิน
3. เนื่องจากเงื่อนไขการตัดโดยการใช้สเปรย์หล่อเย็นจะมีละอองของสารหล่อเย็นฟุ้งกระจายไปทั่วพื้นที่ทำงาน ซึ่งละอองดังกล่าวเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นในการปฏิบัติงานด้วยเงื่อนไขดังกล่าว ควรมีการสวมหน้ากากทุกครั้งเพื่อป้องกันละอองของสารหล่อเย็น
4. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับ การกัดชิ้นงานว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร และส่งผลอย่างไรต่อความเรียบผิวของชิ้นงาน ความลึกหรือของมีดกัด และแรงตัดที่เกิดขึ้น ซึ่งการทดลองเป็นการกำหนดค่าความลึกหรือของมีดกัดไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร ซึ่งในด้านอุตสาหกรรมแล้วจะให้ความสำคัญกับอายุการใช้งานของมีดกัดมากกว่า ดังนั้น ในการทดลองจึงควรกำหนดอายุการใช้งานของมีดกัดแทนการกำหนดเป็นความลึกหรือของมีดกัด เพื่อให้มีความสอดคล้องกับการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม

5. เพื่อเป็นการสื่อความหมายที่เฉพาะเจาะจงความเร็วรอบของการทดลองควรเปลี่ยนเปลี่ยนเป็นความเร็วตัด ซึ่งสามารถเปลี่ยนจากความเร็วยกให้อยู่ในรอบของความเร็วดัดได้ด้วยสมการที่ 2-1
6. แนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป ควรทดลองในการตัดวัสดุชิ้นงานอื่นๆ เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น หรือทดลองเปลี่ยนวัสดุหรือรูปแบบของมีดกัด เพื่อเปรียบเทียบกับสมการการทำนายที่ได้จากการทดลอง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., and Wakabayashi, T. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. CIRP Annals 53 (2008) : 511-537.
- [2] Grzesik, W. Advanced Machining Processes of Metallic Materials. 1st Edition. Elsevier, 2006.
- [3] Tangjitsicharoen, S. In-Process Investigation of Turning Process Applied With and Without Cutting Fluid. Journal of mechanical engineering 6 (2009) : 85-102.
- [4] Thepsonthi, T., Hamdi, M., and Mitsui, K. Investigation into Minimal-Cutting-Fluid Application in High-Speed Milling of Hardened Steel Using Carbide Mills. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009) : 156–162.
- [5] ปิยะ ศิริธรรมปิติ. การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงที่เย็นที่โดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.
- [6] Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J. W., and Wakabayashi, T. Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. CIRP Annals 53 (2008) : 511-537.
- [7] Dhar, N.R., Kamruzzaman, M., and Ahmed, M. Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Tool Wear and Surface Roughness in Turning AISI-4340 Steel. Journal of Material Processing Technology 172 (2006) : 299-304.
- [8] Dhar, N.R., Islam, M. W., Isla, S., and Mithu, M. A. H. The Influence of Minimum Quantity of Lubrication (MQL) on Cutting Temperature, Chip and Dimensional Accuracy in Turning AISI-4340 Steel. Journal of Material Processing Technology 171 (2006) : 93-99.
- [9] Kelly, J.F., and Cotterell, M.G. Minimal Lubrication Machining of Aluminium Alloys. Journal of Material Processing Technology 120 (2002) : 327-334.
- [10] Seah, K.H.W., Li, X., and Lee, K.S. The Effect of Applying Coolant on Tool Wear in Metal Machining. Journal of Material Processing Technology 48 (1995) : 495-501.
- [11] สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ. เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมการผลิตขั้นสูง. 2551.
- [12] Groover, M. P. Fundamentals of Modern Manufacturing. 2nd Edition. USA : John Wiley & Son, 2004.
- [13] 7-Leaders Corp. End mills, Drills, Reamers Solid Carbide Cutting Tools Catalog.

2007/2008.

- [14] Juneja, B. L., and Sekhon, G. S. Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tool. 1st Edition. India : Wiley Eastern, 1987.
- [15] ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [16] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ท็อป, 2545.
- [17] ภัทรสินี ภัทรโกศล. สถิติเพื่อการวิจัยทางวิทยาศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [18] Dolinšek, S., Šuštaršič, B., and Kopac, J. Wear Mechanisms of Cutting Tools in High-Speed Cutting Processes. Wear 250 (2001) : 349-356.
- [19] Kalpakjian, S., and Schmid, S. Manufacturing Engineering and Technology. 5th Edition. Singapore : Pearson Prentice Hall, 2006.
- [20] Ozcelik, B., and Bayaramoglu, M. The Statistical Modeling of Surface Roughness in High-Speed Flat End Milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) : 1395–1402.
- [21] Ginta, T. L., Amin, A. K. M. N., Radzi, H. C. D. M., and Lajis, M.A. Tool Life Prediction by Response Surface Methodology in End Milling Titanium Alloy Ti-6Al-4V Using Uncoated WC-Co Inserts. European Journal of Scientific Research 28 (2009) : 533-541.
- [22] Davidson, M. J., Balasubramanian, K., and Tagore, G.R.N. Surface roughness prediction of flow-formed AA6061 alloy by design of experiments. Journal of Materials Processing 202 (2008) : 41-46.
- [23] Wang, X., and Feng, C.X. Development of Empirical Models for Surface Roughness Prediction in Finish Turning. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 20 (2002) : 348-356.
- [24] Kadirgama, K., Abou-El-Hossein, K. A., Mohammad, B., and Habeeb, H. Statistical model to determine surface roughness when milling hastelloy C-22HS. Journal of Mechanical Science and Technology 21 (2007) : 1651-1655.
- [25] Noordin, M. Y., Venkatesh, V. C., Sharif, S., Elting, S., and Abdulah, A. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide

- tools when turning AISI 1045 steel. Journal of Material Processing Technology 145 (2004) : 46–58.
- [26] Abou-El-Hossein, K. A., Kadirgama, K., Hamdi, M., and Benyunis, K. Y. Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel. Journal of Material Processing Technology 182 (2007) : 241–247.
- [27] Khaider, B., Mohamed, A. Y., Tarek, M., and Jean-Francois, R. Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials 28 (2010) : 349–361.
- [28] Tangjitsicharoen, S., Rungruang, C., and Laiaddee, D. Monitoring of Dry Cutting and Applications of Cutting Fluid for Ball End Milling. Journal of Industrial Engineering & Management System 9 (2010) : 242–250.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลองที่เงื่อนไขของการตัดต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงื่อนไขการตัดแบบเปียก

Run ที่ 1

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.02_0.5_Wet_0	0.0855	0.9855	0	18.02	3.91	14.11
10000_0.02_0.5_Wet_15	0.3033	1.672	0.07	29.64	3.77	46.28
10000_0.02_0.5_Wet_30	0.3011	2.6808	0.09	28.02	4.06	47.00
10000_0.02_0.5_Wet_45	0.3783	2.3448	0.11	37.20	5.23	66.42
10000_0.02_0.5_Wet_60	0.504	2.8408	0.12	38.68	5.40	76.00
10000_0.02_0.5_Wet_75	0.6729	6.0864	0.12	46.60	7.55	93.42
10000_0.02_0.5_Wet_90	1.0364	6.9376	0.13	47.03	6.98	94.08
10000_0.02_0.5_Wet_105	1.2917	8.7096	0.13	52.49	7.92	103.82
10000_0.02_0.5_Wet_120	1.573	13.1904	0.14	57.22	8.88	113.56
10000_0.02_0.5_Wet_135	1.8596	11.1	0.15	59.58	8.35	123.01
10000_0.02_0.5_Wet_150	2.1466	11.848	0.17	59.61	7.95	127.27
10000_0.02_0.5_Wet_165	2.1749	11.6632	0.22	61.24	8.46	134.95

Run ที่ 2

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.01_0.5_Wet_0	0.0736	0.792	0	13.68	2.70	13.13
8000_0.01_0.5_Wet_15	0.2243	1.5808	0.11	16.56	1.11	33.33
8000_0.01_0.5_Wet_30	0.276	1.7144	0.11	16.30	1.68	35.07
8000_0.01_0.5_Wet_45	0.6561	5.5056	0.12	16.28	1.72	38.43
8000_0.01_0.5_Wet_60	0.6856	4.8024	0.13	18.85	1.25	50.07
8000_0.01_0.5_Wet_75	0.8532	6.3256	0.15	20.47	1.05	56.66
8000_0.01_0.5_Wet_90	1.0985	7.1944	0.15	21.57	0.97	62.55
8000_0.01_0.5_Wet_105	1.6783	12.0672	0.17	23.86	0.86	70.55
8000_0.01_0.5_Wet_120	2.306	16.3448	0.18	30.75	1.85	83.09
8000_0.01_0.5_Wet_135	3.0755	18.4504	0.19	60.47	7.67	131.71
8000_0.01_0.5_Wet_150	3.2366	19.3192	0.2	88.27	18.57	177.76

Run ที่ 3

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.03_0.3_Wet_0	0.1199	0.9488	0	21.39	3.16	16.53
10000_0.03_0.3_Wet_15	0.4615	2.4048	0.09	32.53	3.37	49.59
10000_0.03_0.3_Wet_30	0.5142	2.9672	0.09	37.63	3.38	67.35
10000_0.03_0.3_Wet_45	0.6659	4.0304	0.1	51.45	4.47	95.03
10000_0.03_0.3_Wet_60	1.0602	8.4528	0.1	60.07	5.61	115.08
10000_0.03_0.3_Wet_75	1.55	12.3384	0.11	64.70	7.51	129.47
10000_0.03_0.3_Wet_90	2.1531	14.2744	0.14	70.73	8.15	145.08
10000_0.03_0.3_Wet_105	2.9037	20.8136	0.15	69.59	7.10	149.65
10000_0.03_0.3_Wet_120	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 4

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.03_0.5_Wet_0	0.2446	1.4576	0	20.01	3.66	15.09
8000_0.05_0.5_Wet_15	0.6929	4.3256	0.08	39.53	4.63	65.18
8000_0.03_0.5_Wet_30	0.9658	5.4144	0.09	40.87	6.00	68.64
8000_0.03_0.5_Wet_45	1.1771	7.2632	0.09	49.78	7.08	90.08
8000_0.05_0.5_Wet_60	1.5221	10.7048	0.1	65.09	3.83	129.34
8000_0.03_0.5_Wet_75	1.9903	16.8872	0.1	67.95	5.40	141.16
8000_0.03_0.5_Wet_90	2.2905	19.1408	0.11	73.31	6.26	151.87
8000_0.05_0.5_Wet_105	2.6149	14.1344	0.12	78.31	7.78	164.81
8000_0.03_0.5_Wet_120	3.1527	21.2016	0.14	86.17	11.19	186.76
8000_0.03_0.5_Wet_135	3.1749	20.9736	0.16	95.22	14.04	213.51
8000_0.05_0.5_Wet_150	3.3593	22.8104	0.21	99.20	13.24	224.67

Run ที่ 5

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.02_0.7_Wet_0	0.0997	0.728	0	19.44	5.42	16.59
8000_0.02_0.7_Wet_15	0.3631	2.908	0.09	31.36	5.87	50.59
8000_0.02_0.7_Wet_30	0.4402	3.5912	0.09	60.03	1.60	113.64
8000_0.02_0.7_Wet_45	0.7629	5.8248	0.11	63.10	4.03	126.89
8000_0.02_0.7_Wet_60	1.2228	9.8672	0.16	68.65	4.60	144.96
8000_0.02_0.7_Wet_75	2.0348	17.9008	0.21	74.74	5.19	164.77

Run ที่ 6

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.03_0.5_Wet_0	0.2547	1.5176	0	20.65	3.65	16.17
12000_0.03_0.5_Wet_15	0.8139	6.1064	0.08	35.62	4.37	55.29
12000_0.03_0.5_Wet_30	1.2221	11.7112	0.09	46.11	3.49	78.01
12000_0.03_0.5_Wet_45	1.5139	12.936	0.1	52.07	3.40	94.25
12000_0.03_0.5_Wet_60	2.0452	17.6072	0.11	59.07	4.57	109.43
12000_0.03_0.5_Wet_75	2.2893	18.244	0.11	69.54	6.49	133.88
12000_0.03_0.5_Wet_90	2.7371	19.5504	0.13	78.75	10.52	152.00
12000_0.03_0.5_Wet_105	3.0402	22.888	0.14	83.86	10.86	164.06
12000_0.03_0.5_Wet_120	-	-	chipping	-	-	-

