การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม AA6061 โดยวิธีทากูชิ

โดย

นายประสาน แสงเขียว

สนับสนุนงบประมาณโดย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2559

A Study of Optimal Factor in Milling Process of Aluminum AA6061 by Taguchi method

By

Prasan Saengkhiao

Granted by

Rajamangala University of Technology Rattanakosin

Fiscal Year 2016

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยประจำปี 2559 ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สามารถดำเนินการ และบรรลุวัตถุประสงค์ ดังที่ตั้งไว้

ขอขอบคุณ สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ในการทดลอง ทำให้การทดลองสามารถดำเนินการไปได้อย่างราบรื่น

สุดท้าย คณะวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครูบาอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนจนทำให้คณะผู้วิจัยมีโอกาสในการทำวิจัยนี้ นอกจากนั้นขอกราบขอบพระคุณทุกๆ ท่านที่มีความเกี่ยวของกับงานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งคณะผู้วิจัยไม่ได้เอ่ยนามถึง ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบแด่ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประสาน แสงเขียว (และคณะ)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : **17/2559**
ชื่อโครงการ : การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม AA6061 โดยวิธีทากูชิ
ชื่อนักวิจัย : นายประสาน แสงเขียว, นายวิชัย พุ่มจันทร์, นายคมกริช ละวรรณวงษ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรและพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม AA6061 โดยกำหนดตัวแปร 3 ตัวแปร คือ ความเร็วตัด(Vc) ระยะป้อนลึก(D) และอัตราป้อน(F) ซึ่งแต่ละตัวแปร มี 3 ระดับ ออกแบบการทดลองตามหลักเทคนิคแบบ Orthogonal Array (OA's) ตามแนวทางของ "ทากูชิ" ผลที่ได้จากการทดลองจะนำมาคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N Ratio) เพื่อพิจารณาเลือกตัวแปรที่มีค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนสูงสุด (Max Signal-to-noise Ratio) จากนั้นทำการพยากรณ์และวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง จากการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ (α= 0.05) ได้แก่ ความเร็วตัด(Vc) และอัตราป้อน(F) และผลการพยากรณ์ด้วยวิธีทากูชิ แนะนำให้เลือกใช้ความเร็วตัด(Vc) ระดับที่ 3 คือ 130 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก(D) ระดับที่ 1 คือ 2 มิลลิเมตร และ อัตราป้อน(F) ระดับที่ 1 คือ 150 มิลลิเมตร/นาที

คำสำคัญ : งานกัด, ความหยาบผิว, ความสึกหรอของดอกกัด, วิธีทากูชิ

E-mail Address : Prasan.san@rmutr.ac.th
ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม พ.ศ. 2558 – กันยายน พ.ศ. 2559

Abstract

Code of project : **17/2559**
Project name : A Study of Optimal Factor in Milling Process of Aluminum AA6061 by Taguchi method
Researcher name : Prasan Saengkhiao, Wichai Pumchan, Komgrit Lawanwong

This research aims to study parameter that have an influence in the surface roughness of Aluminum AA6061 milling process. Three factor; cutting speed (Vc), depth of cut (D), and feed rate (F) which have 3 levels for each factor have been defined by taguchi method. The experimental results have been calculated the S/N ratio for selecting the Max signal-to noise ratio. Next, to predict and variance analyzing is operated for the experimental validity testing. From the study, Factor that have an influence to the surface roughness are cutting speed and feed rate. The results from taguchi method suggest to select cutting speed, depth of cut and feed rate at 130 m/min, 2 mm and 150 mm/min, respectively.

Keywords : Milling, Surface Roughness, Tool milling Wear, Taguchi Method

---

E-mail Address : Prasan.san@rmutr.ac.th
Period of project : October 2015 – September 2016

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษาวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	**3**
2.1 อลูมิเนียมและโลหะผสมอลูมิเนียม	3
2.2 งานกัด	11
2.3 เครื่องจักรที่ใช้ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC Machine)	14
2.4 เครื่องมือตัดสำหรับงานกัด	15
2.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัด	15
2.6 ความหยาบของผิวงาน	19
2.7 น้ำมันหล่อเย็น	23
2.8 วัสดุที่ใช้ผลิตเครื่องมือตัด	24
2.9 มีดกัดและความสึกหรอของมีดกัด	27
2.10 การออกแบบการทดลอง	31
2.11 การออกแบบการทดลองโดยวิธีทากูชิ	35
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	**46**
3.1 แผนการดำเนินโครงการ	46

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 48
3.3 การออกแบบการทดลอง 50
3.4 ขั้นตอนการทดลอง 51
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล 52

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล 53
4.1 วิธีการทากูชิสำหรับความหยาบผิว (Surface Roughness) 53
4.2 วิธีการทากูชิสำหรับการสึกหรอของดอกกัด (Tool Wear) 59

บทที่ 5 **สรุปผลการทดลอง 66**
5.1 สรุปผลการทดลอง 66
5.2 ข้อเสนอแนะ 67

บรรณานุกรม 68

ภาคผนวก ก 71
ภาคผนวก ข 80
ภาคผนวก ค 95

ประวัติผู้วิจัย 110

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงสัญลักษณ์ (ระบบตัวเลข) กลุ่มอลูมิเนียมขึ้นรูป	4
2.2	แสดงภาวะประสงค์ (TEMPER) ของโลหะผสมอลูมิเนียม	8
2.3	แสดงสัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (TEMPERING)	9
2.4	แสดงส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสม 6061	10
2.5	แสดงสมบัติทางอุณหภูมิ (THERMAL PROPERTIES) ของอลูมิเนียมผสม 6061	10
2.6	แสดงสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมผสม 6061	10
2.7	แสดงสำหรับงานกัดด้วยคัตเตอร์ทำด้วยเหล็ก HIGH SPEED(1) [6]	18
2.8	แสดงค่าและขั้นความหยาบของผิวงาน ตามมาตรฐาน ISO1302 – 1978 [8]	22
2.9	พัฒนาการของการออกแบบการทดลอง	35
2.10	ขั้นตอนการทำการทดลองโดยวิธีของทากูชิ	36
2.11	มาตรฐานของวิธีการทากูชิ (STANDARD ORTHOGONAL ARRAY)	38
2.12	ตัวอย่างจำนวนของปัจจัยและระดับปัจจัยของ ORTHOGONAL ARRAY L8(27) และ L12(211)	39
2.13	L8 STANDARD ARRAY ที่ 2 ระดับปัจจัย	39
3.1	แผนการดำเนินโครงการ	46
3.2	แสดงลำดับการทดลองวิธีทากูชิ (ทดลองทำซ้ำเงื่อนไขละ 3 ครั้ง)	50
4.1	แสดงความหยาบผิวที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง	52
4.2	สรุปอัตราส่วน S/N ของค่าความหยาบผิวจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง	55
4.3	การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย โดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน	56
4.4	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความหยาบผิว	58
4.5	การสึกหรอของดอกกัดที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง	68
4.6	สรุปอัตราส่วน S/N ของค่าความความสึกหรอของดอกกัดจากผลการทดลอง 9 ชุด	61
4.7	การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย โดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความสึกหรอของดอกกัด	62
4.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความสึกหรอของดอกกัด	64

สารบัญภาพ

ภาพที่ **หน้า**

2.1 ลักษณะของการกัด 11
2.2 ลักษณะของการเครื่องกัดเพลานอน 12
2.3 ลักษณะของการเครื่องกัดเพลาตั้ง 13
2.4 เครื่องกัดซีเอ็นซีเพลานอนและเพลาตั้ง 13
2.5 เครื่องมือตัดสำหรับการกัดงานในลักษณะต่าง ๆ 15
2.6 ความเร็วรอบ ความเร็วขอบ ความเร็วตัด อัตราป้อน และระยะป้อนลึก 16
2.7 ลักษณะการเคลื่อนที่กัด 19
2.8 แสดงความลึก และความกว้างของการตัดเฉือนในงานกัด 19
2.9 ภาพขยายของผิวชิ้นงาน 20
2.10 การวัดค่า RT 21
2.11 การวัดค่า RA 21
2.12 การวัดค่า RZ 22
2.13 เครื่องวัดค่าความหยาบละเอียด 23
2.14 เปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเครื่องมือตัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ 27
2.15 ส่วนประกอบของมีดกัดร่อง (END MILL) 28
2.16 คมตัดและการสึกหรอของผิวหลบของมีด (FLANK WEAR) 29
2.17 การสึกหรอของผิวหลบ (FLANK WEAR) 29
2.18 การสึกหรอที่ผิวคายเศษของมีดกัด 30
2.19 การวัดขนาดการสึกหรอของคมตัด 31
2.20 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ 32
2.21 ความหมายของสัญลักษณ์ตาราง ORTHOGONAL ARRAY 38
2.22 การปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการโดยเทคนิคทากูชิ 43
3.1 เครื่อง CNC milling รุ่น BRIDGEPORT XR760 47
3.2 เครื่องตรวจสอบความหยาบของผิวงาน 49
3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักวัดขนาดความสึกหรอของคมตัด 48
3.4 ชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอย เกรด 6061 48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ **หน้า**

3.5 ดอกกัด (End Mill) HSS) แบบ 2 คมตัด 49

3.6 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นงานที่กัด 50
4.1 ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลองกับ ค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวชิ้นงาน 57
4.2 ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลองกับ ค่า S/N-Ratio ของค่าความสึกหรอของดอกกัด 63

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

จากการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิต แม่พิมพ์ และชิ้นส่วนเครื่องจักรกลในปัจจุบัน ทำให้เกิดกลุ่มบริษัทผู้ผลิตขนาดเล็กขึ้นมากมาย จนส่งผลทำให้เกิดการแข่งขันทางด้านการผลิตชิ้นส่วนขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้นหลายบริษัทจึงจำเป็นต้องหาวิธีและกระบวนการในการผลิตชิ้นส่วนให้ได้คุณภาพ ตรงตามความต้องการและเป็นที่พึงพอใจของลูกค้า โดยมีค่าใช้จ่ายในการผลิตให้น้อยที่สุด ซึ่งในอุตสาหกรรมผู้ผลิตขนาดเล็ก โดยทั่วไปจะมีการผลิตและขึ้นรูปชิ้นส่วนด้วยกระบวนการผลิต เช่น งานกลึง งานกัด งานเจียระไน และงานเจาะ เป็นต้น ทั้งนี้ในกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นจะต้องมีการเลือกใช้เครื่องมือตัดและกำหนดเงื่อนไขหรือค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการตัดเฉือน โดยเครื่องมือและเงื่อนไขที่เลือกใช้ ถือเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยให้การผลิตชิ้นส่วนมีคุณภาพ ซึ่งเงื่อนไขและค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวถึง คือ การกำหนดค่าอัตราป้อน ค่าความเร็วตัด และค่าระยะป้อนลึกให้เหมาะสม โดยปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นส่วนที่ผลิต เช่น ค่าความหยาบผิวงาน และค่าความคลาดเคลื่อนของขนาด ซึ่งนอกจากนี้ปัจจัยดังกล่าวยังส่งผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องมือตัด ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิม

กระบวนการผลิตด้วยกระบวนการกัดถือเป็นขั้นตอนและวิธีการหนึ่งในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรม โดยทั่วไปสามารถผลิตชิ้นงานได้หลากหลาย ซึ่งขึ้นอยู่กับเครื่องมือและวัสดุที่นำมาใช้ในการกัดขึ้นรูป ในที่นี้จะให้ความสำคัญกับการกัดขึ้นรูปวัสดุที่เป็นอะลูมิเนียม AA6061 ซึ่งอะลูมิเนียม AA6061 ถือเป็นวัสดุอีกชนิดหนึ่งที่นิยมนำมาใช้อย่างแพร่หลายในแวดวงอุตสาหกรรม เพราะมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ อะลูมิเนียม AA6061 เป็น High Strength Alloys สามารถทำ Heat Treatment ได้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกล มีความแข็งแรงสูง และทนต่อการล้าได้ดี นิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานโครงสร้างอากาศยาน เช่น ชิ้นส่วนโครงสร้างปีก และลำตัวของเครื่องบิน ซึ่งทั่วไปโลหะอะลูมิเนียม AA6061 จะถูกนำมาใช้ในงานโครงสร้างของเครื่องบินมือสมัครเล่นมากกว่าเครื่องบินทหารหรือเครื่องบินพาณิชย์ นอกจากนี้อะลูมิเนียม AA6061 ยังนิยมใช้ในงานที่ต้องการความแข็งแรงสูงร่วมกับความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม ไม่เป็นสนิม ไม่ต้องทาสี เช่น งานเป่าพลาสติก ราวสะพาน โครงสร้างอาคาร(หมุดย้ำ) และชิ้นส่วนในยานพาหนะต่างๆ เช่น เรือ รถบรรทุก เฟรมจักรยาน และใช้ในชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น Wheel Spacers เป็นต้น [1]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาอิทธิพลของตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการกัดขึ้นรูปสำหรับอะลูมิเนียม AA6061 ด้วยหลักเทคนิคแบบ Orthogonal Array (OA’s) ซึ่งเป็นมาตรฐานการทดลองตามแนวทางของ “ทากูชิ” โดยเป็นการศึกษาค่าความหยาบผิว และอัตราการสึกหรอของดอกกัดภายหลังการตัด ซึ่งใช้เครื่องมือตัดเป็นมีดกัด(End Mill) HSS Ø 6 มิลลิเมตร แบบ 2 คมตัด ซึ่งนิยม

ใช้กันอย่างแพร่หลายในการตัดเฉือนอลูมิเนียมของกลุ่มบริษัทผู้ผลิตขนาดเล็ก ผลการวิจัยที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการกัดขึ้นรูปอะลูมิเนียม AA6061 หรือเกรดอะลูมิเนียมที่ใกล้เคียง อีกทั้งสามารถนำไปใช้ได้ในเชิงปฏิบัติจริง และประยุกต์ใช้ในสถานประกอบการหรือผู้ที่สนใจต่อไป

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาความหยาบผิวชิ้นงานของกระบวนการกัดวัสดุอลูมิเนียม เกรด AA6061

2.2 เพื่อศึกษาอัตราการสึกหรอของดอกกัด

3. ขอบเขตการศึกษาวิจัย

3.1 ใช้เครื่อง CNC MILLING รุ่น BRIDGEPORT XR760 ชุดคอนโทรล FANUC SERIES 18i-MB

3.2 ใช้อลูมิเนียมเกรด 6061 ขนาด 150 x 150 x 16 มิลลิเมตร

3.3 ใช้ดอกกัด (End Mill) HSS แบบ 2 คมตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร

3.4 ศึกษาระยะป้อนลึกแนวแกน Z ที่ 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร

3.5 ศึกษาความเร็วตัด 3 ระดับ คือ 50, 90 และ 130 เมตร/นาที

3.6 ศึกษาอัตราป้อนที่ 150, 200 และ 250 มิลลิเมตร/นาที

3.7 ทดสอบคุณสมบัติดังนี้ คือความหยาบผิวของชิ้นงานและอัตราการสึกหรอของดอกกัด

3.8 ใช้น้ำหล่อเย็นที่เป็นแบบอิมิลชั่นน้ำนม (Milky Emulsion) อัตราผสม 1: 20

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

4.1 ทราบถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการกัดสำหรับอลูมิเนียม เกรด AA6061

4.2 เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมการกัดอลูมิเนียม เกรด AA6061

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยเรื่องการศึกษาผลกระทบของขบวนการการกัดต่อคุณสมบัติอลูมิเนียมผสม เกรด 6061 เป็นการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของดอกกัดในอลูมิเนียมผสม เกรด 6061 ด้วยดอกกัด (End Mill) High Speed Steel แบบ 2 คมตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎี แนวความคิดและเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้เป็นแนวทางในงานวิจัย ดังต่อไปนี้

2.1 อลูมิเนียมและโลหะผสมอลูมิเนียม [1]

โลหะได้มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาของประเทศที่เจริญทางด้านอารยธรรม (Civilization) เมื่อกล่าว ถึงโลหะโดยทั่วไปจะนึกถึงเหล็ก นอกจากเหล็กแล้วยังมีอลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะที่ใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีความหนาแน่นต่ำ (2.7 g/m^3) มีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนัก (Strength to Weight Ratio) สูงจึงนิยมใช้ทำชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และขีปนาวุธ เป็นต้น สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆ ได้ง่าย เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ และมีอัตราการไหลตัวสูง มีค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากแต่มีน้ำหนักเบาซึ่งนิยมนำมาเป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์มักใช้ทำเป็นภาชนะบรรจุอาหารทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัดกร่อนในบรรยากาศ เนื่องจากที่ผิวของอลูมิเนียมมักจะสร้างแผ่นฟิล์มออกไซด์ ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันเนื้อโลหะที่อยู่ลึกลงไปใต้ผิวไม่ให้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) อีกทั้งอลูมิเนียมยังสามารถหาซื้อได้ง่ายและราคาถูกอลูมิเนียมสามารถผสมกับธาตุได้หลายชนิด เช่น ทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี แมงกานีส ฯลฯ โดยธาตุผสมที่เติมเข้าไปเหล่านี้จะทำให้สมบัติอลูมิเนียมเปลี่ยนแปลงไป และอลูมิเนียมผสมบางกลุ่มยังสามารถนำไปปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นโดยผ่านกระบวน การทางความร้อนด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้อลูมิเนียมถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น การเลือกอลูมิเนียม ผสมเพื่อนำไปใช้งานจะต้องคำนึงถึงคุณลักษณะที่สำคัญ คือ คุณสมบัติของอลูมิเนียม กรรมวิธีใช้ในการขึ้นรูป กระบวนการทางความร้อน รวมไปถึงคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

2.1.1 การจำแนกประเภทของอลูมิเนียมผสม

โดยทั่วไปแล้วสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1.1 อลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูป (Wrought Aluminum Alloys) เป็นโลหะผสมที่ต้องผ่านการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก เช่น การรีดหรือการอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นหรือแท่ง

2.1.1.2 อลูมิเนียมผสมประเภทเหล็กหล่อ (Cast Aluminum Alloys) มีสมบัติในการไหลดีธาตุผสมที่สำคัญได้แก่ ซิลิกอน เนื่องจากซิลิกอนเพิ่มความสามารถในการไหลและต้านการแตกร้อนในงานหล่อได้ดี ในแต่ละประเภทของอลูมิเนียมข้างต้น สามารถแบ่งย่อยแต่ละประเภทออกเป็นประเภทที่สามารถนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนได้ (Heat Treatable, HT) และประเภทที่ไม่สามารถผ่านกระบวนการทางความร้อนได้ (Non Heat Treatable, NHT) ซึ่งสามารถปรับปรุงสมบัติ

ทางกลได้โดยผ่านกระบวนการทางอุณหภูมิ (Thermal Process) และกระบวนการขึ้นรูปเย็น (Cold Working) ตามลำดับ

2.1.2 การกำกับชื่อของอลูมิเนียมผสม

อลูมิเนียมขึ้นรูป (Wrought Aluminum) และอลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูป (Wrought Aluminum Alloy) ตาม -ระบบ American Standard of Testing Materials (ASTM) สามารถจำแนกโดยใช้ระบบตัวเลข 4 หลัก ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 9 กลุ่ม แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์ (ระบบตัวเลข) กลุ่มอลูมิเนียมขึ้นรูป

สัญลักษณ์	ธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักในอะลูมิเนียม
1XXX	อลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XXX	ทองแดง (Copper/Cu)
3XXX	แมงกานีส (Manganese/Mn)
4XXX	ซิลิกอน (Silicon/Si)
5XXX	แมกนีเซียม (Magnesium/Mg)
6XXX	แมกนีเซียม (Magnesium/Mg) และซิลิกอน (Silicon/Si)
7XXX	สังกะสี (Zinc/Zn)
8XXX	ธาตุอื่นๆ (Other Element) เช่น นิกเกิล (Nickel/Ni), ไทเทเนียม (Titanium/Ti), โครเมียม (Chromium/Cr), ตะกั่ว (Lead, Pb), และบิสมัท (Bismuth/Bi)
9XXX	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)

ตัวเลขที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสมธาตุใดธาตุหนึ่งเป็นหลักแสดงดังตารางที่ 2.1 เช่น 6XXX เป็นกลุ่มธาตุผสมของอลูมิเนียมที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น

ตัวเลขที่สอง เป็นสัญลักษณ์แสดงอลูมิเนียมผสมที่มีธาตุผสมชนิดอื่นผสมเข้าไปหรือแสดงอลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีข้อจำกัดของธาตุเจือ

ตัวเลขที่สามและสี่ เป็นสัญลักษณ์ซึ่งแสดงโลหะผสมเจือ (Minor Alloy)

2.1.3 อลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum Alloys)

เป็นโลหะผสมประกอบด้วยธาตุ ทองแดง (Copper/Cu), แมกนีเซียม (Magnesium/Mn), แมงกานีส (Manganese/Mg), ซิลิกอน (Silicon/Si), และสังกะสี (Zinc/Zi) สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักดังนี้

2.1.3.1 อลูมิเนียมหล่อผสมอัลลอย (Casting Alloys) แบ่งหมวดย่อย Heat - Treatable/Non Heat Treatable

2.1.3.2 อลูมิเนียมผสมอัลลอย (Wrought Alloys) แบ่งหมวดย่อย Heat-Treatable/Non Heat Treatable ประมาณ 85% อลูมิเนียมใช้ทำแผ่นรีดฟอยล์และบีบอัดเป็นท่อน (Extrusion) อลูมิเนียมผสมอัลลอย (Casting Alloys) เป็นผลิตภัณฑ์ที่คุ้มค่าใช้จ่ายเนื่องจากมีจุด

หลอมเหลวต่ำ แต่โดยปกติจะมีความแข็งแรงน้อยกว่า อลูมิเนียมผสมอัลลอย (Wrought Alloys) และที่สำคัญที่สุดของระบบผสมอัลลอย คือ ปริมาณของอลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) ที่ระดับสูงของซิลิกอน (4.0% ถึง 13%) นำไปสู่การหล่ออลูมิเนียมที่มีคุณภาพดี โดยมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิศวกรรมโครงสร้าง และชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ต้องการ ความทนทานต่อการกัดกร่อน รวมถึงน้ำหนักเบา อัลลอยโลหะผสมส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์จากโลหะที่มีน้ำหนักเบา 2 ชนิด คือ อลูมิเนียม และแมกนีเซียมอัลลอยที่มีความสำคัญมากในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ (Aerospace Manufacturing) เนื่องจากอลูมิเนียม - แมกนีเซียมเป็นอัลลอยโลหะผสมที่เบากว่าโลหะผสมอลูมิเนียมอื่นๆ และทำปฏิกิริยากับไฟน้อยกว่าโลหะผสมชนิดอื่นที่มีแมกนีเซียมผสมอยู่ในปริมาณสูงมากๆ พื้นผิวอลูมิเนียมผสมอัลลอย (Aluminum Alloys Surfaces) มีความเงางามชัดเจนแม้ในสภาพแวดล้อมที่แห้งเนื่องจากการก่อตัวของผิวเคลือบที่ป้องกันอลูมิเนียมออกไซด์ในสภาพแวดล้อมที่เปียกชื้นการกัดกร่อนของกรดทางเคมีและปฏิกิริยาทางไฟฟ้า จะเกิดเมื่อโลหะผสมอลูมิเนียมถูกใช้เป็นสื่อผ่านของกระแสไฟฟ้ากับโลหะอื่นๆ ที่มีศักยภาพเชิงลบมากกว่าการกัดกร่อนก็จะเกิดมากกว่าอลูมิเนียมทั่วไป อลูมิเนียม (Aluminum Alloys) ที่มีคุณสมบัติที่หลากหลายสามารถนำมาใช้งานทางวิศวกรรมโครงสร้างต่างๆ โดยมีการใช้มาตรฐานเทียบของอเมริกา (ANSI) เยอรมัน/ยุโรป (DIN) นานาชาติ (UNS/ISO) เป็นต้น การคัดเลือกอัลลอยให้ถูกต้องตามลักษณะการใช้งานปกติจะพิจารณาระดับความสามารถในการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความหนาแน่น (Density) ความเหนียว (Ductility) ความสามารถในการขึ้นรูป (Formability) ความสามารถในการทำงาน (Workability) ความสามารถในการเชื่อม (Weldability) ความสามารถทนทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion Resistance) เป็นต้น ปัจจุบันมีการใช้อลูมิเนียมกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการบิน เนื่องจากมีอัตราส่วนความแข็งแกร่งต่อน้ำหนักที่เหมาะสมในขณะที่ อลูมิเนียมบริสุทธิ์อ่อนเกินไปสำหรับการใช้งาน และขาดความสามารถในการทนแรงดึง (Tensile Strength)ที่จำเป็นสำหรับ เครื่องบิน และเฮลิคอปเตอร์

2.1.4 อลูมิเนียมผสมอัลลอยกับประเภทเหล็ก (Aluminum Alloys verses Type of Steels)

อลูมิเนียมผสมอัลลอยโดยทั่วไปมักจะมีค่ายืดหยุ่นโมดูลัส (Elastic Modulus) ประมาณ 70 GPa ซึ่งประมาณหนึ่งในสามของเหล็กและเหล็กอัลลอยในตลาดก็มีค่ายืดหยุ่นโมดูลัสที่ผ่านองค์ประกอบนี้ ดังนั้น ชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ทำจากอลูมิเนียมผสมอัลลอยมีโอกาสยืดตัวจนเสียรูปร่างได้มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นส่วนที่ทำจากเหล็กกว่าที่มีขนาดรูปร่างเดียวกัน แม้จะมีอลูมิเนียมผสมอัลลอยบางชนิดที่มีค่าความสามารถทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ที่สูงกว่าเหล็กกล้าบางชนิดและถูกใช้ทดแทนก็ตาม ผลิตภัณฑ์โลหะใหม่ถูกเลือกออกแบบด้วยการเลือกใช้เทคโนโลยีการผลิตที่เหมาะสม การอัดขึ้นรูปเป็นขบวนการสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มอลูมิเนียม (Aluminum/Al) แมงกานีส (Manganese/Mg) ซิลิกอน (silicon/Si) สามารถผ่านกระบวน การบีบอัด (extruded) เพื่อสร้างรูปแบบที่ซับซ้อนได้ โดยทั่วไปการออกแบบโลหะที่แข็ง และเบาสามารถเกิด ขึ้นได้กับอลูมิเนียมผสมอัลลอยมากกว่าจะเกิดขึ้นกับเหล็ก เช่น การดัดท่อผนังที่บางความเครียดจะลดลงสำหรับขนาดที่ใหญ่ขึ้น การเพิ่มสัดส่วนและรัศมีความหนาของผนังจะเป็นการเพิ่มรัศมีและน้ำหนัก โดย 26% เพื่อสามารถลดความเครียดผนัง ด้วยเหตุนี้โครงจักรยานที่ทำจากอลูมิเนียมอัลลอยจะใช้ท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่กว่าท่อเล็กหรือไททาเนียมเพื่อให้ได้ความเหนียวและความแข็งแรงของตัวถังที่ถูกออกแบบเป็นชิ้นเดียวอลูมิเนียมอัลลอยถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในวิศวกรรมยานยนต์ โดยเพราะ

อย่างยิ่งบล็อกเครื่องยนต์ (Cylinder Blocks) และห้องจุดระเบิด (Crankcases) เนื่องจากสามารถลดน้ำหนักได้จริง อลูมิเนียมอัลลอยถูกตั้งข้อสงสัยเกี่ยวกับความทนทานต่อการงอที่อุณหภูมิสูง ระบบระบายความร้อนของเครื่องยนต์ดังกล่าวเป็นสิ่งสำคัญเทคนิคในการผลิตและความก้าวหน้าโลหะถูกออกมาใช้และประสบความสำเร็จอย่างสูงในอุตสาหกรรมรถยนต์ไม่ว่าจะเป็นหัวสูบ (Cylinder heads) และห้องจุดระเบิด (Crankcases) ข้อจำกัดทางโครงสร้างที่สำคัญของอลูมิเนียมอัลลอย คือ ความทนทานต่อการล้าต่ำเมื่อเทียบกับเหล็ก ในสภาพห้องปฏิบัติ การควบคุมเหล็กแสดงอาการล้า ซึ่งเป็นระดับความเครียดต่ำโดยไม่มีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอลูมิเนียมอัลลอย จึงถูกใช้อย่างระมัดระวังเฉพาะในส่วนที่จำเป็นต้องมีความแข็งแรงสูงทนทานต่อการล้าได้อย่างแน่นอน

2.1.5 ประเภทของอลูมิเนียมอัลลอย (Aluminum Alloys)

2.1.5.1 กลุ่มที่ไม่สามารถผ่านกระบวนการ Heat Treatment (Non-Heat-Treatable Aluminum Alloys)

1) เกรด 1050/1080/1200 อลูมิเนียมบริสุทธิ์ (Pure Aluminum) ที่ใช้ทั่วไป ทนทานต่อสารเคมีและสภาพอากาศ สามารถใช้งานและเชื่อมได้ง่าย แต่เป็นเกรดที่มีความแข็งต่ำที่สุด เหมาะสำหรับเครื่องอุปกรณ์ทางเคมี งานที่ต้องการความสะอาดบริสุทธิ์ หรือเครื่องอัดต่างๆ

2) เกรด 1350 เป็น Electrical Quality Alloy ใช้กับงานไฟฟ้า 3003/3103 (Aluminum Sheets and Plates) – ทนทานต่อการกัดกร่อน และเชื่อมได้มีความแข็งแรง เหมาะทำเป็นถังกักเก็บ (Storage tanks) อุปกรณ์ทางเคมี (Chemical -equipment) งานเชื่อมต่างๆ (Brazing Application) ตัวถังรถตู้ และการใช้งานในอุณหภูมิต่ำ (Cryogenic)

3) เกรด 5005 เหมาะกับงานเคลือบสี (Anodised Coating) ซึ่งมีน้ำหนักเบากว่า 3003/3103 ใช้ได้ดีกับงานละเอียดซับซ้อน งานออกแบบตกแต่ง งานออกแบบโครงสร้าง และอุปโภคบริโภคทั่วไป

4) เกรด 5052 (2.5% Mag common in USA)/5251 (2% Mag for UK only)/5754 (3% Mag an EU standard) อยู่ในสภาพพร้อมอบคืนไฟ ทนต่อการกัดกร่อน และเชื่อมได้ดีเหมาะกับงานทนต่อแรงดันของเรือ (Pressure Vessels) ถัง (Tanks) อุปกรณ์เชื่อมต่อ (Fittings) งานที่ต้องการความแข็งแรง เช่น เรือลากจูง ตัวถังรถยนต์ เป็นต้น

5) เกรด 5083 (Similar to 5154) – เหมาะกับงานเชื่อมที่ต้องการความแข็งแรงของจุดเชื่อม เช่น รางขนถ่าย อุปกรณ์ชิ้นส่วนในเรือ สะพาน การใช้งานในอุณหภูมิต่ำ (Cryogenic) เครน (Cranes) สามารถเชื่อม (Weldability) ทนทานต่อการกัดกร่อนดีเยี่ยม ไม่เหมาะกับงานที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่า 65.5 °C

6) เกรด 5086 (Common in USA) – เหมาะกับงานเชื่อมโครงสร้างเรือลากจูงที่มีโครงสร้างขนาดมหึมา อุปกรณ์และโครงสร้างเรือใช้งานในอุณหภูมิต่ำ (Cryogenic Vessels) ที่ต้องทนต่อการสั่นสะเทือน (Energy Absorption) ไม่เหมาะกับงานที่อยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่า 65.5 °C

7) เกรด 5454 เหมาะกับงานเชื่อมโครงสร้างผ่าน ASME Approved เพื่อใช้งานในอุณหภูมิสูงถึง 204.4 °C เช่น รถบรรทุกยางมะตอยร้อนเพื่อทำถนน (Hot Asphalt Road Tankers) ตัวถังรถขนถ่าย (Dump Body) สามารถทนแรงดันของเรือ (Pressure Vessels) และโครงสร้างกลางทะเล

2.1.5.1 กลุ่มที่สามารถผ่านกระบวนการ Heat Treatment (Heat -Treatable Aluminum Alloys)

1) เกรด 2014/2024 เป็น High Strength Alloys สามารถตัดแต่งชิ้นงานได้ดีเยี่ยม เพื่อทำชิ้นส่วนอุปกรณ์ในเครื่องบิน (Aircraft) มีข้อจำกัดด้านการขึ้นรูป และทนทานต่อการกัดกร่อนในอุณหภูมิสูงได้บ้างเท่านั้น ไม่แนะนำให้เชื่อมด้วยวิธี Fusion Welding เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น เครื่องบินและเครื่องจักรกล เฟือง ข้อต่อ ตัวถังรถยนต์ เป็นต้น

2) เกรด 6082 (สภาพจำหน่ายเป็น Heat Treated)/6061 (Common in USA) –ใช้กับงานโครงสร้างที่ต้องการความแข็งแรงน้อย – ปานกลาง สามารถขึ้นรูป/ เชื่อม/ ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี มีความแข็งหลังการทำ Heat Treatment เนื่องจากสูญเสียความแข็งระหว่างการเชื่อม

3) เกรด 7020 สามารถตัดแต่งได้ดี เหมาะกับการใช้งานบนพื้นดิน

4) เกรด 7075 (Aircraft Alloys) – แข็งแรงสามารถตัดแต่งดี ไม่เหมาะกับงานเชื่อม/สภาวะการกัดกร่อน

2.1.5.2 กลุ่ม Tooling Plate1) Cast Plate ผ่านการอบคลายเครียด (Thermal Stress Relieved) มาแล้วเหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง (Precision Application) เช่น แผ่นยึดอุปกรณ์ต่างๆสามารถเชื่อม/เคลือบสี และมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดีไม่เหมาะกับการขึ้นรูป

1) เกรด Rolled Plate คือ 5000 series เป็นเกรดที่มีความเสถียรและเที่ยงตรงสูง

2) เกรด 5558 ถูกออกแบบเพื่อใช้เป็นเครื่องมือ โดยเฉพาะฐานเครื่องจักร สามารถเชื่อม ขัดเงา เคลือบสี

