ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246357

การพัฒนาความสามารถในการตัดสำหรับกระบวนการกัดอลูมิเนียมอัลลอยโดยการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นน้อยที่สุดเพื่อกระบวนการตัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ไม่รับผิดชอบต่อผลเสียใดๆ **อันอาจเกิดจากการนำความคิดเห็นในเอกสารฉบับนี้ไปใช้** ความคิดเห็น **ที่ปรากฏในเอกสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็น ความคิดเห็นของคณะฯ**

b00250915

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
246357

การพัฒนาความสามารถในการตัดสำหรับกระบวนการกัดอลูมิเนียมอัลลอยโดยการประยุกต์ใช้สารหล่อเย็นน้อยที่สุดเพื่อกระบวนการตัดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมบนเครื่องซีเอ็นซีแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์

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)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

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 ตั้งจิตสิตเจริญ
2. ผศ.อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย
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.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

เดือน/ปี ที่เสร็จ มีนาคม 2554

บทคัดย่อ

246357

ปัจจุบันวัสดุประเภทอลูมิเนียมอัลลอย ได้ถูกนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนสำคัญต่างๆมากมาย โดยเฉพาะชิ้นส่วนประกอบสำหรับรถยนต์ ไม่ว่าจะเป็นตัวถังรถยนต์ชิ้นส่วนประกอบภายในเครื่องยนต์ต่างๆ แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และชิ้นส่วนประกอบฮาร์ดดิสก์ กระบวนการกัดเป็นกระบวนการหนึ่งที่สำคัญในการตัดขึ้นรูปวัสดุ ดังกล่าวให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการ อย่างไรก็ตามการสึกหรอของมีดตัดยังเป็นปัญหาหลักในกระบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน เนื่องจากการสึกหรอของมีดตัดไม่เพียงส่งผลกระทบต่อคุณภาพผิวของชิ้นงานแต่ยังทำให้ขนาดและ รูปร่างของชิ้นงานไม่ได้ตามที่ต้องการซึ่งทำให้เกิดอัตราการผลิตต่ำ เนื่องจากการหยุดเครื่องเพื่อเปลี่ยนมีดตัดใหม่

การใช้สารหล่อเย็น (Cutting fluid) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้เพื่อช่วยให้กระบวนการตัดชิ้นส่วนดังกล่าวดีขึ้น และได้คุณภาพตามที่ต้องการ โดยสารหล่อเย็นจะช่วยลดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในขณะตัดรวมถึงลดอัตราการสึกหรอและ เพิ่มอายุการใช้ งานของมีดตัดได้อีกด้วย

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

246357

ทดลองเพื่อเปรียบเทียบการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุดแบบต่างๆ เพื่อหาสภาวการณ์ตัดที่เหมาะสมสำหรับการตัดอลูมิเนียมอัลลอย

เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูงและเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับกระบวนการตัดขึ้นรูปให้สูงขึ้น ดังนั้นใน การหาสภาวการณ์ตัดที่เหมาะสมของอลูมิเนียมอัลลอยกับการใช้ปริมาณสารหล่อเย็นน้อยที่สุด 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

246357

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

246357

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 การทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box – Behnken design) [11] 27
2.14 ทบทวนวรรณกรรม 27
บทที่ 3 30
การตัดแบบเปียก 30
3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับความเรียบของผิวชิ้นงานของการตัดแบบเปียก 30
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการตัดกับแรงตัดที่เกิดขึ้นขณะตัดในแกนต่าง ๆ ของการตัดแบบเปียก 33
3.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของแรงในการตัดของการตัดแบบเปียก 36
3.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนและพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวของการตัดแบบเปียก46
3.5 สรุปสมการความสัมพันธ์ต่าง ๆ ของการตัดแบบเปียก 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 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความเร็วรอบของการตัดแบบเปียก.... 112
7.2 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับอัตราป้อนตัดของการตัดแบบเปียก.... 113
7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความลึกตัดของการตัดแบบเปียก..... 114
7.4 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความเร็วรอบของการตัดแบบลมเป่า.. 115
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับอัตราป้อนตัดของการตัดแบบลมเป่า.. 116
7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความลึกตัดของการตัดแบบลมเป่า.... 117
7.7 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความเร็วรอบของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 118
7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับอัตราป้อนตัดของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 119
7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของเศษโลหะกับความลึกตัดของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 120
บทที่ 8 121
การตรวจวัดสารปนเปื้อนของสารหล่อเย็นในอากาศที่เกิดจากกระบวนการตัด..... 121
8.1 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบต่างกัน..... 121
8.2 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่อัตราป้อนตัดต่างกัน 122
8.3 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัดต่างกัน..... 122
8.4 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่ความเร็วรอบต่างกัน ... 123
8.5 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่อัตราป้อนตัดต่างกัน ... 124
8.6 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่ความลึกตัดต่างกัน 125
8.7 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบต่างกัน 126
8.8 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็นที่อัตราป้อนตัดต่างกัน..... 127
8.9 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบลมเป่าที่ความลึกตัดต่างกัน 128