Run ที่ 7

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.01_0.7_Wet_0	0.0839	0.7464	0	13.00	3.95	9.78
10000_0.01_0.7_Wet_15	0.2583	3.4416	0.07	25.19	2.87	46.34
10000_0.01_0.7_Wet_30	0.3017	2.3704	0.08	28.45	3.10	61.31
10000_0.01_0.7_Wet_45	0.4092	2.7432	0.08	40.61	1.77	87.02
10000_0.01_0.7_Wet_60	0.5397	3.5552	0.11	46.98	3.06	98.46
10000_0.01_0.7_Wet_75	0.7393	5.8672	0.13	56.67	5.00	116.64
10000_0.01_0.7_Wet_90	1.127	6.8088	0.15	63.12	6.03	130.61
10000_0.01_0.7_Wet_105	2.3347	17.6168	0.22	68.97	6.81	140.29

Run ที่ 8

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.02_0.7_Wet_0	0.1134	0.808	0	17.43	5.23	14.01
12000_0.02_0.7_Wet_15	0.1843	1.3256	0.09	31.15	4.69	45.37
12000_0.02_0.7_Wet_30	0.3443	2.5512	0.1	36.34	5.60	57.43
12000_0.02_0.7_Wet_45	0.5948	4.0552	0.11	43.52	6.48	72.05
12000_0.02_0.7_Wet_60	0.784	6.0912	0.11	52.45	7.61	89.03
12000_0.02_0.7_Wet_75	1.3653	7.5232	0.11	52.95	7.42	94.45
12000_0.02_0.7_Wet_90	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 9

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.02_0.3_Wet_0	0.0782	1.1048	0	10.17	1.28	10.09
12000_0.02_0.3_Wet_15	0.2224	2.1344	0.08	21.84	0.56	45.48
12000_0.02_0.3_Wet_30	0.354	2.3608	0.09	21.64	1.76	46.35
12000_0.02_0.3_Wet_45	0.2978	2.9624	0.09	25.46	2.19	55.82
12000_0.02_0.3_Wet_60	0.668	6.1816	0.09	35.23	2.72	79.21
12000_0.02_0.3_Wet_75	1.0788	7.3064	0.1	39.22	1.89	93.42
12000_0.02_0.3_Wet_90	1.1742	9.4936	0.11	34.89	0.15	85.36
12000_0.02_0.3_Wet_105	1.6845	12.836	0.13	37.91	0.75	101.07
12000_0.02_0.3_Wet_120	1.7159	12.6168	0.13	39.38	1.04	109.91
12000_0.02_0.3_Wet_135	1.9534	12.764	0.13	40.15	1.92	118.91
12000_0.02_0.3_Wet_150	2.3795	16.2232	0.17	41.23	3.03	124.74
12000_0.02_0.3_Wet_165	2.4309	17.4336	0.24	53.40	8.92	143.03

Run ที่ 10

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.01_0.3_Wet_0	0.062	0.5424	0	9.24	0.89	18.38
10000_0.01_0.3_Wet_15	0.2066	1.6456	0.07	14.34	0.68	63.54
10000_0.01_0.3_Wet_30	0.2133	2.2448	0.09	15.32	0.62	73.13
10000_0.01_0.3_Wet_45	0.3316	3.864	0.1	15.91	0.29	81.43
10000_0.01_0.3_Wet_60	0.3641	2.7376	0.12	18.25	0.05	92.81
10000_0.01_0.3_Wet_75	0.4778	6.6552	0.13	17.84	0.01	93.62
10000_0.01_0.3_Wet_90	0.6311	5.9408	0.14	19.54	0.07	102.36
10000_0.01_0.3_Wet_105	1.532	14.312	0.14	19.70	1.00	102.61
10000_0.01_0.3_Wet_120	1.7323	17.4128	0.15	22.14	1.40	119.44
10000_0.01_0.3_Wet_135	2.2578	18.4744	0.19	34.72	0.38	162.65
10000_0.01_0.3_Wet_150	2.8666	21.496	0.45	60.58	6.93	244.04

Run ที่ 11

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.01_0.5_Wet_0	0.1084	0.9296	0	10.00	1.83	9.60
12000_0.01_0.5_Wet_15	0.2595	2.0024	0.09	14.98	1.91	35.84
12000_0.01_0.5_Wet_30	0.3367	2.88	0.1	15.66	1.58	47.85
12000_0.01_0.5_Wet_45	1.1319	10.7224	0.11	16.32	1.23	52.24
12000_0.01_0.5_Wet_60	1.4245	9.208	0.11	17.29	0.99	55.48
12000_0.01_0.5_Wet_75	2.5505	18.6284	0.45	61.40	13.26	129.84

Run ที่ 12

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.02_0.5_Wet_0	0.0784	0.9408	0	15.16	2.25	12.29
10000_0.02_0.5_Wet_15	0.3035	1.976	0.07	21.84	0.56	45.48
10000_0.02_0.5_Wet_30	0.3486	2.2432	0.07	41.64	1.63	75.37
10000_0.02_0.5_Wet_45	0.4054	2.6544	0.08	44.11	2.39	80.99
10000_0.02_0.5_Wet_60	0.5031	3.5592	0.08	53.52	3.00	104.83
10000_0.02_0.5_Wet_75	0.8974	6.6648	0.1	60.24	6.23	114.45
10000_0.02_0.5_Wet_90	1.5915	11.928	0.11	62.35	6.95	132.33
10000_0.02_0.5_Wet_105	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 13

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.03_0.7_Wet_0	0.0838	0.5976	0	26.58	5.17	22.39
10000_0.03_0.7_Wet_15	0.2376	1.4816	0.09	32.16	7.80	37.43
10000_0.03_0.7_Wet_30	0.3411	2.1984	0.11	35.81	7.25	51.71
10000_0.03_0.7_Wet_45	0.7961	5.8816	0.11	60.01	9.40	95.47
10000_0.03_0.7_Wet_60	1.1873	8.2136	0.12	66.00	10.24	111.78
10000_0.03_0.7_Wet_75	1.5428	11.76	0.12	71.47	11.63	130.64
10000_0.03_0.7_Wet_90	1.6858	11.5136	0.16	78.02	12.96	144.00
10000_0.03_0.7_Wet_105	2.6536	19.4256	0.17	82.98	14.19	162.26
10000_0.03_0.7_Wet_120	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 14

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.02_0.5_Wet_0	0.0951	0.7288	0	17.68	2.70	17.23
10000_0.02_0.5_Wet_15	0.2218	1.768	0.07	26.79	3.36	40.62
10000_0.02_0.5_Wet_30	0.234	1.792	0.08	39.93	4.05	64.63
10000_0.02_0.5_Wet_45	0.2747	2.42	0.09	44.87	5.06	75.13
10000_0.02_0.5_Wet_60	0.2977	1.9224	0.12	54.81	7.61	95.18
10000_0.02_0.5_Wet_75	0.7244	6.3352	0.14	68.07	9.49	130.79
10000_0.02_0.5_Wet_90	0.7301	5.4904	0.16	71.67	11.49	136.13
10000_0.02_0.5_Wet_105	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 15

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.02_0.3_Wet_0	0.0795	0.8712	0	14.07	1.39	13.01
8000_0.02_0.3_Wet_15	0.2031	1.4272	0.07	21.65	1.37	36.26
8000_0.02_0.3_Wet_30	0.2947	1.9816	0.08	34.58	1.36	62.42
8000_0.02_0.3_Wet_45	0.3471	2.3328	0.08	39.29	2.51	85.03
8000_0.02_0.3_Wet_60	0.3894	2.9512	0.08	46.70	1.77	105.98
8000_0.02_0.3_Wet_75	0.4716	3.096	0.13	53.11	2.24	116.35
8000_0.02_0.3_Wet_90	0.7459	7.888	0.17	51.88	4.55	118.05
8000_0.02_0.3_Wet_105	1.0523	7.556	0.39	84.37587	11.01146	171.67

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงื่อนไขการตัดแบบแห้ง

Run ที่ 1

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.02_0.5_Dry_0	0.1453	0.9656	0	21.78	5.24	15.49
10000_0.02_0.5_Dry_15	0.3056	2.5648	0.09	24.82	6.02	23.31
10000_0.02_0.5_Dry_30	1.8726	12.0216	0.13	27.12	6.81	31.10
10000_0.02_0.5_Dry_45	2.8944	18.2256	0.14	30.38	8.95	50.24
10000_0.02_0.5_Dry_60	4.5042	30.1704	0.16	37.64	11.75	65.37
10000_0.02_0.5_Dry_75	5.6444	32.5696	0.18	41.84	11.52	80.08
10000_0.02_0.5_Dry_90	7.8959	41.0536	0.2	46.82	10.35	94.29

Run ที่ 2

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.01_0.5_Dry_0	0.0811	0.58	0	12.40	2.62	10.56
8000_0.01_0.5_Dry_15	0.1681	1.616	0.1	20.50	5.65	42.16
8000_0.01_0.5_Dry_30	0.3855	6.7856	0.13	24.83	8.10	51.03
8000_0.01_0.5_Dry_45	1.3471	18.8528	0.18	38.92	8.24	88.29
8000_0.01_0.5_Dry_60	4.9085	31.4664	0.2	54.89	4.80	139.50

Run ที่ 3

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.03_0.3_Dry_0	0.2705	2.8416	0	13.21	1.43	8.44
10000_0.03_0.3_Dry_15	0.3689	4.8432	0.05	19.03	3.03	19.34
10000_0.03_0.3_Dry_30	0.6587	6.2296	0.06	20.08	3.28	24.38
10000_0.03_0.3_Dry_45	1.2335	7.7736	0.1	22.80	4.54	39.76
10000_0.03_0.3_Dry_60	2.8833	19.28	0.12	22.97	5.75	40.96
10000_0.03_0.3_Dry_75	3.1588	21.9568	0.14	25.73	4.78	46.76
10000_0.03_0.3_Dry_90	4.1531	27.256	0.15	25.59	4.93	49.86
10000_0.03_0.3_Dry_105	2.2061	23.9032	0.17	23.17	5.69	52.23
10000_0.03_0.3_Dry_120	1.1134	12.3144	0.21	22.19	5.29	67.75

Run ที่ 4

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.03_0.5_Dry_0	0.2894	3.508	0	22.83	4.87	15.49
8000_0.03_0.5_Dry_15	0.3001	2.6536	0.08	28.50	7.18	26.65
8000_0.03_0.5_Dry_30	0.3775	5.4608	0.09	29.33	7.30	33.01
8000_0.03_0.5_Dry_45	0.6441	5.6584	0.11	30.62	8.39	54.67
8000_0.03_0.5_Dry_60	1.6822	11.2608	0.12	31.28	9.50	58.48
8000_0.03_0.5_Dry_75	1.9834	13.6896	0.14	33.11	8.94	67.56
8000_0.03_0.5_Dry_90	1.9819	15.5432	0.17	32.70	9.36	71.27
8000_0.03_0.5_Dry_105	1.2824	11.0216	0.19	31.79	9.50	88.17
8000_0.03_0.5_Dry_120	0.5611	7.2776	0.22	29.85	5.50	58.14

Run ที่ 5

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.02_0.7_Dry_0	0.1862	2.1776	0	24.31	3.63	24.41
8000_0.02_0.7_Dry_15	0.439	2.5928	0.07	24.19	4.06	27.93
8000_0.02_0.7_Dry_30	0.7979	5.9736	0.11	27.34	6.60	45.26
8000_0.02_0.7_Dry_45	1.1884	8.3912	0.14	34.50	7.28	57.20
8000_0.02_0.7_Dry_60	1.9843	13.3472	0.16	38.95	6.73	72.41
8000_0.02_0.7_Dry_75	3.5879	23.6048	0.17	46.13	5.14	86.09
8000_0.02_0.7_Dry_90	6.5309	39.5168	0.2	53.42	3.65	100.77

Run ที่ 6

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.03_0.5_Dry_0	0.3213	4.1712	0	22.71	4.76	16.48
12000_0.03_0.5_Dry_15	0.2297	2.9696	0.07	28.72	6.60	36.75
12000_0.03_0.5_Dry_30	1.437	9.8288	0.09	30.51	6.92	41.99
12000_0.03_0.5_Dry_45	2.1993	20.1288	0.11	35.95	7.23	50.50
12000_0.03_0.5_Dry_60	1.96	17.5104	0.13	43.12	8.07	64.39
12000_0.03_0.5_Dry_75	1.9118	18.0576	0.14	51.57	6.50	79.49
12000_0.03_0.5_Dry_90	1.6511	14.2104	0.16	59.67	4.69	92.21
12000_0.03_0.5_Dry_105	2.0291	15.7272	0.18	68.89	5.69	99.41
12000_0.03_0.5_Dry_120	1.4524	10.0984	0.2	76.65	5.27	110.43