2.1.6 การกำกับภาวะประสงค์ (Temper)

สำหรับอลูมิเนียมและอลูมิเนียมผสมภาวะประสงค์ (Temper) หมายถึง สภาพของโลหะที่ผ่านกรรมวิธีโลหะกรรมต่างๆ จนแสดงสมบัติทางกายภาพและทางกลเป็นที่พึงปรารถนาของผู้ใช้ สัญลักษณ์ที่ใช้กำกับภาวะประสงค์ (Temper) ของโลหะผสมอลูมิเนียมแสดงด้วยตัวอักษรในตารางที่ 2.2 และ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 แสดงภาวะประสงค์ (Temper) ของโลหะผสมอลูมิเนียม

ตัวอักษร	เงื่อนไขของโลหะผสม
F	สภาพเดิมที่ผ่านการขึ้นรูปตามปกติ (As Fabricated)
O	การอบอ่อน (Annealed)
H	เย็น (Cold Working)
T	กระบวนการทางความร้อน (Heat Treated)

ตัวอักษร H และ T โดยทั่วไปจะแสดงตัวเลขบางอย่าง ซึ่งแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับขบวนการทางความร้อนของโลหะผสมโดยเฉพาะ ยกตัวอย่างเช่น

H1 แสดงเฉพาะความแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเครียด

H2 ความแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเครียด

H3 ความแข็งที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเครียด มีความสำคัญทำให้โลหะเกิดความเสถียร โดยมีการอบอ่อนที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.3 แสดงสัญลักษณ์การทำเทมเปอร์ (Tempering)

T1	ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงตามปกติในบรรยากาศปกติ แล้วบ่มแข็งธรรมชาติ (Naturally Aged) โดยสภาพชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลง
T2	ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงในบรรยากาศปกติ ความแข็งจะเกิดขึ้นจากการใช้งานที่อุณหภูมิปกติ (Cold Worked) โดยธรรมชาติ
T3	นำชิ้นงานไปอบละลาย (Solution Heat Treated, SHT) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปเย็น ตามด้วยการบ่มแข็งธรรมชาติ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน
T4	นำชิ้นงานไปอบละลายตามด้วยการบ่มแข็งธรรมชาติเพื่อให้ความแข็งคงที่
T5	ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงในสภาพเดิม แล้วนำไปทำการบ่มเทียม (Artificial Aged)
T6	นำชิ้นงานไปทำการอบละลายแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จากนั้นนำไปบ่มเทียม
T7	ทำการอบละลายและทำความแข็งคงที่ (Stabilized) โดยการบ่มนานเกินไป
T8	ทำการอบละลายตามด้วยขบวนการขึ้นรูปเย็น จากนั้นนำไปบ่มเทียม
T9	ทำการอบละลายตามด้วยตามด้วยการบ่มเทียม จากนั้นตามด้วยขบวนการขึ้นรูปเย็น
T10	ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวลงตามปกติแล้วนำไปผ่านขบวนการขึ้นรูปเย็น จากนั้นนำไปบ่มเทียม

2.1.7 โลหะอลูมิเนียมผสม หมายเลข 6061

อลูมิเนียมผสม 6061 มีส่วนผสมทางเคมีแสดงดังตารางที่ 2.4 นอกจากนี้ยังมีสมบัติทางอุณหภูมิ และสมบัติเชิงกลที่สำคัญ แสดงไว้ในตารางที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 แสดงส่วนผสมทางเคมีของอลูมิเนียมผสม 6061

เกรด			ส่วนผสมทางเคมี wt%					
Al	USN No.	ISO No. R209	Mg	Si	Fe	Cu	Zn	Bal Al
			0.8 - 1.2	0.4 - 0.8	Max. 0.7	0.15 – 0.4	Max. 0.25	
6061	A96061	Al Mg l Si Cu	Ti	Mn	Cr	Other(total)	Other(each)	
			Max. 0.15	Max. 0.15	0.04 - 0.35	Max. 0.15	Max. 0.05	

ตารางที่ 2.5 แสดงสมบัติทางอุณหภูมิ (Thermal Properties) ของอลูมิเนียมผสม 6061

สมบัติทางอุณหภูมิ (Thermal Properties)	
อุณหภูมิหลอมเหลว (Liquidus Temperature)	652°C
อุณหภูมิการแข็งตัว (Solidus Temperature)	582°C
การขยายตัวที่ 20 ถึง 100°C	23.6 μm/m.k
ความร้อนจำเพาะ	896 J/kg.K

ตารางที่ 2.6 แสดงสมบัติเชิงกลของอลูมิเนียมผสม 6061

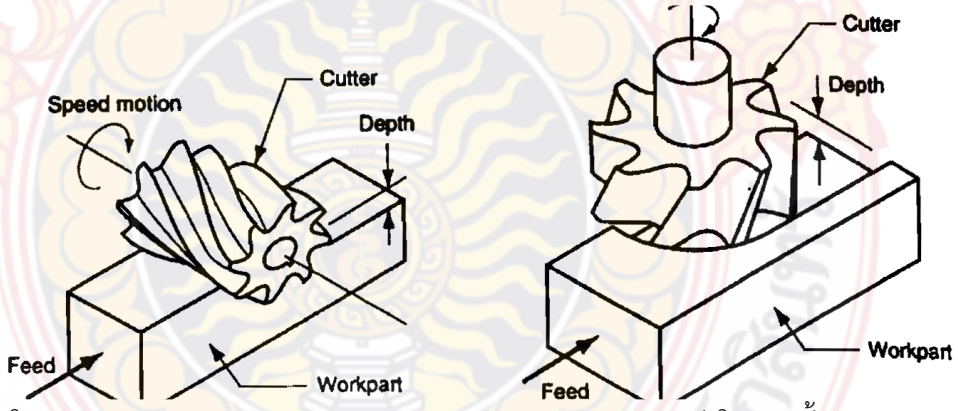
Temper	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Hardness (MPa)	Elongation % (Ø13 mm)
O	124	55	83	30	30
T4, T451	241	145	165	65	25
T6, T651	310	276	207	95	17

<u>หมายเหตุ</u> ข้อมูลในการวัดความแข็ง (Hardness) ใช้นำหนักกด 500 kg หัวกดบอลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 mm และระยะเวลาในการรับน้ำหนักกด 30 นาที

การประยุกต์ใช้งาน (Application) อลูมิเนียมผสม 6061 ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานโครงสร้างอากาศยาน เช่น โครงร้างปีกเครื่องบิน ซึ่งโดยทั่วไปอลูมิเนียมผสม 6061 จะถูกนำมาใช้งานในโครงสร้างเครื่องบินมือสมัครเล่นมากกว่า เครื่องบินทหารหรือเครื่องบินพาณิชย์ นิยมนำไปใช้งานที่ต้องการความแข็งสูงร่วมกับความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีเยี่ยม เช่น งานเป่าพลาสติก ราวสะพาน โครงสร้างอาคาร (หมุดย้ำ) และในยานพาหนะต่างๆ เช่น เรือ รถบรรทุก เฟรมรถจักรยาน และใช้ในชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น Wheel Spacers เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ผลิตกระป๋องสำหรับบรรจุอาหาร และเครื่องดื่ม งานท่อขนส่งงานทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์

2.2 งานกัด [3]

การกัด หรือการมิลลิ่ง คือการตัดชิ้นงานจากเครื่องมือหมุน (Rotating tool) หรือมีดหมุน ถ้าเป็นการกัดจากเครื่องกัดอัตโนมัติ จะเคลื่อนที่ 2 แกน แต่ถ้าเครื่องกัดจากเครื่อง CNC milling จะเคลื่อนที่ได้ 3 แกน เครื่องกัดจะดูเหมือนเครื่องเจาะ แต่บล็อกที่ใช้จับชิ้นงานจะสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวแกน X และ Y ซึ่งเครื่องเจาะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ มีดหมุนจะนำเอาชิ้นงานในส่วนที่ไม่ต้องการออก เพื่อให้ได้รูปร่างตามที่กำหนดเครื่องกัดเป็นเครื่องจักรที่สำคัญในกระบวนการผลิตชิ้นงาน ซึ่งชิ้นงานส่วนใหญ่ จำเป็นต้องผ่านกระบวนการนี้การกัดสามารถทำได้ทั้ง 2D และ 3D ตัวอย่างชิ้นงาน เช่น เครื่องยนต์ชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องจักรกล ฝาครอบ Jig และ Fixture เป็นต้น ล้วนต้องผ่านกระบวนการกัดทั้งสิ้น วัสดุที่สามารถใช้กับเครื่องจักรได้ กลุ่มที่มีความแข็ง คือ อลูมิเนียม สแตนเลส ทองแดง เหล็ก ทองเหลือง เป็นต้น ส่วนกลุ่มที่แข็งไม่มาก คือ ไนลอน เทปล่อน เป็นต้น งานกัดแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ งานกัดในแนวนอน (Peripheral Milling) และงานกัดในแนวตั้ง (Face Milling) ดังภาพที่ 2.1



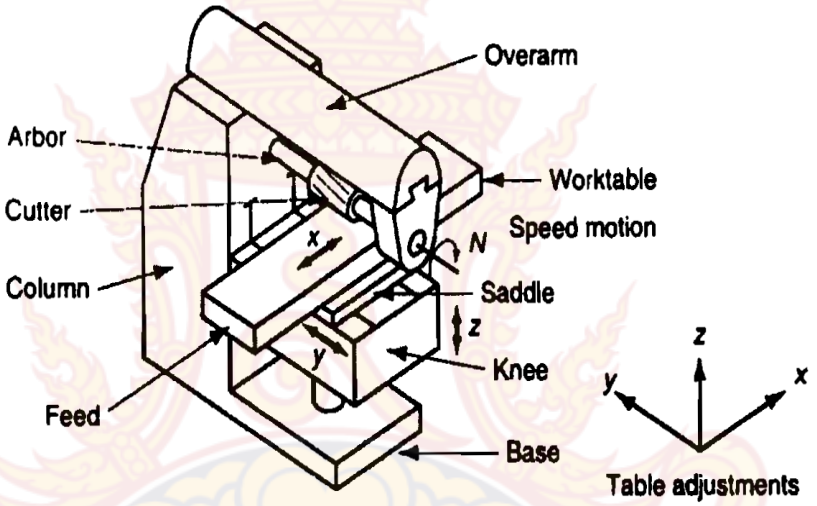
(ก) งานกัดในแนวนอน (Peripheral Milling) (ข) งานกัดในแนวตั้ง (Face Milling)

ภาพที่ 2.1 ลักษณะของการกัด [3]

2.2.1 เครื่องกัด

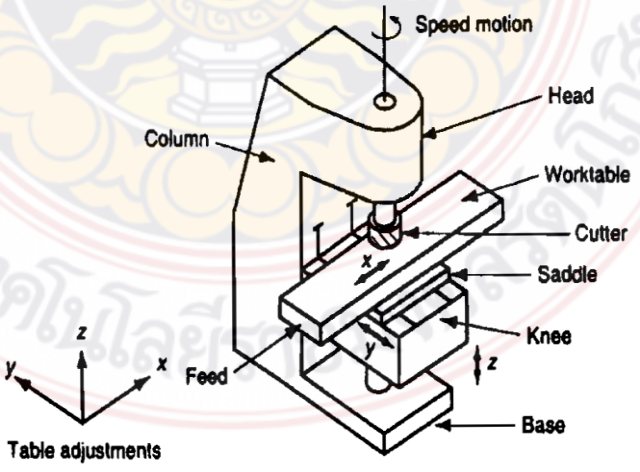
เครื่องกัด (Milling Machines) ที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปโลหะมีให้เลือกใช้หลายแบบขนาด โดยเครื่องที่นิยมใช้กันทั่วไปมีอยู่ *2* แบบ คือ แบบที่แกนหมุนของมีดอยู่ในแนวระนาบ หรือ เครื่องกัดเพลานอน (Plain Milling Machines) ส่วนอีกแบบหนึ่งมีแกนหมุนของมีดจะอยู่ในแนวตั้ง เรียกว่า เครื่องกัดเพลาตั้ง (Vertical Milling Machines) เครื่องกัดมีให้เลือกใช้หลายขนาด

2.2.1.1 เครื่องกัดเพลานอน เป็นเครื่องที่มีเพลาจับมีดอยู่ในแนวนอน และมีโต๊ะสำหรับจับชิ้นงาน หรือปากกาจับงานทั้งแบบธรรมดา (Plane Table) และโต๊ะงานปรับองศาได้ (Universal Table) นิยมใช้กัดงานทั่วๆไป ทั้งกัดผิวราบ กัดมุม กัดร่องและกัดเฟือง ดังแสดงในภาพที่ 2.2



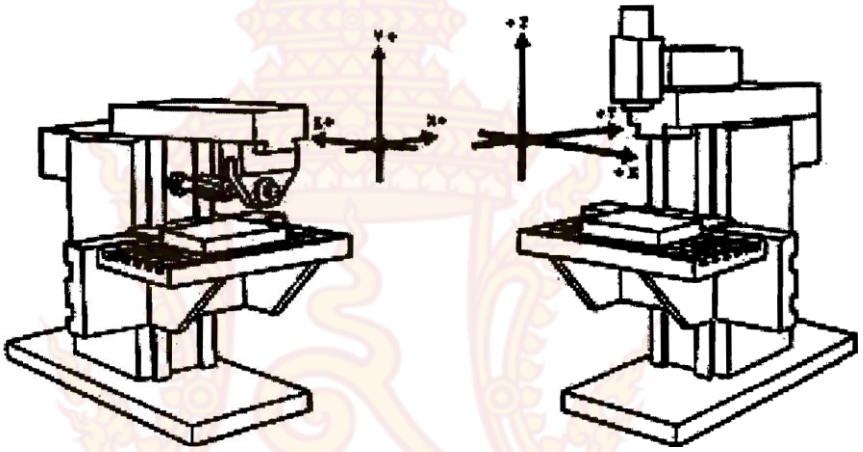
ภาพที่ 2.2 ลักษณะของการเครื่องกัดเพลานอน [*3*]

2.2.1.2 เครื่องกัดเพลาตั้ง เป็นเครื่องกัดที่มีเพลาจับมีดกัดอยู่ในแนวตั้งหรือแนวดิ่ง และสามารถปรับเป็นมุมต่างๆได้ โต๊ะงานมีทั้งแบบธรรมดาและแบบปรับองศาได้ นิยมใช้ในการกัดร่องแบบต่างๆ ด้วยเอ็นมิลล์ (End mill) หรือมีดกัดที่ใช้กับเครื่องกัดตั้ง การคว้านรู เป็นต้นดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของการเครื่องกัดเพลาตั้ง [3]

2.2.1.3 เครื่องกัดซีเอ็นซี เป็นเครื่องจักรกลอีกประเภทหนึ่งที่มีขอบข่ายการทำงานค่อนข้างกว้าง กล่าวคือ นอกจากจะสามารถทำงานกัดเช่นเดียวกับเครื่องทั่วไปแล้ว ยังสามารถทำงานอื่นๆ เช่น เจาะรู ทำเกลียว คว้านรู ได้อีกด้วย โดยทั่วไปเครื่องกัดซีเอ็นซีจะแบ่งออกได้เป็นเครื่องกัดซีเอ็นซีเพลานอนและเพลาตั้งเหมือนกัน เครื่องกัดซีเอ็นซีจะมีแกนการควบคุมตั้งแต่ 3 แกน 4 แกน 5 แกน และมากกว่า ดังแสดงในภาพที่ 2.4 [4]



ภาพที่ 2.4 เครื่องกัดซีเอ็นซีเพลานอนและเพลาตั้ง [4]

2.3 เครื่องจักรที่ใช้ควบคุมคอมพิวเตอร์ (CNC Machine) [4]

2.3.1 ความหมายของเครื่องจักรกลทั่วไป และเครื่องจักรกลซีเอ็นซี

เครื่องจักรกลทั่วไปที่ใช้ในการตัดเฉือนชิ้นงาน เช่น การเปิดและการปิดสวิตซ์ควบคุมการหมุนของเพลาหัวเครื่อง การเปลี่ยนอัตราป้อน และความเร็วรอบ เป็นต้น ในการปฏิบัติหน้าที่ต่างๆ เหล่านี้ช่างผู้ควบคุมเครื่องจำเป็นต้องใช้วิจารณญาณ และการตัดสินใจการแก้ปัญหา เครื่องจักรกลซีเอ็นซี การเคลื่อนที่ต่างๆ ที่จำเป็นในการผลิตชิ้นงาน จะทำงานโดยอัตโนมัติด้วยตัวเครื่องจักรเอง ตามข้อมูลตัวเลข (Numerical Information) ที่ป้อนให้กับระบบควบคุมของตัวเครื่องจักรกล ในรูปแบบรหัสที่ระบบควบคุมเครื่องที่สามารถใช้ได้

2.3.2 ความแตกต่างระหว่างเครื่องจักรกลซีเอ็นซีแทนการใช้เครื่องจักรกลทั่วไป

ระบบซีเอ็นซีเป็นระบบที่พัฒนามาอย่างต่อเนื่องมาจากเครื่องจักรกลทั่วไป ดังนั้นความแตกต่างระหว่างเครื่องจักรกลทั่วไป ก็จะอยู่ตามความสามารถของระบบควบคุม นั่นคือคอมพิวเตอร์เมื่อระบบซีเอ็นซีไปควบคุมเครื่องจักร ความสามารถในงานเชื่อมต่างๆจะเพิ่มมากขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องจักรกลทั่วไป ดังนี้

2.3.2.1 การแสดงภาพจำลอง (Simulation) ทำงานตามโปรแกรมที่ป้อนเข้าไปในระบบจอภาพ

2.3.2.2 ความจุของหน่วยความจำเพิ่มมากขึ้น สามารถเก็บข้อมูลโปรแกรมได้มาก

2.3.2.3 การแก้ไขและลบโปรแกรมสามารถกระทำด้วยเครื่องจักรโดยตรง

2.3.2.4 สามารถส่งข้อมูลไปเก็บไว้ในหน่วยความจำภายนอกได้

2.3.2.5 ระบบความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น

2.3.2.6 การชดเชยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดและการส่งกำลัง

2.3.2.7 มีโปรแกรมสำเร็จสำหรับการคำนวณหาค่าต่างๆ เช่น ความเร็วรอบ อัตราป้อน เป็นต้น

2.3.3 ข้อดีของการใช้เครื่องจักรกลซีเอ็นซีที่มาในการตัดโลหะแทนการใช้เครื่องจักรกลทั่วไป

2.3.3.1 มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง การเปลี่ยนแปลงงานใหม่จะแก้หรือเปลี่ยนแปลงเฉพาะโปรแกรมเท่านั้น

2.3.3.2 ความเที่ยงตรงสูง (Accuracy) จะอยู่ในระดับเดียวกันตลอดในช่วงความเร็วและการป้อนที่ใช้ในการผลิต

2.3.3.3 ใช้เวลาในการผลิตสั้นกว่า

2.3.3.4 สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปทรงซับซ้อน

2.3.3.5 การปรับตั้งเครื่องจักรกระทำได้ง่าย ใช้เวลาน้อยกว่าการผลิตด้วยวิธีอื่น

2.3.3.6 การตรวจสอบคุณภาพไม่จำแนกต้องทำทุกขั้นตอนและทุกชิ้น

2.4 เครื่องมือตัดสำหรับงานกัด

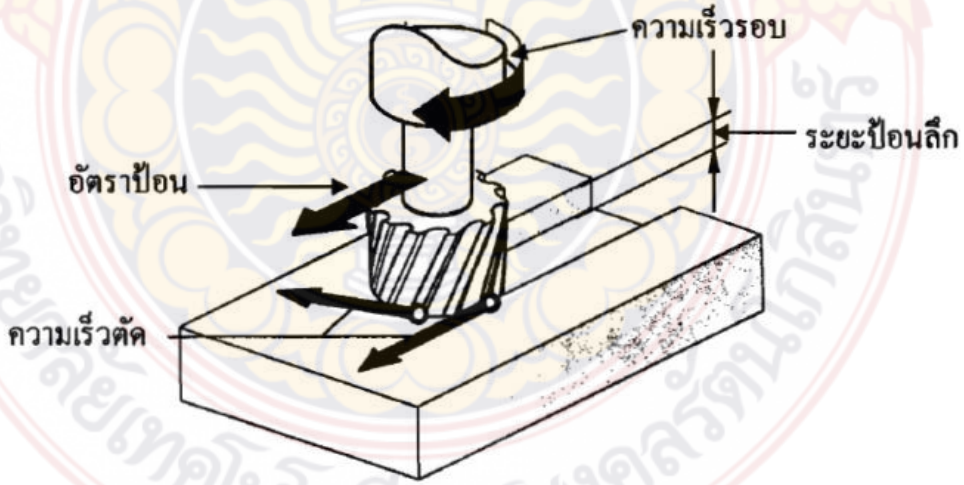
เครื่องมือตัดที่ใช้ในงานกัดโดยทั่วไป ได้แก่มีดกัดราบ (Plain Cutter) มีดกัดร่อง (End Mill) มีดกัดตั้ง (Shell Cutter) มีดกัดข้าง (Side Cutter) มีดกัดเฟือง (Gear Cutter) มีดกัดชนิดถอดเปลี่ยน

คมตัดได้ (Index able Cutter Tools) มีดกัดร่องหางเหยี่ยว (Dovetail) มีดกัดร่อง T-Slot และมีดกัดปลายมน (Radius Cutter) เป็นต้น [4] ดังแสดงในภาพที่ 2.7

ภาพที่ 2.5 เครื่องมือตัดสำหรับการกัดงานในลักษณะต่าง ๆ [5]

2.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับงานกัด

ในการกัดค่าตัวแปรที่ถูกนำมาพิจารณาในกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องกัดมากที่สุด ประกอบด้วยความเร็วตัด (Cutting Speed) อัตราป้อน (Feed Rate) และความลึกของการตัดเฉือน (Deep of Cut) โดยที่ค่าตัวแปรทั้ง 3 นี้ จะเป็นตัวชี้วัดสมรรถภาพของกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงาน ดังนั้นในการพิจารณาเลือกค่าตัวแปรทั้ง 3 นี้ ควรคำนึงถึงความสามารถในการตัดเฉือนของเครื่องมือตัด กำลังม้าที่ใช้ในการขับเพลาจับเครื่องมือตัด และความแข็งแกร่ง (Rigidity) ของชิ้นงาน และอุปกรณ์จับยึด [4]



ภาพที่ 2.6 ความเร็วรอบ ความเร็วขอบ ความเร็วตัด อัตราป้อน และระยะป้อนลึก [4]

2.5.1 ความเร็วรอบ

ความเร็วรอบ (Speed) หมายถึงความเร็วรอบของมีดกัดที่หมุนได้ในเวลา 1 นาที มีหน่วยนับเป็นจำนวนรอบต่อนาที (Revolution Per Minute : RPM) การใช้ความเร็วรอบที่เหมาะสมจะส่งผลให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดยาวขึ้น และทำให้งานออกมามีคุณภาพผิวงานดี ใช้เวลาในการทำงานน้อย เนื่องจากไม่ต้องเสียเวลาในการลับหรือเปลี่ยนมีดกัด โดยมีวิธีการคำนวณหาความเร็วรอบได้ดังนี้ [6]

$$N = \frac{1{,}000 \times V}{\pi \times D}$$

เมื่อ N = ความเร็วรอบของเครื่องมือตัด (รอบ/นาที)

V = ความเร็วตัดของเครื่องมือตัด (เมตร/นาที)

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัด (มิลลิเมตร)

2.5.2 ความเร็วตัด

ความเร็วตัด (Cutting Speed) ในกระบวนการขึ้นรูปทางกลด้วยเครื่องมือกัด หมายถึงความเร็วขอบ ณ จุดที่เกิดการตัดเฉือนของเครื่องมือตัด ในขณะที่เครื่องมือตัดเดินตัดเฉือนบนผิวชิ้นงาน ในการเลือกค่าความเร็วตัดนั้น ควรพิจารณาถึงองค์ประกอบ ดังนี้ เช่น ความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุชิ้นงานวัสดุ และรูปทรงเลขาคณิตของเครื่องมือตัด การหล่อเย็น อัตราป้อน ความลึกของการตัดเฉือน และกำลังม้าในการขับเพลาจับยึดเครื่องมือตัด เป็นต้น [6] โดยมีวิธีการคำนวณหาความเร็วได้ดังนี้

$$V = \frac{\pi \times D \times N}{1{,}000}$$

เมื่อ V = ความเร็วตัดของเครื่องมือตัด (เมตร/นาที)
N = ความเร็วรอบของเครื่องมือตัด (รอบ/นาที)
D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องมือตัด (มิลลิเมตร)

2.5.3 อัตราป้อน

อัตราป้อน (Feed) หมายถึง ความสามารถในการเคลื่อนที่ของมีดตัด หรือการเคลื่อนที่ของงาน ต่อการหมุนของชิ้นงานหรือการหมุนของมีดตัด 1 รอบ การเคลื่อนที่ของมีดตัดหรืองานจะมีหน่วยวัดเป็นมิลลิเมตร ดังนั้นอัตราป้อนจะมีหน่วยวัดเป็นมิลลิเมตรต่อรอบ ถ้าป้อนกินงานทีละน้อย จะสามารถใช้อัตราป้อนได้เร็วกว่าการป้อนกินงานครั้งละมาก ๆ สามารถคำนวณได้จากสมการ [6]

$$Vf = fz \times Z \times N$$

เมื่อ Vf = อัตราป้อน (มิลลิเมตร/ฟัน)
Z = จำนวนฟันของมีดกัด
N = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

ในทางปฏิบัติ ค่าความเร็วตัดและอัตราป้อนในงานกัดนั้น จะดูจากตารางคู่มือมาตรฐาน ซึ่งมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุชิ้นงานและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือตัดดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.7 แสดงสำหรับงานกัดด้วยคัตเตอร์ทำด้วยเหล็ก High speed(1) [6]

กลุ่มวัสดุ	ความต้านทานแรงดึง R_m (N/mm^2)	ความแข็ง (HB)	ความเร็วตัด V_c เป็น (m/min)		ระยะป้อนต่อฟัน f_z (mm) ที่ d3) ≤			
			ไม่เคลือบผิว	เคลือบผิว2)	6	12	20	40
เหล็กอบชุบแล้ว, เหล็ก High speed, เหล็ก Stainless	< 1200	< 380	17	27	0.002 - 0.017	0.013 - 0.11	0.025 - 0.16	0.04 - 0.16
เหล็กหล่อ	-	≤ 150	24	40				
	-	>150	17	27				
Al-หล่อเจือ≤ 6% Si	-	-	90	180	0.003-0.025	0.025-0.09	0.04-0.14	0.06-0.23
Al-หล่อเจือ≥ 6% Si	-	-	55	95				
Al-นวดเจือ	-	-	270	800				

หมายเหตุ

1) ค่านี้กำหนดที่อายุการใช้งานของคมตัด 60 นาที ให้พิจารณาข้อแนะนำของผู้ผลิต

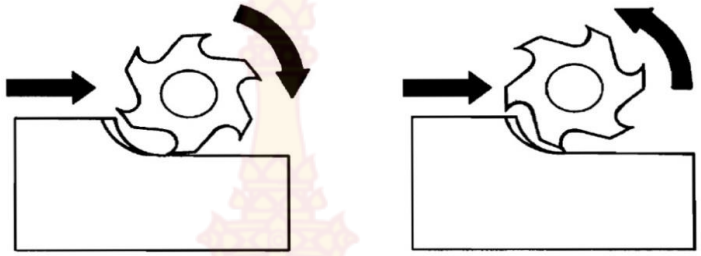
2) การเคลือบผิว: TiN และ TiCN จะทำให้อายุของคมตัดยาวขึ้น

3) เส้นผ่านศูนย์กลางของคัตเตอร์แท่ง

ทิศทางของการกัดนั้นมีอยู่ 2 ทิศทาง นั้นคือ การกัดตามกับการกัดทวน ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนรูปของเศษ (Chip formation) และความดันตัดเฉือน (Cutting pressure)

2.5.3.1 งานกัดตาม (Conventional Milling) ในงานกัดตามความหนาของเศษและความดันในการกัดเฉือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ที่ฟันมีดกัด และจะมีค่าสูงสุดก่อนที่ฟันมีดจะเลื่อนพ้นวัสดุงานเล็กน้อย เมื่อฟันมีดกัดเลื่อนพ้นวัสดุงานแล้ว จะเกิดภาวะที่ติดตามมาคือ ความดันตัดเฉือนจะหมดไปในทันที ทำให้มีดกัดเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยเร็ว และฟันมีดกัดถัดไปจะเลื่อนเข้ากัดวัสดุงานในลักษณะการกระตุก (Jerking) เป็นผลให้เกิดเป็นรอยสั่น (Chatter Marks) ขึ้นที่ผิวงาน ดังภาพที่ 2.9 ก

2.5.3.2 งานกัดทวน (Climb Milling) ในการกัดทวน ลักษณะการเกิดเศษจะกลับกันกับงานกัดตาม กล่าวคือ เมื่อฟันตัดเริ่มเข้าตัดเฉือนชิ้นงาน ความหนาของเศษและความดันตัดเฉือนจะมีค่าสูงสุด และเมื่อฟันมีดกัดเลื่อนออกจากวัสดุงาน เศษจะมีขนาดบางที่สุดและความดันตัดเฉือนมีค่าน้อยสุด ดังนั้น จึงทำให้เกิดรอยสั่นสะเทือนน้อยและชิ้นงานมีผิวสำเร็จที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับงานกัดตาม งานกัดทวนจะใช้เครื่องมือกัดที่มีกำลังน้อยกว่าได้ แต่ต้องการความแข็งแรงของเครื่องกัดมากกว่า และมีโต๊ะงานที่ปราศจากระยะคลอน (Backlash) ดังภาพที่ 2.9 ข [7]

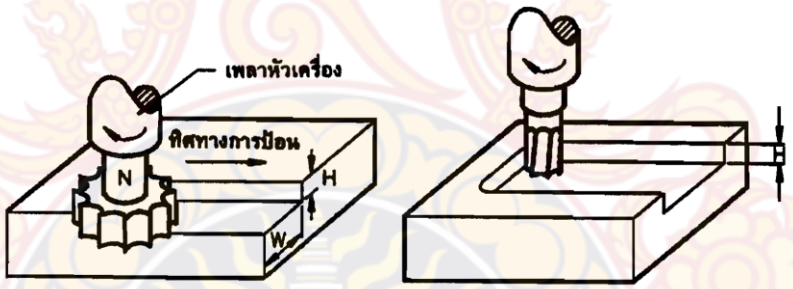


ก) การกัดทวน ข) การกัดตาม

ภาพที่ 2.7 ลักษณะการเคลื่อนที่กัด [7]

2.5.4 ความลึกของการตัดเฉือน

ความลึกหรือความกว้างของการตัดเฉือน (Deep of Cut) หมายถึง ระยะทางที่คมตัดของเครื่องมือตัดหยั่งลึกเข้าไปในชิ้นงานในทิศทางที่ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปความลึกของการตัดหยาบจะมีขนาดมากกว่าความลึกของการตัดละเอียด การกำหนดความลึกของการตัดเฉือนนี้ จะต้องพิจารณาถึงองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ประการคือ แรงม้าในการขับเพลาจับเครื่องมือตัด หรือชิ้นงาน กับความแข็งแกร่งของเครื่องมือตัด หรือความแข็งแกร่งของเครื่องกัด [2]



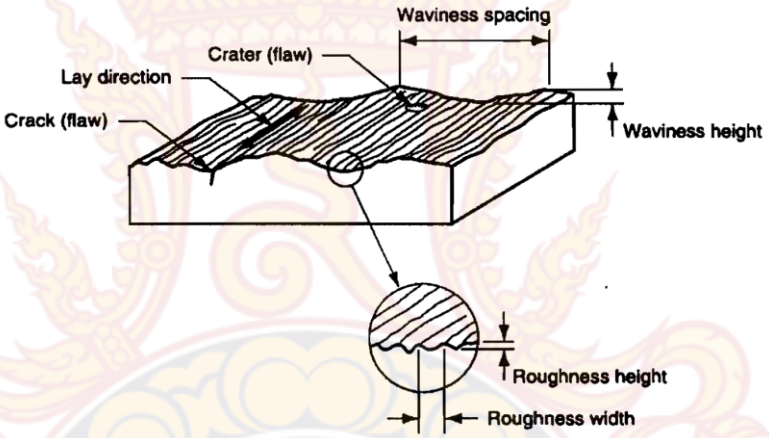
ก) การกัดด้วยมีดปาด (Face Milling) ข) การกัดด้วยมีดกัดเอ็นมิลล์ (End Milling)

ภาพที่ 2.8 แสดงความลึก และความกว้างของการตัดเฉือนในงานกัด [7]

2.6 ความหยาบของผิวงาน [8]

2.6.1 ลักษณะทั่วไปของผิวงานที่ผ่านการแปรรูปและผ่านการตัดเฉือน

ผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ เช่น งานกัด งานกลึง และงานเจียระไน ฯลฯ เมื่อมองด้วยสายตาเราจะเห็นว่าผิวชิ้นงานนั้นมีความหยาบ แต่เมื่อนำมาขยาย ก็จะพบว่าผิวงานเหล่านั้นมีความขรุขระเป็นคลื่น สูง – ต่ำไม่เท่ากัน โดยเฉพาะถ้าผิวของชิ้นงานใดมีความสูง – ต่ำแตกต่างกันมาก ก็แสดงว่าผิวของชิ้นงานนั้นมีความหยาบของผิวมาก แต่ถ้าผิวของชิ้นงานใดมีความสูง – ต่ำน้อย แสดงว่ามีความหยาบของผิวมากหรือละเอียดมากกว่า ซึ่งความหยาบของผิวนี้จะมีความจำเป็นสำหรับงานที่ต้องการความละเอียดสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลบางชนิด เช่น ตลับลูกปืน เป็นต้น แต่สำหรับชิ้นงานบางชนิดก็อาจจะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องระบุความหยาบละเอียดของผิวงาน เพราะจะทำให้เสียเวลาในการผลิต



ภาพที่ 2.9 ภาพขยายของผิวชิ้นงาน [8]

