



การพัฒนาความสามารถในการตัดสำหรับกระบวนการกัดอลูมิเนียมอัลลอยโดยการ
ประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นน้อยที่สุดเพื่อกระบวนการตัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

**Development of the Machinability for the Milling Processes of Aluminum Alloy
by Utilizing the Minimal Quantity Lubrication (MQL) for the Environmentally
Friendly Cutting Process on CNC Machining Center**

โดย
สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

โครงการวิจัยเลขที่ 112G-IE-2553
ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

มีนาคม 2554

การพัฒนาความสามารถในการตัดสำหรับกระบวนการกัดอลูมิเนียมอัลลอย โดยการ
ประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นน้อยที่สุดเพื่อกระบวนการตัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

Development of the Machinability for the Milling Processes of Aluminum Alloy by
Utilizing the Minimal Quantity Lubrication (MQL) for the Environmentally Friendly
Cutting Process on CNC Machining Center

โดย

สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ Dr. Eng. (Kobe University)

โครงการวิจัยเลขที่ 112G-IE-2553
ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2553

คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพฯ
มีนาคม 2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เงินอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การพัฒนาความสามารถในการตัดสำหรับกระบวนการกัดอลูมิเนียมอัลลอย
โดยการประยุกต์ใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด เพื่อกระบวนการตัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

Development of the Machinability for the Milling Processes of Aluminum Alloy by
Utilizing the Minimal Quantity Lubrication (MQL) for the Environmentally Friendly Cutting
Process on CNC Machining Center

โดย

1. รศ.ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตผลิตเจริญ
2. ผศ.อังศุมาลิน เสนจันทร์มิไชย
3. ผศ.ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ
4. รศ.ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย
5. รศ.สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน
6. นาย ชาญณรงค์ รุ่งเรือง
7. น.ส. ดวงตา ละเอียดดี

มีนาคม 2554

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ปีงบประมาณ 2553 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ได้เห็นความสำคัญของงานวิจัยนี้และได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยนี้มาตลอด

ชื่อโครงการวิจัย การพัฒนาความสามารถในการตัดสำหรับกระบวนการกัดอลูมิเนียมอัลลอยโดยการประยุกต์ใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด เพื่อกระบวนการตัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

ชื่อผู้วิจัย รศ.ดร. ลมเกียรติ ตั้งจิตลิตเจริญ

เดือน/ปี ที่เสร็จ มีนาคม 2554

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวัสดุประเภทอลูมิเนียมอัลลอย ได้ถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนสำคัญต่างๆมากมาย โดยเฉพาะชิ้นส่วนประกอบสำหรับรถยนต์ ไม่ว่าจะเป็นตัวถังรถยนต์ชิ้นส่วนประกอบภายในเครื่องยนต์ต่างๆ แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ กระบวนการกัดเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการตัดขึ้นรูปวัสดุ ดังกล่าวให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตาม การสึกหรอของมิดตัดยังเป็นปัญหาหลักในกระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน เนื่องจากการสึกหรอของมิดตัดไม่เพียงส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานแต่ยังทำให้ขนาดและ รูปร่างของชิ้นงานไม่ได้ตามที่ต้องการซึ่งทำให้เกิดอัตราการผลิตต่ำ เนื่องจากการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนมิดตัดใหม่

การใช้สารหล่อเย็น (Cutting fluid) เป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้เพื่อช่วยให้กระบวนการตัดชิ้นส่วนดังกล่าวดีขึ้น และได้คุณภาพตามที่ต้องการ โดยสารหล่อเย็นจะช่วยลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ในขณะที่ตัดรวมถึงลดอัตราการสึกหรอและ เพิ่มอายุการใช้งานของมิดตัดได้อีกด้วย

จากเหตุผลทางด้านต้นทุนและปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่นับวันจะทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น ทำให้มีการ พยายามใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด (Minimal Quantity Lubrication, MQL) เพื่อกระบวนการที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหรือการใช้เทคโนโลยีสะอาดในระหว่างกระบวนการตัดเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดปริมาณการใช้สารหล่อเย็น และลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย อนึ่งการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดในขณะตัดชิ้นงานยังสามารถช่วยให้สารหล่อเย็นเข้าถึงบริเวณที่เกิดความร้อนจากการตัดได้ดีกว่าวิธีปกติ (flooding or wet cutting) เศษโลหะจึงไม่หลอมติดมิดตัดทำให้ประสิทธิภาพในการตัดสูงกว่าเมื่อเทียบกับวิธีปกติ มีผลงานวิจัยมากมายที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการใช้สารหล่อเย็นและได้พัฒนาวิธีการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด[1-10]. อย่างไรก็ตามวิธีการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดมีหลายแบบในกระบวนการตัดซึ่งให้ผลการตัดที่แตกต่างกัน เนื่องจากประสิทธิภาพของการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดจะใช้ได้ดีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน, ชนิดของมิดตัด, ชนิดของสารหล่อเย็นและวิธีการใช้, เครื่องจักรที่ใช้, พารามิเตอร์ในการตัด ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการ

ทดลองเพื่อเปรียบเทียบการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดแบบต่างๆ เพื่อหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมสำหรับการตัดอลูมิเนียมอัลลอย

เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงและเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับกระบวนการตัดขึ้นรูปให้สูงขึ้น ดังนั้นใน การหาสภาวะการตัดที่เหมาะสมของอลูมิเนียมอัลลอยกับการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด จะถูกนำไปทดลองตัดบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ การประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นน้อยที่สุดในงานวิจัยนี้คือการใช้สเปรย์ของสารหล่อเย็นและการใช้ลมเป่า แรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัดจะถูกตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์ เพื่อตรวจสอบความสามารถในการตัดชิ้นงานเมื่อใช้การตัดแบบแห้ง แบบเปียก แบบสเปรย์ของสารหล่อเย็น

สภาวะการตัดที่เหมาะสมจะถูกพิจารณาจากข้อมูล ความเรียบผิวของชิ้นงานกัด อัตราการสึกหรอของมีดตัด ต้นทุนเครื่องมือตัด และแรงตัดที่เกิดขึ้น

Project Title Development of the Machinability for the Milling Processes of Aluminum Alloy by Utilizing the Minimal Quantity Lubrication (MQL) for the Environmentally Friendly Cutting Process on CNC Machining Center

Name of the Investigators Assoc.Prof.Dr.Somkiat Tangjitsitcharoen

Year March 2011

Abstract

Nowadays, the aluminum alloys are most popularly used for the mechanical parts, mainly automotive parts, plastic injection moulds, and hard disk parts. Milling process is one of the important cutting processes, which is used to cutting those materials in order to obtain the shape of the parts as required. However, the tool wear is still the main problems in milling process because it deteriorates not only the machined surfaces quality but also geometrical and accuracy as well as causing the low productivity due to the interruptions of the machining operation to change the new cutting tools.

Generally, the cutting fluids have been used extensively in cutting operation to improve the cutting performance, especially use in the automotive industry. The cutting fluids are applied to cutting operation in various ways to remove the heat at shear zone and friction zone, reduce cutting forces and improve surface finish. Hence, the rate of progress of tool wear decreases, and the life of cutting tool is longer.

For economic and environmental reasons, the extensive researches have been a continuing worldwide trend to minimize or eliminate the use of cutting fluids. This trend has lead to the practice of minimum quantity lubrication (MQL) for the environmentally friendly cutting process or the clean technology with major benefits such as reducing the cost of machining operations and disposal of cutting fluids, delivering the cutting fluid to inaccessible cutting areas, further improving the surface quality. The MQL not only provides environment friendliness but can also improve the machinability characteristics. Extensive research efforts have been devoted so far to investigate the

effects of the cutting fluids and develop the applications of the MQL [1-10]. There are many applications of the MQL used in the cutting process, which give the different results of the cutting performances. However, the effectiveness of the MQL depends on a number of factors, such as the type of machining operations, the cutting tools, the work piece materials, the cutting conditions, and the cutting fluids. It is therefore desirable to know the effects of the different applications of the MQL under any cutting conditions during the cutting process in order to improve the stability of cutting.

In order to obtain the high quality of machined parts, and develop the technology of milling process with the application of the MQL, it is required to examine the machinability of aluminum alloy under various cutting conditions. The CNC Machining Center is employed for the cutting tests. Hence, the aim of this research is to investigate and develop the machinability of the aluminum alloy by applying the MQL with a wide range of cutting conditions in milling process. The application of the MQL used in this research is the spray of cutting fluids and the air blow.

The proper cutting condition is determined based on the data of surface roughness of the machined parts, tool wear rate, cost of cutting tools, and cutting force.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ	II
บทคัดย่อ	III
ABSTRACT	V
สารบัญตาราง.....	XII
สารบัญภาพ	XVI
บทที่ 1	1
บทนำ	1
1.1 บทนำ	1
1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	2
1.3 วัตถุประสงค์	2
1.4 ขอบเขตโครงการวิจัย.....	2
1.5 การดำเนินงานวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนการทดลอง	3
1.7 เกณฑ์การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม	4
1.8 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	4
1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2	7
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 กระบวนการตัด (Machining process) [6]	7
2.2 เงื่อนไขการตัด (Cutting conditions) ในกระบวนการกัด.....	10
2.3 ความเรียบผิวสำเร็จ (Surface finish)	14

2.4 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการตัด (Cutting temperature) [7,8].....	15
2.5 การสึกหรอของมีดตัด (Tool wear).....	16
2.6 อายุของมีดตัด (Tool life) [2,3,6].....	18
2.7 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting material).....	19
2.8 ประเภทของสารหล่อเย็น (Cutting fluids) [9]	20
2.9 ประโยชน์ โทษ และการเลือกใช้สารหล่อเย็น.....	23
2.10 การประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น [7].....	23
2.11 เศษโลหะ [6].....	25
2.12 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ (Model adequacy checking) [11].	26
2.13 การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box – Behnken design) [11]	27
2.14 ทบทวนวรรณกรรม.....	27
บทที่ 3	30
การตัดแบบเป็ยก	30
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับความเรียบของผิวชิ้นงานของการตัดแบบเป็ยก	30
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดในแกนต่าง ๆ ของการตัดแบบเป็ยก.....	33
3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของแรงในการตัดของการตัดแบบเป็ยก	36
3.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวของการตัดแบบเป็ยก	46
3.5 สรุปสมการความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการตัดแบบเป็ยก	54
บทที่ 4	55
การตัดแบบลมเป่า	55
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับความเรียบของผิวชิ้นงาน	55

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับแรงที่เกิดขึ้นขณะตัดในแกนต่าง ๆ ของการตัดแบบลมเป่า	59
4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของแรงที่ใช้ในการตัดของการตัดแบบลมเป่า.....	63
4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่า.....	70
บทที่ 5	78
การตัดแบบละอองสารหล่อเย็น.....	78
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับความเรียบของผิวชิ้นงานของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น	78
5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับแรงที่เกิดขึ้นขณะตัดในแกนต่าง ๆ ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น.....	81
5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของแรงที่ใช้ในการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	85
5.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น	93
บทที่ 6	102
การวิเคราะห์ลักษณะการใช้สารหล่อเย็น	102
6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวและปัจจัยต่างๆ	102
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดและปัจจัยต่างๆ	105
6.3 ความสัมพันธ์ได้สำหรับปัจจัยต่างๆ และตัวแปรตาม	109
บทที่ 7	112
เศษโลหะ	112

7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความเร็วยรอบของการตัดแบบเปียก....	112
7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับอัตราป้อนตัดของการตัดแบบเปียก....	113
7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความลึกตัดของการตัดแบบเปียก.....	114
7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความเร็วยรอบของการตัดแบบลมเป่า..	115
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับอัตราป้อนตัดของการตัดแบบลมเป่า..	116
7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความลึกตัดของการตัดแบบลมเป่า....	117
7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความเร็วยรอบของการตัดแบบละอองของ สารหล่อเย็น.....	118
7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับอัตราป้อนตัดของการตัดแบบละอองของ สารหล่อเย็น.....	119
7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความลึกตัดของการตัดแบบละอองของ สารหล่อเย็น.....	120
บทที่ 8	121
การตรวจวัดสารปนเปื้อนของสารหล่อเย็นในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัด.....	121
8.1 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วยรอบต่างกัน.....	121
8.2 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่อัตราป้อนตัดต่างกัน.....	122
8.3 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัดต่างกัน.....	122
8.4 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่ความเร็วยรอบต่างกัน ...	123
8.5 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่อัตราป้อนตัดต่างกัน ...	124
8.6 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่ความลึกตัดต่างกัน.....	125
8.7 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นที่ความเร็วย รอบต่างกัน	126
8.8 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นที่อัตราป้อน ตัดต่างกัน	127
8.9 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่ความลึกตัดต่างกัน.....	128

8.10 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบต่างๆ	129
บทที่ 9	131
ต้นทุน	131
9.1 การคำนวณต้นทุนในกระบวนการกัก	131
เอกสารอ้างอิง.....	135
ภาคผนวก	138
ภาคผนวก ก.....	139
ภาคผนวก ข.....	140
ภาคผนวก ค	141
ภาคผนวก ง	150
ภาคผนวก จ.....	156

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 รูปเงื่อนไขสำหรับการทดลอง	3
ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดของมิดตัด	17
ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมิดตัด.....	18
ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนของความหยาบผิวและแรงในการตัด แบบเปียก	37
ตารางที่ 3.2 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X ก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ ตัดแบบเปียก	38
ตารางที่ 3.3 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ กัดแบบเปียก	39
ตารางที่ 3.4 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X หลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ กัดแบบเปียก	40
ตารางที่ 3.5 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ กัดแบบเปียก	40
ตารางที่ 3.6 การออกแบบการทดลองต่อความหยาบผิวของการตัดแบบเปียก.....	46
ตารางที่ 3.7 ความแปรปรวนของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัด แบบเปียก	47
ตารางที่ 3.8 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่าน ความเชื่อมั่นของการตัดแบบเปียก.....	47
ตารางที่ 3.9 ความแปรปรวนของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัด แบบเปียก	48

ตารางที่ 3.10 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยابผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่าน ความเชื่อมั่นของการตัดแบบเป็ยก.....	48
ตารางที่ 3.11 ค่าเป้าหมายและขอบบนเพื่อใช้พิจารณาค่าต่ำสุดในพื้นที่ผิวผลตอบ ของการตัดแบบ เป็ยก.....	54
ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดลองความขรุขระผิวและแรงในการตัดแบบลมเป่า.....	63
ตารางที่ 4.2 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X ก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ ตัดแบบลมเป่า.....	64
ตารางที่ 4.3 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ กัดแบบลมเป่า.....	64
ตารางที่ 4.4 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X หลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ กัดแบบลมเป่า.....	65
ตารางที่ 4.5 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ กัดแบบลมเป่า.....	65
ตารางที่ 4.6 การออกแบบการทดลองต่อความหยابผิวของการตัดแบบลมเป่า.....	70
ตารางที่ 4.7 ความแปรปรวนของความหยابผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัด แบบลมเป่า.....	71
ตารางที่ 4.8 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยابผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความ เชื่อมั่นของการตัดแบบลมเป่า.....	71
ตารางที่ 4.9 ความแปรปรวนของความหยابผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัด แบบลมเป่า.....	72
ตารางที่ 4.10 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยابผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความ เชื่อมั่นของการตัดแบบลมเป่า.....	72

ตารางที่ 4.11 ค่าเป้าหมายและขอบบนเพื่อใช้พิจารณาค่าต่ำสุดในพื้นที่ผิวผลตอบของการตัดแบบ ลมเป้า.....	77
ตารางที่ 5.1 การออกแบบการทดลองของความหยาบผิวและแรงในการตัดแบบละอองของสารหล่อ เย็น	85
ตารางที่ 5.2 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X ก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ ตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	86
ตารางที่ 5.3 สมการการถดถอยของพื้นที่ผิวผลตอบก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ กัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	86
ตารางที่ 5.4 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X หลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ กัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	87
ตารางที่ 5.5 สมการถดถอยของพื้นที่ผิวผลตอบหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัด แบบละอองของสารหล่อเย็น	87
ตารางที่ 5.6 การออกแบบการทดลองต่อความหยาบผิวของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น	93
ตารางที่ 5.7 ความแปรปรวนของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัด แบบละอองของสารหล่อเย็น	94
ตารางที่ 5.8 สมการถดถอยของพื้นที่ผิวผลตอบของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความ เชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	94
ตารางที่ 5.9 ความแปรปรวนของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัด แบบละอองของสารหล่อเย็น	95
ตารางที่ 5.10 สมการการถดถอยของพื้นที่ผิวผลตอบของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่าน ความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	95
ตารางที่ 5.11 ค่าเป้าหมายและขอบบนเพื่อใช้พิจารณาค่าต่ำสุดในพื้นที่ผิวผลตอบ ของการตัดแบบ ละอองของสารหล่อเย็น	101

ตารางที่ 6.1 สมการความสัมพันธ์ของการตัดแบบต่าง ๆ.....	110
ตารางที่ 6.2 ค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ค่าความเรียบผิวเกิดต่ำที่สุดของการตัดแบบต่าง ๆ.	110
ตารางที่ 6.3 ค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ค่าความเรียบผิวเกิดต่ำที่สุดร่วมกับแรงที่เกิดขึ้นของ การตัดแบบต่าง ๆ	111
ตารางที่ 9.1 การใช้สารหล่อเย็นสำหรับวิธีการตัดแบบเปียก แบบละออง และแบบลมเป่า.....	131
ตารางที่ 9.2. การเปรียบเทียบปริมาณการใช้สารหล่อเย็นของการตัดแบบต่าง ๆ	132
ตารางที่ 9.3 เปรียบเทียบราคาต้นทุนสารหล่อเย็นของการตัดแบบต่าง ๆ	133

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์สำหรับการวัดและวิเคราะห์แรงตัด	5
รูปที่ 1.2 แสดงการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์และการติดตั้งเครื่องวัดอนุภาค เพื่อตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศจากกระบวนการตัด	5
รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดต่าง ๆ ที่เป็นพื้นฐานสำคัญ	7
รูปที่ 2.2 ชนิดของกระบวนการกัด	8
รูปที่ 2.3 รูปแบบของการกัดแนวราบ	8
รูปที่ 2.4 รูปแบบของการกัดแนวตั้ง	9
รูปที่ 2.5 ทิศทางการกัด	10
รูปที่ 2.6 การตัดในกระบวนการกัด	10
รูปที่ 2.7 การกัดแบบ SLAB MILLING	12
รูปที่ 2.8 การคำนวณเวลาในการตัด	13
รูปที่ 2.9 รายละเอียดของผิวชิ้นงาน	14
รูปที่ 2.10 บริเวณที่เกิดความร้อนขณะตัด	16
รูปที่ 2.11 สัดส่วนความร้อนที่เกิดขณะตัด	16
รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด	19
รูปที่ 2.13 ลักษณะการสึกหรอของมีดกัด	19
รูปที่ 2.14 สัดส่วนการใช้สารหล่อเย็นในประเทศสหรัฐอเมริกา	22
รูปที่ 2.15 การหล่อเย็นแบบเปียก	24
รูปที่ 2.16 การกัดแบบใช้สารหล่อเย็นแบบละออง	24

รูปที่ 2.17 ประเภทของเศษโลหะที่เกิดขึ้นแบ่งตามรูปร่าง	26
รูปที่ 2.18 การออกแบบบอกรอบแบบบอกรี-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร.....	27
รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ.....	30
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ.....	31
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร ความเร็ว รอบ 1,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ	31
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร ความเร็ว รอบ 3,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ	32
รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความลึกตัดต่าง ๆ	32
รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความลึกตัดต่าง ๆ	33
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก.....	34
รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก.....	34
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก.....	35
รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก ...	35

รูปที่ 3.11	เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก ...	36
รูปที่ 3.12	เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก ...	36
รูปที่ 3.13	ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน X (FX) ของการตัดแบบเปียก.....	41
รูปที่ 3.14	ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน X (FX) ของการตัดแบบเปียก.....	42
รูปที่ 3.15	การกระจายตัวของข้อมูลแรงแนวแกน X (FX) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบเปียก	42
รูปที่ 3.16	ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของข้อมูลแรงแนวแกน X (FX) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบเปียก	43
รูปที่ 3.17	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน X (FX) กับความเร็วรอบ (S) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบเปียก.....	43
รูปที่ 3.18	กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบเปียก	44
รูปที่ 3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของ การตัดแบบเปียก.....	44
รูปที่ 3.20	กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบเปียก	45
รูปที่ 3.21	ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิว เฉลี่ยของการตัดแบบเปียก.....	49
รูปที่ 3.22	ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิว เฉลี่ยของการตัดแบบเปียก.....	50

รูปที่ 3.23 การกระจายตัวของข้อมูลความหนาแน่นผิวเฉลี่ยที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบเปียก	50
รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลอง ของการตัดแบบเปียก	51
รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และความเร็รรอบ (S) ของการตัดแบบเปียก.....	51
รูปที่ 3.26 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหนาแน่นผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และความเร็รรอบ (S) ของการตัดแบบเปียก.....	52
รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบเปียก.....	52
รูปที่ 3.28 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหนาแน่นผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบเปียก	53
รูปที่ 3.29 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อพิจารณา ความหนาแน่นผิวเฉลี่ยและตัวแปรต้น ของการตัดแบบเปียก.....	53
รูปที่ 3.30 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบของการตัดแบบเปียก	54
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความหนาแน่นผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความลึก 1 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็รรอบต่าง ๆ.....	55
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความหนาแน่นผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความลึก 0.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็รรอบต่าง ๆ.....	56
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความหนาแน่นผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ความเร็รรอบ 2,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ	57
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความหนาแน่นผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ความเร็รรอบ 2,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ	57
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความหนาแน่นผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความเร็รรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความลึกตัดต่าง ๆ	58

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความลึกตัดต่าง ๆ	58
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า	59
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า	60
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า	60
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า ..	61
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า ..	61
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า ..	62
รูปที่ 4.13 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน X (FX) ของการกัดแบบลมเป่า.....	66
รูปที่ 4.14 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน X (FX) ของการกัดแบบลมเป่า.....	67
รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของข้อมูลแรงแนวแกน X (FX) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบลมเป่า	67
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของข้อมูลแรงแนวแกน X (FX) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบลมเป่า	68
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน X (FX) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อนตัด (F) ของการตัดแบบลมเป่า	68

รูปที่ 4.18 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน X (FX) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อนตัด (F) ของการตัดแบบลมนเป่า.....	69
รูปที่ 4.19 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยابผิวเฉลี่ยของการตัดแบบลมนเป่า.....	73
รูปที่ 4.20 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยابผิวเฉลี่ยของการตัดแบบลมนเป่า.....	74
รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของข้อมูลความหยابผิวเฉลี่ยที่เป็นอิสระต่อกันของการตัดแบบลมนเป่า.....	74
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของการตัดแบบลมนเป่า.....	75
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยابผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบลมนเป่า.....	75
รูปที่ 4.24 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยابผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบลมนเป่า.....	76
รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์หาค่าจุดต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อพิจารณา ความหยابผิวเฉลี่ยและตัวแปรต้นของการตัดแบบลมนเป่า.....	76
รูปที่ 4.26 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบของการตัดแบบลมนเป่า.....	77
รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบความหยابผิวของการตัดแบบละของสารหล่อเย็นที่ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ.....	78
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบความหยابผิวของการตัดแบบละของสารหล่อเย็นที่ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ.....	79
รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบความหยابผิวของการตัดแบบละของสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ที่อัตราป้อนต่าง ๆ.....	79
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบความหยابผิวของการตัดแบบละของสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ที่อัตราป้อนต่าง ๆ.....	80

รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความลึกตัดต่างๆ.....	80
รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความลึกตัดต่างๆ.....	81
รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น	82
รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น	82
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น	83
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น.....	83
รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น.....	84
รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น.....	84
รูปที่ 5.13 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน X (FX) ของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น	88

รูปที่ 5.14 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน X (FX) ของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น	89
รูปที่ 5.15 การกระจายตัวของข้อมูลแรงแนวแกน X (FX) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	89
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของข้อมูลแรงแนวแกน X (FX) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	90
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความเร็วยรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	90
รูปที่ 5.18 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความเร็วยรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น	91
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	91
รูปที่ 5.20 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	92
รูปที่ 5.21 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหนาผิวเฉลี่ยของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	96
รูปที่ 5.22 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหนาผิวเฉลี่ยของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	97
รูปที่ 5.23 การกระจายตัวของข้อมูลความหนาผิวเฉลี่ยที่เป็นอิสระต่อกัน ของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	97
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลอง ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	98

รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	98
รูปที่ 5.26 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหนาแน่นผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	99
รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	99
รูปที่ 5.28 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหนาแน่นผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	100
รูปที่ 5.29 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อพิจารณา ความหนาแน่นผิวเฉลี่ยและตัวแปรต้น ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	100
รูปที่ 5.30 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น.....	101
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นผิว และความเร็วรอบ 1,000 และ 3,000 รอบต่อนาที ของอัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 60 นาที ของการตัดแบบต่าง ๆ.....	102
รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นผิว และความเร็วรอบ 1,000 และ 3,000 รอบต่อนาที ของอัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาที ของการตัดแบบต่าง ๆ.....	102
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นผิว และอัตราป้อน 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ของความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 60 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ.....	103
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นผิว และอัตราป้อน 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ของความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ.....	103

- รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยابผิว และความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรของ ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรที่เวลา 60 นาทีของการ ตัดแบบต่าง ๆ 104
- รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยابผิว และความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรของ ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการ ตัดแบบต่าง ๆ 105
- รูปที่ 6.7 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกนต่างๆ ของการตัดที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตร ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาที 106
- รูปที่ 6.8 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกนต่างๆ ของการตัดที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตร ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาที 106
- รูปที่ 6.9 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกน X (FX) ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบต่าง ๆ ในเวลา ต่าง ๆ 107
- รูปที่ 6.10 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกน X (FX) ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตรา ป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบต่าง ๆ ในเวลา ต่าง ๆ 107
- รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ในการตัดแนวแกน X (FX) และความเร็วรอบ 1,000 และ 3,000 รอบต่อนาทีของอัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่ เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ 108
- รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ในการตัดแนวแกน X (FX) และอัตราป้อน 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบของความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่ เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ 108

รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ในการตัดแนวแกน X (FX) และความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรของความเร็รรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ.....	109
รูปที่ 7.1 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก	112
รูปที่ 7.2 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก	112
รูปที่ 7.3 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก	112
รูปที่ 7.4 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก	112
รูปที่ 7.5 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก.....	113
รูปที่ 7.6 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก.....	113
รูปที่ 7.7 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก.....	113
รูปที่ 7.8 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก.....	113
รูปที่ 7.9 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก	114
รูปที่ 7.10 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็รรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก.....	114

รูปที่ 8.17 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละของ ของสารหล่อเย็น.....	129
รูปที่ 8.18 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละของ ของสารหล่อเย็น.....	129
รูปที่ 8.19 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า130	
รูปที่ 8.20 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 130	
รูปที่ 8.21 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละของ ของสารหล่อเย็น.....	130
รูปที่ 9.1 ต้นทุนในการตัดแบบต่างๆ	134
รูปที่ ง1 วิธีการทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด	159
รูปที่ ง2 วิธีการทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน	160
รูปที่ ง3 ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย	161

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมทั้งในและต่างประเทศพัฒนาอย่างกว้างขวางและรวดเร็ว มีนโยบายรัฐบาลเกิดขึ้นมากมายได้แก่ นโยบายการกระตุ้นเศรษฐกิจในภาพรวมเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นแก่ภาคประชาชนและเอกชนในการลงทุนและการบริโภค ทำให้เกิดโครงการขึ้นมากมายได้แก่ โครงการขยายรถไฟฟ้าใต้ดินและลอยฟ้า โครงการขยายการผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ภายในประเทศ และการสนับสนุนอุตสาหกรรมอื่น ๆ

ด้วยคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการอัดรีด (Extrusion) และสามารถเพิ่มคุณสมบัติความแข็งแรงเมื่อผ่านกระบวนการทางความร้อน มีน้ำหนักเบา ทนทานต่อการผุกร่อน และไม่เป็นสนิม ทำให้ปัจจุบันอลูมิเนียมผสม (Aluminum alloy) ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น Al 6063 ในอุตสาหกรรมการผลิตเฟอร์นิเจอร์ หน้าต่าง บันได ท่อน้ำ ชิ้นส่วนอัดรีดที่ใช้ในสถาปัตยกรรม ชิ้นส่วนภายในเครื่องบิน จรวด ซีปนาวุธ และยังใช้ในชิ้นส่วนรถยนต์อย่างแพร่หลายเพื่อลดน้ำหนักของรถให้น้อยลง นำมาซึ่งการประหยัดเชื้อเพลิง ซึ่งกระบวนการขึ้นรูปที่สำคัญที่ถูกนำมาใช้เพื่อให้ได้รูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการก็คือกระบวนการกัด (Milling process) มีความพยายามอย่างมากที่จะทำให้การผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ มีคุณภาพและผลิตภาพที่สูงที่สุด แต่เนื่องจากการกำจัดเนื้อโลหะในกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการกัดอย่างรวดเร็วทำให้เกิดปัญหาความร้อนสูงส่งผลให้เกิดปัญหาการสึกหรอของมิตดัดซึ่งนอกจากจะทำให้เกิดความขรุขระของผิวงานซึ่งเป็นสาเหตุของชิ้นงานที่มีคุณภาพต่ำกว่ากำหนดแล้ว ยังนำมาซึ่งต้นทุนที่สูงจากการผลิตชิ้นงานที่ผิดพลาด และการเปลี่ยนมิตดัด ทำให้เกิดการหาวิธีการยืดอายุการใช้งานของมิตดัดขึ้น วิธีการลดความร้อนระหว่างการตัดที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ การใช้สารหล่อเย็น (Cutting fluid) โดยสารดังกล่าวจะช่วยลดอุณหภูมิกระบวนการตัด ลดอัตราการสึกหรอของมิตดัดนำมาซึ่งผิวชิ้นงานที่มีคุณภาพดีขึ้น และอายุการใช้งานของมิตดัดที่สูงขึ้น

อย่างไรก็ตามการใช้สารหล่อเย็นปริมาณมากก่อให้เกิดต้นทุนที่สูง และแม้สารหล่อเย็นจะสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ แต่ในที่สุดผู้ใช้จำเป็นต้องทิ้งสารหล่อเย็นนั้นไปตามอายุการใช้งาน สารหล่อเย็นที่ทิ้งไปนี้เองนำมาซึ่งปัญหาสิ่งแวดล้อม ทำให้มีความพยายามลดปริมาณการใช้สารหล่อเย็น ภายใต้แนวคิดการใช้สารหล่อเย็นปริมาณต่ำที่สุด (Minimum Quantity Lubrication,

MQL) ซึ่งนอกจากจะลดต้นทุนและลดปริมาณการใช้สารหล่อเย็นได้ วิธีนี้ยังทำให้สารหล่อเย็นสามารถเข้าถึงบริเวณพื้นผิวการตัดได้ดียิ่งขึ้น นำมาซึ่งผลผลิตภาพและคุณภาพของชิ้นงานสูงขึ้น

นอกเหนือจากการใช้สารหล่อเย็น ยังมีปัจจัยการตัดที่สำคัญที่จะนำมาซึ่งคุณภาพของชิ้นงานที่ดี ได้แก่ ประเภทของกระบวนการตัด ชนิดของมีดตัด ประเภทของวัสดุ เงื่อนไขในการตัด (Cutting condition) และวิธีการประยุกต์การใช้น้ำยาหล่อเย็น การพัฒนากระบวนการกัดจึงถูกนำไปทดสอบความสามารถในการตัดอลูมิเนียมบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ บนเงื่อนไขการตัดต่าง ๆ ภายใต้รูปแบบการใช้สารหล่อเย็นที่แตกต่างกันโดยพิจารณาต้นทุนพร้อมกันไปด้วย ทั้งนี้มีการตรวจติดตามแรงที่ใช้ในการตัดในขณะตัดจริงด้วยเครื่องไดนาโมมิเตอร์

1.2 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

คุณภาพของชิ้นส่วนไม่ได้ตามความต้องการ มีการซ่อมแซมสูงทำให้เสียเวลาในการซ่อมแซมส่ง ผลกระทบต่อกระบวนการประกอบชิ้นส่วนต่างๆเหล่านั้น และทำให้อัตราการผลิตต่ำ สาเหตุเนื่องจากขาด เทคโนโลยีในการตัดที่ถูกต้อง ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงได้เสนอระบบการตรวจติดตามภายในกระบวนการตัด โดยใช้เครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์เข้ามาช่วยตรวจวัดสัญญาณจากแรงตัดที่เกิดขึ้น และนำแรงตัดที่ตรวจวัดได้มาวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงในระหว่างกระบวนการตัดจริง

1.3 วัตถุประสงค์

เพื่อแก้ปัญหาชิ้นส่วนที่ตัดขึ้นรูปแล้วไม่ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการก่อนที่จะถูกนำไปประกอบ เพื่อ พัฒนาเทคโนโลยีในการตัดงานให้ดีขึ้น โดยการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตัดอลูมิเนียมอัลลอยกับการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งเป็นเทคโนโลยีสะอาด และใช้เป็นแนวทางในการลดต้นทุนอันเนื่องมาจากการสึกหรอของมีดตัดและการเปลี่ยนมีดตัดบ่อย

1.4 ขอบเขตโครงการวิจัย

กระบวนการตัดจะเป็นการตัดอลูมิเนียมอัลลอยบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ ด้วยมีดตัด Ball End Mill

1.5 การดำเนินงานวิจัย

ระบบการตรวจติดตามเชิงปัญญาถูกนำมาใช้ในกระบวนการตัดสำหรับชิ้นส่วน โดยใช้เครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์ช่วยในการตรวจวัดแรงตัดที่เกิดขึ้น และนำแรงตัดที่วัดได้มา

วิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิดของเสียในขณะทำการตัด ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียสามารถอธิบายได้จากแรงตัดที่เกิดขึ้นและสามารถแก้อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียได้โดยดูจากแรงตัดที่เกิดขึ้น

การใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้นำมาช่วยในการพัฒนาคุณภาพของชิ้นงานและแก้ปัญหาจากสารปนเปื้อนในอากาศ และรวมถึงต้นทุนของสารหล่อเย็นและการบำบัดน้ำเสีย

เครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์จะถูกติดตั้งอยู่บนซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ เพื่อตรวจวัดแรงตัดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการตัดจริง โดยจะเปรียบเทียบการตัดแบบปัจจุบันและการตัดโดยใช้ ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด แรงตัดที่วัดได้จะถูกนำมาวิเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขการตัดที่หลากหลายเพื่อหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุดต่อวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วน โดยมีเกณฑ์ที่ใช้ในการเลือกคือความเรียบผิวของ ชิ้นงาน ความกลมของชิ้นงาน รูปร่างของชิ้นงาน อัตราการสึกหรอของมีดตัด อายุเครื่องมือตัด แรงตัดที่เกิดขึ้น และปริมาณสารหล่อเย็นในอากาศ

สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

เงื่อนไขการตัดของการทดลอง ประกอบด้วย ความเร็วรอบ อัตราป้อนตัด และความลึก โดยมีกำหนดค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 1.1 และทำการทดลองแบบเปียก แบบละอองของสารหล่อเย็น และแบบลมเป่าเพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลต่อไป

ตารางที่ 1.1 สรุปลักษณะสำหรับการทดลอง

เงื่อนไข ชนิดการใช้สารหล่อเย็น	ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)			อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตร/รอบ)			ความลึกการตัด (มิลลิเมตร)		
แบบเปียก	1,000	2,000	3,000	0.01	0.02	0.03	0.5	1.0	1.5
แบบละอองของสารหล่อเย็น									
แบบลมเป่า									

1.6 ขั้นตอนการทดลอง

- ศึกษาและตรวจสอบปัจจัยในกระบวนการกัดอลูมิเนียมที่คาดว่าจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงาน

2. ออกแบบการทดลองและกำหนดเงื่อนไขการตัดที่คาดว่าจะมีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานอลูมิเนียม รวมถึงการออกแบบติดตั้งเครื่องมือตรวจปริมาณสารหล่อเย็นที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศและเครื่องมือวัดแรงตัดไดนาโมมิเตอร์
3. ทำการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยและวิเคราะห์ผลการตัดสำหรับเงื่อนไขการตัดแบบใช้สารหล่อเย็นหรือการตัดแบบเปียก การตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น และการตัดแบบลมเป่าบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์สำหรับชิ้นงานเหล็กกล้า
4. ทำรายงานสรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง รวมถึงข้อเสนอแนะในการตัดแบบเปียกบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์สำหรับชิ้นงานอลูมิเนียม
5. วิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมของการตัดแบบเปียก โดยพิจารณาจากค่าความเรียบผิว การสึกหรอของมีดตัด ปริมาณสารหล่อเย็นที่ปนเปื้อนอยู่ในอากาศ ต้นทุนสารหล่อเย็น และความสามารถในการตัดชิ้นงานอลูมิเนียม
6. ทำรายงานเพื่อสรุปผลการทดลองและวิเคราะห์ผลโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์เบห์นเคน (Box-Behnken design) รวมถึงข้อเสนอแนะในส่วนของการใช้เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์สำหรับการตัดชิ้นงานอลูมิเนียม เพื่อนำเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นได้ในกระบวนการตัด โดยการประยุกต์ใช้การตรวจติดตามภายในกระบวนการตัดไปใช้จริงในโรงงานผลิตชิ้นส่วน

1.7 เกณฑ์การเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม

พิจารณาความหยาบผิวของชิ้นงานหลังการตัด โดยตามตารางคุณภาพชิ้นงานหลังกระบวนการแมชชีนนิ่งแบบการกัด กำหนดให้ค่าความหยาบผิวที่ยอมรับได้คือช่วงความหยาบผิวเฉลี่ย 0.15 ถึง 0.9 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นช่วงความหยาบผิวของงานคุณภาพสูง อีกส่วนหนึ่งของเกณฑ์ในการเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม คือ ต้นทุนของสารหล่อเย็นที่ต่ำที่สุด

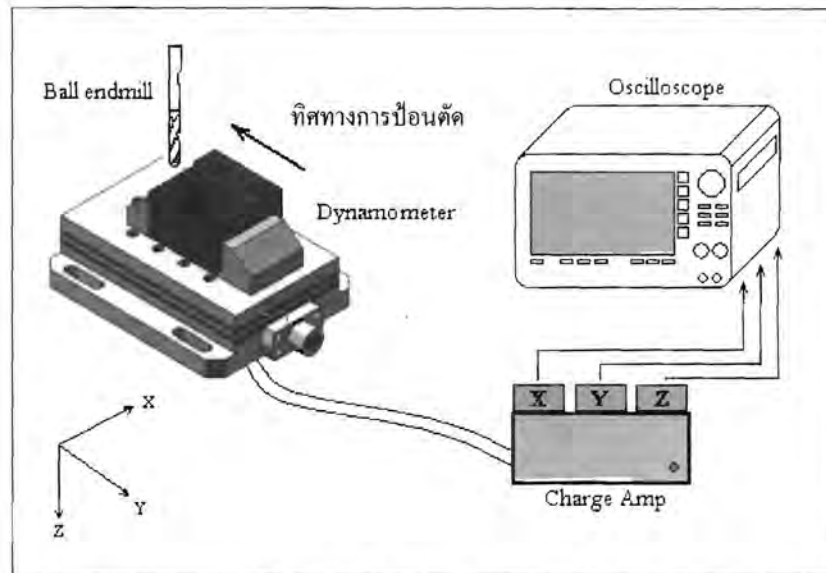
1.8 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1.8.1 การเตรียมเครื่องมือวัดแรงตัดสำหรับการตัด

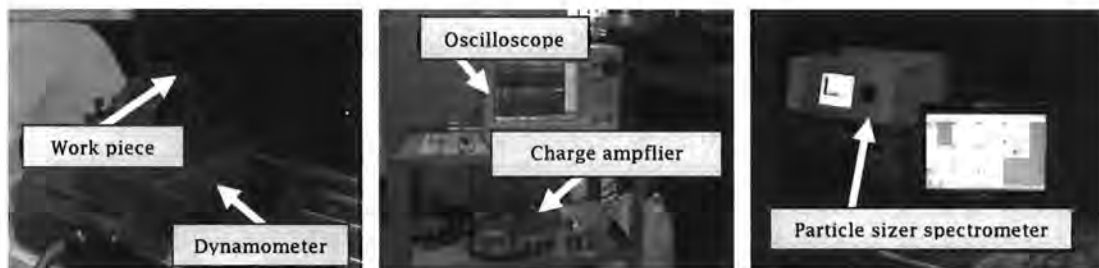
การเตรียมเครื่องมือวัดแรงตัดสำหรับการตัดในระหว่างกระบวนการตัดสามารถอธิบายได้ดังนี้

1. ติดตั้งไดนาโมมิเตอร์ที่โต๊ะงานของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์
2. ต่อสายเซนเซอร์ของไดนาโมมิเตอร์เข้ากับ Charge amplifier

3. ต่อสายเข้าเครื่องวัด High speed oscilloscope recorder
4. ติดตั้งเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer



รูปที่ 1.1 แสดงการติดตั้งไดนามิเตอร์สำหรับการวัดและวิเคราะห์แรงตัด



รูปที่ 1.2 แสดงการติดตั้งไดนามิเตอร์บนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์และการติดตั้งเครื่องวัดอนุภาค เพื่อตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศจากกระบวนการตัด



รูปที่ 1.3 แสดงจุดวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศด้วยเครื่องวัดอนุภาคจากเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

1.8 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ชนิด 5 แกน ยี่ห้อ MAZAK รุ่น Variaxis 500-5X
2. เครื่อง Oscilloscope ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น DL750
3. ไดนาโมมิเตอร์ ยี่ห้อ Kistler Type 9257B
4. สารหล่อเย็น ยี่ห้อ Castrol clearedge EP 690
5. Charge amplifier ยี่ห้อ Kistler Type 5073
6. Surface roughness tester ยี่ห้อ TSK รุ่น Surfcom 1400D-12
7. Aerodynamic particle sizer spectrometer ยี่ห้อ TSI Model 3321
8. Microscope ยี่ห้อ KEYENCE Model VHX 600

1.9 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การเผยแพร่ในวารสาร จดสิทธิบัตร ฯลฯ และหน่วยงานที่เกี่ยวข้องนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ และบทความวิชาการจำนวน 2 ฉบับ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการตัด (Machining process) [6]

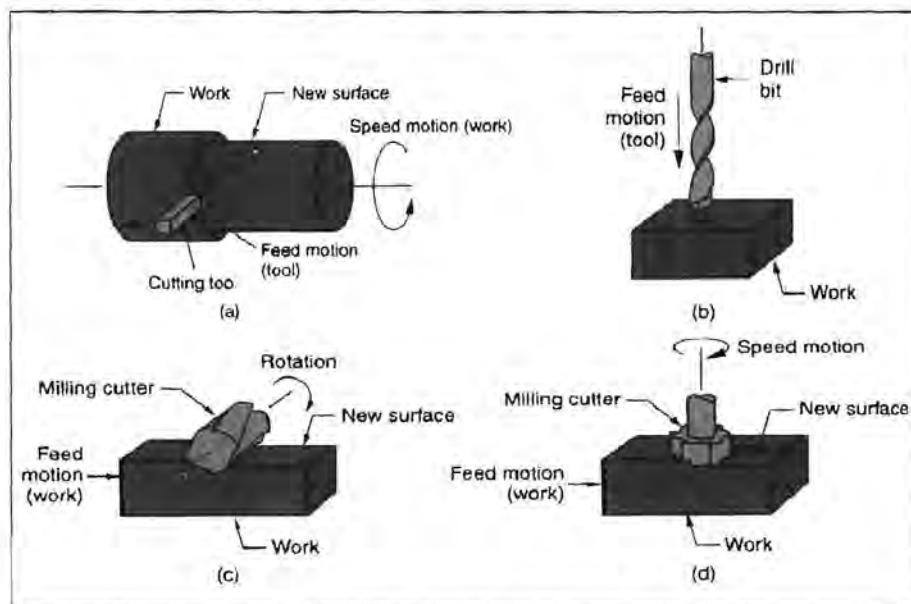
กระบวนการตัด หมายถึง การใช้เครื่องมือตัดเพื่อกำจัดส่วนเกินของเนื้อวัสดุเพื่อให้ได้ขนาดและรูปร่างของชิ้นงานตามที่ต้องการ กระบวนการตัดเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญทั้งเชิงพาณิชย์และเทคโนโลยี

ข้อดี

- 1) ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท
- 2) สร้างชิ้นงานขนาดและรูปร่างต่างๆ
- 3) มีความแม่นยำสูง
- 4) ผิวชิ้นงานสุดท้ายมีคุณภาพดี

ข้อเสีย

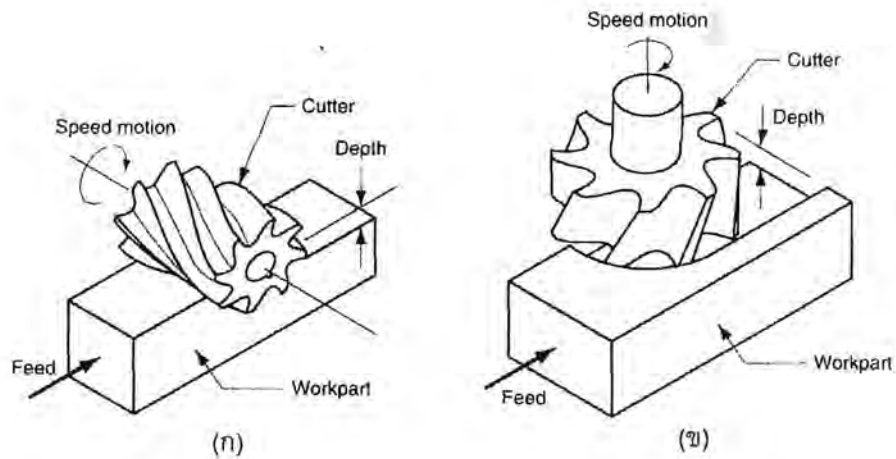
- 1) มีเศษวัสดุที่ต้องทิ้งมาก
- 2) ใช้เวลาในการตัดนาน



รูปที่ 2.1 กระบวนการตัดต่างๆ ที่เป็นพื้นฐานสำคัญ

2.1.1 ชนิดของกระบวนการกัด

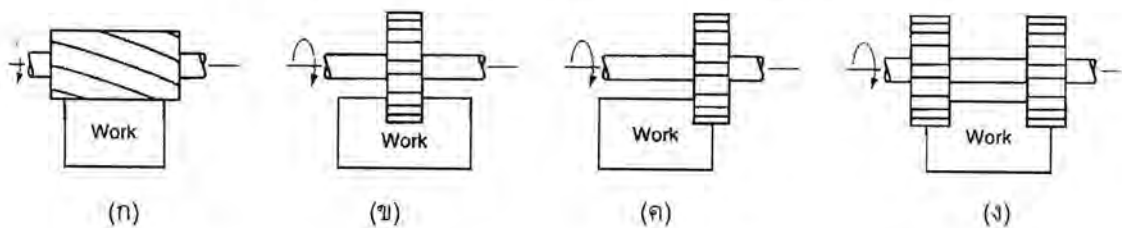
ประกอบด้วย 2 ลักษณะ คือ การกัดแนวราบ และการกัดแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ชนิดของกระบวนการกัด ก) การกัดแนวราบ ข) การกัดแนวตั้ง

การกัดแนวราบ (Peripheral milling or plain milling) คือ การกัดที่มีแกนหมุนขนานกับพื้นผิวชิ้นงาน และบริเวณตัด คือ ส่วนเส้นรอบวงของมีดตัด แบ่งออกเป็น

- Slab milling การกัดแนวราบที่มีมีดตัดกว้างกว่าชิ้นงานทั้งสองด้าน
- Slot milling การกัดแนวราบที่มีมีดตัดแคบกว่าชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นช่อง (Slot)
- Side milling การกัดแนวราบที่มีมีดตัดตัดด้านข้างของชิ้นงาน
- Straddle milling เหมือนกับการกัดด้านข้างแต่กระทำกับทั้งสองด้าน

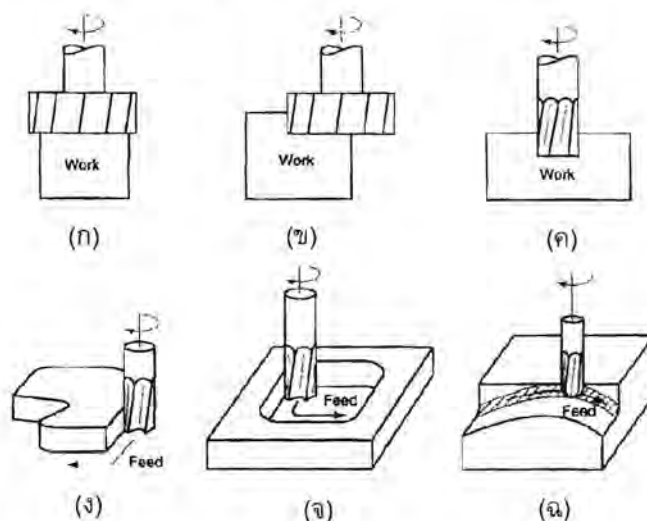


รูปที่ 2.3 รูปแบบของการกัดแนวราบ (ก) Slab milling (ข) Slot milling (ค) Side milling (ง) Straddle milling

การกัดแนวตั้ง (Face milling or end milling) คือ การกัดที่มีแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นผิวชิ้นงาน และกระบวนการกัดเกิดขึ้นบริเวณเส้นรอบวงของมีดตัด แบ่งออกเป็น

- Conventional face milling การกัดแนวตั้งที่มีมีดตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความกว้างชิ้นงาน
- Partial face milling การกัดแนวตั้งที่กระทำกับชิ้นงานเพียงด้านเดียว

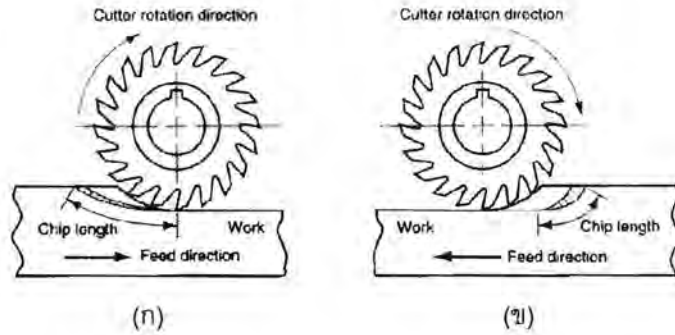
- End milling การกัดแนวตั้งที่มีเม็ดตัดมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าผิวชิ้นงาน
- Profile milling การกัดแนวตั้งที่มีเม็ดตัดกระทำต่อขอบด้านนอกของชิ้นงาน
- Pocket milling การกัดแนวตั้งที่มีเม็ดตัดเจาะรูและกัดชิ้นงานให้เรียบ
- Surface contouring การกัดแนวตั้งด้วยเม็ดตัดหัวบอลกระทำผิวเกิดเป็นส่วนโค้งสามมิติ



รูปที่ 2.4 รูปแบบของการกัดแนวตั้ง (ก) Conventional face milling (ข) Partial face milling (ค) End milling (ง) Profile milling (จ) Pocket milling (ฉ) Surface contouring