Run ที่ 7

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.01_0.7_Dry_0	0.0865	1.1424	0	17.08	3.57	14.74
10000_0.01_0.7_Dry_15	0.2344	4.1768	0.08	24.61	6.55	41.73
10000_0.01_0.7_Dry_30	2.4717	16.6616	0.12	30.33	8.42	57.68
10000_0.01_0.7_Dry_45	3.0499	24.9568	0.14	45.94	8.79	80.19
10000_0.01_0.7_Dry_60	3.9167	37.3104	0.15	57.60	10.45	103.16
10000_0.01_0.7_Dry_75	4.8983	41.164	0.17	63.70	8.20	125.79
10000_0.01_0.7_Dry_90	5.4545	37.8736	0.18	76.23	9.40	147.13
10000_0.01_0.7_Dry_105	5.4221	45.2472	0.2	74.70	7.81	137.12

Run ที่ 8

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.02_0.7_Dry_0	0.1858	2.6896	0	20.87	4.19	15.42
12000_0.02_0.7_Dry_15	0.3033	2.4144	0.08	26.50	6.49	33.85
12000_0.02_0.7_Dry_30	2.7176	18.6832	0.09	36.75	6.87	48.05
12000_0.02_0.7_Dry_45	3.5796	25.1776	0.11	45.94	7.87	61.67
12000_0.02_0.7_Dry_60	4.0665	31.8928	0.12	54.89	7.28	77.29
12000_0.02_0.7_Dry_75	4.3496	32.9904	0.13	60.38	9.80	85.57
12000_0.02_0.7_Dry_90	4.3471	35.908	0.14	65.74	10.68	93.65
12000_0.02_0.7_Dry_105	3.2269	30.4984	0.14	71.23	11.94	103.11
12000_0.02_0.7_Dry_120	3.2302	26.6184	0.16	82.88	10.23	118.97
12000_0.02_0.7_Dry_135	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 9

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.02_0.3_Dry_0	0.1782	1.1088	0	15.86	2.09	14.35
12000_0.02_0.3_Dry_15	0.3734	3.1168	0.08	25.49	2.56	35.14
12000_0.02_0.3_Dry_30	1.1098	14.8832	0.11	43.46	4.19	87.01
12000_0.02_0.3_Dry_45	2.4571	19.3568	0.14	51.27	7.03	101.85
12000_0.02_0.3_Dry_60	4.5715	32.4344	0.15	52.25	6.52	103.69
12000_0.02_0.3_Dry_75	5.8378	37.2648	0.15	56.65	4.96	113.23
12000_0.02_0.3_Dry_90	5.5859	31.808	0.17	52.34	4.71	110.09
12000_0.02_0.3_Dry_105	5.0477	35.9032	0.2	56.09	2.62	116.08

Run ที่ 10

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.01_0.3_Dry_0	0.0711	0.9506	0	9.21	1.77	8.43
10000_0.01_0.3_Dry_15	0.2547	4.5872	0.09	15.07	4.49	39.73
10000_0.01_0.3_Dry_30	2.4821	26.8632	0.14	20.52	5.99	51.86
10000_0.01_0.3_Dry_45	3.6822	27.7576	0.18	28.01	5.27	86.85
10000_0.01_0.3_Dry_60	3.7077	25.5176	0.24	36.70	0.89	133.47

Run ที่ 11

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.01_0.5_Dry_0	0.0591	0.74	0	8.51	3.53	7.23
12000_0.01_0.5_Dry_15	0.2793	2.1296	0.08	13.17	2.99	20.89
12000_0.01_0.5_Dry_30	2.1213	19.8	0.11	20.55	6.01	44.92
12000_0.01_0.5_Dry_45	3.8691	33.1304	0.14	23.18	5.64	50.99
12000_0.01_0.5_Dry_60	4.746	39.8904	0.17	26.74	5.38	63.20
12000_0.01_0.5_Dry_75	4.8292	35.8	0.25	35.28	5.52	110.96

Run ที่ 12

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.02_0.5_Dry_0	0.4377	4.752	0	19.53	3.37	16.26
10000_0.02_0.5_Dry_15	0.4688	4.904	0.08	26.80	3.59	30.62
10000_0.02_0.5_Dry_30	1.8814	13.3096	0.1	22.28	4.47	36.78
10000_0.02_0.5_Dry_45	2.1005	12.3912	0.14	21.51	5.70	41.77
10000_0.02_0.5_Dry_60	2.2318	11.7576	0.18	22.65	7.49	53.67
10000_0.02_0.5_Dry_75	3.0911	24.6424	0.19	25.49	8.14	61.29
10000_0.02_0.5_Dry_90	2.5161	16.44	0.21	30.41	10.25	74.66

Run ที่ 13

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.03_0.7_Dry_0	0.2808	5.0376	0	31.74	6.06	26.23
10000_0.03_0.7_Dry_15	0.4324	4.2176	0.08	45.13	7.56	48.92
10000_0.03_0.7_Dry_30	0.9905	10.7104	0.11	31.32	5.57	38.24
10000_0.03_0.7_Dry_45	1.7253	16.1256	0.14	62.11	10.27	85.16
10000_0.03_0.7_Dry_60	2.3177	18.0992	0.15	71.95	11.55	102.59
10000_0.03_0.7_Dry_75	2.6934	23.1856	0.18	80.83	13.21	116.46
10000_0.03_0.7_Dry_90	2.9294	22.288	0.19	97.16	13.60	150.74
10000_0.03_0.7_Dry_105	3.0992	25.2952	0.2	112.99	11.17	177.19

Run ที่ 14

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.02_0.5_Dry_0	0.178	1.4568	0	17.41	3.10	13.74
10000_0.02_0.5_Dry_15	0.28	1.5768	0.06	20.54	3.69	25.49
10000_0.02_0.5_Dry_30	1.6614	12.5793	0.1	22.70	6.32	42.28
10000_0.02_0.5_Dry_45	2.5773	16.4928	0.13	24.37	6.54	49.06
10000_0.02_0.5_Dry_60	3.2383	24.5808	0.15	26.03	6.50	59.87
10000_0.02_0.5_Dry_75	3.8507	25.6104	0.17	28.68	4.56	71.11
10000_0.02_0.5_Dry_90	4.9714	39.1128	0.2	32.91	4.09	82.91

Run ที่ 15

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.02_0.3_Dry_0	0.1838	1.9968	0	14.19	1.73	13.14
8000_0.02_0.3_Dry_15	0.4997	4.432	0.06	16.16	1.56	20.94
8000_0.02_0.3_Dry_30	1.909	11.064	0.1	20.33	4.93	41.20
8000_0.02_0.3_Dry_45	1.908	12.1864	0.12	32.11	6.08	62.48
8000_0.02_0.3_Dry_60	2.2532	15.3616	0.16	32.97	5.28	69.98
8000_0.02_0.3_Dry_75	3.241	18.9664	0.18	40.26	6.28	90.62
8000_0.02_0.3_Dry_90	4.6742	27.4592	0.22	50.83	6.73	124.80

เงื่อนไขการตัดโดยใช้สเปรย์สารหล่อเย็น

Run ที่ 1

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.02_0.5_Mist_0	0.0808	0.6784	0	17.03	2.70	14.77
10000_0.02_0.5_Mist_15	0.1383	0.9184	0.09	24.18	3.35	39.10
10000_0.02_0.5_Mist_30	0.3882	2.5568	0.1	24.87	3.67	44.00
10000_0.02_0.5_Mist_45	0.1634	1.3576	0.1	28.48	3.82	53.98
10000_0.02_0.5_Mist_60	0.5913	3.868	0.12	35.83	4.29	70.12
10000_0.02_0.5_Mist_75	0.6763	3.9696	0.12	42.05	5.23	79.63
10000_0.02_0.5_Mist_90	0.8412	6.872	0.12	45.24	5.21	87.83
10000_0.02_0.5_Mist_105	1.2489	9.0848	0.12	49.53	6.00	98.44
10000_0.02_0.5_Mist_120	1.3788	8.4296	0.13	51.97	5.85	104.88
10000_0.02_0.5_Mist_135	1.5497	10.6224	0.14	48.16	5.31	100.74
10000_0.02_0.5_Mist_150	1.8492	11.5536	0.15	67.25	5.52	144.28
10000_0.02_0.5_Mist_165	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 2

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.01_0.5_Mist_0	0.0611	0.5112	0	12.96	3.31	15.58
8000_0.01_0.5_Mist_15	0.2285	1.6304	0.07	15.89	1.44	32.11
8000_0.01_0.5_Mist_30	0.2515	2.0168	0.08	16.04	0.98	35.72
8000_0.01_0.5_Mist_45	0.5417	5.368	0.08	17.12	0.96	43.16
8000_0.01_0.5_Mist_60	0.632	4.732	0.09	20.49	1.09	53.92
8000_0.01_0.5_Mist_75	0.6334	4.7232	0.09	20.17	0.98	54.25
8000_0.01_0.5_Mist_90	0.8981	8.1448	0.1	22.74	0.91	64.18
8000_0.01_0.5_Mist_105	1.6295	13.4208	0.11	23.08	0.66	66.11
8000_0.01_0.5_Mist_120	1.8961	13.9856	0.12	26.39	0.76	75.86
8000_0.01_0.5_Mist_135	2.2802	14.1336	0.13	27.91	0.50	79.90
8000_0.01_0.5_Mist_150	2.6585	18.1752	0.13	34.94	0.90	96.24
8000_0.01_0.5_Mist_165	3.3897	20.1792	0.14	48.96	2.78	125.70
8000_0.01_0.5_Mist_180	3.4887	20.6944	0.25	73.86	11.90	168.56

Run ที่ 3

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.03_0.3_Mist_0	0.0797	0.6048	0	19.84	2.12	18.57
10000_0.03_0.3_Mist_15	0.3224	2.3208	0.08	32.37	3.67	55.37
10000_0.03_0.3_Mist_30	0.4168	2.7352	0.1	43.66	3.01	86.17
10000_0.03_0.3_Mist_45	0.395	3.0328	0.13	50.93	1.52	107.18
10000_0.03_0.3_Mist_60	0.5817	3.8632	0.13	56.05	2.77	124.83
10000_0.03_0.3_Mist_75	0.6127	6.0984	0.15	61.73	4.30	141.30
10000_0.03_0.3_Mist_90	0.7756	7.068	0.16	69.09	4.14	164.50
10000_0.03_0.3_Mist_105	1.0331	8.2784	0.21	72.13	5.67	186.45

Run ที่ 4

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.03_0.5_Mist_0	0.1063	1.134	0	19.73	4.05	14.87
8000_0.03_0.5_Mist_15	0.265	1.9032	0.08	33.14	4.56	47.93
8000_0.03_0.5_Mist_30	0.3338	2.3448	0.09	42.97	4.46	71.94
8000_0.03_0.5_Mist_45	0.6398	4.8	0.11	53.84	5.30	98.53
8000_0.03_0.5_Mist_60	0.4619	3.1328	0.1	62.79	5.02	122.01
8000_0.03_0.5_Mist_75	0.7824	6.4904	0.11	70.52	5.48	143.41
8000_0.03_0.5_Mist_90	0.6509	5.4916	0.12	76.15	6.23	161.54
8000_0.03_0.5_Mist_105	1.4794	11.6604	0.13	85.64	7.54	181.91
8000_0.03_0.5_Mist_120	1.8424	15.436	0.14	93.00	7.77	204.32
8000_0.03_0.5_Mist_135	2.2837	18.9924	0.17	92.95	7.95	208.87
8000_0.03_0.5_Mist_150	3.2935	20.3424	0.21	114.89	16.33	253.11

Run ที่ 5

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.02_0.7_Mist_0	0.0849	0.5866	0	19.18	4.22	14.60
8000_0.02_0.7_Mist_15	0.1837	1.348	0.07	29.94	4.58	44.84
8000_0.02_0.7_Mist_30	0.267	2.42	0.08	43.52	5.45	70.56
8000_0.02_0.7_Mist_45	0.5126	5.0368	0.09	43.93	6.98	68.73
8000_0.02_0.7_Mist_60	0.6338	5.1072	0.09	50.49	7.84	82.96
8000_0.02_0.7_Mist_75	0.7942	6.3584	0.1	65.28	6.12	116.49
8000_0.02_0.7_Mist_90	0.841	5.5408	0.1	75.86	5.92	137.98
8000_0.02_0.7_Mist_105	1.3605	11.4416	0.1	82.71	6.87	162.67
8000_0.02_0.7_Mist_120	1.5577	11.344	0.11	87.62	5.86	183.68
8000_0.02_0.7_Mist_135	1.7664	17.5232	0.12	94.63	6.24	201.66
8000_0.02_0.7_Mist_150	2.0956	16.3768	0.17	91.90	3.71	205.36
8000_0.02_0.7_Mist_165	2.2032	18.2472	0.21	98.22	3.50	228.57