2.6.1.1 ผิวชิ้นงาน (Surface) หมายถึง ขอบเขตหรือบริเวณ ที่แยกออกจากส่วนเนื้อวัสดุงาน รูปร่างและลักษณะผิวงาน ระบุได้ด้วยรูปภาพ (Drawing) หรือคำอธิบายคำจำกัดความ (Descriptive Specifications)

2.6.1.2 รูปทรงผิว (Profile) หมายถึง เส้นที่แสดงลักษณะพื้นผิวงาน ตลอดภาพหน้าตัดที่ถูกนำมาพิจารณา

2.6.1.3 ความหยาบของผิว (Roughness) หมายถึง ความผิดปกติของผิวงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปอันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต

2.6.1.4 คลื่นของผิวงาน (Waviness) หมายถึง ความผิดปกติของผิวงานที่มีระยะในการพิจารณากว้างกว่าช่วงหยาบผิว เกิดขึ้นจากการโก่งตัวของทั้งชิ้นงาน และการหลวมคลอนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รวมทั้งการสั่นสะเทือนขณะทำการขึ้นรูป

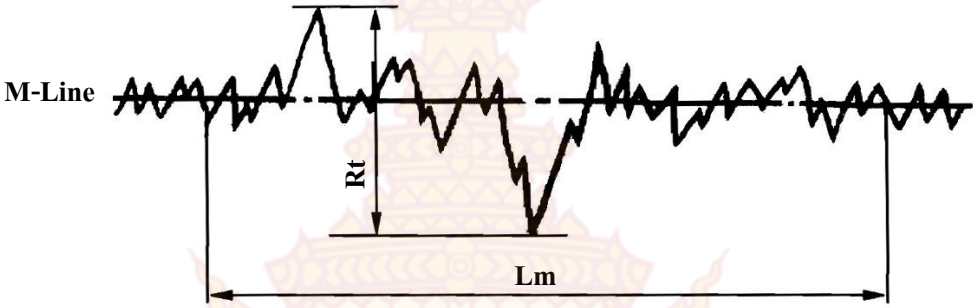
2.6.1.5 Flaw หมายถึง ความผิดปกติของผิวงาน ที่เกิดขึ้นจุดใดจุดหนึ่งบนผิวงาน เช่น รอยขีดข่วน รอยแตก และรูพรุน เป็นต้น

2.6.1.6 Lay หมายถึง แนวทิศทางของรอยสัน ส่วนยอดความหยาบของผิวที่ทำการตรวจสอบ

2.6.2 การวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวงานตามมาตรฐานของ ISO 4287

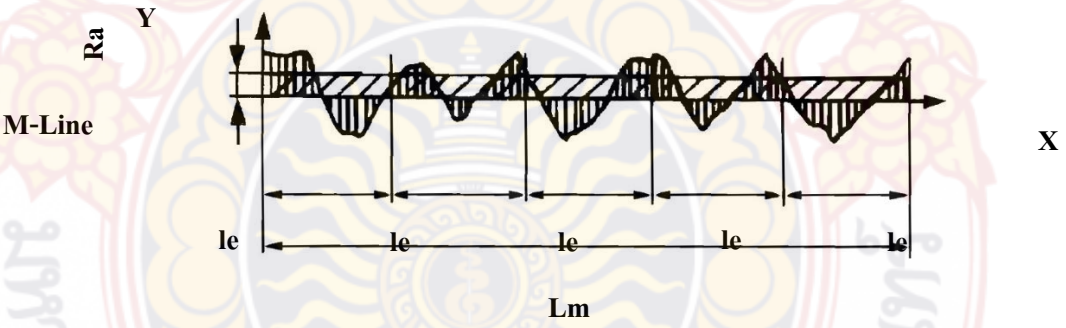
การวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวงานที่จะกล่าวถึงนี้ประกอบด้วย ค่า Rt ,Ra และ Rz ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) โดยแต่ละค่ามีวิธีการวัด ดังนี้ [8]

2.6.2.1 ค่า Rt หมายถึง ค่าวัดจากจุดสูงสุดไปยังถึงจุดต่ำสุดของผิวงาน



ภาพที่ 2.10 การวัดค่า Rt [8]

2.6.2.2 ค่า Ra หมายถึง ค่าที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ของพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M – Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง หารด้วยความยาวเฉลี่ย (Lm) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร



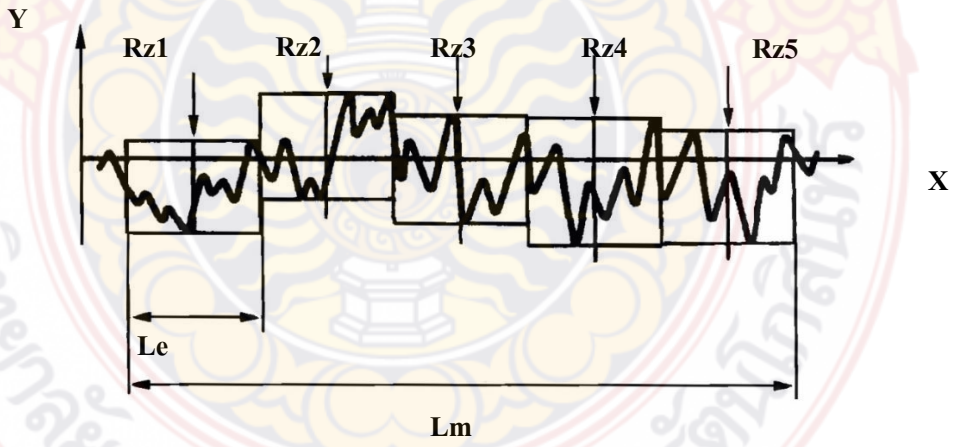
ภาพที่ 2.11 การวัดค่า Ra [8]

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าและขั้นความหยาบของผิวงาน ตามมาตรฐาน ISO1302 – 1978 [8]

ค่า Ra (หน่วย : ไมโครเมตร)	ขั้นความหยาบละเอียดของผิว
50.00	N12
25.00	N11
12.50	N10
6.30	N9
3.20	N8
1.60	N7
0.80	N6
0.40	N5
0.20	N4
0.10	N3
0.05	N2
0.02	N1

หมายเหตุ Ra คือ ค่าที่ได้จากค่าเฉลี่ยเลขคณิต

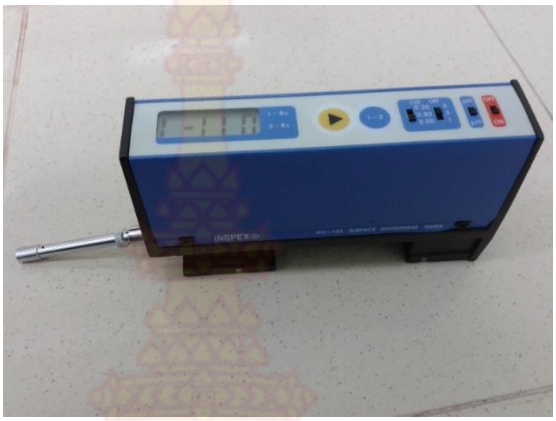
2.6.2.3 ค่าความหยาบ Rz หมายถึง ค่าหาได้จากการวัดทดสอบช่วงเท่า ๆ กัน 5 ช่วง แล้วนำค่าที่ได้มารวมกันแล้วหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตร



ภาพที่ 2.12 การวัดค่า Rz [8]

2.6.3 การตรวจสอบความหยาบละเอียดของผิว

การตรวจสอบความหยาบละเอียดของผิว โดยทั่วไปจะใช้วิธีการตรวจสอบผิวของชิ้นทดสอบเปรียบเทียบกับค่าความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการเจียระไนด้วยเครื่องวัดความหยาบผิว [8]



ภาพที่ 2.13 เครื่องวัดค่าความหยาบละเอียด

2.7 น้ำมันหล่อเย็น [9]

ในงานตัดเฉือนโลหะนั้นจะมีความร้อนสูงมาก ซึ่งอาจสูงถึง 700 องศาเซลเซียส หรือมากกว่า ความร้อนนี้เกิดจากการเสียดสีระหว่างคมตัดกับชิ้นงาน และจากการเปลี่ยนรูปของเนื้อโลหะ (Deformation) ที่ถูกตัดเฉือน หากความร้อนไม่ได้ระบายออกไปโดยเร็ว ความร้อนเกิดการสะสมมากขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้คมตัดเกิดความร้อนจัดและสูญเสียความแข็งและเกิดการสึกหรอในที่สุด ชิ้นงานที่ได้รับความร้อนก็อาจเกิดการบิดเบี้ยว ทำให้ไม่ได้ขนาดและคุณภาพผิวตามต้องการ

2.7.1 หน้าที่ของน้ำมันหล่อเย็น มีดังนี้

2.7.1.1 ระบายความร้อน น้ำมันตัดหรือน้ำมันหล่อเย็น มีหน้าที่ระบายความร้อนออกจากบริเวณการตัด เพื่อทำให้คมตัดและชิ้นงานไม่สูญเสียความแข็ง หรืออ่อนตัวอันเนื่องมาจากความร้อนอีกทั้งยังป้องกันไม่ให้เศษโลหะยึดติดที่ปลายคมตัด ทำให้สามารถตัดเฉือนได้เร็ว

2.7.1.2 หล่อลื่นลดแรงเสียดทาน น้ำมันตัดหรือน้ำมันหล่อเย็น มีหน้าที่หล่อลื่นและลดแรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับคมตัด รวมทั้งลดแรงเสียดทานของเศษโลหะที่เคลื่อนที่ผ่านผิวคายเศษ ทำให้การตัดเฉือนใช้แรงน้อยลง ลดการสึกหรอของคมตัดได้

2.7.1.3 ชะล้างเศษโลหะ น้ำมันหล่อเย็นจะทำหน้าที่ป้องกันสนิมให้กับชิ้นงานในขณะทำการทำตัดเฉือน ซึ่งผิวชิ้นงานบริเวณที่ตัดเฉือนมักจะมีความไวต่อการเกิดสนิมมาก นอกจากนี้น้ำมันหล่อเย็นยังช่วยป้องกันการเกิดสนิมให้กับชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลได้ด้วย

2.7.2 ชนิดของสารหล่อเย็น สารหล่อเย็นแบ่งชนิดตามต้องการใช้ได้ 3 ชนิด ดังนี้

2.7.2.1 ชนิดผสมกับน้ำ (Soluble Oils) น้ำมันชนิดนี้มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่าน้ำมันสบู่ ทำมาจากสารสังเคราะห์หรือน้ำมันแร่ ผสมกับตัวทำลายและสารเพิ่มคุณภาพ เช่น การป้องกันสนิมสารป้องกันการเกิดฟอง สารฆ่าเชื้อ จุลินทรีย์ ใช้สำหรับงานตัดเฉือนโดยทั่ว ๆ ไป เช่น งานกลึง การตัด งานเจาะ งานไส และงานกัด เป็นต้น วิธีการผสมกับน้ำควรใช้น้ำน้ำสะอาดใส่ลงในอ่างหรือภาชนะผสมตามอัตราส่วนโดยทั่วไปจะประมาณ 3 – 5% จากนี้จึงเทน้ำมันสบู่ตามอัตราส่วนลงในน้ำ

2.7.2.2 ชนิดน้ำมัน (Cutting Oils) น้ำมันชนิดนี้จะใช้ในกรณีหล่อเย็นวัสดุที่มีความเหนียวหรือแข็งมาก ๆ โดยทั่วไปจะเป็นน้ำมันแร่กลั่นอย่างดีผสมกับน้ำมันจากพืชหรือสัตว์ เพื่อช่วยการหล่อลื่น สารช่วยเพิ่มคุณภาพในการช่วยรับแรงกดดังนั้นการเลือกใช้ควรคำนึงถึงชนิดของโลหะ ทั้งนี้

เพราะสารช่วยเพิ่มคุณภาพบางชนิดอาจทำให้มีของโลหะเปลี่ยนไป โดยดูคู่มือการใช้ตามที่บริษัทผู้ผลิตกำหนด

2.7.2.3 ชนิดที่มีส่วนผสมทางเคมี (Chemical Cutting Oils) เป็นน้ำยาหล่อเย็นที่เกิดจากการสังเคราะห์ทางเคมี และจะอยู่ในสภาพของสารละลาย เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการหล่อเย็น การหล่อลื่น การสึกหรอ และลดแรงเสียดทานแต่จะขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางสารเคมี และบางชนิดมีส่วนผสมของสาร Extreme – Pressure (EP) ซึ่งจะต่อต้านการเกิดความร้อน และแรงดันสูงเนื่องจากการตัดเฉือน

2.8 วัสดุที่ใช้ผลิตเครื่องมือตัด [10]

วัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตเป็นเครื่องมือตัด (Tool Materials) เช่น มีดกลึง และมีดกัด ที่ใช้ในการตัดเฉือนโลหะ จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่มีความแข็ง ทนความร้อนที่อุณหภูมิสูง ทนต่อแรงกด และแรงดัดงอ ทั้งนี้เพราะในขณะเกิดการตัดเฉือนจะมีแรงต้านจากโลหะ อีกทั้งต้องมีความคงทนต่อความร้อนและทนต่อการสึกหรอสูง เนื่องจากในขณะทำการตัดเฉือนโลหะ จะเกิดการเสียดสีกันระหว่างมีดกัดกับเนื้อโลหะทำให้เกิดความร้อนขึ้นและมีอุณหภูมิที่สูง ซึ่งถ้าวัสดุที่นำมาทำเครื่องมือตัดไม่มีความสามารถในการต้านทานความร้อนที่อุณหภูมิสูงก็จะทำให้วัสดุที่นำมาทำเครื่องมือตัดเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากที่แข็ง และใช้ในการตัดเฉือน อาจกลายเป็นวัสดุที่อ่อนได้ จะเห็นได้ว่าวัสดุเครื่องมือตัดมีความสำคัญอย่างยิ่งในการตัดเฉือนโลหะ นอกจากวัสดุในการทำเครื่องมือตัดเฉือนแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อการตัดเฉือนโลหะอีก เช่น อัตราป้อน ความเร็วรอบ และรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัด

2.8.1 เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสมต่ำ และเหล็กกล้าผสมปานกลาง

เหล็กกล้าคาร์บอน เหล็กกล้าผสมต่ำ และเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Carbon steels and Low/Medium alloy steels) บางครั้งเรียกว่า เหล็กเครื่องมือ (Tool steel) เป็นวัสดุที่มีใช้กันมานานเหล็กเครื่องมือมีส่วนผสมของคาร์บอน 0.90 – 1.30% เมื่อทำการชุบแข็งและเทมเปอร์ (Tempering) แล้วจะมีความแข็งแรงและความเหนียวที่เหมาะสมที่จะใช้ทำเป็นคมตัดได้ แต่ข้อจำกัดของเหล็กเครื่องมือ คือจะสูญเสียความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูงกว่า 190 องศาเซลเซียส

2.8.2 เหล็กกล้าผสมต่ำ และเหล็กกล้าผสมปานกลาง

เหล็กกล้าผสมต่ำ และเหล็กกล้าผสมปานกลาง (Low/medium alloy steels) มีธาตุที่เป็นส่วนผสมหลักคือ โมลิบดีนัม (Mo) โครเมียม (Cr) ซึ่งช่วยเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งได้ดี และทังสเตน (W) โมลิบดีนัมช่วยให้มีความสามารถทนต่อการสึกหรอได้ดียิ่งขึ้น แต่เหล็กผสมก็มีข้อจำกัดเช่นเดียวกันกับเหล็กเครื่องมือ คือจะสูญเสียความแข็งแรงที่อุณหภูมิขณะทำการเทมเปอร์ (Tempering) ที่อุณหภูมิประมาณ 135 – 330 องศาเซลเซียส

2.8.3 เหล็กล้ารอบสูง

เหล็กกล้าผสมสูง (High Speed Steels : HSS) มีคุณสมบัติสูงกว่าเหล็กเครื่องมือสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงถึง 580 องศาเซลเซียส โดยยังมีคุณสมบัติด้านความแข็งแรงไว้ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเหล็กเครื่องมือ เหล็กกล้ารอบสูงมีส่วนผสมหลักคือ เหล็ก โครเมียม วาเนเดียม ทังสเตน โมลิบดีนัม และคาร์บอน ในบางกรณีก็มีการเติมโคบอลต์ด้วย โดยที่ส่วนผสมของธาตุต่าง ๆ จะถูก

ควบคุมให้อยู่ในสัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อที่จะให้เหล็กรอบสูงมีความแข็ง ต้านทานการสึกหรอ และยังคงความเหนียวด้วย

2.8.4 โคบอลต์หล่อผสม

โคบอลต์หล่อผสม (Cast Cobalt Alloys) เป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของโคบอลต์มากกว่าธาตุชนิดอื่น ๆ ที่นำมาผสม ซึ่งจะมีอยู่ประมาณ 38 – 53% และมีธาตุอื่นผสม เช่น โครเมียม ทังสเตน และคาร์บอน โคบอลต์หล่อผสม ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อลดช่องว่างด้านคุณสมบัติระหว่างเหล็กรอบสูง และเหล็กเครื่องมือคาร์ไบด์ ความสามารถในการนำไปใช้งาน จะอยู่กึ่งกลางระหว่างเหล็กรอบสูงและวัสดุซีเมนต์คาร์ไบด์ เมื่อเปรียบเทียบการใช้งานโคบอลต์หล่อผสม สามารถที่จะใช้งานได้ดีกว่าเหล็กรอบสูงทั้งในด้านที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงกว่า โดยที่ยังสามารถคงความแข็งได้ และยังสามารถใช้ความเร็วตัดได้สูงกว่าเหล็กรอบสูงประมาณ 25% อีกด้วย ธาตุที่ช่วยทำให้โคบอลต์หล่อผสมมีความแข็งมากขึ้นคือ โครเมียม และทังสเตน ส่วนผสมอื่นที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติให้ดียิ่งขึ้น คือ วาเนเดียม (V) โบรอน (B) นิกเกิล (Ni) และแทนทาลัม (Ta) เครื่องมือตัดที่เป็นโคบอลต์หล่อผสมจะถูกสร้างขึ้นมาโดยการหล่อให้รูปร่างที่ต้องการก่อนจากนั้น จึงทำการเจียระไนให้ได้รูปร่างที่ต้องการเป็นขั้นตอนสุดท้าย โดยใช้ทำเครื่องมือตัดที่มีรูปร่างที่มาซับซ้อน

2.8.5 ซีเมนต์คาร์ไบด์

ซีเมนต์คาร์ไบด์ (Cement Carbide) หรือ เรียกอีกอย่าง คือ ทังสเตนคาร์ไบด์ จัดเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูง และมีการต้านทานการสึกกร่อนที่สูงด้วย ซีเมนต์คาร์ไบด์ถูกพัฒนาขึ้นไปประเทศเยอรมันในปี ค.ศ. 1920 จุดประสงค์ของการพัฒนาขึ้นมาก็เพื่อใช้งานในการทำแม่พิมพ์ขึ้นรูป และใช้แทนวัสดุอื่นที่มีราคาแพงกว่า ซีเมนต์คาร์ไบด์ที่พัฒนาขึ้นมาครั้งแรกนั้น คือ ทังสเตนคาร์ไบด์ (WC) ซึ่งมีส่วนผสมของโคบอลต์ด้วยวิธีการผลิตซีเมนต์คาร์ไบด์มีด้วยกันหลายวิธี เช่น การหลอมธาตุต่าง ๆ เข้าด้วยกันแล้วหล่อกรรมวิธีซินเตอร์ ภายหลังพบว่า โคบอลต์เป็นตัวที่ทำการผสานโลหะผงได้เข้าด้วยกัน จึงได้มีการพัฒนามาเป็น ทังสเตนโคบอลต์ (WC – Co) และนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายทังสเตนคาร์ไบด์ จะแบ่งเป็น 2 ชนิดคือ ชนิด WC ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 2800 องศาเซลเซียส และชนิด W2C มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 2750 องศาเซลเซียส

2.8.6 เซอร์เมท

เซอร์เมท (Cermeted) เป็นวัสดุเครื่องมือตัดที่ทำการผลิตมาตามกรรมวิธีโลหะผงหรือซินเตอร์ริ่ง มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ เซรามิก และธาตุผสมอื่นๆ เซรามิกที่ผสมลงไปจะเป็นตัวช่วยในการต้านทานความร้อน และการสึกกร่อน ในขณะที่ส่วนผสมของโลหะอื่นเป็นตัวช่วยในด้านความเหนียว การยืดหยุ่น การต้านแรงกระแทก เซรามิกถูกจัดอยู่ในกลุ่มของอโลหะ ซึ่งคุณสมบัติสำคัญ คือ มีความ สามารถในการต้านทานความร้อนสูงในอุตสาหกรรมการผลิตได้แยกเครื่องมือตัดเซอร์เมทออกเป็นสองชนิดคือ ชนิดที่มีไททาเนียมคาร์ไบด์เป็นโลหะฐานและชนิดไททาเนียมคาร์โบไนไตรด์เป็นโลหะพื้นฐาน ในขณะที่ชนิดที่มีทังสเตนคาร์ไบด์เป็นโลหะฐานเรียกว่า ซีเมนต์คาร์ไบด์

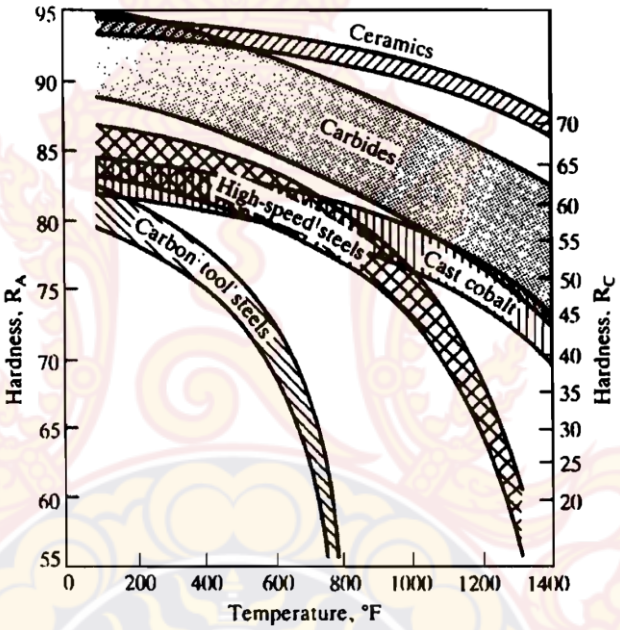
2.8.7 เซรามิก

เซรามิก (Ceramics) จัดเป็นวัสดุเครื่องมือตัดชนิดใหม่ที่นำมาใช้ ซึ่งความสามารถของเซรามิกสามารถที่จะใช้งานได้หลากหลาย เช่น งานตัดปาดผิวที่ละเอียดงานตัดปาดผิวที่ใช้วัสดุอื่นตัดได้ยาก การพัฒนานำเซรามิกมาใช้ได้เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1970 ซึ่งนำมาเพื่อเป็นชิ้นส่วนของงานที่ต้องใช้ใน

อุณหภูมิสูง เนื่องจากเซรามิกเป็นอโลหะ จึงมีความสามารถในด้านการทนอุณหภูมิสูงอยู่แล้วเซรามิกที่ใช้ทำเครื่องมือตัดในปัจจุบันเป็นเซรามิกฐานอะลูมิเนียม (Al203) เซรามิกฐานซิลิกอนไนไตรด์ (Si3N4)

2.8.8 วัสดุเครื่องมือตัดแข็งพิเศษ

วัสดุเครื่องมือตัดแข็งพิเศษมี 2 ชนิด คือ เพชร (Diamond) และ CBN (Cubic Boron Nitride) วัสดุทั้งสองชนิดนี้ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ซึ่งจะใช้สำหรับเป็นเครื่องมือตัด เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างเพชรและ CBN มีลักษณะคล้ายคลึงกันหลายอย่าง ทั้งสองชนิดเป็นวัสดุที่แข็งมากที่สุด



ภาพที่ 2.14 เปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุเครื่องมือตัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ [10]

2.9 มีดกัดและความสึกหรอของมีดกัด [11]

2.9.1 มีดกัด

มีดกัด หรือเอ็นมิลล์ (End mill) ผลิตจากวัสดุหลายชนิด ได้แก่ เหล็กกล้ารอบสูง หมายเลข 1.3343, 1.3243, 1.3247 ตามมาตรา DIN และวัสดุทั้งสเตนคาร์ไบด์ (Solid Tungsten Carbide) การผลิตเอ็นมิลล์ส่วนใหญ่ใช้วัสดุประเภทเหล็กกล้ารอบสูง เช่น ตามมาตรฐาน AISI เหล็กกล้ารอบสูงที่ใช้ผลิตเอ็นมิลล์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ เหล็กกล้ารอบสูงผสมโมลิบดีนัมกับโคบอลต์เป็นหลัก เช่น M30 M33 M34 M42 M43 M46 และM47 เป็นต้น และเหล็กกล้ารอบสูงผสมทังสเตนเป็นหลัก เช่น T4 T5 T6 T8 และT15 เป็นต้น ในการกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์จะพิจารณาจากเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น วัสดุสำหรับผลิตเอ็นมิลล์ วัสดุชิ้นงานที่ทำการตัดเฉือนและเงื่อนไขในการตัดเฉือน เป็นต้น โดยที่ขนาดรูปทรงเรขาคณิตของเอ็นมิลล์นั้นประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

2.9.1.1 มุมคายในแนวรัศมี (Radial Rake Angle)

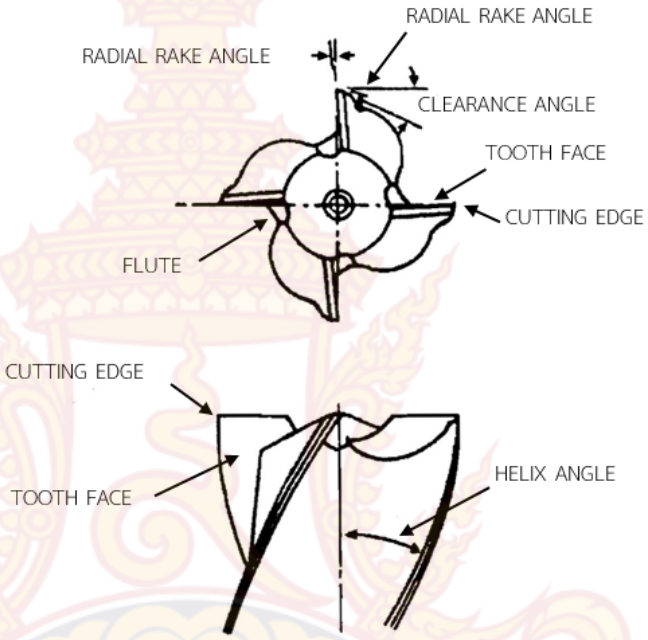
2.9.1.2 มุมหลบในแนวรัศมี (Radial Relief Angle)

2.9.1.3 มุมหลบ (Clearance Angle)

2.9.1.4 มุมเกลียวหรือมุมเฉียง (Helix Angle)

2.9.1.5 ความยาวทั้งหมด (Over Length)

2.9.1.6 ความยาวช่วงคมตัด (Cut Length)

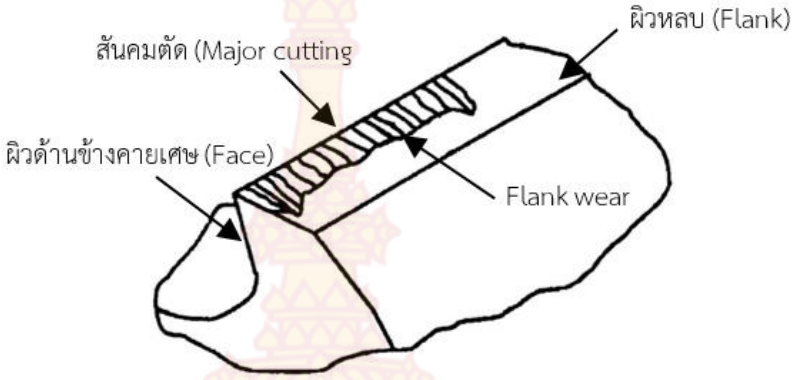


ภาพที่ 2.15 ส่วนประกอบของมีดกัดร่อง (End mill) [11]

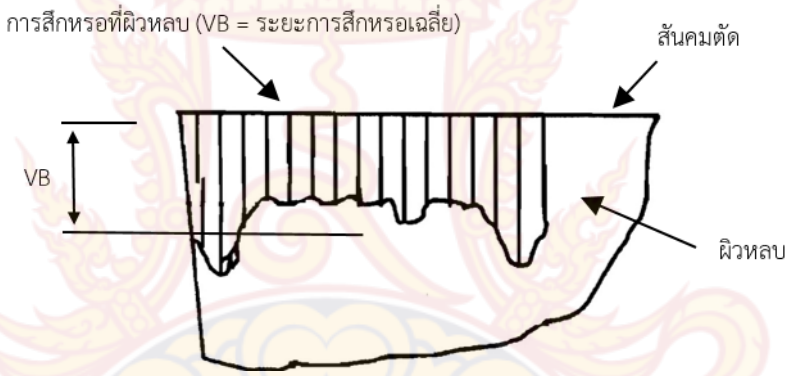
2.9.2 ความสึกหรอของมีดกัด

เครื่องมือตัดขณะที่ตัดเฉือนโลหะจะเกิดความเค้น การเสียดสี และความร้อนสูง ส่งผลทำให้เครื่องมือตัดมีอายุการใช้งานสั้นลง ซึ่งจะปรากฏออกมาในรูปความสึกหรอ (Wear) ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีขนาดผิดไปจากที่ต้องการ และผิวหยาบ อัตราการสึกหรอ ส่วนมากมีสาเหตุมาจาก การเลือกใช้เครื่องมือตัดที่ไม่เหมาะสมกับวัสดุงาน รวมทั้งรูปร่างของวัสดุเครื่องมือตัดด้วย นอกจากนี้ การหล่อเย็นที่ไม่ถูกชนิดหรือการหล่อเย็นไม่ตรงจุด และไม่มีกำลังน้ำหล่อเย็นฉีดแรงเพียงพอ ที่สำคัญคือการเลือกใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่น ความเร็วรอบ ความเร็วตัด และอัตราการป้อนไม่ถูกต้อง การสึกหรอของมีดกัดแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

2.9.2.1 การสึกหรอของคมตัดบริเวณผิวหลบ (Flank Wear) การสึกหรอที่ผิวหลบเป็นการสึกหรอที่เกิดขึ้นกับคมตัดทุกประเภท ซึ่งโดยทั่วไปเป็นการสึกหรอที่เกิดจากชิ้นงานเคลื่อนที่สัมผัสผ่านมีดกัดในขณะเดียวกันก็เกิดเศษตัด (Chip) แยกตัวออกจากชิ้นงาน ถ้าการสึกหรอด้านผิวหลบขยายตัวเพิ่มขึ้น ก็จะมีผลโดยตรงต่อขนาด และคุณภาพของผิวงาน ดังนั้นในการศึกษาการสึกหรอของมีดกัดจะทำการตรวจสอบที่ผิวหลบเป็นหลัก ส่วนการตรวจสอบระยะการสึกหรอที่ผิวหลบ จะเป็นการวัดความกว้างของการสึกหรอตลอดช่วงความลึกในการตัด

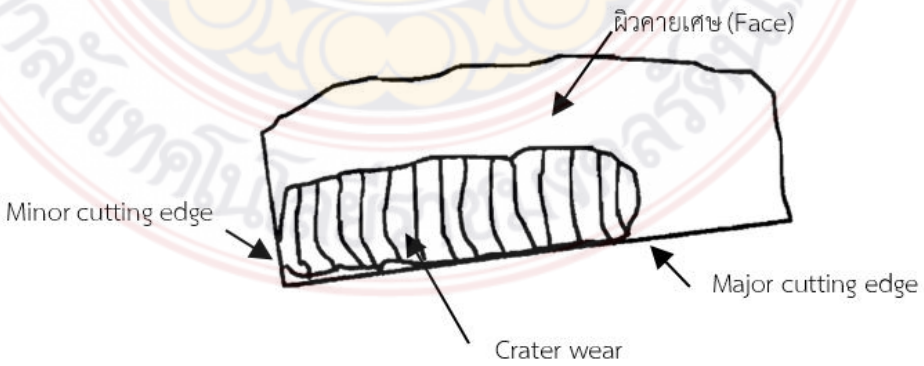


ภาพที่ 2.16 คมตัดและการสึกหรอของผิวหลบของมีด (Flank Wear) [11]



ภาพที่ 2.17 การสึกหรอของผิวหลบ (Flank Wear) [11]

2.9.2.2 การสึกหรอที่ผิวคายเศษของตมตัด (Ceater Wear) การสึกหรอที่ผิวคายเศษเป็นการสึกหรอเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างเศษตัด (Chip) เคลื่อนที่ออกจากบริเวณการสัมผัสผิวคายเศษแต่ละคมตัดของมีดกัด มีแรงเสียดทานและความร้อนเพิ่มขึ้น ก่อให้เกิดการสึกหรอเป็นการสึกหรอที่ผิวคายเศษ



ภาพที่ 2.18 การสึกหรอที่ผิวคายเศษของมีดกัด [11]

2.9.3 สาเหตุการสึกหรอของมีดกัด

โดยทั่วไปสาเหตุการหมดสภาพของเครื่องมือภายใต้การทำงานแบบปกติในการตัดเฉือน จะเป็นการสึกหรอจากการสึกเพียงเล็กน้อยก่อน ต่อจากนั้นเมื่อมีเวลาใช้งานในการตัดเพิ่มขึ้น การสึกหรอของเครื่องมือตัดก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และอัตราการสึกหรอก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งคมตัดไม่สามารถตัดเฉือนโลหะได้ดีเช่นเดิม สาเหตุการสึกหรอของเครื่องมือตัดประกอบด้วย [13]

2.9.3.1 การขัดสี เนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งมากกว่าและเกิดการลื่นไถลในลักษณะการขัดถูทำให้ขอบของคมตัดสึกหรอ