2.1.2 ทิศทางการกัด

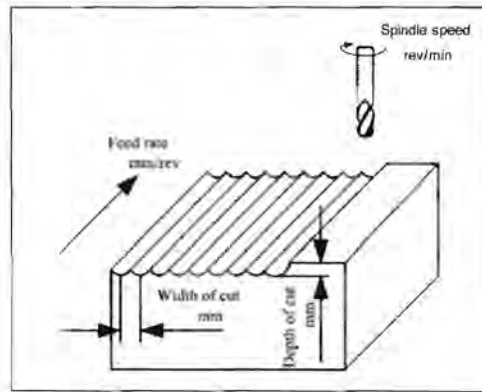
- 1) Up milling (Conventional milling): ทิศทางเม็ดตัดตรงข้ามกับทิศทางป้อนตัด ซึ่งจะทำให้เกิดเศษโลหะลักษณะบางไปหนา ผิวชิ้นงานขรุขระน้อยกว่าการกัดลง
- 2) Down milling (Climb milling): ทิศทางเม็ดตัดไปทางเดียวกับทิศทางป้อนตัดซึ่งจะทำให้เกิดเศษโลหะลักษณะหนาไปบาง มีความยาวน้อยกว่าการกัดขึ้น



รูปที่ 2.5 ทิศทางการกัด (ก) Up milling (ข) Down milling [6]

2.2 เงื่อนไขการตัด (Cutting conditions) ในกระบวนการกัด

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการตัดจะประกอบด้วยปัจจัยต่างๆ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้
รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการสำหรับงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.6 การตัดในกระบวนการกัด

1) ความเร็วการตัด (Cutting speed, v) คำนวณได้จาก

$$v = \frac{\pi \times D \times N}{1000} \tag{2.1}$$

หน่วย มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

N คือ ความเร็วรอบในการตัด (รอบต่อนาที)

2) ความเร็วรอบในการตัด (Spindle rotation speed, N) คำนวณได้จาก

$$N = \frac{1000v}{\pi \times D} \quad (2.2)$$

หน่วย รอบต่อนาที

เมื่อ v คือ ความเร็วในการตัด (มิลลิเมตรต่อนาที)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

3) อัตราป้อน (Feed rate, f_r) คำนวณได้จาก

$$f_r = N \times n_r \times f \quad (2.3)$$

หน่วย มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อ N คือ ความเร็วรอบในการตัด (รอบต่อนาที)
 n_r คือ จำนวนฟันของมีดตัด
 f คือ การป้อนกัดต่อฟัน (Chip load) (มิลลิเมตรต่อฟัน)

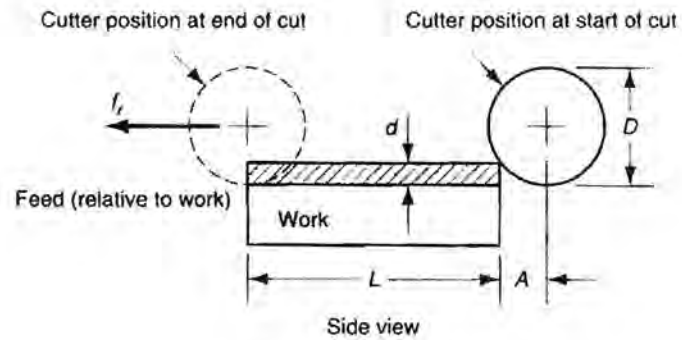
4) อัตราการกำจัดเนื้อโลหะในระบบการกัด (R_{MR}) แบบ Slab milling ดังรูปที่ 2.7
 คำนวณได้จาก

$$R_{MR} = w \times d \times f_r \quad (2.4)$$

หน่วย ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที

เมื่อ w คือ ความกว้างของชิ้นงาน (มิลลิเมตร)
 d คือ ความลึกในการกัด (มิลลิเมตร)
 f_r คือ อัตราป้อน (Feed rate) (มิลลิเมตรต่อนาที)

สมการที่ 2.4 สามารถปรับใช้กับ end milling, side milling, face milling และการกัดแบบอื่น โดยการคำนวณพื้นที่ผิวการตัด



รูปที่ 2.7 การกัดแบบ Slab milling

5) เวลาในการกัด (T_m)

1) สำหรับ Slab milling ต้องคำนวณระยะทางเข้าตัด (A) ที่จะเข้าถึงความลึกมีดทั้งหมดจากสมการ

$$A = \sqrt{d(D-d)} \tag{2.5}$$

	หน่วย	มิลลิเมตร	
เมื่อ	d	คือ ความลึกในการตัด	(มิลลิเมตร)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด	(มิลลิเมตร)

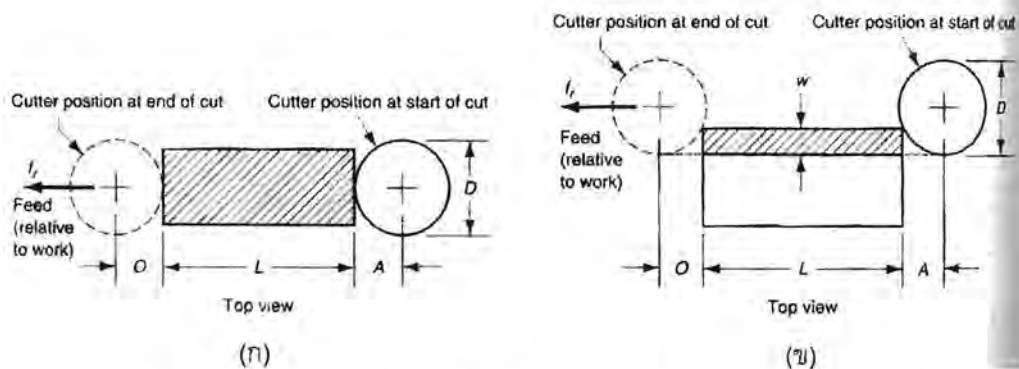
สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการตัด (T_m) ได้จาก

$$T_m = \frac{L+A}{f_r} \tag{2.6}$$

		หน่วย	นาที
เมื่อ	L	คือ ความยาวของชิ้นงาน	(มิลลิเมตร)
	A	คือ ระยะเข้าตัด	(มิลลิเมตร)
	f_r	คือ อัตราป้อน (Feed rate)	(มิลลิเมตรต่อนาที)

2) สำหรับการตัดแนวตั้ง หรือการกัดผิวหน้า (Face milling) แยกได้เป็นสองกรณี ดัง

รูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การคำนวณเวลาในการตัด (ก) กรณีที่ 1 (ข) กรณีที่ 2

กรณีที่ 1 เส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดของมีดตัดโตกว่าชิ้นงาน (ระยะ A และ O มีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของเส้นผ่านศูนย์กลางมีดตัด) นั่นคือ

$$A = O = \frac{D}{2} \quad (2.7)$$

หน่วย นาที่

เมื่อ D คือ ผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

กรณีที่ 2 เมื่อมีดตัดอยู่ในตำแหน่งที่เกินออกมาจากด้านหนึ่ง และตัดชิ้นงานลึกเข้าไป (w) จะคำนวณระยะเข้า และออกของการตัดได้จาก

$$A = O = \sqrt{w(D - w)} \quad (2.8)$$

หน่วย นาที่

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด (มิลลิเมตร)

w คือ ความกว้างการตัดชิ้นงาน (มิลลิเมตร)

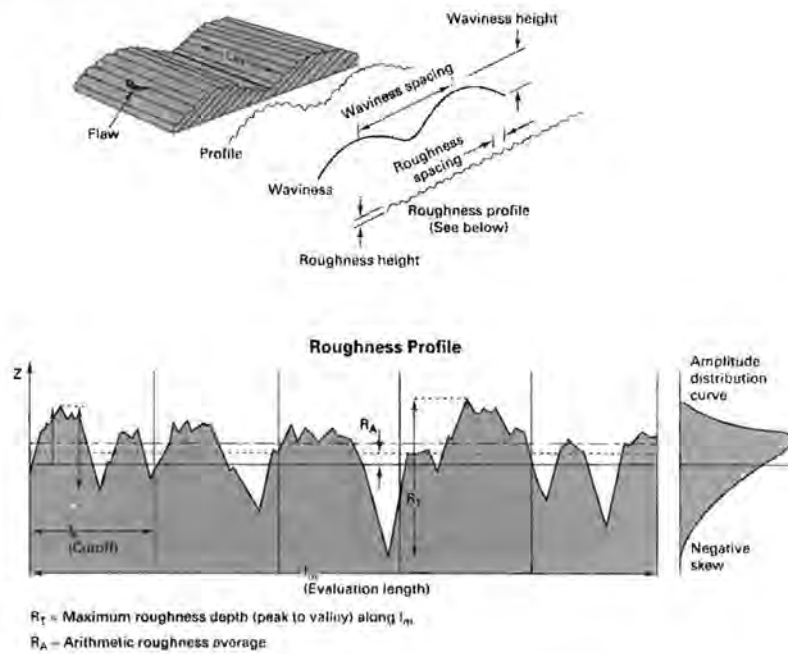
สามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการตัด (T_m) ของทั้ง 2 กรณีได้จาก

$$T_m = \frac{L + 2A}{f_r} \quad (2.9)$$

หน่วย	นาที่		
เมื่อ	L	คือ ความยาวของชิ้นงาน	(มิลลิเมตร)
	A	คือ ระยะเข้าตัด	(มิลลิเมตร)
	f_r	คือ อัตราป้อน (Feed rate)	(มิลลิเมตรต่อนาที)

2.3 ความเรียบผิวสำเร็จ (Surface finish)

กระบวนการตัดถูกนำมาใช้เพื่อผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะและขนาดตามที่ต้องการ โดยการเอาเนื้อของชิ้นงานที่เกินจากที่ต้องการออกในรูปแบบของเศษโลหะ (Chip) ผิวชิ้นงานที่ได้จะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ลักษณะของผิวสำเร็จจะแสดงในรูปของคุณสมบัติที่จะกล่าวดังต่อไปนี้ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 รายละเอียดของผิวชิ้นงาน

ลักษณะของความเรียบผิว (Surface finish) จะแสดงในรูปของคุณสมบัติของผิวชิ้นงานที่จะกล่าวดังต่อไปนี้

- 1) ความขรุขระ (Roughness): จะประกอบไปด้วยช่องว่างขนาดเล็กและละเอียดที่ชิดกันหลายๆช่อง สาเหตุหลักเกิดจากรอยที่เหลือไว้จากการทำดำนานี้ด้วยเครื่องมือตัด ความสูงเฉลี่ยหรือความลึกเฉลี่ยถูกวัดโดยกำหนดช่วงความยาวหนึ่งเรียกว่า "cutoff length" หรือ "roughness sampling length"

- 2) รอยคลื่น (Waviness): ประกอบไปด้วยรอยขรุขระบนชิ้นงานซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า "roughness sampling length" (ประมาณ 1 ไมครอน) สาเหตุเกิดจากการสั่นหรือมีรอยตำหนิบนชิ้นงานหรือ มีดตัดที่เกิดจากรับภาระในการตัดมากและอุณหภูมิในการตัด
- 3) รอยตำหนิยาว (Lay): เป็นรอยตำหนิที่เป็นทิศทางยาว มักจะขึ้นกับทิศทางของชิ้นงานและมีดตัด รวมทั้งการเคลื่อนที่ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัด
- 4) รอยตำหนิขุ่น (Surface flaw): เป็นรอยตำหนิที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม สาเหตุเกิดมาจากรอยตำหนิที่มีมาแต่แรกแล้ว เช่นรอยร้าว ฟองอากาศ
- 5) ความเรียบผิว (Surface finish) มีความสำคัญต่อการสวมประกอบและการจัดวางของชิ้นงาน การสวมประกอบและการจัดวางต่างๆจะเกิดขึ้นได้ก็ต้องอาศัยการทาสีหรือทำตำหนิเข้าช่วย บางทีก็ใช้เป็นลักษณะก๊าซหรือของไหลไหลผ่าน บางทีก็ใช้สายตาดูโดยอาศัยความมันวาวของชิ้นงาน บางทีก็ใช้แสงที่มีคุณสมบัติการสะท้อนได้สูง

ความเรียบผิวสำเร็จมีผลมาจากพารามิเตอร์ในการตัดหลายอย่างซึ่งรวมถึงรูปทรงของมีดตัด รูปทรงของชิ้นงาน ความแข็งแรงของเครื่องจักร วัสดุชิ้นงาน ปัจจัยในการตัด และวัสดุมีดตัดโดยทั่วไปแล้ว ค่าความหยาบผิวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของอัตราการป้อนตัดและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัดได้ ซึ่งค่าความหยาบผิว (R_t) ทางทฤษฎีสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

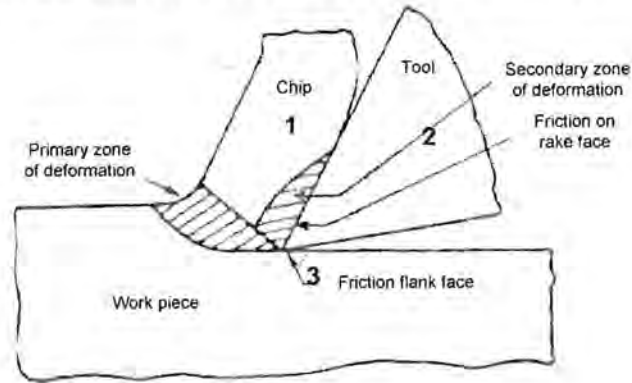
$$R_t = \frac{0.125f^2}{\frac{D}{2} \pm \frac{f \times n}{\pi}} \quad (2.10)$$

	หน่วย	มิลลิเมตร	
เมื่อ	f	คือ อัตราการป้อนตัด	(มิลลิเมตร/ฟัน)
	D	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมีดกัด	(มิลลิเมตร)
	n	คือ จำนวนฟันของดอกกัด	
โดย	เครื่องหมาย +	หมายถึงการกัดแบบ Up milling	
	เครื่องหมาย -	หมายถึงการกัดแบบ Down milling	

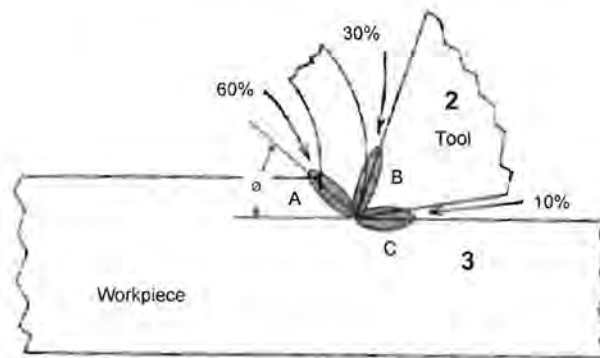
2.4 ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการตัด (Cutting temperature) [7,8]

กระบวนการตัดโลหะจะทำให้บริเวณการตัดที่ 1 และ 2 เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก (Plastic deformation) ผลกระทบจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกจะทำให้เกิดความร้อนบริเวณ

การตัดที่ 2 เป็นการเสียดสีของเศษโลหะบนผิวคายของมีดตัด ส่วนบริเวณการตัดที่ 3 คือการเสียดสีระหว่างชิ้นงานกับผิวหลับ แหล่งที่มาของความร้อนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.10 และรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.10 บริเวณที่เกิดความร้อนขณะตัด



รูปที่ 2.11 สัดส่วนความร้อนที่เกิดขณะตัด

จากพลังงานที่ใช้ไปในกระบวนการตัดโลหะพบว่า 60% จะถูกใช้ในการเปลี่ยนรูปบริเวณการตัดลำดับที่ 1 และการตัดลำดับที่ 2 อีก 30% จะเสียพลังงานไปในรูปแรงเสียดทานที่เกิดบนผิวคาย อีก 10% จะเสียรูปในรูปแรงเสียดทานที่เกิดบนผิวหลับ

2.5 การสึกหรอของมีดตัด (Tool wear)

ในการตัดชิ้นงาน มีดตัดจะต้องทนต่อแรงและอุณหภูมิที่สูงในระหว่างการตัด ถ้าแรงในการตัดมากเกินไปจะทำให้มีดตัดหักได้ หรือถ้าอุณหภูมิตัดสูงเกินไปก็ทำให้มีดตัดอ่อนและเสื่อมได้เร็วเช่นเดียวกัน เทคโนโลยีด้านมีดตัดจะให้ความสำคัญกับประเด็นหลัก 2 ประการคือ เรื่องวัสดุที่ใช้ทำมีดตัดและรูปร่างของมีดตัด ทั้งนี้ก็เพื่อให้อายุการใช้งานของมีดตัดนานขึ้น ใน

ด้านวัสดุของมีดตัดนั้นจะเกี่ยวข้องกับการพัฒนาวัสดุที่สามารถทนทานต่อแรง อุณหภูมิ และการสึกหรอในกระบวนการตัด ส่วนในด้านรูปทรงของเครื่องมือตัดจะพัฒนาเกี่ยวกับการหารูปทรงที่เหมาะสมของมีดตัดสำหรับวัสดุของมีดตัด และสำหรับกระบวนการตัดความเสียหายของมีดตัดเกิดขึ้นได้ด้วยสาเหตุหลัก 3 อย่าง ดังตารางที่ 2.1 โดยทั่วไปแล้ว การสึกหรอของมีดตัดจะเป็นแบบค่อยเป็นค่อยไป (Gradual wear) ซึ่งกลไกต่างๆที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษกึ่งโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดของมีดตัด [1,6]

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

กลไกต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับเศษโลหะ และบริเวณผิวสัมผัสระหว่างมีดตัดกับผิวชิ้นงานในระหว่างการตัด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.2 ซึ่งกลไกการสึกหรอทั้ง 5 แบบจะเกิดได้เร็วยิ่งขึ้นในสภาวะที่ใช้ความเร็วในการตัดสูง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลไกการสึกหรอแบบ Diffusion และ Chemical reaction จะยิ่งเกิดง่ายที่อุณหภูมิสูง

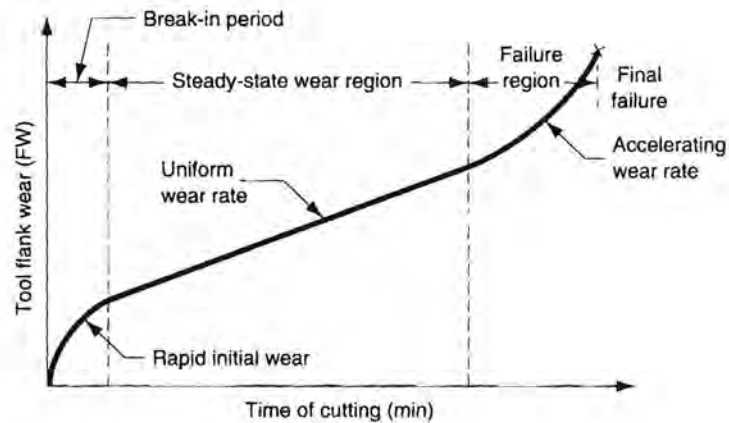
ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมีดตัด [6]

กลไก	สาเหตุ	ผล
Abrasion	อนุภาคที่แข็งของชิ้นงานจะทำให้บางส่วนเครื่องมือตัดค่อย ๆ หลุดติดออกมา	ทำให้เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวหยาบและผิวคาย
Adhesion	โลหะสองอย่างถูกทำให้ติดกันภายใต้ความดันและอุณหภูมิที่สูง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
Diffusion	เกิดการแลกเปลี่ยนอะตอมกันระหว่างผิวหน้าของวัสดุ 2 ชนิด อะตอมของมีดตัดจะหายไป ความแข็งลดลง ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก Abrasion และ Adhesion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
Chemical reaction	ความเร็วตัดสูงและอุณหภูมิที่สูงจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้เครื่องมือตัดอ่อนลง	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย
Plastic deformation	เกิดอุณหภูมิที่สูงบริเวณคมตัด คมตัดจะเริ่มเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก ทำให้ง่ายต่อการเกิดกลไก Abrasion	เกิดรอยสึกหรอบริเวณผิวหยาบ

2.6 อายุของมีดตัด (Tool life) [2,3,6]

อายุเครื่องมือตัด หมายถึง เวลาตัดโดยนับจากเครื่องมือเริ่มต้นใช้งานโดยที่เครื่องมือตัดไม่เคยใช้งานมาก่อนบนชิ้นงานชนิดเดียวและในสภาวะเดียวกัน จนกระทั่งไม่สามารถใช้เครื่องมือตัดนั้นต่อไปได้ ในขณะที่กำลังทำการตัดจะเกิดกลไกการสึกหรอต่างๆ บนมีดตัด ซึ่งจะมีอัตราที่เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของมีดตัดกับระยะเวลาที่ใช้ในการตัดแสดงดังรูปที่ 2.12 ซึ่งความสัมพันธ์ในรูปจะแสดงถึงรอยสึกหรอบริเวณผิวหยาบ (Frank wear) ดังรูปที่ 2.13 ส่วนรอยสึกหรอบริเวณผิวคาย (Crater wear) ดังรูปที่ 2.13 ก็เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน

ในกระบวนการตัดจะพบว่าการใช้เครื่องมือตัดไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเสียหาย แล้วค่อยนำกลับมาลับคมตัดใหม่เป็นสิ่งที่ไม่สมควรทำ เพราะถ้ามีดตัดแตกแล้วการลับคมตัดให้คมเหมือนเดิมจะทำได้ยากกว่าปกติ และคุณภาพของชิ้นงานก็จะออกมาไม่ดีด้วย



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรอยสึกหรอบนผิวคายและเวลาที่ใช้ในการตัด



รูปที่ 2.13 ลักษณะการสึกหรอของมีดกัด (ก) รอยสึกหรอบนผิวหลบ (Frank wear) (ข) รอยสึกหรอบนผิวคาย (Crater wear)

2.7 วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัด (Cutting material)

2.7.1 เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon and medium-alloy steels)

เหล็กกล้าคาร์บอนเป็นวัสดุที่เก่าแก่ที่สุดและใช้มากในงานเจาะ ตีแป (Tapping) มีดตัดที่ทำจากเหล็กกล้าผสมปานกลางจะมีอายุมีดตัดจะนานกว่า ถึงแม้ว่าวัสดุนี้จะมีราคาถูกแล้วลับให้คมได้ง่าย แต่ด้วยความแข็งและการทนต่อการสึกหรอต่ำสำหรับการตัดที่ความเร็วสูง มีดตัดชนิดนี้จึงใช้กับงานตัดที่ความเร็วรอบต่ำ

2.7.2 เหล็กกล้ารอบสูง (High-speed steels)

ใช้มากในงานตัดความเร็วรอบสูง ทนต่อการสึกหรอ และราคาไม่แพงมากเมื่อเทียบกับคุณสมบัติของมีดตัด เนื่องจากวัสดุประเภทนี้ทนต่อแรงกระแทกและการแตกหัก ดังนั้นจึงมักใช้ในงานตัดที่มีการสั่นสะเทือนได้ดี

2.7.3 โคบอลต์หล่อผสม (Cast-cobalt alloys)

มีความแข็งสูง (58-64 HRC) ทนต่อการสึกหรอได้ดี มีความแข็งสูงแม้ว่าอุณหภูมิใช้งานจะสูงตาม วัสดุนี้ทนแรงกระแทกได้น้อย จึงไม่เหมาะจะใช้กับงานตัดรอบสูง ส่วนใหญ่ใช้กับงานตัดหยาบ

2.7.4 คาร์ไบด์ (Cemented or sintered carbide)

มีความแข็งสูงทุกอุณหภูมิ โมดูลัสความยืดหยุ่นและนำความร้อนสูง แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ๆ คือ ทั้งสแตนคาร์ไบด์และไทเทเนียมคาร์ไบด์ การผสมโคบอลต์จะช่วยทำให้รับแรงกระแทกได้ดี แต่จะลดความแข็งและการทนต่อการสึกหรอ สามารถเพิ่มความแข็งและการทนต่อการสึกหรอได้ด้วยการผสมคาร์ไบด์ของไทเทเนียมและแทนทาลัม วัสดุประเภทนี้เหมาะกับการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ เพราะไม่เหมาะต่อการสั่น มีดตัดชนิดนี้ใช้กับการตัดแบบลมเป่าได้

2.7.5 โคตต์ทูล (Coated tools)

ใช้กับงานตัดรอบสูง เพื่อลดเวลาในการทำงาน อายุมีดตัดนานกว่ามีดตัดที่ไม่ได้เคลือบสารถึง 10 เท่า วัสดุที่ใช้เคลือบมักจะเป็นพวกไทเทเนียมไนไตรด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ และเซรามิก ความหนาชั้นเคลือบประมาณ 5-10 ไมครอน

2.7.6 เซรามิก (Ceramics)

ทำจากอลูมิเนียมออกไซด์ที่มีความละเอียดและความบริสุทธิ์สูง วัสดุนี้ทนต่อการขีดสีได้สูง ทนความร้อนได้ดี ลดการติดของเศษโลหะบนชิ้นงานได้ ผิวชิ้นงานหลังตัดมีความเรียบสูง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือมีดตัดชนิดนี้ไม่ทนต่อการกระแทก

2.7.7 คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride)

เป็นวัสดุที่มีความแข็งมากที่สุด ทนต่อการสึกหรอและมีคมตัดที่แข็งแรง แต่เปราะ จึงไม่เหมาะต่องานที่มีการสั่นสะเทือน เหมาะต่อการตัดเหล็กที่มีความแข็งสูง

2.7.8 ไดมอนด์ (Diamond)

ทนต่อการสึกหรอได้ดี ลับคมได้ง่ายใช้กับงานที่ต้องการความละเอียดสูง

2.8 ประเภทของสารหล่อเย็น (Cutting fluids) [9]

แบ่งประเภทตามหน้าที่การทำงาน

- 1) สารหล่อเย็น (Coolant) มีน้ำเป็นส่วนประกอบสำคัญ มีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อใช้ที่ความเร็วสูง ๆ นิยมใช้ในการกลึงและการกัด และมีคุณสมบัติดังนี้
 - ลดความร้อนระหว่างมีดตัดและชิ้นงาน
 - เพิ่มอายุของมีดตัด

- เพิ่มความสามารถในการลดอุณหภูมิ
- 2) สารหล่อลื่น (Coolant) มีน้ำมัน ที่มีส่วนประกอบของ ซัลเฟอร์ คลอรีน และ ฟอสฟอรัส เป็นส่วนประกอบสำคัญ มีประสิทธิภาพมากเมื่อใช้ที่ความเร็วต่ำ นิยมใช้กับการเจาะและตัดแปะเกลียว (Tapping) และมีคุณสมบัติดังนี้
 - ลดแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือตัด เศษวัสดุ และชิ้นงาน
 - เพิ่มอายุของมีดตัด

แบ่งประเภทตามส่วนประกอบสารเคมี

1) สารจำพวกน้ำมัน (Cutting oils or insoluble oils)

น้ำยาประเภทนี้ไม่มีส่วนประกอบของน้ำ ใช้เป็นสารหล่อเย็น ทำให้ผิวชิ้นงาน สูดถ่ายเรียบ และป้องกันสนิม น้ำมันประเภทนี้จะได้มาจากการกลั่นน้ำมันแร่ส่วนใหญ่จะมีการใส่น้ำมันสัตว์ น้ำมันพืช ผสมลงไปเพื่อทำให้เหลวขึ้นและเพิ่มคุณสมบัติในการหล่อลื่น น้ำยาหล่อเย็นประเภทนี้จะใช้กับงานตัดปานกลางถึงหนัก มีความต้องการสารเติมแต่ง (Additives) น้อยกว่าในกรณีของอิมัลชัน (Emulsion) น้ำยาหล่อเย็นประเภทนี้แบ่งย่อยได้ออกเป็น 3 ชนิดคือ น้ำมันแร่ (Mineral oils), น้ำมันไขมัน (Fatty oils) และส่วนผสมของสารทั้ง 2 น้ำมันเหล่านี้จะให้คุณสมบัติในการหล่อเย็นดีแต่มีคุณสมบัติในการดูดซับความร้อนได้ต่ำ อัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยน้ำมัน 3 ชนิดนี้จะมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับน้ำยาหล่อเย็นแบบอื่นๆ ดังนั้นน้ำมันเหล่านี้จึงเหมาะสำหรับการตัดที่ความเร็วต่ำๆ

2) สารจำพวกอิมัลชัน (Emulsified oils or soluble oils)

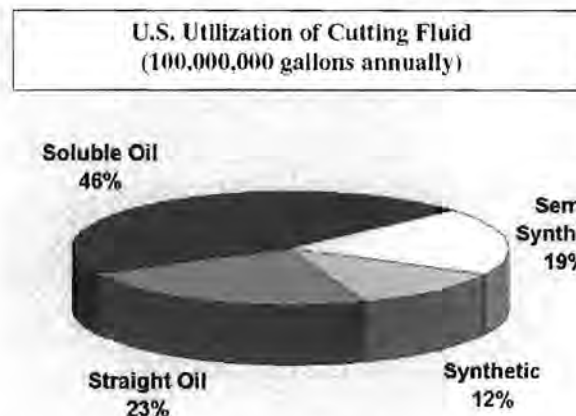
สารจำพวกนี้เป็นพวกน้ำมันแร่ (Mineral oils) ไขมันผสม (Fat mixture) และพวกอิมัลชันที่เติมลงไปน้ำ น้ำมันจะถูกจับอยู่ในรูปของหยดเล็ก ๆ ในน้ำ (หรือที่เรียกว่า คอลลอยด์) มีลักษณะสีขาวแบบน้ำนม เนื่องจากองค์ประกอบหลักเป็นสารจำพวกน้ำ จึงทำให้น้ำยาหล่อเย็นนี้เป็นสารหล่อเย็นที่ดี ใช้เพื่อหล่อเย็น น้ำยาหล่อเย็นประเภทนี้จะช่วยป้องกันการหลอมติดของเศษโลหะกับมีดตัดและผิวชิ้นงาน และลดการสึกหรอของมีดตัดจากการเสียดสีที่อุณหภูมิสูงได้ ป้องกันการบิดเบี้ยวของชิ้นงานที่เกิดจากความร้อนที่ตกค้างในชิ้นงานหลังการตัด ส่วนผสมที่ใช้ทำน้ำยาหล่อเย็น มีแตกต่างกันไปตามแต่ความต้องการในการระบายความร้อน หรือการหล่อเย็น ถ้าต้องการให้มีการระบายความร้อนได้สูงขึ้น ก็ควรจะมีส่วนผสมน้ำมันในอัตราส่วนน้อยๆ ถ้าต้องการให้มีการหล่อเย็นที่ดีขึ้น ก็ควรจะมีส่วนผสมน้ำมันในอัตราส่วนที่มากขึ้นอัตราส่วนที่ใช้ในการผสมมีได้ตั้งแต่ 1:5 ถึง 1:100 (น้ำมันต่อน้ำ)

3) สารจำพวกกึ่งสังเคราะห์ (Semi-chemical fluids or semi-synthetic metalworking fluids)

สารหล่อเย็นหล่อเย็นประเภทนี้จะมีส่วนผสมของน้ำมัน 5-30% ผสมด้วยการเติมสารเติมแต่งอื่นๆ เช่น ไนโตรด์ เอไมน์ เพื่อช่วยลดการกัดกร่อนของมีดตัดและชิ้นงาน นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติของ น้ำมันแร่ (Mineral oils) ได้โดยการเพิ่มสารเติมแต่งซึ่งเป็นสารประกอบจำพวกซัลเฟอร์ (Sulfur) และ คลอรีน (Chlorine) การเติมสารจำพวกซัลเฟอร์จะช่วยลดโอกาสที่เศษโลหะหลอมละลายติดบนผิวคายของมีดตัด นอกจากนี้ สารเติมแต่งยังช่วยเพิ่มความเสถียรและป้องกันสนิม ในบางครั้งอาจมีการเติมสารจำพวกยาฆ่าแมลงลงไปเพื่อป้องกันการเติบโตของสารอินทรีย์ และสารจำพวกไขมันก็ใช้เติมลงไปเพื่อเพิ่มการหล่อลื่น น้ำมันจำพวกนี้ใช้สำหรับงานเบาและงานหนักที่ความเร็วในการตัดต่ำถึงปานกลาง

4) สารสังเคราะห์ (Chemical fluids synthetic metalworking fluids)

สารหล่อเย็นประเภทนี้เป็นสารสังเคราะห์ ไม่มีส่วนผสมของน้ำมัน ส่วนมากจะเป็นพวกสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ มีคุณสมบัติหล่อเย็น ลดการเกิดละออง ลดการออกซิเดชัน และป้องกันสนิม ส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติในการลดความร้อนแต่หล่อเย็นไม่ได้ สารเคมีจำพวกนี้จะมีความเสถียรสูง ใช้ได้ดีกับงานตัดหนัก



รูปที่ 2.14 สัดส่วนการใช้สารหล่อเย็นในประเทศสหรัฐอเมริกา

2.9 ประโยชน์ โทษ และการเลือกใช้สารหล่อเย็น

ประโยชน์

- 1) เพิ่มอายุของมีดตัด
- 2) เพิ่มความเรียบของผิวชิ้นงาน
- 3) ช่วยในการกำจัดเศษวัสดุ
- 4) ลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงาน
- 5) ลดแรงในการตัด (Cutting force)

โทษ

- 1) ไอระเหยของสารหล่อเย็นเป็นอันตรายต่อสุขภาพของพนักงาน
- 2) ทำลายสิ่งแวดล้อม
- 3) ทำลายบรรยากาศในการทำงาน
- 4) สารหล่อเย็นบางชนิดอาจทำให้ผิวของชิ้นงานเสียหายเนื่องจากปฏิกิริยาเคมี
- 5) สารหล่อเย็นบางชนิดอาจเป็นสารไวไฟ

การเลือกใช้สารหล่อเย็น

- 1) มีความสามารถในการดูดความร้อนได้สูง
- 2) ไม่เกิดควันพิษเมื่อถูกความร้อน
- 3) มีความเสถียรสูง
- 4) จุดวาบไฟสูง
- 5) ไม่ทำให้ผิวชิ้นงานเสียหาย

2.10 การประยุกต์ใช้สารหล่อเย็น [7]

2.10.1 การหล่อเย็นแบบเปียก (Flooding application or flood cooling)

น้ำยาหล่อเย็นจะถูกจ่ายผ่านท่อจ่ายน้ำยาหล่อเย็นที่บริเวณเพลาหมุนของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซนเตอร์ ลักษณะของน้ำยาหล่อเย็นจะเป็นลำน้ำ ความสามารถในการเข้าถึงบริเวณพื้นที่ตัดเฉือนระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานจะไม่ดีเมื่อเทียบกับการหล่อเย็นแบบละออง เนื่องจากขนาดอนุภาคของน้ำยาหล่อเย็นจะโตกว่าการหล่อเย็นแบบละออง จึงทำให้การเข้าถึงบริเวณพื้นที่ตัดเฉือนได้ยากกว่า



รูปที่ 2.15 การหล่อเย็นแบบเปียก

2.10.2 การหล่อเย็นแบบละออง (Mist application or mist cooling)

น้ำยาหล่อเย็นจะถูกจ่ายโดยหัวฉีดที่ถูกออกแบบมาโดยเฉพาะ น้ำยาหล่อเย็นที่ใช้จะมีน้ำเป็นส่วนผสมหลัก ขนาดของละอองน้ำ ขนาดเล็ก ๆ ที่ละเอียด ตั้งแต่ 5 ถึง 25 ไมครอน ละอองนี้จะถูกฉีดเข้าไปด้วยความเร็วสูงตรงบริเวณการตัด (Cutting zone) โดยอาศัยอากาศที่มีความดันสูงเป็นตัวขับเคลื่อน ถึงแม้การหล่อเย็นแบบละอองจะต้องการระบบระบายอากาศที่ดีและมีความสามารถในการหล่อเย็นที่จำกัด วิธีนี้มีข้อได้เปรียบว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียก (Flood application) เพราะช่วงที่เกิดละออง อุณหภูมิของน้ำยาหล่อเย็นจะลดลงเนื่องจากการขยายตัว ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดซับเอาความร้อนมากได้มากขึ้น เนื่องจากวิธีนี้จะฉีดสารหล่อเย็นเข้าไปโดยตรงด้วยความเร็วสูงจึงทำให้มีผลการหล่อเย็นที่ดีกว่า วิธีนี้มีจุดเด่นตรงที่สามารถฉีดไปยังบริเวณที่เข้าถึงได้ยากและยังทำให้สามารถเห็นชิ้นงานขณะการตัดได้ชัดเจน ในกระบวนการตัดโลหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ใช้มีดตัดคาร์ไบด์ในการตัด จะพบว่าวิธีการหล่อเย็นแบบเปียก (Flood application) อาจทำให้มีดตัดเกิดรอยแตกร้าวได้ ในกรณีนี้ วิธีการหล่อเย็นแบบละออง (Mist application or mist cooling) จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการยืดอายุของมีดตัด



รูปที่ 2.16 การกัดแบบใช้สารหล่อเย็นแบบละออง











2.10.3 การหล่อเย็นแบบลำน้ำความดันสูง (High jet method)

เป็นวิธีที่ถือได้ว่ามีข้อได้เปรียบกว่าระบบเดิม ที่ถูกเสนอโดย Pigott และ Colwell และต่อมาก็กลายมาเป็นหัวข้อสำคัญให้กับนักวิจัยหลายๆคนที่สนใจ วิธีนี้จะอาศัยลำขนาดเล็กที่มีความเร็วสูงฉีดไปยังผิวหลบของมีดตัด ของเหลวที่ใช้เป็นได้ทั้งสารจำพวกน้ำ และน้ำมัน (Water-based and oil-based)

2.11 เศษโลหะ [6]

ผิวชิ้นงานที่ผ่านการกลึงแล้ว รูปแบบของเศษโลหะที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของเศษโลหะ (t_o) ในขณะที่เศษกลึงโลหะกำลังก่อตัวตามระนาบเฉือน ความหนาของเศษโลหะจะลดลงเป็น t_c อัตราส่วนระหว่าง t_o กับ t_c เรียกว่า Chip thickness ratio หรือ Chip ratio อัตราส่วนนี้จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอในการเกิดเศษโลหะจริงในการตัดจะแตกต่างจากการตัดแบบมุมตั้งฉาก เพราะว่าการบวกรูปการเปลี่ยนรูปจะไม่ได้เกิดบนระนาบเท่านั้น แต่จะเกิดเป็นบริเวณ (Zone) รูปแบบการเกิดเศษโลหะที่เกิดขึ้นจริง ลักษณะของเศษโลหะที่เกิดขึ้นนี้ จะขึ้นกับปัจจัยต่างๆเช่น ชนิดของวัสดุที่ใช้ในการตัด สภาวะในการตัดต่างๆ รูปแบบการเกิดของเศษโลหะสามารถแยกได้เป็น 3 แบบคือ

- (1) เศษโลหะเกิดการแตกเป็นชิ้นเล็ก เกิดกับวัสดุที่เปราะและแตกง่าย ความเร็วในการตัดต่ำ ความร้อนที่เกิดต่ำ ผิวชิ้นงานไม่ดี อายุเครื่องมือตัดยาวนาน
- (2) เศษโลหะยาว ม้วนเป็นเส้น เกิดกับวัสดุเหนียว มุมคายมาก ความเร็วในการตัดสูงกว่าแบบ แรก ผิวชิ้นงานที่ได้เรียบ ใช้แรงตัดต่ำ
- (3) เศษโลหะเกิดการหลอมติดกับเครื่องมือตัดหรือชิ้นงาน เกิดกับวัสดุเหนียว มุมคายน้อย ความเร็วในการตัดต่ำ ผิวชิ้นงานที่ได้ไม่เรียบ ใช้แรงตัดสูง นอกจากนี้เศษโลหะที่เกิดอาจแบ่งได้ตามรูปร่างของเศษโลหะที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.17

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									
ribbon chips	tangled chips	corkscrew chips	helical chips	long tubular chips	short tubular chips	spiral tubular chips	spiral chips	long comma chips	short comma chips
				good					
				acceptable					
unfavourable									

รูปที่ 2.17 ประเภทของเศษโลหะที่เกิดขึ้นแบ่งตามรูปร่าง

2.12 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ (Model adequacy checking) [11]

การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบที่นิยมใช้มี 3 กรณี คือ

1) การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2)

เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ค่า R^2 ยิ่งมากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก แต่ในทางปฏิบัติ เนื่องจากค่า R^2 มีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ จึงใช้ค่าที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน

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

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

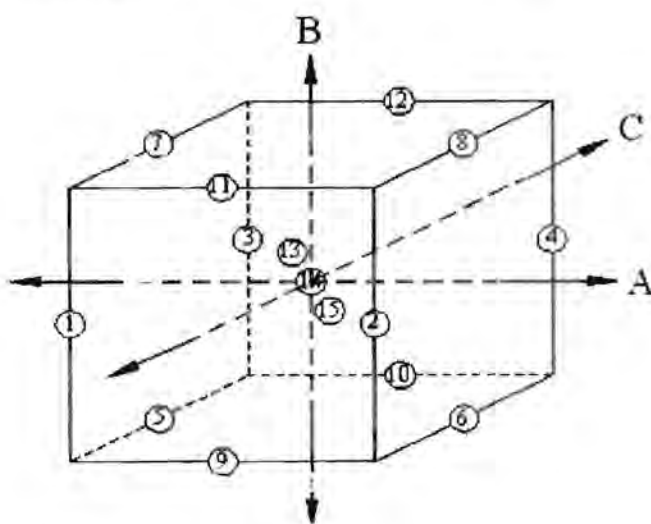
3) การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยและการประมาณค่าแบบช่วง

(Hypothesis testing for regression coefficients and interval estimation)

การทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยจัดได้ว่าเป็นขั้นตอนสุดท้าย ก่อนที่จะนำสมการไปใช้ในการพยากรณ์ โดยจะทำการประมาณค่าพยากรณ์ที่ต้องการโดยใช้ ค่าประมาณแบบจุดและช่วงต่อไป เพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการนำไปประยุกต์ใช้เมื่อทราบค่าประมาณความแปรปรวนของตัวประมาณดังกล่าวแล้ว จะสามารถดำเนินการทดสอบ สมมติฐาน และการประมาณแบบช่วงได้ โดยทั่วไปมักนิยมทดสอบสมมติฐานเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยซึ่งจะทำให้ทราบว่าสมการถดถอยที่สร้างขึ้นจะสามารถลดรูปลงอีกได้หรือไม่ สำหรับการประมาณแบบช่วงมักจะสร้างขึ้นเพื่อประโยชน์การพยากรณ์ กรณีสมการถดถอยอย่างง่ายมักจะทำการสร้างช่วงสำหรับค่าความชัน

2.13 การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box – Behnken design) [11]

การทดลองนี้เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ (3 level design) โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแปรเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative factors) เช่น เวลา ความดัน เป็นต้น โดยใช้หลักการของการทดลองของ แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบกับจุดกึ่งกลาง (Central points) รวมเข้าไป



รูปที่ 2.18 การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบ 3 ตัวแปร

2.14 ทบทวนวรรณกรรม

ในวงการอุตสาหกรรม การศึกษาเงื่อนไขการตัด (Cutting conditions) มีจุดประสงค์ เพื่อให้ได้เงื่อนไขการกัดที่ดีที่สุดซึ่งจะพิจารณาปัจจัยที่ทำให้เกิดผลลัพธ์การตัดแตกต่างกัน 2 ด้าน

คือ ลักษณะการใช้สารหล่อเย็น (Cutting fluid) และค่าตัวแปรต้นในการตัด (Cutting parameters) [12,14]

การใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการตัดมีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถใช้ความเร็วการกัดสูงในการเพิ่มผลิตภาพ และสำหรับชิ้นงานบางอย่างเช่น Titanium alloys ซึ่งมีอัตราการทำความร้อนต่ำ สารหล่อเย็นเป็นสิ่งจำเป็นในกระบวนการตัดโดยจะทำหน้าที่เป็นน้ำยาหล่อลื่น และน้ำยาหล่อเย็นในกระบวนการตัดสามารถเพิ่มความเร็วได้ถึง 30 % อย่างไรก็ตาม การใช้สารหล่อเย็นก่อให้เกิดผลลบทางด้าน เศรษฐศาสตร์ สิ่งแวดล้อม และ สุขภาพ [14,15] และเมื่อพิจารณาต้นทุนพบว่าสูงถึง 17% จากต้นทุนการผลิตทั้งหมด และจากการทดลองการกัดเหล็กกล้าแข็ง (ASSAB DF3) ด้วยความเร็วสูง คิดต้นทุนสารหล่อเย็นได้เป็น 7-17% ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับต้นทุนมีดตัด (Titanium) ที่คิดเป็น 4% และ 2-4% สำหรับการตัดด้วยมีดตัดเหล็กกล้า (AISI 4340) จากต้นทุนการผลิตทั้งหมด

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมคือการออกแบบการทดลอง โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface analysis) แบ่งการทดลองเป็นสองแบบได้แก่ การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) และการออกแบบบ็อกซ์-เบนห์นเคน (Box-Behnken Design) โดยการเลือกวิธีการจะพิจารณาจากจำนวนการทดลอง การตั้งค่า เครื่องจักร ลักษณะของข้อมูล ฯลฯ [10,11]

การศึกษาปัจจัยที่เป็นตัวแปรต้นในการตัด ได้แก่ การใช้ตัวแปรต้น 3 ตัวได้แก่ ความเร็วการตัด (Cutting speed) อัตราป้อน (Feed rate) และมุมมีดตัดด้านข้าง (Side Cutting Edge Angle, SCEA) [12] อีกรูปแบบหนึ่งคือ การใช้ตัวแปรต้นสี่ตัวโดยใช้ตัวแปรสามตัวที่กล่าวมาแล้ว และเพิ่มความลึกการตัด (Depth of cut) เข้าไป [13] แล้วนำมาออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) ด้วยโปรแกรม Minitab, Design expert software หรือโปรแกรมทางสถิติต่างๆ เป็นต้น เพื่อสร้างโมเดลสมการถดถอย และสร้างโมเดลพื้นผิวผลตอบต่อไป

ผลตอบที่นำมาพิจารณาได้แก่ แรงในการกัดสามแกน (Axial forces) [12-14] และ ความขรุขระของชิ้นงาน (Surface roughness) หลังการตัด โดยนำมาสร้างเป็นแผนภูมิพื้นผิวผลตอบ (Response surface model) แสดงความเหมาะสมของการใช้เงื่อนไขการตัด

M.A. Dabnun, M.S.J. Hashmi และ M.A. El-Baradie วิจัยเกี่ยวกับความขรุขระผิวชิ้นงานหลังการตัดว่าความขรุขระผิวชิ้นงานสัมพันธ์กับ ความเร็วมีดตัด (V), อัตราการป้อน (f)

และความลึกการตัด (d) ดังสมการ $R_g = CV^i f^k d^m$ โดย i,k,l,m คือค่าคงที่ [16] เช่นเดียวกัน Y. Sahin และ A.R. Motorcu ได้ใช้สมการ $R_g = CV^i f^m d^p e$ โดย n, m, p คือค่าคงที่และ e คือ error ซึ่งไม่นำมามีตัดด้านข้างซึ่งเป็นหนึ่งในตัวแปรต้นมาพิจารณา ส่วน Junakarn, Chansit, Papichaya (2551) เลือกใช้สมการ $R = CV^{a1} f^{a2} R_n^{a3} D^{a4} (F_y/F_z)^{a5}$ โดย $R_n, F_y/F_z$ คือ Nose Radius และ อัตราส่วนแรงการตัดในแนวแกน y และแกน z หรือเรียกอัตราส่วน แรงที่ป้อนต่อแรงหลัก ตามลำดับ และ a1-a5 คือค่าคงที่

เมื่อพิจารณาปัจจัยตัวแปรต้นของแต่ละงานวิจัยพบว่าแต่ละตัวแปรจะประกอบไปด้วย ข้อมูลสามค่าคือ ค่าต่ำ ค่ากลาง และค่าสูง เพื่อให้เพียงพอต่อการออกแบบการทดลองนั่นเอง Basim และ Bashir (2009) ใช้เงื่อนไขคลังแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ M.Y.Noordin, V.C. Venkatesh, S.Sharif, S.Eltng, A.Abdullah ที่ทำการทดลองการกลึงเหล็ก AISI 1045 แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น และ N.H. Elmagrabi, C.H. Che Haron ทดลองขึ้นรูปวัสดุไททาเนียมอัลลอยด์

ข้อสังเกตก็คือ ในปัจจุบันที่ยังทำกันน้อยคือการออกแบบกระบวนการตัดโดยใช้ปัจจัยเงื่อนไขการใช้สารหล่อเย็น (Cutting fluid) ด้วยเงื่อนไขในการทดลองคือ 1.การตัดโดยใช้สารหล่อเย็น 2.การตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น 3. การตัดแบบใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด รวมไปถึงการออกแบบโดยกำหนดตัวแปรต้นเป็นความเร็วรอบมีดตัด (Spindle speed) และความลึกหรือมีดตัด (Flank wear) จึงเป็นที่มาของการออกแบบการทดลองการหาเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบนี้ อีกเหตุผลหนึ่งคือในปัจจุบันการทดสอบกระบวนการกัดอลูมิเนียมด้วยมีดตัดหัวบอลยังทำกันไม่มาก และไม่แพร่หลาย ซึ่งเมื่อได้ผลการทดลอง จะสามารถบอกได้ว่าการตัดที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่การตั้งเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ค่าปัจจัยใด

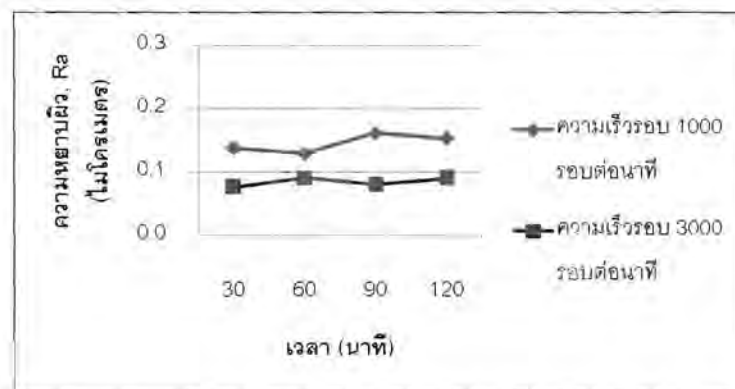
บทที่ 3

การตัดแบบเป็ยก

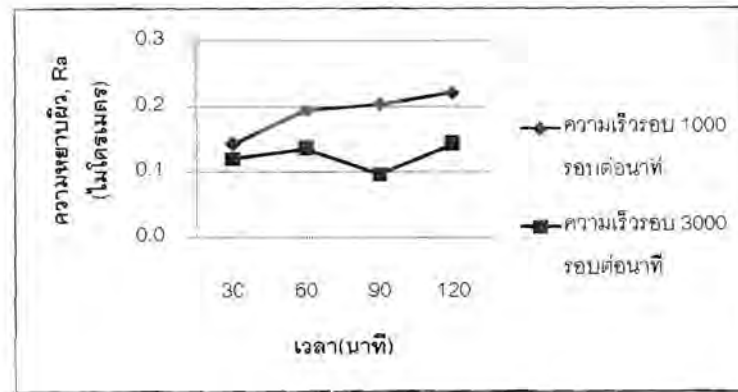
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับความเรียบของผิวชิ้นงานของการตัดแบบเป็ยก

3.1.1 อิทธิพลของความเร็รรอบต่อความหยาบผิว

จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 เห็นได้ว่าความเร็รรอบในการตัดที่ต่ำจะทำให้ค่าความหยาบผิวสูงกว่าความเร็รรอบในการตัดสูง สามารถอธิบายได้จากการตัดที่ความเร็รรอบสูงทำให้เกิดความร้อนสูงบริเวณพื้นที่ตัดเฉือน จึงส่งผลให้ชิ้นงานนิ่มขึ้นทำให้การตัดง่ายขึ้น จึงให้ค่าความหยาบผิวต่ำกว่าการใช้ความเร็รรอบต่ำ และนอกจากนี้เมื่อระยะเวลาในการตัดที่ยาวนานขึ้น ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเกิดเนื้อวัสดุ(เศษโลหะ)หลอมติดกับมีดตัด (Built-up edge: BUE) ซึ่ง BUE จะทำให้ความสามารถในการตัดเฉือนลดลงและทำให้ได้ผิวชิ้นงานไม่ดี เพราะเมื่อการตัดยาวนานขึ้นอัตราการเกิด BUE สะสมเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้ความหยาบผิวชิ้นงานสูงขึ้นตามไปด้วย



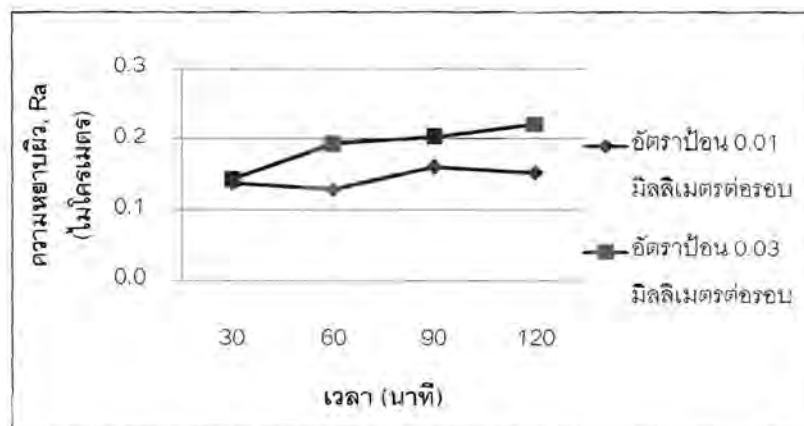
รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเป็ยกที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็รรอบต่าง ๆ



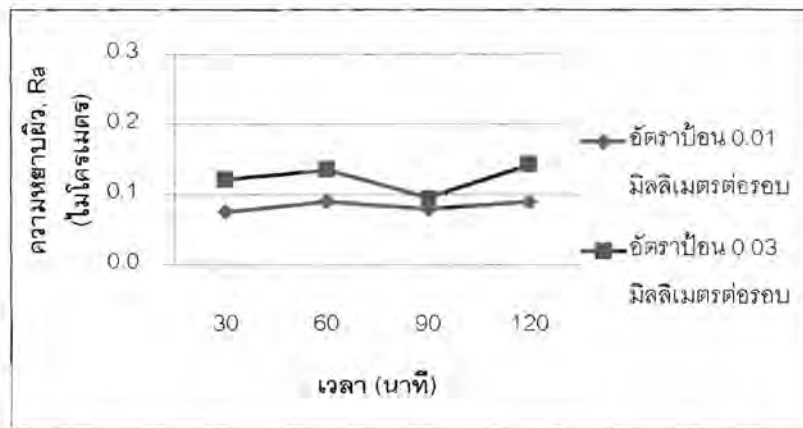
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

3.1.2 อิทธิพลของอัตราป้อนต่อความหยาบผิว

จากรูปที่ 3.3 และ 3.4 สามารถเปรียบเทียบได้ว่าที่อัตราการป้อนตัดที่สูง ทำให้ค่าความหยาบผิวสูง อธิบายได้จากอัตราป้อนที่มากกว่า หมายถึง การกัดด้วยอัตราการกินเนื้อโลหะที่มากกว่าต่อรอบซึ่งตัดยากกว่า ส่งผลให้เกิดความหยาบที่สูงกว่า ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน สามารถอธิบายได้ว่า (พิจารณาจะสมการที่ 2.10) เมื่ออัตราการป้อนตัดสูงขึ้นค่าความหยาบผิวที่ได้จะสูงขึ้นตาม และอีกเหตุผลหนึ่งคือการตัดด้วยอัตราป้อนตัดที่สูงจะต้องใช้แรงในการตัดที่สูงกว่า มีผลต่อการเกิดการสั่นของมีดตัดซึ่งส่งผลให้ความหยาบผิวสูงกว่าการกัดที่อัตราป้อนต่ำ



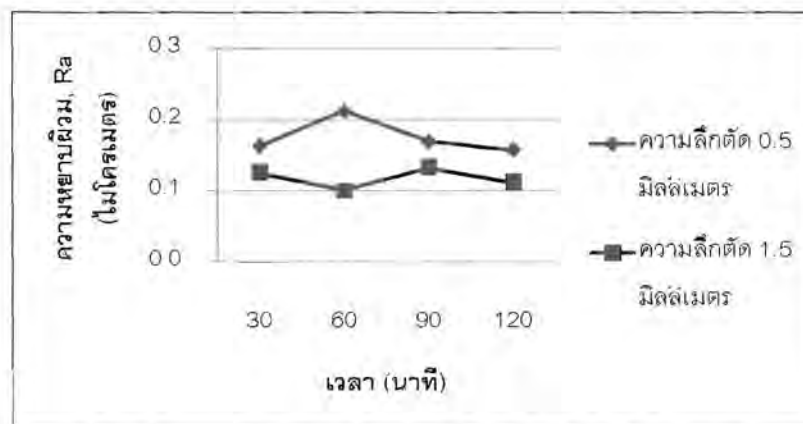
รูปที่ 3.3 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ



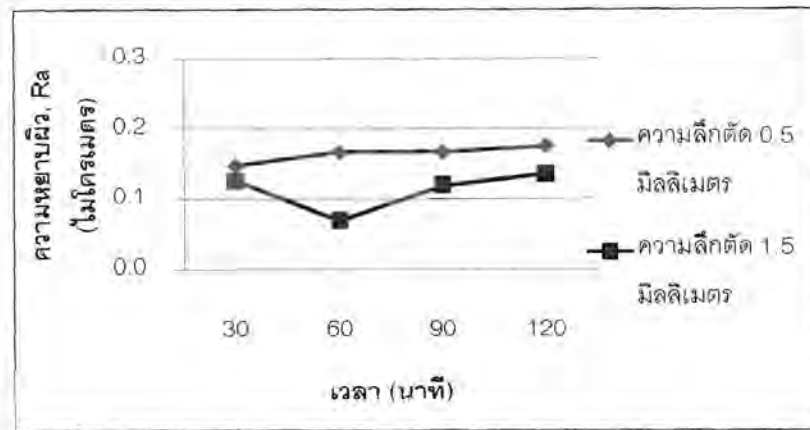
รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ

3.1.3 อิทธิพลของความลึกตัดต่อความหยาบผิว

จากรูปที่ 3.5 และ 3.6 แสดงให้เห็นว่าการตัดด้วยความลึกตัดที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดความหยาบผิวที่ต่ำกว่า สามารถอธิบายได้จากการที่มีดตัดกินเนื้อผิวที่ลึกกว่าทำให้เกิดความร้อนสะสมที่สูงกว่าที่ความลึกตัดต่ำ เนื่องจากที่ความลึกตัดสูงมีพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานสูง จึงทำให้เกิดความร้อนสูง จึงทำให้น้ำมันหล่อลื่นตัว ส่งผลให้การตัดง่ายขึ้นและทำให้ได้ค่าความเรียบผิวที่ต่ำ



รูปที่ 3.5 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความลึกตัดต่าง ๆ



รูปที่ 3.6 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความลึกตัดต่าง ๆ

เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบที่ต่างกัน คือ ที่ 2,000 และ 3,000 รอบต่อนาที จะพบว่าความเร็วรอบสูงค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการตัดนานขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า ที่ความเร็วรอบสูงอัตราการสึกหรอก็จะสูงขึ้นด้วย จึงทำให้ขอบคมตัด (cutting edge) เกิดการสึกหรอส่งผลให้เกิดพื้นที่การตัดเฉือนที่สูงขึ้น และในขณะเดียวกันขอบคมตัดก็มีความมันอันเนื่องจากการสึกหรอเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มรัศมีของขอบคมตัดจึงทำให้ผิวชิ้นงานออกมาดีหรือค่าความหยาบผิวลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดเพียงช่วงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้น เมื่อระยะเวลาในการตัดที่ยาวนานขึ้นก็จะมีผลของการเกิด BUE เกิดขึ้นตามมา ทำให้ BUE มีอิทธิพลมากกว่าการสึกหรอของมีดกัดที่เกิดขึ้น (ซึ่งการสึกหรอเกิดขึ้นค่อนข้างจะน้อยมากในการตัดวัสดุอ่อน เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น) ทำให้ความหยาบผิวของชิ้นงานสูงขึ้น

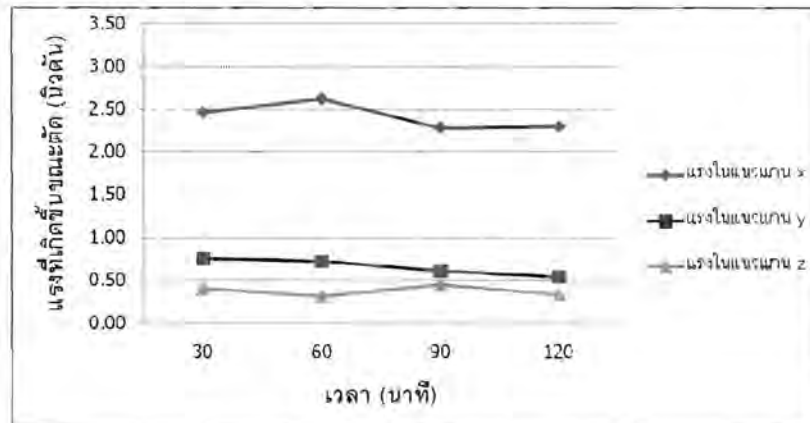
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดในแกนต่าง ๆ ของการตัดแบบเปียก

จากรูปที่ 3.7 ถึง 3.12 จะพบว่าแรงที่เกิดขึ้นในเวลาต่าง ๆ มีค่าไม่ต่างกันมากโดยแรงในแนวแกน x เกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือแรงในแนวแกน y ซึ่งจะมีค่าไม่ต่างจากแรงในแนวแกน z มากนัก ดังนั้นในการทดลองจึงนำแรงในแนวแกน x มาพิจารณาแรงเดียว

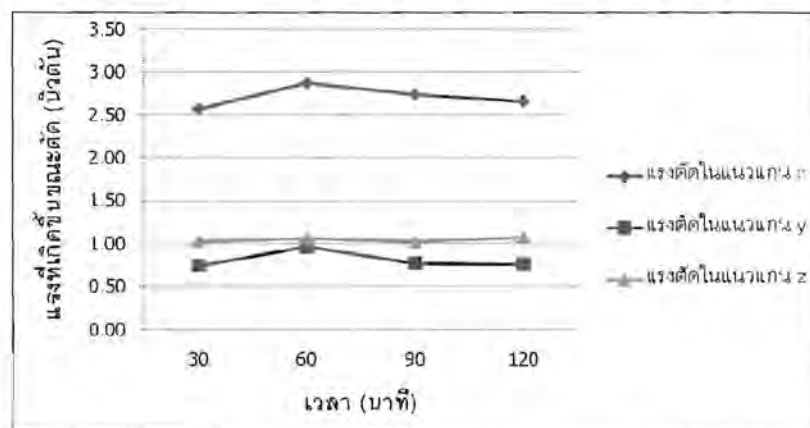
3.2.1 อิทธิพลของความเร็วรอบต่อแรงตัดในสามแกน

จากรูปที่ 3.7 และ 3.8 จะเห็นว่าความเร็วรอบสูงแรงตัดที่เกิดขึ้นจะสูงกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ความเร็วรอบสูงเกิดความร้อนสูงทำให้เนื้อวัสดุอ่อนตัวแรงตัดที่เกิดขึ้นควรจะต่ำ แต่เนื่องจากที่ความร้อนสูงจะทำให้เศษโลหะหลอมติดกับมีดตัดสูงด้วย

ซึ่งความลึกหรือส่งผลมากกว่าการอ่อนตัวของเนื้อวัสดุทำให้เกิดแรงตัดสูงขึ้น และขณะเดียวกันที่ความเร็วรอบสูงจะทำให้เนื้อวัสดุหลอมติดกับคมตัดทำให้การตัดเฉือนไม่เสถียร ส่งผลให้แรงตัดสูงขึ้น โดยแรงที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือแรงในแนวแกน x และที่รองลงมาและมีค่าใกล้เคียงกันคือ แรงในแนวแกน y และ z ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก

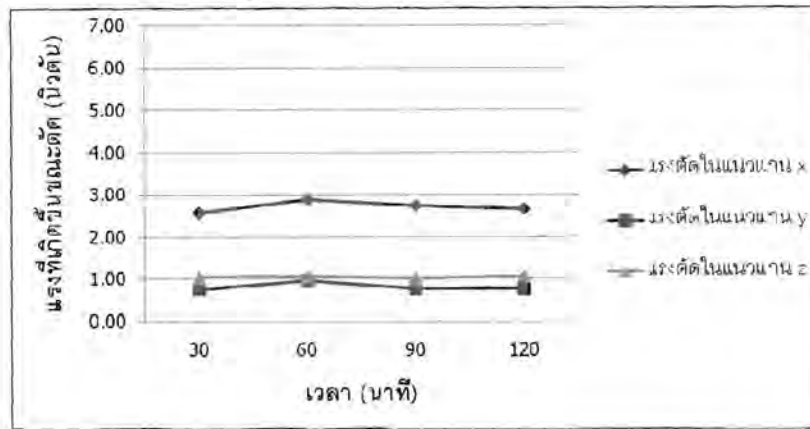


รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก

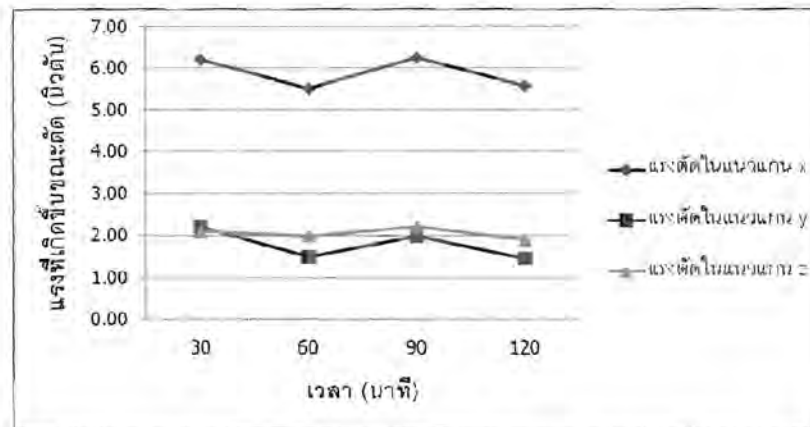
3.2.2 อิทธิพลของอัตราป้อนต่อแรงตัดในสามแกน

รูปที่ 3.9 และ 3.10 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการตัดเฉือนชิ้นงาน จากรูปจะพบว่าแรงตัดในแนวแกน x มีค่าสูงสุด และแรงตัดในแนวแกน y และ z มีค่าที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบแรงตัดที่เกิดขึ้นที่อัตราการป้อนตัดที่ต่างกัน คือที่อัตราป้อนตัด 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่อัตราการป้อนตัดที่สูงกว่าจะเกิดแรงในขณะตัดสูงกว่าที่อัตราการป้อนตัด

ต้า สามารถอธิบายได้ว่า ที่อัตราการป้อนตัดสูงจะมีพื้นที่ในการตัดเฉือนสูง (พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับเนื้อชิ้นงาน) เนื่องจากระยะเวลาในการเคลื่อนที่เข้าตัดชิ้นงานสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดแรงในการตัดสูงตามไปด้วย



รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเป็ยก

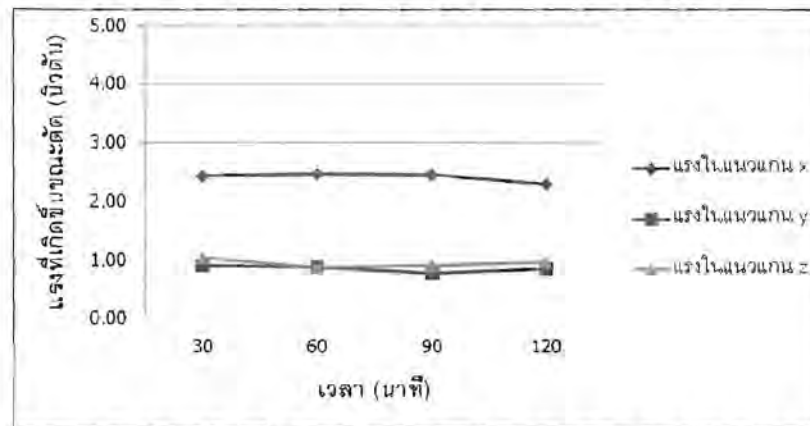


รูปที่ 3.10 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเป็ยก

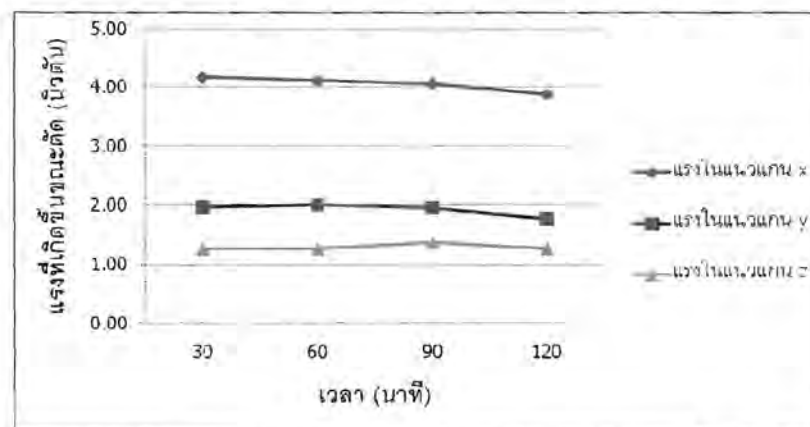
3.2.3 อิทธิพลของความลึกตัดต่อแรงตัดในสามแกน

รูปที่ 3.11 และ 3.12 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดเฉือนชิ้นงานที่ความลึกแตกต่างกันคือ ที่ความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตร จากรูปจะพบว่าแรงตัดในแนวแกน x มีค่าสูงสุด และแรงตัดในแนวแกน y และ z มีค่าที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับอิทธิพลของอัตราการป้อนตัด ที่ความลึกตัดที่สูงกว่าจะเกิดแรงในขณะตัดสูงกว่าที่ความลึกตัดต่ำ ซึ่งเหตุผล

สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับอัตราการป้อนตัด นั่นคือ ที่ความลึกตัดสูงจะมีพื้นที่ในการตัดเฉือนสูง (พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับเนื้อชิ้นงาน) จึงทำให้เกิดแรงในการตัดสูงตามไปด้วย



รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก

3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของแรงในการตัดของการตัดแบบเปียก

เนื่องจากการทดลองนี้เป็นการทดลองที่มีตัวแปร 3 ระดับและปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ ดังนั้นจึงใช้การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ได้จำนวนเงื่อนไขการทดลองต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.1

เมื่อพิจารณาต่อไปพบว่าตัวแปรที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ได้ในการทดลอง ได้แก่ ค่าคงที่ ความเร็วรอบ (S) อัตราป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) ความเร็วรอบอันดับสอง (S^2) ความสัมพันธ์กันระหว่างความเร็วรอบและอัตราป้อนตัด (SF) และความสัมพันธ์กันระหว่างอัตราป้อนและความลึกตัด (FD) ซึ่งทุกพจน์มี P-value น้อยกว่า 0.05 ทั้งสิ้น และทำการทดลองตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่น (P-value น้อยกว่า 0.05) พบว่าได้ผลดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน x ก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเปียก

Source	DF	Seq	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	47.3679	47.3679	5.2631	49.68	0.000
Linear	3	41.1291	41.1291	13.7097	129.41	0.000
Square	3	2.3265	2.3265	0.7755	7.32	0.028
Interaction	3	3.9122	3.9122	1.3041	12.31	0.010
Residual Error	5	0.5297	0.5297	0.1059		
Lack-of-Fit	3	0.5054	0.5054	0.1685	13.89	0.068
Pure Error	2	0.0243	0.0243	0.0121		
Total	14	47.8976				

ตารางที่ 3.3 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ
 กัดแบบเปียก

Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		4.30333	0.1879	22.900	0.000
S	rpm	0.57125	0.1151	4.964	0.004
F	mm/rev	1.75000	0.1151	15.207	0.000
D	Mm	1.32375	0.1151	11.503	0.000
S*S	rpm ²	-0.72542	0.1694	-4.283	0.008
F*F	mm ² /rev ²	0.25708	0.1694	1.518	0.190
D*D	mm ²	0.03958	0.1694	0.234	0.824
S*F	rpm*mm/rev	0.56000	0.1627	3.441	0.018
S*D	rpm*mm	0.26750	0.1627	1.644	0.161
F*D	mm ² /rev	0.77000	0.1627	4.731	0.005

S = 0.3255 R-Sq = 98.9% R-Sq(adj) = 96.9%

ตารางที่ 3.4 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน x หลังการตัดพจนที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบเปียก

Source	DF	Seq	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	46.8362	46.8362	7.8060	58.84	0.000
Linear	3	41.1291	41.1291	13.7097	103.33	0.000
Square	1	2.0810	2.0810	2.0810	15.69	0.004
Interaction	2	3.6260	3.6260	1.8130	13.66	0.003
Residual						
Error	8	1.0614	1.0614	0.1327		
Lack-of-Fit	6	1.0371	1.0371	0.1729	14.25	0.067
Pure Error	2	0.0243	0.0243	0.0121		
Total	14	47.8976				

จากตารางที่ 3.5 พบว่าสมการถดถอยที่ได้ยังคงมีค่า R-Square และค่า R-Square Adj. สูง และมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 สำหรับทุกปัจจัย และค่า P-value ของค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) มีค่า 0.067 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายความว่าสมการนี้เหมาะสม

ตารางที่ 3.5 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบหลังการตัดพจนที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบเปียก

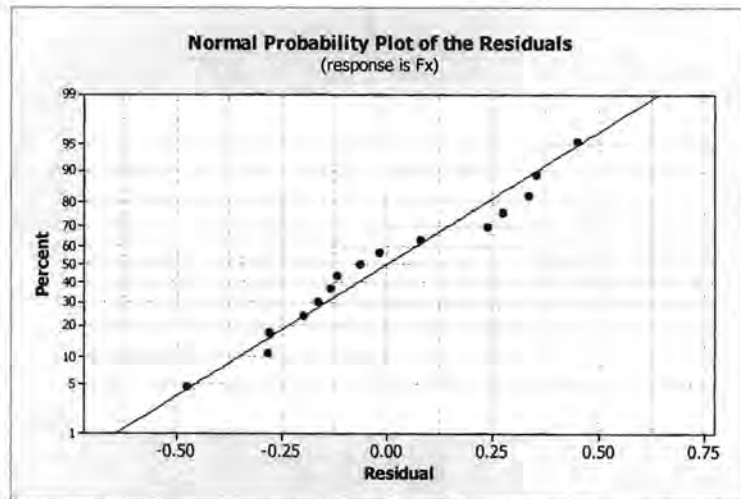
Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		4.4729	0.1377	32.489	0.000
S	Rpm	0.5713	0.1288	4.436	0.002
F	mm/rev	1.7500	0.1288	13.589	0.000
D	Mm	1.3237	0.1288	10.279	0.000
S*S	rpm ²	-0.7466	0.1885	-3.960	0.004
S*F	rpm*mm/rev	0.5600	0.1821	3.075	0.015
S = 0.3642 R-Sq = 97.8% R-Sq(adj) = 96.1%					

สมการความสัมพันธ์ระหว่าง แรงในแนวแกน x ต่อตัวแปรต้นต่าง ๆ คือ

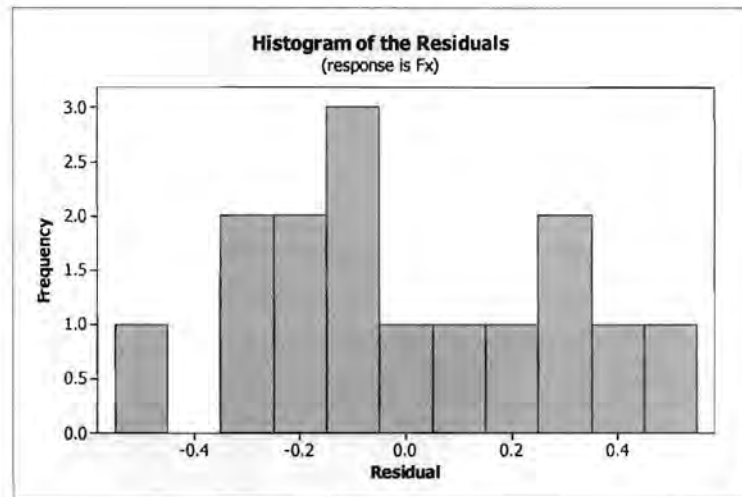
$$F_x = -0.483571 + 0.00243768S - 91.0000F - 0.432500D - 7.46607E-07SS + 0.0560000SF + 154.000FD$$

จากสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ว่า อัตราป้อนตัด (F) และผลคูณของอัตราป้อนตัดกับความลึกตัด (FD) มีอิทธิพลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x มาก ในส่วนของความเร็วรอบ (S) ความลึกตัด (D) และผลคูณระหว่างความเร็วรอบกับอัตราป้อน (SF) มีอิทธิพลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x น้อย ดังนั้นถ้าในการตัดมีอัตราป้อนตัดและความลึกตัดสูง จะส่งผลให้แรงในแนวแกน x มีค่ามาก

รูปที่ 3.13 เป็นการตรวจสอบสมมติฐานที่ว่าข้อมูลมีการกระจายเป็นปกติ ซึ่งสังเกตได้จากข้อมูลมีค่าใกล้เคียงเส้นตรงที่กำหนด แสดงให้เห็นถึงสมมติฐานมีความถูกต้อง ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 3.14 จะเห็นกลุ่มข้อมูลมีแนวโน้มที่จะกระจายเป็นรูปประฆังคว่ำ

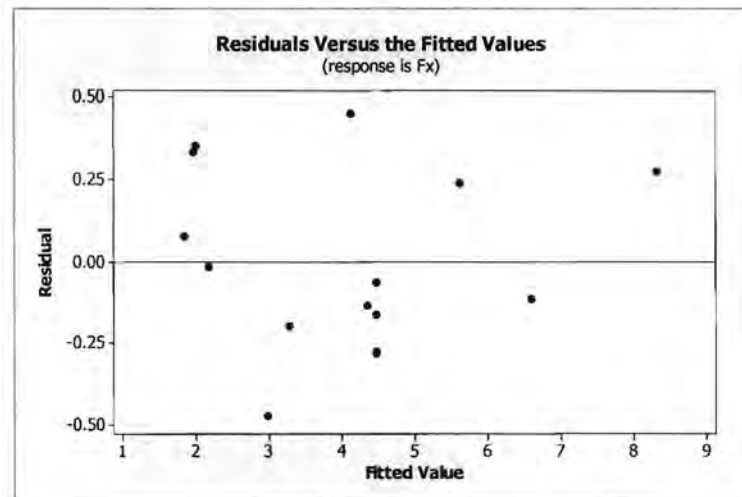


รูปที่ 3.13 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน x (Fx) ของการตัดแบบเปียก

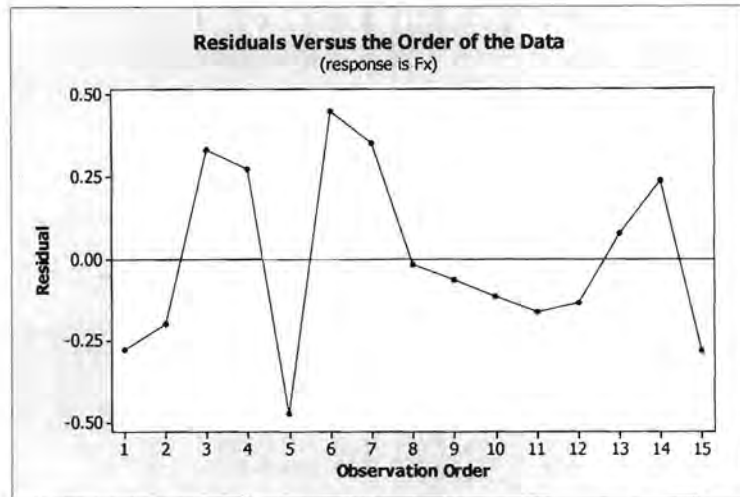


รูปที่ 3.14 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน x (Fx) ของการตัดแบบเป็ยก

รูปที่ 3.15 และ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาด (Residual) ซึ่งสังเกตได้ว่าค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีการกระจายแบบสุ่ม หรือ ไม่มีรูปแบบ

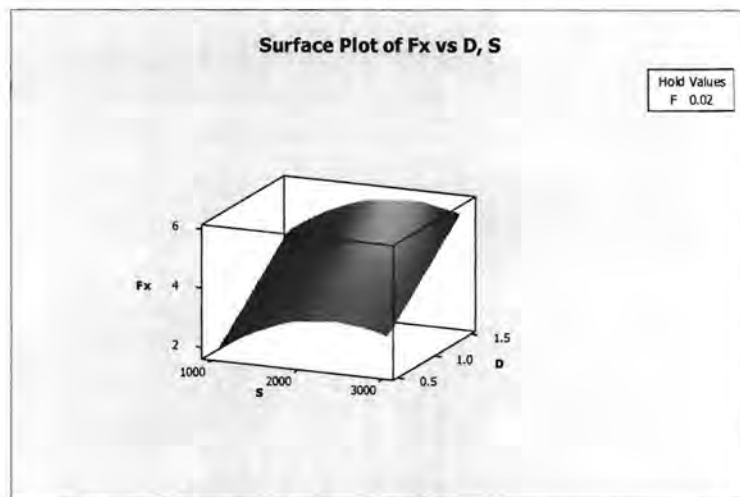


รูปที่ 3.15 การกระจายตัวของข้อมูลแรงแนวแกน x (Fx) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบเป็ยก

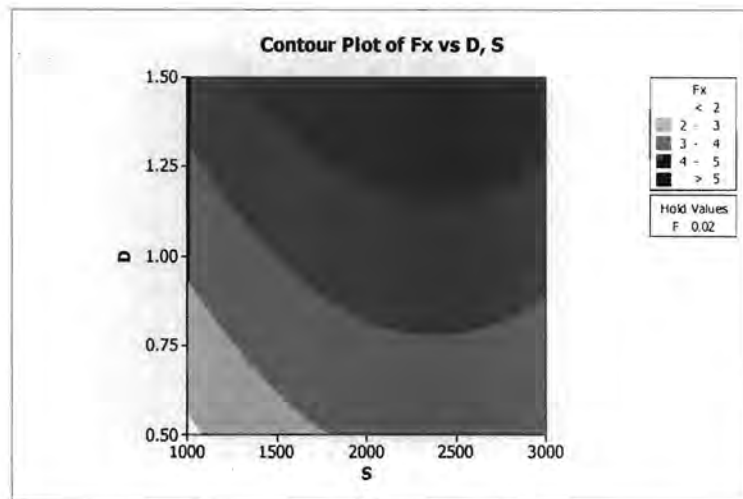


รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของข้อมูลแรงแนวแกน x (F_x) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบเป็ยก

รูปที่ 3.17 และ 3.18 บ่งบอกว่าเมื่อทำการกัดอลูมิเนียมแบบเป็ยก แรงในแนวแกน x จะมีค่าน้อยที่สุดที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที หรือความเร็วรอบต่ำ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร หรือที่ความลึกตัดต่ำ โดยกราฟคอนทัวร์แสดงถึงระดับความหยาบผิวที่ความเร็วรอบและความลึกตัดต่าง ๆ โดยพื้นที่สีเขียวอ่อน จะแสดงถึงบริเวณที่แรงตัดแกน x (F_x) ต่ำที่สุด

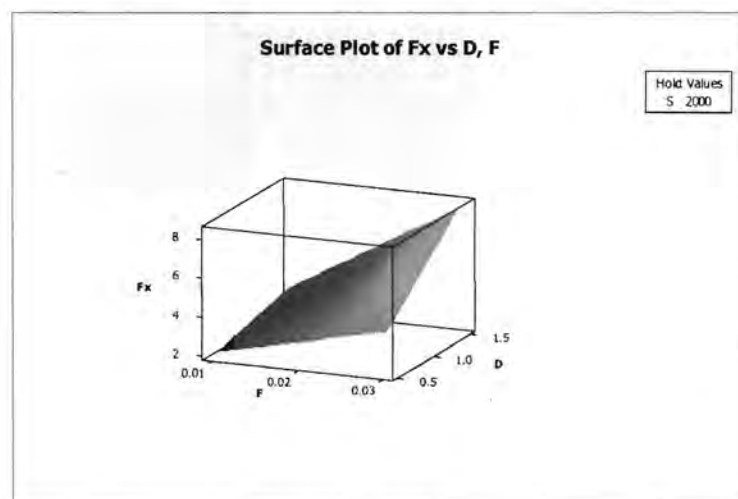


รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน x (F_x) กับความเร็วรอบ (S) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบเป็ยก

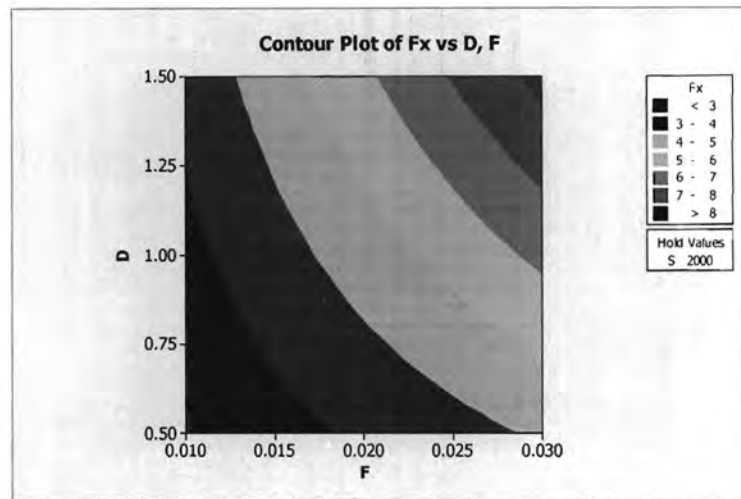


รูปที่ 3.18 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน x (F_x) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบเปียก

เมื่อพิจารณาแรงตัดแกน x (F_x) เทียบกับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ดังรูปที่ 3.19 และ 3.20 พบว่าแรงในแนวแกน x (F_x) มีค่าน้อยที่สุดเมื่อ ใช้อัตราป้อนต่ำ และความลึกตัดต่ำ ซึ่งก็คือบริเวณสีน้ำเงินเข้มในกราฟคอนทัวร์



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน x (F_x) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบเปียก



รูปที่ 3.20 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน x (F_x) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบเปียก

3.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวของการตัดแบบเปียก

ตารางที่ 3.6 การออกแบบการทดลองต่อความหยาบผิวของการตัดแบบเปียก

Standard Order	Input Value			Responses
	S (rpm)	F (mm/rev)	D (mm)	Ra (micro m)
1	1,000	0.01	1	0.1530
2	3,000	0.01	1	0.0900
3	1,000	0.03	1	0.222
4	3,000	0.03	1	0.1429
5	1,000	0.02	0.5	0.2400
6	3,000	0.02	0.5	0.1570
7	1,000	0.02	1.5	0.1480
8	3,000	0.02	1.5	0.1110
9	2,000	0.01	0.5	0.0990
10	2,000	0.03	0.5	0.1751
11	2,000	0.01	1.5	0.0890
12	2,000	0.03	1.5	0.1350
13	2,000	0.02	1	0.0736
14	2,000	0.02	1	0.0758
15	2,000	0.02	1	0.1070

จากข้อมูลความหยาบผิวในตารางที่ 3.6 เมื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 3.7 ความแปรปรวนของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเบี่ยง

Source	DF	Seq	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.033585	0.033585	0.003732	10.82	0.009
Linear	3	0.020452	0.020452	0.006817	19.76	0.003
Square	3	0.012313	0.012313	0.004104	11.9	0.01
Interaction	3	0.00082	0.00082	0.000273	0.79	0.548
Residual Error	5	0.001725	0.001725	0.000345		
Lack-of-Fit	3	0.001027	0.001027	0.000342	0.98	0.541
Pure Error	2	0.000698	0.000698	0.000349		
Total	14	0.03531				

ตารางที่ 3.8 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเบี่ยง

Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.085467	0.010723	7.970	0.001
S	rpm	-0.032763	0.006567	-4.989	0.004
F	mm/rev	0.030500	0.006567	4.645	0.006
D	Mm	-0.023513	0.006567	-3.581	0.016
S*S	rpm ²	0.052992	0.009666	5.482	0.003
F*F	mm ² /rev ²	0.013517	0.009666	1.398	0.221
D*D	mm ²	0.025542	0.009666	2.642	0.046
S*F	rpm*mm/rev	-0.004025	0.009287	-0.433	0.683
S*D	rpm*mm	0.011500	0.009287	1.238	0.271
F*D	mm ² /rev	-0.007525	0.009287	-0.810	0.455
S = 0.01857 R-Sq = 95.1% R-Sq(adj) = 86.3%					

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าสมการการถดถอยที่ค่าความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ คือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit test) มีค่า P-value 0.54 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม และเมื่อพิจารณาต่อไป

พบว่าตัวแปรที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ได้ในการถดถอย ได้แก่ ค่าคงที่ ความเร็วรอบ (S) อัตราป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) ความเร็วรอบอันดับสอง (S^2) และความลึกตัดอันดับสอง (D^2) ซึ่งทุกพจน์มี P-value น้อยกว่า 0.5 ทั้งสิ้น และตัวแปรต้นไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างกัน ทำการทดลองตัด พจน์อื่นที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่น (P-value น้อยกว่า 0.05) พบว่าได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.9 ความแปรปรวนของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเบี่ยง

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	5	0.03209	0.03209	0.006418	17.94	0
Linear	3	0.020452	0.020452	0.006817	19.06	0
Square	2	0.011639	0.011639	0.005819	16.27	0.001
Residual Error	9	0.00322	0.00322	0.000358		
Lack-of-Fit	7	0.002522	0.002522	0.00036	1.03	0.575
Pure Error	2	0.000698	0.000698	0.000349		
Total	14	0.03531				

ตารางที่ 3.10 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเบี่ยง

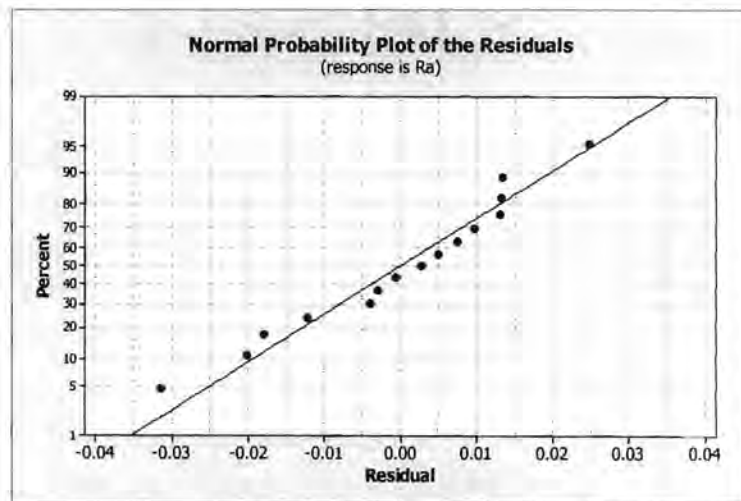
Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.09378	0.009086	10.322	0.000
S	rpm	-0.03276	0.006687	-4.899	0.001
F	mm/rev	0.03050	0.006687	4.561	0.001
D	mm	-0.02351	0.006687	-3.516	0.007
S*S	mm ² /rev	0.05195	0.009814	5.294	0.000
D*D	Mm ²	0.02450	0.009814	2.497	0.034
S = 0.01891 R-Sq = 90.9% R-Sq(adj) = 85.8%					

พบว่าสมการถดถอยที่ได้ยังคงมีค่า R-Square และค่า R-Square Adj. สูง และมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และค่า P-value ของค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) มี

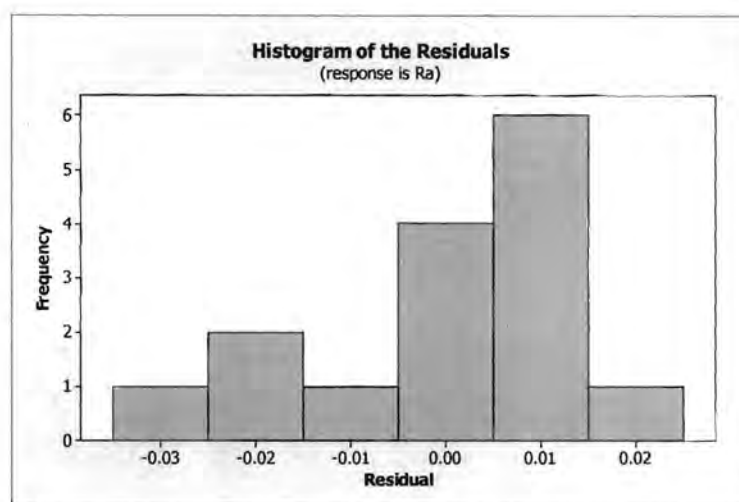
ค่า 0.575 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่าเพิ่มขึ้น หมายความว่าสมการนี้เหมาะสม ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิวเฉลี่ยต่อตัวแปรต้นต่าง ๆ คือ

$$Ra = 0.451150 - 2.40570E-04S + 3.05000F - 0.243040D + 5.19519E-08S^2 + 0.0980077D^2$$

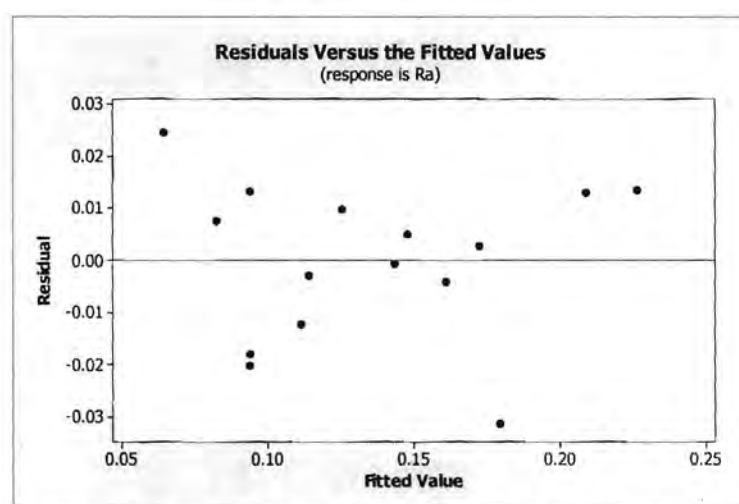
จากสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ว่า อัตราป้อนตัด (F) และความลึกตัด (D) มีอิทธิพลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x มาก ในส่วนของความเร็วรอบ (S) ความเร็วรอบลำดับสอง (S^2) และความลึกตัดลำดับสอง (D^2) มีอิทธิพลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x น้อย ดังนั้นถ้าในการตัดมีอัตราป้อนตัดและความลึกตัดสูง จะส่งผลให้แรงในแนวแกน x มีค่ามาก เนื่องจากการตัดที่มีอัตราป้อนตัดและความลึกตัดสูงส่งผลให้แรงในการตัดแนวแกน x มีค่าสูง



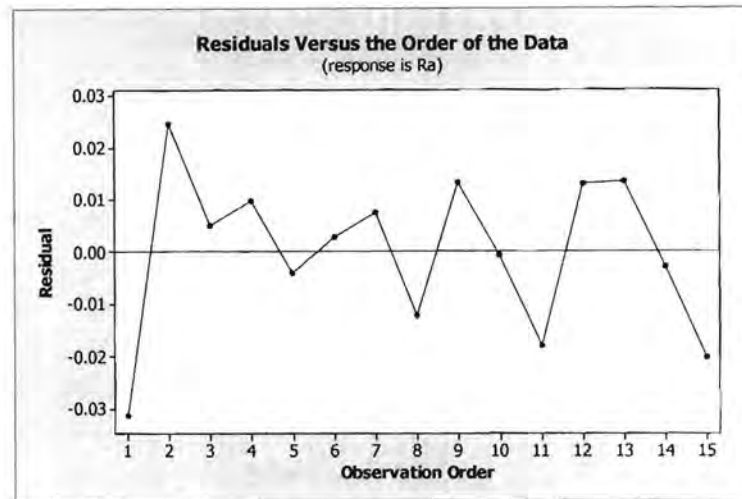
รูปที่ 3.21 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของการตัดแบบเปียก



รูปที่ 3.22 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย(Ra) ของการตัดแบบเปียก

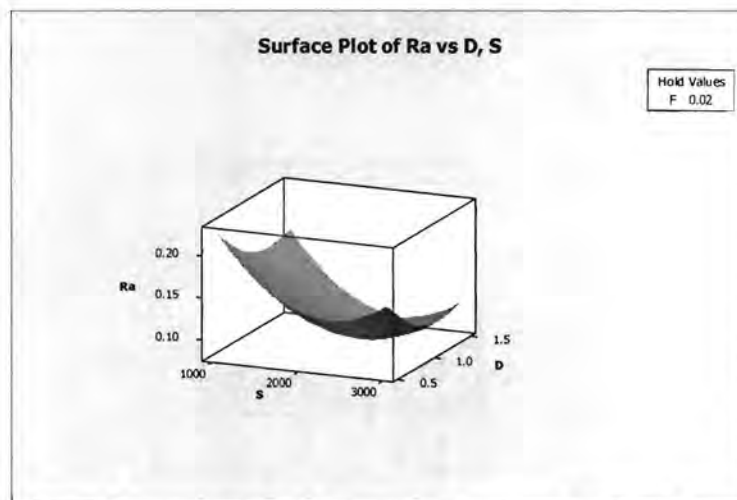


รูปที่ 3.23 การกระจายตัวของข้อมูลความหยาบผิวเฉลี่ย(Ra) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบเปียก

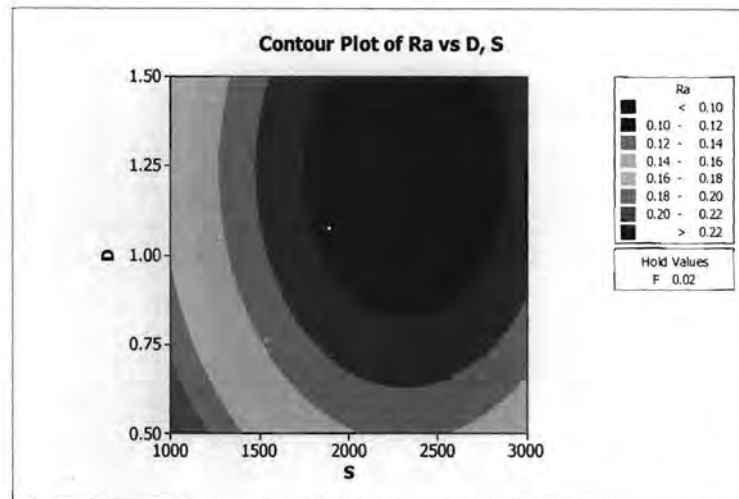


รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลอง ของการตัดแบบเป็ยก

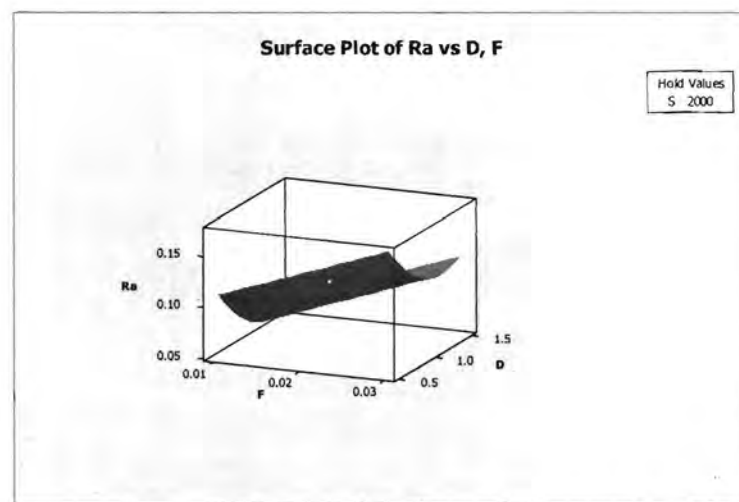
รูปที่ 3.23 และ 3.24 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาด (Residual) ซึ่งสังเกตได้ ว่าค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีการกระจายแบบสุ่ม หรือ ไม่มีรูปแบบ



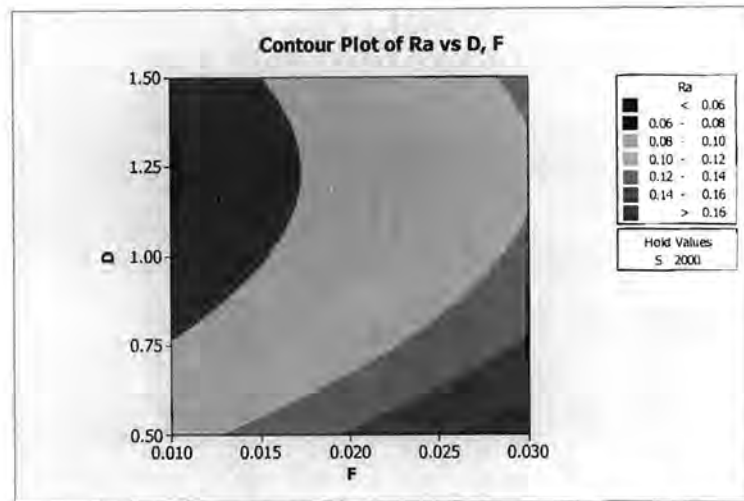
รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และความเร็วยรอบ (S) ของการตัดแบบเป็ยก



รูปที่ 3.26 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบเปียก



รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบเปียก



รูปที่ 3.28 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบเปียก

เมื่อพิจารณาค่าต่ำสุดของความหยาบผิวจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อกำหนดค่าเป้าหมายไว้เท่ากับ 0.15 ไมโครเมตร และค่าขอบบน (Upper value) ไว้เท่ากับ 0.9 ไมโครเมตร พบว่า ความหยาบผิวจะต่ำที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบ 2639.44 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.46 มิลลิเมตร นั้นหมายถึงความหยาบผิวจะต่ำที่สุดเมื่อปัจจัยทั้งสามมีค่าดังนี้ ความเร็วรอบสูง อัตราป้อนปานกลาง และความลึกตัดสูง ดังรูปที่ 3.29

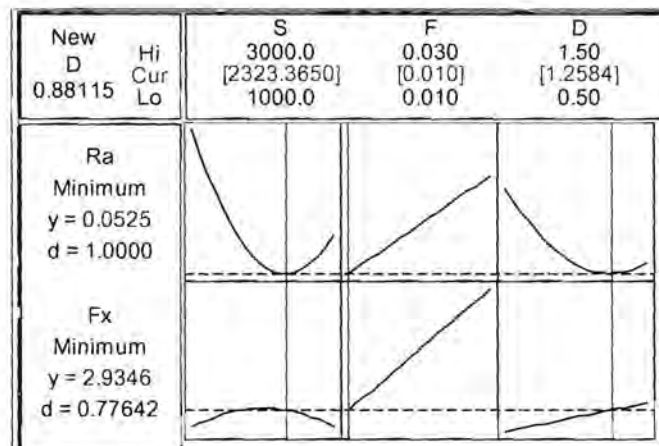
New D 1.0000	Hi Cur Lo	S 3000.0 [2323.3650] 1000.0	F 0.030 [0.010] 0.010	D 1.50 [1.2492] 0.50
Ra Minimum y = 0.0525 d = 1.0000				

รูปที่ 3.29 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อพิจารณา ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และตัวแปรต้น ของการตัดแบบเปียก

ทำการวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบอีกครั้งโดยมีปัจจัยเพิ่มเข้ามาคือ แรงในแนวแกน x โดยตั้งค่าเป้าหมาย (Target value) ไว้เท่ากับ 0.15 ไมโครเมตร และค่าขอบบน (Upper value) ไว้เท่ากับ 0.9 ไมโครเมตร สำหรับค่าผลตอบความหยาบผิว และ ตั้งค่าเป้าหมายไว้เท่ากับ 0.9 นิวตันและค่าขอบบนไว้เท่ากับ 10 นิวตัน สำหรับแรงตัดในแกน x (Fx)

ตารางที่ 3.11 ค่าเป้าหมายและขอบบนเพื่อใช้พิจารณาค่าต่ำสุดในพื้นที่ผิวผลตอบ ของการตัดแบบ เบี่ยง

ผลตอบ	เป้าหมาย	ค่าเป้าหมาย	ขอบบน
Ra	จุดต่ำที่สุด	0.15 ไมโครเมตร	0.9 ไมโครเมตร
Fx	จุดต่ำที่สุด	0.9 นิวตัน	10 นิวตัน



รูปที่ 3.30 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นที่ผิวผลตอบของการตัดแบบเบี่ยง

จากรูปที่ 3.30 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นที่ผิวผลตอบ โดยพบว่าค่าความหยابผิวต่ำ ที่สุดและเกิดแรงการตัดในแนวแกน x (Fx) น้อยที่สุดเมื่อ

- ความเร็วรอบ = 2,323.37 รอบต่อนาที
- อัตราป้อน = 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ
- ความลึกตัด = 1.25 มิลลิเมตร

หรือหมายถึง การกัดที่เงื่อนไขการตัด ความเร็วรอบและ อัตราป้อนตัดต่ำ และความลึกตัดสูง

3.5 สรุปสมการความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการตัดแบบเบี่ยง

สมการความหยابผิวเฉลี่ย (Ra)

$$Ra = 0.451150 - 2.40570E-04S + 3.05000F - 0.243040D + 5.19519E-08S^2 + 0.0980077D^2$$

สมการแรงแนวแกนป้อนตัด (Fx)

$$Fx = -0.483571 + 0.00243768S - 91.0000F - 0.432500D - 7.46607E-07SS + 0.0560000SF + 154.000FD$$

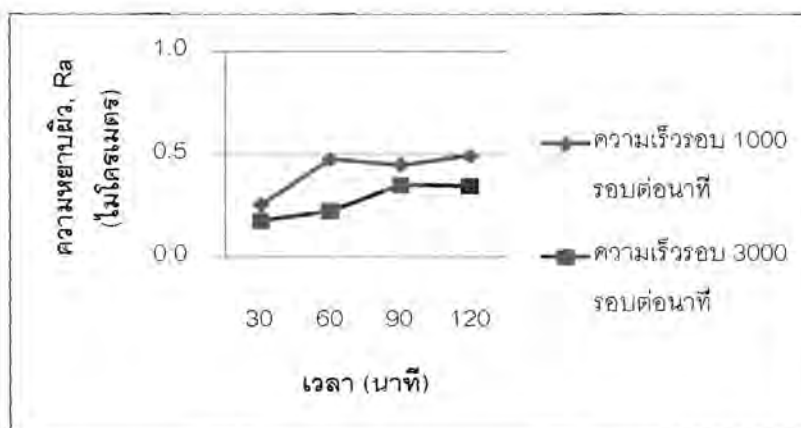
บทที่ 4

การตัดแบบลมเป่า

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับความเรียบของผิวชิ้นงาน

4.1.1 อิทธิพลของความเร็วยุโรปต่อความหยาบผิว

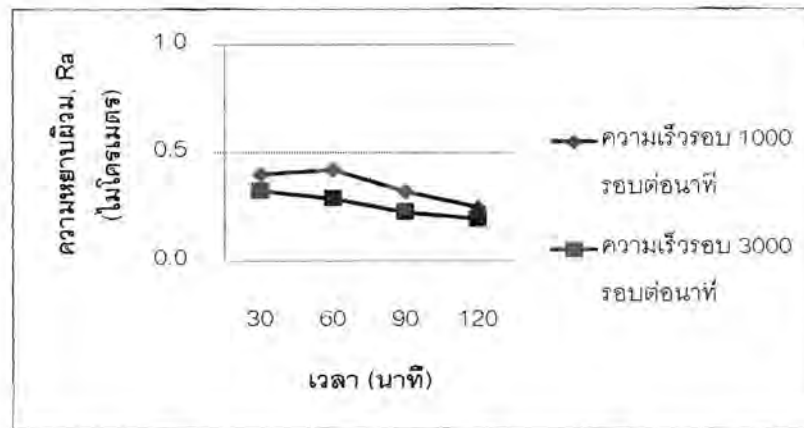
จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เห็นได้ว่าความเร็วยุโรปในการตัดที่ต่ำจะให้ค่าความหยาบผิวสูงกว่าความเร็วยุโรปในการตัดสูง สามารถอธิบายได้จากการตัดที่ความเร็วยุโรปสูงทำให้เกิดความร้อนสูงบริเวณพื้นที่ตัดเฉือน จึงส่งผลให้ชิ้นงานนิ่มขึ้นทำให้การตัดง่ายขึ้น จึงให้ค่าความหยาบผิวต่ำกว่าการใช้ความเร็วยุโรปต่ำ และนอกจากนี้เมื่อระยะเวลาในการตัดที่ยาวนานขึ้น ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลของการเกิด BUE ทำให้ความสามารถในการตัดเฉือนลดลงหรือการตัดเฉือนไม่มีเสถียรภาพและทำให้ได้ผิวชิ้นงานไม่ดี เพราะเมื่อการตัดยาวนานขึ้นอัตราการเกิด BUE สะสมเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้ความหยาบผิวชิ้นงานสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความลึก 1 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็วยุโรปต่าง ๆ

แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อระยะเวลาในการตัดที่ยาวนานขึ้นความหยาบผิวของชิ้นงานควรจะเพิ่มขึ้น แต่รูปที่ 4.2 กลับแสดงว่าความเรียบผิวมีแนวโน้มที่ลดลง สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากค่าความลึกตัดที่ต่างกันจะส่งผลต่อความเรียบผิวของชิ้นงานและแรงตัดที่เกิดขึ้น รวมถึงพลังงานที่ต้องใช้ในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุให้แยกออกจากกันก็จะแตกต่างกัน เนื่องจากรูปที่ 4.1 มีความลึกตัดสูงกว่ารูปที่ 4.2 จึงส่งผลให้พลังงานที่ใช้สูงตามไปด้วย จึงทำให้การสึกหรอของมีดตัดเกิดขึ้นมากกว่า ในขณะที่ความลึกตัดที่ต่ำจะทำให้อัตราการสึกหรอของมีดตัดเกิดขึ้นน้อย จึงทำ

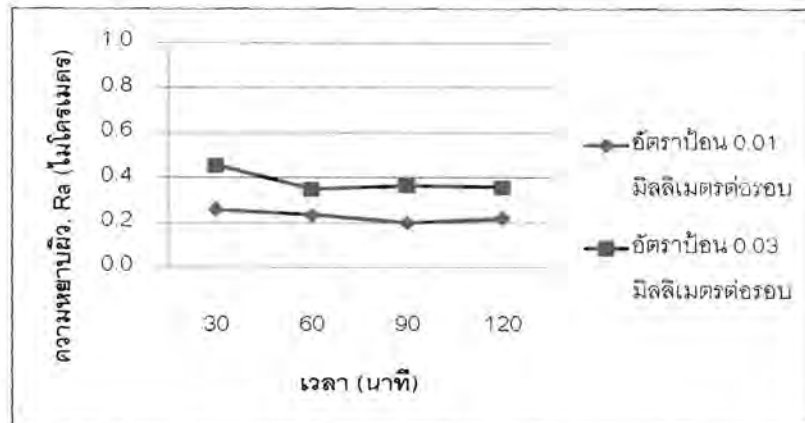
ให้การสึกหรอแทนที่ส่งผลเสียต่อความเรียบผิวของชิ้นงานกลับส่งผลดี คือทำให้ความเรียบผิวมีค่าน้อย อันเนื่องมาจากการสึกหรอทำให้ขอบคมตัดมีความมนเปรียบเสมือนเป็นการเพิ่มรัศมีของขอบคมตัดจึงทำให้ผิวชิ้นงานออกมาดีหรือค่าความหยาบผิวลดลง



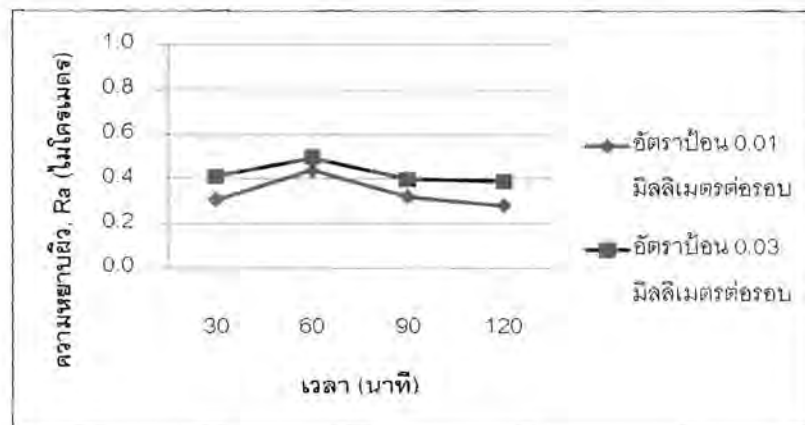
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความลึก 0.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

4.1.2 อิทธิพลของอัตราป้อนต่อความหยาบผิว

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 สามารถเปรียบเทียบได้ว่าที่อัตราการป้อนตัดที่สูง ทำให้ค่าความหยาบผิวสูง อธิบายได้จากอัตราป้อนที่มากกว่า หรือการเข้าตัดด้วยอัตราการกินเนื้อโลหะที่มากกว่าต่อรอบซึ่งตัดยากกว่า ส่งผลให้เกิดความหยาบที่สูงกว่า ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (พิจารณาจะสมการที่ 2.10) สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออัตราการป้อนตัดสูงขึ้นค่าความหยาบผิวที่ได้จะสูงขึ้นตาม และอีกเหตุผลหนึ่งคือการตัดด้วยอัตราป้อนตัดที่สูงจะต้องใช้แรงในการตัดที่สูงกว่า มีผลต่อการเกิดการสั่นของมีดตัดซึ่งส่งผลให้ความหยาบผิวสูงกว่าการกัดที่อัตราป้อนต่ำ ซึ่งแนวโน้มที่เกิดขึ้นก็เป็นไปในทิศทางเดียวกับการตัดแบบเปียก



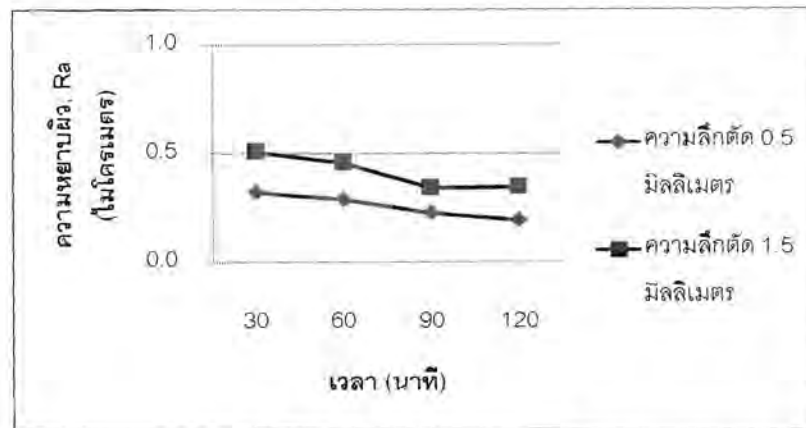
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเป็ยกที่ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ



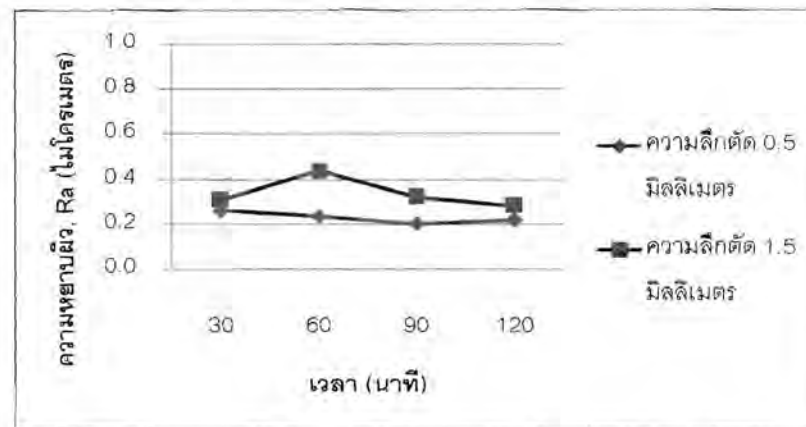
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเป็ยกที่ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ

4.1.3 อิทธิพลของความลึกตัดต่อความหยาบผิว

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 แสดงให้เห็นว่าการตัดด้วยความลึกตัดที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดความหยาบผิวที่สูงกว่า สามารถอธิบายได้จากการที่มิตตัดกินเนื้อผิวที่ลึกกว่าทำให้เกิดโอกาสในการสั่นสูงกว่าที่ความลึกตัดต่ำ เนื่องจากที่ความลึกตัดสูงมีพื้นที่สัมผัสระหว่างมิตตัดกับชิ้นงานสูง จึงทำให้ได้ความหยาบผิวที่สูงตามไปด้วย และอีกกรณีหนึ่งคือ ที่ความลึกในการตัดต่ำสำหรับการตัดแบบลมเป่ามีอุณหภูมิในการตัดที่เหมาะสมกว่าที่ความลึกตัดสูง จึงทำให้การตัดง่ายขึ้นกว่า ส่งผลให้ได้ความหยาบผิวของชิ้นงานที่ต่ำ



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความลึกตัดต่าง ๆ



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความลึกตัดต่าง ๆ

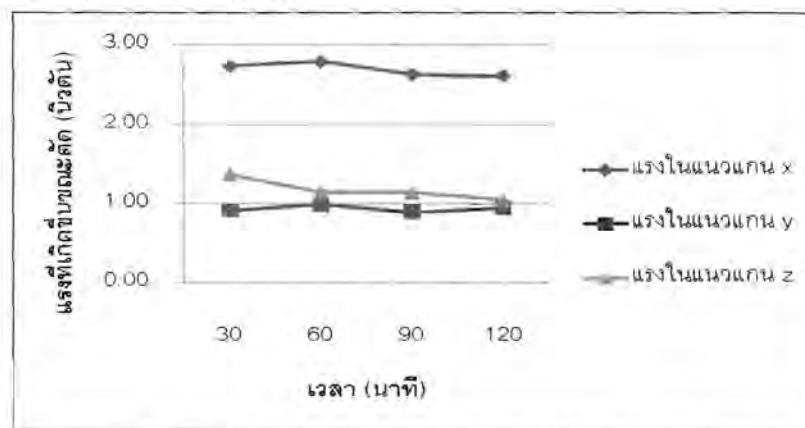
เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบที่ต่างกัน คือ ที่ 2,000 และ 3,000 รอบต่อนาที จะพบว่าความเร็วรอบสูงค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะเวลาในการตัดนานขึ้น สามารถอธิบายได้ว่า ที่ความเร็วรอบสูงวัสดุมีความอ่อนตัวทำให้การตัดเฉือนง่าย จึงส่งผลให้ความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลง และเนื่องจากขอบคมตัดของมีดกัดมีความคมมากขึ้นทำให้การตัดเฉือนได้ผิวชิ้นงานที่ดีกว่าที่ความเร็วรอบต่ำซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับการตัดแบบเปียก

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับแรงที่เกิดขึ้นขณะตัดในแกนต่าง ๆ ของการตัดแบบลมเป่า

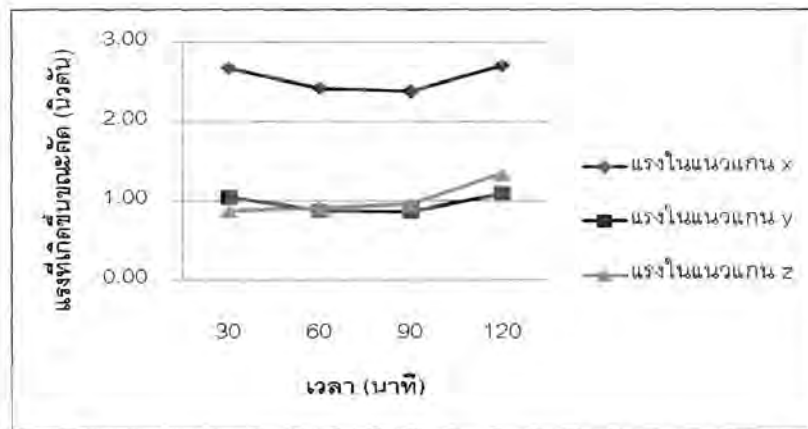
จากรูปที่ 4.7 ถึง 4.12 จะพบว่าแรงที่เกิดขึ้นในเวลาต่าง ๆ มีค่าไม่ต่างกันมากโดยแรงในแนวแกน x เกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือแรงในแนวแกน y ซึ่งจะมีค่าไม่ต่างจากแรงในแนวแกน z มากนัก ดังนั้นในการทดลองจึงนำแรงในแนวแกน x มาพิจารณาแรงเดียว

4.2.1 อิทธิพลของความเร็รรอบต่อแรงตัดในสามแกน

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 จะพบว่าความเร็รรอบที่แตกต่างกันจะไม่ส่งผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้น เนื่องจากแรงตัดที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกัน ซึ่งจะแตกต่างกับการตัดแบบเปียก โดยการตัดแบบเปียกจะเห็นว่าที่ความเร็รรอบสูงเกิดความร้อนสูงทำให้เนื้อวัสดุอ่อนตัวแรงตัดที่เกิดขึ้นควรจะต่ำ แต่เนื่องจากที่ความร้อนสูงจะทำให้มีดตัดเกิดการสึกหรอสูงด้วย ซึ่งความสึกหรอส่งผลมากกว่าการอ่อนตัวของเนื้อวัสดุทำให้เกิดแรงตัดสูงขึ้น ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นผลของสารหล่อเย็น ในขณะที่การตัดแบบลมเป่าไม่ใช้สารหล่อเย็นจึงทำให้ความเร็รรอบที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อแรงตัดที่เกิดขึ้น โดยแรงที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือแรงในแนวแกน x และที่รองลงมาและมีค่าใกล้เคียงกันคือ แรงในแนวแกน y และ z ตามลำดับ



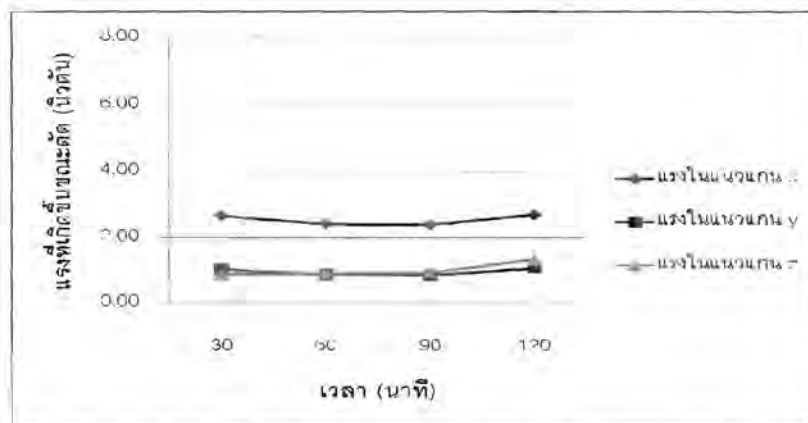
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็รรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า



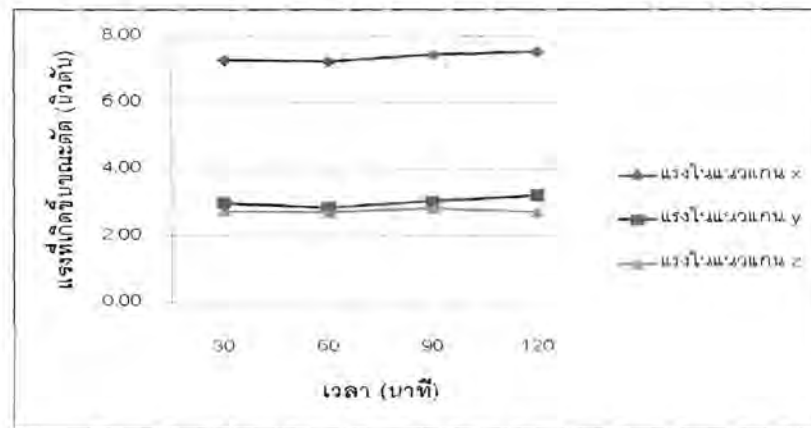
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า

4.2.2 อิทธิพลของอัตราป้อนต่อแรงตัดในสามแกน

รูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการตัดเฉือนชิ้นงาน จากรูปจะพบว่าแรงตัดในแนวแกน x มีค่าสูงสุด และแรงตัดในแนวแกน y และ z มีค่าที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบแรงตัดที่เกิดขึ้นที่อัตราการป้อนตัดที่ต่างกัน คือที่อัตราป้อนตัด 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่อัตราการป้อนตัดที่สูงกว่าจะเกิดแรงในขณะตัดสูงกว่าที่อัตราการป้อนตัดต่ำ สามารถอธิบายได้ว่า ที่อัตราการป้อนตัดสูงจะมีพื้นที่ในการตัดเฉือนสูง (พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับเนื้อชิ้นงาน) เนื่องจากระยะเวลาในการเคลื่อนที่เข้าตัดชิ้นงานสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดแรงในการตัดสูงตามไปด้วย ดังที่ได้อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้ในการตัดแบบเปียก



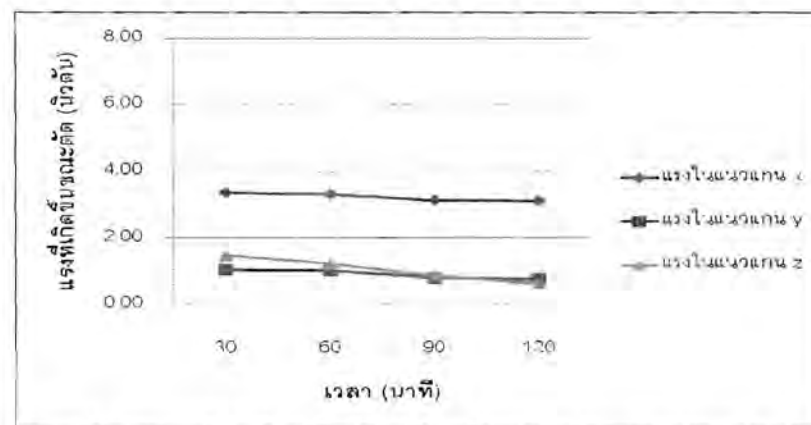
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า



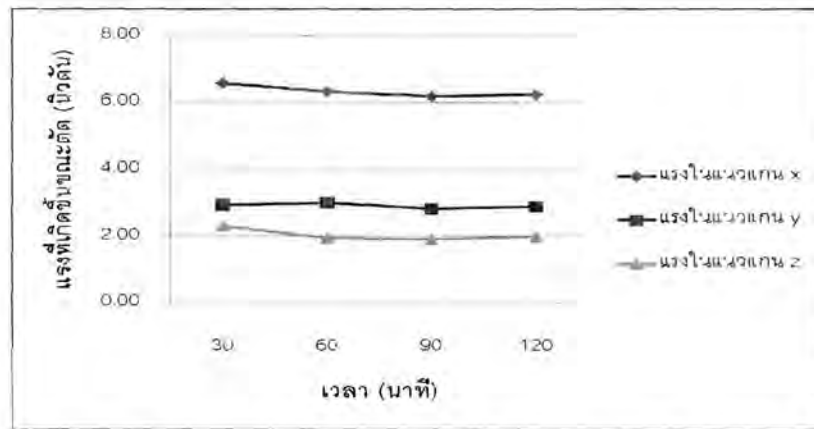
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า

4.2.3 อิทธิพลของความลึกตัดต่อแรงตัดในสามแกน

รูปที่ 4.11 และ 4.12 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ตัดเฉือนชิ้นงานที่ความลึกแตกต่างกันคือ ที่ความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตร จากรูปจะพบว่าแรงตัดในแนวแกน x มีค่าสูงสุด และแรงตัดในแนวแกน y และ z มีค่าที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับอิทธิพลของอัตราการป้อนตัด ที่ความลึกตัดที่สูงกว่าจะเกิดแรงในขณะตัดสูงกว่าที่ความลึกตัดต่ำ ซึ่งเหตุผลสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับอัตราการป้อนตัด นั่นคือ ที่ความลึกตัดสูงจะมีพื้นที่ในการตัดเฉือนสูง (พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับเนื้อชิ้นงาน) จึงทำให้เกิดแรงในการตัดสูงตามไปด้วย ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการตัดแบบเปียก



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า

4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของแรงที่ใช้ในการตัดของการตัดแบบลมเป่า

ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดลองความขรุขระผิวและแรงในการตัดแบบลมเป่า

Standard Order	Input Value			Responses		
	S (rpm)	F (mm/rev)	D (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)
1	1,000	0.01	1	2.61	0.94	1.05
2	3,000	0.01	1	2.70	1.09	1.34
3	1,000	0.03	1	5.90	2.41	2.09
4	3,000	0.03	1	7.54	3.21	2.72
5	1,000	0.02	0.5	3.11	0.76	0.63
6	3,000	0.02	0.5	3.30	1.13	1.27
7	1,000	0.02	1.5	6.24	2.89	1.99
8	3,000	0.02	1.5	7.12	3.29	2.33
9	2,000	0.01	0.5	2.27	0.86	1.06
10	2,000	0.03	0.5	5.29	1.85	1.93
11	2,000	0.01	1.5	3.53	1.41	1.44
12	2,000	0.03	1.5	9.58	4.49	3.23
13	2,000	0.02	1	4.93	2.03	1.65
14	2,000	0.02	1	5.19	2.07	2.06
15	2,000	0.02	1	5.46	2.40	1.93

จากข้อมูลแรงตัดที่แนวแกนต่างๆ (F_x F_y และ F_z) ในตารางที่ 4.1 เมื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.2 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน x ก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมนเป่า

Source	DF	Seq	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	61.1308	61.1308	6.7923	61.71	0
Linear	3	57.4913	57.4913	19.1638	174.1	0
Square	3	0.6247	0.6247	0.2082	1.89	0.249
Interaction	3	3.0149	3.0149	1.005	9.13	0.018
Residual Error	5	0.5504	0.5504	0.1101		
Lack-of-Fit	3	0.4099	0.4099	0.1366	1.95	0.357
Pure Error	2	0.1405	0.1405	0.0702		
Total	14	61.6812				

ตารางที่ 4.3 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบลมนเป่า

Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		5.1933	0.1915	27.112	0
S	rpm	0.35	0.1173	2.984	0.031
F	mm/rev	2.15	0.1173	18.329	0
D	mm	1.5625	0.1173	13.321	0
S*S	rpm ²	-0.3654	0.1727	-2.116	0.088
F*F	mm ² /rev ²	-0.1404	0.1727	-0.813	0.453
D*D	mm ²	0.1146	0.1727	0.664	0.536
S*F	rpm*mm/rev	0.3875	0.1659	2.336	0.067
S*D	rpm*mm	0.1725	0.1659	1.04	0.346
F*D	mm ² /rev	0.7575	0.1659	4.566	0.006

S = 0.3318 R-Sq = 99.1% R-Sq(adj) = 97.5%

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ค่าความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือ มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่า Lack of fit test ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอก

ถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value 0.357 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม

เมื่อพิจารณาต่อไปพบว่าตัวแปรที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ได้ในการ Regression ได้แก่ ค่าคงที่ ความเร็วรอบ (S) อัตราป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) ความสัมพันธ์กันระหว่างอัตราป้อนและความลึกตัด (FD) ซึ่งทุกพจน์มี P-value น้อยกว่า 0.05 ทั้งสิ้น และทำการทดลองตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่น (P-value น้อยกว่า 0.05) พบว่าได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน x หลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบลมเป่า

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	59.7865	59.7865	14.9466	78.89	0
Linear	3	57.4913	57.4913	19.1638	101.14	0
Interaction	1	2.2952	2.2952	2.2952	12.11	0.006
Residual Error	10	1.8947	1.8947	0.1895		
Lack-of-Fit	8	1.7542	1.7542	0.2193	3.12	0.265
Pure Error	2	0.1405	0.1405	0.0702		
Total	14	61.6812				

ตารางที่ 4.5 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบลมเป่า

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4.9847	0.1124	44.352	0
S	0.35	0.1539	2.274	0.046
F	2.15	0.1539	13.971	0
D	1.5625	0.1539	10.153	0
F*D	0.7575	0.2176	3.481	0.006
S = 0.4353 R-Sq = 96.9% R-Sq(adj) = 95.7%				

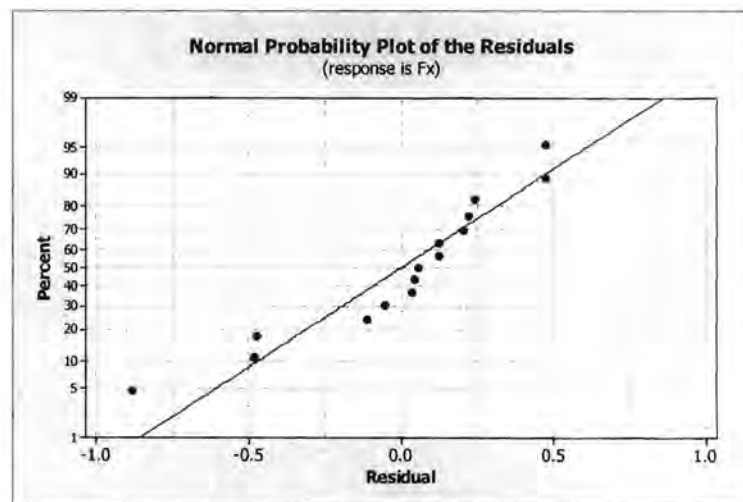
พบว่าสมการถดถอยที่ได้ยังคงมีค่า R-Square และค่า R-Square Adj. สูง และมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 สำหรับทุกปัจจัย และค่า P-value ของค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ

(Lack of fit) มีค่า 0.16 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายความว่าสมการนี้เหมาะสม ทำให้ได้สมการ ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงในแนวแกน x ต่อตัวแปรต้นต่าง ๆ คือ

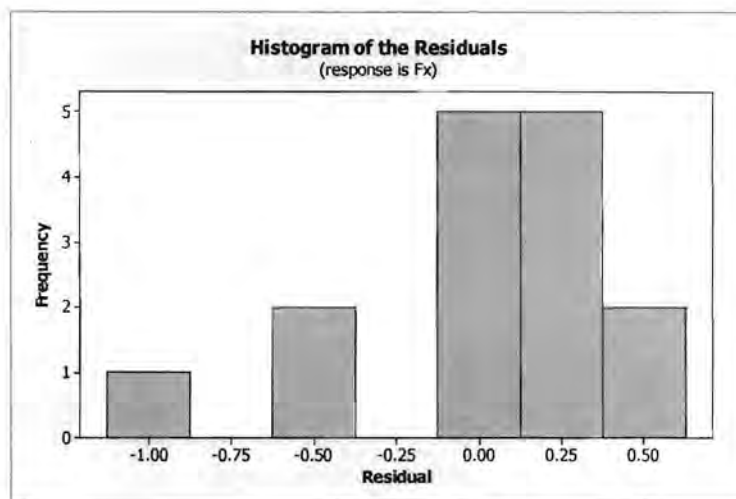
$$F_x = -0.110333 + 0.00035S + 63.5F + 0.095D + 151.5FD$$

จากสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ว่า อัตราป้อนตัด (F) และผลคูณของอัตราป้อนตัดกับความลึกตัด (FD) มีอิทธิพลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x มาก ในส่วนของความเร็วรอบ (S) และความลึกตัด (D) มีอิทธิพลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x น้อย ดังนั้นถ้าในการตัดมีอัตราป้อนตัดและความลึกตัดสูง จะส่งผลให้แรงในแนวแกน x มีค่ามาก

เมื่อทำการวิเคราะห์กราฟรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นการตรวจสอบสมมติฐานที่ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ จะสังเกตได้ว่าข้อมูลมีค่าใกล้เคียงเส้นตรงที่กำหนด แสดงให้เห็นถึงสมมติฐานมีความถูกต้อง ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.14 จะเห็นกลุ่มข้อมูลมีแนวโน้มที่จะกระจายเป็นรูปประฆังคว่ำ

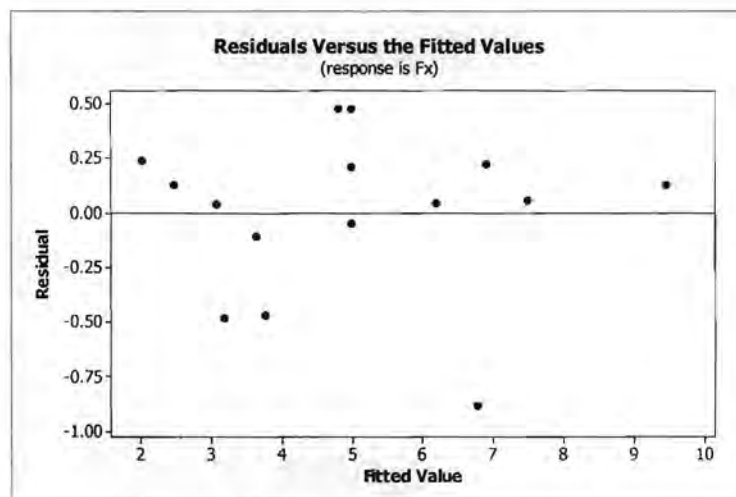


รูปที่ 4.13 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน x (Fx) ของการกัดแบบลมเป่า

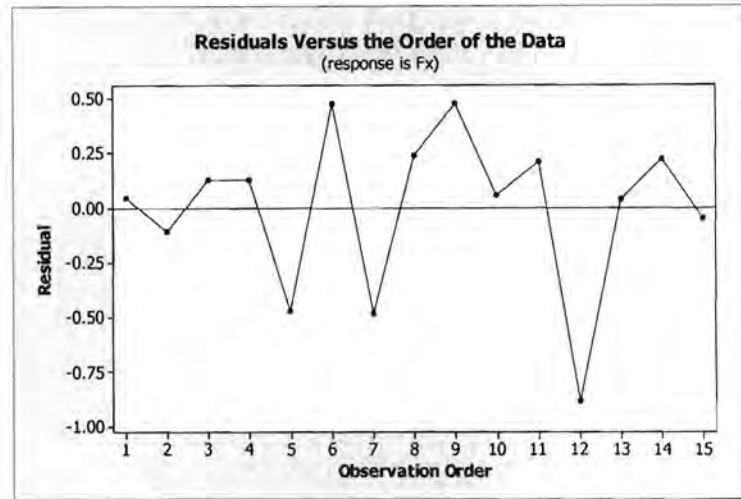


รูปที่ 4.14 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน x (Fx) ของการกัดแบบลมเป่า

รูปที่ 4.15 และ 4.16 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาด (Residual) ซึ่งไม่มีรูปแบบการกระจาย หรือมีการกระจายแบบสุ่ม

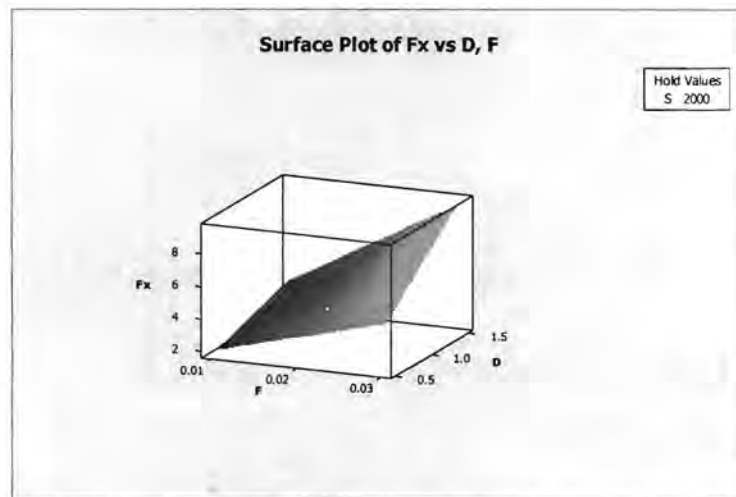


รูปที่ 4.15 การกระจายตัวของข้อมูลแรงแนวแกน x (Fx) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการกัดแบบลมเป่า

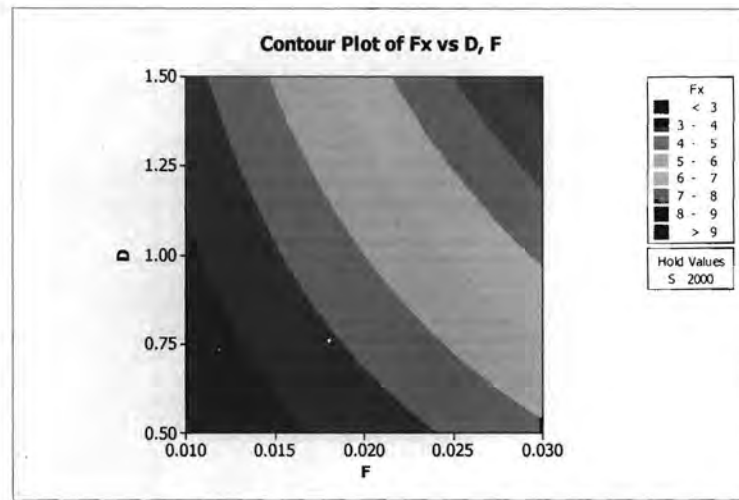


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของข้อมูลแรงแนวแกน x (Fx) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบลมเป่า

รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการกัดอลูมิเนียมแบบลมเป่าจะได้แรงในแนวแกน x (Fx) จะมีค่าน้อยที่สุด ที่อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ หรือเป็นอัตราป้อนที่ต่ำและความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร หรือที่ความลึกตัดต่ำ โดยกราฟคอนทัวร์แสดงถึงระดับความหยাবผิวที่ความเร็วรอบ และความลึกตัดต่าง ๆ โดยพื้นที่สีน้ำเงินเข้ม จะแสดงถึงบริเวณที่ใช้แรงในการตัดแกน x ต่ำที่สุด



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน x (Fx) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อนตัด (F) ของการตัดแบบลมเป่า



รูปที่ 4.18 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน x (F_x) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อนตัด (F) ของการตัดแบบลมเป่า

4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวของการตัดแบบ ลมเป่า

ตารางที่ 4.6 การออกแบบการทดลองต่อความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่า

Standard Order	Input Value			Responses
	S (rpm)	F (mm/rev)	D (mm)	Ra (micro m)
1	1,000	0.01	1	0.3304
2	3,000	0.01	1	0.3180
3	1,000	0.03	1	0.4331
4	3,000	0.03	1	0.4069
5	1,000	0.02	0.5	0.3532
6	3,000	0.02	0.5	0.3052
7	1,000	0.02	1.5	0.2828
8	3,000	0.02	1.5	0.2500
9	2,000	0.01	0.5	0.2688
10	2,000	0.03	0.5	0.3599
11	2,000	0.01	1.5	0.1260
12	2,000	0.03	1.5	0.3319
13	2,000	0.02	1	0.3529
14	2,000	0.02	1	0.3486
15	2,000	0.02	1	0.3618

จากข้อมูลความหยาบผิวในตารางที่ 4.6 เมื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.7 ความแปรปรวนของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมนเป่า

Source	DF	Seq	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.071684	0.071684	0.007965	20.35	0.002
Linear	3	0.042605	0.042605	0.014202	36.28	0.001
Square	3	0.025679	0.025679	0.00856	21.87	0.003
Interaction	3	0.0034	0.0034	0.001133	2.9	0.141
Residual Error	5	0.001957	0.001957	0.000391		
Lack-of-Fit	3	0.001867	0.001867	0.000622	13.73	0.069
Pure Error	2	0.000091	0.000091	0.000045		
Total	14	0.073641				

ตารางที่ 4.8 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมนเป่า

Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.3544	0.011423	31.028	0
S	rpm	-0.01493	0.006995	-2.134	0.086
F	mm/rev	0.061075	0.006995	8.731	0
D	mm	-0.03705	0.006995	-5.297	0.003
S*S	rpm ²	0.021908	0.010297	2.128	0.087
F*F	mm ² /rev ²	-0.00424	0.010297	-0.412	0.697
D*D	mm ²	-0.07854	0.010297	-7.628	0.001
S*F	rpm*mm/rev	-0.00345	0.009893	-0.349	0.741
S*D	rpm*mm	0.0038	0.009893	0.384	0.717
F*D	mm ² /rev	0.0287	0.009893	2.901	0.034
S = 0.01979 R-Sq = 97.3% R-Sq(adj) = 92.6%					

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ค่าความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่า Lack of fit test ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึง

การขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value 0.069 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม

เมื่อพิจารณาต่อไปพบว่าตัวแปรที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ได้ในการ Regression ได้แก่ ค่าคงที่ อัตราป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) ความลึกตัดลำดับสอง (D^2) ความสัมพันธ์กันระหว่างอัตราป้อนและความลึกตัด (FD) ซึ่งทุกพจน์มี P-value น้อยกว่า 0.05 ทั้งสิ้น และทำการทดลองตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่น (P-value น้อยกว่า 0.05) พบว่าได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.9 ความแปรปรวนของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมนเป่า

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	0.067894	0.067894	0.016973	29.53	0
Linear	2	0.040823	0.040823	0.020411	35.51	0
Square	1	0.023776	0.023776	0.023776	41.37	0
Interaction	1	0.003295	0.003295	0.003295	5.73	0.038
Residual Error	10	0.005747	0.005747	0.000575		
Lack-of-Fit	4	0.003547	0.003547	0.000887	2.42	0.16
Pure Error	6	0.002201	0.002201	0.000367		
Total	14	0.073641				

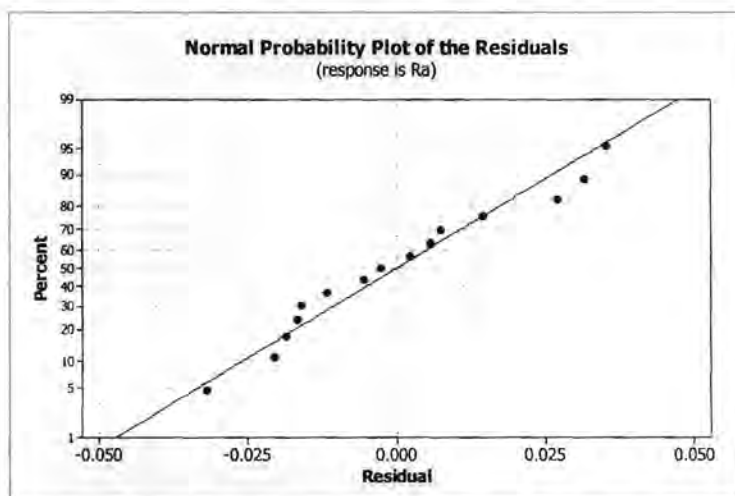
ตารางที่ 4.10 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมนเป่า

Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.36453	0.009061	40.23	0.000
F	mm/rev	0.06108	0.008476	7.206	0.000
D	mm	-0.03705	0.008476	-4.371	0.001
D*D	mm ²	-0.0798	0.012408	-6.432	0.000
F*D	mm ² /rev	0.0287	0.011987	2.394	0.038

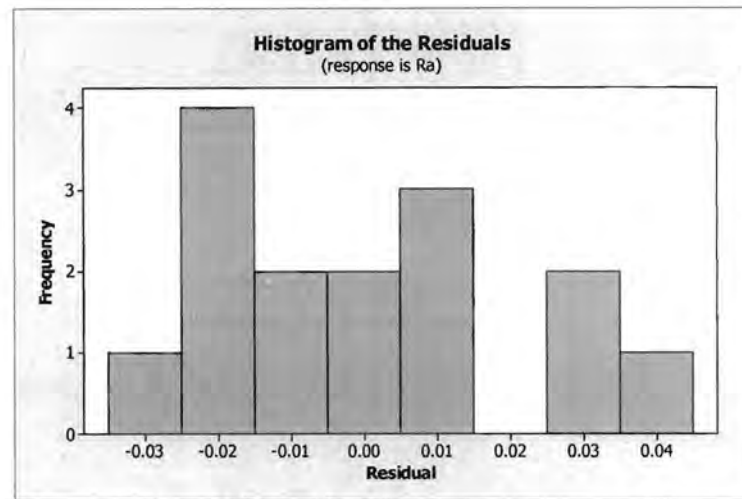
พบว่าสมการถดถอยที่ได้ยังคงมีค่า R-Square และค่า R-Square Adj. สูง และมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ที่สำคัญคือค่า P-value ของค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) มีค่า 0.16 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่าเพิ่มขึ้น หมายความว่าสมการนี้เหมาะสม ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิวเฉลี่ยต่อตัวแปรต้นต่าง ๆ คือ

$$Ra = 0.112064 + 0.367500F + 0.449529D - 0.319214D^2 + 5.74000FD$$

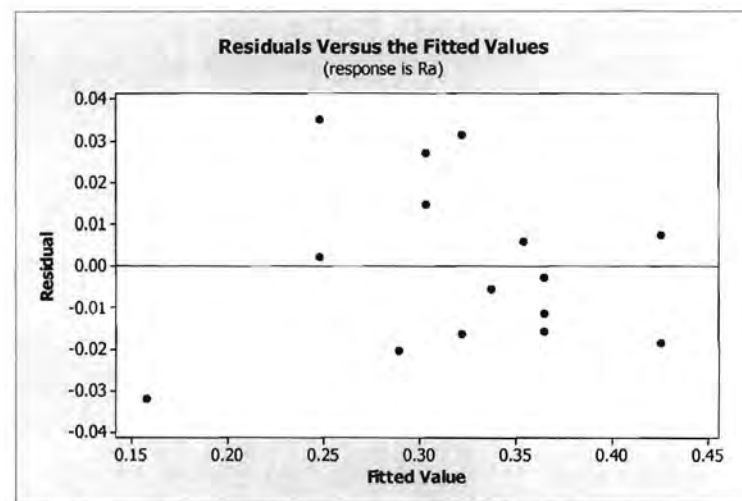
จากสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ว่า ผลคูณของอัตราป้อนตัดกับความลึกตัด (FD) มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวมาก ในส่วนของอัตราป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) และความลึกตัดยกกำลังสอง (D^2) มีอิทธิพลต่อแรงที่เกิดขึ้นต่อความหยาบผิวน้อย ดังนั้นถ้าในการตัดมีอัตราป้อนตัดและความลึกตัดสูง จะส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าน้อย



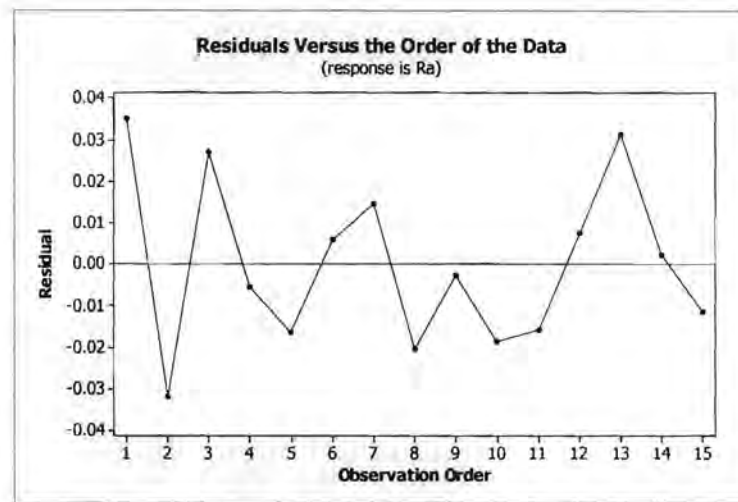
รูปที่ 4.19 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของการตัดแบบลมเป่า



รูปที่ 4.20 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของการตัดแบบลมเป่า

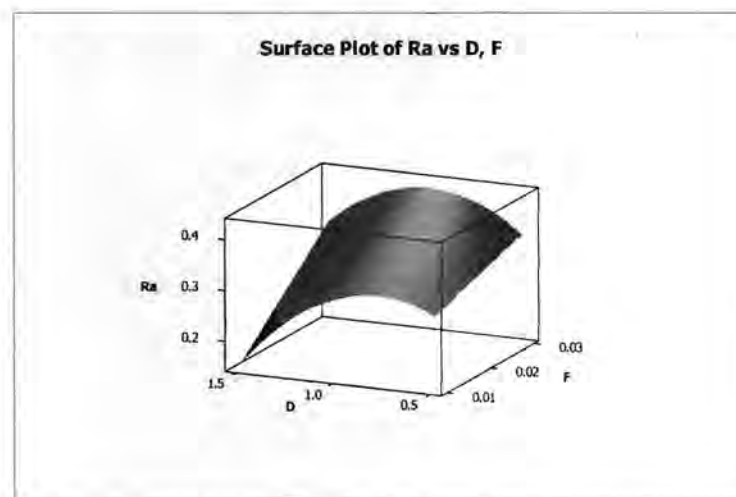


รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของข้อมูลความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ที่เป็นอิสระต่อกันของการตัดแบบลมเป่า

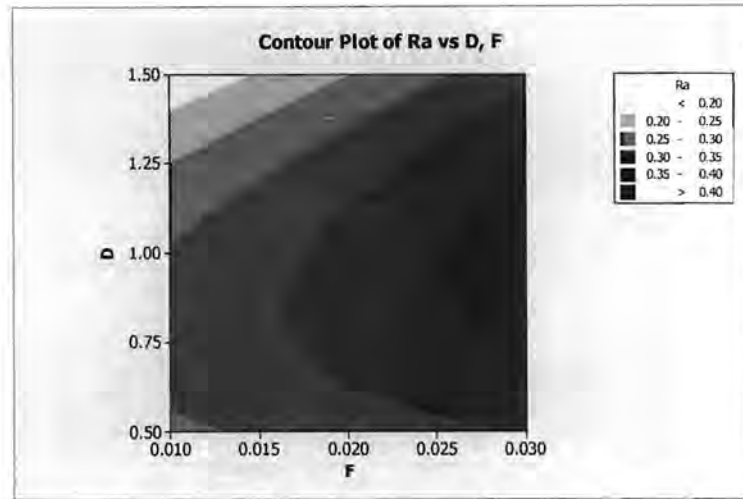


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของการตัดแบบลมเป่า

ความสัมพันธ์แรงตัดในแนวแกน x (F_x) เมื่อทำการวิเคราะห์หกรูปที่ 4.19 ซึ่งเป็นการตรวจสอบสมมติฐานที่ว่าข้อมูลมีการกระจายเป็นปกติ จะสังเกตได้ว่าข้อมูลมีค่าใกล้เคียงเส้นตรงที่กำหนด แสดงให้เห็นถึงสมมติฐานมีความถูกต้อง ข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 จะเห็นกลุ่มข้อมูลมีแนวโน้มที่จะกระจายเป็นรูประฆังคว่ำ และรูปที่ 4.21 และ 4.22 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาด (Residual) ซึ่งไม่มีรูปแบบการกระจาย หรือมีการกระจายแบบสุ่ม