Run ที่ 6

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.03_0.5_Mist_0	0.1199	1.192	0	18.64	4.11	14.38
12000_0.03_0.5_Mist_15	0.2495	1.5968	0.07	30.81	4.53	43.26
12000_0.03_0.5_Mist_30	0.5277	4.616	0.08	36.15	5.10	56.18
12000_0.03_0.5_Mist_45	0.7329	3.8992	0.09	40.94	5.13	66.57
12000_0.03_0.5_Mist_60	0.4511	2.732	0.09	48.12	5.63	81.09
12000_0.03_0.5_Mist_75	0.8147	4.0128	0.09	54.07	5.71	94.48
12000_0.03_0.5_Mist_90	0.8542	4.856	0.09	59.66	6.24	107.38
12000_0.03_0.5_Mist_105	1.7178	10.7936	0.1	63.82	6.58	117.45
12000_0.03_0.5_Mist_120	2.0471	12.5792	0.1	68.23	7.06	128.27
12000_0.03_0.5_Mist_135	2.0983	14.228	0.1	74.44	7.33	145.73
12000_0.03_0.5_Mist_150	2.576	14.1912	0.11	76.91	6.60	154.30
12000_0.03_0.5_Mist_165	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 7

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.01_0.7_Mist_0	0.0539	0.4704	0	14.13	3.35	14.98
10000_0.01_0.7_Mist_15	0.1587	1.0272	0.07	19.09	2.66	39.33
10000_0.01_0.7_Mist_30	0.2475	1.7376	0.08	25.01	2.26	58.43
10000_0.01_0.7_Mist_45	0.3931	2.8712	0.08	30.03	1.83	69.54
10000_0.01_0.7_Mist_60	0.4411	3.1728	0.09	35.29	2.06	78.95
10000_0.01_0.7_Mist_75	0.7388	5.8912	0.1	46.22	0.92	102.43
10000_0.01_0.7_Mist_90	0.8671	7.8968	0.14	51.89	1.03	118.17
10000_0.01_0.7_Mist_105	1.4381	10.8608	0.14	61.40	0.53	134.62
10000_0.01_0.7_Mist_120	1.6403	10.784	0.17	62.90	1.36	133.84
10000_0.01_0.7_Mist_135	2.0629	14.0456	0.18	67.68	2.67	153.42
10000_0.01_0.7_Mist_150	2.2914	16.8672	0.23	58.16	3.84	126.32

Run ที่ 8

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.02_0.7_Mist_0	0.119	1.28	0	15.01	5.45	10.28
12000_0.02_0.7_Mist_15	0.1756	1.204	0.08	27.50	4.48	39.19
12000_0.02_0.7_Mist_30	0.3962	3.28	0.08	22.82	4.34	35.45
12000_0.02_0.7_Mist_45	0.477	3.2736	0.1	33.77	4.40	58.22
12000_0.02_0.7_Mist_60	0.6117	3.9256	0.1	31.00	4.69	52.12
12000_0.02_0.7_Mist_75	0.97	5.6792	0.1	32.99	4.56	57.49
12000_0.02_0.7_Mist_90	1.2316	8.0104	0.1	47.60	5.66	87.43
12000_0.02_0.7_Mist_105	1.2961	9.4536	0.12	51.16	5.40	98.86
12000_0.02_0.7_Mist_120	1.6606	11.828	0.13	56.31	5.14	109.47
12000_0.02_0.7_Mist_135	2.0158	11.6904	0.13	62.39	5.45	122.00
12000_0.02_0.7_Mist_150	2.3658	15.0376	0.14	68.78	5.24	137.19
12000_0.02_0.7_Mist_165	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 9

Cutting Condition (n_f d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.02_0.3_Mist_0	0.0807	0.516	0	12.49	0.39	12.46
12000_0.02_0.3_Mist_15	0.1472	1.06	0.08	16.94	0.48	32.60
12000_0.02_0.3_Mist_30	0.1812	1.416	0.11	17.34	0.18	40.97
12000_0.02_0.3_Mist_45	0.2986	1.8984	0.13	28.63	0.39	51.71
12000_0.02_0.3_Mist_60	0.358	2.6016	0.12	18.39	0.50	54.08
12000_0.02_0.3_Mist_75	0.5204	4.5448	0.12	18.72	0.46	57.14
12000_0.02_0.3_Mist_90	1.0731	10.02	0.13	22.77	0.26	66.74
12000_0.02_0.3_Mist_105	1.3811	11.1712	0.14	25.64	1.37	68.90
12000_0.02_0.3_Mist_120	1.6312	10.1712	0.14	31.40	2.21	83.14
12000_0.02_0.3_Mist_135	1.7752	10.3104	0.14	34.65	2.46	92.03
12000_0.02_0.3_Mist_150	2.2234	15.5144	0.17	44.36	4.16	117.56
12000_0.02_0.3_Mist_165	2.3554	18.824	0.24	68.51	2.24	168.87

Run ที่ 10

Cutting Condition (n_f d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.01_0.3_Mist_0	0.0534	0.3832	0	9.84	1.09	21.57
10000_0.01_0.3_Mist_15	0.1408	1.2648	0.07	14.37	0.49	62.55
10000_0.01_0.3_Mist_30	0.1999	2.0776	0.09	15.04	0.16	70.10
10000_0.01_0.3_Mist_45	0.2585	2.6784	0.09	16.31	0.03	80.34
10000_0.01_0.3_Mist_60	0.264	2.32	0.1	16.78	0.31	82.69
10000_0.01_0.3_Mist_75	0.3497	3.0976	0.12	19.35	0.44	96.79
10000_0.01_0.3_Mist_90	0.4654	3.4384	0.12	19.89	0.89	98.59
10000_0.01_0.3_Mist_105	1.2026	11.048	0.13	20.87	0.92	101.92
10000_0.01_0.3_Mist_120	1.4768	18.184	0.14	25.36	0.65	121.84
10000_0.01_0.3_Mist_135	1.7649	17.4368	0.17	45.07	2.56	195.57
10000_0.01_0.3_Mist_150	2.0683	16.3824	0.45	56.22	7.58	227.58

Run ที่ 11

Cutting Condition (n_f d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
12000_0.01_0.5_Mist_0	0.0922	0.7592	0	11.64	3.89	13.11
12000_0.01_0.5_Mist_15	0.2327	1.6232	0.06	13.24	1.52	25.34
12000_0.01_0.5_Mist_30	0.2984	2.1096	0.07	13.58	1.31	29.45
12000_0.01_0.5_Mist_45	0.6195	4.5944	0.09	14.27	1.47	36.38
12000_0.01_0.5_Mist_60	0.8208	8.4904	0.1	23.05	0.64	55.67
12000_0.01_0.5_Mist_75	0.8993	8.4424	0.1	35.34	0.65	80.92
12000_0.01_0.5_Mist_90	1.0304	6.1376	0.11	38.08	2.14	79.96
12000_0.01_0.5_Mist_105	1.9171	12.7088	0.11	45.93	2.85	101.71
12000_0.01_0.5_Mist_120	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 12

Cutting Condition (n_f d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.02_0.5_Mist_0	0.0789	0.5824	0	16.69	2.82	14.48
10000_0.02_0.5_Mist_15	0.1217	1.0768	0.09	22.22	2.22	39.33
10000_0.02_0.5_Mist_30	0.2508	1.8728	0.1	22.35	2.13	45.51
10000_0.02_0.5_Mist_45	0.3413	2.152	0.11	30.40	7.25	64.33
10000_0.02_0.5_Mist_60	0.3717	3.304	0.12	31.50	3.76	66.46
10000_0.02_0.5_Mist_75	0.6609	7.2824	0.12	38.37	4.16	82.65
10000_0.02_0.5_Mist_90	0.987	9.6824	0.13	43.85	4.67	94.67
10000_0.02_0.5_Mist_105	1.482	8.5736	0.13	47.40	4.95	103.87
10000_0.02_0.5_Mist_120	1.7509	12.5712	0.13	60.16	5.70	137.25
10000_0.02_0.5_Mist_135	1.968	11.6312	0.13	71.89	6.36	167.61
10000_0.02_0.5_Mist_150	1.9878	12.3744	0.13	73.39	6.19	181.19
10000_0.02_0.5_Mist_165	-	-	Chipping	-	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Run ที่ 13

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.03_0.7_Mist_0	0.0983	0.6864	0	24.33	5.07	18.08
10000_0.03_0.7_Mist_15	0.3888	2.7568	0.07	36.59	7.01	47.78
10000_0.03_0.7_Mist_30	0.4008	2.7944	0.08	43.59	7.62	66.77
10000_0.03_0.7_Mist_45	0.8121	5.4752	0.09	49.15	8.15	79.78
10000_0.03_0.7_Mist_60	0.8109	6.0768	0.09	55.77	6.88	97.45
10000_0.03_0.7_Mist_75	0.9965	6.7024	0.1	59.70	8.57	102.96
10000_0.03_0.7_Mist_90	1.311	8.2056	0.1	67.68	9.83	118.81
10000_0.03_0.7_Mist_105	1.7129	11.8584	0.11	74.92	10.36	133.15
10000_0.03_0.7_Mist_120	2.5471	15.7448	0.12	84.87	10.37	153.93
10000_0.03_0.7_Mist_135	2.6992	16.5464	0.14	92.19	11.09	164.66
10000_0.03_0.7_Mist_150	-	-	Chipping	-	-	-

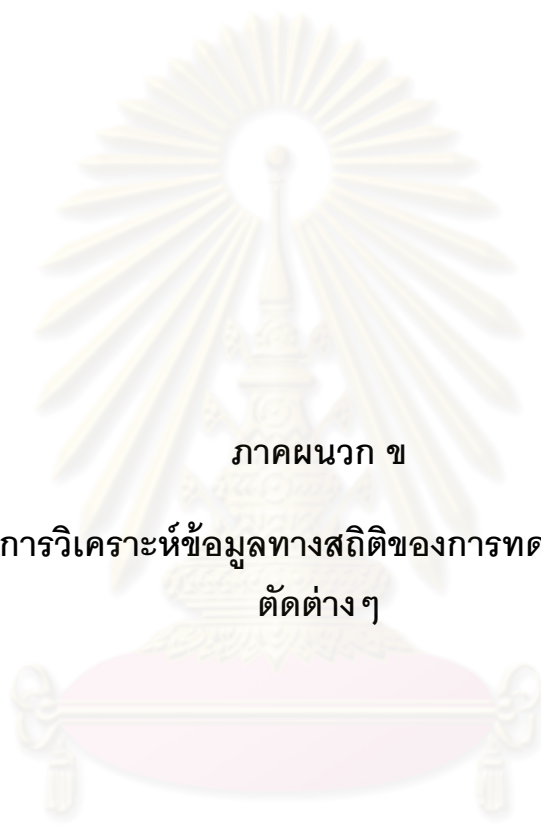
Run ที่ 14

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
10000_0.02_0.5_Mist_0	0.0638	0.5208	0	17.03	2.70	14.77
10000_0.02_0.5_Mist_15	0.1712	1.2304	0.07	24.30	2.54	39.43
10000_0.02_0.5_Mist_30	0.2325	1.9429	0.08	29.17	2.83	52.83
10000_0.02_0.5_Mist_45	0.2121	2.1944	0.09	26.98	3.13	49.74
10000_0.02_0.5_Mist_60	0.4026	3.6368	0.09	29.05	3.37	57.94
10000_0.02_0.5_Mist_75	0.52	3.8576	0.09	33.03	4.07	66.71
10000_0.02_0.5_Mist_90	0.9719	7.112	0.09	43.04	4.92	90.84
10000_0.02_0.5_Mist_105	1.2336	10.1864	0.11	47.63	4.41	102.78
10000_0.02_0.5_Mist_120	1.6209	10.044	0.11	46.03	4.92	99.69
10000_0.02_0.5_Mist_135	1.5762	9.6056	0.12	51.81	4.91	115.16
10000_0.02_0.5_Mist_150	1.8614	13.1808	0.13	55.94	5.44	123.55
10000_0.02_0.5_Mist_165	2.1197	13.9056	0.13	59.25	5.06	134.76
10000_0.02_0.5_Mist_180	2.6243	13.7888	0.15	65.37	5.65	149.77
10000_0.02_0.5_Mist_195	-	-	Chipping	-	-	-