2.9.3.2 การแพร่ความร้อน บริเวณการตัดในสภาวะความร้อนสูง

2.9.3.3 การสึกหรอแบบออกซิเดชั่น การตัดในลักษณะการเกิดออกซิเดชั่น (Oxidation) เช่น ในช่วงอุณหภูมิตัดเฉือนสูง ๆ เป็นต้น

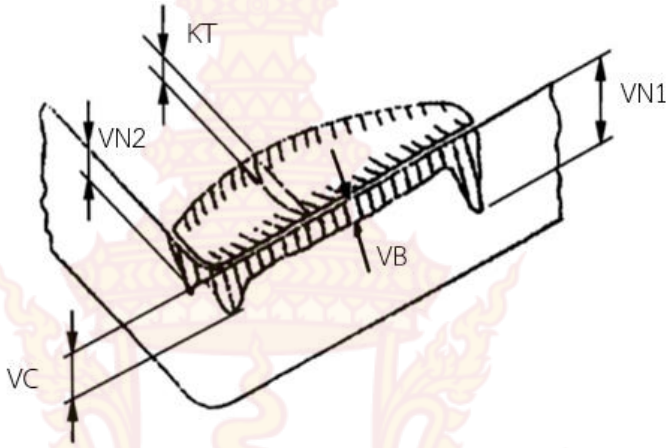
2.9.3.4 การยึดติดระหว่างผิวคายเศษกับเศษตัด สัมผัสกับภายใต้แรงกดและแรงเสียดทาน เมื่อผิวโลหะทั้งสองชนิดถูกประกบติดกัน ภายใต้ภาวะที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้น

2.9.3.5 การสึกหรอทางเคมีและการแตกตัวทางไฟฟ้า การสึกหรอทางเคมีเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเครื่องมือตัดกับชิ้นงาน ถ้าหากมีการหล่อเย็น ขบวนการทางเคมีจะกระทำหรือเกิดขึ้นต่อระบบของสารหล่อเย็น ในขณะทำการตัดเฉือน

นอกจากนี้องค์ประกอบ และเงื่อนไขที่มีผลต่อการสึกหรอของคมตัดบริเวณการตัดเฉือนประกอบด้วย ความลึกในการตัดเฉือน ความเร็วป้อน ความเร็วตัด รูปทรงเรขาคณิต มุมตั้งมีด ความยาวด้ามมีด วัสดุชิ้นงาน ระยะความยาวจากคมตัดบริเวณการตัดถึงจุดจับยึดของด้ามเอ็นมิลล์ปริมาณและชนิดของสารหล่อเย็น เป็นต้น

2.9.4 การวัดขนาดของการสึกหรอของคมตัด

ขนาดของการสึกหรอของคมตัด จะขึ้นอยู่กับสันคมตัดนำ และวัดระยะตั้งฉากกับสันคมตัดก่อนการสึกหรอ (ก่อนใช้งาน) ลงไปถึงเส้นขอบเขตการสึกหรอที่ขนานกับสันคมตัด ซึ่งจะได้ขนาดการสึกหรอเฉลี่ยหรือจนถึงขนาดการสึกหรอสูงสุด [14]



ภาพที่ 2.19 การวัดขนาดการสึกหรอของคมตัด [14]

KT คือขนาดความลึกจากผิวคายเศษถึงที่สึกหรอมากที่สุดโดยวัดตั้งฉากกับผิวคายเศษ

VN1 คือขนาดการสึกหรอของผิวหลบ บริเวณผิวชิ้นงาน โดยวัดตั้งฉากจากสันคมตัดนำถึงตำแหน่งการสึกหรอสูงสุด

VN2 คือขนาดการสึกหรอแบบรอยบาก (Notch wear) ที่ปลายมีดโดยวัดตั้งฉากจากสันคมตัดรองถึงตำแหน่งการสึกหรอสูงสุด

VB คือขนาดการสึกหรอเฉลี่ยของผิวหลบ โดยวัดตั้งฉากจากสันคมตัดนำถึงตำแหน่งการสึกหรอโดยเฉลี่ยจากระยะตัดลึก

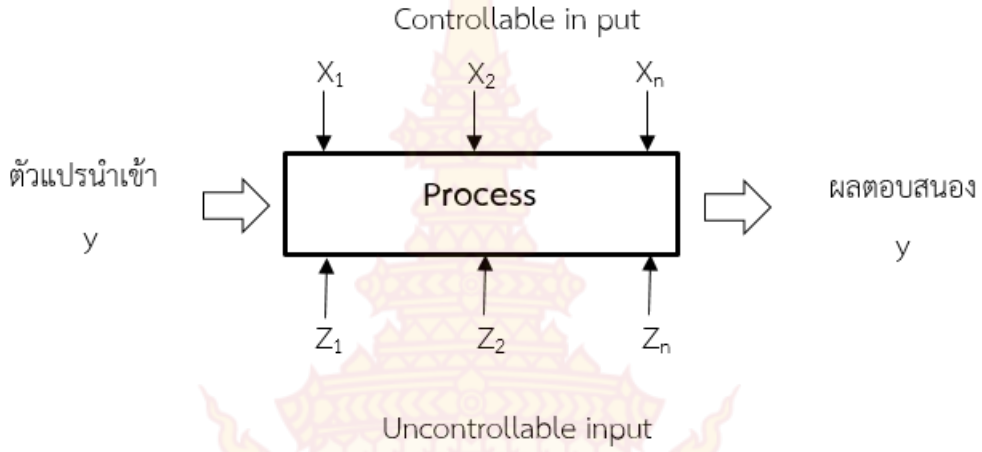
VC คือขนาดการสึกหรอแบบรอยบาก

2.10 การออกแบบการทดลอง [12]

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) คือ การทดสอบหรือชุดการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์ที่จะเปลี่ยนปัจจัย (Factor) นำเข้าของกระบวนการ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของผลตอบ (Response) ดังแสดงดังภาพที่ 2.22 มีวัตถุประสงค์ คือ ต้องการพัฒนาขบวนการที่มีความเข้มแข็งโดยขบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักรวิธีการ ทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนปัจจัยเข้ามา เช่น วัตถุดิบ ไปสู่ผลลัพธ์ขาออกที่มีผลตอบออกมาหนึ่งผลตอบ หรือมากกว่านั้นก็ได้ โดยกำหนดตัวแปร Z1 Z2….Zm เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Uncontrollable)และบางครั้งเรียกว่า ปัจจัยรบกวน (Noise) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองมีดังนี้

1. การหาตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ y
2. การหาวิธีตั้งค่า x ที่มีค่าผลผลตอบ y เพื่อทำให้ได้ค่า y ตามต้องการ

3. การหาวิธีตั้งค่า x ที่มีค่าผลให้เกิดความแปรปรวนในค่า y น้อยที่สุด
4. การหาวิธีตั้งค่า x ที่มีค่าผลให้ตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ z มีค่าต่ำสุด



ภาพที่ 2.20 แบบจำลองทั่วไปของกระบวนการ [12]

2.10.1 หลักพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลอง คือ

2.10.1.1 การทดลองซ้ำ (Replication) ทำให้เพื่อทราบตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้จำนวนซ้ำของการทดลองที่ทำให้มีโอกาสที่จะพบผลที่มีในสำคัญทางสถิติ (Signal) ในขอบเขตของความแปรปรวนในกระบวนการทางธรรมชาติ (Noise) ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือสามารถหาค่าประมาณความผิดพลาดของการทดลองได้ตัวประมาณค่าของความผิดพลาดนี้จะกลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาความแตกต่างของข้อมูลที่ได้มาจากการทดลอง ดังนั้นการทดลองซ้ำทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

2.10.1.2 การสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งจะเป็นลำดับการสุ่ม (Random) วิธีการเลือกสถิติการกำหนดข้อมูล (หรือความผิดพลาด)จะต้องเป็นตัวแปลแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การสุ่มลำดับการทดลอง จะทำให้สมมุติฐานเป็นจริง การสุ่มลำดับการทดลองสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

2.10.1.3 บล็อกกลิ้ง (blocking) เป็นเทคนิคสำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่ การทดลองบล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุการเปรียบเทียบเงื่อนไขที่หน้าสนใจต่างๆแต่ภายในบล็อกซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ทำให้ทราบแหล่งของความแปรปรวนโดยการแบ่งอันดับของการทดลองให้อยู่ในบล็อกเดียวกันที่มีความคล้ายกันและใช้หลักการทางพีชคณิตแยกความแตกต่างออกมา เพื่อเพิ่มความไวของการทดสอบ

2.10.2 ข้อดีข้อการออกแบบการทดลอง คือ ให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าของตัวเลขทางสถิติที่แสดงระดับความสำคัญที่ส่งผลต่อขบวนการ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหาที่ใช้วิธีการทางสถิติในการออกแบบการวิเคราะห์การทดลองมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนเกี่ยวข้องจะต้องมีความ

เข้าใจ ล่วงหน้า เรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไรและวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินงานอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

2.10.2.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา พัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์การทดลอง และบ่อยครั้งเราจะต้องหาข้อมูล สำหรับป้อนป้อนเข้าจากบุคคลที่มีความรู้ความชำนาญในแต่ละด้านนั้นเป็นองค์ประกอบหนึ่งของการออกแบบการทดสอบเพราะเป็นกลุ่มที่ต้องเริ่มต้นของการดำเนินงานคือ การใช้ประสบการณ์คาดคะเนว่าปัจจัยใดบ้างที่มีผลต่อปัญหาที่เราหน้าสนใจ หากไม่มีในส่วนของประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญเข้ามาเกี่ยวข้องการออกแบบการทดลองก็ยังดำเนินต่อไปแต่จะใช้เวลาที่นานขึ้นเพราะต้องเสียเวลาในการตรวจสอบทุก ๆ ปัจจัยที่มีอยู่ทั้งหมด

2.10.2.2 เลือกปัจจัยระดับ และขอบเขตผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่นำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้เปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่เกิดขึ้นในการทดลองจะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นผู้ทดลองจะต้องมีความรู้จากทฤษฎี มีการตรวจสอบดูว่าปัจจัยที่กำหนดขึ้นมามีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลอง (Screening) ซึ่งต้องเลือกวิธีการคัดกรองปัจจัยให้เหมาะสมกับการทดลอง และควรจะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลอง ก็มีความสำคัญ เช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึง ว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้น ตัวแปรใดมีความสำคัญและที่ระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้

2.10.2.3 เลือกตัวแปรตอบสนองในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทดลองต้องแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับ ขบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

2.10.2.4 เลือกการออกแบบการทดลอง ถ้ากิจกรรมกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณา ขนาดของตัวอย่าง (จำนวนการทำซ้ำ) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่าควรจะใช้ วิธีบล็อกหรือลำดับหรือการสุ่มลำดับการทดลอง อย่างใดอย่างหนึ่งหรือหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบเราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของทดลองอยู่ตลอดเวลา ในการทดลองทางวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางส่วนจะมีผลต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่างและประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

2.10.2.5 ทำการทดลอง เมื่อเราทำการทดลองเราจะต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจทำการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามการการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้การทลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่เกิดขึ้น

2.10.2.6 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ใช้วิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูก

ออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่สับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ เป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

2.10.2.7 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อย ผู้ทดลองจะหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะแนวทาง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อจะตรวจสอบความถูกต้องข้อสรุปที่เกิดขึ้นด้วย จากขั้นตอนการเลือกการตรวจสอบการออกแบบออกแบบการทดลองนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบสนอง เช่น ถ้าจำนวนปัจจัยเป็นหนึ่งและจำนวนระดับของปัจจัยมากกว่าสามการออกแบบการทดลองที่ใช้คือการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่เป็นทางเดียว (One Way Analysis of Variance) ถ้าจำนวนของปัจจัยมีมากกว่าหนึ่งแต่ไม่เกินห้า ควรใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design) หรือถ้าจำนวนปัจจัยมีมากกว่าห้าควรใช้การออกแบบเฟรคชั่นนัลแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design) เพื่อลดการทดลองลง ส่วนในกรณีที่ต้องการลดการทดลองโดยที่จำนวนปัจจัยมีน้อยกว่าห้าควรใช้ของแนวคิดของทากูชิ (Taguchi Method) ในการออกแบบการทดลองโดยมีความละเอียดดังหัวข้อต่อไปนี้

2.11 การออกแบบการทดลองโดยวิธีทากูชิ [12]

การออกแบบการทดลองวิธีของทากูชิเป็นการออกแบบชนิดหนึ่งในการประยุกต์ การออกแบบการทดลองของปัจจัยควบคุมได้ (Control Factor) เช่น ขนาดของชิ้นส่วนสามารถควบคุมได้ง่ายโดยผู้ออกแบบ ปัจจัยควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) หรือ Noise Factor เช่น ตัวแปรทางด้านสภาพแวดล้อม การเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ กรรมวิธีการผลิตที่ไม่สมบูรณ์ ฯลฯ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ยังเป็นแหล่งของความผันแปรอีกด้วยซึ่งอิทธิพลที่เกิดจากตัวแปรเหล่านี้ไม่สามารถที่จะกำจัดได้ เพราะฉะนั้นหน้าที่หลักของ Robust Design (RD) เป็นการลดความผันแปรของผลิตภัณฑ์ โดยทำการลดความไวของผลิตภัณฑ์ที่มีต่อแหล่งความผันแปร โดยควบคุมแหล่งความผันแปร หรือนัยหนึ่งคือ RD จะลดความผันแปรของค่าตอบสนอง โดยทำการเลือกปรับตั้งปัจจัยควบคุมแหล่ง (Control Factor) เพื่อลดอิทธิพลตัวแปรที่ควบคุมได้ยาก (Hard-to-Control Noise) ซึ่งเป็นจุดสำคัญของ off Line Quality Control

ตารางที่ 2.9 พัฒนาการของการออกแบบการทดลอง

แบบเก่า	แบบใหม่
1. ปรับที่ละตัวแปรต่อครั้ง	1. ปรับทุกตัวแปรทั้งหมด (Full Factorials)
2. ทำทุกตัวแปรที่เป็นไปได้ในการปรับ	2. ทำเพียงบ้างส่วน (Factional Factorials)
3. เลือกเอาเฉพาะการทดลองโดยการเดา	3. เลือกการทดลองโดยมีหลักการ (Screening Design)

2.11.1 จุดประสงค์สำคัญของการทดลองมี 2 ประการ คือ เป็นการยืนยันข้อเท็จจริง เป็นการพิสูจน์ถึงข้อเท็จจริง หรือความเชื่อจากประสบการณ์ หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต และเป็นการค้นหาข้อเท็จจริง เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของเงื่อนไขใหม่ที่มีต่อระบบการผลิตโดยวิธีของทากูชิสำหรับสนับสนุน Roust Design (RD) มีขั้นตอนในการปฏิบัติสำคัญ 10 ขั้นตอนดังแสดงดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ขั้นตอนการทำการทดลองโดยวิธีของทากูชิ

1. Problem recognition and formulation
2. Select quality characteristic
3. Select design or process parameters
4. Classify design parameters
5. Determine levels
6. Identify interaction
7. Choose appropriate orthogonal array
8. Conduct experiments
9. Perform statistical analysis
10. Perform a confirmatory experiment and implement results

2.11.1.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา (Problem Recognition and Formulation) ขั้นตอนนี้ต้องพยายามทำความเข้าใจอะไรที่เป็นปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลองโดยเป้าหมายของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ ในกระบวนการผลิต คือ เพื่อให้ได้ค่า y ที่ดีที่สุด (Optimal) แบ่งเป็น 3 แบบคือ

1) ค่ายิ่งมากยิ่งดี (Higher is Better Type Problem) คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่าให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น ความทนแรงดึง และอายุการใช้งาน

2) ค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Lower is Better Type Problem) คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดจะต้องมีค่าให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เช่น เวลาในการทำปฏิกิริยาและจำนวนของเสีย

3) เท่ากับค่าที่ต้องการดีที่สุด (Nominal is Best Type Problem) คือ ค่าความต้องการของค่าตอบสนองของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับค่าที่ได้กำหนดไว้หรือค่าที่จำกัดไว้ เช่น ปริมาตร และความหนา

2.11.1.2 เลือกผลตอบของปัญหา (Select Quality Characteristic) ผู้ทดลองควรแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องกำหนดให้ได้ว่าอะไรคือตัวแปรตอบและจะวัดตัวแปรอย่างไรก่อนที่จะเริ่มการทดลองจริง

2.11.1.3 เลือกการออกแบบการทดลอง (Select Design or Process Parameters) เลือกให้เหมาะสมกับปัจจัยควบคุมทั้งหมดที่คิดว่าส่งผลต่อคุณลักษณะที่เลือกไว้

2.11.1.4 ทำการแบ่งประเภทปัจจัย (Classify Design Parameters into Control, Noise and Signal Factors) ทำการแบ่งปัจจัยตามลักษณะว่าปัจจัยไหนเป็นปัจจัยควบคุม ปัจจัยรบกวน และปัจจัยผลตอบ

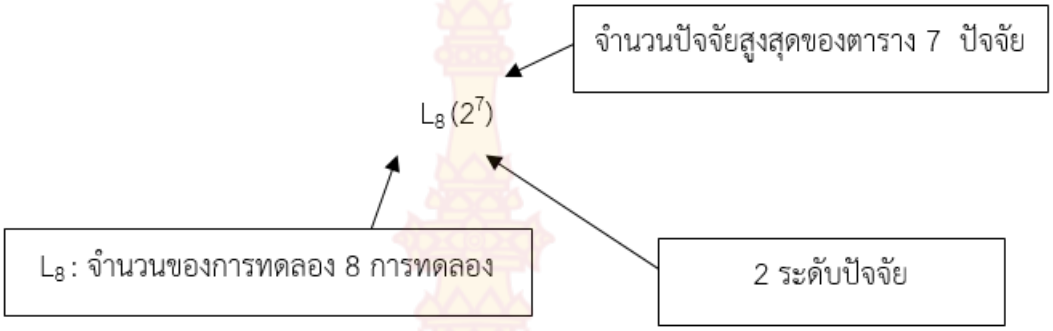
2.11.1.5 กำหนดระดับของปัจจัยควบคุม (Determine Levels of Design or process Parameters) เลือกตามวัตถุประสงค์ และความเหมาะสมของการทดลองนิยมทำการทดลอง

ที่ 2-3 ระดับ ถ้าการทกลองมีปัจจัยควบคุมจำนวนมากและมีข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากรควรใช้ 2 ระดับ แต่ถ้ามีจำนวนปัจจัยควบคุมน้อย หรือจำนวนมาก แต่ไม่มีข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากรควรใช้ 3 ระดับ

2.11.1.6 กำหนดคู่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกัน (Identify Interactions) ผู้ทดลองต้องกำหนดคู่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกันและมีผลต่อตัวแปรผลตอบ เพราะเทคนิคทากูชิจะไม่สามารถหาค่าคู่ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกันได้ครบทุกตัว ดังนั้นต้องพิจารณาให้รอบคอบ

2.11.1.7 เลือกคอลัมน์ของการจัดเรียงแบบออโธกอนอล (Choose Appropriate Orthogonal Array; OA) การเลือกการจัดเรียงแบบออโธกอนอลเป็นตารางกำหนดค่าระดับการทดลองที่มีแนวนอนเป็นจำนวนครั้งที่ทำการทดลอง และแนวตั้งเป็นตัวแปรที่จะกำหนดให้โดยก่อนเลือกการจัดเรียงแบบออโธกอนอลต้องใช้ควบคู่กับกราฟเส้นตรง (Linear Graphs) และตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย (Interaction Table) มาประกอบด้วยเพื่อทำความเข้าใจกับการออกแบบที่มีการจัดเรียงแบบออโธกอนอล (Taguchi and Konishi' 1999) การกำหนดว่าปัจจัยอยู่ในคอลัมน์ใดในตาราง Orthogonal Array (แสดงดังตารางที่ 2.11) ต้องใช้ Linear Graphs ประกอบ และการเลือก OA ยังขึ้นกับค่าวัดจำนวนข้อมูลที่สามารถผันแปรได้อย่างอิสระเมื่อกำหนดค่าที่ต้องการ (Degrees of Freedom : df) ระหว่างปัจจัยควบคุมกับปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกันและผลตอบของการทดลองตลอดจนวัตถุประสงค์ในการทดลองที่มีข้อจำกัดของเวลาและทรัพยากร

ในการกำหนดตารางแผนการทดลอง (Matrix Experiment) โดยใช้ตารางมาตรฐานที่ใช้ในการทดลอง การนำมาตรฐาน Orthogonal Array ไปใช้งานขึ้นอยู่กับระดับปัจจัยและจำนวนปัจจัยในการทดลอง ซึ่งจะได้จำนวนการทดลองตามาตรฐานของ Orthogonal Array นั้นใช้สัญลักษณ์ L ตามด้วยตัวอักษรซึ่งบ่งบอกจำนวนการทดลอง ดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.21 ความหมายของสัญลักษณ์ตาราง Orthogonal Array

ตารางที่ 2.11 มาตรฐานของวิธีการทากูชิ (Standard Orthogonal Array)

จำนวนปัจจัย	ระดับของปัจจัย				จำนวน	ระดับของปัจจัย			
	2	3	4	5	ปัจจัย	2	3	4	5
2	L4	L9	L16	L25	17	L32	L36	-	-
3	L4	L9	L16	L25	18	L32	L36	-	-
4	L8	L9	L16	L25	19	L32	L36	-	-
5	L8	L18	L16	L25	20	L32	L36	-	-
6	L8	L18	L32	L25	21	L32	L36	-	-
7	L8	L18	L32	L50	22	L32	L36	-	-
8	L12	L18	L32	L50	23	L32	L36	-	-
9	L12	L27	L32	L50	24	L32	-	-	-
10	L12	L27	L32	L50	25	L32	-	-	-
11	L12	L27	L32	L50	26	L32	-	-	-
12	L16	L27	L32	L50	27	L32	-	-	-
13	L16	L27	-	-	28	L32	-	-	-
14	L16	L36	-	-	29	L32	-	-	-
15	L16	L36	-	-	30	L32	-	-	-
16	L32	L36	-	-	31	L32	-	-	-

การใช้ตาราง Orthogonal Array มีข้อดี คือ ทำให้สามารถลดการทดลองให้น้อยลงและเป็นผลให้ลดต้นทุนในการทดลองได้อย่างมาก เช่นตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ตัวอย่างจำนวนของปัจจัยและระดับปัจจัยของ Orthogonal Array $L_8(2^7)$ และ L_{12} (2^{11})

จำนวนปัจจัย	ระดับปัจจัย	การทดลองปกติใช้	การทดลองของทากูชิ
7 ปัจจัย	2	128 การทดลอง	8 การทดลอง (L8)

11 ปัจจัย	2	2,048 การทดลอง	12 การทดลอง (L12)

จากตารางที่ 2.12 แสดง Orthogonal Array $L_8(2^7)$ มีระดับปัจจัยเท่ากับ 2 ระดับ และจำนวนของปัจจัยเท่ากับ 7 ปัจจัย จะมีการทดลอง 8 การทดลอง

ตารางที่ 2.13 L_8 Standard Array ที่ 2 ระดับปัจจัย

Trial no.	Column no.						
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

2.11.1.8 ทำการทดลอง (Conduct Experiments) ทำการทดลองตามแผนที่กำหนดจากตารางการจัดเรียงแบบออโธกอนอล

2.11.1.9 วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยหลักการทางสถิติ (Perform Statistical Analysis) ใช้วิธีการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อดูว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองและช่วยให้การตัดสินใจมีประสิทธิภาพ

2.11.1.10 ทำการทดลองซ้ำ และสรุปผลการทดลอง (Perform a Confirmatory Experiment and Implement Results) หลังจากวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองแล้วจะต้องหาข้อสรุปและข้อเสนอแนะของผลการทดลองที่เกิดขึ้น เพื่อนำเสนอผลงานให้หน่วยงานหรือผู้เกี่ยวข้องรับทราบ นอกจากนี้ควรทำการทดลองเพื่อตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้น

ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงอาจนำมาใช้ทั้งการพัฒนากระบวนการที่มีปัญหาเพื่อให้กระบวนการนั้นมีสมรรถนะดีขึ้น หรือทำให้เกิดความมั่นคง (Robust or Insensitive) ต่อแหล่งความผันแปรที่อยู่ภายนอก วิธีการควบคุมกระบวนการทางสถิติและการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือสองชนิดที่มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการปรับปรุงและหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการ ดังเช่น ถ้ากระบวนการอยู่ในการควบคุมทางสถิติแต่ความสามารถของกระบวนการยังไม่ดีนักจึงต้องมีการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดความผันแปรให้น้อยลง ดังนั้นการออกแบบการทดลองจึงทำให้ความสามารถของกรรมวิธีการผลิต ความมั่นคงของระบบ และความเชื่อมั่นเพิ่มขึ้นตลอดจนเวลาในการผลิตและต้นทุนลดลง

2.11.2 อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวน (Signal-to-Noise Ratio; S/N)

เป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของกระบวนการร่วมกันระหว่างค่าเฉลี่ยกับค่าผันแปร (Single Performance Measure) จึงได้ค่าที่เหมาะสมโดยลดความผันแปรของกระบวนการ (Jiju, 2006) ซึ่งความสัมพันธ์ของสมการอัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวนนั้น เลขเศษหรือสัญญาณของอัตราส่วน คือ ความสามารถของกระบวนการในการสร้างผลิตภัณฑ์ที่ดี หรือความสามารถของผลิตภัณฑ์เพื่อการดำเนินการได้อย่างถูกต้อง ตัวส่วน คือ ผลรวมของผลกระทบของปัจจัยแทรกซ้อนที่มีต่อกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวนเป็นการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาว่าคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่มีความมั่นคงต่อปัจจัยรบกวน (Noise) ได้ดีเพียงใด ซึ่งการกำหนดว่าจะให้ปัจจัยใดมีค่าเท่าใดต้องมุ่งเน้นให้อัตราส่วนสัญญาณไปยังสิ่งรบกวนค่ามากที่สุด เพราะยิ่งมีค่ามากแสดงว่าเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่ทำให้กระบวนการเกิดความมั่นคง โดยทั่วไปผลของการทดลองจากการออกแบบการทดลองใดๆ มักจะแทนด้วยสัญลักษณ์ทางคณิตศาสตร์ คือ y_i ซึ่งก็คือค่าของตัวแปรตาม (Response Variable) ที่เราสนใจนั้นเอง ซึ่งในแง่ของการออกแบบการทดลองโดยทั่วไปมักจะให้ความสนใจกับ y_i หรือค่าเฉลี่ยของตัวแปรตามค่อนข้างสูง ว่ามีความสอดคล้องกับความต้องการหรือไม่ โดยบางครั้งลืมพิจารณาถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองนั้นๆ ว่ามีมากน้อยเพียงใด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำของตัวแปรตามใดๆ หรือของขบวนการใดเป็นสิ่งบ่งบอกถึงความมีคุณภาพสูงและการออกแบบที่ดีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณภาพที่ดีและการออกแบบที่มีประสิทธิภาพ โดย ดร.ทากูชิ ได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาค่า Signal-to-Noise Ratio ของผลการทดลองใดๆ เพื่อบ่งชี้ว่าการทดลองนั้นให้ผลตามเป้าหมายที่เราต้องการหรือไม่ โดยพิจารณาทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลอง และคำนวณค่า Signal-to-Noise Ratio (S/N) คืออัตราส่วนหรือค่าเฉลี่ย (Signal) กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Noise) ดังแสดงในสมการที่ (2-1)

$$S/N = -10\log(MSD) \qquad (2\text{-}1)$$

MSD (Mean Square Deviation) เป็นตัวแปรค่าหนึ่งที่ได้มาจากการคำนวณตามแนวทางของทากูชิ ซึ่งมี 3 วิธีการคำนวณแสดงดังสมการที่ (2-2) ถึงสมการที่ (2-4)

1. กรณีที่ต้องการค่าน้อยกว่าเป็นค่าที่ดีกว่า (Lower is Better Type Problem) สามารถคำนวณ MSD ได้ดังนี้

$$MSD = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2 \qquad (2\text{-}2)$$

2. กรณีที่ต้องการค่ามากกว่าเป็นค่าที่ดีกว่า (Higher is Better Type Problem) สามารถคำนวณ MSD ได้ดังนี้

$$MSD = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2} \qquad (2\text{-}3)$$

3. กรณีที่ต้องการค่าตามความต้องการเป็นค่าที่ดีที่สุด (Nominal is Best Type Problem) สามารถคำนวณ MSD ได้ดังนี้

$$MSD = \left|\frac{1}{n}\left(\frac{S_m - V_e}{V_e}\right)\right| \quad (2\text{-}4)$$

เมื่อ

$$V_e = \frac{\left(y_1^2 + y_1^2 + \ldots + y_n^2\right) - S_m}{n-1} \quad (2\text{-}5)$$

$$S_m = \frac{T^2}{n} \quad (2\text{-}6)$$

$$T = \sum_{i=1}^{n} y_i \quad (2\text{-}7)$$

โดยที่ T แทน ผลรวมของข้อมูล (ผลที่ได้จากการทดลอง)

n แทน จำนวนชุดข้อมูล

S_m แทน ผมรวมกำลังสองของค่าเฉลี่ย (Sum of the Squares of the Mean)

V_e แทนความแปรปรวนของการทดลอง

2.12.3 การประมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัย (Analysis of Means)

เป็นการประมาณอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยการใช้ค่าเฉลี่ยในการวิเคราะห์ โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio ในการทดลองโดยใช้สูตร

$$\overline{S/N} = \frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} S/N_i\right] \quad (2\text{-}8)$$

เมื่อ

$\overline{S/N}$ = ค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio ในการทดลอง

S/N_i = S/N Ratio ของแต่ละการทดลอง

i = ลำดับของการทดลอง

การหาอิทธิพลของระดับปัจจัยแต่ละระดับ โดยคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนของ S/N Ratio เฉลี่ยของปัจจัยแต่ละระดับ ที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวมของ S/N Ratio ในการทดลองซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$Factor = \left(\overline{S/N_i} - \overline{S/N}\right) \quad (2\text{-}9)$$

เมื่อ

Factor = ค่าเฉลี่ยของปัจจัยแต่ละระดับที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยรวม

$\overline{S/N_i}$ = S/N Ratio เฉลี่ยของแต่ละการทดลอง

i = ลำดับการทดลอง

2.11.4 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

2.12.4.1 การออกแบบการทดลองในส่วนผลิตภัณฑ์

2.12.4.2 ง่ายต่อการนำไปผลิต

2.11.4.3 ความเชื่อมั่น (Reliability) ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น หรืออายุการใช้งานนานขึ้น

2.11.4.4 ต้นทุน (Costs) การผลิตลดลง

2.11.4.5 ลดเวลาในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์

2.12.5 การออกแบบการทดลองในส่วนกระบวนการ

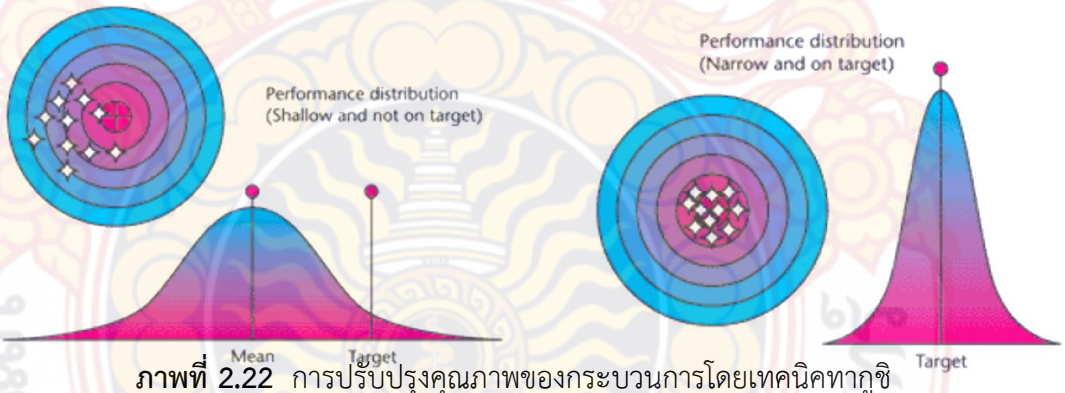
2.11.5.1 เพื่อให้กระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมั่นคง ใต้สภาพแวดล้อมที่หลากหลาย

2.11.5.2 การเพิ่มผลการผลิตที่ได้ (Yields) จากกระบวนการ

2.11.5.3 ลดเวลาที่ใช้ในการพัฒนาขั้นตอนของกระบวนการ

2.11.5.4 ลดต้นทุนการผลิต

2.11.5.5 ลดความผันแปร (Variation) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ ทำให้ได้ค่าที่เข้าใกล้ค่าเป้าหมาย (Target) มากที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.22 การปรับปรุงคุณภาพของกระบวนการโดยเทคนิคทากูชิ

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.12.1 สมเดช อิงคะวะระ [13] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเค้นที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ ผลการทดลองพบว่า อัตราป้อน ความเร็วตัด และมุมคายเศษ เป็นตัวแปรที่มีผลต่อการกระจายความเค้น ที่เกิดขึ้นบนผิวคายของเครื่องมือตัด ซึ่งส่งผลให้เครื่องมือตัดเกิดการสึกหรอที่ผิว (Flank wear) และผิวคายเศษ (Crater wear) นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่ารัศมีของปลายเครื่องมือตัด ความร้อนที่เกิดขึ้นในขบวนการตัดเฉือนวัสดุเครื่องมือตัด และรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือดัดมีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเช่นเดียวกัน

2.12.2 มารุต แซ่ห่ง และคณะ [14] ได้ศึกษาการหาค่าการนำความร้อนในของเหลวแต่ละชนิด ได้แก่ น้ำ น้ำมันเครื่อง น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันหล่อเย็น น้ำมันคอมเพรสเซอร์