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบลมเป่า



รูปที่ 4.24 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบลมเป่า

เมื่อพิจารณาหาจุดต่ำสุดของความหยาบผิวจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อกำหนดค่าเป้าหมายไว้เท่ากับ 0.2 ไมโครเมตร และค่าขอบบน (Upper value) ไว้เท่ากับ 0.9 ไมโครเมตร พบว่า ความหยาบผิวจะต่ำที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบ 2737.79 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร นั่นหมายถึงความหยาบผิวจะต่ำที่สุดเมื่อความเร็วรอบสูง อัตราป้อนตัดต่ำ และความลึกตัดต่ำ ดังรูป

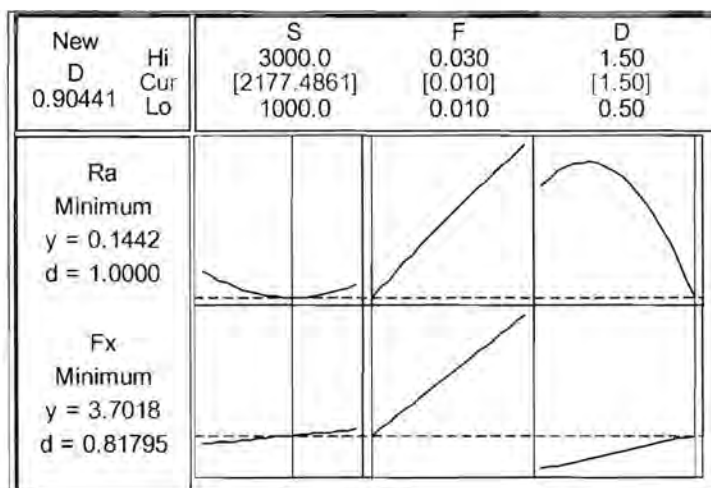
Optimal	S	F	D
D	3000.0	0.030	1.50
Hi	[2737.7918]	[0.010]	[1.5000]
0.99855	1000.0	0.010	0.50
Lo			
Ra			
Minimum	y = 0.1511		
d = 0.99855	d = 0.99855		

รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์หาค่าจุดต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อพิจารณา ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และตัวแปรต้นของการตัดแบบลมเป่า

ทำการวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบอีกครั้งโดยมีปัจจัยเพิ่มเข้ามาคือแรงในแนวแกน x โดยตั้งค่าเป้าหมาย (Target value) ไว้เท่ากับ 0.2 ไมโครเมตร และค่าขอบบน (Upper value) ไว้เท่ากับ 0.9 ไมโครเมตร สำหรับค่าผลตอบความหยาบผิว และ ตั้งค่าเป้าหมายไว้เท่ากับ 2.3 นิวตันและค่าขอบบนไว้เท่ากับ 10 นิวตันสำหรับแรงตัดในแกน x (Fx)

ตารางที่ 4.11 ค่าเป้าหมายและขอบบนเพื่อใช้พิจารณาค่าต่ำสุดในพื้นที่ผิวผลตอบของการตัดแบบลมเป่า

ผลตอบ	เป้าหมาย	ค่าเป้าหมาย	ขอบบน
Ra	จุดต่ำที่สุด	0.15 ไมโครเมตร	0.9 ไมโครเมตร
Fx	จุดต่ำที่สุด	2.3 นิวตัน	10 นิวตัน



รูปที่ 4.26 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นที่ผิวผลตอบของการตัดแบบลมเป่า

จากรูปที่ 4.26 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นที่ผิวผลตอบ โดยพบว่าค่าความหนายาวผิวต่ำที่สุดและเกิดแรงการตัดในแนวแกน x (Fx) น้อยที่สุดเมื่อ

ความเร็วรอบ = 2,177.49 รอบต่อนาที

อัตราป้อน = 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ

ความลึกตัด = 1.5 มิลลิเมตร

หรือหมายถึง การกัดที่เงื่อนไขการตัด ความเร็วรอบปานกลาง อัตราป้อนตัดต่ำ และความลึกตัดสูง

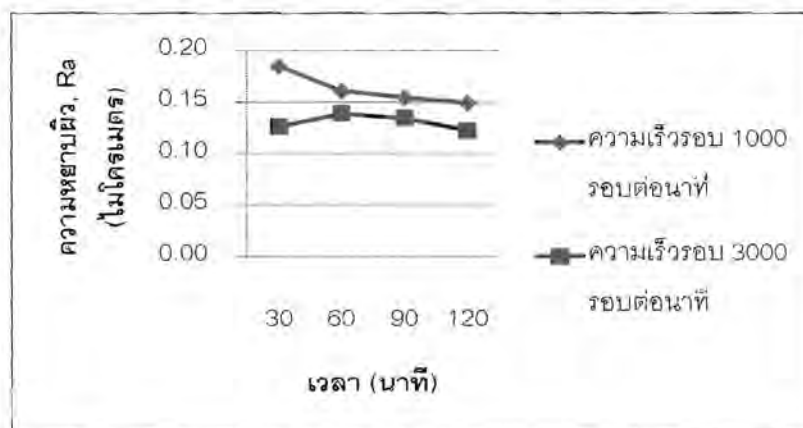
บทที่ 5

การตัดแบบละอองสารหล่อเย็น

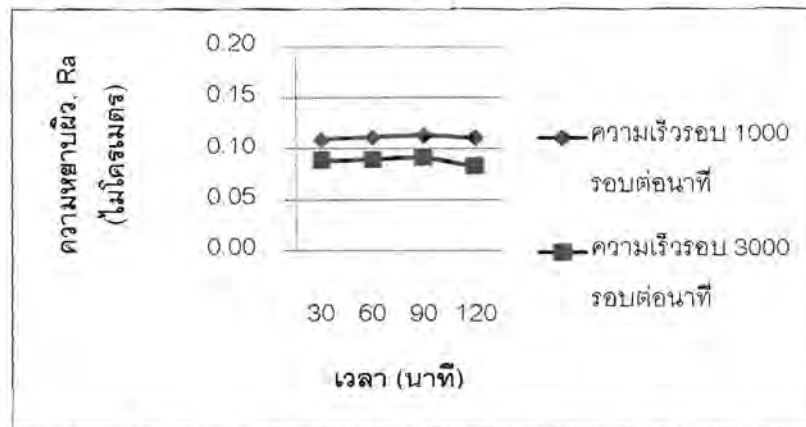
5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับความเรียบของผิวชิ้นงานของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

5.1.1 อิทธิพลของความเร็รรอบต่อความหยาบผิว

จากรูปที่ 5.1 และ 5.2 เห็นได้ว่าความเร็รรอบในการตัดที่ต่ำจะให้ค่าความหยาบผิวสูงกว่าความเร็รรอบในการตัดสูง ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการตัดแบบเปียกและแบบลมเป่า สามารถอธิบายได้จากการตัดที่ความเร็รรอบสูงทำให้เกิดความร้อนสูงบริเวณพื้นที่ตัดเฉือน จึงส่งผลให้ชิ้นงานนิ่มขึ้นทำให้การตัดง่ายขึ้น จึงให้ค่าความหยาบผิวต่ำกว่าการใช้ความเร็รรอบต่ำ



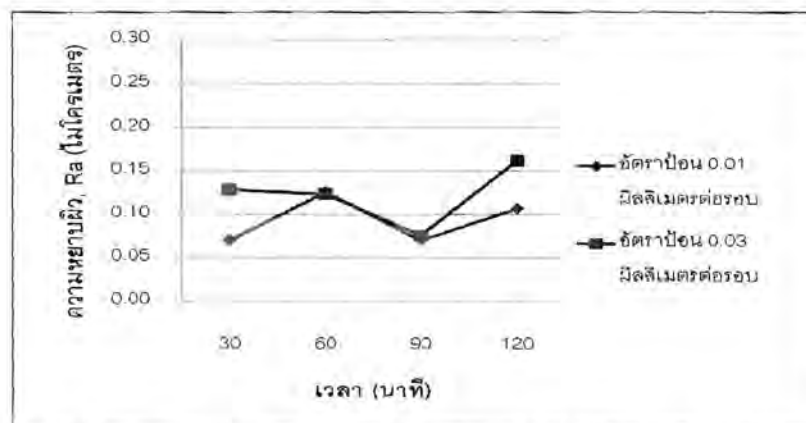
รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความเร็รรอบต่าง ๆ



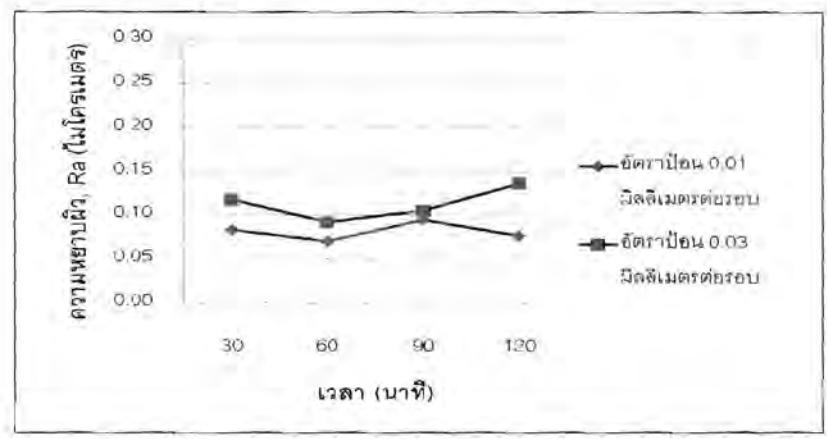
รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ

5.1.2 อิทธิพลของอัตราป้อนต่อความหยาบผิว

จากรูปที่ 5.3 และ 5.4 สามารถเปรียบเทียบได้ว่าที่อัตราการป้อนตัดที่สูง ทำให้ค่าความหยาบผิวสูง อธิบายได้จากอัตราป้อนที่มากกว่า หรือการเข้าตัดด้วยอัตราการกินเนื้อโลหะที่มากกว่าต่อรอบซึ่งตัดยากกว่า ส่งผลให้เกิดความหยาบที่สูงกว่า ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน (พิจารณาจะสมการที่ 2.10) สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออัตราการป้อนตัดสูงขึ้นค่าความหยาบผิวที่ได้จะสูงขึ้นตาม และอีกเหตุผลหนึ่งคือการตัดด้วยอัตราป้อนตัดที่สูง จะต้องใช้แรงในการตัดที่สูงกว่า มีผลต่อการเกิดการสั่นของมีดตัดซึ่งส่งผลให้ความหยาบผิวสูงกว่าการกัดที่อัตราป้อนต่ำ ซึ่งแนวโน้มที่เกิดขึ้นก็เป็นไปในทิศทางเดียวกับการตัดแบบเปียกและการตัดแบบลมเป่า



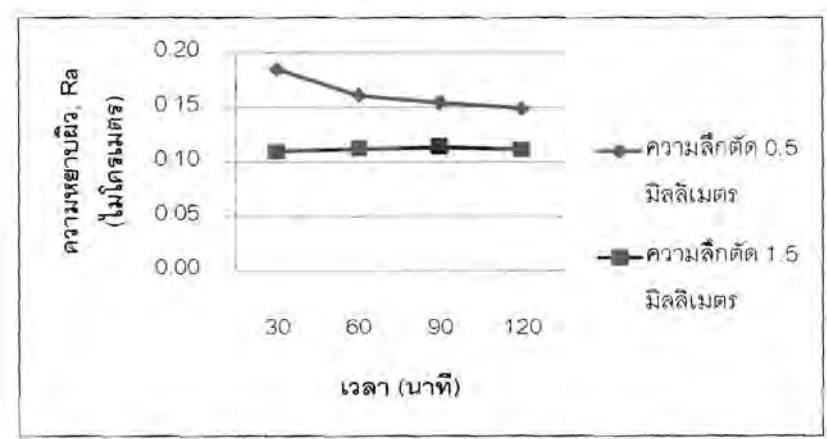
รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ที่อัตราป้อนต่าง ๆ



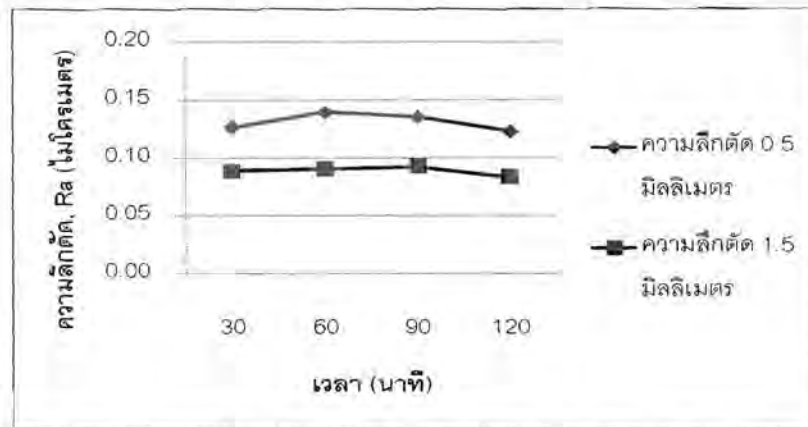
รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ที่อัตราป้อนต่าง ๆ

5.1.3 อิทธิพลของความลึกตัดต่อความหยาบผิว

จากรูปที่ 5.5 และ 5.6 แสดงให้เห็นว่าการตัดด้วยความลึกตัดที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดความหยาบผิวที่ต่ำกว่า สามารถอธิบายได้จากการที่มีดตัดกินเนื้อผิวที่ลึกกว่าทำให้เกิดความร้อนสะสมที่สูงกว่าที่ความลึกตัดต่ำ เนื่องจากที่ความลึกตัดสูงมีพื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับชิ้นงานสูง จึงทำให้เกิดความร้อนสูง จึงทำให้เนื้อวัสดุอ่อนตัวและในขณะเดียวกันก็ได้รับการระบายความร้อนจากสารหล่อเย็นทำให้อุณหภูมิในการตัดมีความเหมาะสม ส่งผลให้การตัดง่ายขึ้นและทำให้ได้ค่าความเรียบผิวที่ต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการตัดแบบเปียก ในขณะที่การตัดแบบลมเป่าจะเกิดผลตรงกันข้ามกับการตัดแบบเปียกและแบบละอองสารหล่อเย็น จึงกล่าวเป็นผลมาจากการใช้สารหล่อเย็นช่วยในการตัด



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความลึกตัดต่างๆ



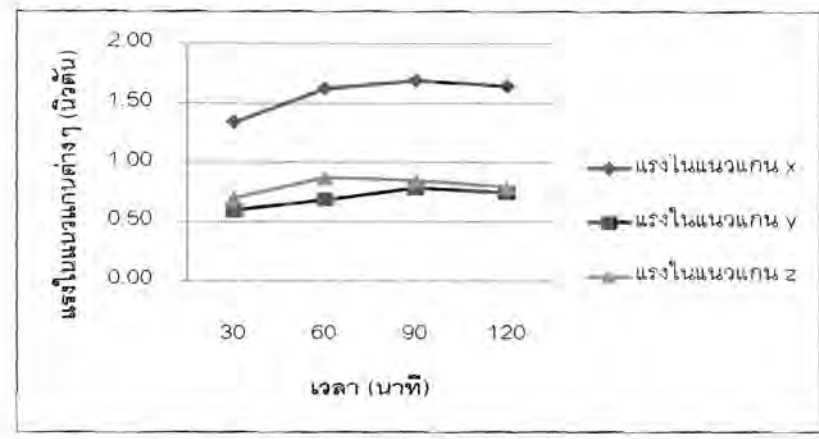
รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความลึกดัดต่างๆ

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับแรงที่เกิดขึ้นขณะตัดในแกนต่าง ๆ ของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

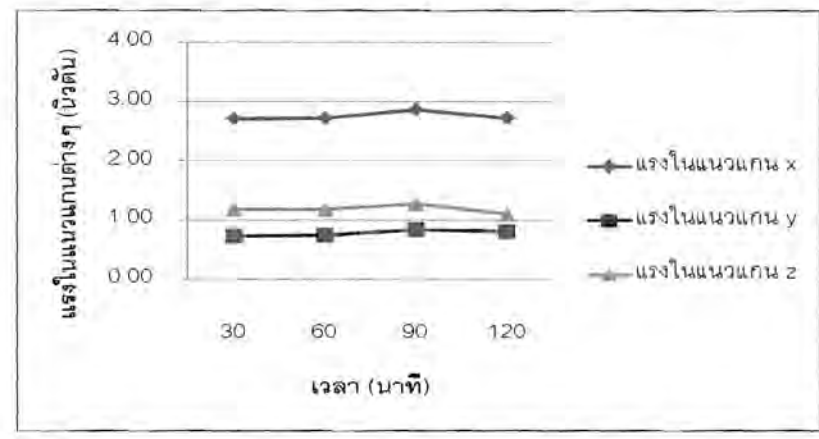
จากรูปที่ 5.7 ถึง 5.12 จะเห็นว่าแรงที่เกิดขึ้นในเวลาต่าง ๆ มีค่าไม่ต่างกันมากโดยแรงในแนวแกน x เกิดขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือแรงในแนวแกน y ซึ่งจะมีค่าไม่ต่างจากแรงในแนวแกน z มากนัก ดังนั้นในการทดลองจึงนำแรงในแนวแกน x มาพิจารณาแรงเดียว

5.2.1 อิทธิพลของความเร็วรอบต่อแรงตัดในสามแกน

จากรูปที่ 5.7 จะพบว่าที่ระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นแรงตัดมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นด้วย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าที่ความเร็วรอบต่ำทำให้เกิดอุณหภูมิในการตัดไม่เหมาะสม การตัดเฉือนเป็นไปได้ยากทำให้ต้องใช้พลังงานในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุให้แยกออกจากกันสูง และในขณะเดียวกันที่ความเร็วรอบในการตัดต่ำจะทำให้เกิด BUE ส่งผลให้การตัดเฉือนเป็นไปได้ยากและการตัดไม่มีความเสถียรทำให้แรงตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 5.5 ที่ความเร็วรอบต่ำจะให้ความหยาบผิวสูงกว่าที่ความเร็วรอบสูง (รูปที่ 5.6) เพราะที่ความเร็วรอบสูงจะทำให้วัสดุอ่อนตัวทำให้การตัดเฉือนง่าย ทำให้ได้ความหยาบผิวที่ต่ำ



รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น



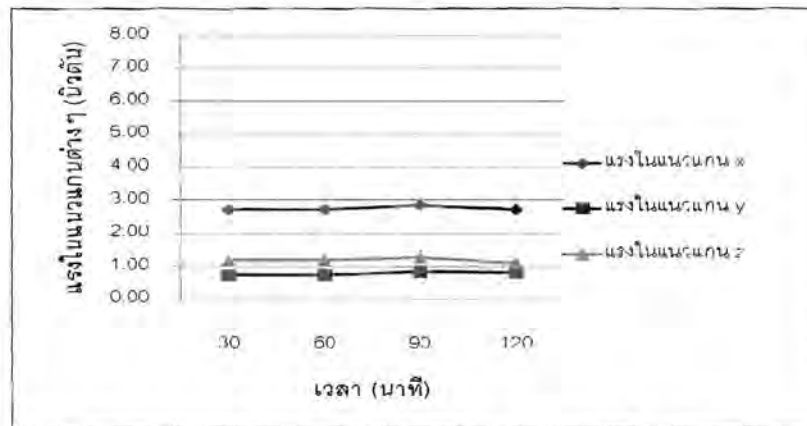
รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น

รูปที่ 5.8 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในแนวแกนต่างๆ เมื่อความเร็วรอบตัดเพิ่มขึ้น จะพบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วยิ่งสูงขึ้น ที่ระยะเวลาในการตัดต่างๆ แรงตัดค่อนข้างจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และที่ความเร็วรอบที่สูงจะเกิดแรงในการตัดที่สูงกว่าที่ความเร็วรอบต่ำ สามารถกล่าวได้ว่าที่ความเร็วรอบที่สูงทำให้เกิดอุณหภูมิในการตัดเฉือนที่สูงทำให้จึงทำให้เกิดการสึกหรอที่สูง จึงทำให้เกิดแรงในการตัดสูง แต่ในขณะเดียวกันนั้นอัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นค่อนข้างจะคงที่จึงทำให้แรงตัดที่เกิดขึ้นไม่แตกต่างกันที่ระยะเวลาในการตัดต่างๆ

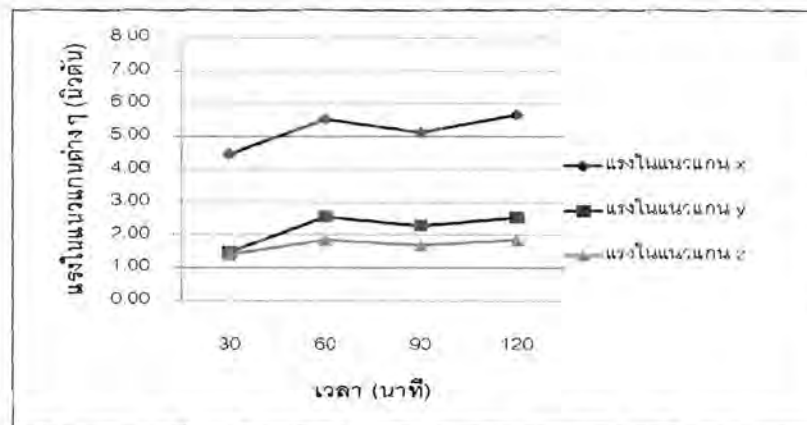
5.2.2 อิทธิพลของอัตราป้อนต่อแรงตัดในสามแกน

รูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการตัดเฉือนชิ้นงาน จากรูปจะพบว่าแรงตัดในแนวแกน x มีค่าสูงสุด และแรงตัดในแนวแกน y และ z มีค่าที่ค่อนข้างจะ

ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบแรงตัดที่เกิดขึ้นที่อัตราการป้อนตัดที่ต่างกัน คือที่อัตราป้อนตัด 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่อัตราการป้อนตัดที่สูงกว่าจะเกิดแรงในขณะตัดสูงกว่าที่อัตราการป้อนตัดต่ำ สามารถอธิบายได้ว่า ที่อัตราการป้อนตัดสูงจะมีพื้นที่ในการตัดเฉือนสูง (พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับเนื้อชิ้นงาน) เนื่องจากระยะเวลาในการเคลื่อนที่เข้าตัดชิ้นงานสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดแรงในการตัดสูงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการตัดแบบเปียกและแบบลมเป่า ดังที่ได้อธิบายมาแล้วก่อนหน้านี้



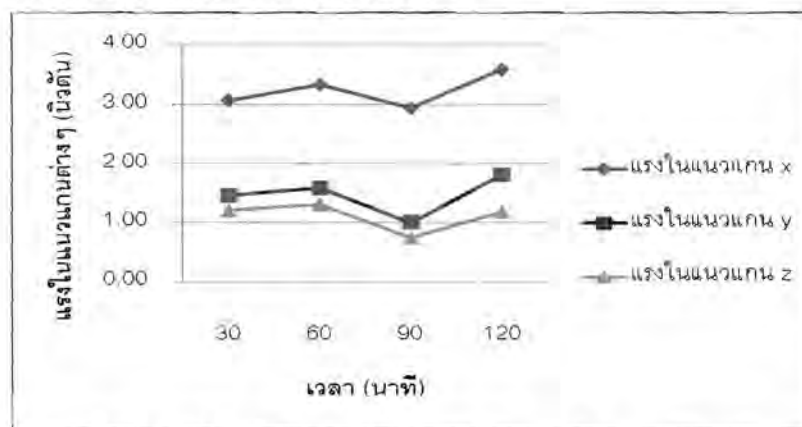
รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น



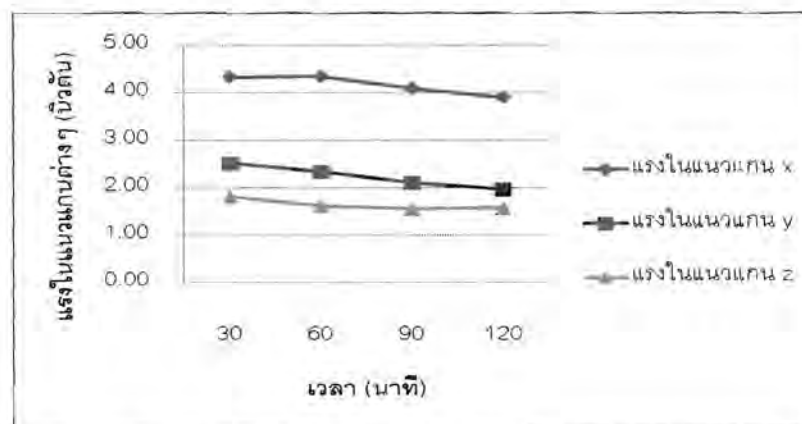
รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น

5.2.3 อิทธิพลของความลึกตัดต่อแรงตัดในสามแกน

รูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดงแรงตัดที่เกิดขึ้นในขณะตัดเฉือนชิ้นงานที่มีความลึกแตกต่างกันคือ ที่ความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตร จากรูปจะพบว่าแรงตัดในแนวแกน x มีค่าสูงสุด และแรงตัดในแนวแกน y และ z มีค่าที่ค่อนข้างจะใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับอิทธิพลของอัตราการป้อนตัด ที่ความลึกตัดที่สูงกว่าจะเกิดแรงในขณะตัดสูงกว่าที่ความลึกตัดต่ำ ซึ่งเหตุผลสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับอัตราการป้อนตัด นั่นคือ ที่ความลึกตัดสูงจะมีพื้นที่ในการตัดเฉือนสูง (พื้นที่สัมผัสระหว่างมีดตัดกับเนื้อชิ้นงาน) จึงทำให้เกิดแรงในการตัดสูงตามไปด้วย ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับการตัดแบบเปียกและแบบลมเป่า



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น



รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น

5.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของแรงที่ใช้ในการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

ตารางที่ 5.1 การออกแบบการทดลองความหยาดผิวและแรงในการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

Standard Order	Input Value			Responses		
	S (rpm)	F (mm/rev)	D (mm)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)
1	1,000	0.01	1	3.16	1.17	1.39
2	3,000	0.01	1	2.88	0.85	1.32
3	1,000	0.03	1	4.70	1.58	1.76
4	3,000	0.03	1	4.40	1.29	1.66
5	1,000	0.02	0.5	2.76	0.95	1.65
6	3,000	0.02	0.5	2.29	0.65	1.06
7	1,000	0.02	1.5	4.31	1.33	1.96
8	3,000	0.02	1.5	3.58	1.16	1.42
9	2,000	0.01	0.5	1.50	0.49	1.16
10	2,000	0.03	0.5	3.12	1.00	1.47
11	2,000	0.01	1.5	3.58	1.38	1.37
12	2,000	0.03	1.5	4.05	1.68	1.89
13	2,000	0.02	1	3.02	1.31	1.66
14	2,000	0.02	1	3.68	1.40	1.73
15	2,000	0.02	1	3.36	1.35	1.69

จากข้อมูลแรงที่แนวแกนต่างๆ (F_x F_y และ F_z) ในตาราง 5.1 เมื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.2 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน x ก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ
ตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

Source	DF	Seq	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	9.4760	9.4760	1.05288	13.60	0.005
Linear	3	7.9892	7.9892	2.66306	34.39	0.001
Square	3	1.1392	1.1392	0.37972	4.90	0.060
Interaction	3	0.3476	0.3476	0.11588	1.50	0.323
Residual Error	5	0.3871	0.3871	0.07743		
Lack-of-Fit	3	0.1693	0.1693	0.05643	0.52	0.711
Pure Error	2	0.2179	0.2179	0.10893		
Total	14	9.8631				

ตารางที่ 5.3 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการ
ตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		3.35333	0.16065	20.873	0.000
S	rpm	-0.22250	0.09838	-2.262	0.073
F	mm/rev	0.64375	0.09838	6.544	0.001
D	mm	0.73125	0.09838	7.433	0.001
S*S	rpm ²	0.30208	0.14481	2.086	0.091
F*F	mm ² /rev ²	0.12958	0.14481	0.895	0.412
D*D	mm ²	-0.42042	0.14481	-2.903	0.034
S*F	rpm*mm/rev	-0.00500	0.13913	-0.036	0.973
S*D	rpm*mm	-0.06500	0.13913	-0.467	0.660
F*D	mm ² /rev	-0.28750	0.13913	-2.066	0.094
S = 0.2783 R-Sq = 96.1% R-Sq(adj) = 89.0%					

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ค่าความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่า Lack of fit test ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึง

การขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value 0.711 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม

เมื่อพิจารณาต่อไปพบว่าตัวแปรที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ได้ในการ Regression ได้แก่ ค่าคงที่ อัตราป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) ความลึกตัดอันดับสอง (D^2) ซึ่งทุกพจน์มี P-value น้อยกว่า 0.05 ทั้งสิ้น และทำการทดลองตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่น (P-value น้อยกว่า 0.05) ที่ละปัจจัยพบว่าได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.4 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน x หลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	9.3970	9.3970	1.56616	26.88	0.000
Linear	3	7.9892	7.9892	2.66306	45.70	0.000
Interaction	2	1.0772	1.0772	0.53858	9.24	0.008
Residual Error	1	0.3306	0.3306	0.33063	5.67	0.044
Lack-of-Fit	8	0.4661	0.4661	0.05827		
Pure Error	6	0.2483	0.2483	0.04138	0.38	0.849
Total	2	0.2179	0.2179	0.10893		

ตารางที่ 5.5 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

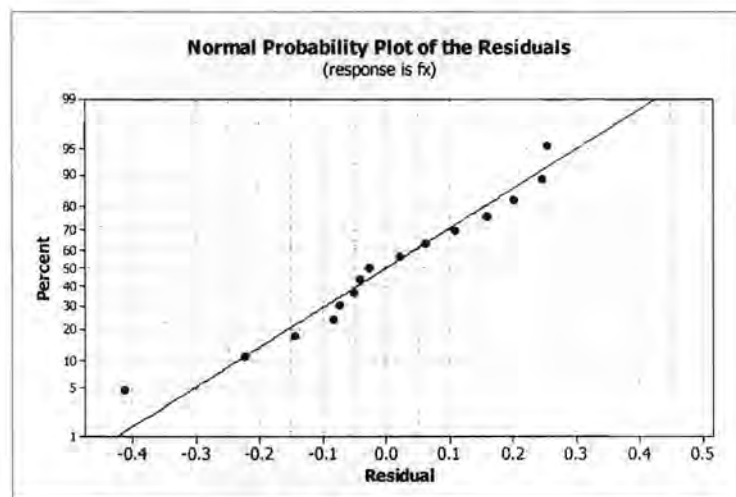
Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		3.4331	0.11596	29.606	0.000
S	rpm	-0.2225	0.08534	-2.607	0.031
F	mm/rev	0.6438	0.08534	7.543	0.000
D	mm	0.7312	0.08534	8.568	0.000
S*S	rpm ²	0.2921	0.12525	2.332	0.048
D*D	mm ²	-0.4304	0.12525	-3.436	0.009
F*D	mm ² /rev	-0.2875	0.12069	-2.382	0.044
S = 0.2414 R-Sq = 95.3% R-Sq(adj) = 91.7%					

พบว่าสมการถดถอยที่ได้ยังคงมีค่า R-Square และค่า R-Square Adj. สูง และมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และค่า P-value ของค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of Fit) มีค่า 0.849 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายความว่าสมการนี้เหมาะสม ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง แรงในแนวแกน x ต่อตัวแปรต้นต่าง ๆ คือ

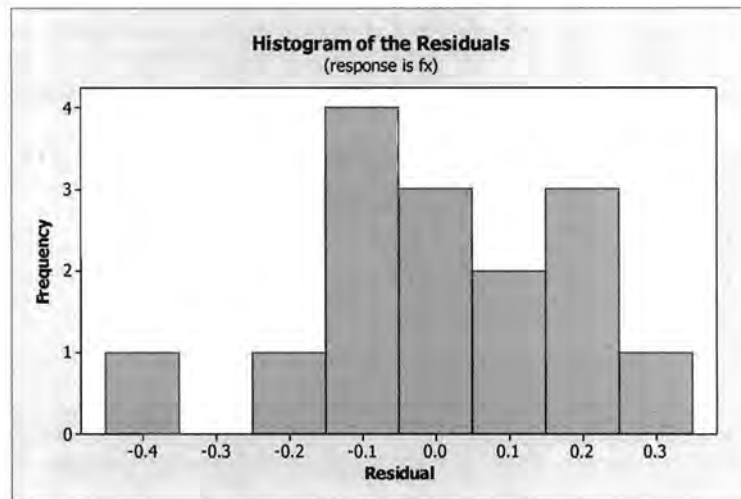
$$F_x = -0.575000 + -0.00139096S + 121.875F + 6.05558D + 2.92115E-07S^2 - 1.72154D^2 - 57.5000FD$$

จากสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ว่า อัตราป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) ความเร็วรอบยกกำลังสอง (S^2) ความลึกตัดยกกำลังสอง (D^2) และผลคูณของอัตราป้อนตัดกับความลึกตัด (FD) มีอิทธิพลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x มาก ในส่วนของความเร็วรอบ (S) มีอิทธิพลต่อแรงที่เกิดขึ้นในแนวแกน x น้อย ดังนั้นถ้าในการตัดมีความเร็วรอบ อัตราป้อนตัดและความลึกตัดสูง จะส่งผลให้แรงในแนวแกน x มีค่ามาก

รูปที่ 5.13 เป็นการตรวจสอบสมมติฐานที่ว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ ซึ่งสังเกตได้ว่าข้อมูลมีค่าใกล้เคียงเส้นตรงที่กำหนด แสดงให้เห็นถึงสมมติฐานมีความถูกต้อง ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 5.14 จะเห็นกลุ่มข้อมูลมีแนวโน้มที่จะกระจายเป็นรูประฆังคว่ำ

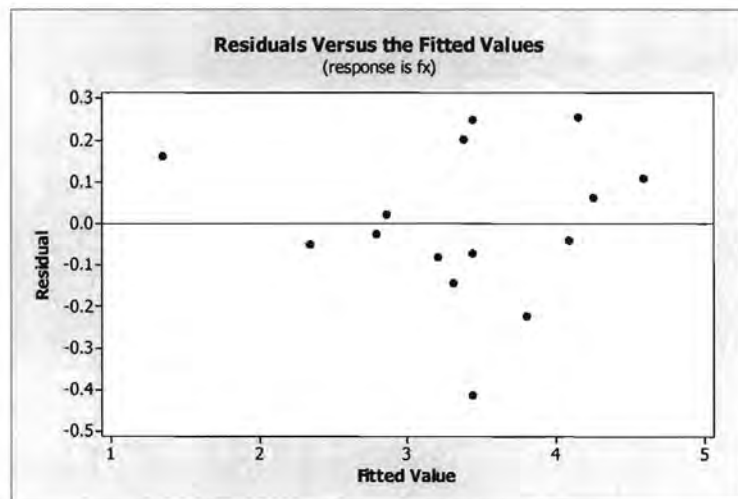


รูปที่ 5.13 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน x (Fx) ของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

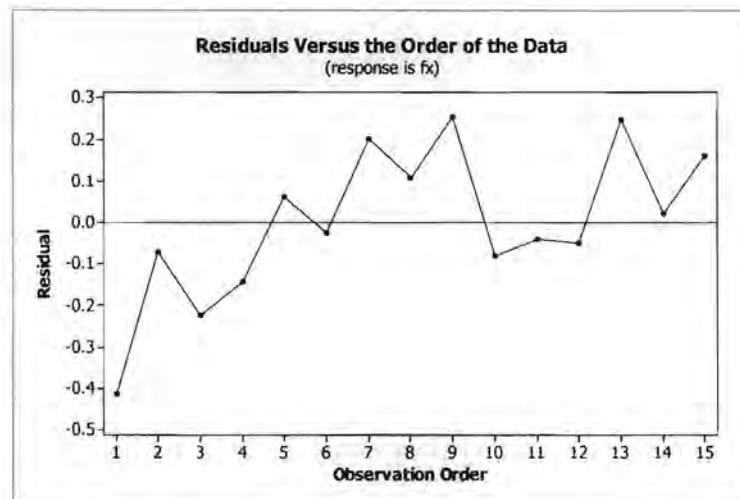


รูปที่ 5.14 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับแรงแนวแกน x (Fx) ของการกัดแบบละเอียดของของสารหล่อเย็น

รูปที่ 3.15 และ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาด (Residual) ซึ่งสังเกตได้ว่าค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีการกระจายแบบสุ่มหรือไม่มีรูปแบบ

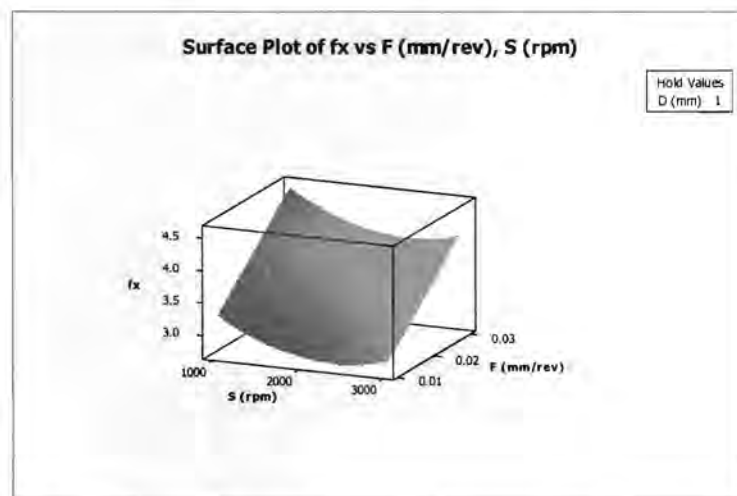


รูปที่ 5.15 การกระจายตัวของข้อมูลแรงแนวแกน x (Fx) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการกัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

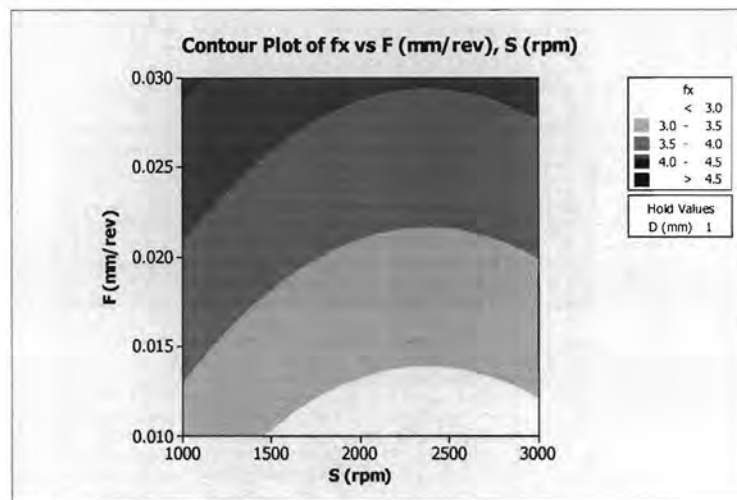


รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของข้อมูลแรงแนวแกน x (F_x) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

รูปที่ 5.17 และ 5.18 บ่งบอกว่าเมื่อทำการกัดอลูมิเนียมแบบละอองของสารหล่อเย็น แรงในแนวแกน x (F_x) จะมีค่าน้อยที่สุดอยู่ที่อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบและมีความเร็วรอบอยู่ในช่วง 1,500 ถึง 3,000 รอบต่อนาที โดยพื้นที่สีเขียวย่อมนจะแสดงถึงบริเวณที่แรงตัดแกน x (F_x) ต่ำที่สุด

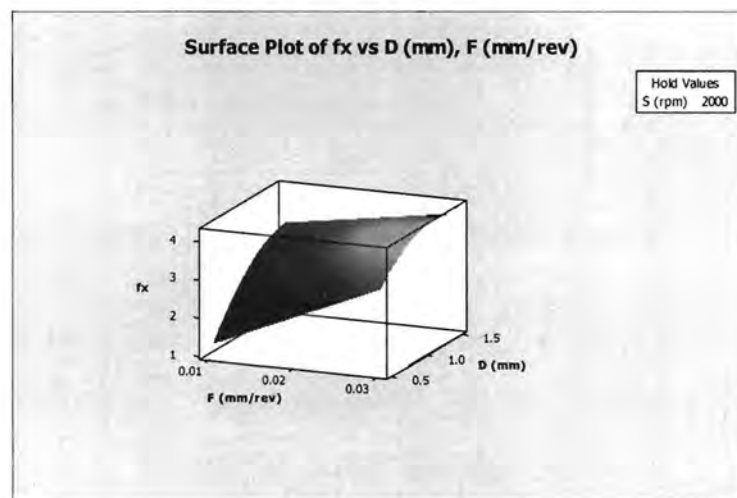


รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน x (F_x) กับอัตราป้อน (F) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

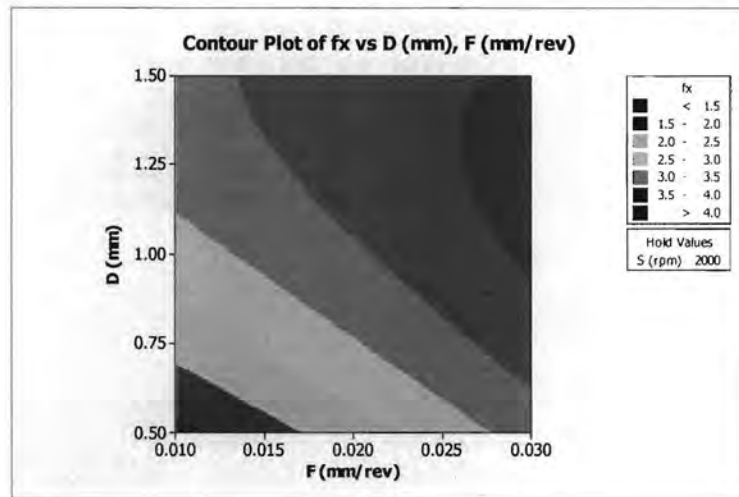


รูปที่ 5.18 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน x (F_x) กับอัตราป้อน (F) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

เมื่อพิจารณาแรงตัดแกน x (F_x) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ดังรูปที่ 5.19 และ 5.20 พบว่าแรงตัดแกน x (F_x) มีค่าน้อยที่สุดเมื่อใช้อัตราป้อนต่ำ และความลึกตัดต่ำ ซึ่งก็คือบริเวณสีน้ำเงินเข้มในกราฟคอนทัวร์



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน x (F_x) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น



รูปที่ 5.20 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน x (F_x) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

5.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวของการตัดแบบ ละอองของสารหล่อเย็น

ตารางที่ 5.6 การออกแบบการทดลองต่อความหยาบผิวของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

Standard Order	Input Value			Responses
	S (rpm)	F (mm/rev)	D (mm)	Ra (micro m)
1	1,000	0.01	1	0.1008
2	3,000	0.01	1	0.0728
3	1,000	0.03	1	0.1236
4	3,000	0.03	1	0.1067
5	1,000	0.02	0.5	0.1491
6	3,000	0.02	0.5	0.1227
7	1,000	0.02	1.5	0.1113
8	3,000	0.02	1.5	0.0832
9	2,000	0.01	0.5	0.1047
10	2,000	0.03	0.5	0.1358
11	2,000	0.01	1.5	0.0834
12	2,000	0.03	1.5	0.1116
13	2,000	0.02	1	0.0977
14	2,000	0.02	1	0.0925
15	2,000	0.02	1	0.0937

จากข้อมูลความหยาบผิวในตารางที่ 5.6 เมื่อนำไปวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 5.7 ความแปรปรวนของความหยابผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

Source	DF	Seq	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	0.005805	0.005805	0.000645	21	0.002
Linear	3	0.004802	0.004802	0.001601	52.11	0.000
Square	3	0.000969	0.000969	0.000323	10.51	0.013
Interaction	3	0.000034	0.000034	0.000011	0.36	0.782
Residual Error	5	0.000154	0.000154	0.000031		
Lack-of-Fit	3	0.000139	0.000139	0.000046	6.24	0.141
Pure Error	2	0.000015	0.000015	0.000007		
Total	14	0.005958				

ตารางที่ 5.8 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยابผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.094633	0.0032	29.573	0
S	rpm	-0.012425	0.00196	-6.341	0.001
F	mm/rev	0.0145	0.00196	7.4	0.001
D	mm	-0.01535	0.00196	-7.833	0.001
S*S	rpm ²	0.007021	0.002884	2.434	0.059
F*F	mm ² /rev ²	-0.000679	0.002884	-0.235	0.823
D*D	mm ²	0.014921	0.002884	5.173	0.004
S*F	rpm*mm/rev	0.002775	0.002771	1.001	0.363
S*D	rpm*mm	-0.000425	0.002771	-0.153	0.884
F*D	mm ² /rev	-0.000725	0.002771	-0.262	0.804
S = 0.005543 R-Sq = 97.4% R-Sq(adj) = 92.8%					

จากข้อมูลข้างต้นพบว่าสมการถดถอย (Regression model) ที่ค่าความเชื่อมั่น 95 % สามารถใช้ได้ กล่าวคือมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ

(Lack of fit test) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงการขาดความเหมาะสมของสมการมีค่า P-value 0.141 ซึ่งมากกว่า 0.05 หมายถึงสมการมีความเหมาะสม

เมื่อพิจารณาต่อไปพบว่าตัวแปรที่มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งหมายความว่าเป็นตัวแปรที่สามารถใช้ได้ในการถดถอย ได้แก่ ค่าคงที่ ความเร็วรอบ (S) อัตราป้อนตัด (F) ความลึกตัด (D) และความลึกตัดลำดับสอง (D^2) ซึ่งทุกพจน์มี P-value น้อยกว่า 0.05 ทั้งสิ้น และทำการทดลองตัดพจน์อื่นที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่น (P-value น้อยกว่า 0.05) พบว่าได้ผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.9 ความแปรปรวนของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	4	0.005583	0.005583	0.001396	37.25	0.000
Linear	3	0.004802	0.004802	0.001601	42.71	0.000
Square	1	0.000781	0.000781	0.000781	20.85	0.001
Residual Error	10	0.000375	0.000375	0.000037		
Lack-of-Fit	8	0.00036	0.00036	0.000045	6.07	0.149
Pure Error	2	0.000015	0.000015	0.000007		
Total	14	0.005958				

ตารางที่ 5.10 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

Term		Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.09826	0.002314	42.466	0
S	rpm	-0.01243	0.002164	-5.741	0
F	mm/rev	0.0145	0.002164	6.7	0
D	mm	-0.01535	0.002164	-7.092	0
D*D	Mm ²	0.01447	0.003168	4.566	0.001
S = 0.006122 R-Sq = 93.7% R-Sq(adj) = 91.2%					

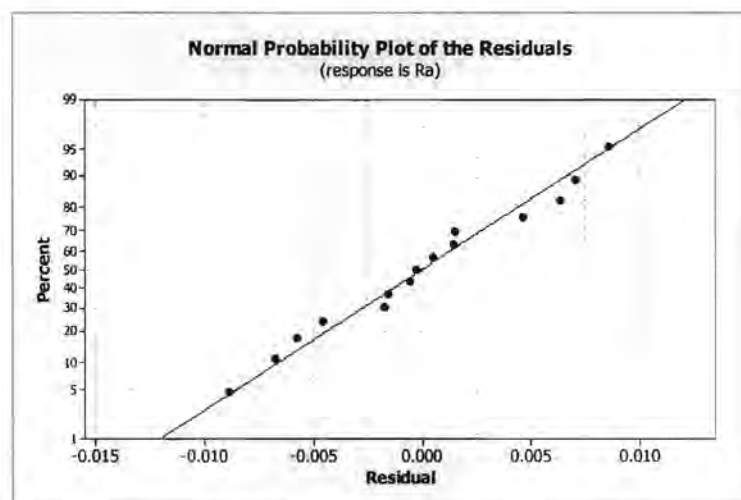
พบว่าสมการถดถอยที่ได้ยังคงมีค่า R-Square และค่า R-Square Adj. สูง และมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 และค่า P-value ของค่าการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack of fit) มี

ค่า 0.149 ซึ่งมากกว่า 0.05 และมีค่าเพิ่มขึ้น หมายความว่าสมการนี้เหมาะสม ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิวเฉลี่ยต่อตัวแปรต้นต่าง ๆ คือ

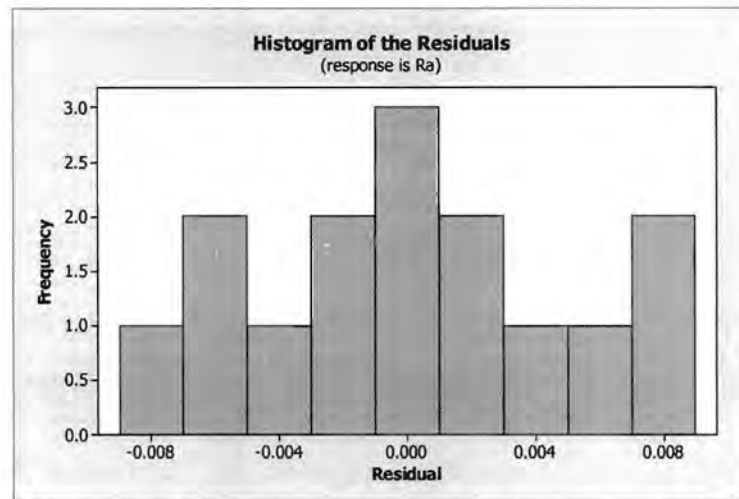
$$Ra = 0.182679 - 1.24E-05S + 1.45F - 0.146443D + 0.0578714D^2$$

จากสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ว่า อัตราป้อนตัด (F) มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวมาก ในส่วนของความลึกตัด (D) และความลึกตัดกำลังสอง (D^2) มีอิทธิพลต่อความหยาบผิวน้อย ดังนั้นถ้าในการตัดมีความลึกตัดตัดสูง จะส่งผลให้ความหยาบผิวมีค่าน้อย

รูปที่ 5.21 เป็นการตรวจสอบสมมติฐานที่ว่าข้อมูลมีการกระจายเป็นปกติ ซึ่งสังเกตได้ว่าข้อมูลมีค่าใกล้เคียงเส้นตรงที่กำหนด แสดงให้เห็นถึงสมมติฐานมีความถูกต้อง ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 5.22 จะเห็นกลุ่มข้อมูลมีแนวโน้มที่จะกระจายเป็นรูประฆังคว่ำ