Run ที่ 15

Cutting Condition (n_f_d_colling type_cutting time)	Roughness		Flank wear	Cutting Force		
	Ra (μm)	Rz (μm)	Vb (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
8000_0.02_0.3_Mist_0	0.0926	0.644	0	16.56	1.41	18.85
8000_0.02_0.3_Mist_15	0.1713	1.152	0.09	21.95	1.21	42.91
8000_0.02_0.3_Mist_30	0.2454	1.8544	0.1	21.54	0.81	49.82
8000_0.02_0.3_Mist_45	0.3576	2.396	0.12	22.66	1.06	61.01
8000_0.02_0.3_Mist_60	0.55	3.6832	0.12	42.97	3.22	100.91
8000_0.02_0.3_Mist_75	0.5957	5.0744	0.12	47.94	0.32	118.86
8000_0.02_0.3_Mist_90	0.6975	5.6208	0.13	52.08	1.88	135.25
8000_0.02_0.3_Mist_105	1.3861	11.4376	0.15	60.33	0.14	161.20
8000_0.02_0.3_Mist_120	1.9786	13.2056	0.18	64.87	0.77	177.17
8000_0.02_0.3_Mist_135	2.5854	16.804	0.18	66.96	1.34	185.70
8000_0.02_0.3_Mist_150	-	-	Chipping	-	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ตารางแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของการทดลองที่เงื่อนไขของการ
ตัดต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. เงื่อนไขการตัดแบบเปียก

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Ra versus Spindle 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	0.35280	0.07318	4.821	0.005
Spindle speed	0.11474	0.04482	2.560	0.051
Feed rate	0.20303	0.04482	4.530	0.006
Depth of cut	0.07474	0.04482	1.668	0.156
Spindle speed*Spindle speed	0.31811	0.06597	4.822	0.005
Feed rate*Feed rate	0.44884	0.06597	6.804	0.001
Depth of cut*Depth of cut	-0.25094	0.06597	-3.804	0.013
Spindle speed*Feed rate	-0.03475	0.06338	-0.548	0.607
Spindle speed*Depth of cut	0.05098	0.06338	0.804	0.458
Feed rate*Depth of cut	0.01315	0.06338	0.207	0.844

S = 0.126757 PRESS = 1.15453
R-Sq = 95.92% R-Sq(adj) = 88.57%

Analysis of Variance for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1.88715	1.88715	0.209683	13.05	0.006
Linear	3	0.47976	0.47976	0.159919	9.95	0.015
Square	3	1.39148	1.39148	0.463825	28.87	0.001
Interaction	3	0.01592	0.01592	0.005305	0.33	0.805
Residual Error	5	0.08034	0.08034	0.016067		
Lack-of-Fit	3	0.07082	0.07082	0.023607	4.96	0.172
Pure Error	2	0.00952	0.00952	0.004758		
Total	14	1.96748				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Ra versus Spindle 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	0.35280	0.06333	5.571	0.001
Spindle speed	0.11474	0.03878	2.959	0.018
Feed rate	0.20303	0.03878	5.235	0.001
Depth of cut	0.07474	0.03878	1.927	0.090
Spindle speed*Spindle speed	0.31811	0.05708	5.573	0.001
Feed rate*Feed rate	0.44884	0.05708	7.863	0.000
Depth of cut*Depth of cut	-0.25094	0.05708	-4.396	0.002

S = 0.109688 PRESS = 0.368354
R-Sq = 95.11% R-Sq(adj) = 91.44%

Analysis of Variance for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	1.87123	1.87123	0.311872	25.92	0.000
Linear	3	0.47976	0.47976	0.159919	13.29	0.002
Square	3	1.39148	1.39148	0.463825	38.55	0.000
Residual Error	8	0.09625	0.09625	0.012032		
Lack-of-Fit	6	0.08674	0.08674	0.014456	3.04	0.268
Pure Error	2	0.00952	0.00952	0.004758		
Total	14	1.96748				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความสึกหรอของมีดกัดก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Vb versus Spindle speed, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Vb

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.083333	0.003073	27.116	0.000
Spindle speed	0.000000	0.001882	0.000	1.000
Feed rate	-0.021250	0.001882	-11.292	0.000
Depth of cut	0.001250	0.001882	0.664	0.536
Spindle speed*Spindle speed	0.008333	0.002770	3.008	0.030
Feed rate*Feed rate	0.010833	0.002770	3.911	0.011
Depth of cut*Depth of cut	0.000833	0.002770	0.301	0.776
Spindle speed*Feed rate	0.002500	0.002661	0.939	0.391
Spindle speed*Depth of cut	0.002500	0.002661	0.939	0.391
Feed rate*Depth of cut	0.005000	0.002661	1.879	0.119

S = 0.00532291 PRESS = 0.00135
R-Sq = 96.89% R-Sq(adj) = 91.30%

Analysis of Variance for Vb

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.004418	0.004418	0.000491	17.33	0.003
Linear	3	0.003625	0.003625	0.001208	42.65	0.001
Square	3	0.000643	0.000643	0.000214	7.57	0.026
Interaction	3	0.000150	0.000150	0.000050	1.76	0.270
Residual Error	5	0.000142	0.000142	0.000028		
Lack-of-Fit	3	0.000075	0.000075	0.000025	0.75	0.615
Pure Error	2	0.000067	0.000067	0.000033		
Total	14	0.004560				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความสึกหรอของมีดกัดหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Vb versus Spindle speed, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Vb

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.083846	0.002362	35.498	0.000
Spindle speed	-0.000000	0.001738	-0.000	1.000
Feed rate	-0.021250	0.001738	-12.224	0.000
Depth of cut	0.001250	0.001738	0.719	0.495
Spindle speed*Spindle speed	0.008269	0.002551	3.241	0.014
Feed rate*Feed rate	0.010769	0.002551	4.221	0.004
Spindle speed*Feed rate	0.002500	0.002458	1.017	0.343
Feed rate*Depth of cut	0.005000	0.002458	2.034	0.081

S = 0.00491689 PRESS = 0.000771368

R-Sq = 96.29% R-Sq(adj) = 92.58%

Analysis of Variance for Vb

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	0.004391	0.004391	0.000627	25.95	0.000
Linear	3	0.003625	0.003625	0.001208	49.98	0.000
Square	2	0.000641	0.000641	0.000320	13.25	0.004
Interaction	2	0.000125	0.000125	0.000062	2.59	0.144
Residual Error	7	0.000169	0.000169	0.000024		
Lack-of-Fit	5	0.000103	0.000103	0.000021	0.62	0.714
Pure Error	2	0.000067	0.000067	0.000033		
Total	14	0.004560				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสัดส่วนแรงตัดก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Fx/Fz versus Spindle spee, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.567313	0.02982	19.022	0.000
Spindle speed	-0.001324	0.01826	-0.073	0.945
Feed rate	0.109623	0.01826	6.002	0.002
Depth of cut	0.067698	0.01826	3.707	0.014
Spindle speed*Spindle speed	-0.030086	0.02688	-1.119	0.314
Feed rate*Feed rate	-0.076948	0.02688	-2.862	0.035
Depth of cut*Depth of cut	-0.032355	0.02688	-1.204	0.283
Spindle speed*Feed rate	0.027768	0.02583	1.075	0.331
Spindle speed*Depth of cut	0.028177	0.02583	1.091	0.325
Feed rate*Depth of cut	-0.046031	0.02583	-1.782	0.135

S = 0.0516556 PRESS = 0.193364
R-Sq = 92.87% R-Sq(adj) = 80.05%

Analysis of Variance for Fx/Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.173861	0.173861	0.019318	7.24	0.021
Linear	3	0.132815	0.132815	0.044272	16.59	0.005
Square	3	0.026311	0.026311	0.008770	3.29	0.116
Interaction	3	0.014735	0.014735	0.004912	1.84	0.257
Residual Error	5	0.013341	0.013341	0.002668		
Lack-of-Fit	3	0.011880	0.011880	0.003960	5.42	0.160
Pure Error	2	0.001462	0.001462	0.000731		
Total	14	0.187203				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองส่วนแรงตัดหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Fx/Fz versus Spindle spee, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.567313	0.03055	18.569	0.000
Spindle speed	-0.001324	0.01871	-0.071	0.946
Feed rate	0.109623	0.01871	5.859	0.001
Depth of cut	0.067698	0.01871	3.618	0.009
Spindle speed*Spindle speed	-0.030086	0.02754	-1.092	0.311
Feed rate*Feed rate	-0.076948	0.02754	-2.794	0.027
Depth of cut*Depth of cut	-0.032355	0.02754	-1.175	0.278
Feed rate*Depth of cut	-0.046031	0.02646	-1.740	0.125

S = 0.0529168 PRESS = 0.113367
R-Sq = 89.53% R-Sq(adj) = 79.06%

Analysis of Variance for Fx/Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	0.167601	0.167601	0.023943	8.55	0.006
Linear	3	0.132815	0.132815	0.044272	15.81	0.002
Square	3	0.026311	0.026311	0.008770	3.13	0.097
Interaction	1	0.008476	0.008476	0.008476	3.03	0.125
Residual Error	7	0.019601	0.019601	0.002800		
Lack-of-Fit	5	0.018140	0.018140	0.003628	4.96	0.176
Pure Error	2	0.001462	0.001462	0.000731		
Total	14	0.187203				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. เงื่อนไขการตัดแบบแห้ง

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Ra versus Spindle 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	2.52407	0.2255	11.191	0.000
Spindle speed	0.87719	0.1381	6.351	0.001
Feed rate	-0.76826	0.1381	-5.562	0.003
Depth of cut	0.03280	0.1381	0.237	0.822
Spindle speed*Spindle speed	-0.32431	0.2033	-1.595	0.172
Feed rate*Feed rate	-0.18486	0.2033	-0.909	0.405
Depth of cut*Depth of cut	0.08352	0.2033	0.411	0.698
Spindle speed*Feed rate	-0.24170	0.1953	-1.237	0.271
Spindle speed*Depth of cut	0.46053	0.1953	2.358	0.065
Feed rate*Depth of cut	0.28102	0.1953	1.439	0.210

S = 0.390651 PRESS = 7.81708
R-Sq = 94.38% R-Sq(adj) = 84.27%

Analysis of Variance for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	12.8210	12.8210	1.4246	9.33	0.012
Linear	3	10.8861	10.8861	3.6287	23.78	0.002
Square	3	0.5370	0.5370	0.1790	1.17	0.407
Interaction	3	1.3979	1.3979	0.4660	3.05	0.130
Residual Error	5	0.7630	0.7630	0.1526		
Lack-of-Fit	3	0.4437	0.4437	0.1479	0.93	0.557
Pure Error	2	0.3194	0.3194	0.1597		
Total	14	13.5840				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Ra versus Spindle 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	2.57546	0.1965	13.108	0.000
Spindle speed	0.87719	0.1446	6.066	0.000
Feed rate	-0.76826	0.1446	-5.313	0.001
Depth of cut	0.03280	0.1446	0.227	0.826
Spindle speed*Spindle speed	-0.33073	0.2122	-1.558	0.158
Feed rate*Feed rate	-0.19128	0.2122	-0.901	0.394
Spindle speed*Depth of cut	0.46053	0.2045	2.252	0.054

S = 0.409019 PRESS = 4.57674
R-Sq = 90.15% R-Sq(adj) = 82.76%

Analysis of Variance for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	12.2456	12.2456	2.0409	12.20	0.001
Linear	3	10.8861	10.8861	3.6287	21.69	0.000
Square	2	0.5112	0.5112	0.2556	1.53	0.274
Interaction	1	0.8483	0.8483	0.8483	5.07	0.054
Residual Error	8	1.3384	1.3384	0.1673		
Lack-of-Fit	6	1.0190	1.0190	0.1698	1.06	0.559
Pure Error	2	0.3194	0.3194	0.1597		
Total	14	13.5840				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความสึกหรอของมีดกัดก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Vb versus Spindle speed, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Vb

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.136667	0.004014	34.049	0.000
Spindle speed	-0.006250	0.002458	-2.543	0.052
Feed rate	-0.022500	0.002458	-9.154	0.000
Depth of cut	-0.001250	0.002458	-0.509	0.633
Spindle speed*Spindle speed	-0.007083	0.003618	-1.958	0.108
Feed rate*Feed rate	0.005417	0.003618	1.497	0.195
Depth of cut*Depth of cut	-0.002083	0.003618	-0.576	0.590
Spindle speed*Feed rate	0.010000	0.003476	2.877	0.035
Spindle speed*Depth of cut	-0.012500	0.003476	-3.596	0.016
Feed rate*Depth of cut	0.020000	0.003476	5.754	0.002

