# สารบัญ


หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค
กิตติกรรมประกาศ ง
สารบัญ จ
รายการตาราง ซ
รายการรูปประกอบ ญ

**บทที่**

**1. บทนำ 1**
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.5 ขอบเขตการวิจัย 2
1.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา 3
1.7 ข้อจำกัดของการวิจัย 3
1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ 3

**2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5**
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับอลูมิเนียม 5
2.2 งานกัด 10
2.3 เครื่องจักรที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ 14
2.4 เครื่องมือตัดสำหรับงานกัด 16
2.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัด 16
2.6 ความเรียบของผิวงาน 21
2.7 น้ำมันหล่อเย็น 25
2.8 วัสดุที่ใช้ผลิตเครื่องมือตัด 27

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.9 มีดกัดและความสึกหรอของมีดกัด 30
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 36

**3. วิธีดำเนินการวิจัย 40**
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 40
3.2 การทดลองเบื้องต้น 43
3.3 การออกแบบการทดลอง 45
3.4 ขั้นตอนการทดลอง 46
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล 48
3.6 สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล 49

**4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล 51**
4.1 ผลของการทดลองเบื้องต้น (Pilot Study) 51
4.2 ผลการทดลอง 54
4.3 ผลการวิเคราะห์การทดลองทางสถิติ 57

**5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 67**
5.1 สรุปผลการทดลอง 68
5.2 อภิปรายผลการทดลอง 68
5.3 ข้อเสนอแนะ 71

**เอกสารอ้างอิง 72**

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

**ภาคผนวก**

ก. ตารางบันทึกการทดลอง 77

ข. ตารางวิเคราะห์ผลข้อมูล 89

ค. ภาพประกอบขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย 100

ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ 122

**ประวัติผู้วิจัย** **133**

# รายการตาราง

**ตาราง** **หน้า**


| | | |
|---|---|---|
| 2.1 | คุณสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียม | 10 |
| 2.2 | แสดงค่าความเร็วตัดของวัสดุชนิดต่าง ๆ | 19 |
| 2.3 | แสดงค่าอัตราป้อนของวัสดุชนิดต่าง ๆ | 19 |
| 2.4 | แสดงค่าและขั้นความหยาบของผิวงาน ตามมาตรฐาน ISO1302 - 1978 | 24 |
| 3.1 | การกำหนดระดับของตัวแปรที่เลือกใช้ในการทดลองเบื้องต้น | 43 |
| 3.2 | การกำหนดระดับของตัวแปรที่เลือกใช้ในการทดลองจริง | 45 |
| 4.1 | แสดงค่าเฉลี่ยความเรียบผิวงานกัด ( $\mu$ m) ที่วัดได้จากการทดลองเบื้องต้น | 52 |
| 4.2 | แสดงค่าเฉลี่ยการสึกหรอของคมตัด (g) ที่วัดได้จากการทดลองเบื้องต้น | 53 |
| 4.3 | แสดงค่าเฉลี่ยความเรียบผิวงานกัด ( $\mu$ m) ที่วัดได้จากการทดลอง | 54 |
| 4.4 | แสดงค่าเฉลี่ย การสึกหรอของคมตัด (g) ที่วัดได้จากการทดลอง | 56 |
| 4.5 | แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของงานกัด | 57 |
| 4.6 | ตารางความเร็วรอบ ที่มีอิทธิพลต่อความเรียบของผิวงาน โดยวิธี LSD | 58 |
| 4.7 | สรุปผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ระดับต่าง ๆ | 59 |
| 4.8 | ตารางอัตราป้อน ที่มีอิทธิพลต่อความเรียบของผิวงาน โดยวิธี LSD | 60 |
| 4.9 | สรุปผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราป้อนที่ระดับต่าง ๆ | 60 |
| 4.10 | แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความสึกหรอของดอกกัด | 62 |
| 4.11 | ตารางระยะป้อนลึก ที่มีอิทธิพลต่อความสึกหรอของคมตัด โดยวิธี LSD | 63 |
| 4.12 | สรุปผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของระยะป้อนลึกที่ระดับต่าง ๆ | 63 |
| 4.13 | ตารางอัตราป้อน ที่มีอิทธิพลต่อความสึกหรอของคมตัด โดยวิธี LSD | 65 |
| 4.14 | สรุปผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราป้อนที่ระดับต่าง ๆ | 65 |
| ก.1 | ตารางบันทึกผลการทดลองค่าความเรียบผิวที่ได้จากการสุ่ม | 78 |
| ก.2 | ตารางบันทึกค่าน้ำหนักของเครื่องมือตัดก่อนการทดลอง | 82 |
| ก.3 | ตารางบันทึกค่าน้ำหนักของเครื่องมือตัดหลังการทดลอง | 84 |
| ก.4 | ตารางบันทึกค่าน้ำหนักก่อน หลัง และการสึกหรอของเครื่องมือตัด ที่ได้จากการสุ่ม | 86 |
| ข.1 | แสดงค่าเฉลี่ยความเรียบผิวงานกัด ( $\mu$ m) ที่วัดได้จากการทดลองเบื้องต้น | 90 |
| ข.2 | แสดงค่าเฉลี่ยการสึกหรอของคมตัด (g) ที่วัดได้จากการทดลองเบื้องต้น | 91 |
| ข.3 | แสดงค่าเฉลี่ยความเรียบผิวงานกัด ( $\mu$ m) ที่วัดได้จากการทดลอง | 92 |