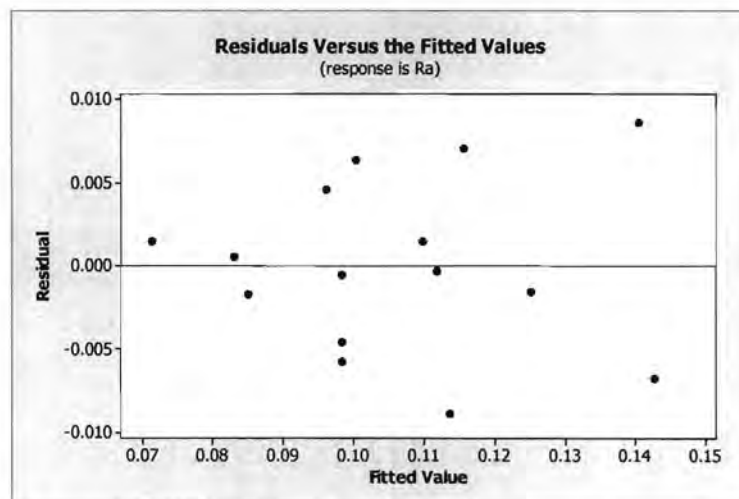


รูปที่ 5.21 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

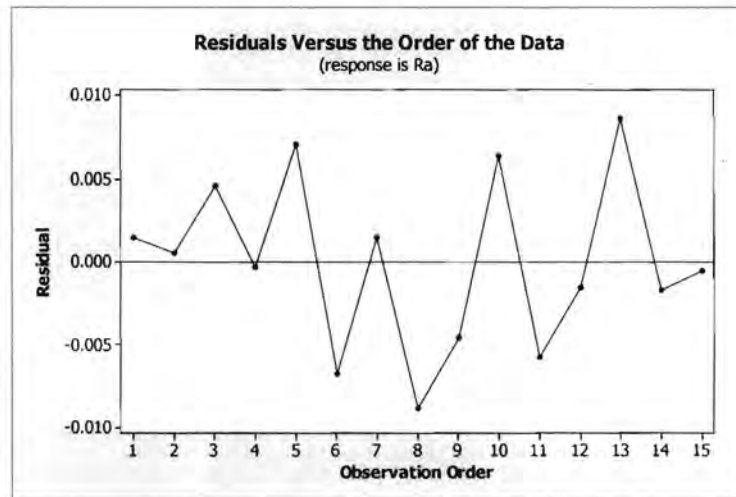


รูปที่ 5.22 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

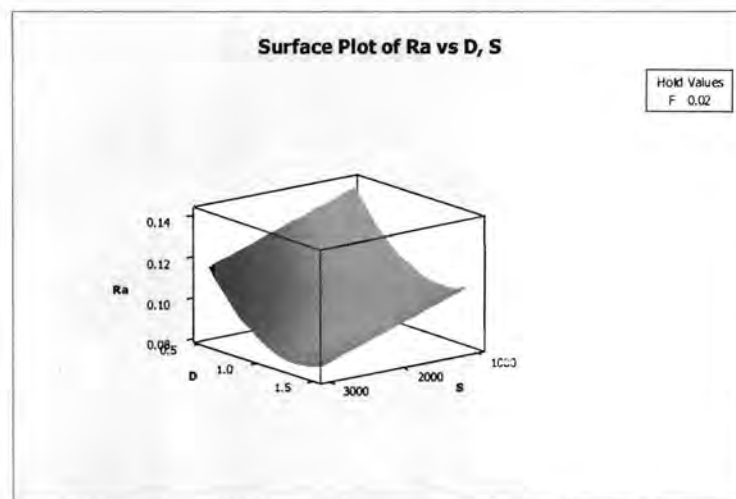
รูปที่ 5.23 และ 5.24 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความผิดพลาด (Residual) ซึ่งสังเกตได้ว่าค่าความผิดพลาดดังกล่าวควรมีการกระจายแบบสุ่ม หรือ ไม่มีรูปแบบ



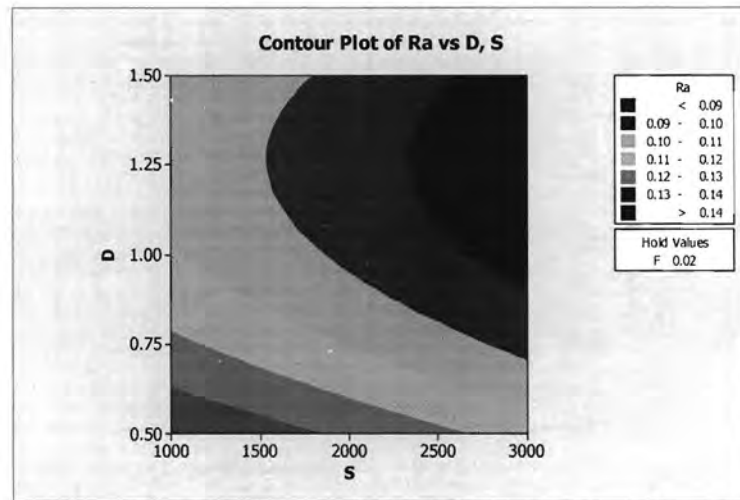
รูปที่ 5.23 การกระจายตัวของข้อมูลความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น



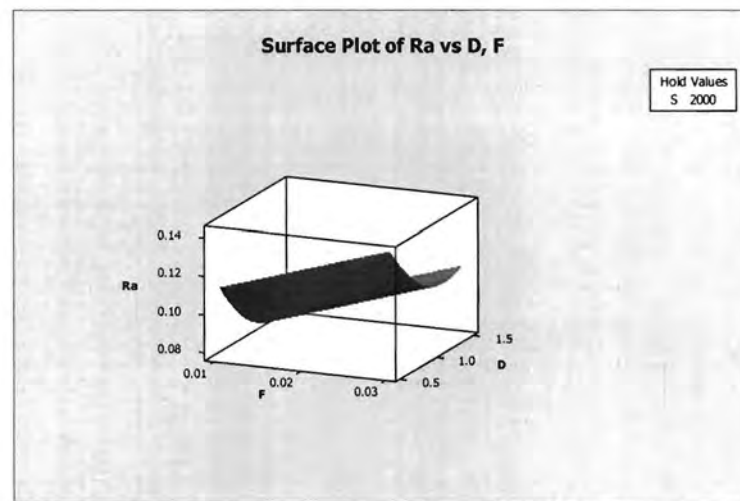
รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลอง ของการตัดแบบละออง
ของสารหล่อเย็น



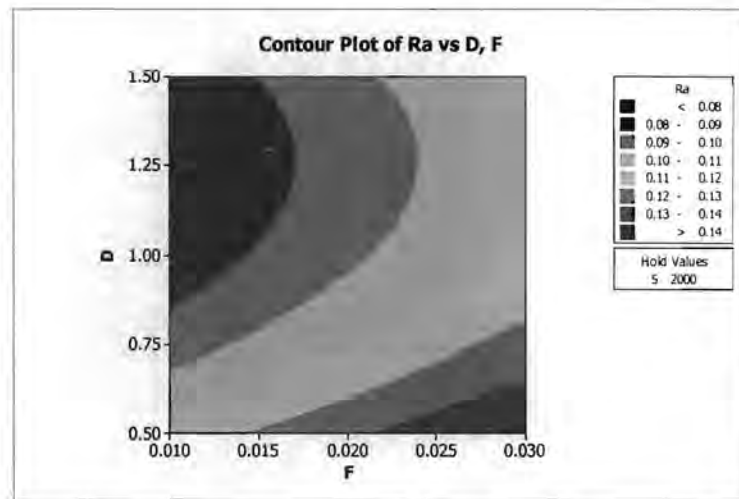
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และความเร็วยรอบ
(S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น



รูปที่ 5.26 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น



รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น



รูปที่ 5.28 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) กับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

เมื่อพิจารณาหาจุดต่ำสุดของความหยาบผิวจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อกำหนดค่าเป้าหมายไว้เท่ากับ 0.15 ไมโครเมตร และค่าขอบบน (Upper value) ไว้เท่ากับ 0.9 ไมโครเมตร พบว่า ความหยาบผิวจะต่ำที่สุดเมื่อใช้ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.50 มิลลิเมตร นั่นหมายถึงความหยาบผิวจะต่ำที่สุดเมื่อปัจจัยทั้งสามมีค่าดังนี้ ความเร็วรอบสูง อัตราป้อนต่ำ และความลึกตัดสูง ดังรูป

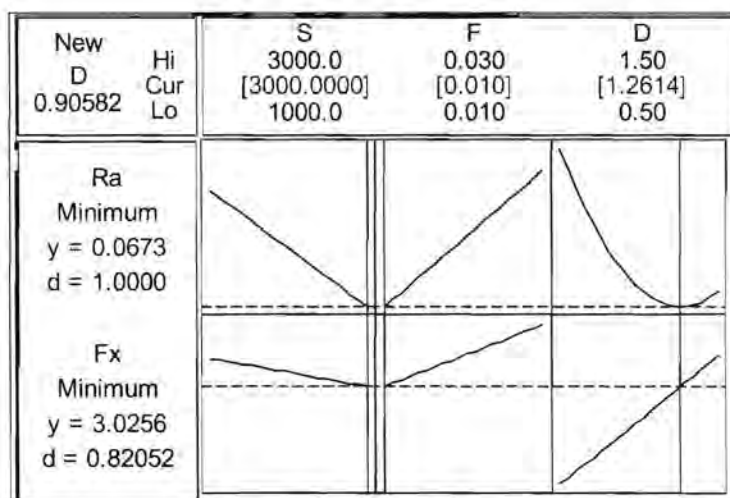
New D 1.0000	Hi Cur Lo	S 3000.0 [3000.0000] 1000.0	F 0.030 [0.010] 0.010	D 1.50 [1.2492] 0.50
Ra Minimum y = 0.0673 d = 1.0000				

รูปที่ 5.29 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อพิจารณา ความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) และตัวแปรต้น ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

ทำการวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบอีกครั้งโดยมีปัจจัยเพิ่มเข้ามาคือ แรงในแนวแกน x โดยตั้งค่าเป้าหมาย (Target value) ไว้เท่ากับ 0.15 ไมโครเมตร และค่าขอบบน (Upper value) ไว้เท่ากับ 0.9 ไมโครเมตร สำหรับค่าผลตอบความหยาบผิว (Ra) และ ตั้งค่าเป้าหมายไว้เท่ากับ 1.5 นิวตัน และค่าขอบบนไว้เท่ากับ 10 นิวตัน สำหรับแรงตัดในแกน x (Fx)

ตารางที่ 5.11 ค่าเป้าหมายและขอบบนเพื่อใช้พิจารณาค่าต่ำสุดในพื้นที่ผิวผลตอบ ของการตัดแบบ ละอองของสารหล่อเย็น

ผลตอบ	เป้าหมาย	ค่าเป้าหมาย	ขอบบน
Ra	จุดต่ำที่สุด	0.15 ไมโครเมตร	0.9 ไมโครเมตร
Fx	จุดต่ำที่สุด	1.5 นิวตัน	10 นิวตัน



รูปที่ 5.30 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นที่ผิวผลตอบของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

จากรูปที่ 5.30 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นที่ผิวผลตอบ โดยพบว่าค่าความหยابผิวต่ำ ที่สุดและเกิดแรงการตัดในแนวแกน x (Fx) น้อยที่สุดเมื่อ

ความเร็วรอบ = 3,000 รอบต่อนาที

อัตราป้อน = 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ

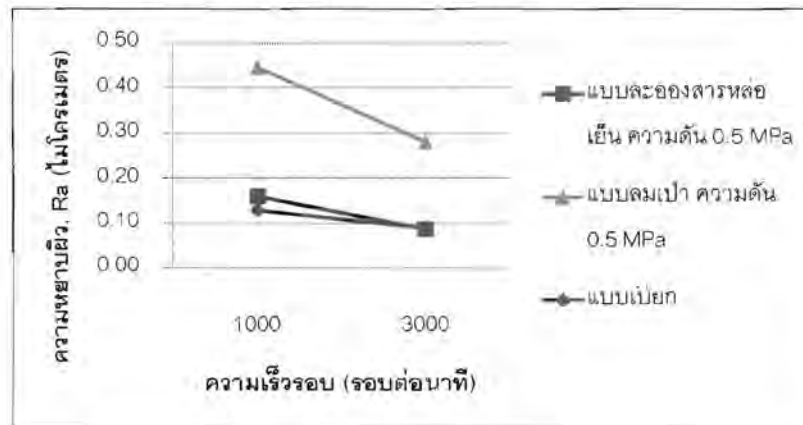
ความลึกตัด = 1.26 มิลลิเมตร

หรือหมายถึง การกัดที่เงื่อนไขการตัด อัตราป้อนตัดต่ำ ความเร็วรอบ และความลึกตัดสูง

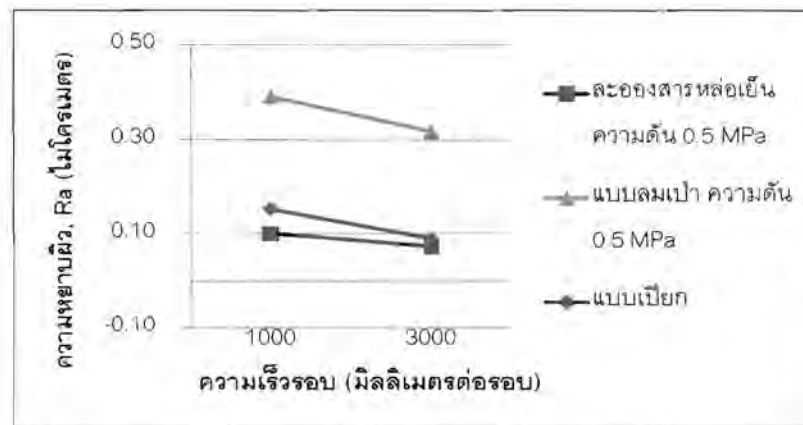
บทที่ 6

การวิเคราะห์ลักษณะการใช้สารหล่อเย็น

6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวและปัจจัยต่างๆ



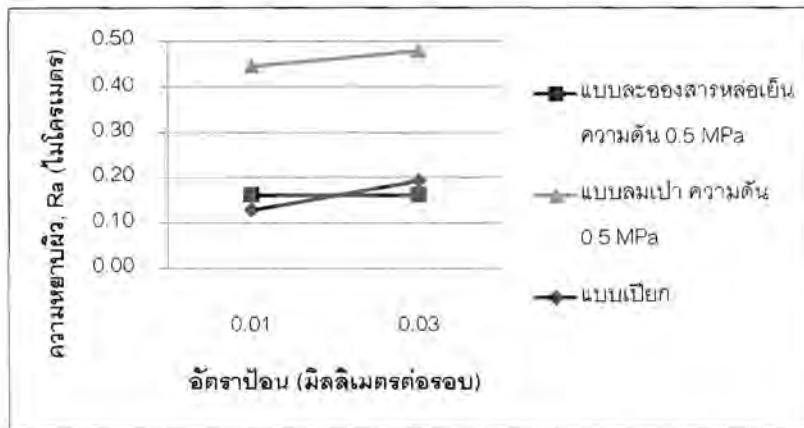
รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และความเร็รรอบ 1,000 และ 3,000 รอบต่อนาที ของอัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 60 นาที ของการตัดแบบต่าง ๆ



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และความเร็รรอบ 1,000 และ 3,000 รอบต่อนาที ของอัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาที ของการตัดแบบต่าง ๆ

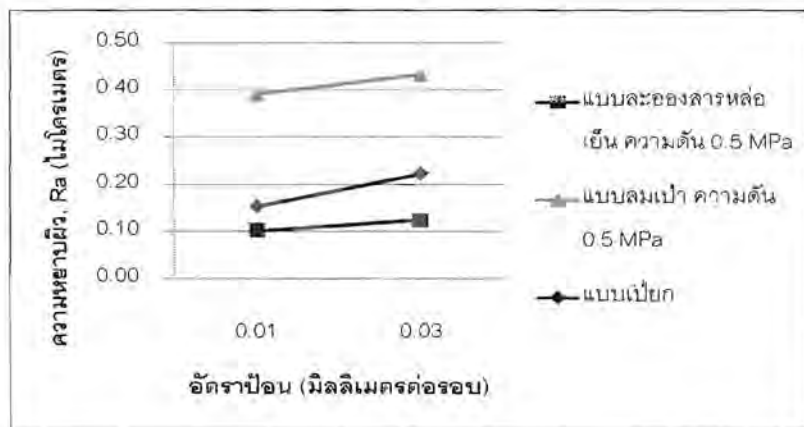
เมื่อพิจารณารูปแบบการใช้สารหล่อเย็นทั้งสามแบบ ดังรูปที่ 6.1 และรูปที่ 6.2 จะเห็นว่าความหยาบผิวในการตัดแบบลมเป่าจะมีค่ามากกว่าการตัดแบบเปียกและแบบลวดของสาร

หล่อเย็น โดยการตัดที่ความเร็วรอบมากขึ้นจะทำให้ความหยาบผิวลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าการตัดความเร็วสูงทำให้เกิดอุณหภูมิสูงขึ้น แต่ยังไม่เกินค่าความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) ส่งผลให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวทำให้การตัดง่ายขึ้นจึงได้ผิวที่ดีหรือชิ้นงานมีความหยาบผิวดำ และเนื่องจากการสึกหรอมัดตัดเกิดขึ้นน้อย จึงส่งผลกระทบต่อความหยาบผิว



รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และอัตราป้อน 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ของความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 60 นาทีของการตัดแบบต่าง

๗



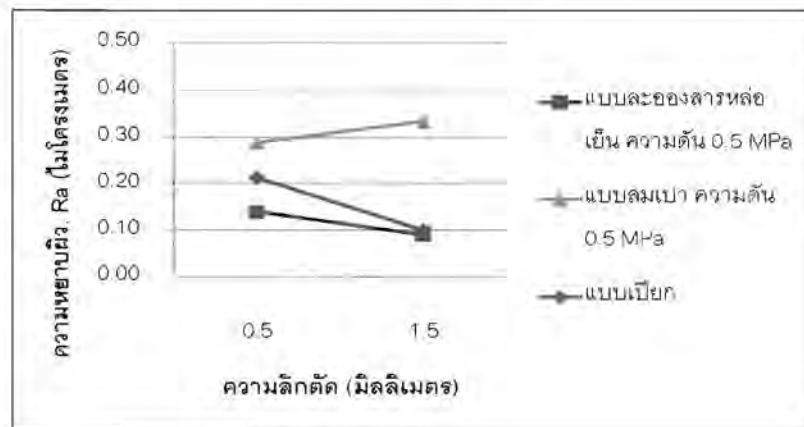
รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และอัตราป้อน 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ของความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบ

ต่าง ๆ

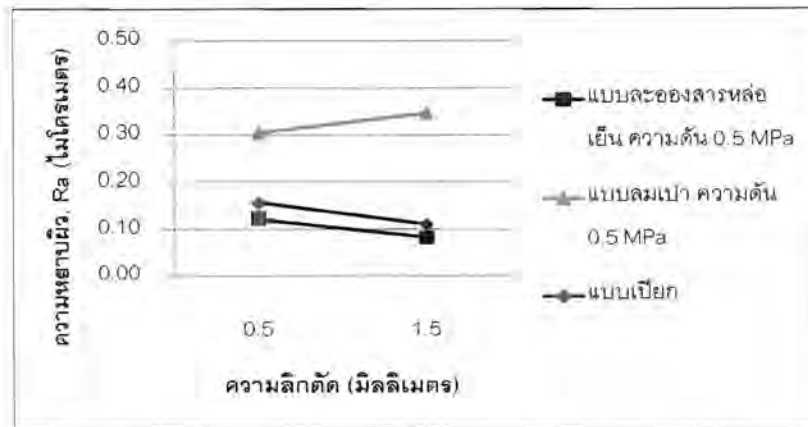
จากรูปที่ 6.3 และ 6.4 พบว่าเมื่ออัตราการป้อนตัดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ความหยาบผิวมีแนวโน้มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของความหยาบผิวชิ้นงาน (สมการที่ 2.10) เมื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขการตัดที่แตกต่างกันคือ การตัดแบบเปียก การตัดแบบละของสารหล่อเย็น

และการตัดแบบลมเป่า พบว่าการตัดแบบเป็ยกและละอองสารหล่อเย็นให้ค่าความหยาบผิวที่ไม่แตกต่างกัน ในขณะที่การตัดแบบลมเป่าให้ค่าความหยาบผิวสูงสุดของเงื่อนไขการตัดทั้ง 3 แบบ เนื่องจากอุณหภูมิในการตัดไม่เหมาะสม สามารถอธิบายได้ว่าการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นจะทำให้อุณหภูมิในการตัดเหมาะสมกว่าการตัดแบบลมเป่าเพราะมีการนำสารหล่อเย็นเข้ามาใช้ในการตัดเฉือน

เมื่อเปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเป็ยกกับการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น จะพบว่าการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นจะให้ผิวที่ดีกว่า ซึ่งเป็นเหตุผลมาจากการที่ละอองสารหล่อเย็นซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก สามารถเข้าถึงในพื้นที่ผิวการตัดได้ดีกว่าการตัดแบบเป็ยก ทำให้อุณหภูมิการตัดเหมาะสมส่งผลให้ความหยาบผิวต่ำลง



รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรของ ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรที่เวลา 60 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ

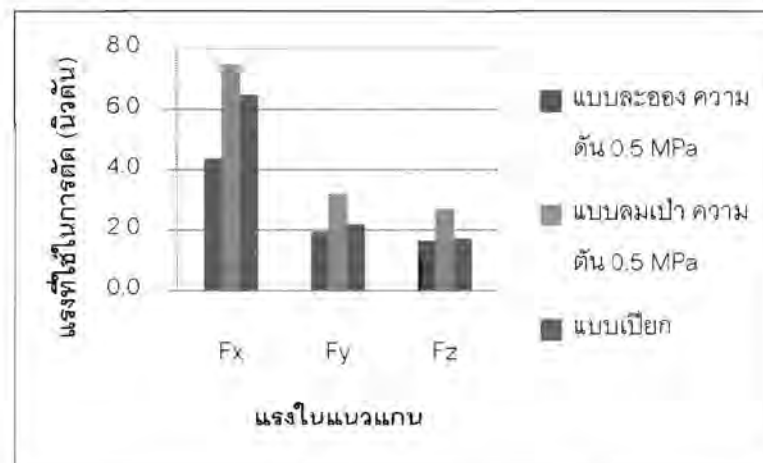


รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรของ ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบ ต่าง ๆ

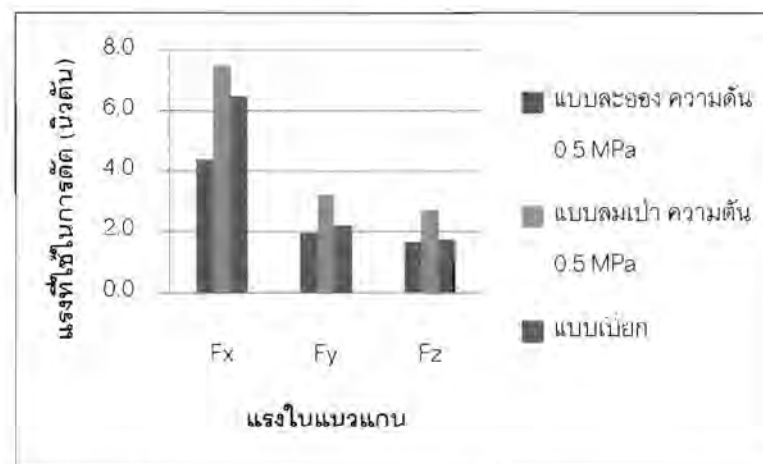
จากรูปที่ 6.5 และ รูปที่ 6.6 เห็นได้ชัดว่าสำหรับการกัดแบบลมเป่าเมื่อเพิ่มความลึกตัด จะทำให้ความหยาบผิวเพิ่มขึ้น ในขณะที่การกัดแบบเปียกและแบบละของของสารหล่อเย็นการเพิ่มความลึกตัดส่งผลกระทบต่อความหยาบผิว แต่มีแนวโน้มที่ลดลง สามารถอธิบายได้จากการที่มีสารหล่อเย็นช่วยลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้น จึงทำให้ได้พื้นผิวที่ดี โดยที่การใช้ละของของสารหล่อเย็นจะได้ผิวที่ดีกว่า ดังที่อธิบายในรูปที่ 6.3 และ 6.4 และการที่ค่าความหยาบผิวลดลงนั้น มีเหตุผลมาจากความลึกตัดที่มากขึ้นจะช่วยกำจัดเศษโลหะได้มากขึ้น นั่นก็คือลดความร้อนบริเวณผิวตัดดีขึ้นนั่นเอง

6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงในการตัดและปัจจัยต่างๆ

แรงที่เกิดขึ้นในการตัดแบ่งพิจารณาออกเป็นแรงในสามแกน ได้แก่ แรงในแนวแกน x (F_x : tangential force) แรงในแนวแกน y (F_y : radial force) และแรงในแนวแกน z (F_z : axial force) ซึ่งแรงในแกนต่าง ๆ เหล่านี้จะส่งผลต่อการสึกหรอของมีดตัด ซึ่งเนื่องจากการตัดอลูมิเนียม (Al 6063) ในช่วงที่ทำการทดลอง พบว่าเกิดการสึกหรอของมีดตัด (Tool wear) เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งไม่มีนัยสำคัญที่จะนำมาพิจารณา อย่างไรก็ตามยังคงต้องมีการศึกษาแรงในการตัดต่อไป

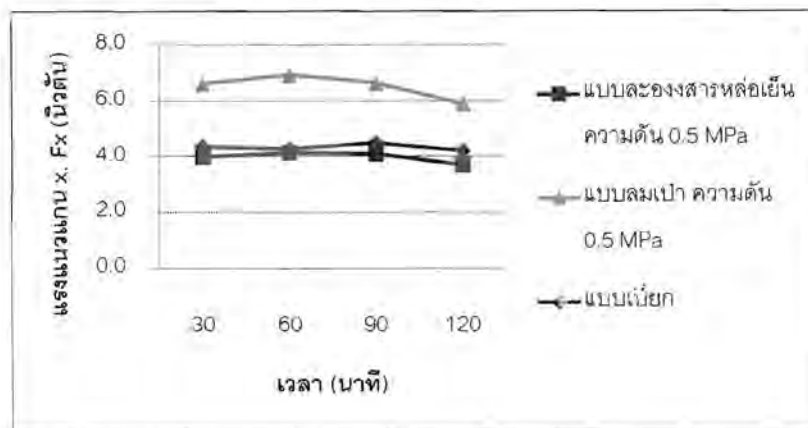


รูปที่ 6.7 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกนต่างๆ ของการตัดที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตร ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาที

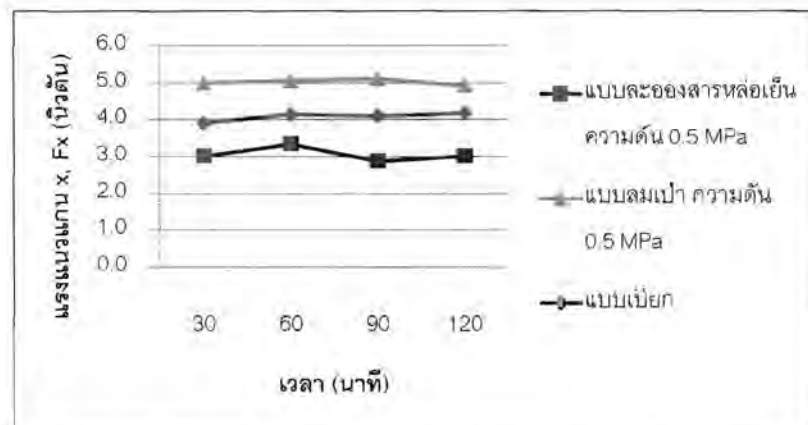


รูปที่ 6.8 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกนต่างๆ ของการตัดที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตร ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาที

ผลการทดลองแสดงถึงการตัดอลูมิเนียมจะต้องใช้แรงตัดในแนวแกน x มากที่สุด รองลงมาคือ แรงในแนวแกน y และแรงในแนวแกน z ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 6.7 และ 6.8 โดยมีแนวโน้มว่าการตัดแบบลมน้ำจะให้แรงในการตัดสูงที่สุด รองลงมาคือการตัดแบบเปียก และการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นจะใช้ในการตัดต่ำที่สุด สามารถอธิบายได้จาก การตัดแบบลมน้ำจะเกิดแรงเสียดทานมากที่สุดจึงต้องใช้แรงในการตัดสูงสุด ซึ่งการตัดแบบเปียกจะสามารถตัดได้ง่ายกว่า และการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นจะช่วยให้สารหล่อเย็นสามารถเข้าถึงผิวสัมผัสการตัดได้ดีเนื่องจากมีอนุภาคเล็กและไม่หลุดออกไปได้ง่ายเมื่อมีดตัดหมุนซึ่งเป็นการช่วยในการหล่อลื่นขณะทำการตัดเฉือนจึงใช้แรงในการตัดต่ำที่สุด



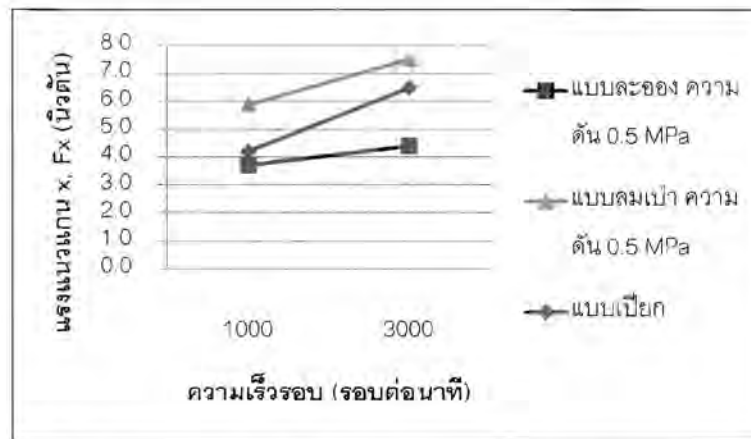
รูปที่ 6.9 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกน x (Fx) ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบต่าง ๆ ในเวลาต่าง ๆ



รูปที่ 6.10 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกน x (Fx) ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบต่าง ๆ ในเวลาต่าง ๆ

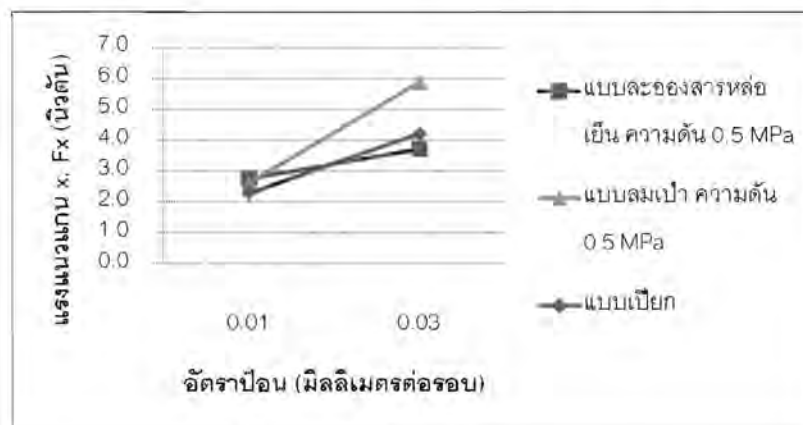
เมื่อพิจารณารูปที่ 6.9 และ 6.10 จะเห็นได้ว่าการตัดแบบลวด ต้องใช้แรงในการตัดสูงสุด รองลงมาคือการตัดแบบการตัดแบบเปียก และ ใช้ลวดของของสารหล่อเย็น ซึ่งอธิบายไว้ในรูปที่ 6.7 และ 6.8

จากรูปที่ 6.11 เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบที่ต่างกัน พบว่าที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาทีจะใช้แรงในการตัดน้อยกว่าที่ 3,000 รอบต่อนาที เนื่องจากการตัดที่ความเร็วรอบสูงจะทำให้ความร้อนสูงกว่าการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ ซึ่งความร้อนที่สูงกว่านี้เองจะช่วยให้ลูมิเนียมอ่อนตัวลงและตัดได้ง่ายกว่า ทำให้ใช้แรงในการตัดที่ต่ำกว่า โดยการตัดแบบลมเป่ายังคงใช้แรงในการตัดสูงสุด รองลงมาคือการตัดแบบเปียก และการตัดแบบลวดของสารหล่อเย็นตามลำดับ



รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ในการตัดแนวแกน x (Fx) และความเร็วรอบ 1,000 และ 3,000 รอบต่อนาทีของอัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ

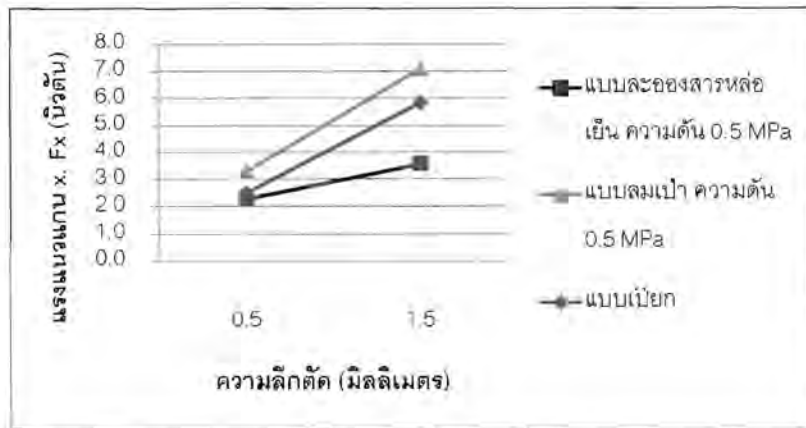
จากรูปที่ 6.12 อัตราป้อนตัดส่งผลโดยตรงกับแรงในแนวแกน x ซึ่งเป็นแนวเดียวกับแนวการป้อน โดยอัตราป้อนที่สูงขึ้น จะทำให้เกิดแรงต้านมากขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ที่มากกว่าต่อการหมุนหนึ่งรอบจะต้องใช้แรงที่มากกว่า โดยการตัดแบบลมเป่ายังคงใช้แรงในการตัดสูงสุด รองลงมาคือการตัดแบบเปี้ยก และการตัดแบบละของของสารหล่อเย็นตามลำดับ



รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ในการตัดแนวแกน x (Fx) และอัตราป้อน 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบของความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ

จากรูปที่ 6.13 เมื่อพิจารณาความลึกการตัดและแรงเกิดขึ้นในแนวแกน x พบว่า การตัดที่ความลึกที่มากกว่าจะทำให้เกิดแรงที่สูงกว่า เนื่องจากการตัดด้วยความลึกสูง เป็นการกำจัดเศษ

โลหะในปริมาณที่มากกว่าต่อหน่วยเวลา จะทำให้ต้องใช้แรงในการนำเศษโลหะออกจากชิ้นงาน สูงขึ้นกว่าการตัดด้วยความลึกตัดที่ต่ำ



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ในการตัดแนวแกน x (F_x) และความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรของความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่เวลา 120 นาที ของการตัดแบบต่าง ๆ

6.3 ความสัมพันธ์ได้สำหรับปัจจัยต่างๆ และตัวแปรตาม

จากตารางที่ 6.1 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความหยابผิวเฉลี่ยของการตัดทั้งสามรูปแบบนั้น (แบบเปียก, แบบละของของสารหล่อเย็น, และแบบลมเป่า) ประกอบด้วย อัตราป้อนตัด ความเร็วรอบ และความลึกตัด ยกเว้นการตัดแบบลมเป่าที่ไม่มีปัจจัยของความเร็วรอบเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ในขณะเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็วรอบของการตัดแบบเปียก และแบบละของของสารหล่อเย็นมีค่าน้อยมาก แม้ความเร็วรอบจะเป็นปัจจัยที่มีผลตามที่สมการแสดง แต่ค่าที่ได้จากการคำนวณไม่มีผลต่อค่าความหยابผิวของการตัดแบบต่างๆ จากค่าของอัตราป้อนของความหยابผิวของการตัดทั้งสามแบบ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดทั้งสามแบบมีค่าใกล้เคียงกันโดยการตัดแบบเปียกมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด ตามด้วยการตัดแบบละของของสารหล่อเย็น และการตัดแบบลมเป่าตามลำดับ ซึ่งสาเหตุอาจเกิดมาจากเนื้อวัสดุที่มีความแข็งตัวน้อย ประกอบกับความร้อนในการตัดทำให้วัสดุเกิดความนิ่มขึ้นมาก มีตัดจึงเกิดการสึกหรอน้อยมาก ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยต่างๆ จึงมีค่าน้อยและมีความใกล้เคียงกัน

แรงในแนวแกน x (F_x) ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความหยابผิวเฉลี่ยของการตัดทั้งสามรูปแบบนั้น (แบบเปียก, แบบละของของสารหล่อเย็น, และแบบลมเป่า) ประกอบด้วย อัตราป้อนตัด ความเร็วรอบ และความลึกตัด เหมือนกับค่าความหยابผิว ปัจจัยที่

ส่งผลมากคืออัตราป้อนตัด และผลคูณของอัตราป้อนตัดกับความลึกตัดเหมือนกันทั้งสามแบบการตัด และค่าสัมประสิทธิ์ของความเร็รรอบ และความลึกตัดมีค่าน้อยและใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 6.1 สมการความสัมพันธ์ของการตัดแบบต่าง ๆ

แบบเปียก	ความหนาผิวเฉลี่ย (Ra)	$Ra = 0.451150 - 2.40570E-04S + 3.05000F - 0.243040D + 5.19519E-08S^2 + 0.0980077D^2$
	แรงแนวแกนป้อนตัด (Fx)	$Fx = -0.483571 + 0.00243768S - 91.0000F - 0.432500D - 7.46607E-07S^2 + 0.0560000SF + 154.000FD$
แบบละอองของสารหล่อเย็น	ความหนาผิวเฉลี่ย (Ra)	$Ra = 0.182679 - 1.24E-05S + 1.45F - 0.146443D + 0.0578714D^2$
	แรงแนวแกนป้อนตัด (Fx)	$Fx = -0.575000 + -0.00139096S + 121.875F + 6.05558D + 2.92115E-07S^2 - 1.72154D^2 - 57.5000FD$
แบบลมเป่า	ความหนาผิวเฉลี่ย (Ra)	$Ra = 0.112064 + 0.367500F + 0.449529D - 0.319214D^2 + 5.74000FD$
	แรงแนวแกนป้อนตัด (Fx)	$Fx = -0.110333 + 0.00035S + 63.5F + 0.095D + 151.5FD$

หลังจากนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวผลตอบแล้ว ทำการวิเคราะห์ผลจนได้ผลปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ค่าความเรียบผิวเกิดต่ำที่สุด ดังนี้

ตารางที่ 6.2 ค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ค่าความเรียบผิวเกิดต่ำที่สุดของการตัดแบบต่าง ๆ

	ความเร็รรอบ (รอบต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
แบบเปียก	2,323.37	0.01	1.25
แบบละอองของสารหล่อเย็น	3,000.00	0.01	1.5
แบบลมเป่า	2,737.79	0.01	1.5

เมื่อพิจารณาร่วมกับแรงที่เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลต่ออายุของมีดตัด พบว่า แรงที่เกิดขึ้นต่ำและความหนาผิวที่ต่ำที่สุดเกิดขึ้นเมื่อมีปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 6.3 ค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ค่าความเรียบผิวเกิดต่ำที่สุดร่วมกับแรงที่เกิดขึ้นของการตัดแบบต่าง ๆ

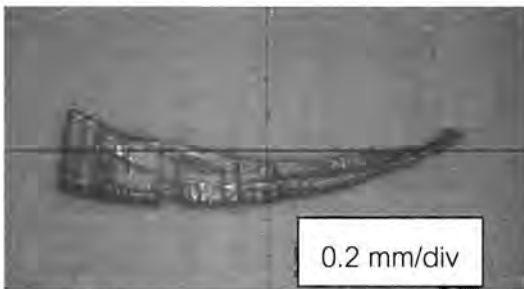
	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	อัตราป้อนตัด (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
แบบเปียก	2,323.37	0.01	1.25
แบบละอองของสารหล่อเย็น	3,000.00	0.01	1.5
แบบลมเป่า	2,737.79	0.01	1.5

บทที่ 7

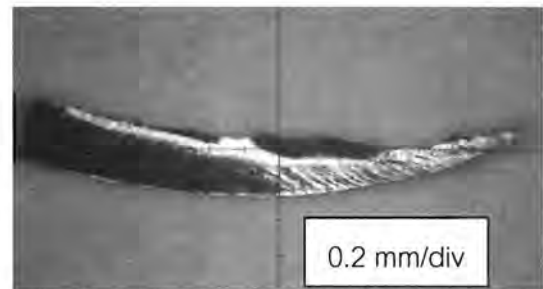
เศษโลหะ

7.1 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความเร็วยรอบของการตัดแบบเปียก

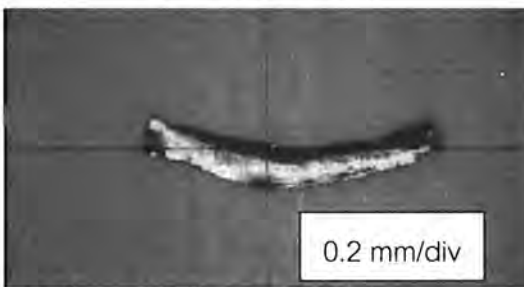
จากรูปที่ 7.1 ถึง 7.4 จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วยรอบของการตัดทำให้ความยาวของเศษโลหะน้อยลง หรือที่ความเร็วยรอบต่ำกว่า เศษโลหะจะยาวกว่าการตัดที่มีความเร็วยรอบสูง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการตัดสูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานนิ่มขึ้น การตัดง่ายขึ้น ดังนั้นความยาวของเศษโลหะจึงสั้นกว่าเศษโลหะจากการตัดที่มีความเร็วยรอบสูง



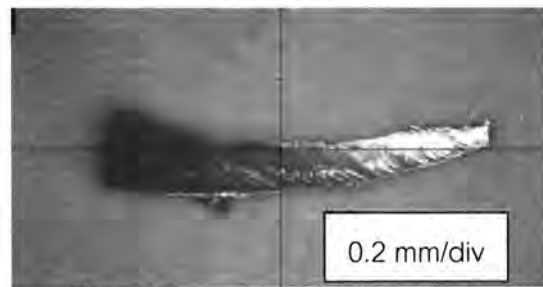
รูปที่ 7.1 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.2 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



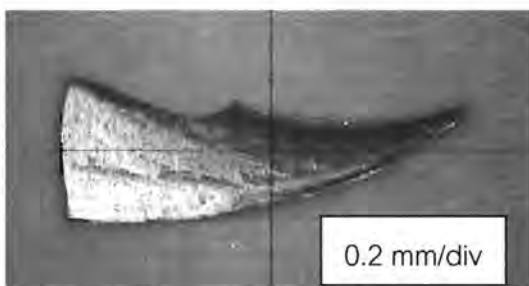
รูปที่ 7.3 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



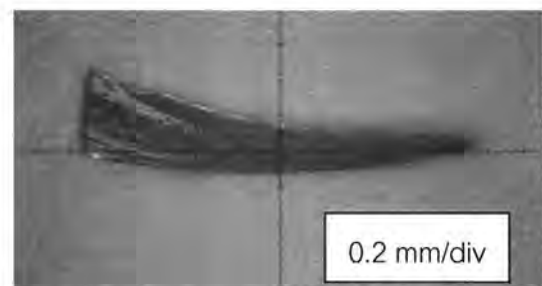
รูปที่ 7.4 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)

7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับอัตราป้อนตัดของการตัดแบบเปียก

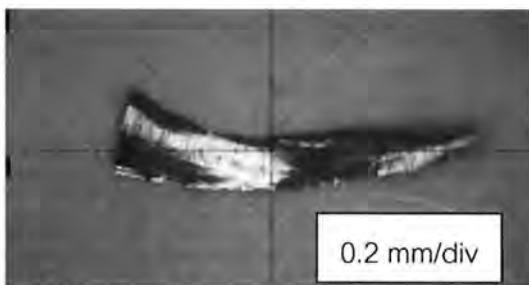
จากรูปที่ 7.5 ถึง 7.8 จะเห็นว่าอัตราป้อนตัดที่มากส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะสูงกว่าเศษโลหะจากอัตราป้อนตัดต่ำเล็กน้อย และที่อัตราป้อนตัดที่มาก เศษโลหะจะมีความหนา มากกว่าเศษโลหะที่อัตราป้อนตัดน้อย เนื่องจาก การตัดที่อัตราป้อนสูงมีดตัดเคลื่อนที่ตัดเนื้อวัสดุ เร็วกว่าการตัดที่อัตราป้อนต่ำส่งผลให้ขนาดของเศษโลหะหนากว่า ในขณะที่ความเร็วรอบในการ ตัดเท่ากันส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะใกล้เคียงกัน



รูปที่ 7.5 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.6 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



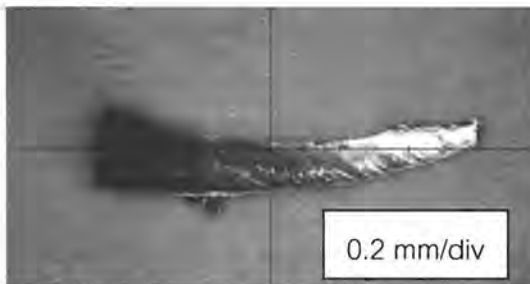
รูปที่ 7.7 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



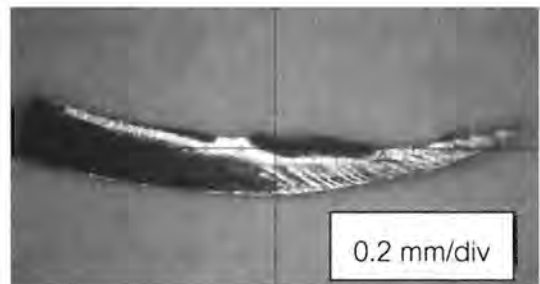
รูปที่ 7.8 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)

7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความลึกตัดของการตัดแบบเป็ยก

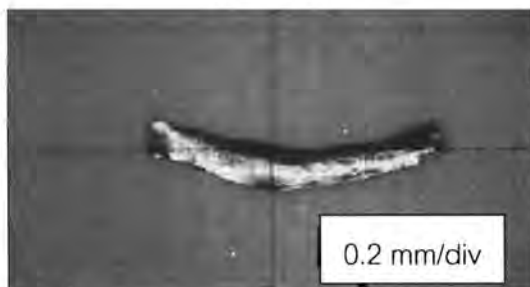
จากรูปที่ 7.9 ถึง 7.12 จะเห็นว่าความลึกของการตัดที่มาก ส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะสูง หรือที่ความลึกตัดน้อย เศษโลหะจะสั้น เนื่องจากที่ความลึกตัดมากกว่าการสัมผัสเนื้อวัสดุของการตัดจะมีมากกว่า ปริมาณเนื้อวัสดุที่ถูกตัดมีมากกว่า ส่งผลให้ขนาดของเศษวัสดุยาวกว่า



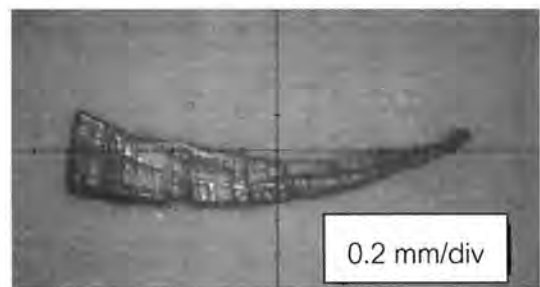
รูปที่ 7.9 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเป็ยก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.10 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเป็ยก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)



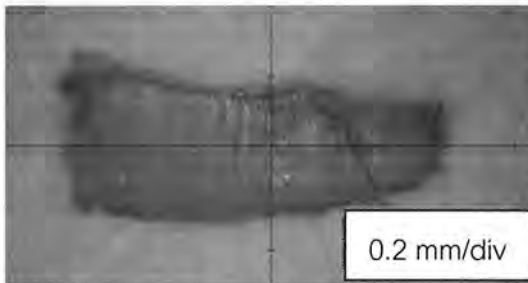
รูปที่ 7.11 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเป็ยก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)



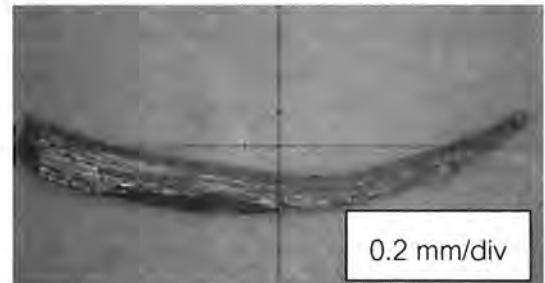
รูปที่ 7.12 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเป็ยก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)

7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความเร็วยรอบของการตัดแบบลมเป่า

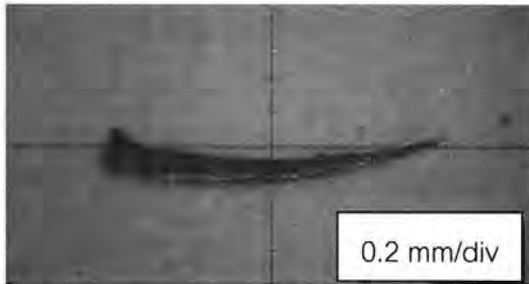
จากรูปที่ 7.13 ถึง 7.16 จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วยรอบของการตัดทำให้ความยาวของเศษโลหะน้อยลง หรือที่ความเร็วยรอบต่ำกว่า เศษโลหะจะยาวกว่าการตัดที่มีความเร็วยรอบสูง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการตัดสูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานนิ่มขึ้น การตัดง่ายขึ้น ดังนั้นความยาวของเศษโลหะจึงสั้นกว่าเศษโลหะจากการตัดที่ความเร็วยรอบสูง



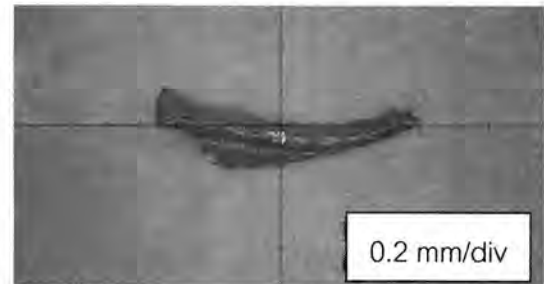
รูปที่ 7.13 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.14 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



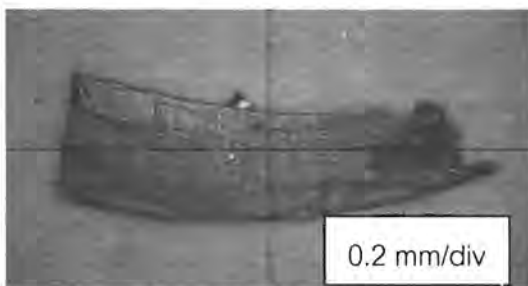
รูปที่ 7.15 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)



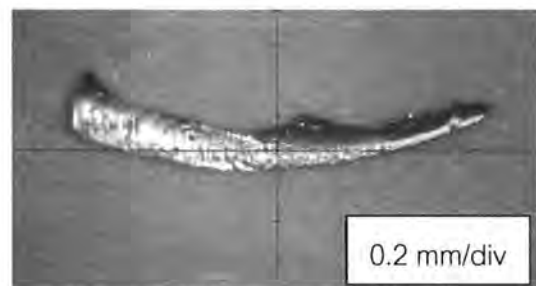
รูปที่ 7.16 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)

7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับอัตราป้อนตัดของการตัดแบบลมเป่า

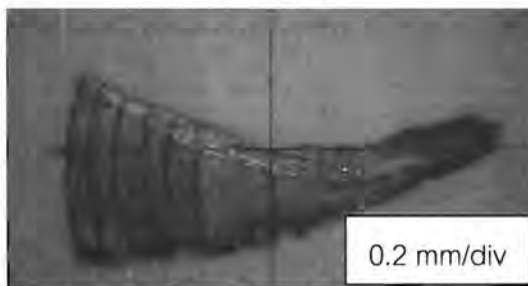
จากรูปที่ 7.17 ถึง 7.20 จะเห็นว่าอัตราป้อนตัดที่มากส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะสูงกว่าเศษโลหะจากอัตราป้อนตัดต่ำเล็กน้อย และที่อัตราป้อนตัดที่มาก เศษโลหะจะมีความหนา มากกว่าเศษโลหะที่อัตราป้อนตัดน้อย เนื่องจาก การตัดที่อัตราป้อนสูงมีดตัดเคลื่อนที่ตัดเนื้อวัสดุ เร็วกว่าการตัดที่อัตราป้อนต่ำส่งผลให้ขนาดของเศษโลหะหนากว่า ในขณะที่ความเร็วรอบในการ ตัดเท่ากันส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะใกล้เคียงกัน