S = 0.00695222 PRESS = 0.00295
R-Sq = 96.81% R-Sq(adj) = 91.07%

Analysis of Variance for Vb

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.007332	0.007332	0.000815	16.85	0.003
Linear	3	0.004375	0.004375	0.001458	30.17	0.001
Square	3	0.000332	0.000332	0.000111	2.29	0.196
Interaction	3	0.002625	0.002625	0.000875	18.10	0.004
Residual Error	5	0.000242	0.000242	0.000048		
Lack-of-Fit	3	0.000175	0.000175	0.000058	1.75	0.384
Pure Error	2	0.000067	0.000067	0.000033		
Total	14	0.007573				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความสึกหรอของมีดกัดหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Vb versus Spindle speed, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Vb

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.135385	0.003148	43.004	0.000
Spindle speed	-0.006250	0.002317	-2.697	0.036
Feed rate	-0.022500	0.002317	-9.711	0.000
Depth of cut	-0.001250	0.002317	-0.539	0.609
Spindle speed*Spindle speed	-0.006923	0.003400	-2.036	0.088
Feed rate*Feed rate	0.005577	0.003400	1.640	0.152
Spindle speed*Feed rate	0.010000	0.003277	3.052	0.022
Spindle speed*Depth of cut	-0.012500	0.003277	-3.815	0.009
Feed rate*Depth of cut	0.020000	0.003277	6.104	0.001

S = 0.00655353 PRESS = 0.00208663

R-Sq = 96.60% R-Sq(adj) = 92.06%

Analysis of Variance for Vb

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	0.007316	0.007316	0.000914	21.29	0.001
Linear	3	0.004375	0.004375	0.001458	33.96	0.000
Square	2	0.000316	0.000316	0.000158	3.67	0.091
Interaction	3	0.002625	0.002625	0.000875	20.37	0.002
Residual Error	6	0.000258	0.000258	0.000043		
Lack-of-Fit	4	0.000191	0.000191	0.000048	1.43	0.450
Pure Error	2	0.000067	0.000067	0.000033		
Total	14	0.007573				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสัดส่วนแรงตัดก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Fx/Fz versus Spindle spee, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.53880	0.02259	23.846	0.000
Spindle speed	0.03710	0.01384	2.682	0.044
Feed rate	0.09799	0.01384	7.082	0.001
Depth of cut	0.09213	0.01384	6.659	0.001
Spindle speed*Spindle speed	0.02243	0.02037	1.101	0.321
Feed rate*Feed rate	-0.01938	0.02037	-0.951	0.385
Depth of cut*Depth of cut	0.03012	0.02037	1.479	0.199
Spindle speed*Feed rate	0.03450	0.01957	1.763	0.138
Spindle speed*Depth of cut	0.03808	0.01957	1.946	0.109
Feed rate*Depth of cut	-0.02362	0.01957	-1.207	0.281

S = 0.0391350 PRESS = 0.0306862
R-Sq = 95.82% R-Sq(adj) = 88.29%

Analysis of Variance for Fx/Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.175378	0.175378	0.019486	12.72	0.006
Linear	3	0.155733	0.155733	0.051911	33.89	0.001
Square	3	0.006850	0.006850	0.002283	1.49	0.324
Interaction	3	0.012795	0.012795	0.004265	2.78	0.149
Residual Error	5	0.007658	0.007658	0.001532		
Lack-of-Fit	3	0.000979	0.000979	0.000326	0.10	0.954
Pure Error	2	0.006679	0.006679	0.003340		
Total	14	0.183036				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสัดส่วนแรงตัดหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Fx/Fz versus Spindle spee, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.52687	0.01928	27.327	0.000
Spindle speed	0.03710	0.01419	2.615	0.035
Feed rate	0.09799	0.01419	6.906	0.000
Depth of cut	0.09213	0.01419	6.493	0.000
Spindle speed*Spindle speed	0.02392	0.02083	1.148	0.289
Depth of cut*Depth of cut	0.03161	0.02083	1.518	0.173
Spindle speed*Feed rate	0.03450	0.02007	1.719	0.129
Spindle speed*Depth of cut	0.03808	0.02007	1.898	0.100

S = 0.0401357 PRESS = 0.0342552
R-Sq = 93.84% R-Sq(adj) = 87.68%

Analysis of Variance for Fx/Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	0.171760	0.171760	0.024537	15.23	0.001
Linear	3	0.155733	0.155733	0.051911	32.23	0.000
Square	2	0.005464	0.005464	0.002732	1.70	0.251
Interaction	2	0.010563	0.010563	0.005281	3.28	0.099
Residual Error	7	0.011276	0.011276	0.001611		
Lack-of-Fit	5	0.004597	0.004597	0.000919	0.28	0.894
Pure Error	2	0.006679	0.006679	0.003340		
Total	14	0.183036				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. เงื่อนไขการตัดโดยใช้สเปรย์สารหล่อเย็น

ตารางที่ 13 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Ra versus Spindle 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		0.238933	0.05566	4.293		0.008
Spindle speed		0.009538	0.03408	0.280		0.791
Feed rate		0.095875	0.03408	2.813		0.037
Depth of cut		0.110637	0.03408	3.246		0.023
Spindle speed*Spindle speed		0.170658	0.05017	3.402		0.019
Feed rate*Feed rate		0.223883	0.05017	4.463		0.007
Depth of cut*Depth of cut		0.001858	0.05017	0.037		0.972
Spindle speed*Feed rate		0.003825	0.04820	0.079		0.940
Spindle speed*Depth of cut		0.005850	0.04820	0.121		0.908
Feed rate*Depth of cut		0.070625	0.04820	1.465		0.203
S = 0.0963996 PRESS = 0.510997						
R-Sq = 90.96% R-Sq(adj) = 74.68%						
Analysis of Variance for Ra						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.46744	0.46744	0.051938	5.59	0.036
Linear	3	0.17219	0.17219	0.057396	6.18	0.039
Square	3	0.27510	0.27510	0.091701	9.87	0.015
Interaction	3	0.02015	0.02015	0.006716	0.72	0.580
Residual Error	5	0.04646	0.04646	0.009293		
Lack-of-Fit	3	0.02956	0.02956	0.009853	1.17	0.493
Pure Error	2	0.01690	0.01690	0.008452		
Total	14	0.51390				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 14 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความเรียบผิวชิ้นงานหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Ra versus Spindle 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	0.240077	0.03669	6.543	0.000
Spindle speed	0.009538	0.02700	0.353	0.733
Feed rate	0.095875	0.02700	3.550	0.008
Depth of cut	0.110637	0.02700	4.097	0.003
Spindle speed*Spindle speed	0.170515	0.03963	4.302	0.003
Feed rate*Feed rate	0.223740	0.03963	5.645	0.000
Feed rate*Depth of cut	0.070625	0.03819	1.849	0.102

S = 0.0763811 PRESS = 0.200519
R-Sq = 90.92% R-Sq(adj) = 84.11%

Analysis of Variance for Ra

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	0.46723	0.46723	0.077872	13.35	0.001
Linear	3	0.17219	0.17219	0.057396	9.84	0.005
Square	2	0.27509	0.27509	0.137545	23.58	0.000
Interaction	1	0.01995	0.01995	0.019952	3.42	0.102
Residual Error	8	0.04667	0.04667	0.005834		
Lack-of-Fit	6	0.02977	0.02977	0.004961	0.59	0.741
Pure Error	2	0.01690	0.01690	0.008452		
Total	14	0.51390				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 15 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความสึกหรอของมีดกัดก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Vb versus Spindle speed, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Vb

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.100000	0.004564	21.909	0.000
Spindle speed	0.001250	0.002795	0.447	0.670
Feed rate	0.010000	0.002795	3.578	0.012
Depth of cut	-0.013750	0.002795	-4.919	0.003
Spindle speed*Spindle speed	0.002500	0.004114	0.608	0.566
Feed rate*Feed rate	-0.010000	0.004114	-2.431	0.051
Depth of cut*Depth of cut	0.007500	0.004114	1.823	0.118
Spindle speed*Feed rate	-0.007500	0.003953	-1.897	0.107
Feed rate*Depth of cut	-0.007500	0.003953	-1.897	0.107

S = 0.00790569 PRESS = 0.0025
R-Sq = 90.13% R-Sq(adj) = 76.97%

Analysis of Variance for Vb

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	0.003425	0.003425	0.000428	6.85	0.015
Linear	3	0.002325	0.002325	0.000775	12.40	0.006
Square	3	0.000650	0.000650	0.000217	3.47	0.091
Interaction	2	0.000450	0.000450	0.000225	3.60	0.094
Residual Error	6	0.000375	0.000375	0.000063		
Lack-of-Fit	4	0.000175	0.000175	0.000044	0.44	0.782
Pure Error	2	0.000200	0.000200	0.000100		
Total	14	0.003800				

Term	Coef	SE Coef	T	P
------	------	---------	---	---

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์ผลตอบความสึกหรอของมีดกัดหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Vb versus Spindle speed, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Vb

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.101538	0.003623	28.029	0.000
Spindle speed	0.001250	0.002666	0.469	0.653
Feed rate	0.010000	0.002666	3.751	0.007
Depth of cut	-0.013750	0.002666	-5.157	0.001
Feed rate*Feed rate	-0.010192	0.003913	-2.605	0.035
Depth of cut*Depth of cut	0.007308	0.003913	1.868	0.104
Spindle speed*Feed rate	-0.007500	0.003771	-1.989	0.087
Feed rate*Depth of cut	-0.007500	0.003771	-1.989	0.087

S = 0.00754110 PRESS = 0.00186885
R-Sq = 89.52% R-Sq(adj) = 79.05%

Analysis of Variance for Vb

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	7	0.003402	0.003402	0.000486	8.55	0.006
Linear	3	0.002325	0.002325	0.000775	13.63	0.003
Square	2	0.000627	0.000627	0.000313	5.51	0.037
Interaction	2	0.000450	0.000450	0.000225	3.96	0.071
Residual Error	7	0.000398	0.000398	0.000057		
Lack-of-Fit	5	0.000198	0.000198	0.000040	0.40	0.825
Pure Error	2	0.000200	0.000200	0.000100		
Total	14	0.003800				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 17 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสนองส่วนแรงตัดก่อนตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Fx/Fz versus Spindle spee, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.51418	0.015676	32.800	0.000
Spindle speed	0.02342	0.009600	2.439	0.059
Feed rate	0.08787	0.009600	9.154	0.000
Depth of cut	0.06718	0.009600	6.999	0.001
Spindle speed*Spindle speed	0.05477	0.014130	3.876	0.012
Feed rate*Feed rate	-0.08137	0.014130	-5.759	0.002
Depth of cut*Depth of cut	-0.03287	0.014130	-2.326	0.068
Spindle speed*Feed rate	0.01829	0.013576	1.347	0.236
Spindle speed*Depth of cut	-0.06036	0.013576	-4.446	0.007
Feed rate*Depth of cut	-0.05356	0.013576	-3.945	0.011

S = 0.0271519 PRESS = 0.0218413
R-Sq = 97.90% R-Sq(adj) = 94.11%

Analysis of Variance for Fx/Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.171518	0.171518	0.019058	25.85	0.001
Linear	3	0.102268	0.102268	0.034089	46.24	0.000
Square	3	0.041864	0.041864	0.013955	18.93	0.004
Interaction	3	0.027386	0.027386	0.009129	12.38	0.009
Residual Error	5	0.003686	0.003686	0.000737		
Lack-of-Fit	3	0.000985	0.000985	0.000328	0.24	0.862
Pure Error	2	0.002701	0.002701	0.001350		
Total	14	0.175204				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 18 ผลการวิเคราะห์ผลตอบสัดส่วนแรงตัดหลังตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญ

Response Surface Regression: Fx/Fz versus Spindle spee, Feed rate, Depth of cut

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Fx/Fz

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.51418	0.01671	30.776	0.000
Spindle speed	0.02342	0.01023	2.289	0.062
Feed rate	0.08787	0.01023	8.589	0.000
Depth of cut	0.06718	0.01023	6.567	0.001
Spindle speed*Spindle speed	0.05477	0.01506	3.637	0.011
Feed rate*Feed rate	-0.08137	0.01506	-5.403	0.002
Depth of cut*Depth of cut	-0.03287	0.01506	-2.183	0.072
Spindle speed*Depth of cut	-0.06036	0.01447	-4.172	0.006
Feed rate*Depth of cut	-0.05356	0.01447	-3.701	0.010

S = 0.0289377 PRESS = 0.0232279
R-Sq = 97.13% R-Sq(adj) = 93.31%

Analysis of Variance for Fx/Fz

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	8	0.170179	0.170179	0.021272	25.40	0.000
Linear	3	0.102268	0.102268	0.034089	40.71	0.000
Square	3	0.041864	0.041864	0.013955	16.66	0.003
Interaction	2	0.026047	0.026047	0.013024	15.55	0.004
Residual Error	6	0.005024	0.005024	0.000837		
Lack-of-Fit	4	0.002323	0.002323	0.000581	0.43	0.786
Pure Error	2	0.002701	0.002701	0.001350		
Total	14	0.175204				