น้ำมันหม้อแปลง น้ำมันชุบโลหะ และกลีเซอลีน ผลการทดลองพบว่า ของเหลวแต่ละชนิดนั้นมีค่าการนำความร้อนไม่เท่ากัน และอุณหภูมิเป็นตัวแปรที่มีผลต่อการนำความร้อนมาก ถ้าหากอุณหภูมิของของเหลวเปลี่ยนไปก็จะทำให้ค่าการนำความร้อนของของเหลวนั้นเปลี่ยนตามไปด้วย สรุปได้ว่าค่าการนำความร้อนนั้นจะผันแปรตามค่าของอุณหภูมิ โดยที่น้ำ และน้ำมันหล่อเย็น มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.586 – 1.1878 W/mK ของเหลวในกลุ่มของ น้ำมันเครื่อง น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม น้ำมันคอมเพรสเซอร์ น้ำมันหม้อแปลง และน้ำมันชุบโลหะ มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.08 – 0.377 W/mK และกลีเซอรีนมีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วง 0.287 – 0.324 W/mK

2.12.3 ประวุฒิ เพชรไพรินทร์ [15] ได้ทำการศึกษาเรื่อง ปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวและความสึกหรอของคมตัดในการกัดทองเหลืองผสม พบว่าปัจจัยที่มีผลคือ สารหล่อเย็นที่มีผลต่อความหยาบผิวงาน โดยที่สารหล่อเย็นชนิดน้ำมันแบบผสมน้ำให้ค่าความหยาบผิวมากกว่าน้ำมันพืช ส่วนความเร็วตัดมีผลต่อความหยาบผิวงาน เมื่อเพิ่มความเร็วตัดให้สูงขึ้นมีผลทำให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นด้วย อัตราป้อนมีผลต่อคุณภาพผิวงาน เมื่อเพิ่มอัตราป้อนให้สูงจากการใช้น้ำมันแบบผสมน้ำ ทำให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานลดลง ตรงกันข้ามกับการใช้น้ำมันพืชจะให้ค่าความหยาบผิวงานที่สูงขึ้น อัตราป้อนมีผลต่อการสึกหรอของคมตัด โดยเมื่อเพิ่มอัตราป้อนให้สูงขึ้นจะให้ค่าความสึกหรอของคมตัดที่ลดลง

2.12.4 ประพลเปี่ยม ศักดิ์ชัย [16] ได้ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความหยาบผิวในการกัดเหล็กกล้าเครื่องมืองานเย็น D2 กำหนดตัวแปรซึ่งประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราป้อน และระยะกินลึก ภายใต้สภาวะ การตัดเฉือนที่ใช้สารหล่อเย็น โดยตัวแปรคือคุณภาพผิวงาน จากการศึกษาพบว่าความเร็วตัด อัตราป้อนมีอิทธิพลต่อความหยาบผิว ส่วนระยะป้อนลึกไม่มีผลต่อความหยาบผิว เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้นมีผลให้ค่าความหยาบผิวต่ำลง ตรงข้ามกับอัตราป้อนที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้น

2.12.5 J.M. Vieira, A.R. Machado and E.O. Ezugwu. [17] ได้ทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Performance of cutting fluid during face milling of steels เพื่อประสิทธิผลของการใช้น้ำมันตัดเฉือนในงานกัดผิวราบเหล็กเหนียว AISI 8640 โดยใช้มีดคาร์ไบด์เคลือบผิวเปรียบเทียบกับงานกัดแบบแห้ง เพื่อวิเคราะห์หาอายุการใช้งานของมีด กำลังใช้งานที่ใช้ในการตัดเฉือนและความหยาบผิวงาน รวมทั้งศึกษาทั้งความสามารถในการหล่อเย็นของน้ำมันตัดเฉือน อุณหภูมิระหว่างการตัดเฉือนของวัสดุเหล็ก AISI 1020 โดยวิธีการใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล จากการทดลองตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย น้ำมันตัดเฉือนแบบผสมน้ำน้ำมันกึ่งสังเคราะห์และน้ำมันสังเคราะห์ ผลการวิจัยพบว่า เมื่อตัดเฉือนแบบแห้งจะทำให้เกิดอุณหภูมิสูงที่สุด รองลงมาคือ การใช้น้ำมันสังเคราะห์ (Synthetic) น้ำมันแบบผสมน้ำ (Emulsion) และน้ำมันกึ่งสังเคราะห์ (Semi-Synthetic) ตามลำดับ ส่วนกำลังที่ใช้ในการตัดเฉือนจะเป็นส่วนกลับผกผันกับอุณหภูมิ ส่วนอายุการใช้งานได้สูงที่สุดคือ การตัดเฉือนแบบแห้ง รองลงมาคือแบบสังเคราะห์และกึ่งสังเคราะห์ตามลำดับ ด้านการกะเทาะของคมตัดจะมีลักษณะเป็นแบบซี่คล้ายหวี (Comb Cracking) และความหยาบผิวงานนั้น การตัดเฉือนแบบแห้งจะมีผิวงานที่ค่อนข้างหยาบกว่าใช้น้ำมันตัดเฉือนแบบอื่น ๆ

2.12.6 ชุมพร ช่างกลึงเหมาะ [18] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบละเอียดผิวของชิ้นงานกับเงื่อนไขการกัดของวัสดุอิพอกซีเรซิ่นเติมอลูมิเนียม โดยใช้ตัวแปรต้นคือ ระยะป้อนลึก ความเร็วรอบ และอัตราป้อน พบว่า ตัวแปรดังกล่าวสามารถเป็นตัวแทนความหยาบ

ละเอียดผิวชิ้นงานในลักษณะระนาบได้เป็นอย่างดี และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง ของระยะป้อนลึก ความเร็วรอบของดอกกัด และอัตราป้อนของดอกกัด ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลอง (Experiment Research) ที่จะมุ่งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิว และความสึกหรอของคมตัด ในการกัดอลูมิเนียมผสม เกรด 6061 ที่อัตรากำจัดเนื้อวัสดุปริมาตร 211.56 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยวิธีทากูชิ และพื้นผิวตอบสนอง ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยจึงเริ่มจากการศึกษางานวิจัยและทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นเพื่อให้งานวิจัยเป็นไปด้วยความถูกต้อง และบรรลุตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ คณะผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนวิธีการดำเนินงานตามลำดับ ดังนี้

3.1 แผนการดำเนินโครงการ
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
3.3 การออกแบบการทดลอง
3.4 ขั้นตอนการทดลอง
3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 แผนการดำเนินโครงการ

ในการทดลองได้มีการกำหนดแผนการดำเนินงานไว้ดังตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นแผนการดำเนินโครงการตลอดปีการศึกษา

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินโครงการ

การดำเนินงาน	พ.ศ. 2558				พ.ศ. 2559							
	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย.
1. ศึกษาข้อมูลและเลือกหัวข้อที่น่าสนใจ	▪▪▪▪▪▪▪▪											
	▬▬▬▬▬▬▬▬											
2. รวบรวมข้อมูลและเตรียมเครื่องมือ				▪▪▪▪▪▪▪▪								
				▬▬▬▬▬▬▬▬								
3. ออกแบบแผนการทดลองและจัดเตรียมวัสดุและศึกษาวิธีการใช้เครื่องจักร							▪▪▪▪▪▪▪▪					
							▬▬▬▬▬▬▬▬					
4. ทำการทดลองและบันทึกผล									▪▪▪▪▪			
									▬▬▬▬▬			
5. สรุปผลการทดลองและจัดทำเล่ม										▪▪▪▪▪▪▪▪		
										▬▬▬▬▬▬▬▬		

<u>หมายเหตุ</u>

▪▪▪▪▪▪▪▪ แผนการดำเนินงาน

▬▬▬▬▬▬▬▬ ระยะเวลาดำเนินงานจริง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Machine)

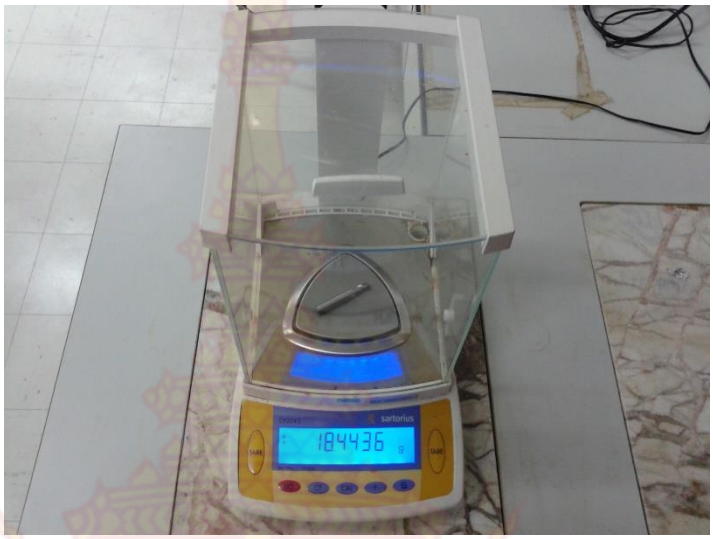
ภาพที่ 3.1 เครื่อง CNC milling รุ่น BRIDGEPORT XR760

3.2.2 เครื่องวัดความหยาบผิว

ใช้ตรวจสอบความหยาบผิวของพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าความหยาบผิวที่ได้จากการเจียระไน (Ra = 0.1 -1.6 μm)

ภาพที่ 3.2 เครื่องตรวจสอบความหยาบของผิวงาน

3.2.3 เครื่องชั่งน้ำหนักวัดขนาดความสึกหรอของคมตัด



ภาพที่ 3.3 เครื่องชั่งน้ำหนักวัดขนาดความสึกหรอของคมตัด

3.2.4 วัสดุชิ้นงาน

วัสดุชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองเป็นอลูมิเนียม เกรด 6061 ขนาดกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร หนา 16 มิลลิเมตร จำนวน 27 ชิ้น

ภาพที่ 3.4 ชิ้นงานอลูมิเนียมอัลลอย เกรด 6061

3.1.5 ดอกกัด (End Mill) HSS แบบ 2 คมตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร 27 ดอก

ภาพที่ 3.5 ดอกกัด (End Mill) HSS) แบบ 2 คมตัด

3.3 การออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 3.2 แสดงลำดับการทดลองวิธีทากูชิ (ทดลองทำซ้ำเงื่อนไขละ 3 ครั้ง)

ลำดับ	ความเร็วตัด(m/min)	ความลึกกัด(mm)	อัตราป้อน(mm/min)
1	50	2	150
2	50	3	200
3	50	4	250
4	90	2	200
5	90	3	250
6	90	4	150
7	130	2	250
8	130	3	150
9	130	4	200

หมายเหตุ ใช้น้ำมันตัดเฉือนแบบผสมน้ำอัตราส่วน 1 ต่อ 20 ลิตร

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

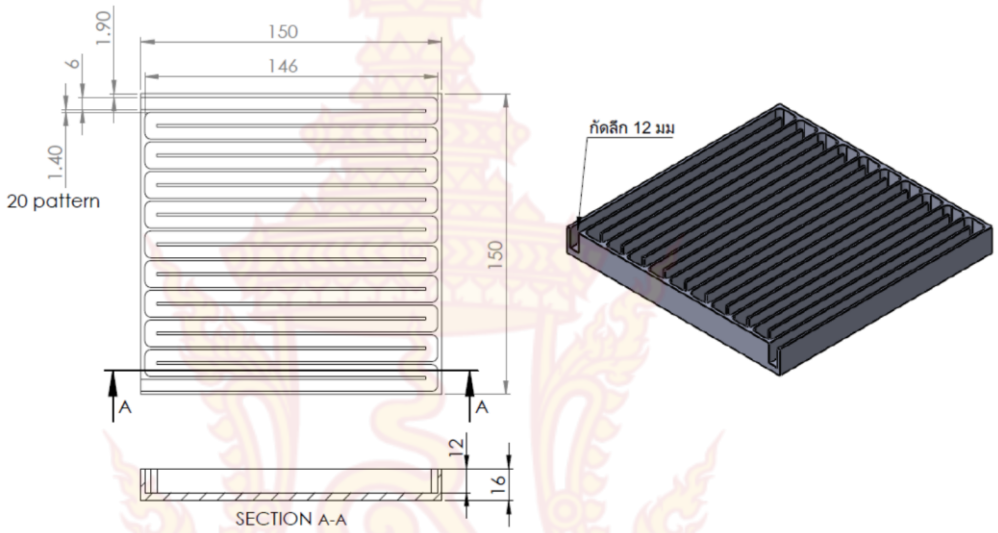
3.4.1 นำดอกกัดล้างทำความสะอาดด้วย อะซิโตน (Acetone) และนำมาชั่งน้ำหนักและจดบันทึกค่าไว้ให้ครบจำนวน 27 ดอก

3.4.2 นำชิ้นงานอลูมิเนียม เกรด 6061 มาตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร หนา 16 มิลลิเมตร

3.4.3 จับยึดชิ้นงานอลูมิเนียม เกรด 6061 ที่ใช้ในการทดลอง เข้าที่ปากกาจับยึดชิ้นงานบนเครื่องกัด ปรับระดับให้เที่ยงตรง

3.4.4 จับยึดดอกกัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เข้าที่หัวจับของเครื่องกัด

3.4.5 กัดชิ้นงานด้วยเครื่องอัตโนมัติ ซึ่งการกัดจะเป็นไปตามตารางการทดลองที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3.6 แสดงรูปตัวอย่างชิ้นงานที่กัด

3.4.6 ถอดดอกกัดออกมาล้างทำความสะอาดด้วยอะซิโตน (Acetone) แล้วชั่งน้ำหนักเพื่อวัดความสึกหรอที่เกิดขึ้นจากการกัด แล้วจดบันทึกค่าความสึกหรอของมีดกัด (กรัม)

3.4.7 นำชิ้นงานมาวัดความหยาบผิว ในการวัดค่าความหยาบผิวนั้นจะทำการถอดชิ้นงานออกมาวัดความหยาบผิว ก็ต่อเมื่อกัดครบความลึก 12 มิลลิเมตร หรือได้ปริมาตร 211.56 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.4.8 ทำซ้ำในขั้นตอนการทดลองที่ 3.4.1 – 3.4.7 โดยเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ไปตามการทดลองดังตารางที่ 3.2 จนครบตามกำหนดชิ้นงาน 27 ชิ้น

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ โดยใช้หลักสถิติศาสตร์บรรยายผลการทดลอง โดยใช้วิธีทากูชิช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ค่าตอบสนองดีที่สุด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยทดลอง (Experiments Research) มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน และค่าการสึกหรอของดอกกัด ในการกัดอลูมิเนียมอัลลอยเกรด 6061 โดยใช้ดอกกัดเป็นเหล็กรอบสูง (High Speed Steel) ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ความเร็วตัด(Vc) ระยะป้อนลึก(D) และอัตราป้อน(F) เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ เครื่องกัด CNC เครื่องวัดความหยาบผิว เครื่องชั่งน้ำหนัก การวิจัยได้กำหนดตัวแปรในการทดลองคือตัวแปรต้นได้แก่ ความเร็วตัด ระยะป้อนลึก และอัตราป้อน ส่วนตัวแปรตามได้แก่ ค่าความหยาบผิว โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวและค่าความสึกหรอของดอกกัดโดยเปรียบเทียบน้ำหนักก่อน และหลังการทดลอง กำหนดความเร็วตัด 3ระดับ คือ 50 , 90 และ130 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 3 ระดับ คือ 2 , 3 และ4 มิลลิเมตร อัตราป้อน 3 ระดับ คือ 150 , 200 และ250 มิลลิเมตร/นาที ชิ้นงานมีความกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร หนา 16 มิลลิเมตร จำนวน 27 ชิ้น ในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผิวชิ้นงานและการสึกหรอของดอกกัด คณะผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองโดยใช้ Taguchi Design L9

4.1 วิธีการทากูชิสำหรับความหยาบผิว (Surface Roughness)

การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ได้ค่าผลตอบสนองของความหยาบผิว (Surface Roughness) ซึ่งผลลัพธ์ที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความหยาบผิวที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ความหยาบผิว Ra (µm)		
	Vc (m/min)	D (mm)	F (mm/min)	ชิ้นงานที่ 1 (µm)	ชิ้นงานที่ 2 (µm)	ชิ้นงานที่ 3 (µm)
1	50	2	150	1.26	1.21	1.23
2	50	3	200	2.23	2.25	2.13
3	50	4	250	2.94	2.66	2.75
4	90	2	200	2.01	1.56	1.73

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) แสดงความหยาบผิวที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ความหยาบผิว Ra (µm)		
	Vc (m/min)	D (mm)	F (mm/min)	ชิ้นงานที่ 1 (µm)	ชิ้นงานที่ 2 (µm)	ชิ้นงานที่ 3 (µm)
5	90	3	250	2.47	2.52	2.57

6	90	4	150	1.31	1.35	1.36
7	130	2	250	2.11	2.12	2.13
8	130	3	150	1.19	1.15	1.16
9	130	4	200	1.82	1.79	1.77

หมายเหตุ : วิธีการเก็บข้อมูลการสึกหรอของดอกกัดแสดงดังภาคผนวก ก

4.1.1 ค่าอัตราส่วน S/N-Ratio ของความหยาบผิว

จากการทดลองชิ้นงานด้วยระดับปัจจัยที่แตกต่างกันได้ค่าความหยาบผิวดังตารางที่ 4.1 นำมาใช้ในการคำนวณหาค่า S/N-Ratio โดยค่าความหยาบผิวหาค่าอัตราส่วน S/N-Ratio ชนิดที่ค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด (The Smaller - The Better) ตามสมการที่ (4-1)

S/N-Ratio แบบ The Smaller - The Better

$$S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y^2\right) \qquad (4\text{-}1)$$

เมื่อ S/N แทน อัตราส่วนของ S/N ในแต่ละ Experiment Number

n แทน จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละ Experiment Number

y_i แทน ค่าตอบสนอง (Response) ในแต่ครั้งของการทดลอง ของแต่ละ Experiment Number

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 1

$$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\left(1.26^2+1.21^2+1.23^2\right)\right)$$

$$= -10 \log\left(1.52\right) \qquad = -1.83$$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 2

$$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(2.23^2+2.25^2+2.13^2)\right)$$

$$= -10 \log(4.86) \qquad = -6.87$$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 3

$$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(2.94^2+2.66^2+2.75^2)\right)$$

$$= -10 \log(7.74) \qquad = -8.89$$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 4

$$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(2.01^2+1.56^2+1.73^2)\right)$$

$$= -10 \log(3.15) \qquad = -4.99$$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 5

$$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(2.47^2+2.52^2+2.57^2)\right)$$

$$= -10 \log(6.34) \qquad = -8.02$$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 6

$$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(1.31^2+1.35^2+1.36^2)\right)$$

$$= -10 \log(1.80) \qquad = -2.54$$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 7

$$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(2.11^2+2.12^2+2.13^2)\right)$$

$$= -10 \log(4.49) \qquad = -6.52$$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 8

$$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(1.19^2+1.15^2+1.16^2)\right)$$

$$= -10 \log(1.37) \qquad = -1.35$$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 9

$$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(1.82^2+1.79^2+1.77^2)\right)$$

$$= -10 \log(3.22) \qquad = -5.07$$

นั่นคือการคำนวณค่าอัตราส่วน S/N ของความหยาบผิวจากการทดลองทั้ง 9 การทดลองสรุปดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปอัตราส่วน S/N ของค่าความหยาบผิวจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับ	ปัจจัย	ความหยาบผิว (μm)	MSD	S/N-Ratio

	Vc (m/min)	D (mm)	F (mm/min)	ความหยาบผิวครั้งที่ 1	ความหยาบผิวครั้งที่ 2	ความหยาบผิวครั้งที่ 3		
1	50	2	150	1.26	1.21	1.23	1.52	-1.82
2	50	3	200	2.23	2.25	2.13	4.86	-6.86
3	50	4	250	2.94	2.66	2.75	7.76	-8.90
4	90	2	200	2.01	1.56	1.73	3.16	-4.99
5	90	3	250	2.47	2.52	2.57	6.35	-8.03
6	90	4	150	1.31	1.35	1.36	1.80	-2.54
7	130	2	250	2.11	2.12	2.13	4.49	-6.53
8	130	3	150	1.19	1.15	1.16	1.36	-1.34
9	130	4	200	1.82	1.79	1.77	3.22	-5.07
							Average =	-5.12

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวที่ได้อยู่ในช่วง 1.15 ถึง 2.94 ไมโครเมตร และค่ากลางเบี่ยงเบนมาตรฐาน (MSD) ของค่าวามหยาบผิวอยู่ระหว่าง 1.36 ถึง 7.76 อัตราส่วน S/N-Ratio ของความหยาบผิวที่ได้อยู่ระหว่าง -1.34 ถึง -8.90 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio อยู่ที่ -5.12

4.1.2 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิว

ถ้าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามากหมายความว่าที่ระดับปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้คุณภาพงานออกมาดี โดยได้ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวดังต่อไปนี้

ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย Vc ระดับที่ 1 = [(-1.82) + (-6.86) + (-8.90)]/3
= -5.86

ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย Vc ระดับที่ 2 = [(-4.99) + (-8.03) + (-2.54)]/3
= -5.19

ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย Vc ระดับที่ 3 = [(-6.53) + (-1.34) + (-5.07)]/3
= -4.31

ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 1 = [(-1.82) + (-4.99) + (-6.53)]/3
= -4.45
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 2 = [(-6.86) + (-8.03) + (-1.34)]/3
= -5.41
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 3 = [(-8.90) + (-2.54) + (-5.07)]/3
= -5.50
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 1 = [(-1.82) + (-2.54) + (-1.34)]/3
= -1.90
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 2 = [(-6.86) + (-4.99) + (-5.07)]/3
= -5.64
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 3 = [(-8.90) + (-8.03) + (-6.53)]/3
= -7.82

ดังนั้นได้ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวจากการทดลองทั้ง 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย โดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

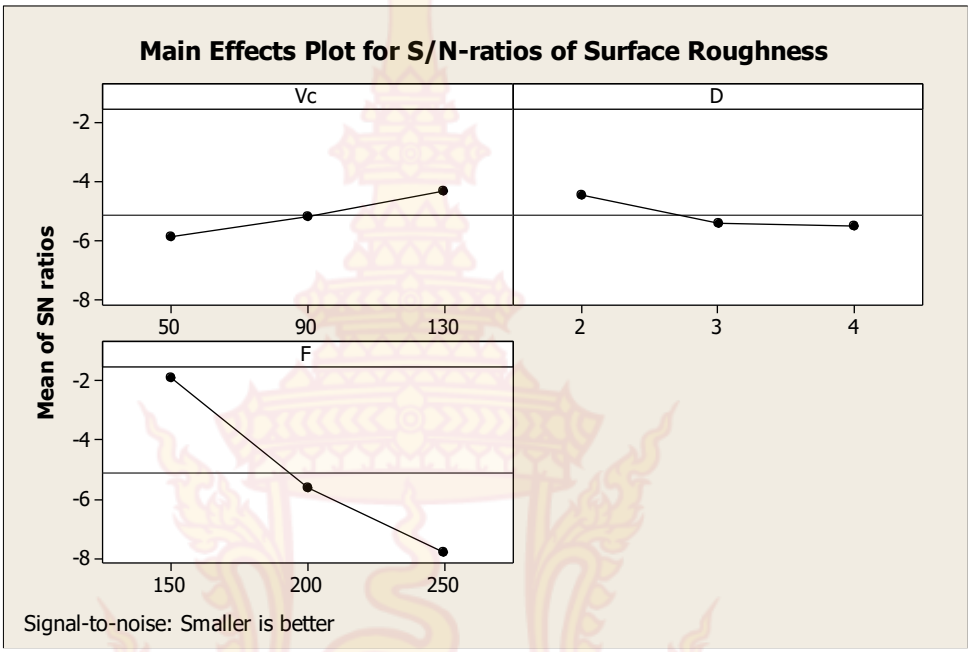
ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย			max	min	Max - min	%main effect
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
Vc	-5.86	-5.19	<u>-4.31</u>	-4.31	-5.86	1.55	18.19
D	<u>-4.45</u>	-5.41	-5.50	-4.45	-5.50	1.05	12.32
F	<u>-1.90</u>	-5.64	-7.82	-1.90	-7.82	5.92	69.37
					รวม	8.52	100

จากตารางที่ 4.3 ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยจะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยจากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูง(max) และต่ำ (min) และทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (%Main Effect) ของแต่ละปัจจัยดังนี้

%Main Effect ของปัจจัย Vc = (1.55/8.52) x 100
= 18.19%
%Main Effect ของปัจจัย D = (1.05/8.52) x 100
= 12.32%
%Main Effect ของปัจจัย F = (5.92/8.52) x 100
= 69.37%

พบว่า อัตราป้อน (F) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความหยาบผิวของชิ้นงานมากที่สุดคิดเป็น 69.37% รองลงมาคือ ความเร็วตัด (Vc) มีค่าเท่ากับ 18.19% และรองมาคือระยะป้อนลึก (D) มีค่าเท่ากับ 12.32% จากผลในตารางที่ 4.3 สามารถสร้างกราฟผลตอบสนอง S/N-Ratio

โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับปัจจัยแสดงดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.1 พบว่าระดับปัจจัย Vc และ D ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับระดับปัจจัย F ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมาก โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานต่ำที่สุด ควรกำหนด Vc ระดับที่ 3 คือ 130 เมตร/นาที ,D ระดับที่ 1 คือ 2 มิลลิเมตร และ F ระดับที่ 1 คือ 150 มิลลิเมตร/นาที

4.1.3 การพยากรณ์ค่าความหยาบผิวที่ได้จากวิธีทากูชิ

ระดับปัจจัยที่ใช้พยากรณ์ที่ได้จากภาพที่ 4.1 คือ Vc ระดับที่ 3 คือ 130 เมตร/นาที D ระดับที่ 1 คือ 2 มิลลิเมตร และ F ระดับที่ 1 คือ 150 มิลลิเมตร/นาที ได้ผลลัพธ์การพยากรณ์ดังนี้ อัตราส่วน S/N Ratio คือ -0.42 และค่า Mean คือ 0.885 μm.

4.1.4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% (α = 0.05) ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความหยาบผิว

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	3.6166	3.6166	1.8083	20.28	0.047
D	2	2.0592	2.0592	1.0296	11.54	0.080

F	2	53.7297	53.7297	26.8648	301.22	0.003
Error	2	0.1784	0.1784	0.0892		
Total	8	59.5838				
S = 0.298643 R-Sq = 99.70% R-Sq(adj) = 98.80%						

จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่า P-value ของ Vc และF มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าความเร็วตัด (Vc) และอัตราป้อน (F) ส่งผลต่อค่าความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ว่าค่าอัตราป้อน (F) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวมากที่สุด

4.2 วิธีการทากูชิสำหรับการสึกหรอของดอกกัด (Tool Wear)

การวิเคราะห์ผลที่ไดจากการทดลองทั้ง 9 ชุดการทดลอง ได้ค่าผลตอบสนองของการสึกหรอของดอกกัด (Tool wear) ซึ่งผลลัพธ์ที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การสึกหรอของดอกกัดที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัยในการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			การสึกหรอของดอกกัด (กรัม)		
	Vc (m/min)	D (mm)	F (mm/min)	ชิ้นงานที่1 (g)	ชิ้นงานที่ 2 (g)	ชิ้นงานที่ 3 (g)
1	50	2	150	0.0007	0.0010	0.0009
2	50	3	200	0.0010	0.0011	0.0011
3	50	4	250	0.0018	0.0017	0.0014
4	90	2	200	0.0010	0.0009	0.0010
5	90	3	250	0.0014	0.0015	0.0017
6	90	4	150	0.0013	0.0009	0.0013
7	130	2	250	0.0014	0.0012	0.0014
8	130	3	150	0.0013	0.0010	0.0009
9	130	4	200	0.0016	0.0015	0.0013

หมายเหตุ : วิธีการเก็บข้อมูลการสึกหรอของดอกกัดแสดงดังภาคผนวก ก

4.2.1 ค่าอัตราส่วน S/N-Ratio ของความสึกหรอของดอกกัด

จากการทดลองชิ้นงานด้วยระดับปัจจัยที่แตกต่างกันได้ค่าความสึกหรอของดอกกัดดังตารางที่ 4.6 นำมาใช้ในการคำนวณหาค่า S/N-Ratio โดยค่าความสึกหรอของดอกกัดหาค่าอัตราส่วน S/N-Ratio ชนิดที่ค่าตอบสนองที่น้อยที่สุดคือค่าที่ดีที่สุด (The Smaller - The Better) ตามสมการที่ (4-2)

S/N-Ratio แบบ The Smaller - The Better

$$\frac{S}{N} = -10 \log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \quad (4\text{-}2)$$

เมื่อ S/N แทน อัตราส่วนของ S/N ในแต่ละ Experiment Number

n แทน จำนวนการทดลองซ้ำในแต่ละ Experiment Number

y_i แทน ค่าตอบสนอง (Response) ในแต่ครั้งของการทดลอง ของแต่ละ Experiment Number

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 1

$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(0.0007^2+0.0010^2+0.0009^2)\right)$

$= -10 \log(7.67E\text{-}07) = 61.15$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 2

$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(0.0010^2+0.0011^2+0.0011^2)\right)$

$= -10 \log(1.14E\text{-}06) = 59.43$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 3

$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(0.0018^2+0.0017^2+0.0014^2)\right)$

$= -10 \log(2.70E\text{-}06) = 55.69$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 4

$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(0.0010^2+0.0009^2+0.0009^2)\right)$

$= -10 \log(9.37E\text{-}07) = 60.28$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 5

$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(0.0014^2+0.0015^2+0.0017^2)\right)$

$= -10 \log(2.37E\text{-}06) = 56.26$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 6

$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(0.0013^2+0.0009^2+0.0013^2)\right)$

$= -10 \log(1.40E\text{-}06) = 58.55$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 7

$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(0.0014^2+0.0012^2+0.0014^2)\right)$

$= -10 \log(1.79E\text{-}06) = 57.48$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 8

$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}(0.0013^2+0.0010^2+0.0009^2)\right)$

$= -10 \log\left(1.17E\text{-}06\right) \quad = 59.33$

ค่า S/N – Ratio ของการทดลองที่ 9

$= -10 \log\left(\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\left(0.0016^2+0.0015^2+0.0013^2\right)\right)$

$= -10 \log\left(2.17E\text{-}06\right) \quad = 56.67$

นั่นคือการคำนวณค่าอัตราส่วน S/N ของความสึกหรอของดอกกัดจากการทดลองทั้ง 9 การทดลองสรุปดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สรุปอัตราส่วน S/N ของค่าความความสึกหรอของดอกกัดจากผลการทดลอง 9 ชุด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			การสึกหรอของดอกกัด (กรัม)			MSD	S/N-Ratio
	Vc (m/min)	D (mm)	F (mm/min)	ชิ้นงานที่ 1 (g)	ชิ้นงานที่ 2 (g)	ชิ้นงานที่ 3 (g)		
1	50	2	150	0.0007	0.0010	0.0009	7.67E-07	61.15
2	50	3	200	0.0010	0.0011	0.0011	1.14E-06	59.43
3	50	4	250	0.0018	0.0017	0.0014	2.70E-06	55.69
4	90	2	200	0.0010	0.0009	0.0010	9.37E-07	60.28
5	90	3	250	0.0014	0.0015	0.0017	2.37E-06	56.26
6	90	4	150	0.0013	0.0009	0.0013	1.40E-06	58.55
7	130	2	250	0.0014	0.0012	0.0014	1.79E-06	57.48
8	130	3	150	0.0013	0.0010	0.0009	1.17E-06	59.33
9	130	4	200	0.0016	0.0015	0.0013	2.17E-06	56.64
							Average =	58.31

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าค่าความสึกหรอของดอกกัดที่ได้อยู่ในช่วง 0.0007 ถึง 0.0018 กรัม และค่ากลางเบี่ยงเบนมาตรฐาน (MSD) ของค่าความสึกหรอของดอกกัดที่อยู่ระหว่าง 7.67E-07 ถึง 2.70E-06 อัตราส่วน S/N-Ratio ของความสึกหรอของดอกกัดที่ได้อยู่ระหว่าง 55.69 ถึง 61.15 โดยมีค่าเฉลี่ยของ S/N-Ratio อยู่ที่ 58.31

4.2.2 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความสึกหรอของดอกกัด

ถ้าค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัยควบคุมใดมีค่ามากหมายความว่าที่ระดับปัจจัยควบคุมนั้นจะมีผลทำให้ค่าความสึกหรอของดอกกัดออกมามาก โดยได้ผลการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยโดยอาศัย ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความสึกหรอของดอกกัดดังต่อไปนี้

ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย Vc ระดับที่ 1 = [(61.15) + 59.43) + (55.69)]/3

= 58.76

ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย Vc ระดับที่ 2 = [(60.28) + (56.26) + (58.55)]/3
= 58.36
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย Vc ระดับที่ 3 = [(57.48) + (59.33) + (56.64)]/3
= 57.81
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 1 = [(61.15) + (60.28) + (57.48)]/3
= 59.63
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 2 = [(59.43) + (56.26) + (59.33)]/3
= 58.34
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย D ระดับที่ 3 = [(55.69) + (58.55) + (56.64)]/3
= 56.96
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 1 = [(61.15) + (58.55) + (59.33)]/3
= 59.68
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 2 = [(59.43) + (60.28) + (56.64)]/3
= 58.78
ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของปัจจัย F ระดับที่ 3 = [(55.69) + (56.26) + (57.48)]/3
= 56.48

ดังนั้นได้ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความสึกหรอของดอกกัดจากการทดลองทั้ง 3 ปัจจัย และ 3 ระดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัย โดยอาศัยค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของค่าความสึกหรอของดอกกัด