8.10 การเปรียบเทียบอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบต่างๆ 129

บทที่ 9 131

ต้นทุน 131

9.1 การคำนวณต้นทุนในกระบวนการกัด 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 สรุปเงื่อนไขสำหรับการทดลอง 3

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการชำรุดของมีดตัด 17

ตารางที่ 2.2 กลไกการสึกหรอของมีดตัด 18

ตารางที่ 3.1 การออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคนของความหยาบผิวและแรงในการตัดแบบเปียก 37

ตารางที่ 3.2 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X ก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเปียก 38

ตารางที่ 3.3 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบเปียก 39

ตารางที่ 3.4 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X หลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบเปียก 40

ตารางที่ 3.5 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบเปียก 40

ตารางที่ 3.6 การออกแบบการทดลองต่อความหยาบผิวของการตัดแบบเปียก 46

ตารางที่ 3.7 ความแปรปรวนของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเปียก 47

ตารางที่ 3.8 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเปียก 47

ตารางที่ 3.9 ความแปรปรวนของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเปียก 48

ตารางที่ 3.10 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบเปียก 48

ตารางที่ 3.11 ค่าเป้าหมายและขอบบนเพื่อใช้พิจารณาค่าต่ำสุดในพื้นผิวผลตอบ ของการตัดแบบเปียก 54

ตารางที่ 4.1 การออกแบบการทดลองความขรุขระผิวและแรงในการตัดแบบลมเป่า 63

ตารางที่ 4.2 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X ก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมเป่า 64

ตารางที่ 4.3 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบลมเป่า 64

ตารางที่ 4.4 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X หลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบลมเป่า 65

ตารางที่ 4.5 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบลมเป่า 65

ตารางที่ 4.6 การออกแบบการทดลองต่อความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่า 70

ตารางที่ 4.7 ความแปรปรวนของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมเป่า 71

ตารางที่ 4.8 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมเป่า 71

ตารางที่ 4.9 ความแปรปรวนของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมเป่า 72

ตารางที่ 4.10 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบลมเป่า 72

ตารางที่ 4.11 ค่าเป้าหมายและขอบบนเพื่อใช้พิจารณาค่าต่ำสุดในพื้นผิวผลตอบของการตัดแบบลมเป่า 77

ตารางที่ 5.1 การออกแบบการทดลองความหยาบผิวและแรงในการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 85

ตารางที่ 5.2 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X ก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 86

ตารางที่ 5.3 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 86

ตารางที่ 5.4 ความแปรปรวนของแรงในแนวแกน X หลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 87

ตารางที่ 5.5 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 87

ตารางที่ 5.6 การออกแบบการทดลองต่อความหยาบผิวของการกัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 93

ตารางที่ 5.7 ความแปรปรวนของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 94

ตารางที่ 5.8 สมการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวก่อนการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 94

ตารางที่ 5.9 ความแปรปรวนของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 95

ตารางที่ 5.10 สมการการถดถอยของพื้นผิวผลตอบของความหยาบผิวหลังการตัดพจน์ที่ไม่ผ่านความเชื่อมั่นของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 95

ตารางที่ 5.11 ค่าเป้าหมายและขอบบนเพื่อใช้พิจารณาค่าต่ำสุดในพื้นผิวผลตอบ ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 101

ตารางที่ 6.1 สมการความสัมพันธ์ของการตัดแบบต่าง ๆ..... 110

ตารางที่ 6.2 ค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ค่าความเรียบผิวเกิดต่ำที่สุดของการตัดแบบต่าง ๆ. 110

ตารางที่ 6.3 ค่าของปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลให้ค่าความเรียบผิวเกิดต่ำที่สุดร่วมกับแรงที่เกิดขึ้นของการตัดแบบต่าง ๆ 111

ตารางที่ 9.1 การใช้สารหล่อเย็นสำหรับวิธีการตัดแบบเปียก แบบละออง และแบบลมเป่า..... 131

ตารางที่ 9.2. การเปรียบเทียบปริมาณการใช้สารหล่อเย็นของการตัดแบบต่างๆ 132

ตารางที่ 9.3 เปรียบเทียบราคาต้นทุนสารหล่อเย็นของการตัดแบบต่างๆ 133

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 แสดงการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์สำหรับการวัดและวิเคราะห์แรงตัด 5

รูปที่ 1.2 แสดงการติดตั้งไดนาโมมิเตอร์บนเครื่องซีเอ็นซีแมชีนนิ่งเซ็นเตอร์และการติดตั้งเครื่องวัดอนุภาค 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 การออกแบบบออกแบบบอกซ์-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 ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ 31

รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 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 อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก ... 35

รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบเปียก ... 36

รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 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 ของการตัดแบบเปียก42

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) ของการตัดแบบเปียก 44

รูปที่ 3.20 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบเปียก 45

รูปที่ 3.21 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ยของการตัดแบบเปียก 49

รูปที่ 3.22 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ยของการตัดแบบเปียก 50

รูปที่ 3.23 การกระจายตัวของข้อมูลความหยาบผิวเฉลี่ยที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบเปียก 50

รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลอง ของการตัดแบบเปียก . 51

รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบเปียก..... 51

รูปที่ 3.26 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบเปียก..... 52

รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบเปียก..... 52

รูปที่ 3.28 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบเปียก 53

รูปที่ 3.29 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อพิจารณา ความหยาบผิวเฉลี่ยและตัวแปรต้น ของการตัดแบบเปียก..... 53

รูปที่ 3.30 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบของการตัดแบบเปียก 54

รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความลึก 1 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ..... 55

รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความลึก 0.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่ความเร็วรอบต่าง ๆ..... 56

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ 57

รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบเปียกที่ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาทีที่อัตราป้อนต่าง ๆ 57

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบลมเป่าที่ความเร็วรอบ 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 อัตราป้อน 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า .. 61

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ และความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร ของการตัดแบบลมเป่า .. 61

รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นในสามแกนสำหรับความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 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 ของการตัดแบบลมเป่า67

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) ของการตัดแบบลมเป่า 69

รูปที่ 4.19 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ยของการตัดแบบลมเป่า 73

รูปที่ 4.20 ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิวเฉลี่ยของการตัดแบบลมเป่า 74

รูปที่ 4.21 การกระจายตัวของข้อมูลความหยาบผิวเฉลี่ยที่เป็นอิสระต่อกันของการตัดแบบลมเป่า74

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของการตัดแบบลมเป่า 75

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบลมเป่า 75

รูปที่ 4.24 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบลมเป่า 76

รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์หาค่าจุดต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อพิจารณา ความหยาบผิวเฉลี่ยและตัวแปรต้นของการตัดแบบลมเป่า 76

รูปที่ 4.26 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบของการตัดแบบลมเป่า 77

รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 78

รูปที่ 5.2 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตร อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ที่ความเร็วรอบต่าง ๆ 79

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1.0 มิลลิเมตร ที่อัตราป้อนต่าง ๆ 79

รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบความหยาบผิวของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบ 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 ของการตัดแบบละออง ของสารหล่อเย็น..... 89

รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลองของข้อมูลแรงแนวแกน X (FX) ที่เป็นอิสระต่อกัน ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 90

รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความเร็วรอบ (S) ของ การตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 90

รูปที่ 5.18 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 91

รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของ การตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 91

รูปที่ 5.20 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของแรงตัดแกน X (FX) กับอัตราป้อน (F) และความลึกตัด (D) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 92

รูปที่ 5.21 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิว เฉลี่ยของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 96

รูปที่ 5.22 ความน่าจะเป็นของค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ สำหรับความหยาบผิว เฉลี่ยของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 97

รูปที่ 5.23 การกระจายตัวของข้อมูลความหยาบผิวเฉลี่ยที่เป็นอิสระต่อกัน ของการกัดแบบละออง ของสารหล่อเย็น..... 97

รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดและลำดับของการทดลอง ของการตัดแบบละออง ของสารหล่อเย็น..... 98

รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 98

รูปที่ 5.26 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และความเร็วรอบ (S) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 99

รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบละอองสารหล่อเย็น..... 99

รูปที่ 5.28 กราฟคอนทัวร์แสดงระดับของความหยาบผิวเฉลี่ยกับความลึกตัด (D) และอัตราป้อน (F) ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 100

รูปที่ 5.29 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบ เมื่อพิจารณา ความหยาบผิวเฉลี่ยและตัวแปรต้น ของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 100