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

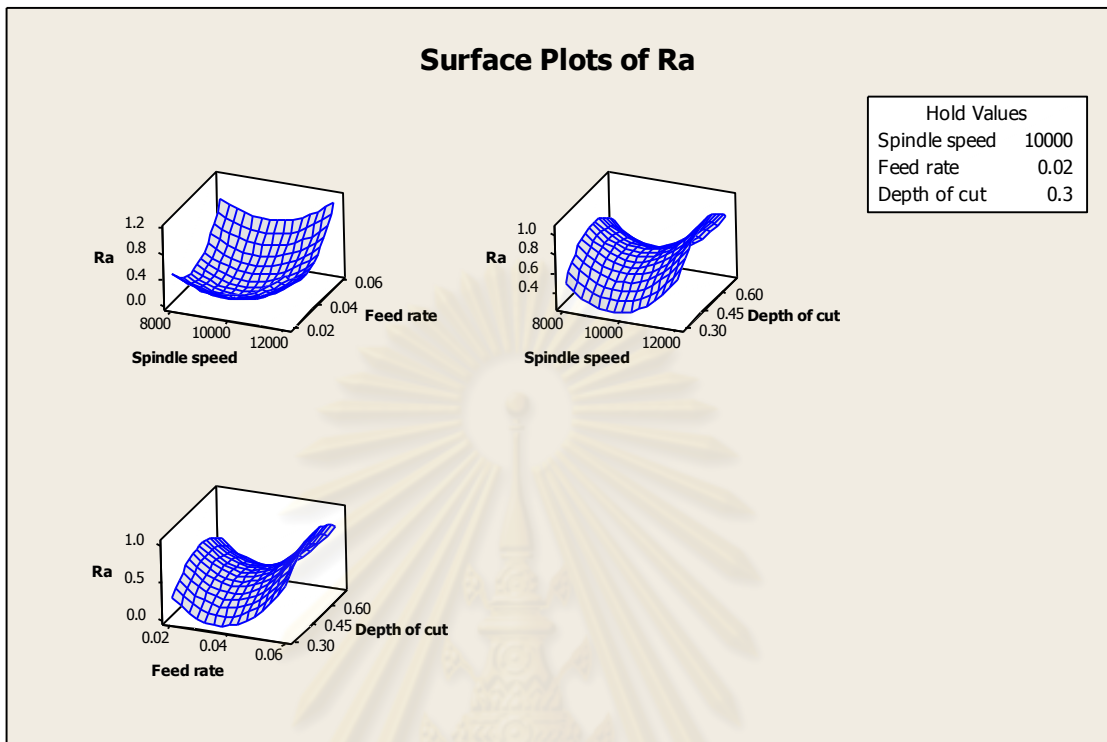


ภาคผนวก ค

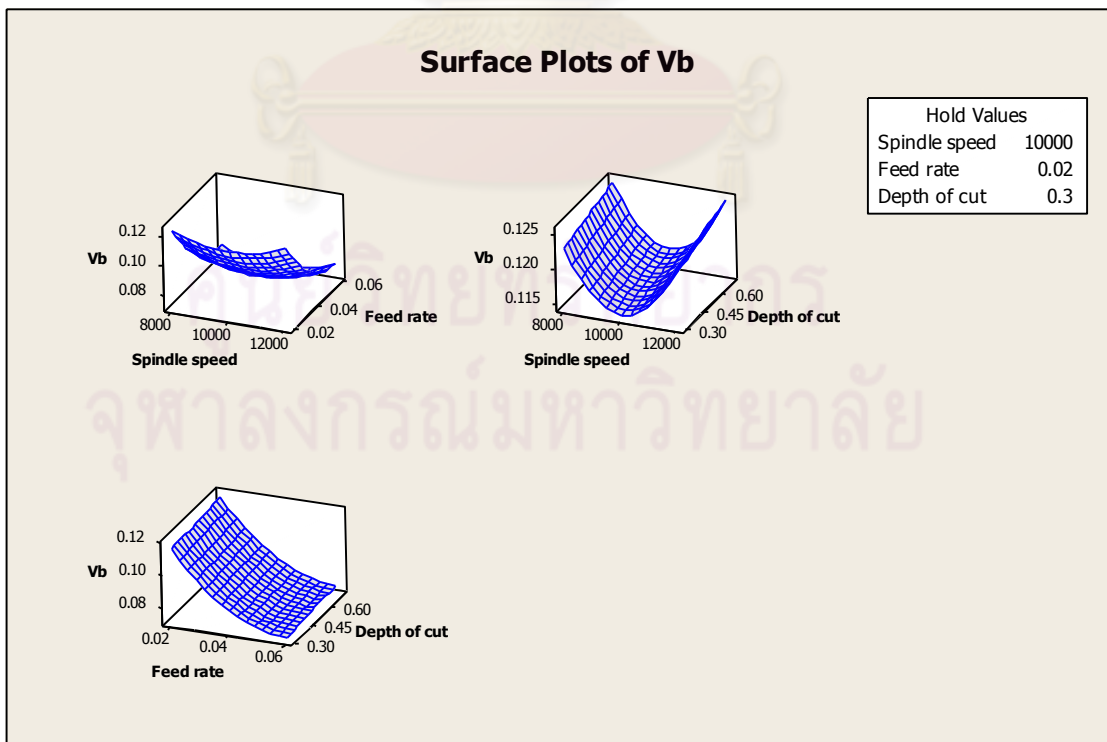
กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ส่งผลต่อผลตอบของการทดลองที่เงื่อนไข
ของการตัดต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

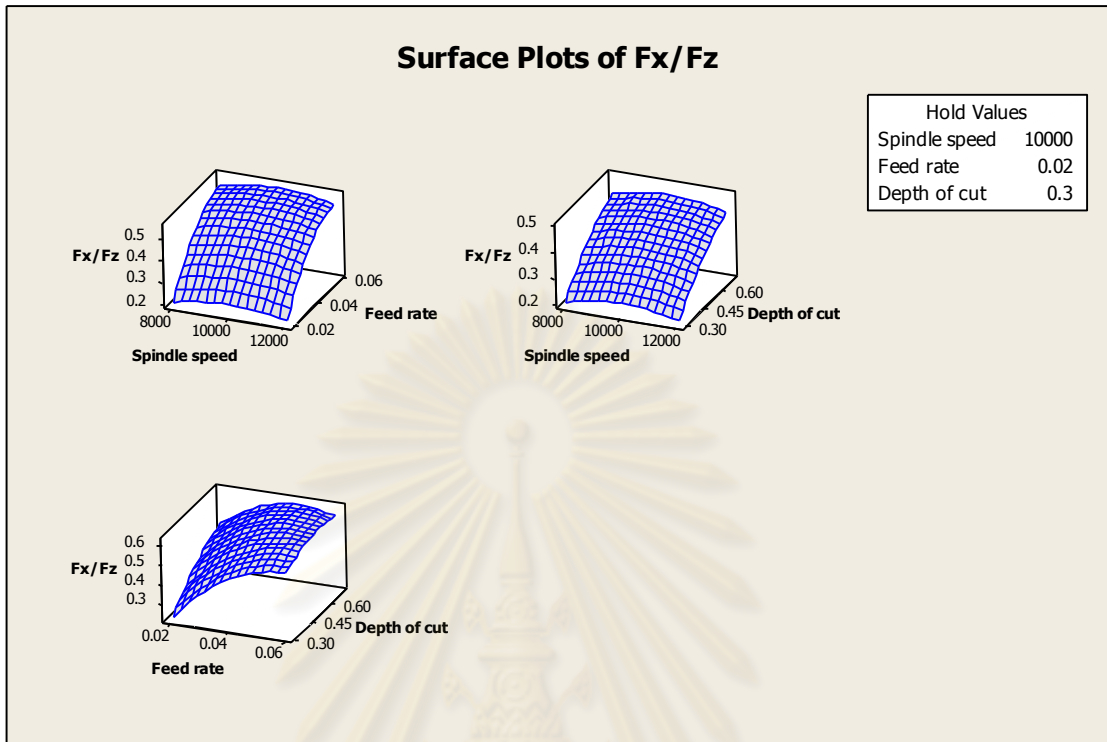
1. เงื่อนไขการตัดแบบเปียก



รูปที่ 1 Surface plot ของผลตอบความเรียบผิวชิ้นงาน



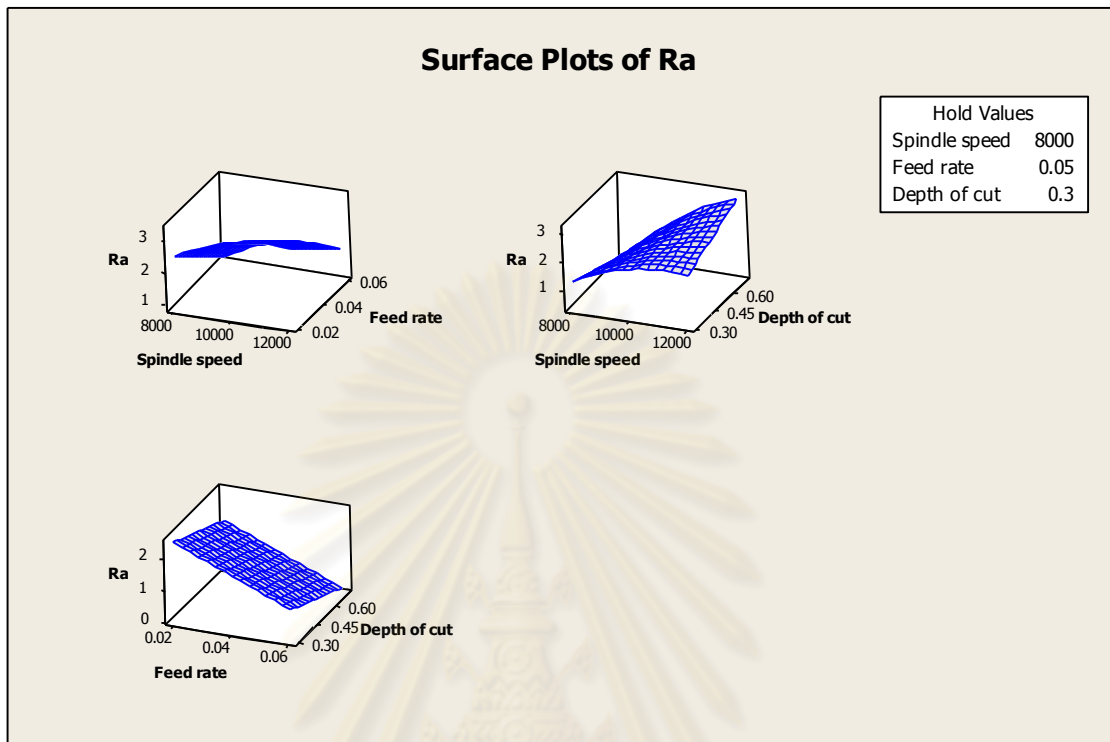
รูปที่ 2 Surface plot ของผลตอบความสีกหรือของมีดกัด



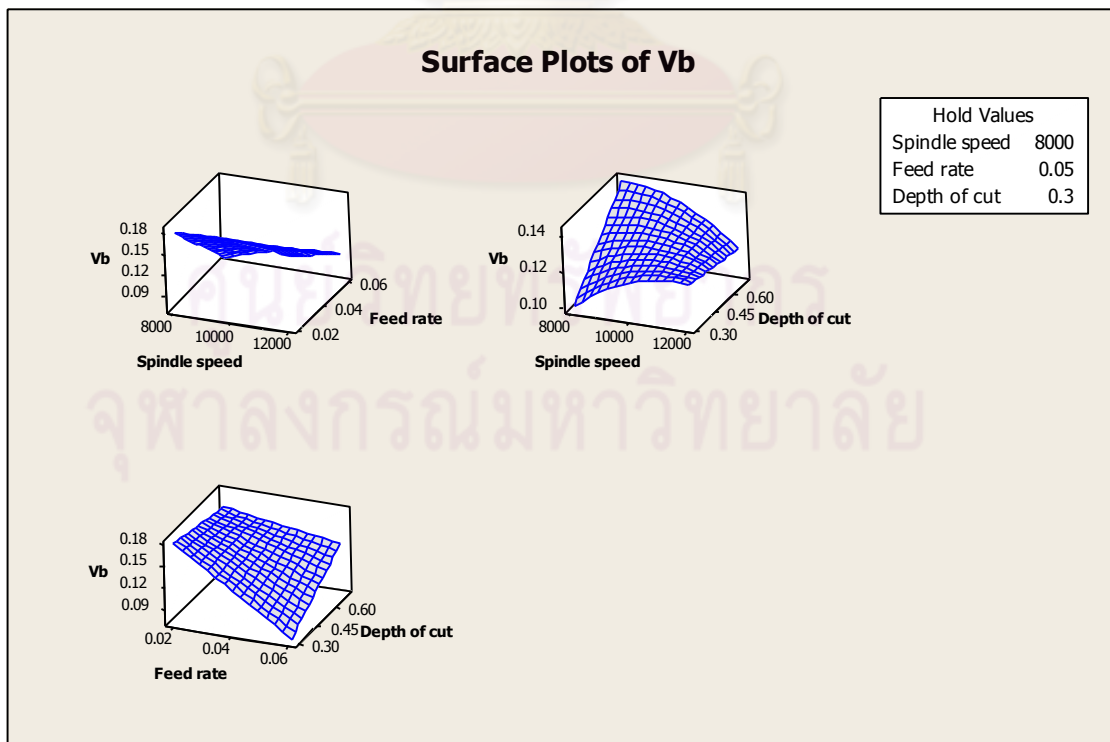
รูปที่ 3 Surface plot ของผลตอบสัดส่วนแรงตัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