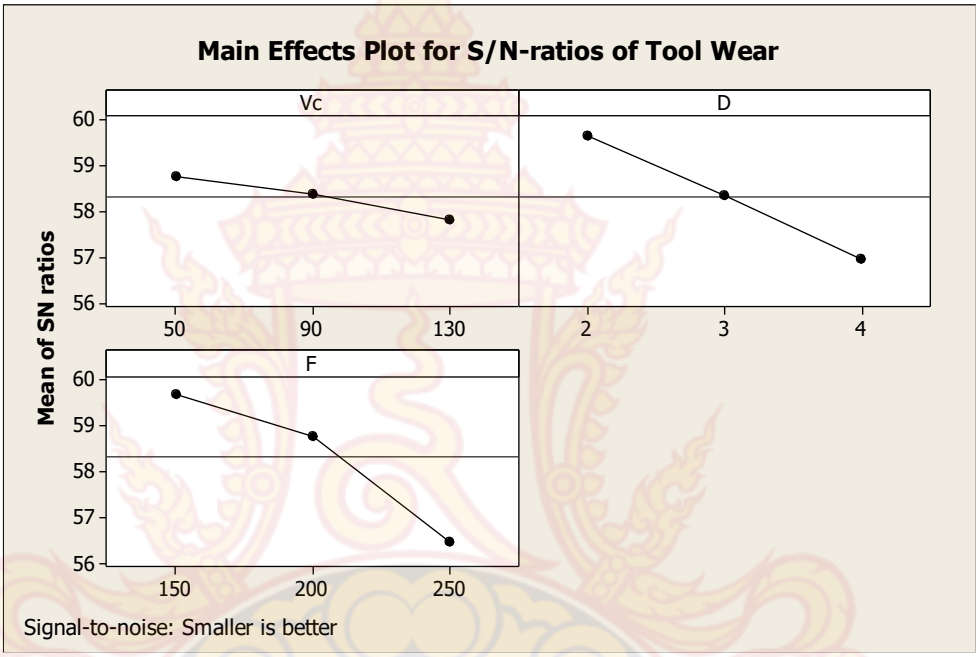
ปัจจัย	ค่า S/N-Ratio เฉลี่ย			max	min	Max - min	%main effect
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3				
Vc	58.76	58.36	57.81	58.76	57.81	0.91	13.42
D	59.63	58.34	56.96	59.63	56.96	2.67	39.38
F	59.68	58.78	56.48	59.68	56.48	3.20	47.20
					รวม	6.78	100

จากตารางที่ 4.7 ค่า S/N-Ratio เฉลี่ยจะถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์หาอิทธิพลของปัจจัยจากผลต่างของค่าของระดับปัจจัยที่สูง(max) และต่ำ (min) และทำการวิเคราะห์ร้อยละของอิทธิพลหลัก (%Main Effect) ของแต่ละปัจจัยดังนี้

%Main Effect ของปัจจัย Vc = (0.91/6.78) x 100
= 13.42%
%Main Effect ของปัจจัย D = (2.67/6.78) x 100
= 39.38%
%Main Effect ของปัจจัย F = (3.20/6.78) x 100

= 47.20%

พบว่า อัตราป้อน (F) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า S/N-Ratio เฉลี่ยของความสึกหรอของชิ้นงานมากที่สุดคิดเป็น 47.20% รองลงมาคือ ระยะป้อนลึก (D) มีค่าเท่ากับ 39.38% และรองมาคือความเร็วตัด (Vc) มีค่าเท่ากับ 13.42% จากผลในตารางที่ 4.7 สามารถสร้างกราฟผลตอบสนอง S/N-Ratio โดยขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยที่ถูกคำนวณสำหรับแต่ละระดับปัจจัยได้ดังภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของระดับต่างๆ ของปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลองกับค่า S/N-Ratio ของค่าความสึกหรอของดอกกัด

จากภาพที่ 4.2 พบว่าระดับปัจจัย Vc ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความสึกหรอของดอกกัดน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับระดับปัจจัย F และ D ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่า S/N-Ratio ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมาก โดยสรุปจากกราฟหากต้องการให้ได้ค่าความสึกหรอดอกกัดของชิ้นงานต่ำที่สุด ควรกำหนด Vc ระดับที่ 1 คือ 50 เมตร/นาที ,D ระดับที่ 1 คือ 2 มิลลิเมตร และ F ระดับที่ 1 คือ 150 มิลลิเมตร/นาที

4.2.3 การพยากรณ์ค่าความสึกหรอของดอกกัดที่ได้จากวิธีทากูชิ

ระดับปัจจัยที่ใช้พยากรณ์ที่ได้จากภาพที่ 4.2 คือ Vc ระดับที่ 1 คือ 50 เมตร/นาที ,D ระดับที่ 1 คือ 2 มิลลิเมตร และ F ระดับที่ 1 คือ 150 มิลลิเมตร/นาทีได้ผลลัพธ์การพยากรณ์ดังนี้ อัตราส่วน S/N Ratio คือ 61.45 และค่า Mean คือ 0.000811 กรัม

4.2.4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการทดลอง สำหรับการทดลองนี้กำหนดให้ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% (α = 0.05) ได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ S/N-Ratio ของความสึกหรอของดอกกัด

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vc	2	1.3411	1.3411	0.6705	3.39	0.228
D	2	10.7628	10.7628	5.3814	27.18	0.035
F	2	16.3755	16.3755	8.1877	41.35	0.024
Error	2	0.3960	0.3960	0.1980		
Total	8	28.8754				
S = 0.444988		R-Sq = 98.63%		R-Sq(adj) = 94.51%		

จากตารางที่ 4.8 พบว่าค่า P-value ของ D และ F มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงว่าระยะป้อนลึก (D) และอัตราป้อน (F) ส่งผลต่อค่าความสึกหรอของดอกกัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยที่ว่าค่าอัตราป้อน (F) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความสึกหรอของดอกกัดมากที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลจากการทดลองหาอิทธิพลของปัจจัยที่ใช้ในกระบวนการกัดสำหรับวัสดุอลูมิเนียม เกรด 6061 โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทากูชิ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ เครื่องกัด CNC เครื่องวัดความหยาบผิว เครื่องชั่งน้ำหนัก ได้กำหนดตัวแปรในการทดลองคือตัวแปรต้นได้แก่ ความเร็วตัด(Vc) ระยะป้อนลึก(D) และอัตราป้อน(F) ส่วนตัวแปรตามได้แก่ ค่าความหยาบผิว โดยใช้เครื่องวัดความหยาบผิวและค่าความสึกหรอของดอกกัดโดยเปรียบเทียบน้ำหนักก่อน และหลังการทดลอง ได้กำหนดความเร็วตัด 3ระดับ คือ 50 ,90 และ
130 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 3 ระดับ คือ 2 ,3 และ4 มิลลิเมตร อัตราป้อน 3 ระดับ คือ 150 ,200 และ250 มิลลิเมตร/นาที

5.1.1 สรุปผลการทดลองจากวิธีการของทากูชิ

จากการทดลองด้วยวิธีทากูชิพบว่า ระดับปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานน้อยที่สุด คือกำหนด ความเร็วตัด(Vc) ระดับที่ 3 คือ 130 เมตร/นาที ป้อนลึก(D) ระดับที่ 1 คือ 2 มิลลิเมตร และ อัตราป้อน(F) ระดับที่ 1 คือ 150 มิลลิเมตร/นาที ส่วนระดับปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าความสึกหรอดอกกัดของชิ้นงานน้อยที่สุด ควรกำหนด ความเร็วตัด(Vc) ระดับที่ 1 คือ 50 เมตร/นาที ป้อนลึก(D) ระดับที่ 1 คือ 2 มิลลิเมตร และ อัตราป้อน(F)ระดับที่ 1 คือ 150 มิลลิเมตร/นาที

5.1.2 การพยากรณ์ค่าความหยาบผิวที่ได้จากวิธีทากูชิ

ระดับปัจจัยที่ใช้พยากรณ์ที่ได้จากภาพที่ 4.1 คือ Vc ระดับที่ 3 คือ 130 เมตร/นาที D ระดับที่ 1 คือ 2 มิลลิเมตร และ F ระดับที่ 1 คือ 150 มิลลิเมตร/นาที ได้ผลลัพธ์การพยากรณ์ดังนี้ อัตราส่วน S/N Ratio คือ -0.42 และค่า Mean คือ 0.885 μm

5.1.3 การพยากรณ์ค่าความสึกหรอของดอกกัดที่ได้จากวิธีทากูชิ

ระดับปัจจัยที่ใช้พยากรณ์ที่ได้จากภาพที่ 4.1 คือ Vc ระดับที่ 1 คือ 50 เมตร/นาที ,D ระดับที่ 1 คือ 2 มิลลิเมตร และ F ระดับที่ 1 คือ 150 มิลลิเมตร/นาที ได้ผลลัพธ์การพยากรณ์ดังนี้ อัตราส่วน S/N Ratio คือ 61.45 และค่า Mean คือ 0.000811 กรัม

5.1.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ (α = 0.05)

จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ได้แก่ ความเร็วตัด(Vc) และอัตราป้อน(F) โดยเมื่อเพิ่มความเร็วตัดมากขึ้นมีผลทำให้มีค่าความหยาบผิวลดลง เนื่องจากความเร็วตัดที่สูงจะทำให้ตัดเฉือนชิ้นงานถี่ขึ้นและส่วนการเพิ่มอัตราป้อนให้สูงขึ้นทำให้ระยะทางในการเดินกัดชิ้นงานแต่ละรอบสูงขึ้น เกิดแรงตัดมากขึ้น ทำให้ได้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้น

5.1.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความสึกหรอของดอกกัด ที่ระดับนัยสำคัญ (α = 0.05)

จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความสึกหรอดอกกัด ได้แก่ ระยะป้อนลึก (D) และอัตราป้อน (F) โดยระยะป้อนลึกมีผลต่อการสึกหรอทางด้านข้างของคมตัด ส่วนอัตราป้อนจะส่งผลต่อการสึกหรอด้านข้างและด้านหน้าคมตัด เนื่องจากแรงเสียดทานและความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเดินตัดชิ้นงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการทดลองเปรียบเทียบความหยาบผิวชิ้นงาน กับขนาดของดอกกัดหรือรูปทรงของดอกกัดแบบต่างๆ เช่น แบบ 3 คมตัด มุมคายเศษ แตกต่างจากดอกกัดที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

5.2.2 การทดลองเกี่ยวกับการสึกหรอของดอกกัดจะต้องใช้วัสดุชิ้นงานในการทดลองในปริมาณที่มากพอ เพื่อจะได้ศึกษาลักษณะของการสึกหรอของมีดกัด

5.2.3 ยังมีตัวแปรอิสระอื่น เช่น ชนิดของการหล่อเย็น ชนิดของวัสดุชิ้นงาน อาจจะส่งผลต่อคุณภาพของชิ้นงานและความสึกหรอของดอกกัด ซึ่งควรได้รับการศึกษาต่อไป

บรรณานุกรม

[1] นิติกานต์ พาเจริญ. **ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรในกระบวนการทางความร้อนที่มีผลต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของอลูมิเนียมหล่อแบบกึงของแข็ง AL 6061.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556

[2] คมพันธ์ ชมสมุทร. **ศึกษาเงื่อนไขการตัดที่ส่งผลต่อคุณภาพชิ้นงานและอายุการใช้งานเม็ดมีดด้วยวิธีทากูชิและพื้นผิวตอบสนอง.** วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2554

[3] รักษ์พล มีด้วง. **ผลของพารามิเตอร์การกัดต่อสมบัติอลูมิเนียมผสมทองแดง เกรด 2024**. วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554

[4] ชาลี ตระกูลการ. **เทคโนโลยีซีเอ็นซี.** บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน), 2554, หน้า 92-93,116.

[5] รูปภาพจาก การใช้เครื่องกัดตั้ง (Milling) [Online], “http://www.panmaneecn.com.

[6] บรรเลง ศรนิล, สมนึก วัฒนศรีกุล. **ตารางคู่มืองานโลหะ**. พิมพ์ครั้งที่ 2, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550, หน้า 282.

[7] อำนาจ ทองแสน. **ทฤษฎีและการเขียนโปรแกรม CNC สำหรับควบคุมเครื่องจักรกลด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical control).** บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2544, หน้า152-155.

[8] มานพ ตันตระบัณฑิต. **เขียนแบบวิศวกรรม (ระบบ ISO และเมตริก)**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2550, หน้า 73-81.

[9] บริษัท ออยเซิร์ฟ จำกัด. **น้ำมันหล่อเย็น (Coolant)**. [Online], “http://www.Oilsevethai.com.

[10] วรพงศ์ พงศ์ภัทรวุฒิ. **การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวและอายุการใช้งานของมีคาร์ไบด์ในการกัดเหล็กกล้าคาร์บอน S50C**. วิทยานิพนธ์ปริญญาครุรุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2554, หน้า 16-19.

[11] สหรัตน์ วงศรีษะ. “**การศึกษาประสิทธภาพการใช้งานและการสึกหรอของเอ็ลมิลล์ที่ผลิตภายในประเทศ**”. Mechanical Technology Magazine, Vol. 1, No. 5, 2002, pp. 30 – 36.

บรรณานุกรม(ต่อ)

[12] ปารเมศ ชุติมา. **การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม**. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

[13] สมเดช อิงคะระวะระ. **การวิเคราะตัวแปรในการชุบเหล็กกล้ารอบสูง เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการต้านทานการสึกหรอของเอ็นมิลล์.** Mechanical Technology Magazine, Vol. 1, 2002

[14] มารุต แซ่ห่ง. "**การศึกษาการนำความร้อนในของเหลวแต่ละชนิด**". Mechanical Technology Magazine, Vol. 1,No.8, 2549, pp. 29-32

[15] ประวุฒิ เพชรไพรินทร์. **การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเรียบผิวและความสึกหรอของคมตัดในการกัดทองเหลืองผสม.** วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2551

[16] ประพลเปี่ยม ศักดิ์ชัย. **การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความเรียบผิวในงานกัดเหล็กกล้างานเครื่องมือเย็น D2.** วิทยานิพนธ์ปริญญาครุศาสตร์อุตสาหกรรมมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าธนบุรี, 2551

[17] J.M. Vieira, A.r. Machado and E.O. Ezugwu, "**Performance of cutting fluid during facemill**". Journal of Material of processing Technology, 2005, pp. 16 – 20.

[18] ชุมพร ช่างกลึงเหมาะ. **ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบละเอียดของผิวงานกับเงื่อนไขการกัดของวัสดุอิพอกเรซิ่นเติมอะลูมิเนียม.** วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2552, หน้า 88 – 90.

ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ตาราง ก.1 บันทึกค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ลำดับ	ซ้ำ	V (ม./นาที)	D (มม.)	F (มม./นาที)	วัดค่าความหยาบผิว Ra (μm)						เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6		
1	1	50	2	150	1.24	1.26	1.28	1.26	1.28	1.25	1.26	1.23
	2				1.24	1.21	1.19	1.2	1.19	1.21	1.21	
	3				1.29	1.27	1.21	1.22	1.20	1.21	1.23	
2	1	50	3	200	2.30	2.26	2.24	2.21	2.19	2.20	2.23	2.20
	2				2.21	2.25	2.21	2.28	2.29	2.28	2.25	
	3				2.11	2.15	2.13	2.11	2.14	2.12	2.13	
3	1	50	4	250	3.02	2.99	2.96	2.95	2.87	2.85	2.94	2.78
	2				2.67	2.61	2.69	2.65	2.68	2.63	2.66	
	3				2.76	2.78	2.75	2.73	2.71	2.74	2.75	
4	1	90	2	200	2.03	2.01	1.98	1.99	2.06	2.01	2.01	1.77
	2				1.56	1.59	1.54	1.57	1.55	1.53	1.56	
	3				1.73	1.71	1.74	1.76	1.70	1.72	1.73	
5	1	90	3	250	2.49	2.46	2.48	2.47	2.45	2.44	2.47	2.52
	2				2.50	2.53	2.49	2.56	2.52	2.49	2.52	
	3				2.57	2.54	2.58	2.58	2.59	2.57	2.57	

ตาราง ก.1(ต่อ) บันทึกค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

ลำดับ	ซ้ำ	V (ม./นาที)	D (มม.)	F (มม./นาที)	วัดค่าความหยาบผิว Ra (μm)						เฉลี่ย	เฉลี่ยรวม
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6		
6	1	90	4	150	1.31	1.3	1.33	1.34	1.29	1.31	1.31	1.34
	2				1.32	1.35	1.36	1.34	1.36	1.35	1.35	
	3				1.36	1.35	1.38	1.36	1.31	1.4	1.36	
7	1	130	2	250	2.01	2.13	2.15	2.09	2.14	2.16	2.11	2.12
	2				2.07	2.00	2.13	2.14	2.20	2.15	2.12	
	3				2.10	2.12	2.14	2.13	2.08	2.18	2.13	
8	1	130	3	150	1.19	1.16	1.15	1.31	1.19	1.15	1.19	1.17
	2				1.16	1.14	1.15	1.17	1.12	1.17	1.15	
	3				1.15	1.14	1.13	1.18	1.19	1.18	1.16	
9	1	130	4	200	1.82	1.80	1.84	1.82	1.84	1.81	1.82	1.79
	2				1.78	1.79	1.84	1.80	1.75	1.76	1.79	
	3				1.81	1.73	1.83	1.76	1.77	1.73	1.77	

ตารางที่ ก.3 บันทึกค่าน้ำหนักดอกกัดก่อนการทดลอง

ลำดับ	ซ้ำ	V (ม./นาที)	D (มม.)	F (มม./นาที)	ค่าน้ำหนักดอกกัดก่อนการทดลอง (กรัม)						เฉลี่ย
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
1	1	50	2	150	18.5292	18.5293	18.5296	18.5293	18.5296	18.5295	18.5294
	2				18.5224	18.5225	18.5224	18.5223	18.5225	18.5224	18.5224
	3				18.4686	18.4687	18.4685	18.4686	18.4688	18.4689	18.4687
2	1	50	3	200	18.4305	18.4308	18.4307	18.4309	18.4308	18.4309	18.4308
	2				18.4399	18.4397	18.4400	18.4400	18.4397	18.4399	18.4399
	3				18.4875	18.4876	18.4876	18.4876	18.4876	18.4876	18.4876
3	1	50	4	250	18.4471	18.4474	18.4472	18.4472	18.4473	18.4475	18.4473
	2				18.5597	18.5585	18.5585	18.5585	18.5585	18.5584	18.5587
	3				18.4897	18.4898	18.4902	18.4902	18.4899	18.4895	18.4899
4	1	90	2	200	18.4807	18.4801	18.4804	18.4801	18.4803	18.4805	18.4804
	2				18.5103	18.5102	18.5103	18.5104	18.5102	18.5103	18.5103
	3				18.4887	18.4884	18.4882	18.4882	18.4884	18.4885	18.4884
5	1	90	3	250	18.5177	18.5176	18.5174	18.5176	18.5174	18.5173	18.5175
	2				18.5149	18.5148	18.5147	18.5148	18.5148	18.5149	18.5148
	3				18.5107	18.5107	18.5308	18.5309	18.5108	18.5306	18.5208

ตารางที่ ก.3(ต่อ) บันทึกค่าน้ำหนักดอกกัดก่อนการทดลอง

ลำดับ	ซ้ำ	V (ม./นาที)	D (มม.)	F (มม./นาที)	ค่าน้ำหนักดอกกัดก่อนการทดลอง (กรัม)						เฉลี่ย
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	

6	1	90	4	150	18.4329	18.4330	18.4330	18.4331	18.4332	18.4332	18.4331
	2				18.4734	18.4735	18.4736	18.4734	18.4733	18.4735	18.4735
	3				18.4348	18.4348	18.4349	18.4349	18.4348	18.4349	18.4349
7	1	130	2	250	18.4380	18.4375	18.4380	18.4379	18.4375	18.4381	18.4378
	2				18.4773	18.4773	18.4770	18.4771	18.4773	18.4772	18.4772
	3				18.4241	18.4240	18.4238	18.4238	18.4240	18.4238	18.4239
8	1	130	3	150	18.4805	18.4805	18.4806	18.4807	18.4806	18.4804	18.4806
	2				18.4766	18.4762	18.4762	18.4763	18.4763	18.4766	18.4764
	3				18.4581	18.4579	18.4579	18.4579	18.4579	18.4579	18.4579
9	1	130	4	200	18.4232	18.4231	18.4231	18.4230	18.4230	18.4232	18.4231
	2				18.4590	18.4591	18.4592	18.4589	18.4591	18.4593	18.4591
	3				18.4675	18.4674	17.4675	17.4676	18.4674	17.4675	17.9675

ลำดับ	ซ้ำ	V (ม./นาที)	D (มม.)	F (มม./นาที)	ค่าน้ำหนักดอกกัดหลังการทดลอง (กรัม)						เฉลี่ย
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
1	1	50	2	150	18.5286	18.5287	18.5288	18.5286	18.5287	18.5289	18.5287
	2				18.5215	18.5213	18.5217	18.5213	18.5213	18.5212	18.5214
	3				18.4679	18.4678	18.4678	18.4678	18.4678	18.4678	18.4678
2	1	50	3	200	18.4298	18.4297	18.4296	18.4298	18.4297	18.4298	18.4297

	2				18.4388	18.4386	18.4389	18.4389	18.4386	18.4388	18.4388
	3				18.4864	18.4865	18.4865	18.4865	18.4865	18.4865	18.4865
3	1	50	4	250	18.4454	18.4456	18.4454	18.4455	18.4456	18.4456	18.4455
	2				18.5580	18.5568	18.5568	18.5568	18.5568	18.5567	18.5570
	3				18.4887	18.4886	18.4886	18.4886	18.4883	18.4883	18.4885
4	1	90	2	200	18.4798	18.4792	18.4795	18.4792	18.4792	18.4791	18.4793
	2				18.5094	18.5093	18.5094	18.5095	18.5093	18.5094	18.5094
	3				18.4878	18.4875	18.4873	18.4875	18.4872	18.4874	18.4875
5	1	90	3	250	18.5165	18.5162	18.5160	18.5158	18.5162	18.5157	18.5161
	2				18.5137	18.5136	18.5135	18.5136	18.5136	18.5136	18.5136
	3				18.5091	18.5092	18.5289	18.5289	18.5092	18.5289	18.5190

ตารางที่ ก.4 บันทึกค่าน้ำหนักดอกกัดหลังการทดลอง

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) บันทึกค่าน้ำหนักดอกกัดหลังการทดลอง

ลำดับ	ซ้ำ	V (ม./นาที)	D (มม.)	F (มม./นาที)	ค่าน้ำหนักดอกกัดหลังการทดลอง (กรัม)						เฉลี่ย
					ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	
6	1	90	4	150	18.4316	18.4317	18.4317	18.4318	18.4317	18.4318	18.4317
	2				18.4726	18.4727	18.4725	18.4724	18.4727	18.4724	18.4726
	3				18.4335	18.4335	18.4336	18.4336	18.4335	18.4336	18.4336
7	1	130	2	250	18.4366	18.4361	18.4366	18.4365	18.4361	18.4367	18.4364
	2				18.4759	18.4759	18.4760	18.4760	18.4759	18.4762	18.4760

	3				18.4227	18.4226	18.4224	18.4224	18.4226	18.4224	18.4225
8	1	130	3	150	18.4793	18.4792	18.4793	18.4791	18.4792	18.4792	18.4792
	2				18.4757	18.4753	18.4753	18.4751	18.4753	18.4753	18.4753
	3				18.4572	18.457	18.457	18.457	18.457	18.457	18.4570
9	1	130	4	200	18.4215	18.4217	18.4215	18.4214	18.4217	18.4215	18.4216
	2				18.4575	18.4578	18.4575	18.4574	18.4578	18.4576	18.4576
	3				18.4667	18.466	17.4661	17.4662	18.466	17.4661	17.9662

ตารางที่ ก.5 บันทึกค่าความสึกหรอของดอกกัด

ลำดับ	ซ้ำ	V (ม./นาที)	D (มม.)	F (มม./นาที)	น้ำหนักดอกกัด (กรัม)		ค่าความสึกหรอ (กรัม)	ค่าความสึกหรอเฉลี่ย ทำซ้ำ 3 ครั้ง
					ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง		
1	1	50	2	150	18.5294	18.5287	0.0007	0.0009
	2				18.5224	18.5214	0.0010	
	3				18.4687	18.4678	0.0009	
2	1	50	3	200	18.4308	18.4297	0.0010	0.0011
	2				18.4399	18.4388	0.0011	
	3				18.4876	18.4865	0.0011	
3	1	50	4	250	18.4473	18.4455	0.0018	0.0016
	2				18.5587	18.5570	0.0017	
	3				18.4899	18.4885	0.0014	
4	1	90	2	200	18.4804	18.4793	0.0010	0.0010
	2				18.5103	18.5094	0.0009	
	3				18.4884	18.4875	0.0010	
5	1	90	3	250	18.5175	18.5161	0.0014	0.0015
	2				18.5148	18.5136	0.0012	
	3				18.5208	18.5190	0.0017	

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) บันทึกค่าความสึกหรอของดอกกัด

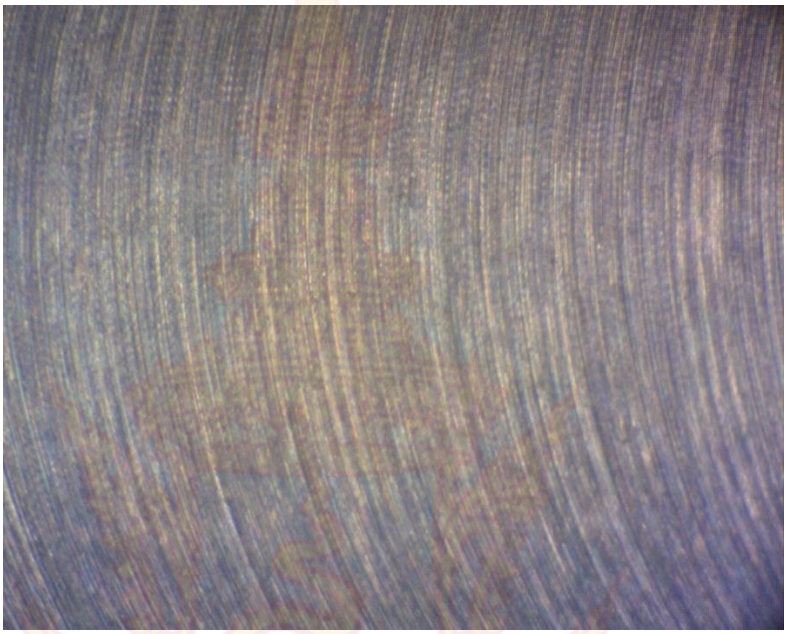
ลำดับ	ซ้ำ	V	D	F	น้ำหนักดอกกัด (กรัม)	ค่าความสึกหรอ	

		(ม./นาที)	(มม.)	(มม./นาที)	ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	(กรัม)	ค่าความสึกหรอเฉลี่ย ทำซ้ำ 3 ครั้ง
6	1	90	4	150	18.4331	18.4317	0.0013	0.0012
	2				18.4735	18.4726	0.0009	
	3				18.4349	18.4336	0.0013	
7	1	130	2	250	18.4378	18.4364	0.0014	0.0013
	2				18.4772	18.4760	0.0012	
	3				18.4239	18.4225	0.0014	
8	1	130	3	150	18.4806	18.4792	0.0013	0.0011
	2				18.4764	18.4753	0.0010	
	3				18.4579	18.4570	0.0009	
9	1	130	4	200	18.4231	18.4216	0.0016	0.0015
	1				18.4591	18.4576	0.0015	
	2				17.9675	17.9662	0.0013	

ภาคผนวก ข

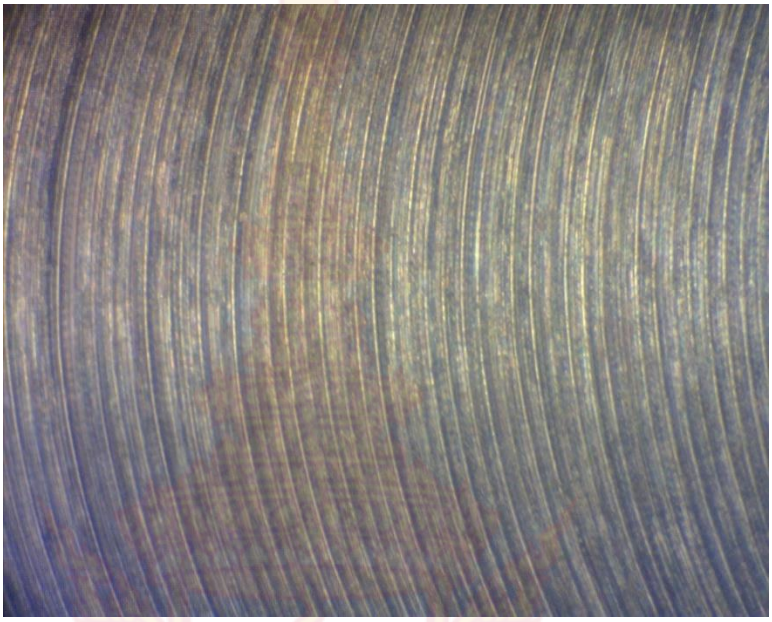
ภาพถ่ายความหยาบผิวชิ้นงาน

การทดลองที่ 1 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับความเร็วตัด 50 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 2 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 150 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เป็น 1.23 µm



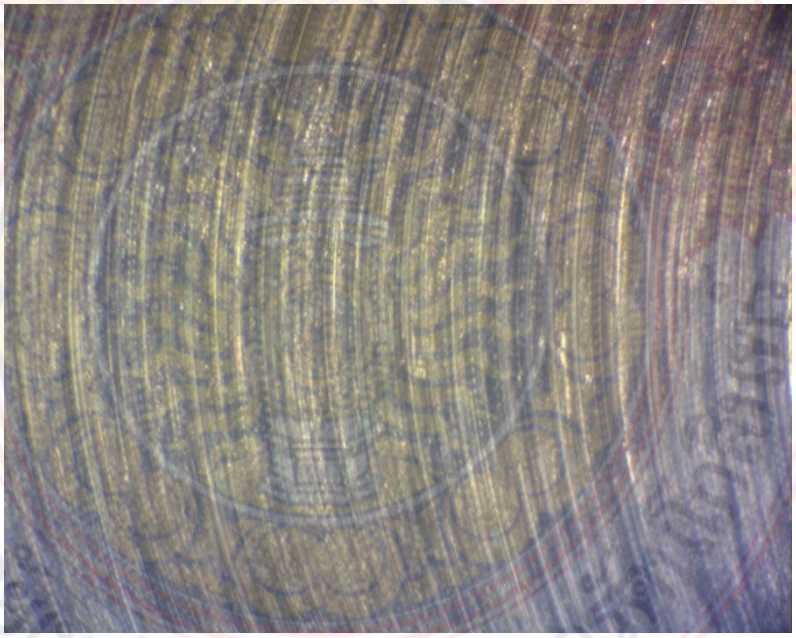
ภาพที่ ข.1 การทดลองที่ 1 / 1 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.26 µm

ภาพที่ ข.2 การทดลองที่ 1 / 2 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.21 µm

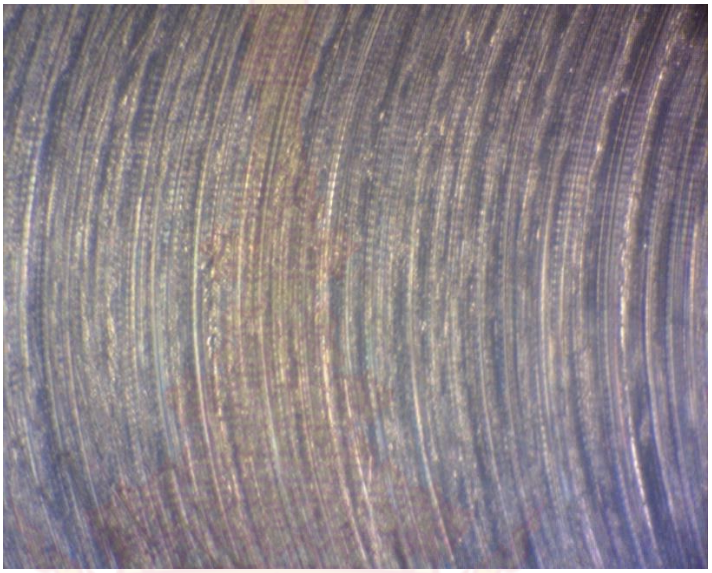


ภาพที่ ข.3 การทดลองที่ 1 / 3 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.23 µm

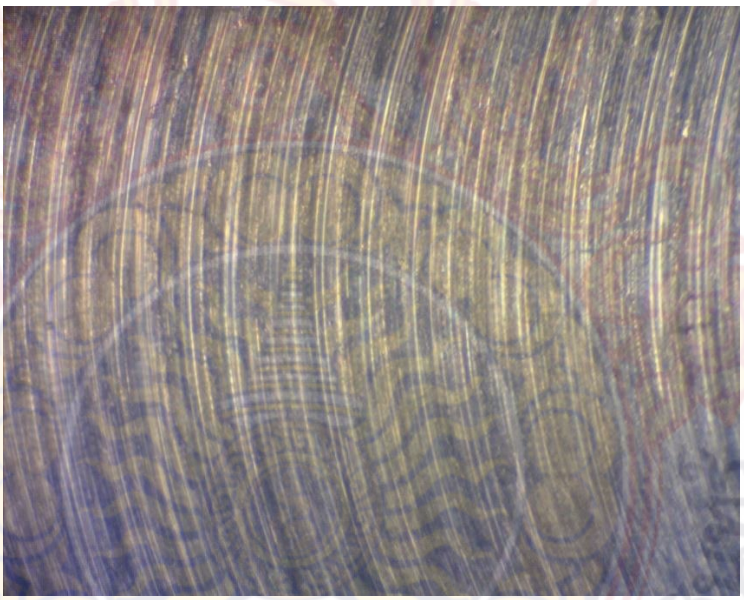
การทดลองที่ 2 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับความเร็วตัด50 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 3 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 200 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เป็น 2.20 µm



ภาพที่ ข.4 การทดลองที่ 2 / 1 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.23 µm