รูปที่ 5.30 การวิเคราะห์หาค่าต่ำสุดจากพื้นผิวผลตอบของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 101

รูปที่ 6.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และความเร็วรอบ 1,000 และ 3,000 รอบต่อนาที ของอัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลเมตรที่เวลา 60 นาที ของการตัดแบบต่าง ๆ 102

รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และความเร็วรอบ 1,000 และ 3,000 รอบต่อนาที ของอัตราป้อนตัด 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลเมตรที่เวลา 120 นาที ของการตัดแบบต่าง ๆ 102

รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และอัตราป้อน 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ของความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 60 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ 103

รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และอัตราป้อน 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ของความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ 103

รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรของความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรที่เวลา 60 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ 104

รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหยาบผิว และความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรของความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ 105

รูปที่ 6.7 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกนต่างๆ ของการตัดที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตร ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาที 106

รูปที่ 6.8 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกนต่างๆ ของการตัดที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตร ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาที 106

รูปที่ 6.9 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกน X (FX) ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบต่าง ๆ ในเวลาต่าง ๆ 107

รูปที่ 6.10 แรงที่ใช้ในการตัดในแนวแกน X (FX) ที่เกิดขึ้นที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบต่าง ๆ ในเวลาต่าง ๆ 107

รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ในการตัดแนวแกน X (FX) และความเร็วรอบ 1,000 และ 3,000 รอบต่อนาทีของอัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ 108

รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ในการตัดแนวแกน X (FX) และอัตราป้อน 0.01 และ 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบของความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ 108

รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรงที่ใช้ในการตัดแนวแกน X (FX) และความลึกตัด 0.5 และ 1.5 มิลลิเมตรของความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อน 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบที่เวลา 120 นาทีของการตัดแบบต่าง ๆ 109

รูปที่ 7.1 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 112

รูปที่ 7.2 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 112

รูปที่ 7.3 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 112

รูปที่ 7.4 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 112

รูปที่ 7.5 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 113

รูปที่ 7.6 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 113

รูปที่ 7.7 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 113

รูปที่ 7.8 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 113

รูปที่ 7.9 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 114

รูปที่ 7.10 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 114

รูปที่ 7.11 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 114

รูปที่ 7.12 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 114

รูปที่ 7.13 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า 115

รูปที่ 7.14 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า 115

รูปที่ 7.15 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 115

รูปที่ 7.16 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 115

รูปที่ 7.17 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า 116

รูปที่ 7.18 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า 116

รูปที่ 7.19 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 116

รูปที่ 7.20 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 116

รูปที่ 7.21 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า 117

รูปที่ 7.22 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า 117

รูปที่ 7.23 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 117

รูปที่ 7.24 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 117

รูปที่ 7.25 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 118

รูปที่ 7.26 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 118

รูปที่ 7.27 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 118

รูปที่ 7.28 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 118

รูปที่ 7.29 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 119

รูปที่ 7.30 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 119

รูปที่ 7.31 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 119

รูปที่ 7.32 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 119

รูปที่ 7.33 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 120

รูปที่ 7.34 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น 120

รูปที่ 7.35 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 120

รูปที่ 7.36 ลักษณะเศษโลหะที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 120

รูปที่ 8.1 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก121

รูปที่ 8.2 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก121

รูปที่ 8.3 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 122

รูปที่ 8.4 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก 122

รูปที่ 8.5 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก123

รูปที่ 8.6 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบเปียก123

รูปที่ 8.7 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า124

รูปที่ 8.8 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า124

รูปที่ 8.9 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า125

รูปที่ 8.10 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า125

รูปที่ 8.11 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า126

รูปที่ 8.12 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบลมเป่า126

รูปที่ 8.13 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 127

รูปที่ 8.14 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.02 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 127

รูปที่ 8.15 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.03 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 128

รูปที่ 8.16 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 128

รูปที่ 8.17 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 1.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 129

รูปที่ 8.18 ผลการวัดอนุภาคสารปนเปื้อนจากการตัดแบบเปียกที่ความเร็วรอบ 2,000 รอบต่อนาที อัตราป้อนตัด 0.01 มิลลิเมตรต่อรอบ ความลึกตัด 0.5 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 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 มิลลิเมตรของการตัดแบบละอองของสารหล่อเย็น..... 130

รูปที่ 9.1 ต้นทุนในการตัดแบบต่างๆ 134

รูปที่ ง1 วิธีการทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างหนึ่งชุด 159

รูปที่ ง2 วิธีการทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน..... 160

รูปที่ ง3 ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย 161