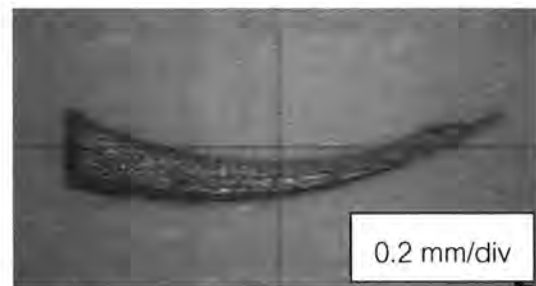
รูปที่ 7.17 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.18 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.19 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียง (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



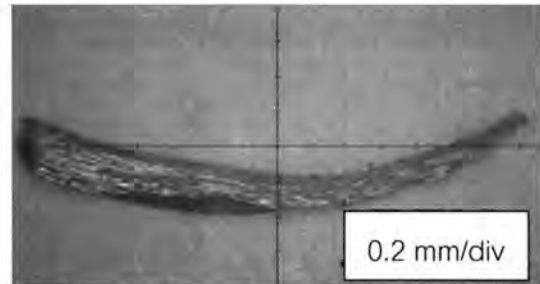
รูปที่ 7.20 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียง (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)

7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความลึกตัดของการตัดแบบลมเป่า

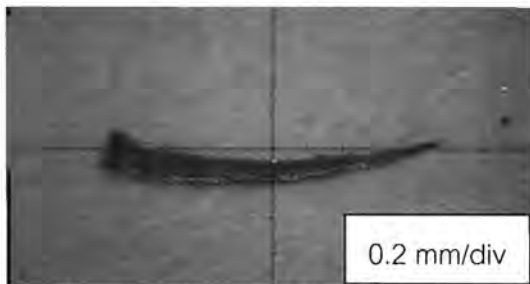
จากรูปที่ 7.21 ถึง 7.24 จะเห็นว่าความลึกของการตัดที่มาก ส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะสูง หรือที่ความลึกตัดน้อย เศษโลหะจะสั้น เนื่องจากที่ความลึกตัดมากกว่าการสัมผัสเนื้อวัสดุของการตัดจะมีมากกว่า ปริมาณเนื้อวัสดุที่ถูกตัดมีมากกว่า ส่งผลให้ขนาดของเศษวัสดุยาวกว่า



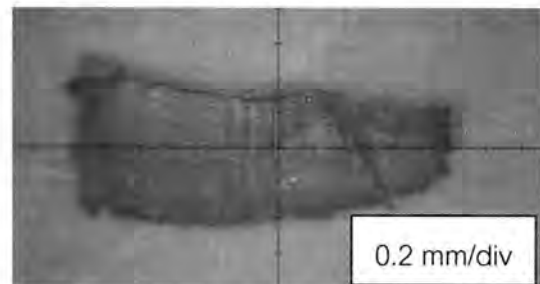
รูปที่ 7.21 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.22 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



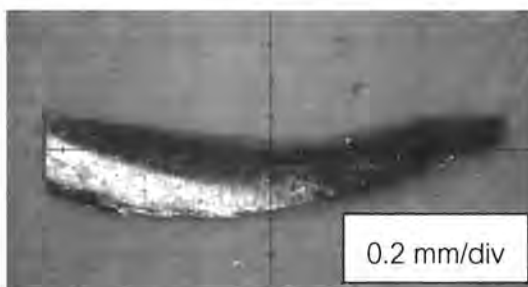
รูปที่ 7.23 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเป็ยก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)



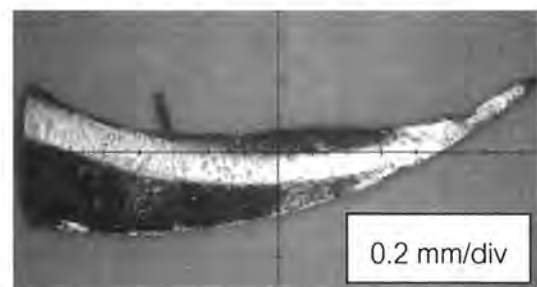
รูปที่ 7.24 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเป็ยก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)

7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความเร็วยรอบของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

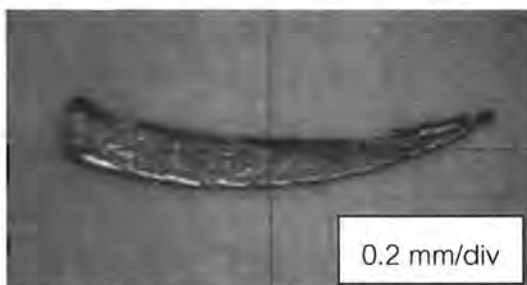
จากรูปที่ 7.25 ถึง 7.28 จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของความเร็วยรอบของการตัดทำให้ความยาวของเศษโลหะน้อยลง หรือที่ความเร็วยรอบต่ำกว่า เศษโลหะจะยาวกว่าการตัดที่มีความเร็วยรอบสูง เนื่องจากการเพิ่มความเร็วยรอบทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในการตัดสูงขึ้น ทำให้ชิ้นงานนิ่มขึ้น การตัดง่ายขึ้น ดังนั้นความยาวของเศษโลหะจึงสั้นกว่าเศษโลหะจากการตัดที่ความเร็วยรอบสูง



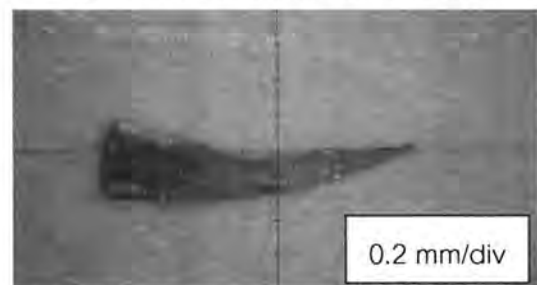
รูปที่ 7.25 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.26 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



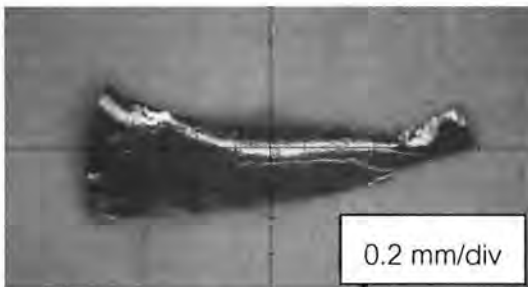
รูปที่ 7.27 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)



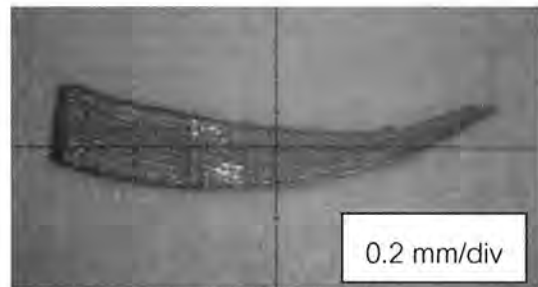
รูปที่ 7.28 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วยรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตร ต่อ 1 ช่อง)

7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับอัตราป้อนตัดของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

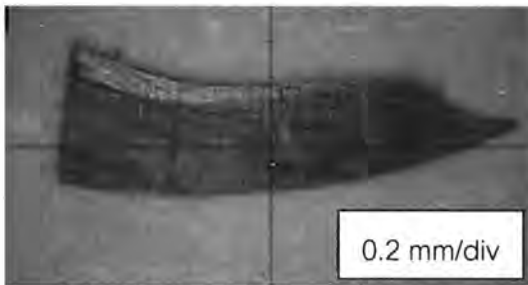
จากรูปที่ 7.29 ถึง 7.32 จะเห็นว่าอัตราป้อนตัดที่มากส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะสูงกว่าเศษโลหะจากอัตราป้อนตัดต่ำเล็กน้อย และที่อัตราป้อนตัดที่มาก เศษโลหะจะมีความหนา มากกว่าเศษโลหะที่อัตราป้อนตัดน้อย เนื่องจาก การตัดที่อัตราป้อนสูงมีดตัดเคลื่อนที่ตัดเนื้อวัสดุเร็วกว่าการตัดที่อัตราป้อนต่ำส่งผลให้ขนาดของเศษโลหะหนากว่า ในขณะที่ความเร็วรอบในการตัดเท่ากันส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะใกล้เคียงกัน



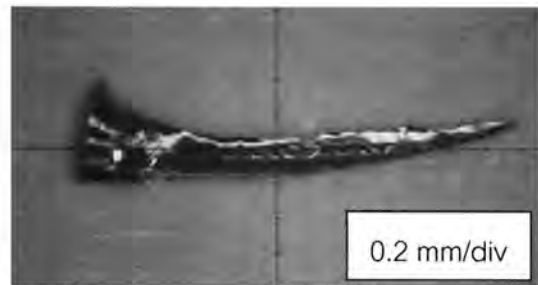
รูปที่ 7.29 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.30 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



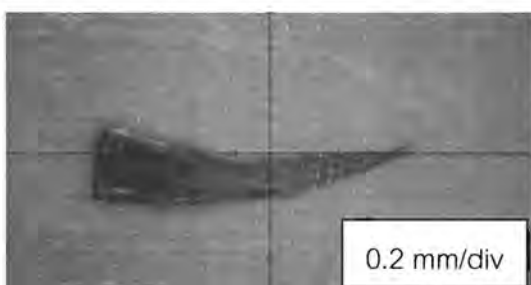
รูปที่ 7.31 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.32 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)

7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความลึกตัดของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

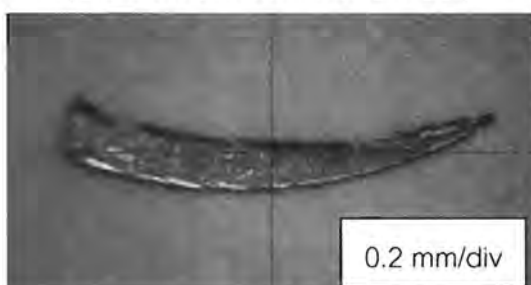
จากรูปที่ 7.33 ถึง 7.36 จะเห็นว่าความลึกของการตัดที่มาก ส่งผลให้ความยาวของเศษโลหะสูง หรือที่ความลึกตัดน้อย เศษโลหะจะสั้น เนื่องจากที่ความลึกตัดมากกว่าการสัมผัสเนื้อวัสดุของการตัดจะมีมากกว่า ปริมาณเนื้อวัสดุที่ถูกตัดมีมากกว่า ส่งผลให้ขนาดของเศษวัสดุยาวกว่า



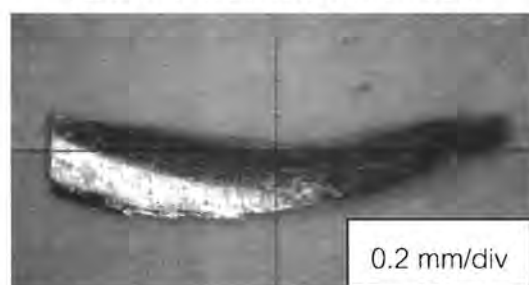
รูปที่ 7.33 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.34 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.35 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)



รูปที่ 7.36 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก (อัตราส่วน 0.2 มิลลิเมตรต่อ 1 ช่อง)

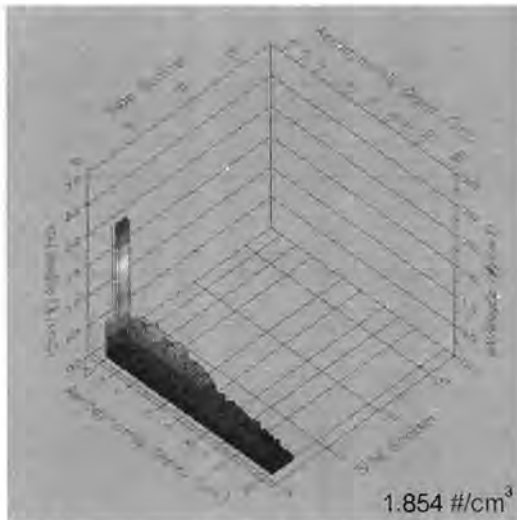
บทที่ 8

การตรวจวัดสารปนเปื้อนของสารหล่อเย็นในอากาศที่เกิดจาก กระบวนการตัด

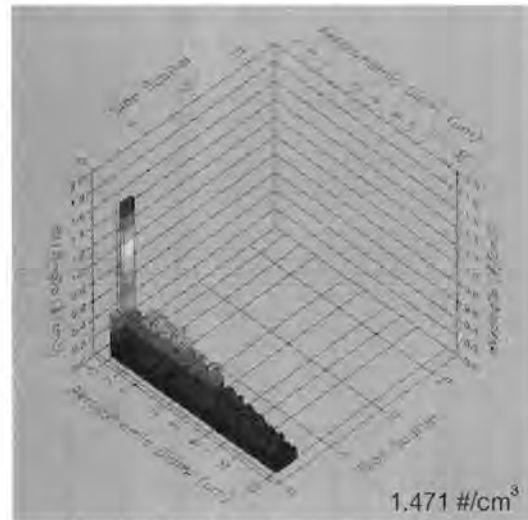
8.1 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบต่างกัน

ผลการทดลองจากการตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer ที่มีความสามารถวัดขนาดละอองสารหล่อเย็นเล็กที่สุดที่ 0.5 ไมโครเมตร ที่ความเร็วรอบต่างกัน

จากรูปที่ 8.1 และ 8.2 สามารถสรุปได้ว่าที่ความเร็วรอบในการตัดสูง จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจะมากกว่าจำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจากความเร็วรอบต่ำ เนื่องจากการหมุนของมีดตัดทำให้สารหล่อเย็นกระจายตัวเป็นละออง ดังนั้นเมื่อมีดตัดหมุนเร็วการกระจายตัวของสารหล่อเย็นจะมาก ส่งผลให้จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดมีมาก



รูปที่ 8.1 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก

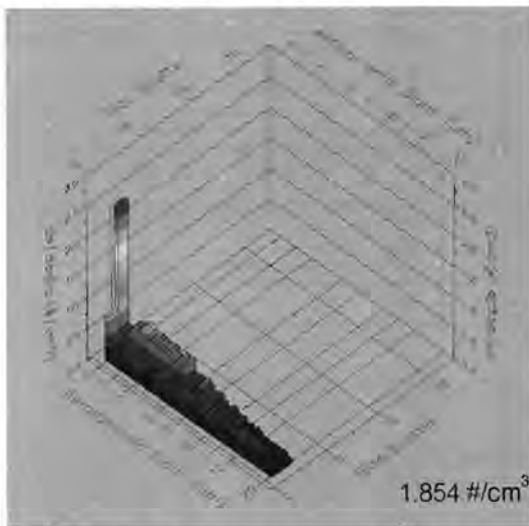


รูปที่ 8.2 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก

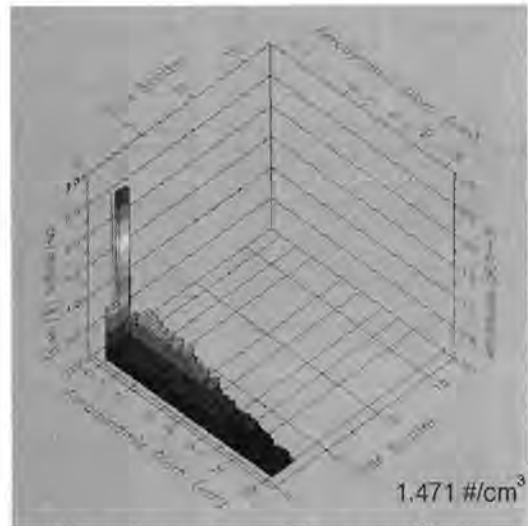
8.2 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่อัตราป้อนตัดต่างกัน

ผลการทดลองจากการตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer ที่มีความสามารถวัดขนาดละอองสารหล่อเย็นเล็กที่สุดที่ 0.5 ไมโครเมตร ที่อัตราป้อนต่างกัน

จากรูปที่ 8.3 และ 8.4 สามารถสรุปได้ว่าที่อัตราป้อนในการตัดสูง จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจะมากกว่าจำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจากอัตราป้อนต่ำ เนื่องจากขนาดของเศษโลหะที่อัตราป้อนสูงมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเศษโลหะที่อัตราป้อนต่ำ ดังนั้นโอกาสในการกระทบสารหล่อเย็นทำให้สารหล่อเย็นแตกตัวเป็นอนุภาคจึงมีมากกว่า ซึ่งส่งผลให้จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนที่อัตราป้อนสูงมีมากกว่า



รูปที่ 8.3 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก



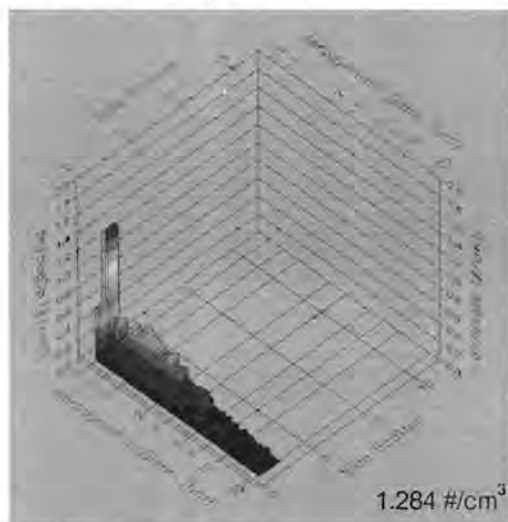
รูปที่ 8.4 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก

8.3 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัดต่างกัน

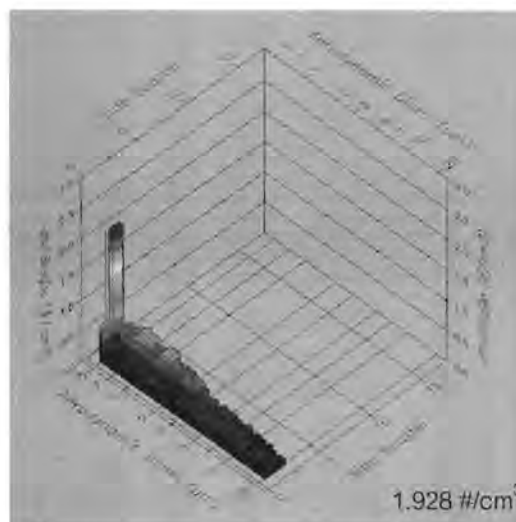
ผลการทดลองจากการตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer ที่มีความสามารถวัดขนาดละอองสารหล่อเย็นเล็กที่สุดที่ 0.5 ไมโครเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 8.5 และ 8.6 สามารถสรุปได้ว่าที่ความลึกตัดสูง จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจะมากกว่าจำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดที่ความลึกตัดต่ำ เนื่องจากการตัดที่ใช้ความลึกการตัดต่ำจะทำให้เกิดการแตกตัวของสารหล่อเย็นจากการตัดยาก ทำให้โอกาสเกิด

เป็นละอองต่ำลงด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดที่มีความลึกการตัดที่มากกว่า และอีกกรณีหนึ่งคือ ที่ความลึกตัดสูงจะทำให้เศษโลหะมีโอกาสในการกระเด็นไปโดนสารหล่อเย็นเพิ่มมากขึ้นกว่าที่ ความลึกตัดต่ำ ทำให้การเกิดละอองของสารหล่อเย็นสูงขึ้น ส่งผลให้มีความหนาแน่นของสาร ปนเปื้อนในอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 8.5 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก

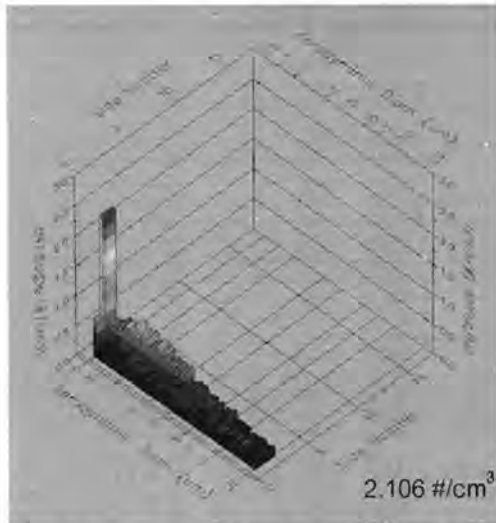


รูปที่ 8.6 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก

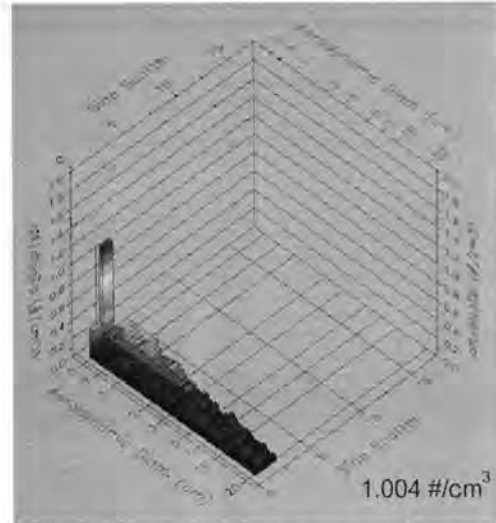
8.4 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่ความเร็วรอบต่างกัน

ผลการทดลองจากการตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศที่เกิดจากระบวนการตัดด้วยเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer ที่มีความสามารถวัดขนาดละอองสารหล่อเย็นเล็กที่สุดที่ 0.5 ไมโครเมตร ที่ความเร็วรอบต่างกัน

จากรูปที่ 8.7 และ 8.8 สามารถสรุปได้ว่าที่ความเร็วรอบในการตัดสูง จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจะมากกว่าจำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจากความเร็วรอบต่ำ เนื่องจากการหมุนของมีดตัดทำให้สารหล่อเย็นกระจายตัวเป็นละออง ดังนั้นเมื่อมีดตัดหมุนเร็วการกระจายตัวของสารหล่อเย็นจะมาก ส่งผลให้จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดมีมาก



รูปที่ 8.7 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเป็ยกที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป้า

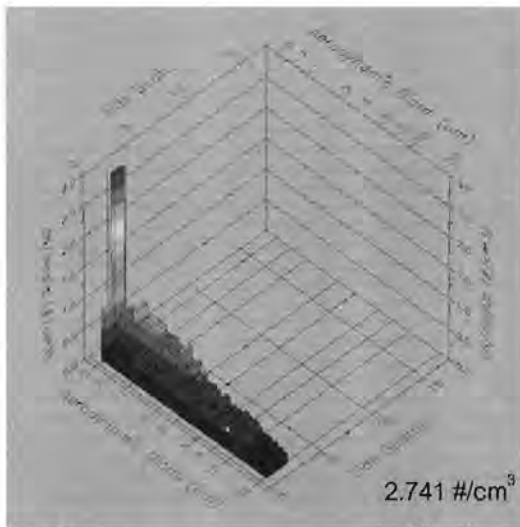


รูปที่ 8.8 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเป็ยกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป้า

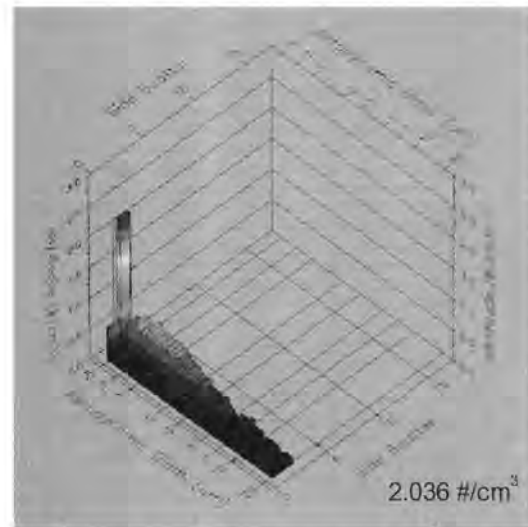
8.5 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป้าที่อัตราป้อนตัดต่างกัน

ผลการทดลองจากการตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer ที่มีความสามารถวัดขนาดละของสารหล่อเย็นเล็กที่สุดที่ 0.5 ไมโครเมตร ที่อัตราป้อนต่างกัน

จากรูปที่ 8.9 และ 8.10 สามารถสรุปได้ว่าที่อัตราป้อนในการตัดสูง จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจะมากกว่าจำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจากอัตราป้อนต่ำ เนื่องจากขนาดของเศษโลหะที่อัตราป้อนสูงมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเศษโลหะที่อัตราป้อนต่ำ ดังนั้นโอกาสในการกระทบสารหล่อเย็นทำให้สารหล่อเย็นแตกตัวเป็นอนุภาคจึงมีมากกว่า ซึ่งส่งผลให้จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนที่อัตราป้อนสูงมีมากกว่า



รูปที่ 8.9 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเป็ยกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า

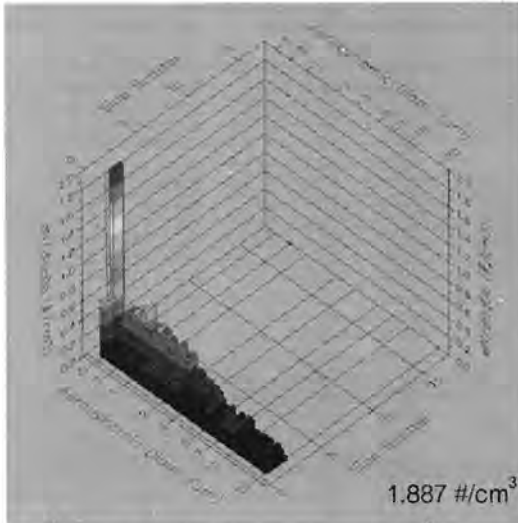


รูปที่ 8.10 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเป็ยกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า

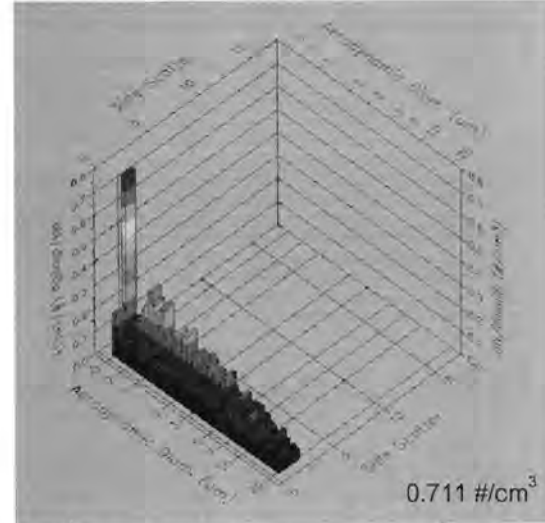
8.6 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่ความลึกตัดต่างกัน

ผลการทดลองจากการตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer ที่มีความสามารถวัดขนาดละอองสารหล่อเย็นเล็กที่สุดที่ 0.5 ไมโครเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 8.11 และ 8.12 สามารถสรุปได้ว่าที่ความลึกตัดสูง จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจะมากกว่าจำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดที่ความลึกตัดต่ำ เนื่องจากการตัดที่ใช้ความลึกการตัดต่ำจะทำให้เกิดการแตกตัวของสารหล่อเย็นจากการตัดยาก ทำให้โอกาสเกิดเป็นละอองต่ำลงด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดที่ความลึกการตัดที่มากกว่า และอีกกรณีหนึ่งคือที่ความลึกตัดสูงจะทำให้เศษโลหะมีโอกาสในการกระเด็นไปโดนสารหล่อเย็นเพิ่มมากขึ้นกว่าที่ความลึกตัดต่ำ ทำให้การเกิดละอองของสารหล่อเย็นสูงขึ้น ส่งผลให้มีความหนาแน่นของสารปนเปื้อนในอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 8.11 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเป็ยกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า

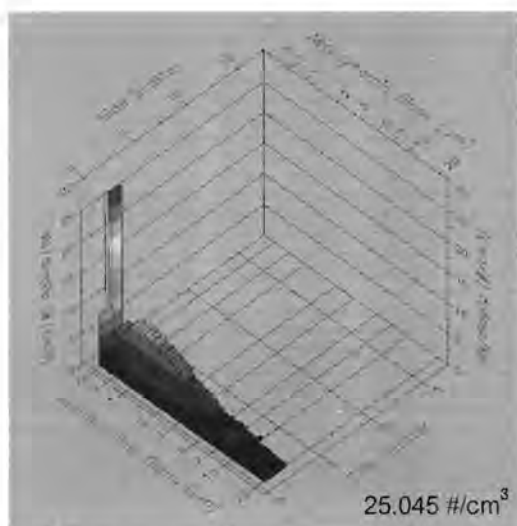


รูปที่ 8.12 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเป็ยกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อ นาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า

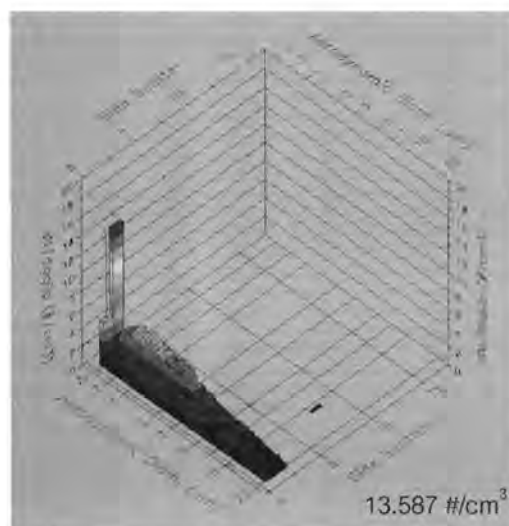
8.7 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบต่างกัน

ผลการทดลองจากการตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer ที่มีความสามารถวัดขนาดละอองสารหล่อเย็นเล็กที่สุดที่ 0.5 ไมโครเมตร ที่ความเร็วรอบต่างกัน

จากรูปที่ 8.13 และ 8.14 สามารถสรุปได้ว่าที่ความเร็วรอบในการตัดสูง จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจะมากกว่าจำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจากความเร็วรอบต่ำ เนื่องจากการหมุนของมีดตัดทำให้สารหล่อเย็นกระจายตัวเป็นละออง ดังนั้นเมื่อมีดตัดหมุนเร็วการกระจายตัวของสารหล่อเย็นจะมาก ส่งผลให้จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดมีมาก



รูปที่ 8.13 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

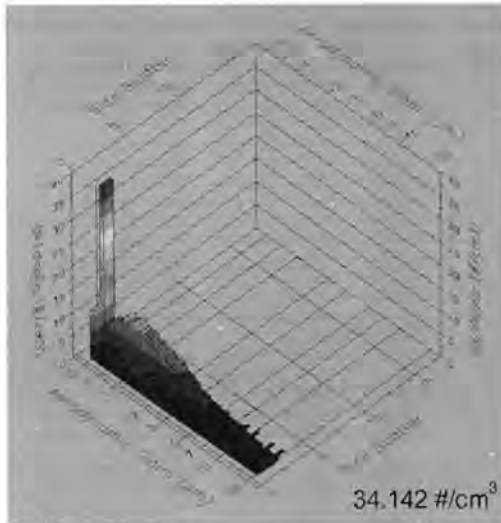


รูปที่ 8.14 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

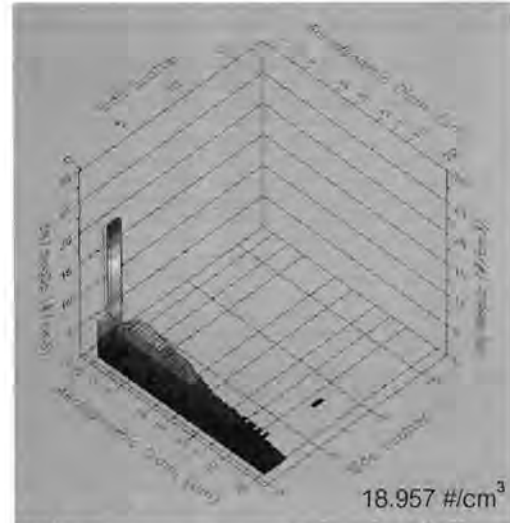
8.8 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็นที่อัตราป้อนตัดต่างกัน

ผลการทดลองจากการตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer ที่มีความสามารถวัดขนาดละอองสารหล่อเย็นเล็กที่สุดที่ 0.5 ไมโครเมตร ที่อัตราป้อนต่างกัน

จากรูปที่ 8.15 และ 8.16 สามารถสรุปได้ว่าที่อัตราป้อนในการตัดสูง จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจะมากกว่าจำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจากอัตราป้อนต่ำ เนื่องจากขนาดของเศษโลหะที่อัตราป้อนสูงมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเศษโลหะที่อัตราป้อนต่ำ ดังนั้นโอกาสในการกระทบสารหล่อเย็นทำให้สารหล่อเย็นแตกตัวเป็นอนุภาคจึงมีมากกว่า ซึ่งส่งผลให้จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนที่อัตราป้อนสูงมีมากกว่า



รูปที่ 8.15 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

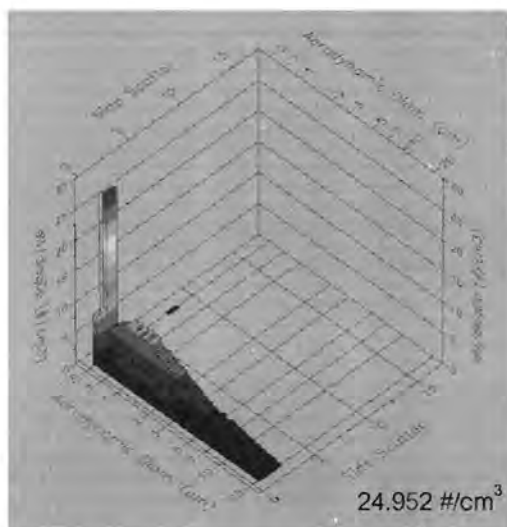


รูปที่ 8.16 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

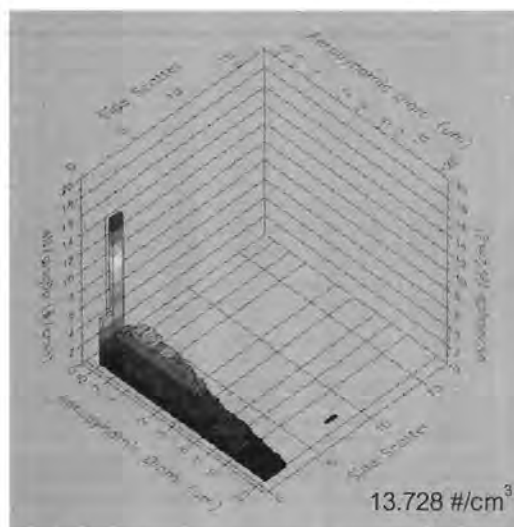
8.9 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่ความลึกตัดต่างกัน

ผลการทดลองจากการตรวจวัดปริมาณสารปนเปื้อนในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัดด้วยเครื่อง Aerodynamic particle sizer spectrometer ที่มีความสามารถวัดขนาดละอองสารหล่อเย็นเล็กที่สุดที่ 0.5 ไมโครเมตร ที่ความลึกตัดต่างกัน

จากรูปที่ 8.17 และ 8.18 สามารถสรุปได้ว่าที่ความลึกตัดสูง จำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดจะมากกว่าจำนวนอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดที่ความลึกตัดต่ำ เนื่องจากการตัดที่ใช้ความลึกการตัดต่ำจะทำให้เกิดการแตกตัวของสารหล่อเย็นจากการตัดยาก ทำให้โอกาสเกิดเป็นละอองต่ำลงด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับ การตัดที่ความลึกการตัดที่มากกว่า และอีกกรณีหนึ่งคือที่ความลึกตัดสูงจะทำให้เศษโลหะมีโอกาสในการกระเด็นไปโดนสารหล่อเย็นเพิ่มมากขึ้นกว่าที่ความลึกตัดต่ำ ทำให้การเกิดละอองของสารหล่อเย็นสูงขึ้น ส่งผลให้มีความหนาแน่นของสารปนเปื้อนในอากาศสูงขึ้นตามไปด้วย



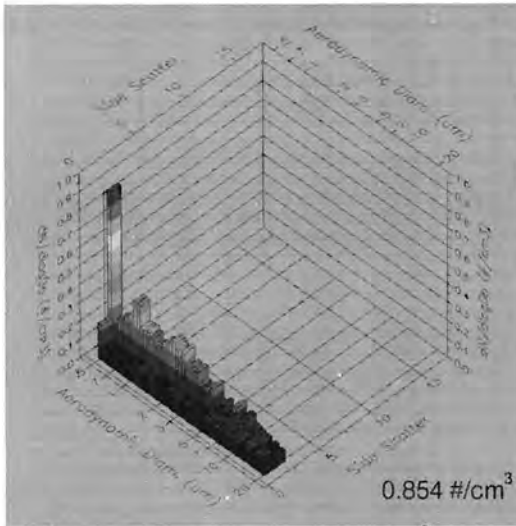
รูปที่ 8.17 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น



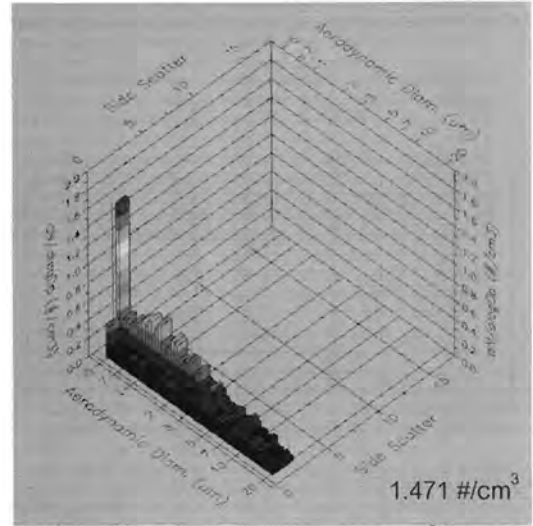
รูปที่ 8.18 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

8.10 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบต่างๆ

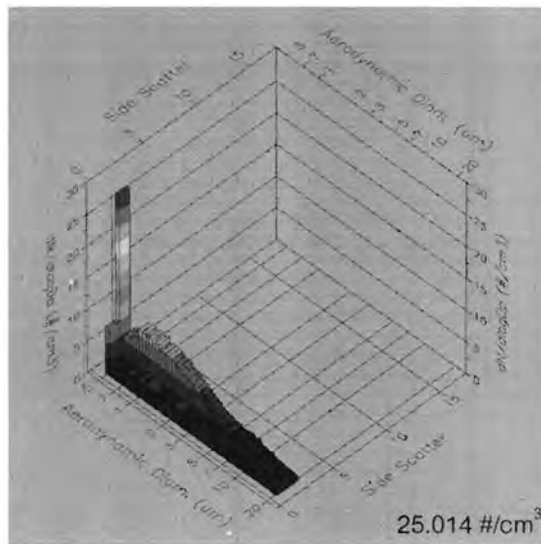
จากรูปที่ 8.19 ถึง 8.21 สรุปได้ว่าการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็นมีสารปนเปื้อนมากที่สุด เนื่องจากอนุภาคของสารหล่อเย็นมีขนาดเล็กมาก จึงปนมากับอากาศได้ง่ายกว่าแบบอื่นๆ และปริมาณสารปนเปื้อนรองลงมาคือการตัดแบบเปียก และการตัดแบบลมเป่ามีปริมาณอนุภาคสารปนเปื้อนน้อยที่สุด



รูปที่ 8.19 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า



รูปที่ 8.20 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก



รูปที่ 8.21 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

บทที่ 9

ต้นทุน

9.1 การคำนวณต้นทุนในกระบวนการกัด

ต้นทุนในกระบวนการตัดประกอบด้วย ต้นทุนมิดตัดและต้นทุนสารหล่อเย็น ต้นทุนมิดตัดหมายถึง ต้นทุนที่เกิดจากการใช้มิดตัดหัวบอลขณะอยู่ในกระบวนการตัดตามเงื่อนไขการตัดที่ได้ตั้งไว้ โดยพิจารณาอายุของมิดตัดหัวบอลว่ายังใช้งานได้จากค่าความสึกหรอของมิดตัดหัวบอล (Flank wear, Vb) อายุของมิดตัดหัวบอลที่ยังสามารถใช้งานได้ต้องมีค่าขนาดความสึกหรอไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร

สำหรับการตัดแบบเปียก แบบละออง และแบบลมเป่าในระยะเวลา 2 ชั่วโมงมีค่าความสึกหรอของมิดตัดน้อยมากเมื่อเทียบกับเกณฑ์ที่ตั้งไว้ 0.2 มิลลิเมตร ดังนั้นกำหนดให้จำนวนมิดตัดที่ใช้มีค่าเท่ากัน ส่งผลให้การเปรียบเทียบต้นทุนการตัด จึงสามารถละต้นทุนมิดตัดออกไปได้ ดังนั้นการคำนวณเปรียบเทียบต้นทุนจึงพิจารณาเฉพาะต้นทุนของสารหล่อเย็นเท่านั้น ในส่วนของสารหล่อเย็นมีอัตราการใช้และอัตราการวนกลับมาใช้ใหม่ดังตารางที่ 9.1

ตารางที่ 9.1 การใช้สารหล่อเย็นสำหรับวิธีการตัดแบบเปียก แบบละออง และแบบลมเป่า

	การตัดแบบเปียก	การตัดแบบละออง	การตัดแบบลมเป่า
อัตราการใช้สารหล่อเย็นขณะตัด (ลิตรต่อนาที)	16	0.09	0
อัตราการวนกลับมาใช้ใหม่	100%	99.07%	0
หมายเหตุ: ถังที่ใช้ใส่สารหล่อเย็นของเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์มีปริมาตร 191.34 ลิตร อายุการใช้งานของสารหล่อเย็น 1000 ชั่วโมง			

จากตารางที่ 9.1 จะเห็นว่าการตัดแบบลมเป่าไม่มีการใช้สารหล่อเย็น การตัดแบบเปียกมีการใช้สารหล่อเย็นมากที่สุดแต่มีการวนสารหล่อเย็นกลับมาใช้ให้ทั้งหมด และการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นมีการใช้สารหล่อเย็นที่น้อยมากเมื่อเทียบกับการตัดแบบเปียกแต่มีการสูญเสียสารหล่อเย็นที่เป็นละอองไปกับอากาศจึงทำให้มีการนำสารหล่อเย็นกลับมาใช้ใหม่ไม่ครบทั้งหมด โดยสามารถสรุปการใช้สารหล่อเย็นในการตัดแต่ละเงื่อนไขดังตารางที่ 9.2

ตารางที่ 9.2. การเปรียบเทียบปริมาณการใช้สารหล่อเย็นของการตัดแบบต่างๆ

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)	ปริมาณการใช้สารหล่อเย็น
1,000	0.01	1	A 0.5 < W < M 0.5
3,000	0.01	1	A 0.5 < W < M 0.5
1,000	0.03	1	A 0.5 < W < M 0.5
3,000	0.03	1	A 0.5 < W < M 0.5
1,000	0.02	0.5	A 0.5 < W < M 0.5
3,000	0.02	0.5	A 0.5 < W < M 0.5
1,000	0.02	1.5	A 0.5 < W < M 0.5
3,000	0.02	1.5	A 0.5 < W < M 0.5
2,000	0.01	0.5	A 0.5 < W < M 0.5
2,000	0.03	0.5	A 0.5 < W < M 0.5
2,000	0.01	1.5	A 0.5 < W < M 0.5
2,000	0.03	1.5	A 0.5 < W < M 0.5
2,000	0.02	1	A 0.5 < W < M 0.5

หมายเหตุ A 0.5 คือ การตัดแบบลมเป่าที่ความดัน 0.5 MPa
W คือ การตัดแบบเปียก
M 0.5 คือ การตัดแบบละอองที่ความดัน 0.5 MPa

จากตารางที่ 9.2 จะเห็นว่า การใช้สารหล่อเย็นของการตัดแบบลมเป่าจะน้อยที่สุด ตามด้วยการตัดแบบเปียก และแบบละอองของสารหล่อเย็น และสามารถคำนวณต้นทุนในการใช้สารหล่อเย็นได้ดังตารางที่ 9.3 โดยหัวเชื้อสารหล่อเย็นมีราคาลิตรละ 266.33 บาท อายุการใช้งาน 1000 ชั่วโมง และมีอัตราการผสมน้ำอยู่ที่ สารหล่อเย็น 1 ส่วนผสมน้ำ 15 ส่วน คิดหัวเชื้อสารหล่อเย็นเป็น 6.25% ของสารหล่อเย็นทั้งหมด

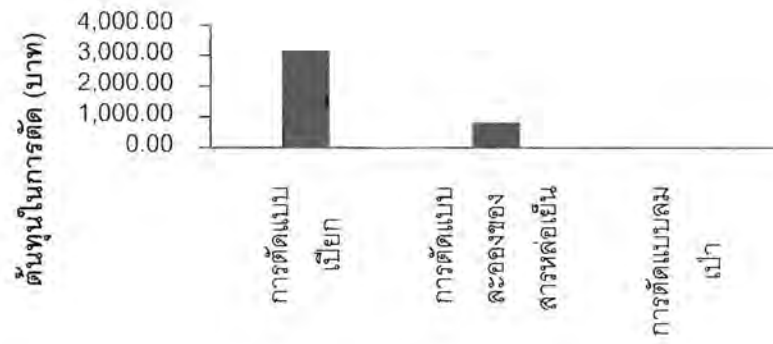
ตารางที่ 9.3 เปรียบเทียบราคาต้นทุนสารหล่อเย็นของการตัดแบบต่างๆ

	แบบ เปียก	แบบละอองของ สารหล่อเย็น	แบบลม เป่า
อัตราการใช้สารหล่อเย็นขณะทำการตัด (ลิตร/ นาที)	16	0.09	-
อัตราการวนกลับมาใช้ใหม่	100%	99.07%	-
หัวเชื้อสารหล่อเย็นผสมกับน้ำ	6.25%	6.25%	-
อัตราหัวเชื้อสารหล่อเย็นที่ใช้ (ลิตร/ชั่วโมง)	0.01196	0.00314	
ราคาลิตรละ (บาท)	266.33	266.33	-
ค่าหัวเชื้อสารหล่อเย็น (บาท/ชั่วโมง)	3.185	0.837	
ค่าสารหล่อเย็นเมื่อใช้ไป 1,000 ชั่วโมง (บาท)			
กรณีที่ 1 ไม่มีการเติมสารหล่อเย็น	3,185.04	3,185.04	-
กรณีที่ 2 มีการเติมสารหล่อเย็นเป็นระยะ	3,185.04	836.91	-

จากตารางที่ 9.3 จะเห็นว่าถึงแม้การตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นจะมีการสูญเสียสารหล่อเย็นไปกับอากาศ แต่เมื่อนำอายุการใช้งานของสารหล่อเย็นเข้ามาคิดด้วยแล้ว จะเห็นว่า ในกรณีที่ 1 ไม่มีการเติมสารหล่อเย็นขณะทำงานเลย ซึ่งจะทำให้สารหล่อเย็นของแบบละอองที่ใช้ไม่หมดต้องถูกเปลี่ยนทิ้งทั้งหมดเหมือนแบบเปียก ดังนั้นต้นทุนสารหล่อเย็นของทั้งสองแบบจะเท่ากัน

ในกรณีที่ 2 มีการเติมสารหล่อเย็นแบบละอองเป็นระยะ จะทำให้เมื่อครบ 1,000 ชั่วโมงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนสารหล่อเย็น จึงคิดต้นทุนการใช้สารหล่อเย็นเฉพาะที่ใช้เท่านั้น ดังนั้นต้นทุนสารหล่อเย็นแบบละอองจะต่ำกว่าต้นทุนแบบเปียก

จากการคิดต้นทุนการตัดสามารถสรุปได้ว่า ต้นทุนการตัดของแบบลมเป่า น้อยที่สุด หรือไม่มีต้นทุนในการตัดตามเงื่อนไขที่กำหนด ต้นทุนการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นมีมากกว่าแบบลมเป่า และต้นทุนการตัดแบบเปียกจะเท่ากับแบบละอองในกรณีที่ 1 และจะมากที่สุด ในกรณีที่ 2



รูปที่ 9.1 ต้นทุนในการตัดแบบต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] ปิยะ ศิริธรรมปิติ, 2550. การศึกษาพารามิเตอร์ของกระบวนการกลึงเหล็กกล้าคาร์บอนบนเครื่องกลึงซีเอ็นซีโดยการประยุกต์ใช้วิธีปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [2] รศ.ดร. ปารเมศ ชูติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, 2545
- [3] รศ.ดร.ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และรศ.ดร. พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์: การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป.
- [4] Tangjitsitcharoen, S. and Rungruang, C., Effect of various strategies on cutting performance for ball end milling, 2nd Asia Pacific Conference on Manufacturing Systems, II-11-7, 2009
- [5] Tangjitsitcharoen, S., Monitoring of dry cutting and applications of cutting fluid, Journal of Engineering Tribology, Vol.224 NoJ2, pp.209-219, 2010
- [6] Tangjitsitcharoen, S., Rungruang, C. and Laiaddee, D., Cutting and applications of cutting fluid for ball end milling, 10th Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference, 108-115, 2009.
- [7] Mikell P.Groover, Fundamental of Modern Manufacturing, 3rd ed., USA; John Wiley&Sons, 2007.
- [8] Juneja, L, and Sekhon, G. S., Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools, Indian Institute of Technology, India: Delhi, 2003.
- [9] Phillip Ostwald, and Jairo Munoz, Manufacturing Processes and System, 9th ed., USA: John Wiley&Sons, 2004.
- [10] J. W. Sutherland, V. N. Kukur, N. C. King, An experimental investigation of air quality in wet and dry turning, Annals of the CIRP, 49/1 (2000): 64-61.

- [11] M.Y.Noordin, V.C. Venkatesh, S.Sharif, S.Eltng, A.Abdullah, Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide tools when turning AISI 1045 steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, pp. 46-58, 2004
- [12] Basim A. Khidhir, Selecting of Cutting Parameters from Prediction Model of Cutting Force for Turning Nickel Based Hastelloy C-276 Using Response Surface Methodology, *European Journal of Scientific Research*, Vol. 33 No3, pp.525-535, 2009
- [13] N.H. Elmagrabi, C.H.Che Haron, Jaharah A. Ghani,Gusri.A.I, Yasir,M.S,Yanur.B, Dry Machining of Titanium Alloys and its Impact on the Environment and Tool life, *International Conference on Environmental Research and Technology*, pp.773-777, 2008
- [14] T. Thepsonthi, M. Hamdi, K. Mitsui, Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, pp. 156-162, 2009
- [15] Yusuf Sahin and A.Riza Motorcu, Surface Roughness Prediction Model in Machining of Carbon Steel by PVD Coated Cutting Tools, *American Journal of Applied Sciences* 1(1), pp.12-17, 2004
- [16] Mohamed A. Dabnun, M.S.J. Hashmi, M.A. El-Baradie, Surface roughness prediction model by design of experiments for turning machinable glass-ceramic (Macor), *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 1289-1293, 2005
- [17] Junakarn Wutlerdcharoenwong, Chansit Charernthamanont, Papichaya Tovichit, In-Process Monitoring of Surface Finish of Automotive Parts on CNC Turning, Senior Project, Chulalongkorn University, 2009

[18] [19] http://www.engineeringtoolbox.com/surface-roughness-d_1368.html, เข้าถึงวันที่
9 มีนาคม พ.ศ. 2553

ภาคผนวก

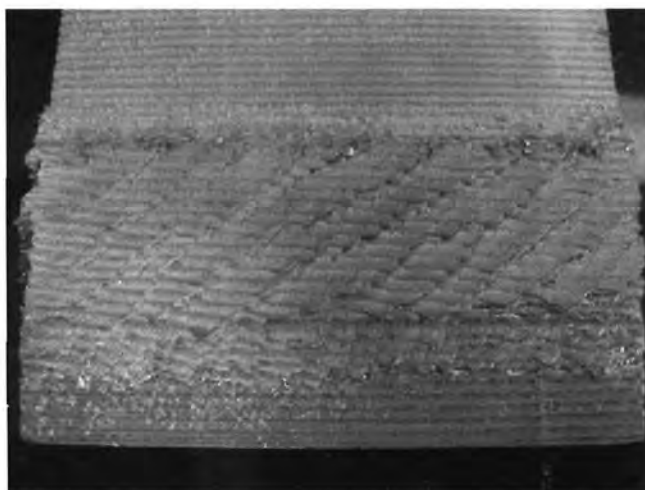
ภาคผนวก ก

Specifications of measuring equipment

Measurement	Model	Uncertainty (%)
Surface Roughness Tester	Surfcom1400D-12	1.57
Particle Sizer	3321	± 10

Measurement	Model	Sensitivity (pC/N)
Force sensor	Fx	-7.922
	Fy	-7.912
	Fz	-3.701

ภาคผนวก ข
ภาพถ่ายผิวชิ้นงาน



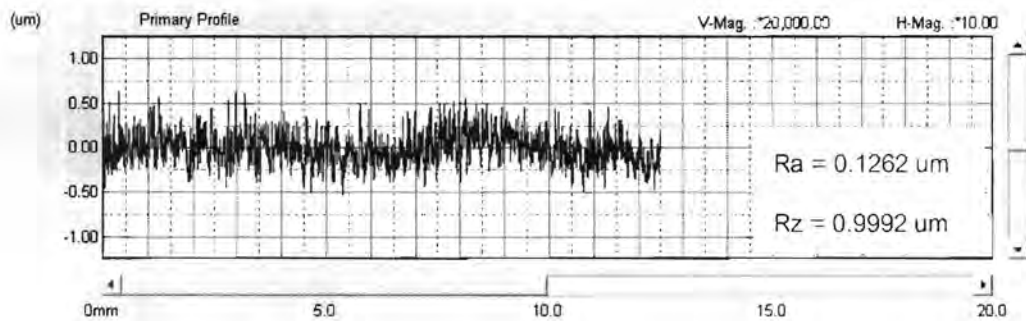
รูปที่ ข1 ผิวของชิ้นงานที่ความเร็วรอบตัดสูงในช่วง 10000 – 12000 รอบต่อนาที

ภาคผนวก ค

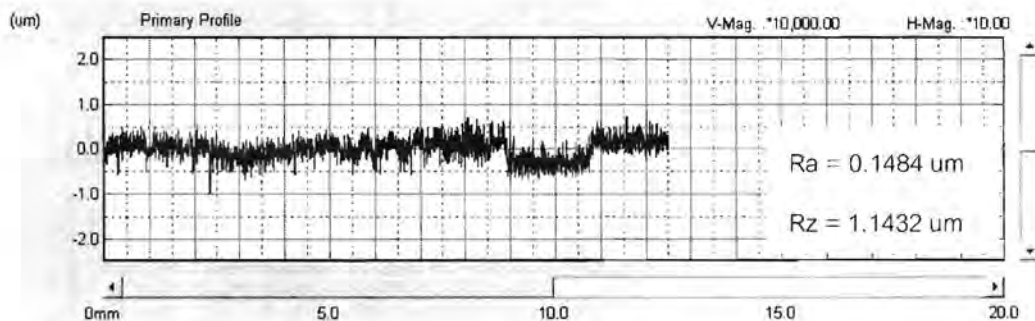
ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัด

ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดที่ความเร็วรอบต่างกันของการตัดแบบเปียก

จากรูปที่ ค1 และ ค2 จะเห็นว่าการตัดที่ความเร็วรอบสูงจะให้ค่าความหยาบผิวมากกว่าการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ



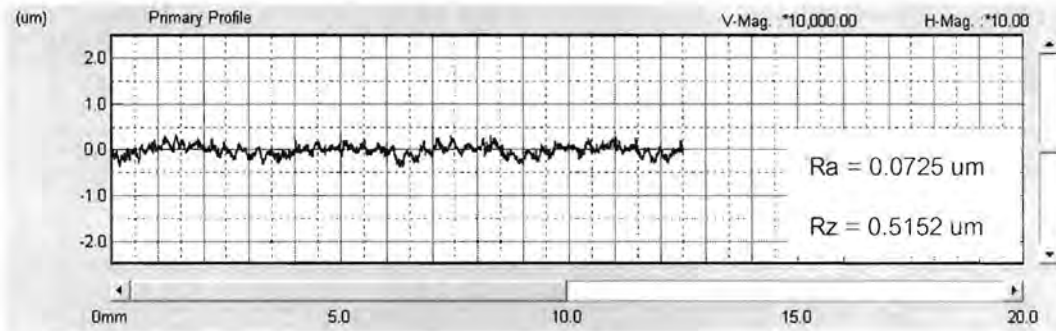
รูปที่ ค1 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก



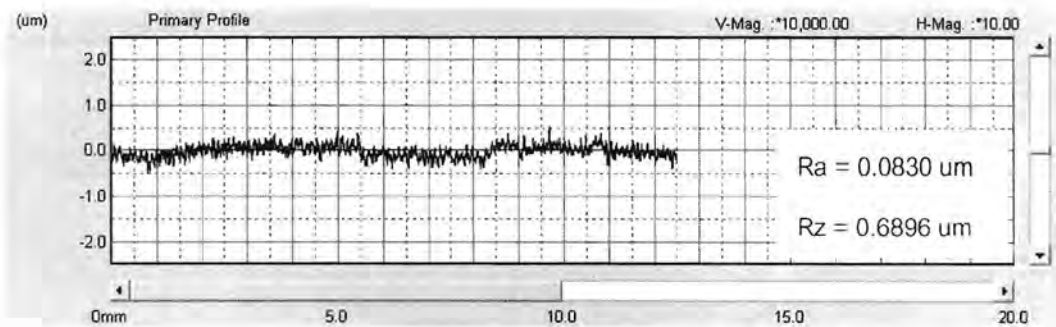
รูปที่ ค2 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก

ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดที่อัตราป้อนต่างกันของการตัดแบบเปียก

จากรูปที่ ค3 และ ค4 จะเห็นว่าการตัดที่อัตราป้อนสูงจะให้ค่าความหยาบผิวน้อยกว่าการตัดที่อัตราป้อนต่ำ



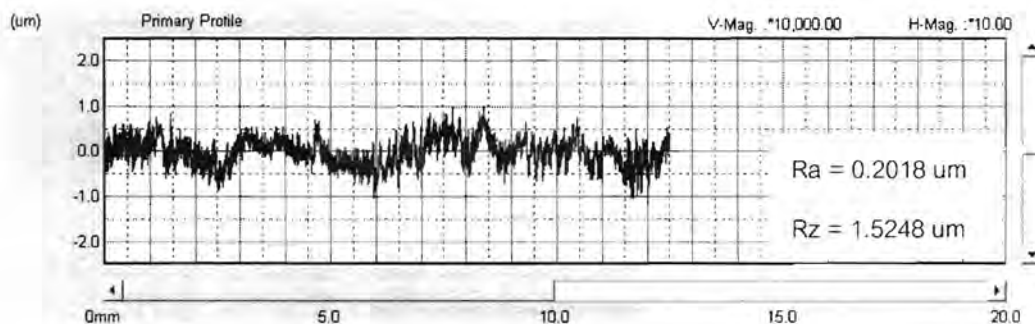
รูปที่ ค3 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก



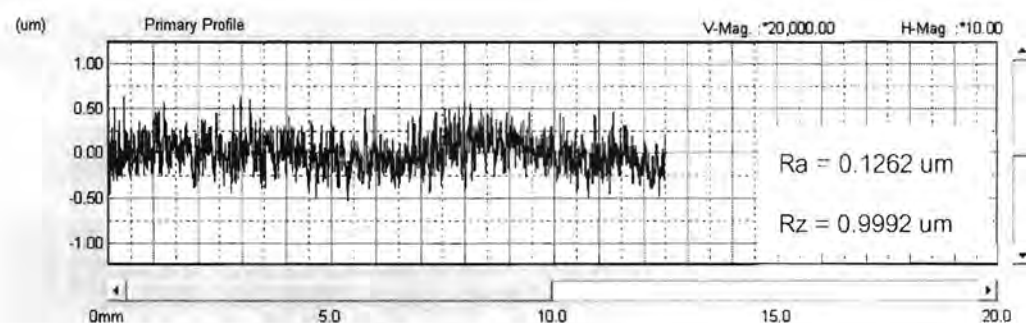
รูปที่ ค4 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก

ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดที่ความลึกตัดต่างกันของการตัดแบบเปียก

จากรูปที่ ค5 และ ค6 จะเห็นว่าการตัดที่ความลึกตัดสูงจะให้ค่าความหยาบผิวน้อยกว่าการตัดที่ความลึกตัดต่ำ



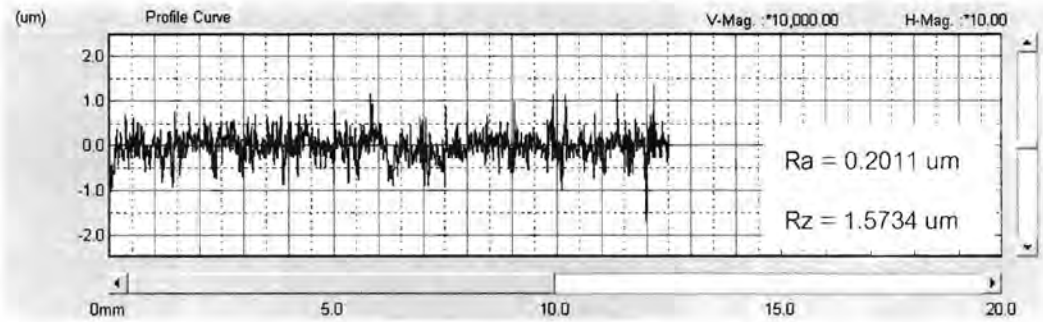
รูปที่ ค5 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก



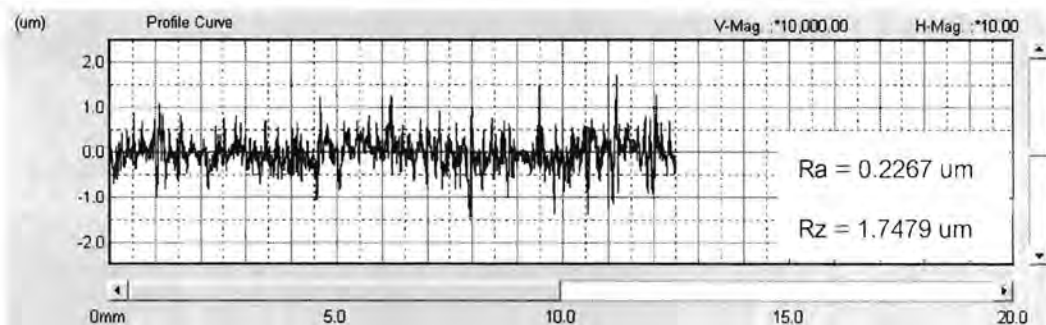
รูปที่ ค6 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก

ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดที่ความเร็วรอบต่างกันของการตัดแบบลมเป่า

จากรูปที่ ค7 และ ค8 จะเห็นว่าการตัดที่ความเร็วรอบสูงจะให้ค่าความหยาบผิวมากกว่าการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ



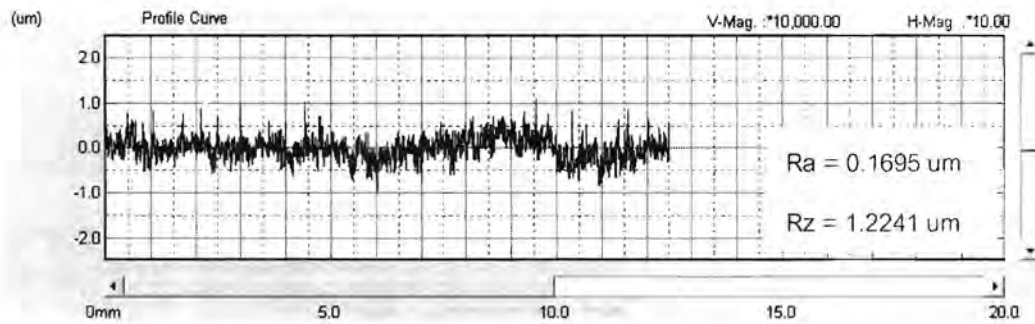
รูปที่ ค7 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า



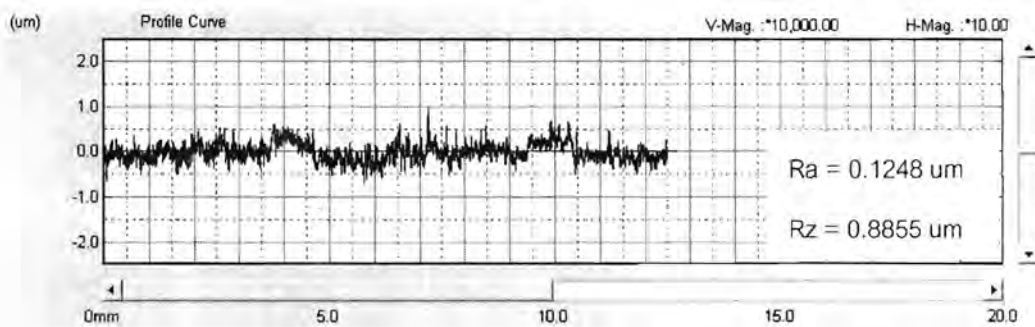
รูปที่ ค8 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า

ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดที่อัตราป้อนต่างกันของการตัดแบบลมนเป่า

จากรูปที่ ค9 และ ค10 จะเห็นว่าการตัดที่อัตราป้อนสูงจะให้ค่าความหยาบผิวน้อยกว่าการตัดที่อัตราป้อนต่ำ



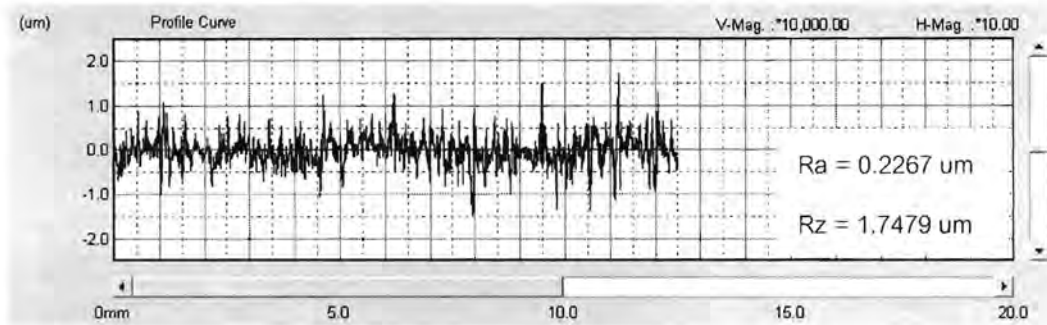
รูปที่ ค9 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมนเป่า



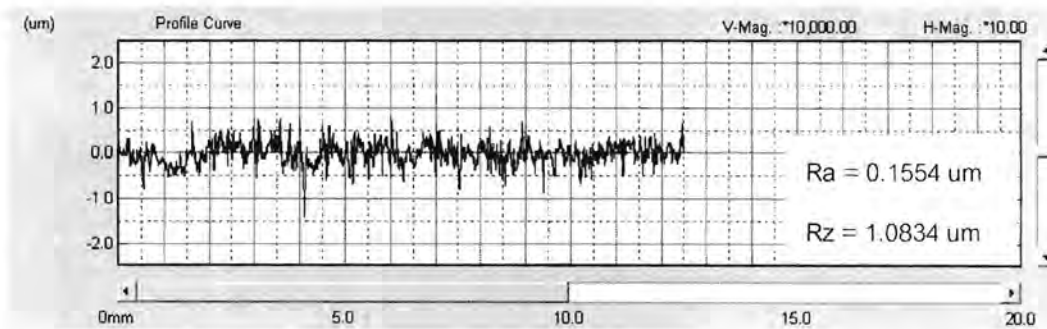
รูปที่ ค10 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมนเป่า

ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดที่ความลึกตัดต่างกันของการตัดแบบลมเป่า

จากรูปที่ ค11 และ ค12 จะเห็นว่าการตัดที่ความลึกตัดสูงจะให้ค่าความหยาบผิวน้อยกว่าการตัดที่ความลึกตัดต่ำ



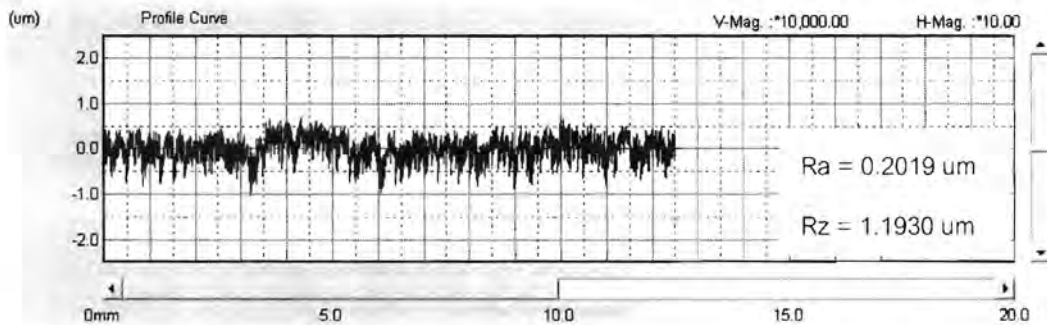
รูปที่ ค11 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า



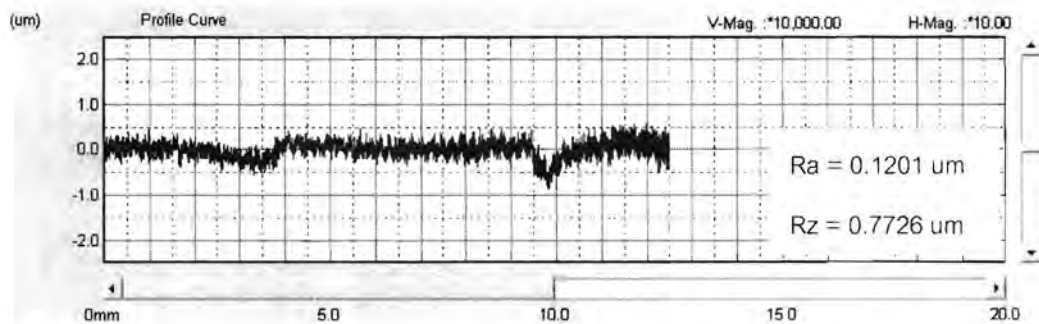
รูปที่ ค12 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า

ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดที่ความเร็วรอบต่างกันของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

จากรูปที่ ค13 และ ค14 จะเห็นว่าการตัดที่ความเร็วรอบสูงจะให้ค่าความหยาบผิวมากกว่าการตัดที่ความเร็วรอบต่ำ



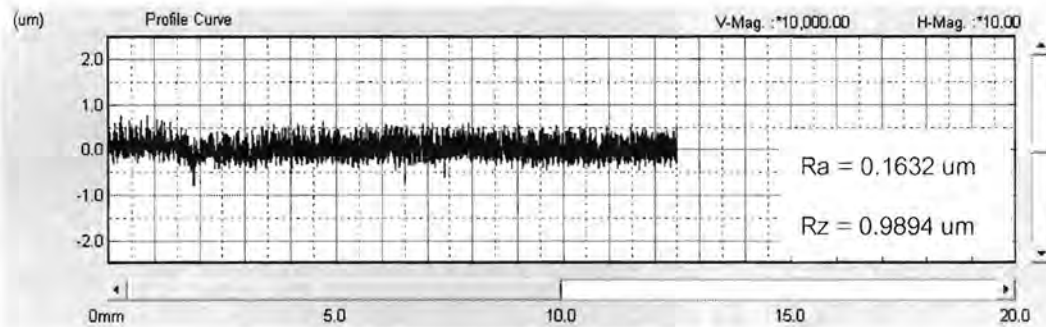
รูปที่ ค13 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น



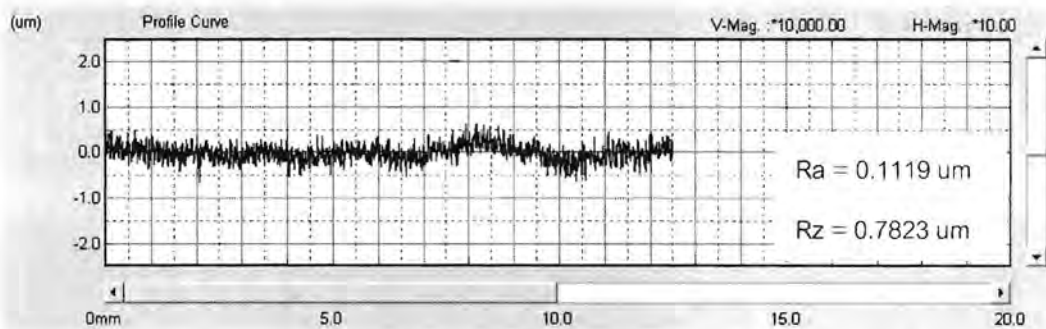
รูปที่ ค14 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดที่อัตราป้อนต่างกันของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

จากรูปที่ ค15 และ ค16 จะเห็นว่าการตัดที่อัตราป้อนสูงจะให้ค่าความหยาบผิวน้อยกว่าการตัดที่อัตราป้อนต่ำ



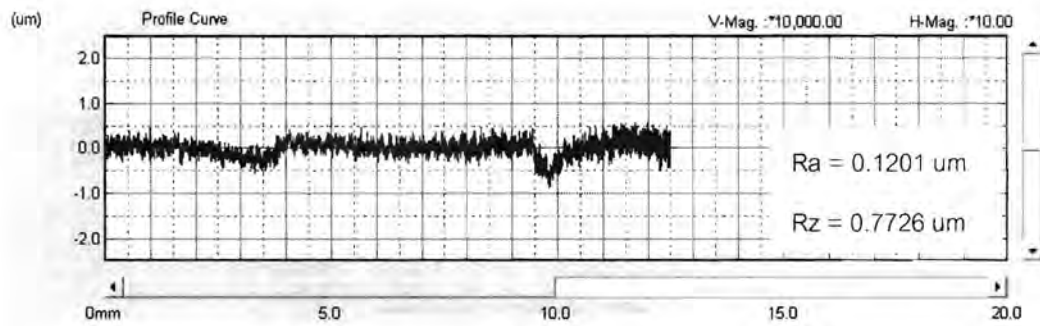
รูปที่ ค15 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น



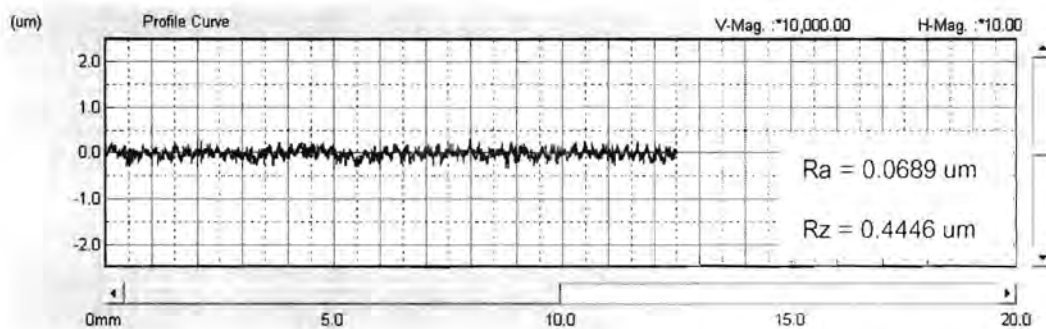
รูปที่ ค16 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 1000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

ค่าความหยาบผิวที่ได้จากการวัดที่ความลึกตัดต่างกันของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

จากรูปที่ ค17 และ ค18 จะเห็นว่า การตัดที่ความลึกตัดสูงจะให้ค่าความหยาบผิวน้อยกว่า การตัดที่ความลึกตัดต่ำ



รูปที่ ค17 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น



รูปที่ ค18 ความหยาบผิวที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละเอียดของสารหล่อเย็น

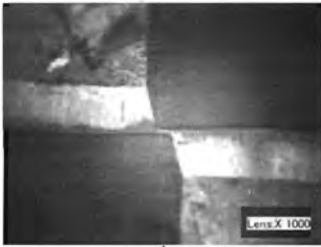
ภาคผนวก ง

รูปการสึกหรอของมิดดัดที่เงื่อนไขการตัดต่างๆ

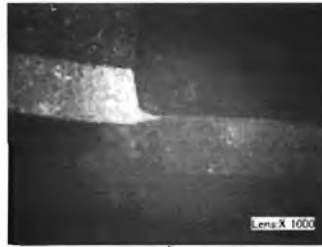
ตารางที่ ง1 เงื่อนไขการตัดต่างๆของการตัดแบบเปียก

รูปที่	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
ง1	1000	0.01	1
ง2	3000	0.01	1
ง3	1000	0.03	1
ง4	3000	0.03	1
ง5	1000	0.02	0.5
ง6	3000	0.02	0.5
ง7	1000	0.02	1.5
ง8	3000	0.02	1.5
ง9	2000	0.01	0.5
ง10	2000	0.03	0.5
ง11	2000	0.01	1.5
ง12	2000	0.03	1.5
ง13	2000	0.02	1

จากรูปที่ ง1 ถึง ง13 จะเห็นว่ามิตมีความสึกน้อยมากจึงส่งผลให้ค่าความหยาบผิวที่เวลาต่าง ๆ อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน



รูปที่ ง1



รูปที่ ง2



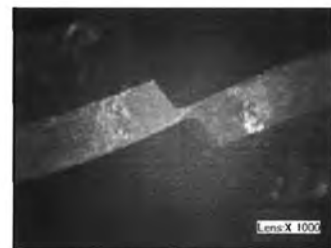
รูปที่ ง3



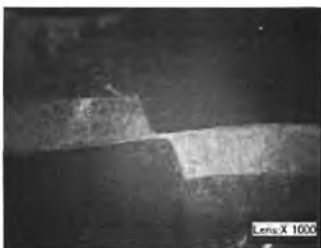
รูปที่ ง4



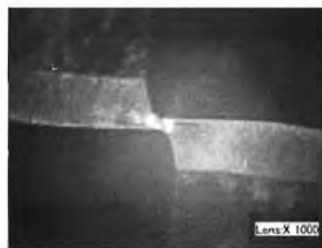
รูปที่ ง5



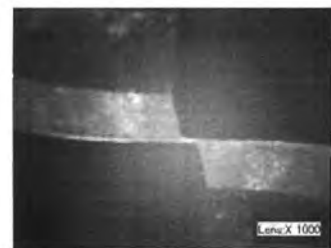
รูปที่ ง6



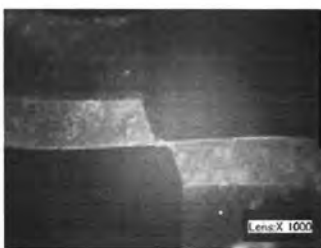
รูปที่ ง7



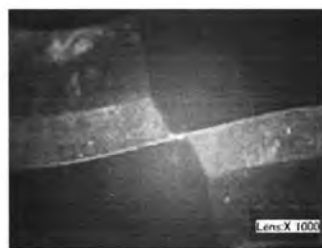
รูปที่ ง8



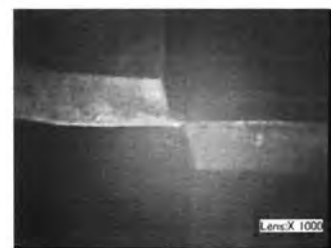
รูปที่ ง9



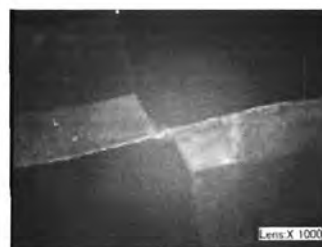
รูปที่ ง10



รูปที่ ง11



รูปที่ ง12



รูปที่ ง13

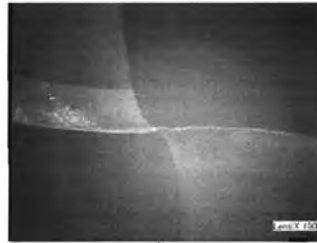
ตารางที่ ง2 เงื่อนไขการตัดต่าง ๆของการตัดแบบลมเป่า

รูปที่	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
ง14	1000	0.01	1
ง15	3000	0.01	1
ง16	1000	0.03	1
ง17	3000	0.03	1
ง18	1000	0.02	0.5
ง19	3000	0.02	0.5
ง20	1000	0.02	1.5
ง21	3000	0.02	1.5
ง22	2000	0.01	0.5
ง23	2000	0.03	0.5
ง24	2000	0.01	1.5
ง25	2000	0.03	1.5
ง26	2000	0.02	1

จากรูปที่ ง14 ถึง ง26 จะเห็นว่ามิติมีความสึกน้้อยมากจึงส่งผลให้ค่าความหยาบผิวที่เวลาต่าง ๆ อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน



รูปที่ ง14



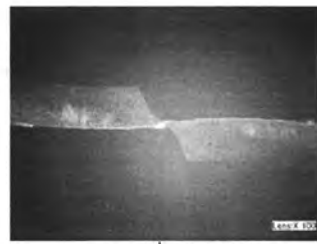
รูปที่ ง15



รูปที่ ง16



รูปที่ ง17



รูปที่ ง18



รูปที่ ง19



รูปที่ ง20



รูปที่ ง21



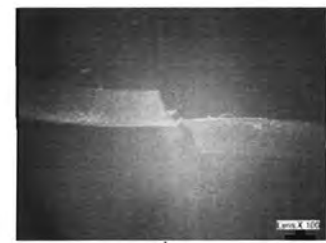
รูปที่ ง22



รูปที่ ง23



รูปที่ ง24



รูปที่ ง25

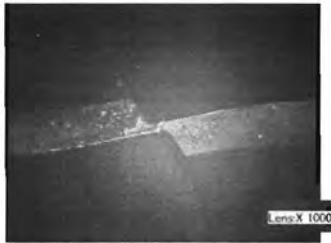


รูปที่ ง26

ตารางที่ ง3 เงื่อนไขการตัดต่าง ๆของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น

รูปที่	ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	อัตราป้อน (มิลลิเมตรต่อรอบ)	ความลึกตัด (มิลลิเมตร)
ง27	1000	0.01	1
ง28	3000	0.01	1
ง29	1000	0.03	1
ง30	3000	0.03	1
ง31	1000	0.02	0.5
ง32	3000	0.02	0.5
ง33	1000	0.02	1.5
ง34	3000	0.02	1.5
ง35	2000	0.01	0.5
ง36	2000	0.03	0.5
ง37	2000	0.01	1.5
ง38	2000	0.03	1.5
ง39	2000	0.02	1

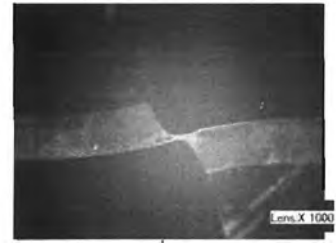
จากรูปที่ ง27 ถึง ง39 จะเห็นว่ามิติมีความสึกน้่อยมากจึงส่งผลให้ค่าความหยาบผิวที่เวลาต่าง ๆ อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน



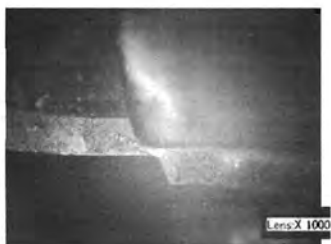
รูปที่ ง27



รูปที่ ง28



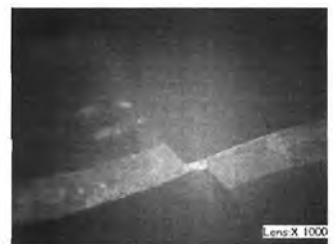
รูปที่ ง29



รูปที่ ง30



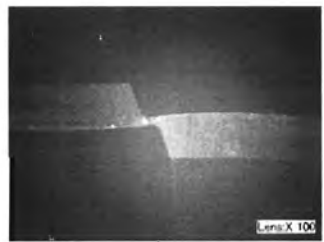
รูปที่ ง31



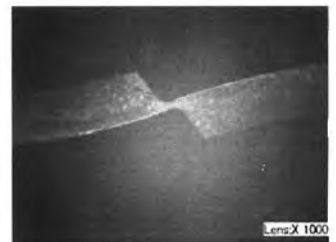
รูปที่ ง32



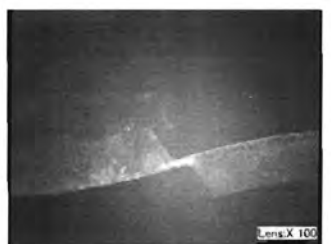
รูปที่ ง33



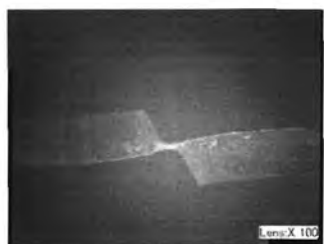
รูปที่ ง34



รูปที่ ง35



รูปที่ ง36



รูปที่ ง37



รูปที่ ง38



รูปที่ ง39

ภาคผนวก จ

การออกแบบการทดลอง [10], [11]

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในกระบวนการหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้สามารถสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or responses)

ตัวแปรที่นำเข้า (Input variables) สามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่มคือ ตัวแปรที่ควบคุมได้ หรือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controlled variables or factors) หรือตัวแปรที่สามารถออกแบบได้ (Design variables) และตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปรที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or noise variables)

ประเภทของการทดลอง (Types of experiment) [11]

ในการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภทหลักตามข้อมูลที่ทราบและวัตถุประสงค์ของการทดลอง ดังนี้

1) การทดลองเดี่ยวหรือการทดลองเพียงครั้งเดียว (Single experiment)

คือ การทดลองที่ผู้ทดลองทราบถึงปัจจัยที่มีความสำคัญในกระบวนการเบื้องต้นเป็นอย่างดี แต่ต้องการทราบและชี้บ่งถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

2) การทดลองอย่างต่อเนื่อง (Continuous experiment)

คือ การทำการทดลองเพื่อที่จะลดค่าเปลี่ยนแปลง (Variation) ในกระบวนการ โดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงกระบวนการอย่างชัดเจน แต่ผู้ทดลองไม่มีความรู้ในกระบวนการหรือระบบที่ต้องปรับปรุงมาก แต่ทราบว่ายังไม่ได้มาตรฐาน

3) การทดลองแบบคัดทิ้ง (Screening experiment)

คือ การทดลองที่ทำขึ้นสำหรับศึกษาระบบหรือกระบวนการใหม่ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน และผู้ทดลองมีความเข้าใจในกระบวนการน้อย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ พยายามปรับลดรายละเอียดของตัวแปรหรือปัจจัยในกระบวนการ หรือเพื่อได้ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในกระบวนการต่อไป

4) การทดลองแบบเจาะจง (Focusing experiment)

คือ การทดลองที่ทำขึ้นโดยมีเป้าหมายกำหนดจากความต้องการในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น โดยการกำหนดค่าที่เหมาะสมกับปัจจัยที่เลือกนั้นๆ

5) การทดลองเชิงลำดับ (Sequential experiment)

คือ การทดลองที่สร้างขึ้นเนื่องจากกระบวนการที่สนใจศึกษาสามารถแบ่งเป็นขั้นตอน หรือกระบวนการย่อย ๆ เป็นจำนวนมาก ทำให้มีปัจจัยที่ศึกษาในภาพรวมในแต่ละขั้นตอนมาก จึงจำเป็นต้องแบ่งกระบวนการออกเป็นส่วน ๆ และทำการทดลองกำหนดปัจจัย จากนั้นจึงนำมารวมเป็นข้อกำหนดของกระบวนการในภาพรวมเพื่อให้สามารถทำการศึกษากิจกรรมหรือระบบที่มีขนาดใหญ่มากได้

การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis testing) [11]

เนื่องจากการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์โดยการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นไม่มีหลักฐานการทดสอบทางสถิติที่ชัดเจนสนับสนุนการสรุปผล การวิเคราะห์ผลจากข้อมูลตัวอย่างทำได้แค่เพียงการประมาณค่าแบบจุด (Point estimation) เท่านั้น ซึ่งค่าสถิติที่ประมาณได้เป็นตัวแปรสุ่มที่มีความแปรปรวน และมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวอย่างที่สุ่มได้ ดังนั้นการทดสอบสมมติฐานถือเป็นทางเลือกหนึ่งในการสรุปข้อมูลเชิงคุณภาพ (Quality characteristic) ของระบบ แบ่งได้เป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 สุ่มตัวอย่าง 1 ชุด (One sample): มีวัตถุประสงค์เพื่อสรุปค่าบางชี้ตำแหน่งของกระบวนการ (Mean, μ) และค่าที่บอกการกระจาย (Variance, σ) เพื่อทราบถึงสภาพปัจจุบันหรือเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนด (Specification)

กรณีที่ 2 สุ่มตัวอย่าง 2 ชุด (Two samples): มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้มาจากสองแหล่งที่ต่างกัน หรือเงื่อนไขที่ต่างกัน ว่ามีลักษณะเหมือนหรือต่างกัน โดยทั่วไปจะทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์หลัก คือ ผลต่างของค่าเฉลี่ย ($\mu_1 - \mu_2 = 0$) และอัตราส่วนของความแปรปรวน ($\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 0$)

ขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน [11] แบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนหลัก คือ

- 1) ตั้งสมมติฐาน คือ การระบุข้อความที่ต้องการพิสูจน์เกี่ยวกับระบบ หรือประชากร โดยทั่วไปจะกำหนด H_1 ก่อนและส่วนกลับของข้อความใน H_1 จะถูกระบุใน H_0

H_1 คือ ข้อความที่ต้องการพิสูจน์ว่าจริง (Prove)

H_0 คือ ข้อความที่เป็นบทกลับของ H_1 (Disprove)

- 2) กำหนดระดับทดสอบหรือระดับนัยสำคัญ (Significance level, α)

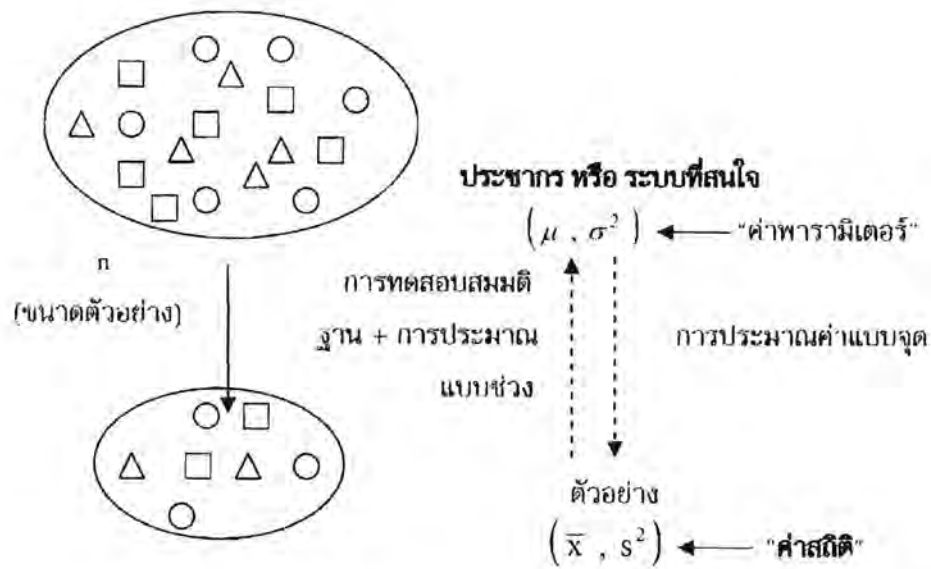
โดยทั่วไปค่าที่นิยมใช้ คือ 5% หรือ $\alpha = 0.05$ แต่ความเป็นจริงแล้วค่า α ที่ใช้สามารถใช้ได้ในช่วง 1% ถึง 10% หรือมีระดับความเชื่อมั่นไม่ต่ำกว่า 90%

- 3) ระบุค่าตัวทดสอบทางสถิติหรือการแจกแจงทางสถิติที่ใช้ทดสอบ
ค่าตัวทดสอบทางสถิติแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ
 - 3.1) สนใจทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย แบ่งเป็น 2 กรณี คือ
กรณีทราบค่าความแปรปรวนที่แท้จริง (σ^2) ใช้ทดสอบ Z
กรณีไม่ทราบ σ^2 แต่ทราบค่าความแปรปรวนจากตัวอย่าง (S^2) ใช้ทดสอบ t
 - 3.2) สนใจทดสอบเกี่ยวกับความแปรปรวน แบ่งเป็น 2 กรณี คือ
กรณีศึกษาประชากรเดียว (σ^2) ใช้ตัวทดสอบ χ^2
กรณีศึกษาสองประชากร (σ_1^2 / σ_2^2) ใช้ตัวทดสอบ F
- 4) กำหนดบริเวณวิกฤต หรือบริเวณปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0)
คือ ค่าที่เป็นตัวแบ่งบริเวณปฏิเสธ H_0 และบริเวณปฏิเสธ H_0 ไม่ได้ คือ ค่าวิกฤต (Critical value) ซึ่งได้จากการเปิดตารางของตัวทดสอบนั้นๆ ในปัจจุบันใช้โปรแกรมสำเร็จรูปจะใช้ค่า P-Value เป็นตัวช่วยในการตัดสินใจแทน
 - 5) สรุปผลการทดสอบ
ในปัจจุบันการสรุปผลทำได้ 2 ลักษณะ คือ
 - 5.1) พิจารณาจากค่าที่ได้จากการทดสอบทางสถิติ (3) ว่าอยู่ใน H_0 หรือไม่ จะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่าใน (3) ตกในบริเวณปฏิเสธ H_0
 - 5.2) พิจารณาเทียบพื้นที่โดยใช้ค่า P-Value เทียบกับพื้นที่ของบริเวณปฏิเสธ H_0 แทน จะปฏิเสธ H_0 (α) เมื่อค่า P-Value $< \alpha$ เท่านั้น

การทดสอบสมมติฐานในกรณีต่าง ๆ [11]

ในการทดสอบสมมติฐานสามารถแบ่งได้ 3 กรณีดังนี้

- 1) การทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด (One-sample hypothesis testing) โดยทั่วไปใช้สำหรับการศึกษาลักษณะลักษณะของระบบหรือประชากรเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน โดยมีวิธีดังรูปที่ 2.17



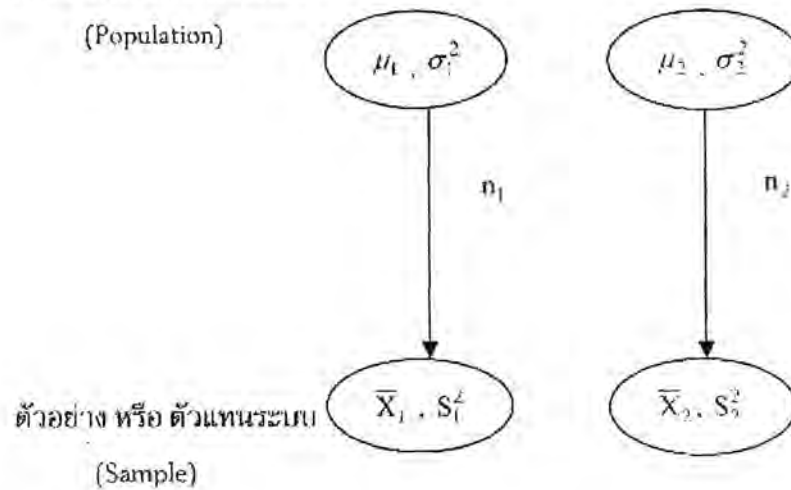
รูปที่ ๑ วิธีการทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด

2) การทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน (Hypothesis testing for two independent samples) คือ ผู้ศึกษาทำการเก็บตัวอย่างโดยไม่คำนึงถึงลำดับข้อมูล ขนาดข้อมูลตัวอย่างมาก แต่ละประชากรจะมีขนาดเท่ากันหรือไม่ก็ได้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้มาจากสองแหล่งที่ต่างกัน หรือเงื่อนไขที่ต่างกัน ว่ามีลักษณะเหมือนหรือต่างกัน โดยทั่วไปจะทำการทดสอบค่าพารามิเตอร์หลัก คือ ผลต่างของค่าเฉลี่ย ($\mu_1 - \mu_2 = 0$) และอัตราส่วนของความแปรปรวน ($\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 0$) ดังรูปที่ 2.18

(Hypothesis Testing for two Independent Samples)

ประชากรหรือระบบที่สนใจ

(Population)



รูปที่ 2 วิธีการทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน

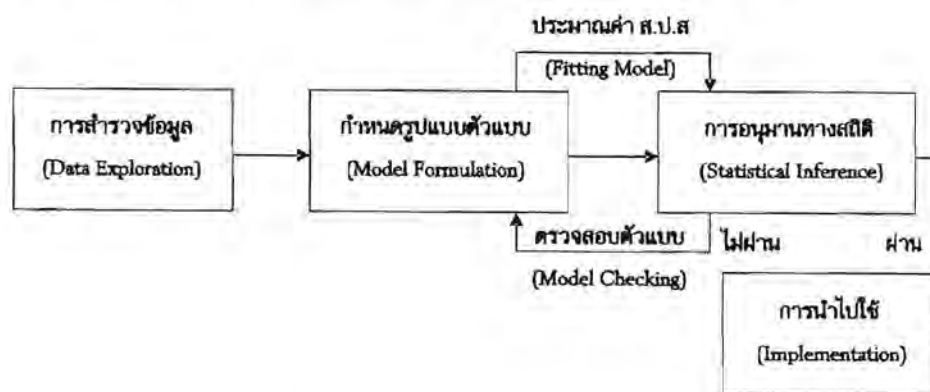
3) การทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน (Hypothesis testing for two dependent samples) ทำได้โดยการเลือกหน่วยตัวอย่างมาเพียง 1 ชุดและทำการวัดซ้ำมากกว่า 1 ครั้ง การวัดครั้งแรก คือ การเก็บข้อมูลตัวอย่างชุดที่หนึ่ง การวัดครั้งที่สอง คือ การเก็บข้อมูลตัวอย่างชุดที่สอง ทำโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความผันแปรที่สามารถควบคุมได้จากความแตกต่างของหน่วยตัวอย่าง เพื่อให้ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ในการเปรียบเทียบ เช่น การเปรียบเทียบระยะเบรคก่อนผู้ขับขี่เต็มสุราและหลังจากที่ผู้ขับขี่เต็มสุรา

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) [11]

การวิเคราะห์สถิติทางวิศวกรรมแบ่งเป็น 3 ระดับคือ การประมาณค่าและการพยากรณ์ (Estimation and prediction) การเปรียบเทียบ (Comparison) และการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) ซึ่งเริ่มจากการสร้างสมการตัวแปรแบบความสัมพันธ์ (Model building) จากนั้นจะใช้วิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดจากสมการ (Model optimization) การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเครื่องมือหนึ่งที่น่าสนใจในระดับแรก และระดับสุดท้าย

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ กับค่าตอบสนองหรือตัวแปรตาม ว่ามีความสัมพันธ์กันลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในการพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวางแผนกระบวนการผลิต ปรับปรุงกระบวนการผลิต

ขอบเขตของการวิเคราะห์การถดถอยนั้นกว้างกว่าการออกแบบแผนการทดลอง อาจกล่าวได้ว่า การออกแบบการทดลองเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์การถดถอย และมักจะใช้ร่วมกันเสมอ โดยเริ่มจากการศึกษาว่าตัวแปรปัจจัยใดที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยการเปรียบเทียบด้วย ANOVA จากนั้นทำการสร้างสมการพยากรณ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง และตัวแปรปัจจัยที่มีผลต่อบัจจัยตอบสนอง เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของกระบวนการนั้น สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ลักษณะตามจำนวนตัวแปรอิสระ คือ การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างหนึ่งตัวแปรต้นและหนึ่งตัวแปรตาม และการวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple regression analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไป และหนึ่งตัวแปรตาม



รูปที่ 3 ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย

การทดสอบข้อสมมติในการวิเคราะห์การถดถอย (Test of assumption in regression) [11]

ข้อสมมติที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์การถดถอยที่สำคัญมี 4 ประการคือ

- 1) ข้อมูลมีการแจกแจงปกติ
- 2) ค่าเฉลี่ยผิดพลาดเท่ากับศูนย์
- 3) ความแปรปรวนคงที่
- 4) ค่าผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน

ในการทดสอบข้อสมมติจะใช้กราฟที่แตกต่างกันดังคือ

- 1) กราฟความน่าจะเป็นเป็นการแจกแจงปกติ (Normal probability plot) ใช้ในการทดสอบข้อข้อที่ 1 ถ้ากราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง ข้อสมมติที่ 1 ผ่าน

- 2) Residual plot ใช้ในการทดสอบข้อสมมติข้อที่ 2 และ 3 โดยพิจารณาว่าค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ (จุดกระจายรอบศูนย์ อย่างสมดุ) และความกว้างของแถบคงที่ (ความแปรปรวนคงที่) และกราฟกระจายอย่างสุ่มแสดงถึงความเป็นอิสระต่อกันของค่าผิดพลาด ตรวจสอบข้อสมมติที่ 4
- 3) Residual plot (ตัวแปรอิสระ) ใช้พิจารณาความเป็นอิสระต่อกัน ถ้ายังมีรูปแบบสัมพันธ์กัน แสดงว่าสมการถดถอยที่ใช้มีรูปแบบไม่เหมาะสม

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple linear regression analysis) [11]

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ คือ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัว หรือปัจจัยตั้งแต่สองตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม หรือค่าตอบสนอง มนทางปฏิบัติ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการประมาณความสัมพันธ์ สามารถเกิดได้หลายกรณี โดยสรุปแบ่งได้เป็น 5 กรณี คือ

- 1) ค่าผิดพลาดจากการวัด (Measurement error or pure error) เกิดจากการคลาดเคลื่อนในการวัดค่า
- 2) ค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการละตัวแปรอิสระ (Omission error) เกิดจากการใส่ตัวแปรในสมการประมาณน้อยกว่าความสัมพันธ์ที่แท้จริง
- 3) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเพิ่มตัวแปรอิสระ (Inclusion error) เกิดในกรณีใส่ตัวแปรอิสระลงในสมการถดถอยมากเกินไปเกินความสัมพันธ์ที่แท้จริง
- 4) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกรูปแบบสมการผิด (Functional form error) เกิดในกรณีที่ผู้ศึกษากำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรตามและตัวแปรอิสระผิดไปจากที่ควรเป็น
- 5) ค่าผิดพลาดที่เกิดจากการเลือกวิธีการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ (Estimation error)

การสร้างสมการถดถอยเชิงพหุ สามารถพิจารณาได้ 3 วิธีคือ

- 1) วิธี Backward elimination เริ่มจากการสร้างสมการเต็มรูปแบบแล้วลดรูปโดยพิจารณาจากค่า P-Value ของตัวแปรอิสระ ที่มีค่า $P\text{-Value} > \alpha$ และมีค่าสูงสุดจะถูกเลือกออกจากสมการจนไม่สามารถลดรูปได้อีก
- 2) วิธี Forward elimination เริ่มจากสมการถดถอยอย่างง่ายและพิจารณาเพิ่มตัวแปรอิสระทีละตัว โดยดูจากค่านัยสำคัญ P-Value ที่น้อยที่สุดเป็นตัวเริ่ม แล้วเพิ่มจนกว่าจะเพิ่มไม่ได้ก็จึงหยุด

- 3) วิธี Stepwise selection เป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป เนื่องจากเป็นหลักการของวิธี Backward elimination และ Forward elimination คู่กัน โดยทุกครั้งที่เลือกตัวแปรอิสระตัวใหม่เข้าในสมการจะทำการพิจารณาว่า ตัวแปรอิสระเดิมในสมการ จะสามารถอยู่ในสมการได้ หรือควรตัดออกไป