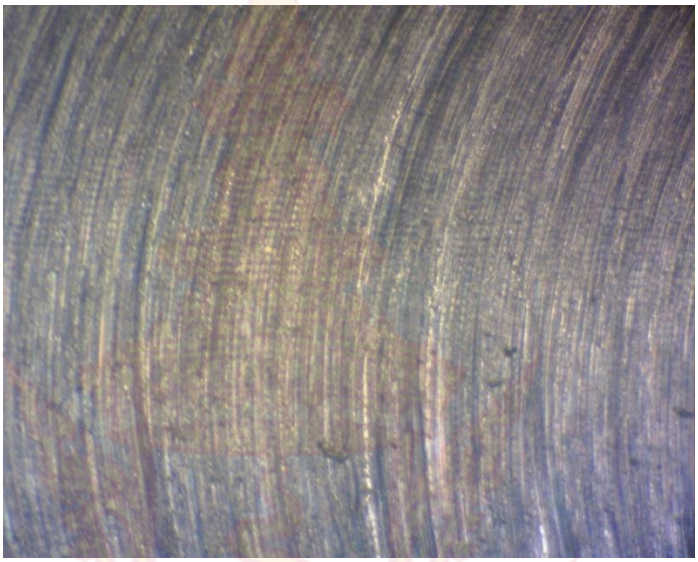


ภาพที่ ข.5 การทดลองที่ 2 / 2 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.25 µm

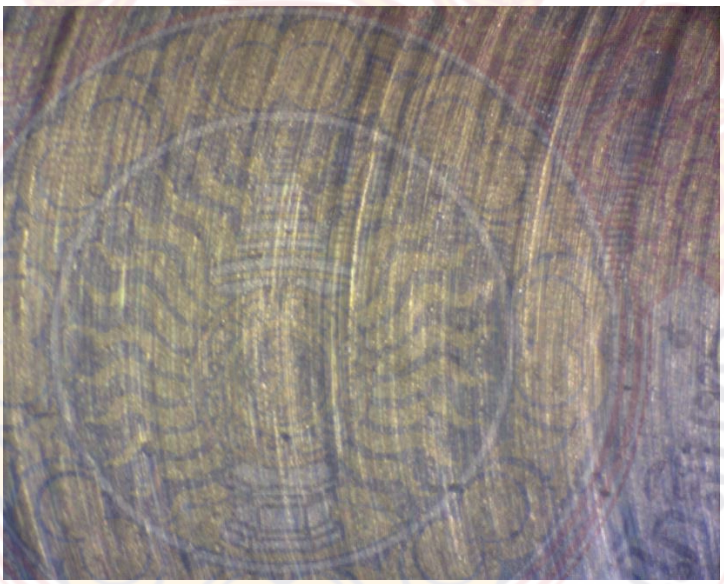


ภาพที่ ข.6 การทดลองที่ 2 / 3 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.13 µm

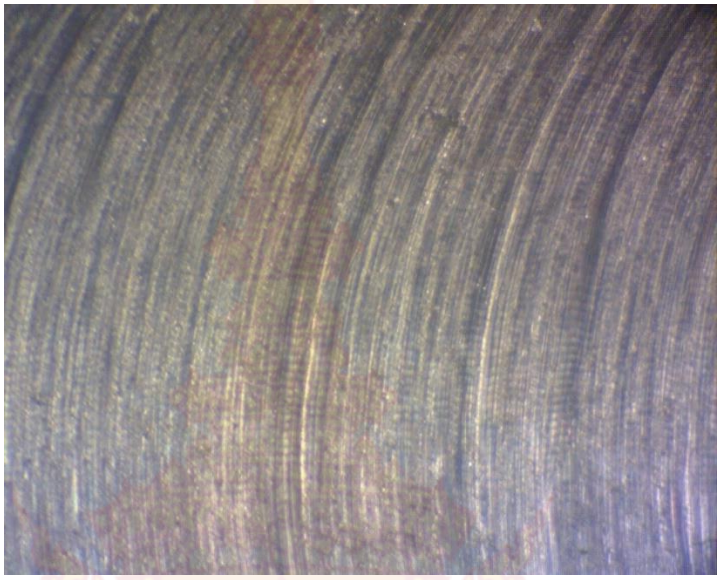
การทดลองที่ 3 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับความเร็วตัด 50 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 4 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 250 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เป็น 2.78 µm



ภาพที่ ข.7 การทดลองที่ 3 / 1 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.94µm

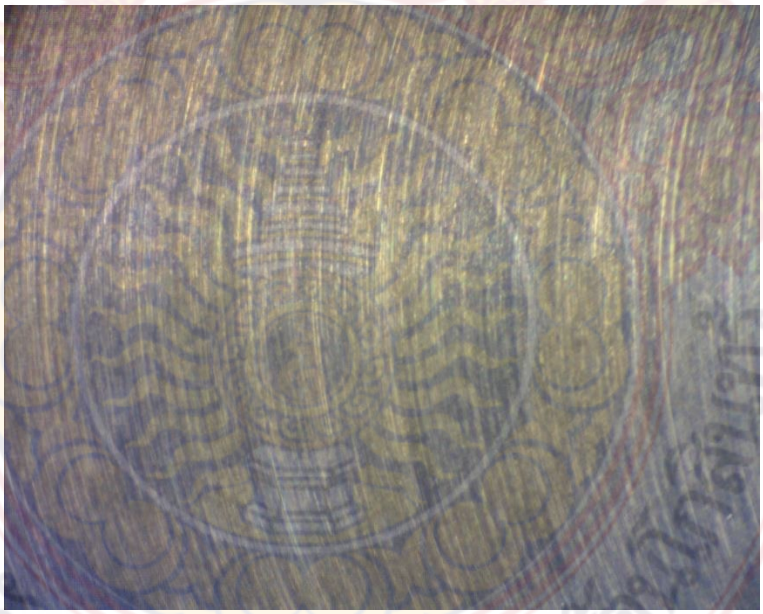


ภาพที่ ข.8 การทดลองที่ 3 / 2 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.66 µm

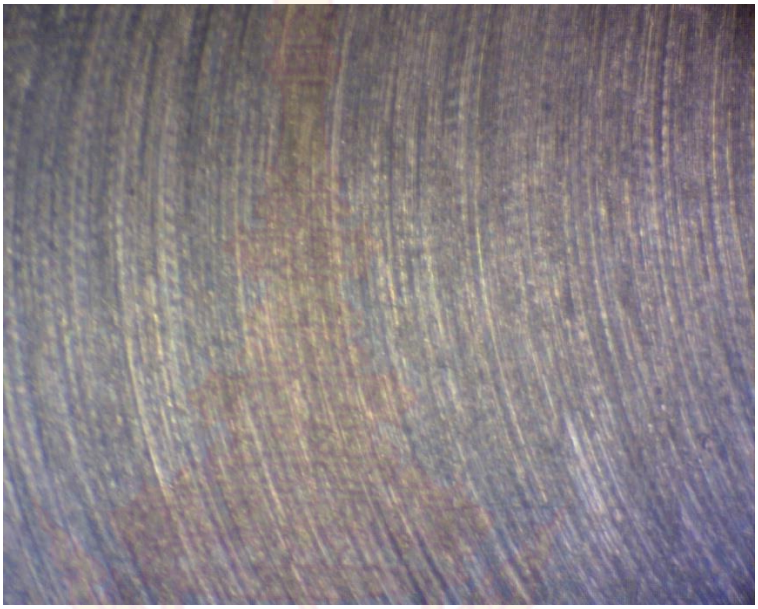


ภาพที่ ข.9 การทดลองที่ 3 / 3 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.75 µm

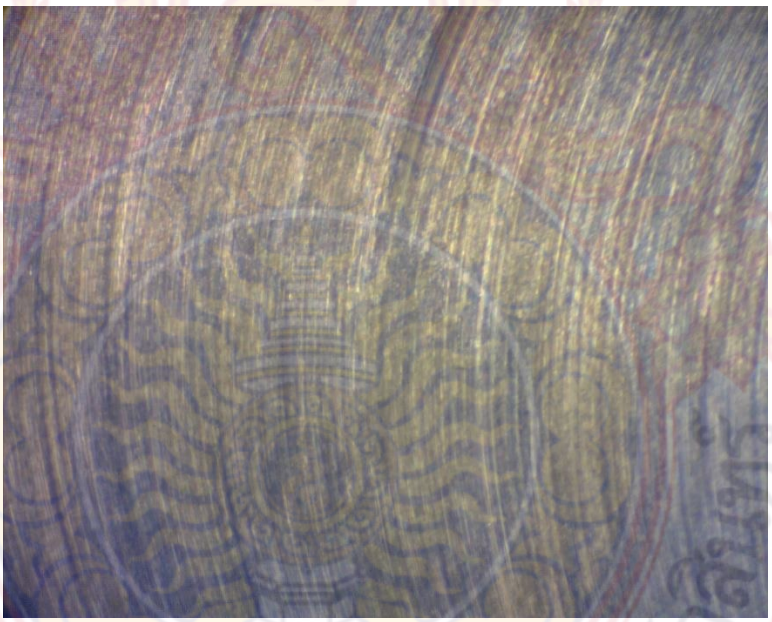
การทดลองที่ 4 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับความเร็วตัด 90 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 2 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 200 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เป็น 1.77 µm



ภาพที่ ข.10 การทดลองที่ 4 / 1 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.01 µm

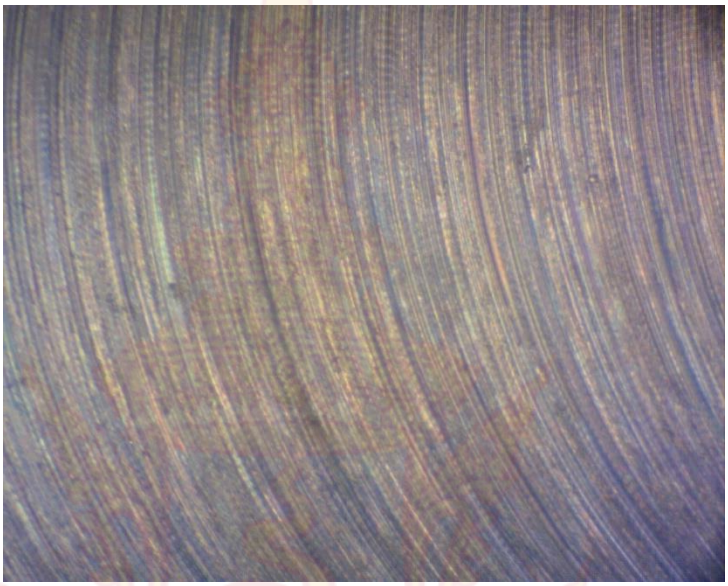


ภาพที่ ข.11 การทดลองที่ 4 / 2 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.56 µm

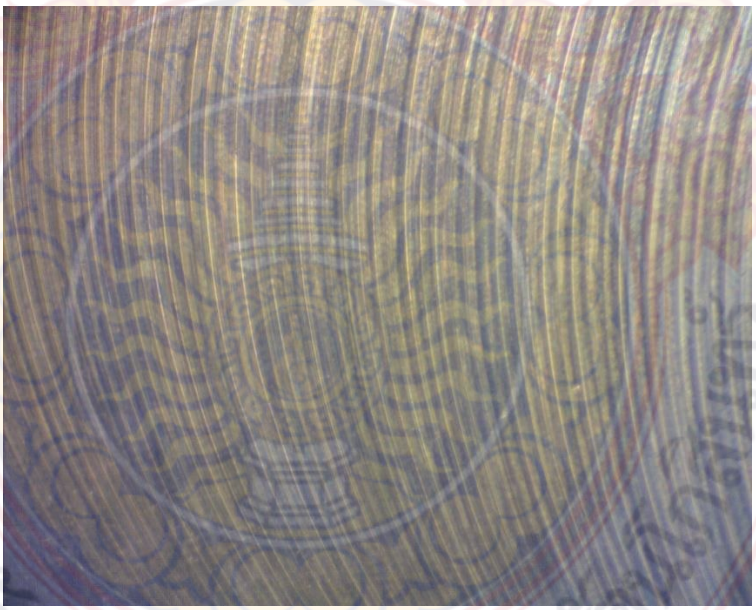


ภาพที่ ข.12 การทดลองที่ 4 / 3 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.73 µm

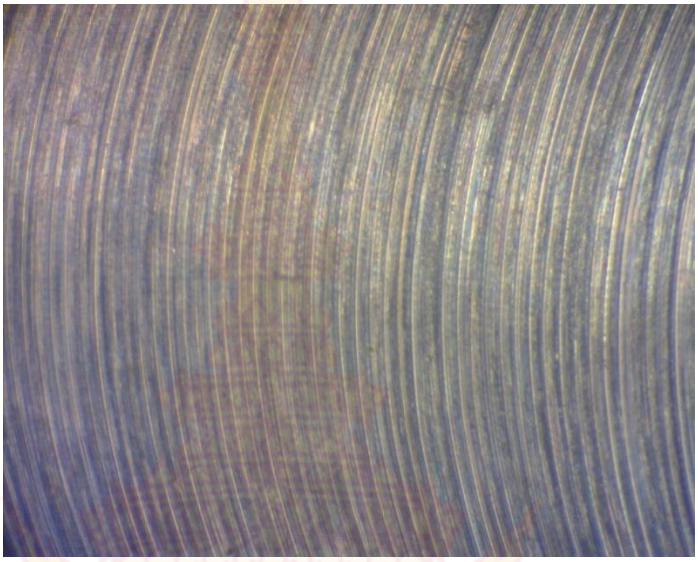
การทดลองที่ 5 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับความเร็วตัด 90 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 3 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 250 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เป็น 2.52 µm



ภาพที่ ข.13 การทดลองที่ 5 / 1 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.47 µm

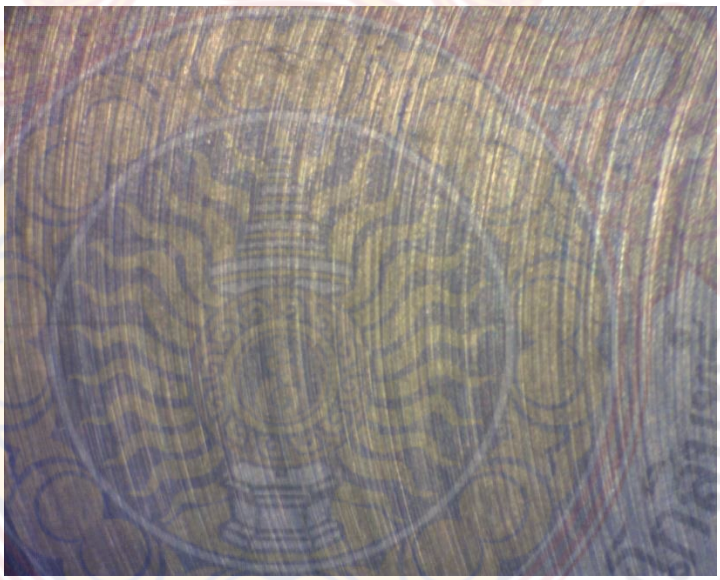


ภาพที่ ข.14 การทดลองที่ 5 / 2 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.52 µm

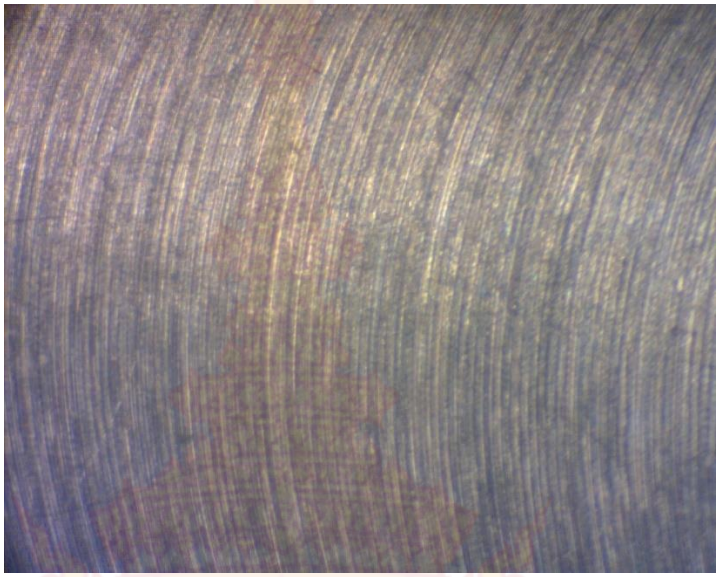


ภาพที่ ข.15 การทดลองที่ 5 / 3 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.57 µm

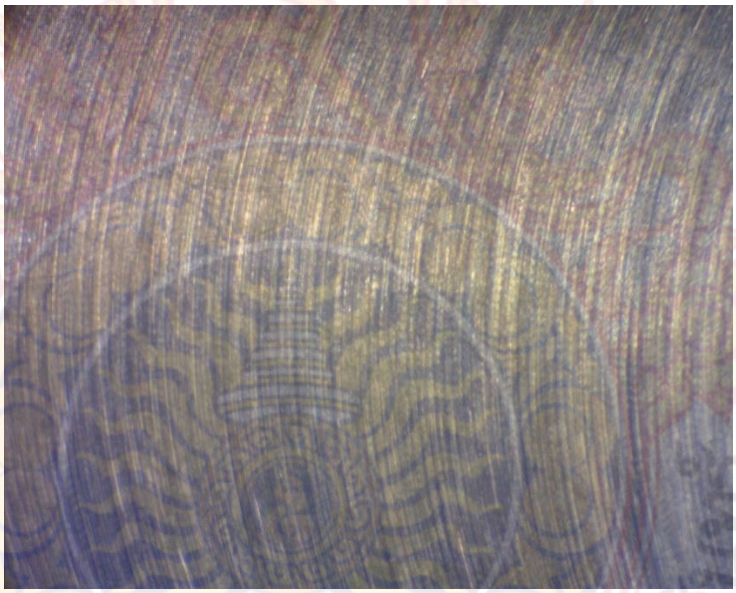
การทดลองที่ 6 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับความเร็วตัด 90 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 4 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 150 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เป็น 1.34 µm



ภาพที่ ข.16 การทดลองที่ 6 / 1 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.31 µm

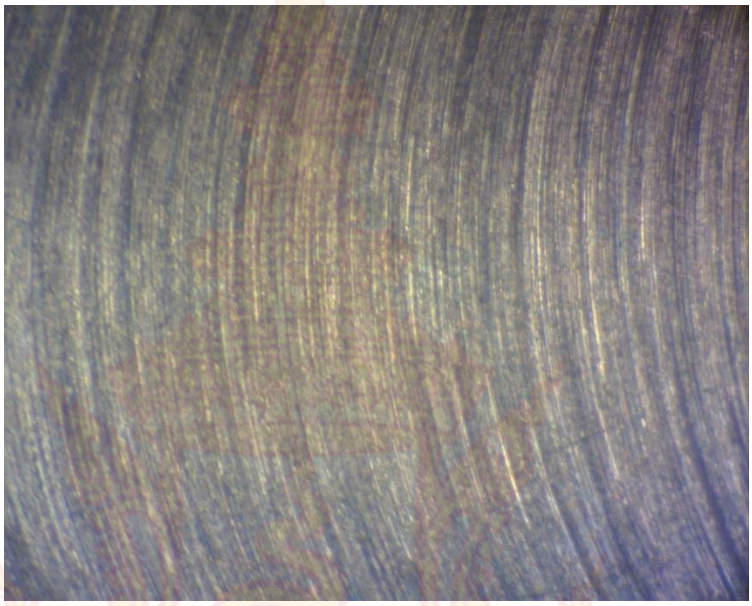


ภาพที่ ข.17 การทดลองที่ 6 / 2 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.35 µm

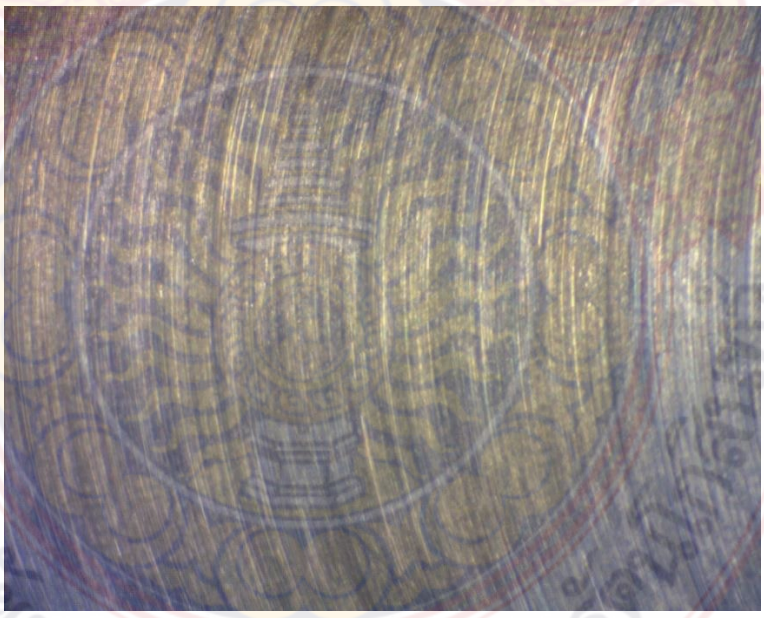


ภาพที่ ข.18 การทดลองที่ 6 / 3 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.36 µm

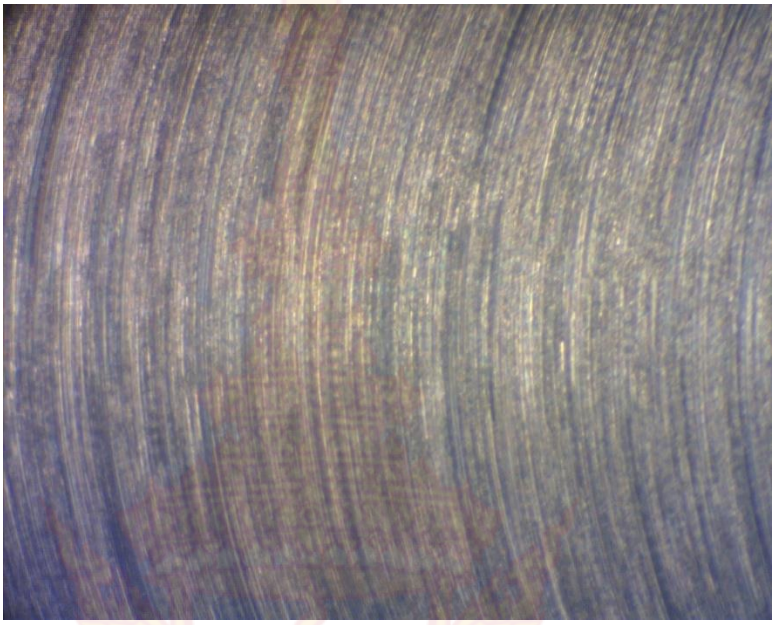
การทดลองที่ 7 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับความเร็วตัด 130 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 2 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 250 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เป็น 2.12 µm



ภาพที่ ข.19 การทดลองที่ 7 / 1 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.11 µm

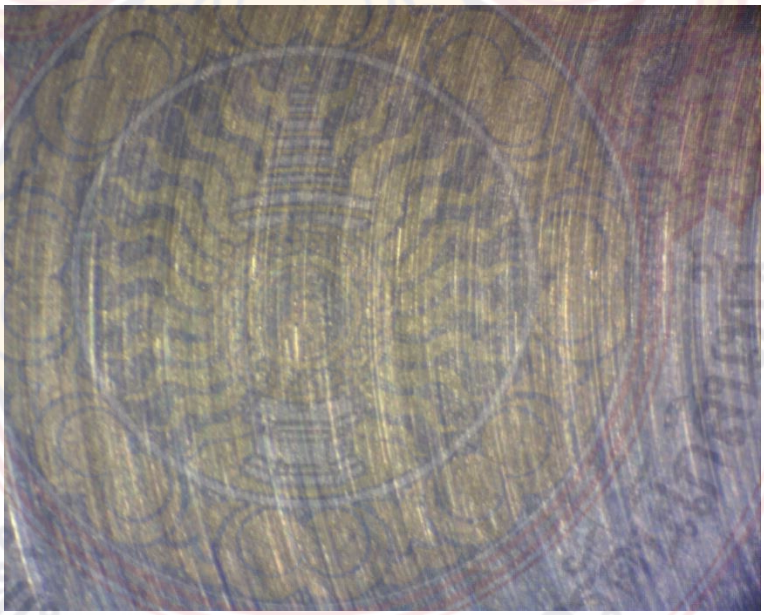


ภาพที่ ข.20 การทดลองที่ 7 / 2 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.12 µm

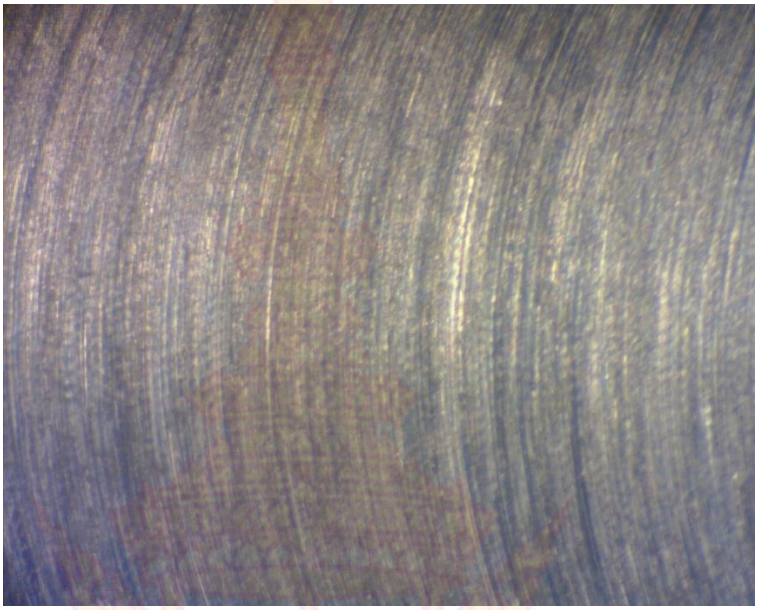


ภาพที่ ข.21 การทดลองที่ 7 / 3 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 2.13 µm

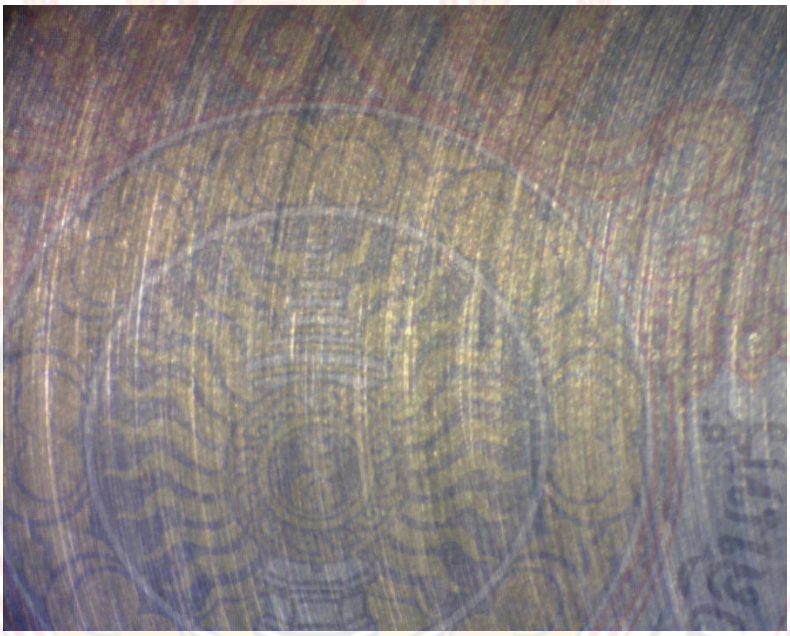
การทดลองที่ 8 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับความเร็วตัด 130 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 3 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 150 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เป็น 1.17 µm



ภาพที่ ข.22 การทดลองที่ 8 / 1 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.19 µm

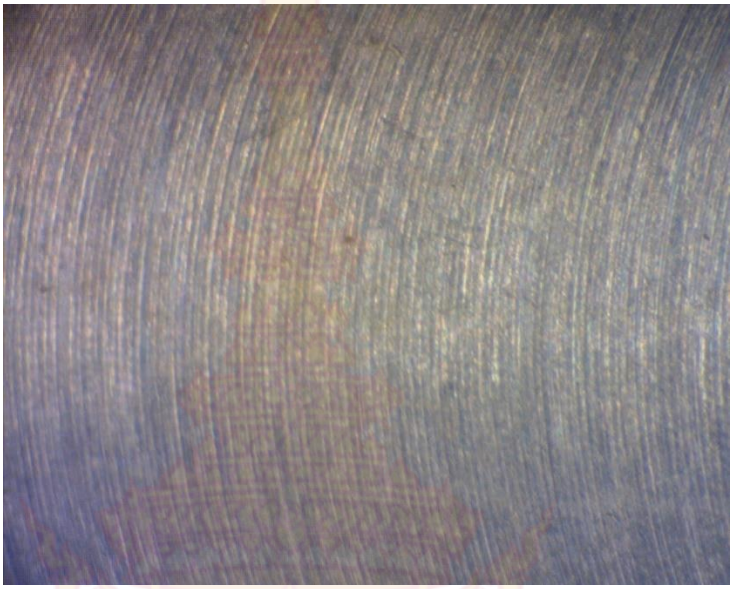


ภาพที่ ข.23 การทดลองที่ 8 / 2 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.15 µm



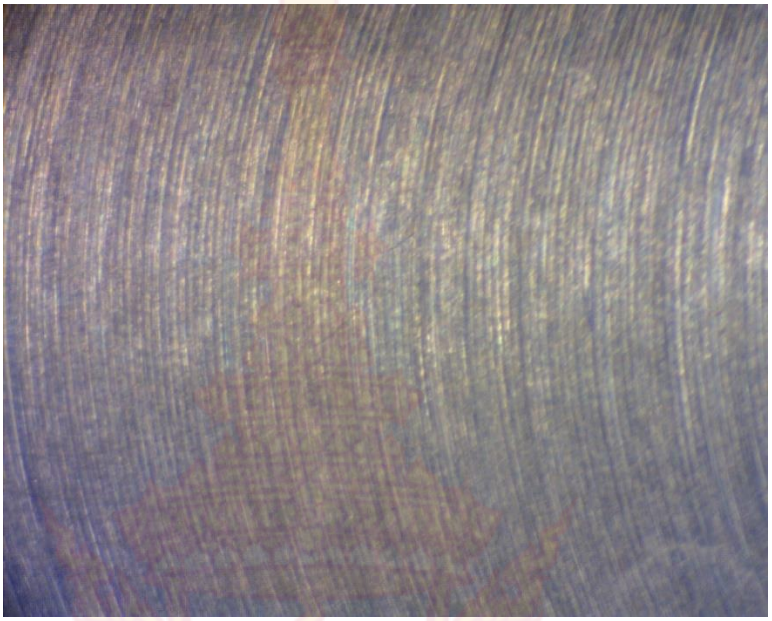
ภาพที่ ข.24 การทดลองที่ 8 / 3 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.16 µm

การทดลองที่ 9 ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน ที่ระดับความเร็วตัด 130 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 4 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 200 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เป็น 1.79 µm



ภาพที่ ข.25 การทดลองที่ 9 / 1 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.82 µm

ภาพที่ ข.26 การทดลองที่ 9 / 2 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.79 µm



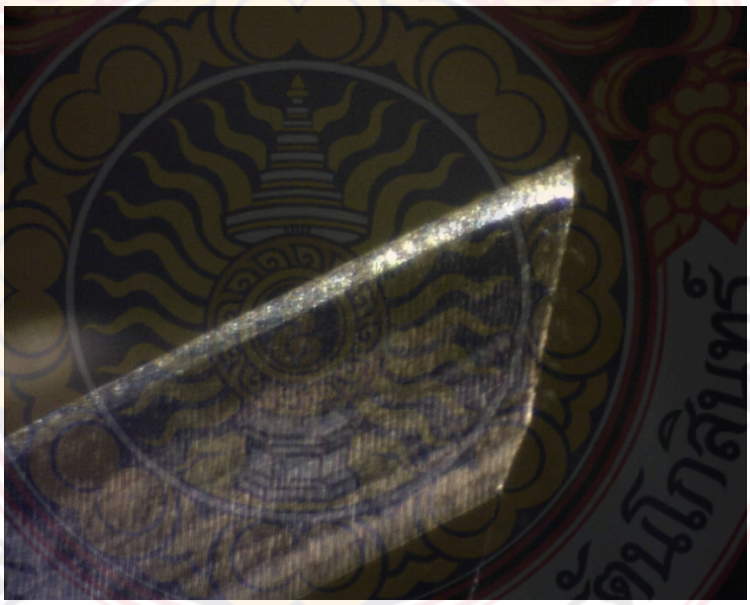
ภาพที่ ข.27 การทดลองที่ 9 / 3 ค่าความหยาบผิว Ra เป็น 1.77 µm

ภาคผนวก ค

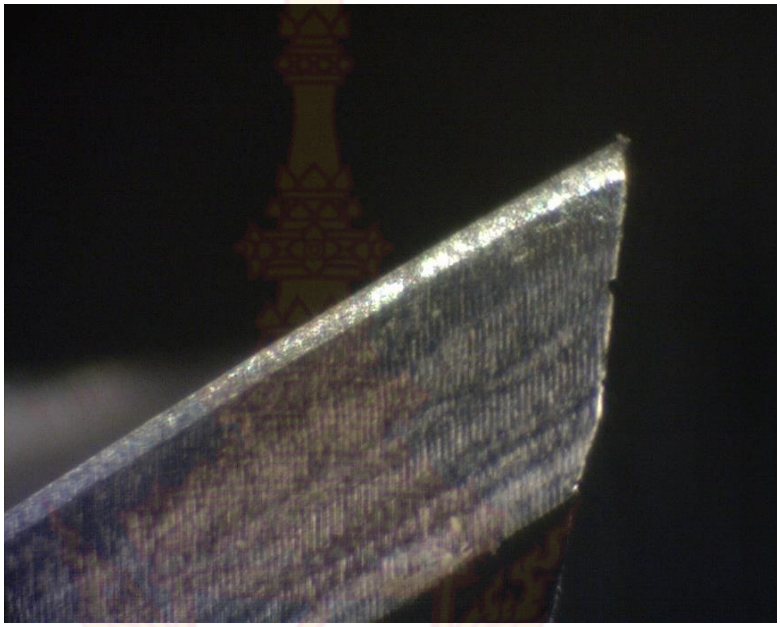
ภาพการสึกหรอของคมตัด

การทดลองที่ 1 ความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ (Flank Wear) ที่ระดับความเร็วตัด50 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 2 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 150 มิลลิเมตร/นาที น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย 0.0009 กรัม

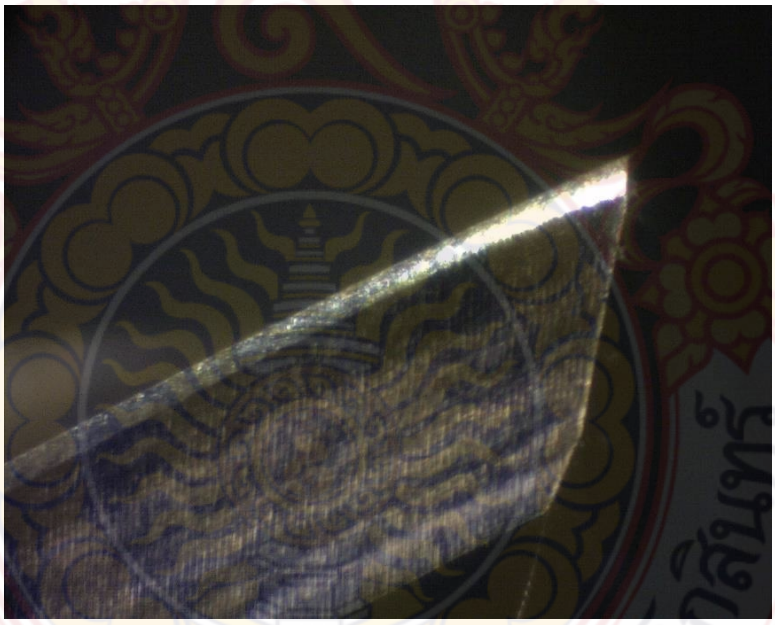
ภาพที่ ค.1 คมตัดดอกกัดก่อนการทดลอง(ยังไม่ผ่านการใช้งาน)



ภาพที่ ค.2 การทดลองที่ 1 / 1 สึกหรอ 0.0007 กรัม

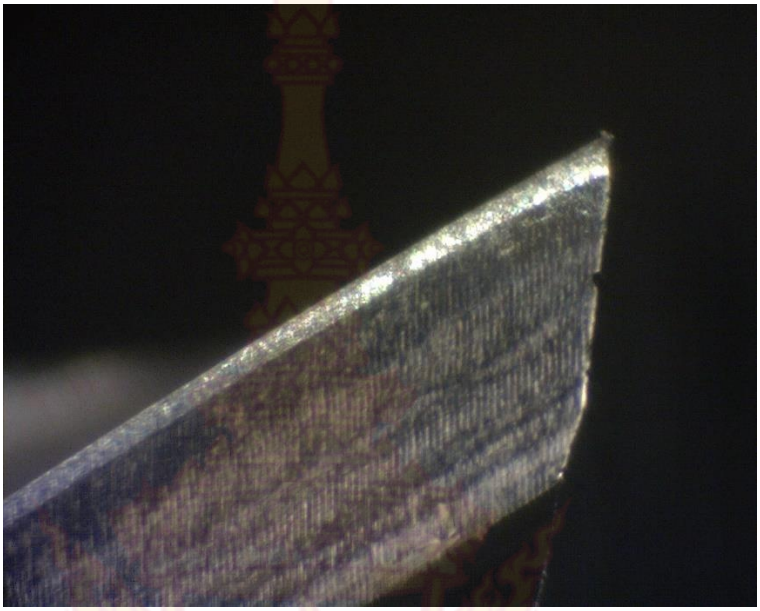


ภาพที่ ค.3 การทดลองที่ 1 / 2 สึกหรอ 0.0010 กรัม

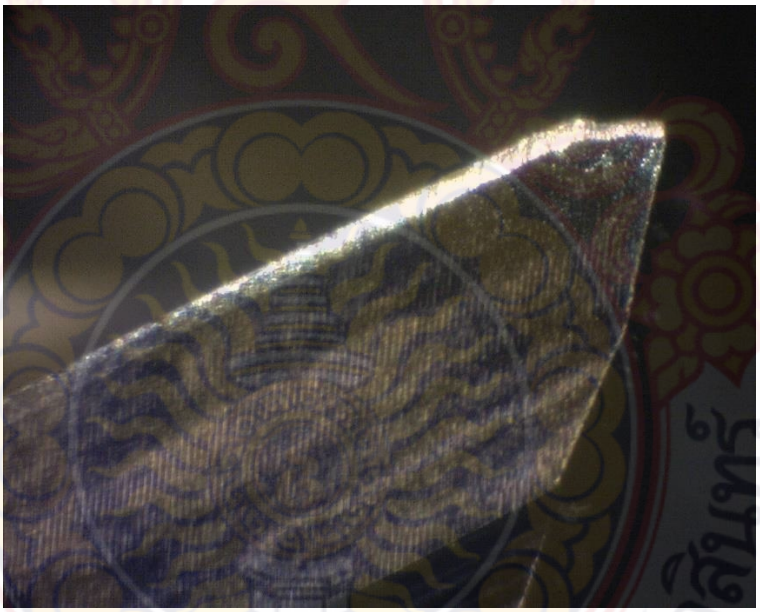


ภาพที่ ค.4 การทดลองที่ 1 / 3 สึกหรอ 0.0009 กรัม

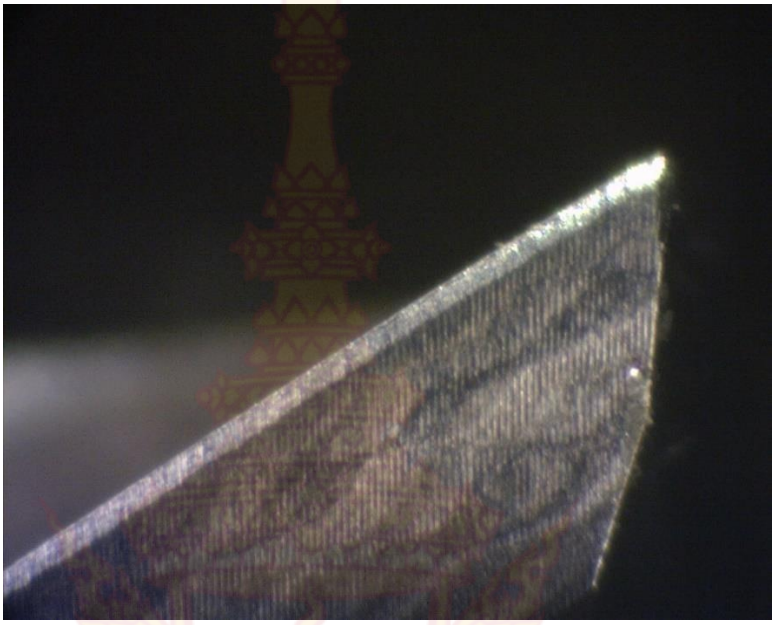
การทดลองที่ 2 ความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ (Flank Wear) ที่ระดับความเร็วตัด 50 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 3 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 200 มิลลิเมตร/นาที น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย 0.0011 กรัม



ภาพที่ ค.5 การทดลองที่ 2 / 1 สึกหรอ 0.0010 กรัม

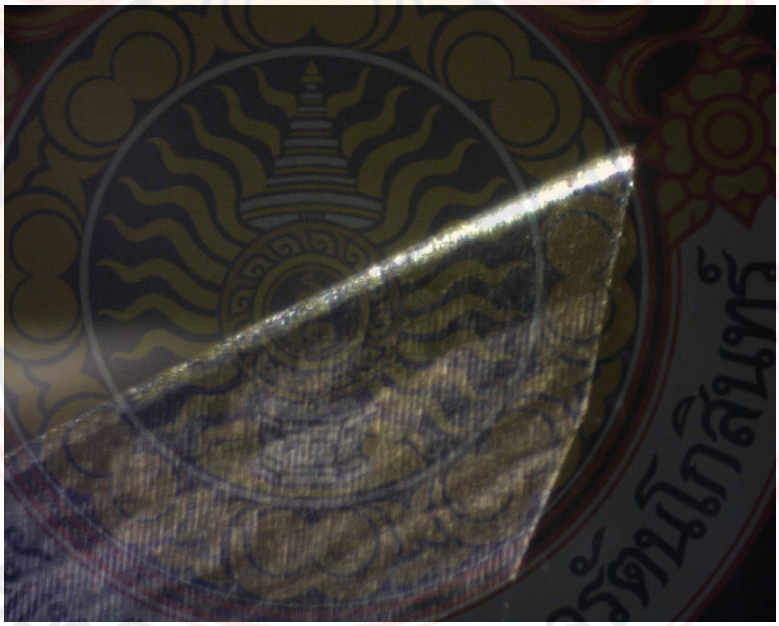


ภาพที่ ค.6 การทดลองที่ 2 / 2 สึกหรอ 0.0011 กรัม

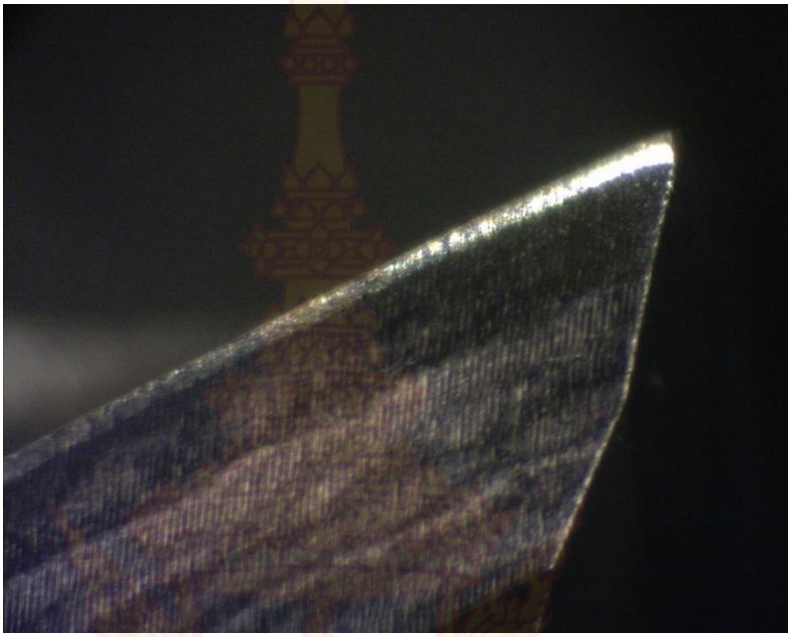


ภาพที่ ค.7 การทดลองที่ 2 / 3 สึกหรอ 0.0011 กรัม

การทดลองที่ 3 ความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ (Flank Wear) ที่ระดับความเร็วตัด 50 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 4 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 250 มิลลิเมตร/นาที น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย 0.0016 กรัม



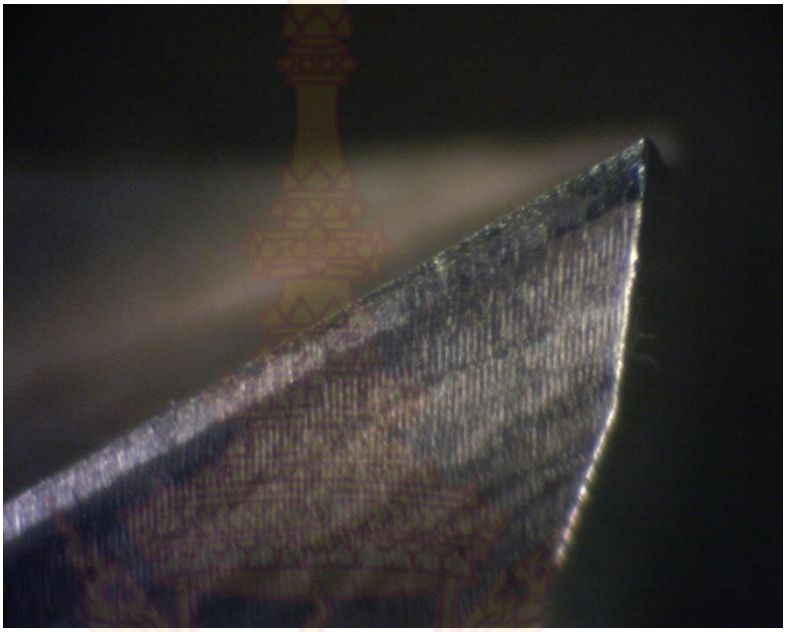
ภาพที่ ค.8 การทดลองที่ 3 / 1 สึกหรอ 0.0018 กรัม



ภาพที่ ค.9 การทดลองที่ 3 / 2 สึกหรอ 0.0017 กรัม

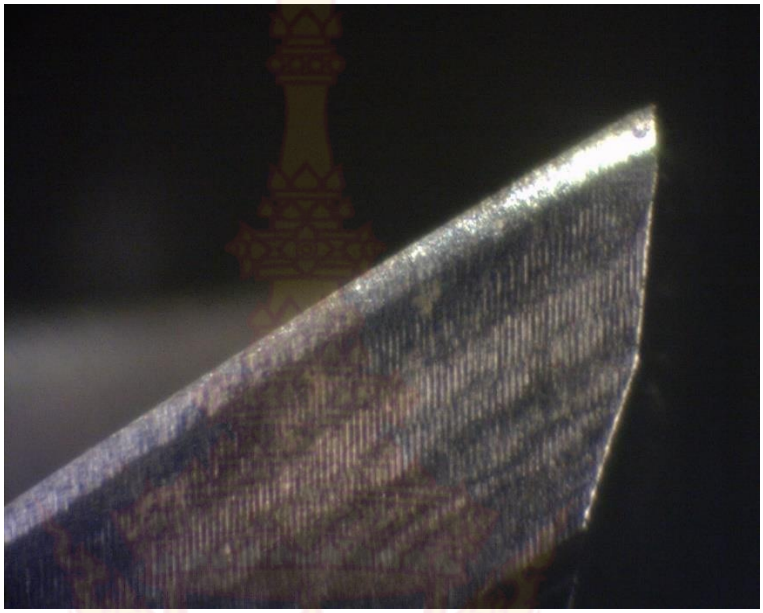
ภาพที่ ค.10 การทดลองที่ 3 / 3 สึกหรอ 0.0014 กรัม

การทดลองที่ 4 ความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ (Flank Wear) ที่ระดับความเร็วตัด 90 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 2 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 200 มิลลิเมตร/นาที น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย 0.0010 กรัม



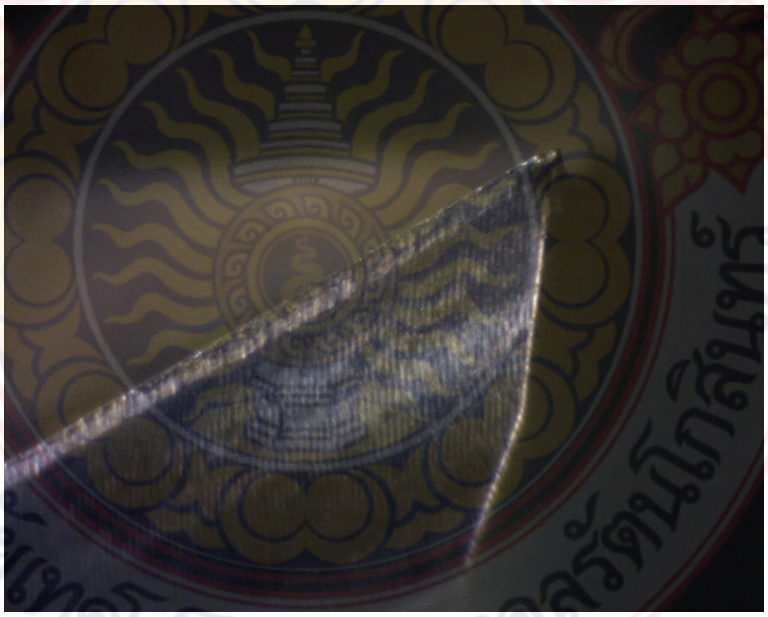
ภาพที่ ค.11 การทดลองที่ 4 / 1 สึกหรอ 0.0010 กรัม

ภาพที่ ค.12 การทดลองที่ 4 / 2 สึกหรอ 0.0009 กรัม



ภาพที่ ค.13 การทดลองที่ 4 / 3 สึกหรอ 0.0010 กรัม

การทดลองที่ 5 ความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ (Flank Wear) ที่ระดับความเร็วตัด 90 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 3 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 250 มิลลิเมตร/นาที น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย 0.0015 กรัม

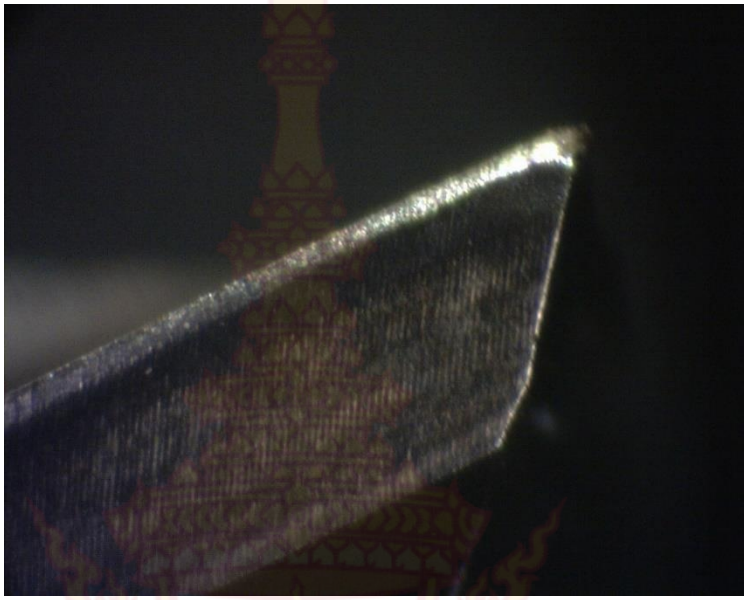


ภาพที่ ค.14 การทดลองที่ 5 / 1 สึกหรอ 0.0014 กรัม

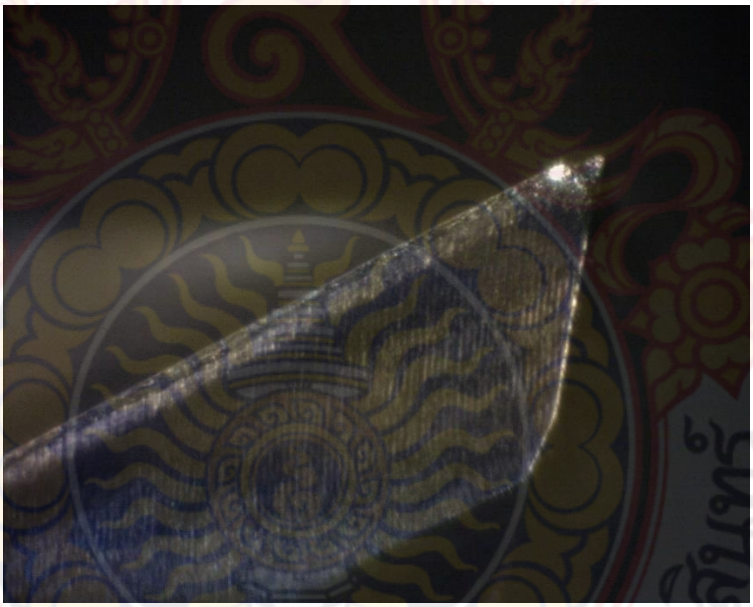
ภาพที่ ค.15 การทดลองที่ 5 / 2 สึกหรอ 0.0012 กรัม

ภาพที่ ค.16 การทดลองที่ 5 / 3 สึกหรอ 0.0017 กรัม

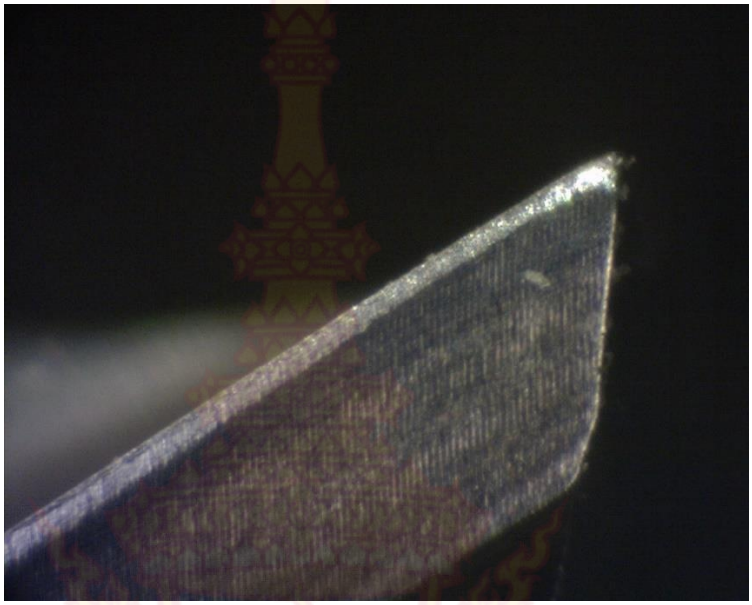
การทดลองที่ 6 ความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ (Flank Wear) ที่ระดับความเร็วตัด 90 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 4 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 150 มิลลิเมตร/นาที น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย 0.0012 กรัม



ภาพที่ ค.17 การทดลองที่ 6 / 1 สึกหรอ 0.0013 กรัม



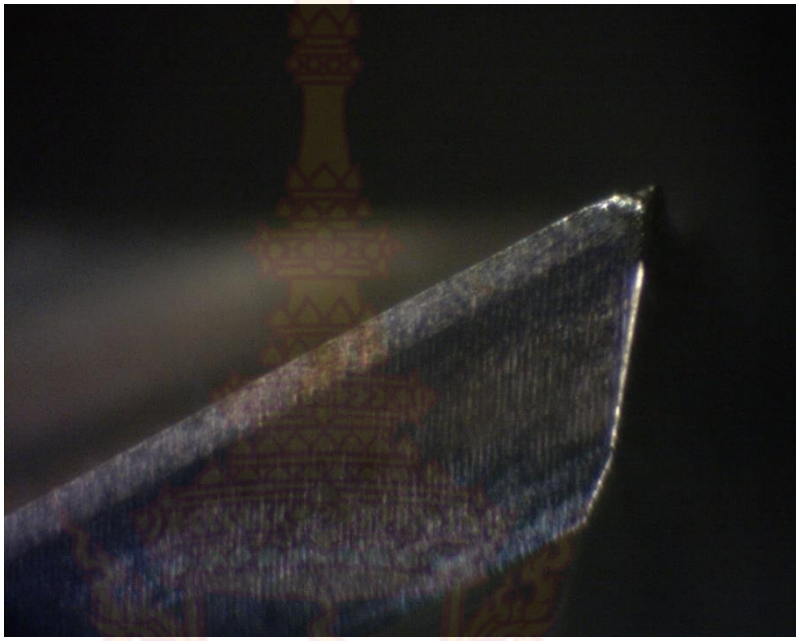
ภาพที่ ค.18 การทดลองที่ 6 / 2 สึกหรอ 0.0009 กรัม



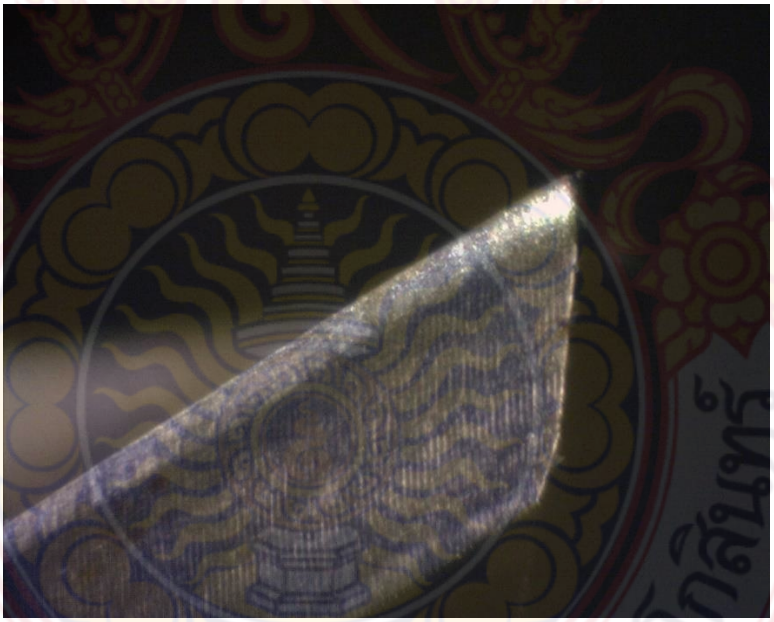
ภาพที่ ค.19 การทดลองที่ 6 / 3 สึกหรอ 0.0013 กรัม

การทดลองที่ 7 ความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ (Flank Wear) ที่ระดับความเร็วตัด 130 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 2 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 250 มิลลิเมตร/นาที น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย 0.0013 กรัม

ภาพที่ ค.20 การทดลองที่ 7 / 1 สึกหรอ 0.0014 กรัม

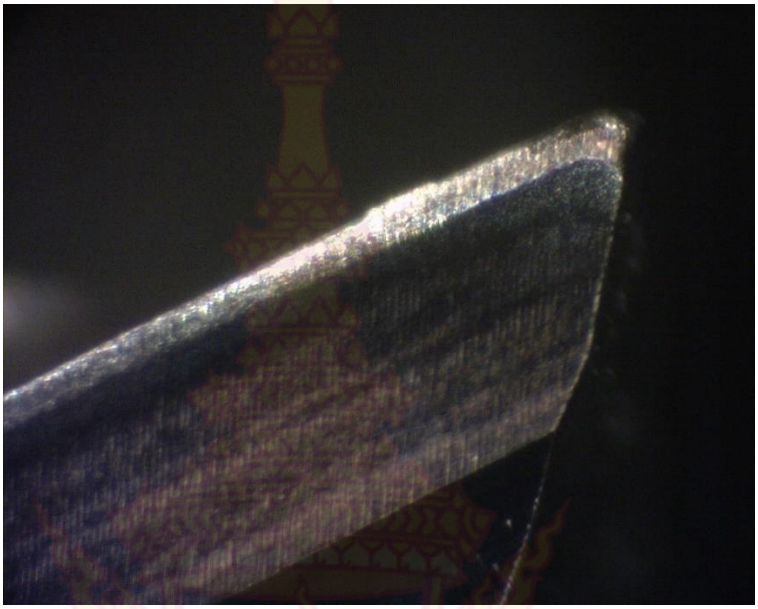


ภาพที่ ค.21 การทดลองที่ 7 / 2 สึกหรอ 0.0012 กรัม

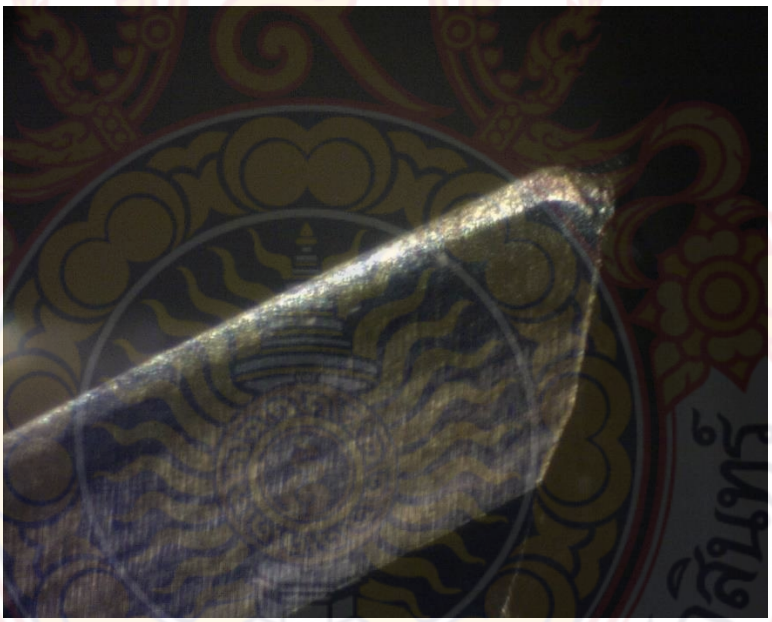


ภาพที่ ค.22 การทดลองที่ 7 / 3 สึกหรอ 0.0014 กรัม

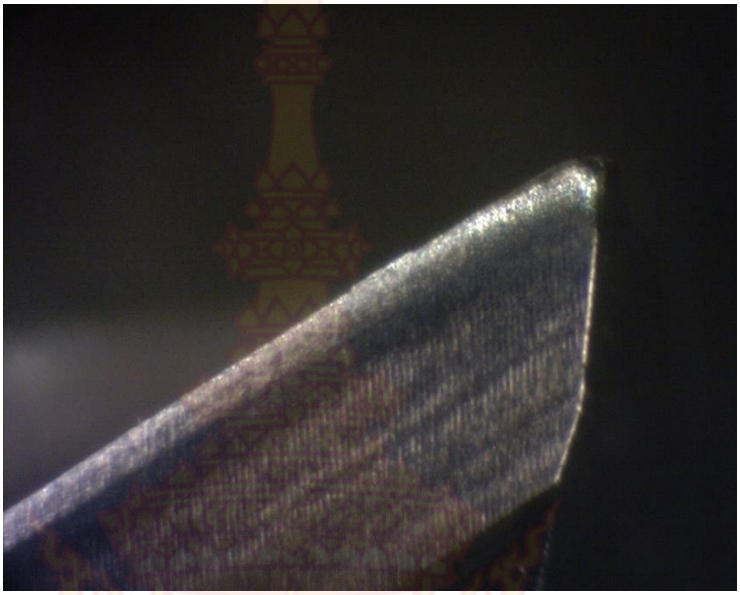
การทดลองที่ 8 ความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ (Flank Wear) ที่ระดับความเร็วตัด 130 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 3 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 150 มิลลิเมตร/นาที น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย 0.0011 กรัม



ภาพที่ ค.23 การทดลองที่ 8 / 1 สึกหรอ 0.0013 กรัม

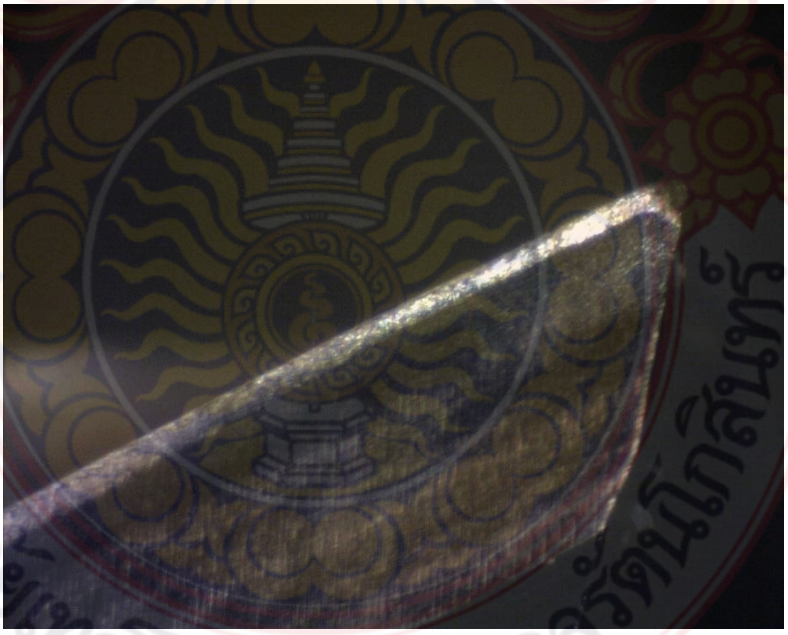


ภาพที่ ค.24 การทดลองที่ 8 / 2 สึกหรอ 0.0010 กรัม

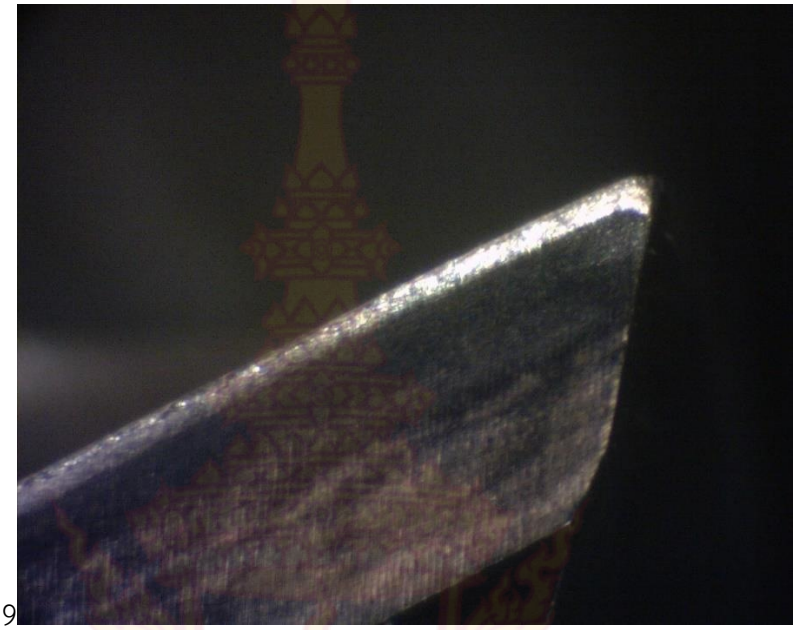


ภาพที่ ค.25 การทดลองที่ 8 / 3 สึกหรอ 0.0009 กรัม

การทดลองที่ 9 ความสึกหรอของคมตัดด้านข้างและผิวหลบ (Flank Wear) ที่ระดับความเร็วตัด 130 เมตร/นาที ระยะป้อนลึก 4 มิลลิเมตร อัตราป้อนที่ 200 มิลลิเมตร/นาที น้ำหนักที่หายไปเฉลี่ย 0.0015 กรัม



ภาพที่ ค.26 การทดลองที่ 9 / 1 สึกหรอ 0.0016 กรัม



9

ภาพที่ ค.27 การทดลองที่ 9 / 2 สึกหรอ 0.0015 กรัม

ภาพที่ ค.28 การทดลองที่ 9 / 3 สึกหรอ 0.0013 กรัม