# รายการตาราง (ต่อ)

**ตาราง** **หน้า**


ข.4 แสดงค่าเฉลี่ย การสึกหรอของคมตัด (g) ที่วัดได้จากการทดลอง 93

ข.5 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความเรียบผิวของงานกัด 94

ข.6 ตารางความเร็วรอบ ที่มีอิทธิพลต่อความเรียบของผิวงาน โดยวิธี LSD 95

ข.7 ตารางอัตราป้อน ที่มีอิทธิพลต่อความเรียบของผิวงาน โดยวิธี LSD 96

ข.8 แสดงผลการวิเคราะห์ ANOVA ของค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความสึกหรอของดอกกัด 97

ข.9 แสดงการสึกหรอของคมตัดในระดับตัวแปรต่างๆ 99

# รายการรูปประกอบ


| รูป | | หน้า |
|---|---|---|
| 2.1 | ลักษณะของการกัด | 10 |
| 2.2 | ลักษณะของเครื่องกัดเพลานอน | 11 |
| 2.3 | ลักษณะของเครื่องกัดเพลาตั้ง | 11 |
| 2.4 | เครื่องกัดซีเอ็นซีแบบเพลานอน และเพลาตั้ง | 12 |
| 2.5 | แสดงส่วนประกอบของเครื่องกัดเพลานอน | 13 |
| 2.6 | แสดงส่วนประกอบของเครื่องกัดเพลาตั้ง | 13 |
| 2.7 | เครื่องมือตัดสำหรับการกัดงานในลักษณะต่าง ๆ | 16 |
| 2.8 | ความเร็วรอบ ความเร็วขอบ ความเร็วตัด อัตราป้อน และระยะป้อนลึก | 17 |
| 2.9 | ลักษณะการเคลื่อนที่กัด | 20 |
| 2.10 | แสดงความลึก และความกว้างของการตัดเฉือนในงานกัด | 21 |
| 2.11 | ภาพขยายของผิวชิ้นงาน | 22 |
| 2.12 | การวัดค่า Rt | 23 |
| 2.13 | การวัดค่า Ra | 23 |
| 2.14 | การวัดค่า Rz | 24 |
| 2.15 | เครื่องวัดค่าความหยาบละเอียด | 25 |
| 2.16 | เปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเครื่องมือตัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ | 29 |
| 2.17 | ส่วนประกอบของมีดกัดร่อง (End Mill) | 31 |
| 2.18 | คมตัดและการสึกหรอของผิวหลบของมีด (Flank Wear) | 32 |
| 2.19 | การสึกหรอของผิวหลบ (Flank Wear) | 32 |
| 2.20 | การสึกหรอที่ผิวคายเศษของมีดกัด | 33 |
| 2.21 | การวัดขนาดการสึกหรอของคมตัด | 34 |
| 3.1 | เครื่อง CNC Milling รุ่น T - P0W MH 1050 | 40 |
| 3.2 | เครื่องตรวจสอบความเรียบของผิวงาน | 41 |
| 3.3 | เครื่องชั่งน้ำหนักวัดความสึกหรอของคมตัด | 41 |
| 3.4 | วัสดุชิ้นงานทดลอง | 42 |
| 3.5 | มีดกัดที่ใช้ในการทดลอง | 42 |

# รายการรูปประกอบ (ต่อ)


| รูป | | หน้า |
|---|---|---|
| 3.6 | แสดงการล้างทำความสะอาดดอกกัดด้วยอะซิโตน และชั่งน้ำหนักก่อนการทดลอง | 46 |
| 3.7 | ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง | 46 |
| 3.8 | ใช้ปากกาจับยึดชิ้นงาน ปรับระดับความเที่ยงตรงโดยใช้นาฬิกาวัด (Dial Gauge) | 47 |
| 3.9 | แสดงการจับยึดดอกกัด | 47 |
| 3.10 | ปรับค่าตัวแปรในโปรแกรม CNC | 48 |
| 4.1 | กราฟการทดสอบการแจกแจงปกติค่าความเรียบของผิวงานของการทดลองเบื้องต้น | 52 |
| 4.2 | กราฟการทดสอบการแจกแจงปกติค่าการสึกหรอของการทดลองเบื้องต้น | 54 |
| 4.3 | กราฟการทดสอบการแจกแจงปกติค่าความเรียบของผิวงานของการทดลอง | 55 |
| 4.4 | กราฟการทดสอบการแจกแจงปกติค่าการสึกหรอของการทดลอง | 56 |
| 4.5 | กราฟแสดงความแตกต่างของระดับความเร็วรอบ ที่มีอิทธิพลต่อความเรียบของผิวงาน | 59 |
| 4.6 | กราฟแสดงความแตกต่างของระดับอัตราป้อน ที่มีอิทธิพลต่อความเรียบของผิวงาน | 61 |
| 4.7 | กราฟแสดงความแตกต่างของระดับระยะป้อนลึก ที่มีอิทธิพลต่อความสึกหรอของคมตัด | 64 |
| 4.8 | กราฟแสดงความแตกต่างของระดับอัตราป้อน ที่มีอิทธิพลต่อความสึกหรอของคมตัด | 66 |
| ข.1 | กราฟการทดสอบการแจกแจงปกติค่าความเรียบของผิวงานของการทดลองเบื้องต้น | 90 |
| ข.2 | กราฟการทดสอบการแจกแจงปกติค่าการสึกหรอของการทดลองเบื้องต้น | 91 |
| ข.3 | กราฟการทดสอบการแจกแจงปกติค่าความเรียบของผิวงานของการทดลอง | 92 |
| ข.4 | กราฟการทดสอบการแจกแจงปกติค่าการสึกหรอของการทดลอง | 93 |
| ข.5 | แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วรอบ และระยะป้อนลึกที่ส่งผลต่อการสึกหรอของดอกกัด | 97 |
| ข.6 | แสดงความสัมพันธ์ของอัตราป้อน และระยะป้อนลึกที่ส่งผลต่อการสึกหรอของดอกกัด | 98 |
| ค.1 | เครื่อง CNC Milling รุ่น T - P0W MH 1050 | 101 |
| ค.2 | ดอกกัดที่ใช้ในการทดลอง | 101 |
| ค.3 | เครื่องชั่งน้ำหนักวัดขนาดความสึกหรอของคมตัด | 102 |
| ค.4 | แสดงการล้างทำความสะอาดดอกกัดด้วยอะซิโตนก่อนการทดลอง | 102 |
| ค.5 | แสดงการชั่งน้ำหนักดอกกัดก่อนการทดลอง | 103 |
| ค.6 | ตัดขนาดของชิ้นงานทดลองด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแบบอัตโนมัติ | 103 |
| ค.7 | แสดงชิ้นงานก่อนตัดและหลังตัด | 104 |

# รายการรูปประกอบ (ต่อ)

**รูป** **หน้า**


ค.8 ชิ้นงานทดลองจำนวน 27 ชิ้น 104
ค.9 ดอกกัดที่ใช้ในการทดลอง 54 ดอก 105
ค.10 จับดอกกัดเข้ากับหัวจับ 105
ค.11 ตังระยะของมีดกัดด้วยไดแอ็ลเกจ 106
ค.12 ป้อนค่าตัวแปรด้วยระบบ CNC 106
ค.13 การกัดชิ้นงานด้วยเครื่อง CNC 107
ค.14 ลักษณะชิ้นงานที่ผ่านการกัดมาแล้ว 107
ค.15 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการกัดมาแล้ว 108
ค.16 แสดงการวัดความเรียบผิวของงาน 108
ค.17 แสดงการล้างทำความสะอาดดอกกัดด้วยอะซิโตนหลังการทดลอง 109
ค.18 ชั่งน้ำหนักดอกกัดหลังการทดลอง 109
ค.19 แสดงคมตัดที่ยังไม่สึกหรอ (ยังไม่ผ่านการใช้งาน) 110
ค.20 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0017 กรัม 110
ค.21 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0021 กรัม 110
ค.22 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0020 กรัม 111
ค.23 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0021 กรัม 111
ค.24 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0022 กรัม 112
ค.25 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0020 กรัม 112
ค.26 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0019 กรัม 113

# รายการรูปประกอบ (ต่อ)

**รูป** **หน้า**


ค.27 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0021 กรัม 113

ค.28 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0020 กรัม 114

ค.29 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0020 กรัม 114

ค.30 แสดงความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ ที่ความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที น้ำหนักที่หายไป 0.0021 กรัม 115

ค.31 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 1.084 $\mu$m. 115

ค.32 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 3.876 $\mu$m. 116

ค.33 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 2.151 $\mu$m. 116

ค.34 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,000 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 200 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 1.962 $\mu$m. 117

ค.35 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 1.049 $\mu$m. 117

ค.36 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 2.785 $\mu$m. 118

ค.37 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 1.463 $\mu$m. 118

ค.38 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,250 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 2.018 $\mu$m. 119

ค.39 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 1.184 $\mu$m. 119

# รายการรูปประกอบ (ต่อ)

**รูป** **หน้า**

ค.40 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที ความลึกที่ 3 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 1.978 $\mu$m. 120

ค.41 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 150 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 1.144 $\mu$m. 120

ค.42 แสดงความเรียบผิวที่ระดับความเร็วรอบ 1,500 รอบ/นาที ความลึกที่ 5 มม. อัตราป้อนที่ 250 มม./นาที ค่าความเรียบผิวเฉลี่ยที่ 2.227 $\mu$m. 121