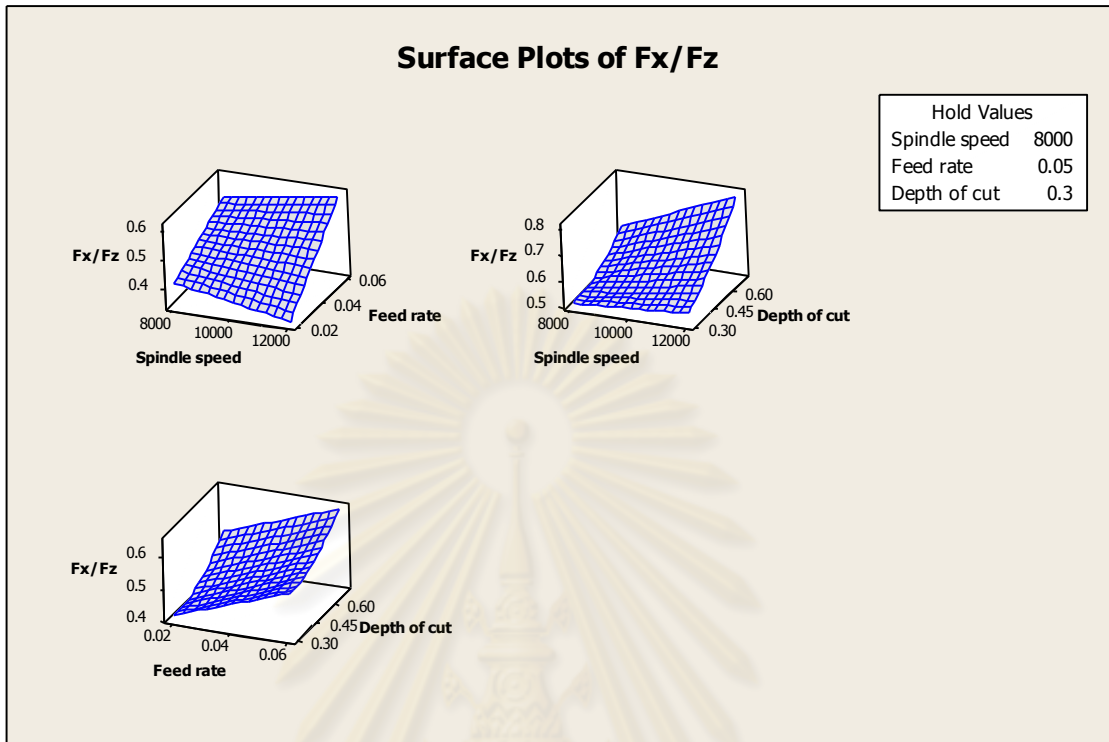
2. เงื่อนไขการตัดแบบแห้ง



รูปที่ 4 Surface plot ของผลตอบความเรียบผิวชิ้นงาน



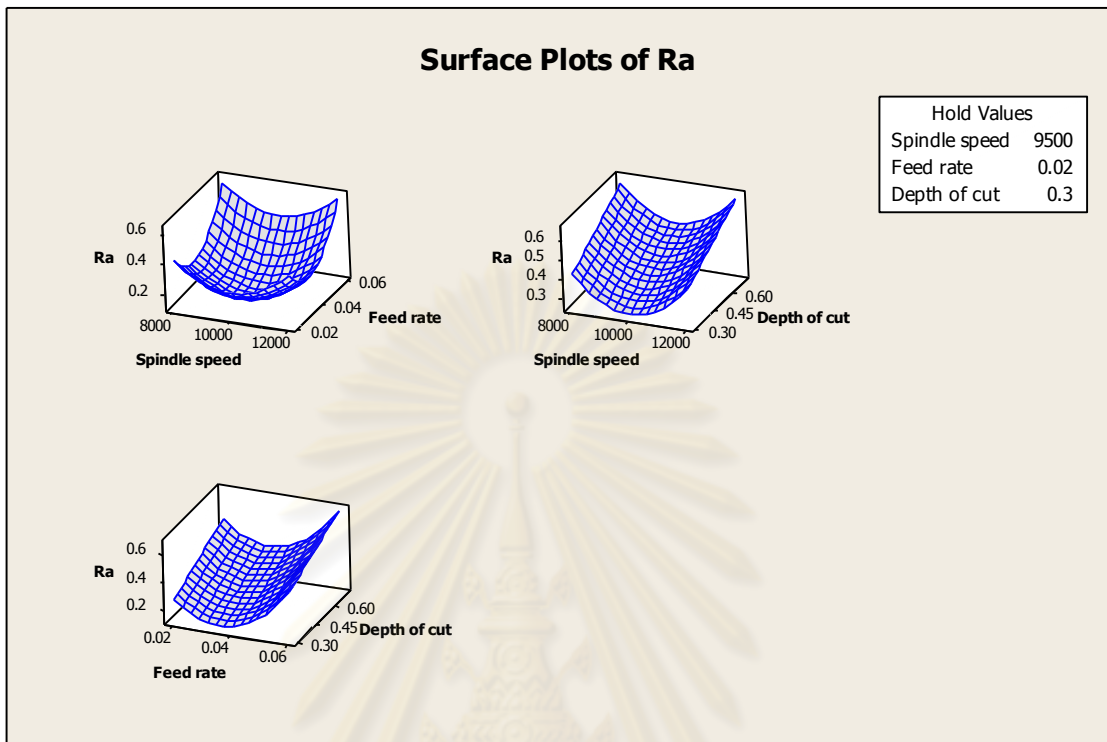
รูปที่ 5 Surface plot ของผลตอบความสึกหรอของมีดกัด



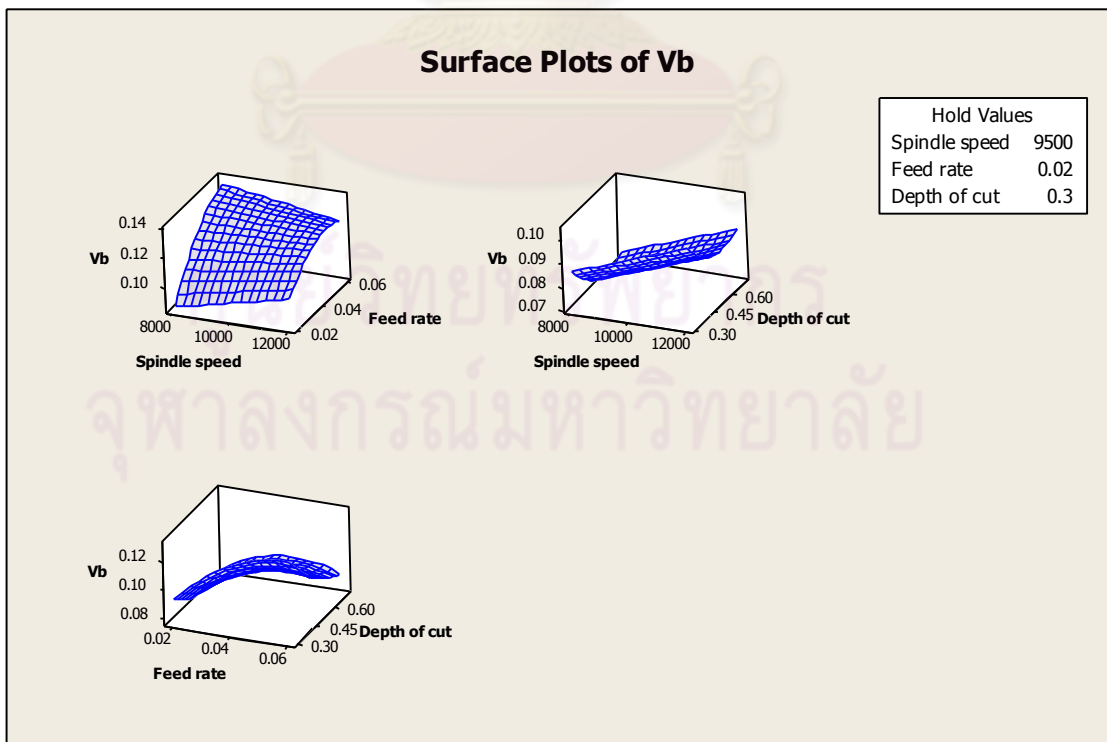
รูปที่ 6 Surface plot ของผลตอบสัดส่วนแรงตัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

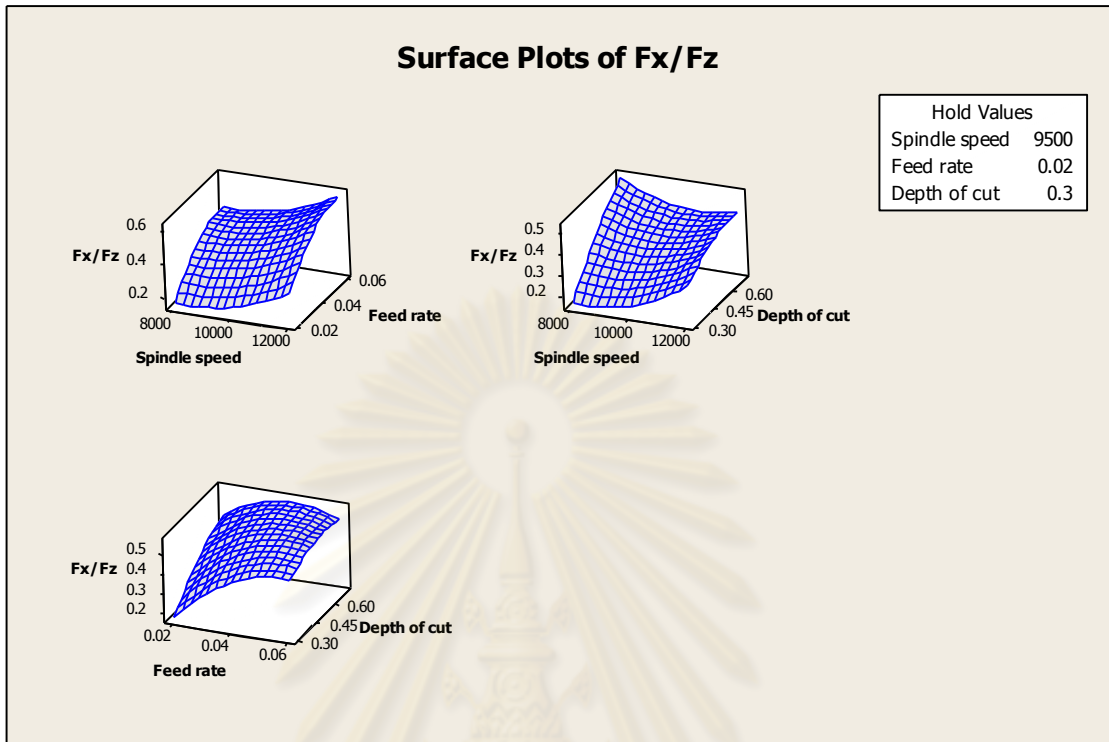
3. เงื่อนไขการตัดโดยใช้สเปรย์สารหล่อเย็น



รูปที่ 7 Surface plot ของผลตอบความเรียบผิวชิ้นงาน



รูปที่ 8 Surface plot ของผลตอบความสึกหรอของมีดกัด



รูปที่ 9 Surface plot ของผลตอบตัดส่วนแรงตัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชาญณรงค์ รุ่งเรือง เกิดวันที่ 21 มิถุนายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดพัทลุง สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2547 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2551



ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย