

## การศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเนื้อในกระบวนการกัดโลหะ



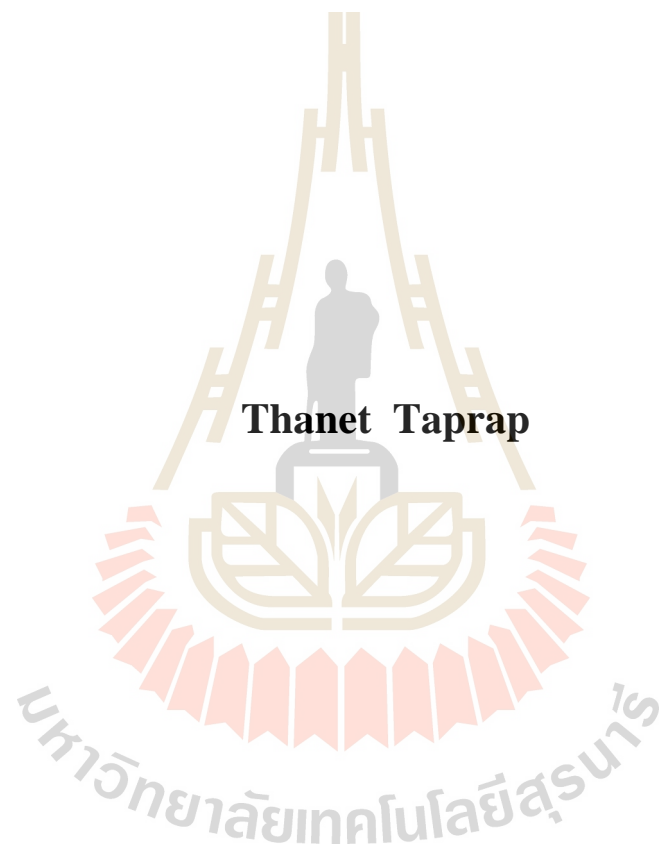
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

**A STUDY OF CUTTING TEMPERATURE ON METAL  
MILLING PROCESS**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Manufacturing Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2016**

## การศึกษาอนุมัติจากการตัดเงื่อนไขในกระบวนการกวดโทษ

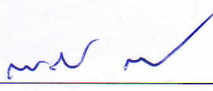
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบบัณฑิตวิทยาลัย



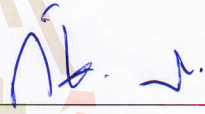
(อ. ดร.วรรณัช ปุงสุต)

ประธานกรรมการ



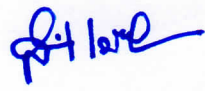
(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาบัณฑิตวิทยาลัย)



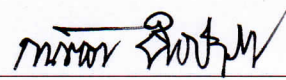
(ผศ. ดร.กัญชลา สุตตาชาติ)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ  
และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



ชเนศ ตาปราบ: การศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในกระบวนการกัดโลหะ (A STUDY OF CUTTING TEMPERATURE ON METAL MILLING PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา: อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ สีวงศ์, 147 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโลหะ และหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ การศึกษาดำเนินงานภายใต้กระบวนการตัดเฉือนด้วยเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC) ร่วมกับเครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์ไฮสปีด 4 คมตัด ที่ผ่านการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียม-คาร์ไบด์-ไนไตรด์ (TiCN) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ภายใต้สภาวะการตัดเฉือนแบบแห้ง วัสดุที่ใช้สำหรับกระบวนการตัดเฉือนเป็นโลหะประเภทเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางเกรด AISI 1050 การออกแบบการทดลองเป็นแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล ทำการทดลอง 2 ชั่วโมงที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย ความเร็วรอบ 800 และ 1270 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 20 และ 60 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี 2.5 และ 5 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะป้อนลึกในแนวแกน 10 มิลลิเมตร คงที่ตลอดการทดลอง อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นจะถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K สำหรับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน และกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนสำหรับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน ผลกระทบหลักและผลกระทบรวมของปัจจัยจะถูกวิเคราะห์ทางสถิติระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิจากการตัดเฉือนบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) คือปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ ความเร็วรอบ (S) ปัจจัยระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการป้อน ( $S \cdot F$ ) คือปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ และอัตราการป้อน (F) คือปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ในรูปแบบความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะมีอิทธิพลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน และการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต  
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา ธน  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา สมศักดิ์

THANET TAPRAP : A STUDY OF CUTTING TEMPERATURE ON  
METAL MILLING PROCESS. THESIS ADVISOR : SOMSAK  
SIWADAMRONGPONG, D.Eng., 147 PP.

CUTTING TEMPERATURE / METAL MILLING / K-TYPE THERMOCOUPLE /  
IRINFRARED CAMERA/ AISI 1050

The aim of this research was to study the cutting temperature during end milling process and factors affecting on the cutting temperature rise. In this study, the work pieces AISI 1050 were machined by CNC machining center under dry cutting condition with TiCN coated 4 flutes HSE diameters 10 mm End Mill tool. The 3 cutting parameters were studied using  $2^3$  Factorial Design in this experiment including spindle speed 800 and 1270 rpm, feed rate 20 and 60 mm/min, radial depth of cut 2.5 to mm and axial depth of cut 10 mm constant. The cutting temperature rise in this study was measured by K-type thermocouple and infrared camera. The main effect and interaction effect of parameters on temperature rise were analyzed with 95% level of confidence. It was found that, the cutting temperature on End Mill surface is higher than the cutting temperature in the workpiece. The radial depth of cut ( $A_e$ ) was the main factor affecting on the cutting temperature rise. The spindle speed (S) and interaction between spindle speed and feed rate ( $S \cdot F$ ) were the factors affecting on the tool wear. The feed rate (F) was the main factor affecting on the surface roughness. It could be concluded that the cutting temperature rise have an influence on the tool and, subsequently, have an effect on the surface roughness.

School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature Thanet Taprap

Advisor's Signature Somsak Siwadamrongpong

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา ผู้ให้กำเนิด ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูส่งเสริมให้ได้รับการศึกษาตลอดมา พร้อมทั้งได้อบรมสั่งสอน แนวความคิดและการปฏิบัติตน ทำให้ผู้วิจัยมีวันนี้ได้ รวมถึงหลาย ๆ กำลังใจจากญาติพี่น้องและ ครอบครัวที่เป็นกำลังใจอย่างยิ่ง อีกทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทุก ๆ ท่าน ที่มีได้เอื้อนาม ทำให้ งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาส ทางการศึกษาให้ความรู้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย มาโดยตลอด พร้อมทั้งขอขอบคุณคณะกรรมการสอบทุกท่าน ที่ได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนจนครุอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งเป็นสถาบันการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยได้มีโอกาสเข้ามาศึกษา รวมถึงบุคลากร ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์และ เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย จนสำเร็จได้ในวันนี้

ธนศ ตาปราบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการศึกษาวิจัย.....	2
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining).....	6
2.1.1 กระบวนการกัดขึ้นรูป.....	6
2.1.2 กระบวนการกลึง.....	7
2.1.3 กระบวนการเจาะ.....	7
2.1.4 เครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์ (End Mill).....	8
2.1.5 ลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือน.....	9
2.2 เครื่องจักรอัตโนมัติ (Computer Numerical Control).....	10
2.2.1 ชุดควบคุม (Control System).....	11

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2	ระบบแกนเครื่อง (Machine Axis).....	11
2.2.3	ระบบขับเคลื่อน ไต้ะงาน (Feed Drivers).....	12
2.2.4	เพลงาน (Work Spindle).....	12
2.2.5	ชุดเปลี่ยนเครื่องมือ (Tool Changers).....	13
2.3	การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing: CAM).....	14
2.3.1	การกำหนดองค์ประกอบในการผลิต .....	14
2.3.2	การกำหนดวิธีการกัด (Milling Operation) .....	14
2.3.3	การกำหนดจุดศูนย์กลางชิ้นงาน (Workpiece Zero Point).....	14
2.3.4	การกำหนดรูปร่างและรูปทรงของเครื่องมือตัดเฉือน (Cutting Tool Definition) .....	15
2.3.5	การกำหนดขนาดของวัสดุดิบ (Blank From) .....	16
2.3.6	การกำหนดการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือน (Tool Path Strategy).....	16
2.3.7	การจำลองงานกัด (Simulation).....	16
2.4	การเสียหายของเครื่องมือตัดเฉือน (Tool Failure) .....	17
2.4.1	การเสียหายเนื่องจากการแตกหักของเครื่องมือตัดเฉือน (Fracture Failure).....	17
2.4.2	การเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Failure) .....	17
2.4.3	การเสียหายเนื่องจากการสึกหรอ (Gradual Wear) .....	17
2.5	ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือน โลหะ.....	18
2.5.1	การกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือน .....	18
2.5.2	ตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดความร้อนในกระบวนการตัดเฉือน.....	18
2.6	เหล็กกล้า (STEEL).....	19
2.6.1	เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel).....	19
2.6.2	เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) .....	19
2.6.3	เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel).....	19
2.6.4	ธาตุหลักที่ผสมในเนื้อเหล็ก .....	19



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.5	เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด AISI 1050 .....	20
2.7	การวัดอุณหภูมิ .....	20
2.7.1	หลักการวัดอุณหภูมิ .....	21
2.7.2	การวัดอุณหภูมิของของแข็งและผิวหน้า .....	22
2.7.3	การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิจากผิวสัมผัสที่มีค่าคงที่ .....	22
2.7.4	เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple).....	22
2.7.5	คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน .....	23
2.7.6	ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล .....	24
2.7.7	กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน (Thermography) .....	25
2.8	การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE).....	26
2.8.1	หลักการพื้นฐานในการออกแบบการทดลอง .....	27
2.8.2	การทดลองแบบการทดลองแบบ $2^k$ แฟกทอเรียล ( $2^k$ Factorial Design)....	27
2.8.3	การทดลองแบบการทดลองแบบ $2^3$ แฟกทอเรียล ( $2^3$ Factorial Design)....	28
2.9	ความหยาบผิวชิ้นงาน .....	29
2.9.1	ความหยาบผิวชิ้นงาน (Roughness) .....	29
2.9.2	เครื่องวัดความหยาบผิว .....	31
2.10	ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1	วัสดุ (Materials).....	37
3.1.1	เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 .....	37
3.2	เครื่องจักรและอุปกรณ์.....	38
3.2.1	เครื่องกัดอัตโนมัติหรือเครื่องกัด CNC (Vertical Machining Center) .....	38
3.2.2	เครื่องมือตัดเฉือน (Cutting Tool) .....	38
3.2.3	อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือตัดเฉือน (Spindle Taper) .....	39
3.2.4	เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermometer).....	39
3.2.5	สารนำความร้อน (Thermal Compound).....	41

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.6	เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface roughness tester) .....	42
3.2.7	เครื่องมือวิเคราะห์และประมวลภาพถ่าย (Optical Microscope) .....	42
3.2.8	เครื่องมือเจาะ (Drilling Tool) .....	43
3.2.9	เครื่องมือกำหนดขอบชิ้นงาน (Optical Edge Finder) .....	43
3.3	การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการกัดโลหะ .....	44
3.4	การกำหนดปัจจัยการทดลอง .....	44
3.5	การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 <sup>3</sup> แฟกทอเรียล 2 ชั้น .....	46
3.6	การกำหนดรูปแบบการตัดเฉือน (Tool path operation) .....	46
3.7	การกำหนดวิธีการวัดอุณหภูมิ .....	47
3.7.1	การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน (Workpiece Temperature) .....	47
3.7.2	การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน (End Mill Surface Temperature) .....	48
3.8	การกำหนดพื้นที่สำหรับวัดค่าความหยาบผิว .....	49
3.9	การกำหนดรูปแบบการวัดค่าการสึกหรอ .....	49
3.10	ขั้นตอนการทดลอง .....	51
3.10.1	ขั้นตอนการเจาะรูชิ้นงาน .....	51
3.10.2	ขั้นตอนการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล .....	52
3.10.3	ขั้นตอนการตั้งค่าเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ .....	53
3.10.4	ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นงานเพื่อดำเนินการตัดเฉือน .....	54
3.10.5	ขั้นตอนการติดตั้งกล่องบันทึกภาพรังสีความร้อน .....	56
3.10.6	ขั้นตอนการตัดเฉือนชิ้นงาน .....	57
3.11	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	58
4	<b>ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง</b>	
4.1	ผลการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน .....	60
4.2	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือน ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน .....	62
4.3	ผลการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน .....	66

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเนื้อ ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเนื้อ .....	68
4.5	ผลการศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ .....	73
4.6	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ .....	75
4.6.1	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ ที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point .....	75
4.6.2	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ ที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area .....	79
4.6.3	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ ที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point .....	83
4.7	ผลการศึกษาความหยาบผิวของชิ้นงาน .....	88
4.8	การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน .....	89
4.9	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลการศึกษา .....	94
4.9.1	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงานกับพื้นผิวเครื่องมือตัดเนื้อ .....	94
4.9.2	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวิธีการวัดการสึกหรอ .....	95
4.9.3	การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจากการตัดเนื้อต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเนื้อ และการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อต่อค่าความหยาบ ผิวชิ้นงาน .....	98
<b>5</b>	<b>สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ</b>	
5.1	อุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน .....	102
5.2	อุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเนื้อ .....	102
5.3	การสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ .....	102
5.4	ความหยาบผิวของชิ้นงาน .....	103
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิจากการตัดเนื้อ, การสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ . และความหยาบผิวชิ้นงาน .....	103
5.6	ข้อเสนอแนะ .....	103

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.7 การประยุกต์ใช้งานวิจัยในอุตสาหกรรม .....	103
รายการอ้างอิง .....	105
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลจากเครื่องบันทึกอุณหภูมิ TESTO 146T4 อุณหภูมิจากการตัดเนื้อ ที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน .....	107
ภาคผนวก ข. ภาพถ่ายรังสีความร้อนอุณหภูมิจากการตัดเนื้อสูงสุด ที่เกิดบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเนื้อ .....	116
ภาคผนวก ค. ภาพถ่ายกำลังขยาย 5 เท่า ของคมตัดเครื่องมือตัดเนื้อ .....	121
ภาคผนวก ง. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	138
ประวัติผู้เขียน .....	147

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณลักษณะทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1050.....20
2.2	ค่าความผิดพลาดของเทอร์โมคัปเปิลเชิงพาณิชย์ .....24
2.3	การออกแบบการทดลองที่ 3 ปัจจัยในระดับสูงและต่ำ .....29
3.1	องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ AIS 1050.....37
3.2	พารามิเตอร์การตัดเฉือนจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดและชิ้นงานทดสอบ .....44
3.3	พารามิเตอร์การตัดเฉือนที่ใช้ในการทดลอง.....45
3.4	ผลการออกแบบการทดลอง 2 <sup>3</sup> แฟกทอเรียล 2 ซ้ำ ด้วยโปรแกรม Minitab.....45
4.1	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน .....61
4.2	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 <sup>3</sup> แฟกทอเรียล อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานของจุดวัดที่ 3 (T3).....63
4.3	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนถูกวัดด้วย FLIR E50 .....67
4.4	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 <sup>3</sup> แฟกทอเรียล อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน.....69
4.5	อภิปรายผลการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในกระบวนการกัดโลหะ .....72
4.6	ค่าการสึกหรอเฉลี่ยของเครื่องมือตัดเฉือน .....74
4.7	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 <sup>3</sup> แฟกทอเรียล การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point.....76
4.8	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 <sup>3</sup> แฟกทอเรียลการสึกหรอ ของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane.....80
4.9	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 <sup>3</sup> แฟกทอเรียล การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area .....84
4.10	อภิปรายผลการศึกษารูปร่างการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน .....87
4.11	ค่าความหยาบผิวชิ้นงาน (Surface Roughness: Ra) .....88
4.12	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 <sup>3</sup> แฟกทอเรียล ค่าความหยาบผิวชิ้นงาน .....90

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 อภิปรายผลการศึกษาค่าความหยาบผิวชั้นงาน .....	93



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการกัดขึ้นรูป.....	6
2.2	กระบวนการกลึงขึ้นรูป.....	7
2.3	กระบวนการเจาะ .....	8
2.4	คมตัดของเครื่องมือตัดเฉือนเอ็นมิลล์.....	9
2.5	ลักษณะงานกัด.....	10
2.6	เครื่องกัดอัตโนมัติ (Vertical Machining Center) .....	10
2.7	ชุดควบคุม TNC 410.....	11
2.8	ระบบแกนในแบบ คาร์ทีเซียน 3 มิติ .....	11
2.9	ระบบขับเคลื่อนโต๊ะงาน .....	12
2.10	ชุดเพลงานของเครื่องกัดอัตโนมัติ.....	12
2.11	ชุดเปลี่ยนเครื่องมือแบบ โซ่ลำเลียง (Chain Conveyor).....	13
2.12	ชุดเปลี่ยนเครื่องมือแบบจานหมุน (Rotary) .....	13
2.13	ฟังก์ชันการกัดในซอฟต์แวร์ SolidCAM .....	14
2.14	การกำหนดจุดศูนย์กลางชิ้นงาน (Work Piece Zero Point) .....	15
2.15	การกำหนดรูปร่างและรูปทรงของเครื่องมือตัดเฉือนใน CAM Software .....	15
2.16	ลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือน .....	16
2.17	การสึกหรอบนคมตัดของเครื่องมือตัดเฉือน .....	17
2.18	การกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือน .....	18
2.19	โครงทั่วไปของเทอร์โมคัปเปิล .....	23
2.20	ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ.....	26
2.21	รูปแบบทั่วไปของกระบวนการ.....	27
2.22	แผนภาพรูปแบบของการออกแบบการทดลอง .....	28
2.23	การวัดค่า Rt .....	29
2.24	การวัดค่า Ra.....	30
2.25	การวัดค่า Rz.....	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	ขนาดชิ้นงานทดสอบ AISI 1050 ..... 37
3.2	เครื่องกัดอัตโนมัติยี่ห้อ BRIDGEPORT รุ่น VMC 500-16..... 38
3.3	เครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์ HSE End Mills 4 Flutes + TiCN..... 38
3.4	เครื่องมือจับยึดเครื่องมือตัดเฉือนแบบ BT 40..... 39
3.5	เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ..... 39
3.6	เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ TESTO 176 T4 ..... 40
3.7	กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50 ..... 41
3.8	ซิลิโคนนำความร้อน รุ่น HTK-002-U1 ..... 41
3.9	เครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SurfTest SJ-210 ..... 42
3.10	กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD-Motorized..... 42
3.11	เครื่องมือเจาะ (Drilling Tool) ..... 43
3.12	เครื่องมือกำหนดขอบชิ้นงาน (Optical Edge Finder)..... 43
3.13	ลักษณะการตัดเฉือนเป็นแบบงานกัดทวน (Climb Milling) ..... 46
3.14	แนวการวางตัวของเทอร์โมคัปเปิลในชิ้นงาน ..... 47
3.15	ลักษณะการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน ..... 48
3.16	แสดงบริเวณที่ถูกวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ ..... 49
3.17	ลักษณะคมตัดของเครื่องมือตัดเฉือนแบบ Endmill 4 F HSE TiCN Coated ..... 49
3.18	การวัดค่าการสึกหรอแบบ Ref. Point..... 50
3.19	การวัดค่าการสึกหรอแบบ Ref. Plane ..... 50
3.20	การวัดค่าการสึกหรอแบบ Area..... 51
3.21	ลักษณะการเจาะรูชิ้นงาน ..... 51
3.22	ลักษณะการฉีดสารนำความร้อน HTK-002-U1 เข้าไปในชิ้นงาน ..... 52
3.23	การวางตัวของเทอร์โมคัปเปิลในชิ้นงาน ..... 52
3.24	การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปในชิ้นงาน ..... 53
3.25	การตั้งค่าโปรแกรมสำหรับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ TESTO 176 T4 ..... 54
3.26	ลักษณะวิธีการกำหนดขอบชิ้นงาน ..... 55
3.27	ระยะการวางตัวของกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50..... 56



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.28	ลักษณะกระบวนการกัดโลหะเพื่อศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือน ..... 57
3.29	องค์ประกอบโดยรวมของกระบวนการ การศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือน ..... 57
4.1	กราฟอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงาน ..... 60
4.2	ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานที่จุดวัดที่ 3 (T3) ..... 62
4.3	การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานที่จุดวัดที่ 3 (T3) ..... 64
4.4	การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานที่จุดวัดที่ 3 (T3) ..... 65
4.5	ภาพถ่ายรังสีความร้อนของพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน ..... 66
4.6	ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อ อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน ..... 68
4.7	การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน ..... 70
4.8	การประมาณอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน ..... 71
4.9	รูปแบบการวัดค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน ..... 73
4.10	ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเฉือน ที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point ..... 75
4.11	การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเฉือน ที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point ..... 77
4.12	การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point ..... 78
4.13	ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane ..... 79
4.14	การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane ..... 81

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane ..... 82
4.16	ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area ..... 83
4.17	การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area ..... 85
4.18	การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของ เครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area ..... 86
4.19	ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวชิ้นงาน ..... 89
4.20	การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ..... 91
4.21	การประมาณอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ..... 92
4.22	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้น ในชิ้นงานกับพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน ..... 94
4.23	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point กับ Ref. Plane ..... 95
4.24	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point กับ Area ..... 96
4.25	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane กับ Area ..... 97
4.26	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกับการสึกหรอ ของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดด้วยวิธี Ref. Point ..... 98
4.27	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดด้วยวิธี Ref. Point กับค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ..... 99
4.28	แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกับค่าความ หยาบผิวชิ้นงาน ..... 100
ก.1	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 1 ..... 108
ก.2	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 2 ..... 108

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.3	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 3..... 109
ก.4	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 4..... 109
ก.5	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 5..... 110
ก.6	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 6..... 110
ก.7	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 7..... 111
ก.8	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 8..... 111
ก.9	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 9..... 112
ก.10	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 10..... 112
ก.11	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 11..... 113
ก.12	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 12..... 113
ก.13	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 13..... 114
ก.14	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 14..... 114
ก.15	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 15..... 115
ก.16	อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชั้นงานการทดลองที่ 16..... 115
ข.1	RunOrder 1 ..... 117
ข.2	RunOrder 2 ..... 117
ข.3	RunOrder 3 ..... 117
ข.4	RunOrder 4 ..... 117
ข.5	RunOrder 5 ..... 118
ข.6	RunOrder 6 ..... 118
ข.7	RunOrder 7 ..... 118
ข.8	RunOrder 8 ..... 118
ข.9	RunOrder 9 ..... 119
ข.10	RunOrder 10 ..... 119
ข.11	RunOrder 11 ..... 119
ข.12	RunOrder 12 ..... 119
ข.13	RunOrder 13 ..... 120

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.14 RunOrder 14.....	120
ข.15 RunOrder 15.....	120
ข.16 RunOrder 16.....	120
ค.1 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 1 .....	122
ค.2 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 2 .....	123
ค.3 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 3 .....	124
ค.4 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 4 .....	125
ค.5 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 5 .....	126
ค.6 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 6 .....	127
ค.7 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 7 .....	128
ค.8 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 8 .....	129
ค.9 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 9 .....	130
ค.10 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 10 .....	131
ค.11 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 11 .....	132
ค.12 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 12 .....	133
ค.13 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 13 .....	134
ค.14 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 14 .....	135
ค.15 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 15 .....	136
ค.16 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ 16 .....	137

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CNC	=	Computer Numerical Control
CAM	=	Computer Aided Manufacturing
CAD	=	Computer Aided Design
% wt	=	ร้อยละ โดยมวล
IR	=	Infrared Camera
HRC	=	Rockwell Hardness
TiCN	=	Titanium Carbo Nitride
(TiAl)N	=	Titanium aluminium nitride
PcBN	=	Polycrystalline cubic boron nitride
Q	=	Estimations of the energy
J	=	Joule
W/m <sup>2</sup> .°C	=	Watt/meter <sup>2</sup> °C
Az91hp	=	Magnesium composites
HSS	=	High Speed Steel
HSE	=	High Speed Steel (Co 7.8-8 %)
CFRP	=	คาร์บอนไฟเบอร์พลาสติก
W/cm.°C	=	Watt/Centimeter-°C
rpm	=	รอบต่อนาที
mm/min	=	มิลลิเมตรต่อนาที
S	=	Spindle speed
F	=	Feed rate
Ae	=	Radial depth of cut
Ap	=	Axial depth of cut
T1	=	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 1
T2	=	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 2
T3	=	เทอร์โมคัปเปิลตัวที่ 3
Ref. Point	=	Reference Point

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

Ref. Plane	=	Reference Plane
$T_0$	=	อุณหภูมิเริ่มต้น หน่วย องศาเซลเซียส
$T_{Peak}$	=	อุณหภูมิสูงสุด หน่วย องศาเซลเซียส
$T_{Rise}$	=	ผลต่างอุณหภูมิ ( $T_{Rise}-T_0$ ) หน่วย องศาเซลเซียส
ANOVA	=	Analysis of variance
$\mu\text{m}$	=	Micrometer หรือ micron ( $1 \text{ micron} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$ )



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

กระบวนการตัดเฉือนคือกระบวนการกำจัดวัสดุส่วนเกินออกจากชิ้นงานเพื่อทำให้เกิดพื้นผิวใหม่ และรูปร่างที่ต้องการ กระบวนการตัดเฉือนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยสามารถจำแนกได้ดังนี้ กระบวนการกลึง กระบวนการกัด และกระบวนการเจาะ ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตเช่น อุตสาหกรรมการผลิตแม่พิมพ์ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องบิน เป็นต้น โดยจะนำไปสู่การขับเคลื่อนระบบเศรษฐกิจ และปฏิวัติวงการอุตสาหกรรมของประเทศไทย

สำหรับกระบวนการตัดเฉือนโลหะ (Groover, MP. 2007) ได้กล่าวว่า “พลังงานที่ใช้ในการตัดเฉือนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อน” ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนเนื่องจากการเสียดสีอย่างถาวรของเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนสามารถจำแนกเป็นส่วนคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีของวัสดุ (Plastic Deformation) บนระนาบตัดเฉือน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นบริเวณนี้จะมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงกว่าบริเวณอื่น ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของวัสดุรวมกับความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานของเครื่องมือตัดเฉือนกับเศษตัด (Chip) และความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือตัดเฉือนที่เกิดการสึกหรอกับวัสดุ ซึ่งพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดความร้อนในกระบวนการตัดเฉือนจะมีอยู่สามตัวแปรได้แก่ ความเร็วการตัดเฉือน อัตราการป้อนต่อฟัน และระยะการป้อนลึก ดังนั้นการกำหนดพารามิเตอร์การตัดเฉือนที่เหมาะสมจะสามารถลดความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนได้ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเฉือนมีอายุที่ยาวนานขึ้น และทำให้คุณภาพผิวชิ้นงานมีค่าความหยาบผิวที่ดี

ในงานวิจัยนี้วิธีการวัดอุณหภูมิจากกาคัดเฉือนจะเลือกใช้วิธีวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล และการถ่ายภาพรังสีความร้อน (Abdil, K., (2015) ซึ่งเป็นวิธีที่มีความน่าเชื่อถือ และได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม สำหรับกระบวนการที่ทำการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะเป็นกระบวนการกัดที่ควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (CNC) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีขีดความสามารถที่มากกว่ากระบวนการอื่นๆ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุได้อย่างหลากหลายเช่น โลหะแข็งเกือบทุกประเภท พลาสติก และพลาสติกผสม

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโลหะ
- 2) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโลหะ

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ตัวแปรควบคุม
  - เครื่องกัดที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ (CNC) แบบ 3 แกน
  - วัสดุทดสอบเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 ขนาด 64x64x24 มิลลิเมตร
  - เครื่องมือตัดเฉือน ไฮสปีดเอ็นมิลล์ (HSE) แบบ 4 คมตัด ชนิดเคลือบผิว TiCN เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความยาวคมตัด 24 มิลลิเมตร
  - การตัดเฉือนแบบแห้ง (Dry Cutting Condition)
  - อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ระยะห่าง 1 มิลลิเมตร จากพื้นผิวที่ถูกตัดเฉือน วัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร ความยาว 30 มิลลิเมตร แบบมีหัวโพรบป้องกัน
  - อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนวัดด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนที่ระยะห่าง 120 มิลลิเมตร
  - ระยะป้อนลึกในแนวแกน (Axial Depth of Cut: Ap) ที่ระยะ 10 มิลลิเมตร
  - การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2<sup>3</sup> แฟกทอเรียล ทำการทดลอง 2 ซ้ำ
- 2) ตัวแปรที่ทำการศึกษา
  - ความเร็วรอบ (Spindle Speed) 800 และ 1270 รอบต่อนาที
  - อัตราการป้อน (Feed Rate) 20 และ 60 มิลลิเมตรต่อนาที
  - ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Radial Depth of Cut) 2.5 และ 5 มิลลิเมตร

## 1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

- 1) สืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2<sup>3</sup> แฟกทอเรียล
- 3) กำหนดพารามิเตอร์การตัดเฉือน
- 4) เตรียมชิ้นงานทดสอบ AISI 1050
- 5) กำหนดวิธีการวัดอุณหภูมิ
- 6) ทำการทดลองและบันทึกผล



- 7) วิเคราะห์ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2<sup>3</sup> แฟกทอเรียล
- 8) วิจารณ์และสรุปผลการวิจัย
- 9) เผยแพร่ตีพิมพ์งานวิจัย

### 1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

- 1) อาคารศูนย์เครื่องมือและวิทยาศาสตร์ 4 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

### 1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องจักรสำหรับการทดลอง
  - เครื่องกัดอัตโนมัติ ยี่ห้อ BRIDGEPORT รุ่น VMC 500-16
- 2) เครื่องมือสำหรับการตัดเฉือน
  - เครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์ ยี่ห้อ SU'S รุ่น EM 4146
  - เครื่องมือเจาะ ยี่ห้อ Nachi ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.7 มิลลิเมตร
  - อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือตัดเฉือนแบบ BT 40 มาพร้อมกับชุด COLLET ER 32
- 3) เครื่องมือวัดสำหรับการทดลอง
  - เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ผลิตโดย WR&W Engineering
  - เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ ยี่ห้อ TESTO รุ่น 176 T4
  - กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน ยี่ห้อ FLIR รุ่น E50
  - เครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น SurfTest SJ-210
  - กล้องจุลทรรศน์แบบแสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD-Motorized
- 4) ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดลอง และวิเคราะห์ผล
  - โปรแกรม SOLIDWORKS รุ่น 2015
  - โปรแกรม EZ-CAM รุ่น 2013
  - โปรแกรม Minitab รุ่น 16
  - โปรแกรม TESTO Comfort Basic รุ่น 5.0
  - โปรแกรม FLIR Tool+
- 5) สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
  - สารนำความร้อน (Thermal compound) รุ่น HTK-002-U1

### 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทราบถึงอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน และ
- 2) ทราบถึงอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของเครื่องมือตัดเฉือน
- 3) ทราบถึงปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานและพื้นผิวของเครื่องมือตัดเฉือน
- 4) ทราบถึงปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการใช้หรือของเครื่องมือตัดเฉือน และค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในกระบวนการกัดโลหะ เป็นการศึกษาที่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในประเทศไทยเนื่องจากมีความยากและมีความละเอียดอ่อน ในการฝังอุปกรณ์วัด และการกำหนดตำแหน่งในการวัดอุณหภูมิ งานวิจัยนี้ได้ทบทวนทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

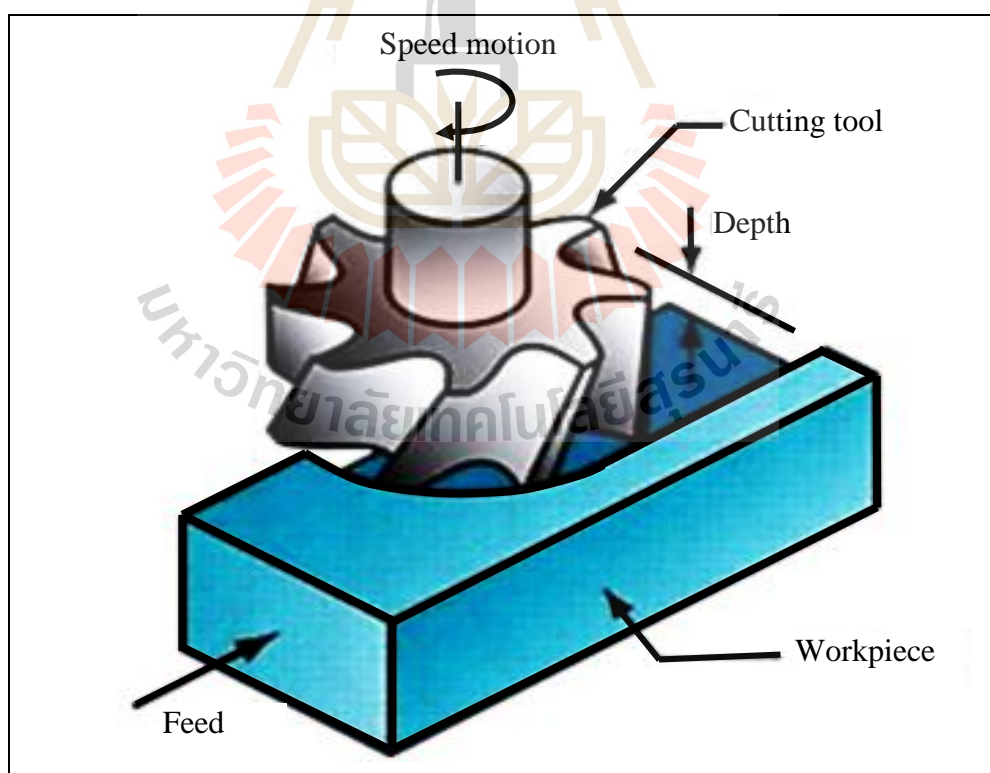
- 2.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining)
- 2.2 เครื่องจักรอัตโนมัติ (Computer Numerical Control)
- 2.3 การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing: CAM)
- 2.4 การเสียหายของเครื่องมือตัดเฉือน (Tool Failure)
- 2.5 ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือน
- 2.6 เหล็กกล้า (STEEL)
- 2.7 การวัดอุณหภูมิ
- 2.8 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)
- 2.9 ความหยาบผิวชิ้นงาน
- 2.10 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 กระบวนการตัดเฉือน (Machining)

การตัดเฉือนคือกระบวนการที่ใช้เครื่องมือตัดเฉือนในการเฉือนกำจัดเนื้อวัสดุในส่วนที่ไม่ต้องการออกจากชิ้นงาน จะทำให้ชิ้นงานเกิดพื้นผิวใหม่และรูปร่างตามที่กำหนด วิธีการตัดเฉือนมีหลายวิธี ได้แก่ การกลึง (Turning) การเจาะ (Drilling) การกัดขึ้นรูป (Milling) การไส (Shaping and planing) การแทงขึ้นรูป (Broaching) การเลื่อย (Sawing) และการขัดผิว (Abrasive) โดยการตัดเฉือนที่ได้รับความนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนมี 3 วิธีคือ การกลึง การเจาะ และการกัดขึ้นรูป (Groover, MP. 2007)

### 2.1.1 กระบวนการกัดขึ้นรูป

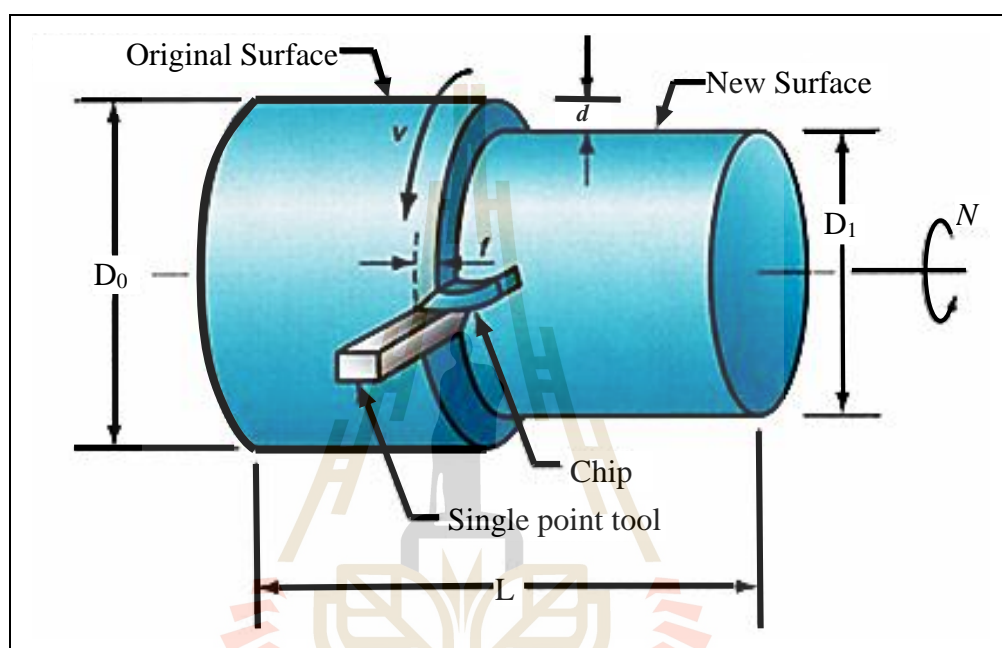
กระบวนการกัดขึ้นรูปเป็นกระบวนการที่ใช้เครื่องมือตัดเฉือนที่มีหลายคมตัด (Multiple cutting edges) ซึ่งเครื่องมือตัดเฉือนจะเกิดการหมุนด้วยแรงขับจากมอเตอร์และเคลื่อนที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานทำให้เกิดระนาบของผิวงานใหม่ ทิศทางการป้อน (Feed direction) ของชิ้นงานจะตั้งฉากกับแกนการหมุนของเครื่องมือตัดเฉือน ในขณะที่การหมุนของใบเครื่องมือตัดเฉือนถูกกำหนดด้วยความเร็ว (Speed)



รูปที่ 2.1 กระบวนการกัดขึ้นรูป

### 2.1.2 กระบวนการกลึง

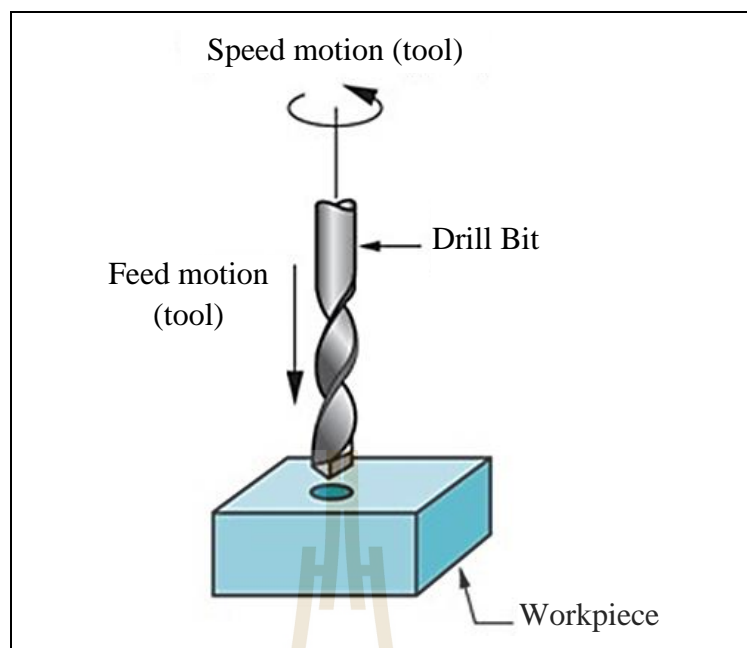
กระบวนการกลึงเป็นกระบวนการที่ใช้เครื่องมือตัดเฉือนที่มีคมตัดเดียว (Single cutting edge) ในการตัดเฉือนเนื้อวัสดุจากชิ้นงานที่กำลังหมุนและทำให้เกิดชิ้นงานรูปทรงกระบอก (Cylindrical shape) ความเร็วในการกลึงถูกกำหนดโดยความเร็วของการหมุนชิ้นงาน ส่วนการป้อนคือการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือนในทิศทางขนานกับแกนหมุนของชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 กระบวนการกลึงขึ้นรูป

### 2.1.3 กระบวนการเจาะ

กระบวนการการเจาะเป็นกระบวนการที่ใช้เครื่องมือตัดเฉือนในการผลิตรูกลม (Round hole) ซึ่งทำได้โดยการใช้เครื่องมือตัดเฉือนที่มีสองคมตัด (Two cutting edges) เครื่องมือตัดเฉือนจะเคลื่อนที่ในทิศทางที่ขนานกับแกนการหมุน ของชิ้นงานและเจาะลงไปชิ้นงานทำให้เกิดรูกลวง

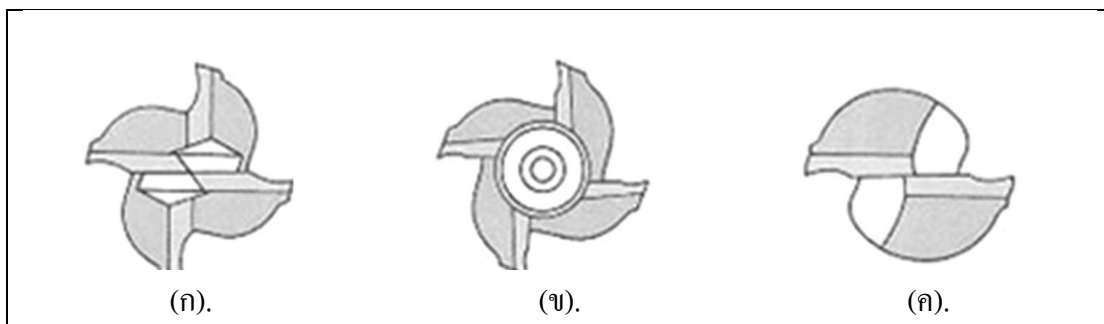


รูปที่ 2.3 กระบวนการเจาะ

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาวิธีการตัดเฉือนด้วยกระบวนการกัดขึ้นรูปที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์หรือเครื่องกัดซีเอ็นซี (Computer Numerical Control for Milling Machine) เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีขีดความสามารถในการผลิตชิ้นงานได้อย่างหลากหลาย ประหยัดเวลา แรงงานคน และทำให้คุณภาพชิ้นงานที่ได้มีความแม่นยำสูง

#### 2.1.4 เครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์ (End Mill)

เครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์เป็นเครื่องมือตัดเฉือนสำหรับงานกัด ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งกลม การทำงานของเครื่องมือตัดเฉือนชนิดนี้จะต้องอาศัยคมตัดตรงปลาย และคมตัดด้านข้างในการกัดขึ้นรูปชิ้นงาน และสามารถทำงานได้อย่างหลากหลายเช่น การกัดร่องลิ้น การกัดเบ้าหรือคอรันูน เป็นต้น วัสดุที่ใช้ในการผลิตเอ็นมิลล์ส่วนใหญ่ทำมาจากวัสดุเหล็กกล้ารอบสูง (High Speed Steel: HSS) โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่เหล็กกล้ารอบสูงที่ผสมโมดินัมกับเหล็กกล้ารอบสูงที่ผสมโคบอลต์ ซึ่งมีคุณลักษณะทนต่อการเสียดสีได้สูง และทำจากวัสดุทังสเตนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide: WC) ที่มีส่วนผสมระหว่างธาตุทังสเตน และธาตุคาร์บอน การผสมธาตุคาร์บอนจะทำให้ทังสเตนมีความแข็งสูง และทนต่อแรงบิดข่วนซึ่งจุดหลอมเหลวของทังสเตนสูงกว่าโลหะชนิดอื่นๆจึงสามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงได้

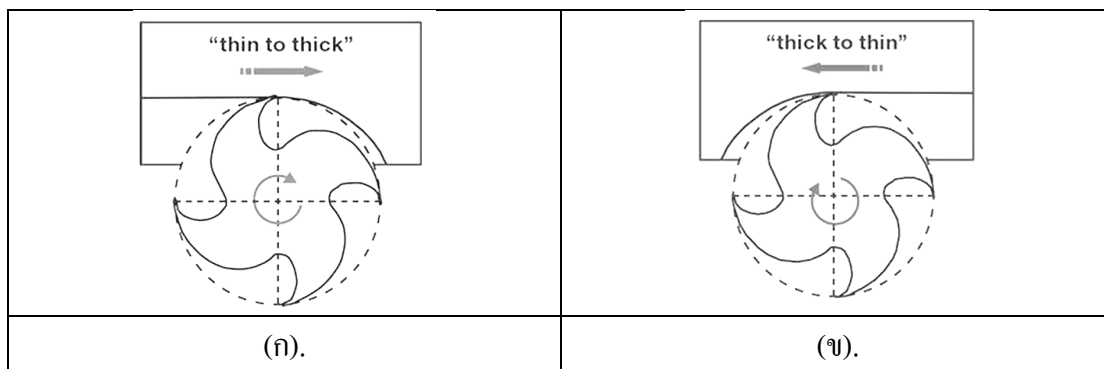


รูปที่ 2.4 คมตัดของเครื่องมือตัดเฉือนเอ็นมิลล์ (ก). แบบ 4 คมตัดที่มีคมตัดตรงกลางที่สามารถเจาะหรือเจาะร่องได้ (ข). แบบ 4 คมตัดที่มีรูตรงปลาย (ค). แบบ 2 คมตัดที่มีร่องคายเศษกว้าง เหมาะกับงานเจาะร่องแต่มีความแข็งแรงน้อยกว่าแบบหลายคมตัด

การเลือกใช้เครื่องมือตัดเฉือนเอ็นมิลล์ให้เหมาะสมกับการใช้งานสามารถพิจารณาได้จากจำนวนคมตัด มีดกัดแบบ 1 คมตัดถูกออกแบบสำหรับการเจาะเนื้อวัสดุที่มีความนิ่มเช่น อลูมิเนียม โดยกำหนดความเร็วรอบในการเจาะที่สูงเพื่อให้เศษตัดหลุดออกมาได้อย่างง่าย มีดกัดแบบ 2 คมตัดเหมาะสำหรับกัดร่องลึมหเพราะสามารถคายเศษตัดได้ดี แต่มีความแข็งแรงน้อยกว่าแบบหลายคมตัด และมีดกัดแบบ 4 คมตัดขึ้นไปเหมาะสำหรับวัสดุที่มีความแข็งเช่น เหล็ก สามารถเก็บรายละเอียดผิวได้ดีแต่ความสามารถในการคายเศษตัดไม่ดีเนื่องจากร่องคายเศษตัดมีขนาดเล็กกว่าแบบ 1 หรือ 2 คมตัด

### 2.1.5 ลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือน

ลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือนสามารถจำแนกเป็น 2 ลักษณะได้แก่ งานกัดตาม (Conventional Milling) โดยทิศทางการหมุนของมีดกัดจะมีทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน จากรูป 2.5 (ก) เมื่อเริ่มต้นกระบวนการตัดเฉือนคมตัดจะตัดชิ้นงานจากส่วนที่มีความหนาที่สุดเศษตัดจะมีขนาดเล็กลง ซึ่งงานกัดชนิดนี้จะแรงกระทำระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานสูง ถ้าการจับยึดชิ้นงานไม่แข็งแรงพออาจส่งผลกระทบต่อทำให้ชิ้นงานการเคลื่อนออกจากจุดจับยึดทำให้เกิดความเสียหายในกระบวนการผลิตได้ และงานกัดทวน (Climb Milling) โดยทิศทางการหมุนของมีดกัดจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน จากรูป 2.5 (ข) เมื่อเริ่มต้นกระบวนการตัดเฉือนคมตัดจะตัดชิ้นงานในส่วนที่มีความหนาน้อยก่อนและเศษตัดจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งงานกัดชนิดนี้จะใช้แรงกระทำระหว่างมีดกัดกับชิ้นงานน้อยกว่าการกัดแบบตาม และยังให้คุณภาพผิวที่ดีสำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซีนิยมใช้งานกัดทวนมากกว่ากัดตาม



รูปที่ 2.5 ลักษณะงานกัด (ก).แสดงลักษณะงานกัดตาม (ข).แสดงลักษณะงานกัดทวน

## 2.2 เครื่องจักรอัตโนมัติ (Computer Numerical Control)

เครื่องจักรอัตโนมัติหรือเครื่องจักร CNC เป็นเครื่องจักรกลอัตโนมัติที่มีการควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ โดยมักจะใช้กับงานโลหะที่มีความซับซ้อนและต้องการความแม่นยำสูง ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องจักรที่ใช้ระบบซีเอ็นซีมีประกอบไปด้วย ชุดควบคุม (Control System) ระบบแกนเครื่อง (Machine Axis) ระบบขับเคลื่อนโต๊ะงาน (Feed Drivers) เพลางาน (Work Spindle) และชุดเปลี่ยนเครื่องมือ (Tool Changers) (ชาติ ตระการกุล, 2539)



รูปที่ 2.6 เครื่องกัดอัตโนมัติ (Vertical Machining Center)

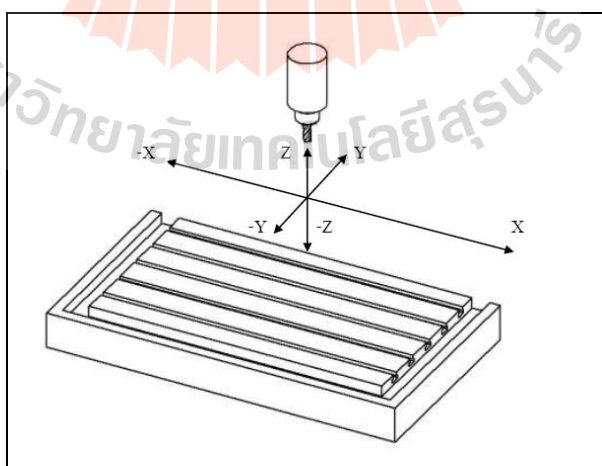


**2.2.1 ชุดควบคุม (Control System)** ทำหน้าที่อ่าน โปรแกรมที่ถูกป้อนจากแผงควบคุม หรือส่งผ่านทางคอมพิวเตอร์ และเปลี่ยนคำสั่งให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อควบคุมระบบกลไกต่างๆ ของเครื่องจักรให้ทำงานตามคำสั่งแต่ละบรรทัดของ โปรแกรม



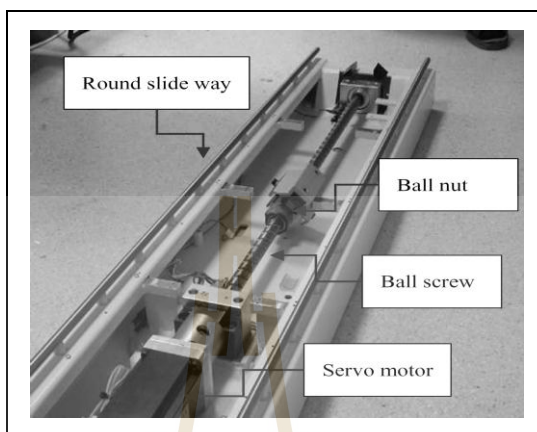
รูปที่ 2.7 ชุดควบคุม TNC 410

**2.2.2 ระบบแกนเครื่อง (Machine Axis)** เครื่องจักรจะต้องประกอบด้วยแกนที่นำพา ชิ้นงานหรือเครื่องมือตัดเฉือนให้เคลื่อนที่ โดยเครื่องจักรซีเอ็นซีทั่วไปจะถูกกำหนดเป็นมาตรฐาน ด้วยสัญลักษณ์ X Y และ Z



รูปที่ 2.8 ระบบแกนในแบบ คาร์ทีเซียน 3 มิติ

**2.2.3 ระบบขับเคลื่อนโต๊ะงาน (Feed Drivers) สำหรับโต๊ะงานของเครื่องจักรซีเอ็นซี** จะต้องเคลื่อนที่ด้วยความเที่ยงตรงโดยมีระยะคลอน (Backlash) น้อยที่สุด ซึ่งจะต้องอาศัยชุดส่งกำลังผ่านชุด Ball screw และ Ball nut ที่ทราบค่า Pitch ที่แน่นอน



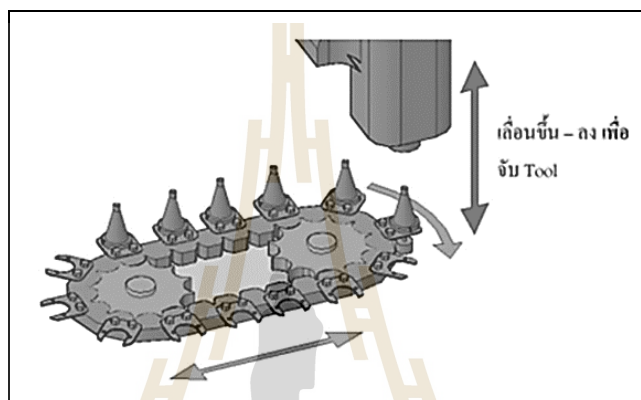
รูปที่ 2.9 ระบบขับเคลื่อนโต๊ะงาน

**2.2.4 เพลงาน (Work Spindle)** เครื่องจักรซีเอ็นซีส่วนใหญ่จะถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงซึ่งผู้เขียนโปรแกรมสามารถกำหนดความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ตามต้องการ โดยให้อยู่ในช่วงความเร็วที่มอเตอร์สามารถทำงานได้

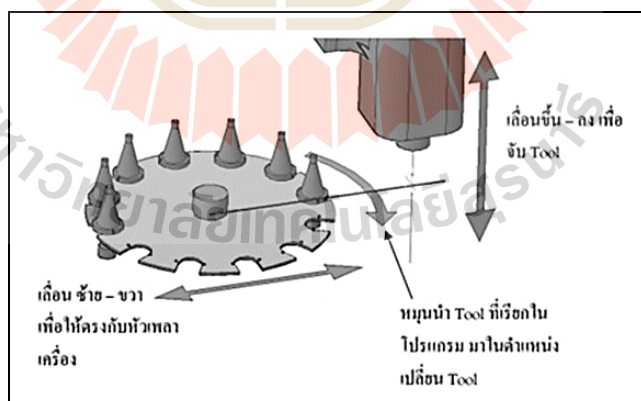


รูปที่ 2.10 ชุดเพลงานของเครื่องกัดอัตโนมัติ

**2.2.5 ชุดเปลี่ยนเครื่องมือ (Tool Changers)** สำหรับเครื่องกัดซีเอ็นซีสามารถเปลี่ยนเครื่องมือตัดเฉือน (Cutting Tool) ได้โดยอัตโนมัติ ชุดเปลี่ยนเครื่องมือนี้ถูกเรียกว่า Automatic Tool Change: ATC ซึ่งจะถูกลูกออกแบบตามผู้ผลิตเครื่องจักร โดยส่วนใหญ่จะสามารถแบ่งชุดเปลี่ยนเครื่องมือได้ดังนี้ 1) แบบโซ่ลำเลียง (Chain Conveyor) จะถูกใช้กับเครื่องกัดแนวตั้งที่ต้องการจับเครื่องมือหลายๆตัว 2) แบบจานหมุน (Rotary) หลักการทำงานเช่นเดียวกับแบบโซ่ลำเลียงแต่สามารถจับเครื่องมือได้น้อยกว่า



รูปที่ 2.11 ชุดเปลี่ยนเครื่องมือแบบโซ่ลำเลียง (Chain Conveyor)



รูปที่ 2.12 ชุดเปลี่ยนเครื่องมือแบบจานหมุน (Rotary)

## 2.3 การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing: CAM)

ในงานอุตสาหกรรมการผลิตทุกประเภทได้นำคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการผลิตหรือ CAM ในกระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการกัดขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรอัตโนมัติจะต้องได้รับการออกแบบชิ้นงานด้วยคอมพิวเตอร์หรือเรียกว่า CAD (Computer Aided Design) และทำการผลิตด้วย CAM โดยองค์ประกอบหลักของ CAM ประกอบด้วยเครื่องจักรที่ควบคุมด้วยระบบ CNC และซอฟต์แวร์สำหรับงาน CAM ปัจจุบันซอฟต์แวร์สำหรับงาน CAM มีให้เลือกใช้อย่างหลากหลาย ซึ่งมีคุณสมบัติและความสามารถที่แตกต่างกัน โดยหลักการพื้นฐานของการทำงาน CAM ต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้ (บริษัท คอร์ปอเรชั่น เทคโนโลยี โซลูชั่น จำกัด)

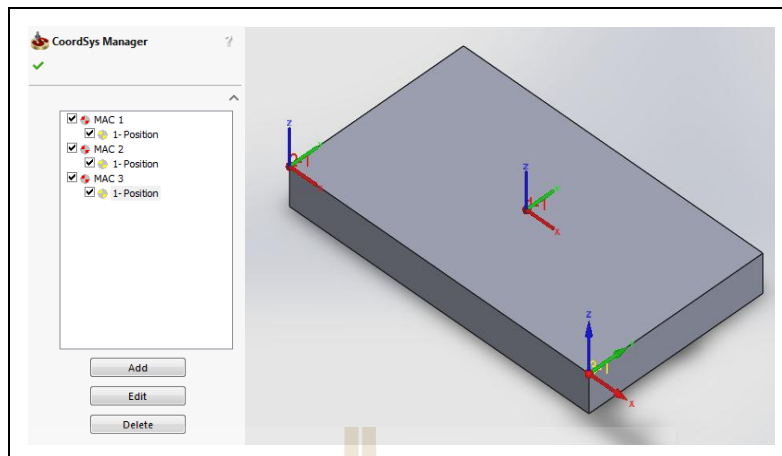
**2.3.1 การกำหนดองค์ประกอบในการผลิต** การทำงานให้มีประสิทธิภาพและลดข้อผิดพลาดในระหว่างการผลิตชิ้นงาน จะต้องมีการทำงานที่เป็นระบบ และมีขั้นตอนการทำงานที่ชัดเจน เพื่อให้สามารถตรวจสอบและแก้ไขข้อผิดพลาดได้ โดยสามารถกำหนดองค์ประกอบในการผลิตได้ดังนี้

**2.3.2 การกำหนดวิธีการกัด (Milling Operation)** ในการผลิตชิ้นงานสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอันดับแรกคือ วิธีการผลิตชิ้นงาน ลำดับขั้นตอนการผลิต รูปแบบการผลิต ซัดจำกัดของเครื่องมือตัดเฉือน เพื่อลดความผิดพลาดในกระบวนการผลิต



รูปที่ 2.13 ฟังก์ชันการกัดในซอฟต์แวร์ SolidCAM

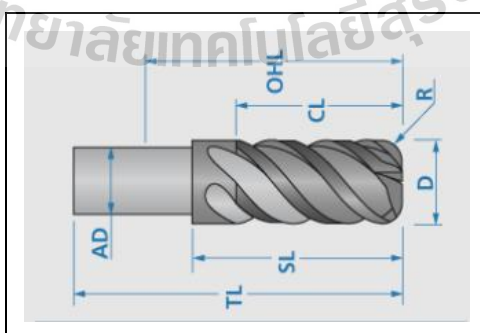
**2.3.3 การกำหนดจุดศูนย์กลางชิ้นงาน (Workpiece Zero Point)** ในการกำหนดจุดศูนย์กลางชิ้นงานจะต้องเข้าใจถึงระบบพิกัดอ้างอิง การเลือกใช้วิธีการกัด และวิธีการจับยึดชิ้นงานด้วย การกำหนดจุดศูนย์กลางของชิ้นงานที่เหมาะสมจะสามารถทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปอย่างเรียบง่ายและรวดเร็ว



รูปที่ 2.14 การกำหนดจุดศูนย์กลางชิ้นงาน (Work Piece Zero Point)

### 2.3.4 การกำหนดรูปร่างและรูปทรงของเครื่องมือตัดเฉือน (Cutting Tool Definition)

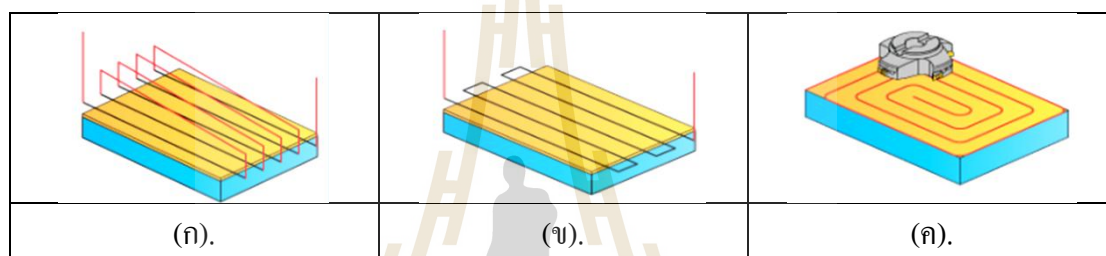
เครื่องมือตัดเฉือนที่ใช้ในงานกัดจะมีรูปร่างที่หลากหลาย ซึ่งจะแบ่งตามลักษณะการใช้งาน การเลือกใช้เครื่องมือตัดเฉือนที่เหมาะสมจะส่งผลต่อคุณภาพการผลิต ลดเวลาการทำงาน และการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน โดยทั่วไปการพิจารณาเครื่องมือตัดเฉือนจะประกอบไปด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Tool Diameter) รัศมีปลายมีด (Tool Nose Radius) ความยาวคมตัด (Cutting Length) ขนาดของด้ามจับเครื่องมือตัดเฉือน (Shank Diameter) มุมของคมตัด (Tool Taper Angle) จำนวนคมตัด (Cutting Flutes) และชุดจับเครื่องมือตัดเฉือน (Tool Holder) เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถคำนวณตำแหน่งของเครื่องมือตัดเฉือนได้อย่างถูกต้องแม่นยำ



รูปที่ 2.15 การกำหนดรูปร่างและรูปทรงของเครื่องมือตัดเฉือนใน CAM Software

**2.3.5 การกำหนดขนาดของวัสดุดิบ (Blank Form)** การกำหนดขนาดของวัสดุดิบเพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถคำนวณปริมาณวัสดุที่ต้องการตัดเฉือนได้อย่างถูกต้อง และลดเวลาการกัดที่สูญเปล่า (Air Cut)

**2.3.6 การกำหนดการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือน (Tool Path Strategy)** ลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือนเป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่จะทำให้กระบวนการกัดมีประสิทธิภาพ การกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือนที่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานมีขนาด รูปร่าง รูปทรง และคุณภาพตามต้องการ นอกจากนี้ยังช่วยลดเวลาการผลิต และเพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเฉือนได้



รูปที่ 2.16 ลักษณะการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือน (ก). Tool path One-way (ข). Tool path Zigzag (ค). Tool path Spiral

**2.3.7 การจำลองงานกัด (Simulation)** การจำลองการกัดงานในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการผลิตเป็นเครื่องมือที่ช่วยยืนยันความถูกต้องของการกำหนดเครื่องมือตัดเฉือน วิธีการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัดเฉือน และรูปร่างรูปทรงของวัสดุหลังเสร็จสิ้นกระบวนการกัดให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้

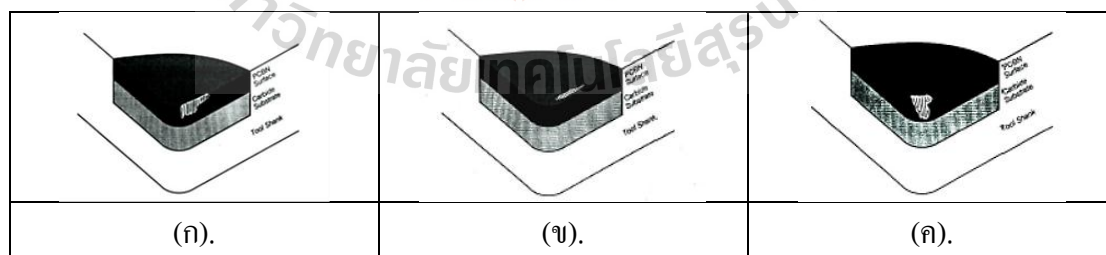
## 2.4 การเสียหายของเครื่องมือตัดเฉือน (Tool Failure)

ในกระบวนการตัดเฉือนต้องใช้เครื่องมือตัดเฉือนซึ่งระหว่างกระบวนการตัดเฉือนให้เกิดแรงในการตัดเฉือน และอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะส่งผลกระทบต่ออายุของเครื่องมือตัดเฉือน การเสียหายของเครื่องมือตัดเฉือนสามารถเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะได้แก่ (ปนัดดา นิรนาทล้ำพงศ์ และคณะ, 2547)

**2.4.1 การเสียหายเนื่องจากการแตกหักของเครื่องมือตัดเฉือน (Fracture Failure)** การเสียหายเนื่องจากการแตกหักของเครื่องมือตัดเฉือนจะเกิดขึ้นเมื่อแรงในการตัดมีค่าสูงมากทำให้เกิดการแตกหักทันที โดยเฉพาะในวัสดุเปราะ

**2.4.2 การเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature Failure)** เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการตัดมีค่าสูงเกินกว่าที่วัสดุทำเครื่องมือตัดเฉือนจะทนได้ ทำให้เกิดการอ่อนตัวลงและเกิดการเปลี่ยนรูปร่างอย่างถาวร

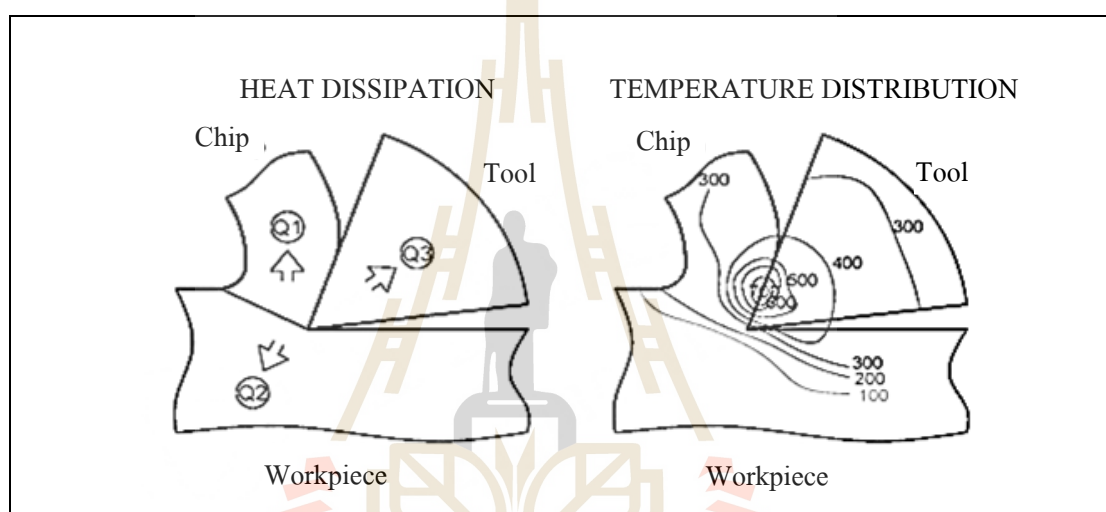
**2.4.3 การเสียหายเนื่องจากการสึกหรอ (Gradual Wear)** การสึกหรอที่ละเอียดเล็กน้อยของคมตัดจะมีผลต่อการสูญเสียรูปร่างของเครื่องมือตัดเฉือนและประสิทธิภาพการตัดเฉือน ที่สภาวะสุดท้ายของเครื่องมือตัดเฉือนจะมีลักษณะคล้ายการพังเนื่องจากอุณหภูมิสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะได้ดังนี้ การสึกหรอบนผิวหอบ (Flank Wear) จะเกิดขึ้นบนด้านข้างของคมตัดมีลักษณะเป็นแนวยาว เกิดจากการขัดถูระหว่างชิ้นงานกับเครื่องมือตัดเฉือน การสึกหรอบนผิวคาย (Cutter Wear) จะเกิดขึ้นบริเวณใกล้คมตัดมีลักษณะเป็นหลุมหรือร่องลึก เกิดจากการแลกเปลี่ยนอะตอมระหว่างผิวสัมผัสของเศษตัดและเครื่องมือตัดเฉือน ทำให้สูญเสียค่าความแข็ง และการสึกหรอที่ปลายมีด (Nose Wear) จะเกิดขึ้นบริเวณปลายมีดหรือจุดที่เสียดสีระหว่างเครื่องมือตัดเฉือนกับชิ้นงาน ซึ่งการสึกหรอที่ปลายมีดจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงาน



รูปที่ 2.17 การสึกหรอบนคมตัดของเครื่องมือตัดเฉือน (ก). Flank Wear (ข). Cutter Wear (ค). Nose Wear (เกสร หล่อบุญสม, 2554)

## 2.5 ความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ

พลังงานที่ใช้ในการตัดเฉือนเกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อนเนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างถาวร (Plastic Deformation) ของเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือน ความร้อนในกระบวนการตัดเฉือนโลหะจะเกิดจาก 3 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ความร้อนที่เกิดจากการเสียรูปของวัสดุ ความร้อนส่วนนี้จะเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ ความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานของเครื่องมือตัดเฉือนกับเศษตัด (Chip) และความร้อนที่เกิดจากแรงเสียดทานของเครื่องมือตัดเฉือนที่เกิดกาลึกหรือกับชิ้นงาน (พอลแลค, ฮอร์มัน ดับบลิว, 2537)



รูปที่ 2.18 การกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการตัดเฉือน

**2.5.1 การกระจายตัวของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือน** ไปยังส่วนต่างๆ ประกอบด้วย ความร้อนที่กระจายตัวไปยังเศษตัด (Chip) ประมาณ 80% ของปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมด จากภาพคือ Q1 ความร้อนที่กระจายไปยังชิ้นงาน (Work piece) ประมาณ 10-20% ของปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมด จากภาพคือ Q2 และความร้อนที่กระจายไปยังเครื่องมือตัดเฉือน (Cutting Tool) น้อยกว่า 10% ของปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากภาพคือ Q3

**2.5.2 ตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดความร้อนในกระบวนการตัดเฉือน** ประกอบด้วยความเร็วตัด (Cutting Velocity:  $V$ ) เมื่อความเร็วตัดเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะเพิ่มขึ้นตาม อัตราป้อนต่อฟัน (Feed per Tooth:  $F_z$ ) เมื่ออัตราการป้อนมากขึ้นความร้อนที่เกิดขึ้นก็จะเพิ่มขึ้นตามระยะป้อนลึก (Depth of Cut,  $A_p$ ) โดยระยะป้อนลึกแทบจะไม่มีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้น



## 2.6 เหล็กกล้า (STEEL)

เหล็กกล้าคือเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบไม่เกิน 2% เหมาะสมสำหรับการอบชุบโลหะด้วยความร้อน (Heat Treatment) ให้มีคุณสมบัติแข็งแรงเหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น เหล็กกล้ามีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป การแบ่งกลุ่มของเหล็กกล้าสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง และเหล็กกล้าคาร์บอนสูง

**2.6.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel)** เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำเป็นเหล็กที่มีการผลิตใช้มากซึ่งมีปริมาณคาร์บอนน้อยกว่า 0.25% wt. ซึ่งสมบัติเชิงกลมีค่า Yield strength 275 MPa. ค่า Tensile strength 415-550 MPa และความเหนียว 25% Elongation โดยทั่วไปเหล็กประเภทนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรงด้วยการรีดเย็น โครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย Ferrite และ Pearlite การนำไปใช้งานสามารถผลิตเป็นตัวถังรถยนต์ เหล็กโครงสร้างเป็นต้น

**2.6.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)** เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.25 ถึง 0.60% wt. มีความแข็งแรงและความเค้นแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ แต่จะมีความเหนียวน้อยกว่าสามารถนำไปชุบแข็งได้ เหมาะกับ งานทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล รางรถไฟ เฟือง ก้านสูบ ท่อเหล็ก ไขควง เป็นต้น

**2.6.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel)** เหล็กกล้าคาร์บอนสูงเป็นเหล็กที่มีความแข็งแรง และทนความเค้นแรงดึงสูง มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอน 0.5 ถึง 1.5% wt. สามารถทำการชุบแข็งได้แต่จะเปราะ เหมาะสำหรับ งานที่ต้องการความต้านทานต่อการสึกหลอ เช่น เครื่องมือเจาะ สกัดกรรไกร มีดคดิ่ง ใบเลื่อยตัดเหล็ก เครื่องมือทำเกลียว (Tap) ใบมีดโกน ตะไบ แผ่นเกจ เหล็กกัดสปริงแหนบ ลูกบอล แบริ่งลูกปืน

**2.6.4 ธาตุหลักที่ผสมในเนื้อเหล็ก** ประกอบด้วย 5 ธาตุคือ คาร์บอน แมงกานีส ซิลิคอน ฟอสฟอรัส และกำมะถัน

1) คาร์บอน (C = Carbon) เป็นตัวสำคัญที่สุดที่จะต้องผสมอยู่ในเนื้อเหล็ก มีคุณสมบัติทำให้เหล็กแข็งหลังจากผ่านขบวนการอบชุบด้วยความร้อน (Heat Treatment)

2) แมงกานีส (Mn = Manganese) ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเหล็ก เหล็กทั่วไปจะมีแมงกานีสผสมอยู่ประมาณ 0.6 – 0.9%

3) ซิลิคอน (Si = Silicon) เหล็กโดยทั่วไปจะมีซิลิคอนอยู่ประมาณ 0.6% เมื่อผสมซิลิคอนมากกว่านี้จะทำให้เหล็กทนค่าแรงดึงที่จุดยึดได้ (Yield point) หรือที่เราเรียกว่า เหล็กสปริง โดยเหล็กสปริงจะมีซิลิคอนผสมอยู่มากกว่า 0.6 ถึง 2.5%

4) ฟอสฟอรัส (P= Phosphorus) มีอยู่ในสินแร่เหล็กและตกค้างในเนื้อเหล็ก ฟอสฟอรัสทำให้เหล็กเปราะ จึงต้องขจัดออกไปให้มากที่สุด โดยไม่ให้มีมากเกินไป 0.05%

5) กำมะถัน (S = Sulphur) มีคุณสมบัติคล้ายฟอสฟอรัส คือทำให้เหล็กเปราะ มีผสมในเนื้อเหล็กตามธรรมชาติ ขจัดให้เหลือน้อยได้ยาก ไม่ควรเกิน 0.05%

**2.6.5 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด AISI 1050** เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด AISI 1050 คือเหล็กที่มีคาร์บอน (C) 0.47-0.55 % wt. จัดเป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่นิยมใช้ในงานพื้นฐาน งานโครงสร้าง งานอุปกรณ์การเกษตร งานเครื่องจักรกล งานแม่พิมพ์ และงานชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ เหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1050 เป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้าน เช่นมีราคาที่ถูกกว่าเมื่อเทียบกับเหล็กแม่พิมพ์เกรดอื่น ความแข็งแรงสูงกว่าเหล็กโครงสร้างทั่วไป มีความเหนียวในระดับดี ประสิทธิภาพหลังจากการชุบแข็งให้ค่าความแข็งที่ผิวสูง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทั่วไปของเหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1050

ส่วนผสมทางเคมี (% wt.)	C	Mn	Si	P	S	Fe
	0.47-0.55	0.60-0.90	≤ 0.400	≤ 0.030	≤ 0.035	Bal.
AISI	1050					
JIS	S50C					
DIN	1.1206 (Ck 50/ C50 E)					
สภาพจำหน่าย	อบปกติ ความแข็งไม่เกิน 235 HB					
สภาพหลังชุบ	ชุบแข็งด้วยน้ำ ความแข็ง 58-60 HRC					

## 2.7 การวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิคือปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุปกรณ์ที่เป็นตัวรับรู้ และตัวกลางที่สนใจวัดอุณหภูมิ โดยกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์กล่าวว่า “อุณหภูมิเป็นสิ่งที่มีความสัมพันธ์กับความร้อน ถ้าไม่มีอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนจะไหลจากที่ที่มีอุณหภูมิสูงไปยังที่ที่มีอุณหภูมิต่ำเท่านั้น” หลักการวัดอุณหภูมิแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติได้เป็น 4 กลุ่ม (พิพัฒน์ อมตฉายา, 2556)

**2.7.1 หลักการวัดอุณหภูมิ** การวัดอุณหภูมิแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงสมบัติสามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม

1) การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าค่าสมบัติทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เช่น เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าอาร์ทีดี (RTD) และเทอร์มิสเตอร์ (Thermistor) ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน เป็นต้น

2) การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางแสงและการแผ่รังสี การวัดอุณหภูมิที่สูงมากๆ ไม่สามารถใช้เครื่องมือวัด (Instrument) ดังกล่าวข้างต้นได้ เนื่องจากอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องมือวัด จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดชนิดพิเศษที่สามารถวัดอุณหภูมิได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุที่ต้องการวัด แต่อาศัยการวัดการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุเพื่อบ่งบอกอุณหภูมิ โดยทั่วไปวัตถุในช่วงอุณหภูมิประมาณ 800 ถึง 1,800 องศาเซลเซียส แผ่รังสีออกมาในรูปของแสงในย่านที่ตามองเห็น ส่วนวัตถุในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิห้อง วัตถุจะแผ่รังสีออกมาในย่านของรังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation) ซึ่งอุณหภูมิแตกต่างกัน ความยาวคลื่นหรือความถี่ของรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุจะแตกต่างกันด้วย เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่อาศัยหลักการแผ่รังสีและสมบัติเชิงแสงนี้เรียกว่า ไพโรมิเตอร์ (Pyrometer) สามารถแบ่งประเภทตามหลักการทำงานได้ 3 ประเภทคือ ไพโรมิเตอร์ชนิดเทียบความสว่างของไส้หลอด (Optical Pyrometer) ไพโรมิเตอร์ชนิดวัดการแผ่รังสี (Radiation Pyrometer) และไพโรมิเตอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared Pyrometer)

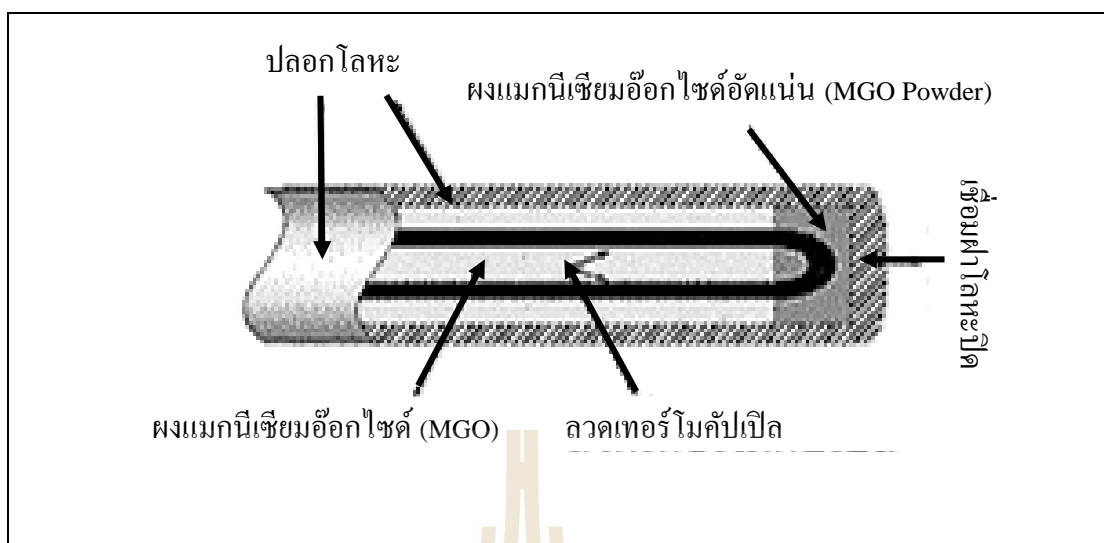
3) การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลหลักการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ประเภทนี้มีหลายแบบขึ้นอยู่กับชนิดของเทอร์โมมิเตอร์ เช่น เทอร์โมมิเตอร์แบบของเหลวบรรจุในหลอดแก้วปิด (Liquid filled in glass thermometer) ทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงการขยายตัวของของเหลวที่บรรจุอยู่ในหลอดแก้วเทอร์โมมิเตอร์แบบเปลี่ยนการขยายตัวเป็นความดัน (Pressure Thermometer) และเทอร์โมมิเตอร์แบบแถบโลหะคู่ (Bi-metal thermometer) โดยเทอร์โมมิเตอร์ประเภทนี้มีช่วงของการวัดอุณหภูมิ (Range) ก่อนข้างแคบขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้และชนิดของเทอร์โมมิเตอร์

4) การวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี เครื่องมือวัดอุณหภูมิประเภทนี้ทำงานโดยอาศัยอุณหภูมิเฉพาะที่สารเคมีละลายหรือเปลี่ยนสีเป็นจุดสังเกต เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบดินสอ (Crayon temperature indicator) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบแล็กเกอร์ (Lacquer temperature indicator) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบเม็ดยา (Pellet temperature indicator) และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิแบบแผ่นฉลาก (Label temperature indicator) เป็นต้น

**2.7.2 การวัดอุณหภูมิของของแข็งและผิวหนัง** การวัดอุณหภูมิของของแข็งและผิวหนังสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การฝังทรานส์ดิวเซอร์ในวัสดุ โดยการเจาะรูแล้วสอดทรานส์ดิวเซอร์เข้าไปในรูเจาะ วิธีนี้ยังสามารถใช้ได้กับเทอร์โมมิเตอร์ชนิดของเหลวในแท่งแก้วหรือแบบแถบโลหะคู่ โดยสอดก้านของทรานส์ดิวเซอร์เข้าไปในวัสดุตามความลึกที่ระบุ เพื่อให้ทรานส์ดิวเซอร์สัมผัสกับความร้อนในบริเวณที่ต้องการ ซึ่งจะต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าทรานส์ดิวเซอร์มีการสัมผัสกับของแข็งที่ต้องการวัดอุณหภูมิเป็นอย่างดี เพื่อลดความผิดพลาดที่อาจเกิดเนื่องจากการนำความร้อนที่ไม่ต้องการภายในสายไฟ หรือการใส่อุปกรณ์วัดเข้าไปในระบบให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และอาจเติมน้ำมันที่มีค่าการนำความร้อนสูงลงไปในรูเจาะเพื่อลดช่องว่างอากาศระหว่างหัววัดกับผนัง สำหรับการวัดอุณหภูมิที่พื้นผิวซึ่งเป็นบริเวณที่สัมผัสกับอากาศ มักจะเกิดการแผ่รังสีความร้อนไปยังสภาพแวดล้อม ทำให้เกิดความผิดพลาดของการวัดได้ง่าย (นวกัทยา หนูนาค และทวีพล ชื้อสสัย, 2556)

**2.7.3 การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิจากผิวสัมผัสที่มีค่าคงที่** การติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิจากผิวสัมผัสที่มีค่าคงที่จะเกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างอุปกรณ์รับรู้กับผิวสัมผัส และอุปกรณ์รับรู้ไปยังสภาพแวดล้อม ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีความแตกต่างกับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในของแข็ง โดยขนาดของความแตกต่างอุณหภูมิสามารถหาได้โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์อุณหภูมิแบบมิติเดียว หรือลดปริมาณการรบกวนของอุณหภูมิให้มีค่าน้อยลงได้โดยการใช้อุปกรณ์รับรู้ที่มีขนาดหัววัดที่เล็ก ฝังอยู่ในช่องหรือรูตื้นๆ เพื่อคงสถานะการไหลที่บริเวณผิวหนังให้คงที่ นอกจากนี้ยังสามารถทำได้โดยใช้เทคนิคไม่ลุกล้ำ (Non-Invasive Technique) เช่นการวัดอุณหภูมิด้วยแสงอินฟราเรด (Infrared thermometry)

**2.7.4 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)** เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์อย่างง่ายที่ทำงานโดยอาศัยปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดยการนำโลหะชนิดที่แตกต่างกันมาเชื่อมต่อกัน โดยรอยต่อที่ปลายทั้งสองของลวดตัวนำมีอุณหภูมิแตกต่างกันทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้น และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าซีเบค



รูปที่ 2.19 โครงสร้างทั่วไปของเทอร์โมคัปเปิล

### 2.7.5 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน

- 1) ความไว (Sensitivity) จากตารางแรงเคลื่อนของ NBS แสดงว่าย่านของแรงเคลื่อนจากเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าน้อยกว่า 100 mV แต่ความไวที่แท้จริงในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับการใช้งานจริงปรับสภาพสัญญาณและตัวเทอร์โมคัปเปิล
- 2) โครงสร้าง (Construction) จะต้องมีความต้านทานต่ำ ให้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงๆ ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่นำไปใช้วัดค่า และเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้
- 3) ย่านการใช้งาน (Range) ย่านอุณหภูมิการใช้งานและความไวในการวัดของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวจะแตกต่างกันตามแต่ละสมาคมจะกำหนด ในส่วนที่สำคัญคือค่าแรงเคลื่อนที่ออกมาจากแต่ละอุณหภูมิจะต้องอ้างอิงกับตารางค่ามาตรฐานของแต่ละสมาคมที่ใช้ให้ถูกต้องเป็นเอกภาพเดียวกันหมดทั้งระบบ
- 4) เวลาตอบสนอง (Time Response) เวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับขนาดของสายและวัสดุที่นำมาทำท่อป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล
- 5) การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ปกติแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลจะมีขนาดเล็กมากจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ขยายความแตกต่างที่มีอัตราขยายสูงๆ

**2.7.6 ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล** ในปัจจุบันมีการผลิตเทอร์โมคัปเปิลมีหลายชนิดโดยการนำหลักการของโลหะหรือสารกึ่งตัวนำต่างชนิดมาใช้ในการทำเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งตามมาตรฐานสากลและมาตรฐานระดับชาติได้จัดแบ่งวัสดุที่นิยมใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลออกเป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1) เทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ทำจากโลหะหายาก ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลชนิด B, R และ S ทำจากแพลตินั่ม (Platinum) และโลหะผสมระหว่างแพลตินั่มกับโรเดียม (Rhodium) เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่มีความเสถียรมากที่สุด และนำไปใช้กับงานที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1750 °C ซึ่งมีราคาแพงและไวต่อการปนเปื้อน

2) เทอร์โมคัปเปิลที่มีโลหะนิกเกิลเป็นหลัก (Nickel-based thermocouple) ได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K และ N มักใช้ในงานที่มีอุณหภูมิเท่ากลุ่มแรก

3) เทอร์โมคัปเปิลค่าลบคอนสแตนแตน (Constantan negative thermocouple) เช่น ชนิด E, J และ T จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เป็นเอาต์พุตมีค่าสูงมาก เนื่องจากคอนสแตนแตนมีสัมประสิทธิ์ซีเบคที่มีค่าลบสูง

ดังนั้นเกณฑ์การพิจารณาในการเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลประกอบด้วยราคา ช่วงการวัดอุณหภูมิที่ต้องการใช้งาน ความเสถียรทางเคมี ความเข้ากันได้ของวัสดุ การป้องกันการทำปฏิกิริยากับบรรยากาศ ข้อจำกัดทางกล อายุการใช้งานของตัวรับรู้ ความไวและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเอาต์พุต การตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลภายใต้สภาวะไม่คงตัวจะขึ้นอยู่กับขนาดของรอยต่อ โดยรอยต่อมีขนาดเล็กจะทำให้การตอบสนองไวขึ้น

ตารางที่ 2.2 ค่าความผิดพลาดของเทอร์โมคัปเปิลเชิงพาณิชย์

ชนิดเทอร์โมคัปเปิล	ย่านวัดอุณหภูมิ (°C)	ความผิดพลาด (เกรดมาตรฐาน)	ความผิดพลาด (เกรดพิเศษ)
E	-270 to +1000	0.5% สูงกว่า 0 °C	0.4%
J	-210 to +1200	0.75% สูงกว่า 0 °C	0.4%
K	-270 to +1372	0.75% สูงกว่า 0 °C	0.4%
N	-270 to + 1300	0.75% สูงกว่า 0 °C	0.4%
R	-50 to +1768	0.25%	0.1%
S	+50 to +1768	0.25%	0.1%
T	-270 to +400	0.75% สูงกว่า 0 °C	0.4%

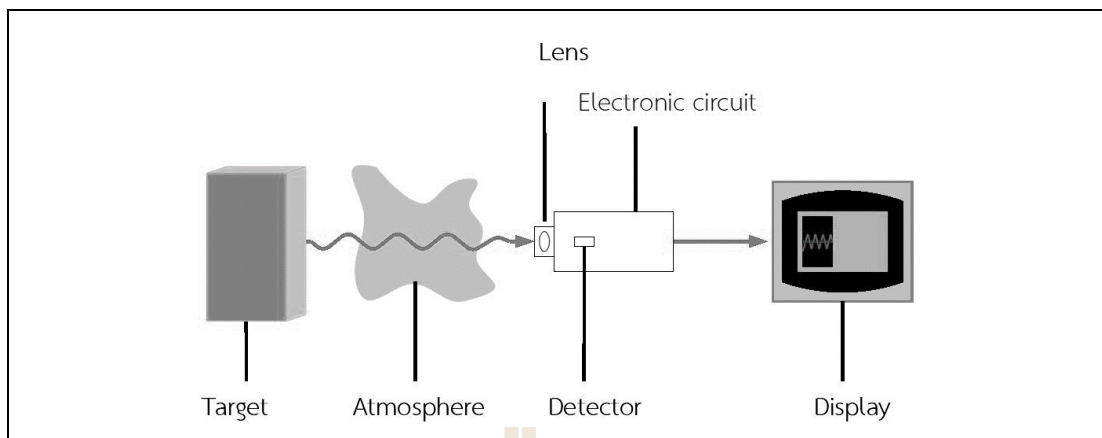
**2.7.7 กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน (Thermography)** กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนเป็นกล้องที่สามารถสร้างภาพจากการแผ่รังสีอินฟราเรดทำงานร่วมกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่น 14000 นาโนเมตร ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า รังสีอินฟราเรด (Infrared: IR) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วงเดียวกันกับไมโครเวฟ ซึ่งสสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 200 องศาเซลเซียส ถึง 4000 องศาเซลเซียส จะปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา โดยคุณสมบัติเฉพาะตัวของรังสีอินฟราเรดจะไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นการนำคลื่นรังสีอินฟราเรดมาใช้ประโยชน์ในการสร้างกล้องอินฟราเรดที่สามารถมองเห็นวัตถุในความมืดได้ การตรวจจับรังสีอินฟราเรดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่สัมผัส และไม่ทำลายวัสดุซึ่งส่วนประกอบสำคัญของกล้องอินฟราเรดประกอบด้วย เลนส์ (Lens) เซนเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared sensor) วงจรอิเล็คทรอนิกส์ (Electronic circuit) และส่วนแสดงผล (Display)

หลักการทำงานกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนโดยทั่วไปคือตัวเซนเซอร์อินฟราเรดทำหน้าที่รับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกจากวัตถุเป้าหมาย ผ่านเลนส์ของเครื่องมือวัด แล้วแปลงรังสีอินฟราเรดให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าตามทฤษฎีการแผ่รังสีความร้อน จากนั้นวงจรอิเล็คทรอนิกส์จะทำหน้าที่แปลงข้อมูลเพื่อนำไปแสดงผล ซึ่งจะออกมาในรูปของตัวเลข สี หรือกราฟ โดยทั่วไปสีแดงจะแสดงผลของบริเวณที่มีอุณหภูมิสูง และสีน้ำเงินจะแสดงบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ผลของของแต่ละจุดที่ได้จากเซนเซอร์เมื่อนำมารวมกันจะประกอบเป็นภาพเรียกว่า ภาพถ่ายความร้อน (Thermal Image) ค่าความถูกต้องของอุณหภูมิที่วัดได้จากกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะพื้นผิวของวัตถุเป้าหมาย ระยะห่างของเครื่องมือวัดกับวัตถุเป้าหมาย และคุณลักษณะของเครื่องมือวัดนั้นๆ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อความถูกต้องมีดังต่อไปนี้

1) ค่าความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุ การแปลผลพลังงานความร้อนที่ได้จากการตรวจจับการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุเป็นอุณหภูมิที่ถูกต้องจำเป็นต้องกำหนดค่าความสามารถในการแผ่รังสีของวัตถุที่เหมาะสม เพื่อให้ค่าอุณหภูมิของวัตถุที่วัดได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่แท้จริง

2) ค่าการสะท้อนรังสีของวัตถุ เนื่องจากตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่ติดตั้งภายในเครื่องมือวัดไม่ได้รับเฉพาะรังสีอินฟราเรดที่เกิดจากตัววัตถุเป้าหมายเท่านั้น แต่ยังรับรังสีที่สะท้อนมาจากวัตถุอื่นด้วย ทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน

3) ระยะห่างระหว่างวัตถุกับเครื่องมือวัด ค่าความผิดพลาดของไพโรมิเตอร์ชนิดอาศัยการเปลี่ยนแปลงการแผ่รังสีของวัตถุ อาจเกิดจากการเคลื่อนที่ของรังสีที่ผ่านตัวกลาง เช่น อากาศที่มีไอน้ำ คิว ก๊าซ หรือฝุ่นละออง เป็นต้น

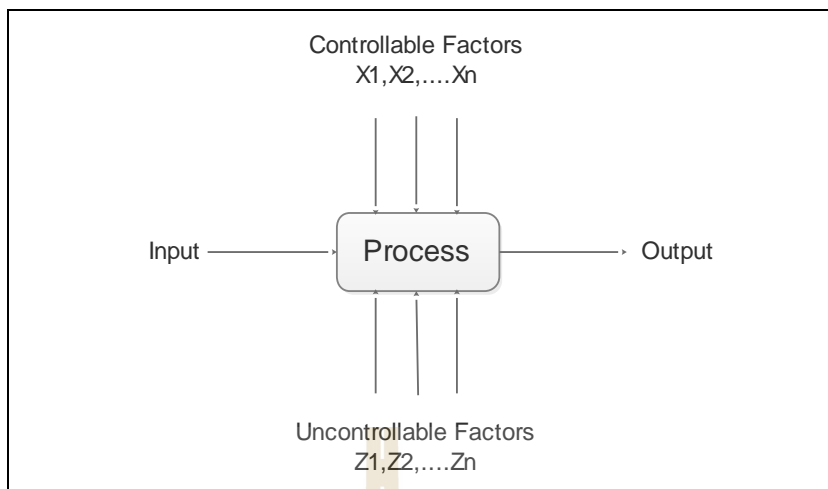


รูปที่ 2.20 ระบบการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยการแผ่รังสีอินฟราเรดของวัตถุ

## 2.8 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment: DOE)

การออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการควบคุมกระบวนการเชิงสถิติ ซึ่งอาจมีปัจจัย (Factors) จำนวนมากที่เป็นไปได้ที่จะเป็นสาเหตุของความผิดปกติ การปรับ แก้ไขกระบวนการจะต้องรู้ถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความผิดปกติของผลตอบสนอง (Response) อย่างมีนัยสำคัญ การออกแบบการทดลอง (DOE) จึงเป็นเครื่องมือที่นิยมใช้เพื่อบ่งชี้ปัจจัยเพื่อนำไปสู่ผลการดำเนินการที่ดีขึ้น การศึกษาผลของปัจจัยนำเข้า (Input) ต่อผลลัพธ์ที่สนใจคุณลักษณะทางคุณภาพจะต้องประกอบไปด้วยปัจจัย (Factor) เป็นปัจจัยอิสระที่ถูกคาดเดาว่าจะมีผลต่อผลลัพธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ และปัจจัยที่ควบคุมได้ โดย DOE จะมุ่งเน้นการศึกษาเพื่อบ่งชี้ผลกระทบจากปัจจัยที่ควบคุมได้ต่อผลลัพธ์ที่สนใจ ในขณะที่ต้องการกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ไม่ให้ส่งผลต่อผลลัพธ์อย่างมีนัยสำคัญปัจจัยที่ควบคุมได้จะเรียกว่า ทริตเมนต์ (Treatment) จำนวนครั้งในการทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการทดลองซ้ำด้วยเงื่อนไขที่เหมือนกัน โดยในการทดลองหนึ่ง ๆ จะมีจำนวนเงื่อนไขการทดลอง (Treatment combination) เท่ากับผลคูณของจำนวนปัจจัยและจำนวนระดับของแต่ละปัจจัย ผลลัพธ์ที่สนใจ (Response) เป็นคุณลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ ซึ่งเป็นปัจจัยไม่อิสระต้องการศึกษา ควบคุม ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญตามการเปลี่ยนแปลงของ ทริตเมนต์ต่าง ๆ (จิราวัลย์ จิตรถเวช, 2552)





รูปที่ 2.21 รูปแบบทั่วไปของกระบวนการ

### 2.8.1 หลักการพื้นฐานในการออกแบบการทดลอง

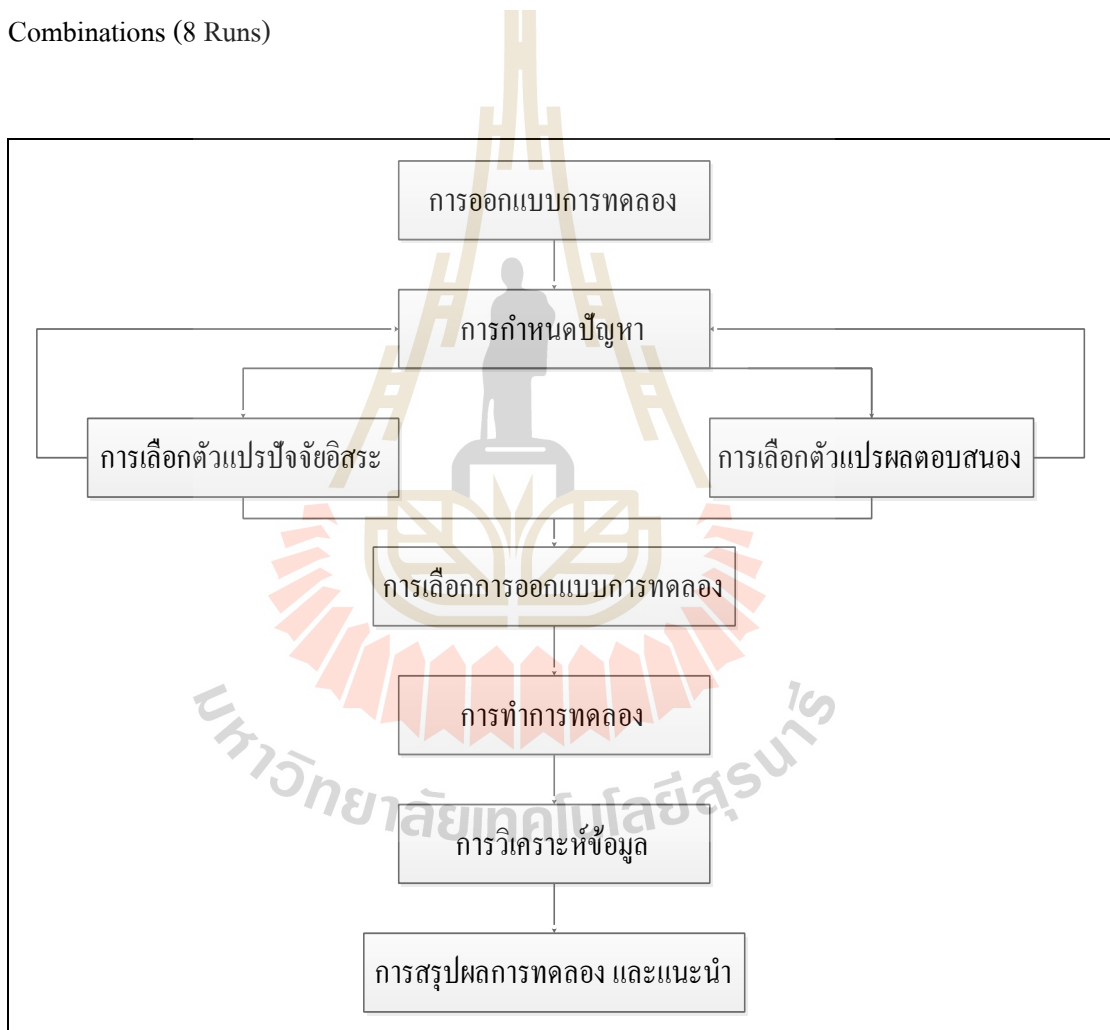
การวางแผนและการออกแบบการทดลองที่ดีแสดงถึงการได้ข้อมูลจากการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งจะส่งผลต่อการวิเคราะห์และสรุปผลได้อย่างแม่นยำ หลักการพื้นฐานมีอยู่ 3 หลักการ 1) การสุ่ม (Randomization) หมายถึงการจัดการทดลองโดยปราศจากการลำเอียง โดยจะต้องทำการทดลองให้มีโอกาสเท่าๆกัน และไม่เจาะจง 2) การทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการกำหนดจำนวนซ้ำของการทดลองโดยมีความเป็นอิสระต่อกัน การทดลองซ้ำจะทำให้ความคลาดเคลื่อนในการทดลองน้อยลง ในขณะที่เดียวกันการทดลองที่มีจำนวนซ้ำมากเกินไป จะทำให้เสียค่าใช้จ่ายและเสียเวลา 3) การจัดกลุ่ม (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการจัดกลุ่มสิ่งๆที่เหมือนกันให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน เพื่อลดความผันแปรจากความแตกต่างของหน่วยตัวอย่าง โดยให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากความแตกต่างในกลุ่มตัวอย่างน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ บางการทดลองจะมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถทำการทดลองโดยใช้วัตถุที่มาจากกลุ่มเดียวกันได้ จึงต้องจัดกลุ่มวัตถุดิบเพื่อทำการทดลองในแต่ละซ้ำนั้นๆ

### 2.8.2 การทดลองแบบการทดลองแบบ $2^k$ แฟกทอเรียล ( $2^k$ Factorial Design)

การออกแบบการทดลองแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบตั้งแต่สองปัจจัยขึ้นไป โดยทำการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก (Main effects) และผลกระทบร่วมกันของปัจจัย (Interaction effects) ได้พร้อมกันในขณะที่ทำการทดลอง ตัวอย่างการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^k$  แฟกทอเรียล ในรูปแบบที่ง่ายที่สุดประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ (ต่ำและสูง) แผนการทดลองนี้เรียกว่า การทดลองแบบ  $2^2$  แฟกทอเรียล นั่นคือ 4 ทริทเมนต์คอมบินเนชัน โดยปกติจะแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่

ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ  $2^2$  ระดับต่ำและสูงจะแทนด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” บนแกน A และ B ตามลำดับ (ชาญณรงค์ สายแก้ว, 2557)

**2.8.3 การออกแบบการทดลองแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล ( $2^3$  Factorial Design)** การออกแบบการทดลองแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล คือการทดลองที่เกี่ยวกับปัจจัย 3 ตัว โดยแต่ละปัจจัยจะมี 2 ระดับ นั่นคือมี 8 ทริทเมนต์คอมบิเนชัน ในแผนการทดลองแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล โดยมี 3 ปัจจัยคือ A B และ C ซึ่งแต่ละปัจจัยจะมี 2 ระดับ ซึ่งรูปแบบการทดลองจะประกอบด้วย การทดลอง 8 Combinations (8 Runs)



รูปที่ 2.22 แผนภาพรูปแบบของการออกแบบการทดลอง

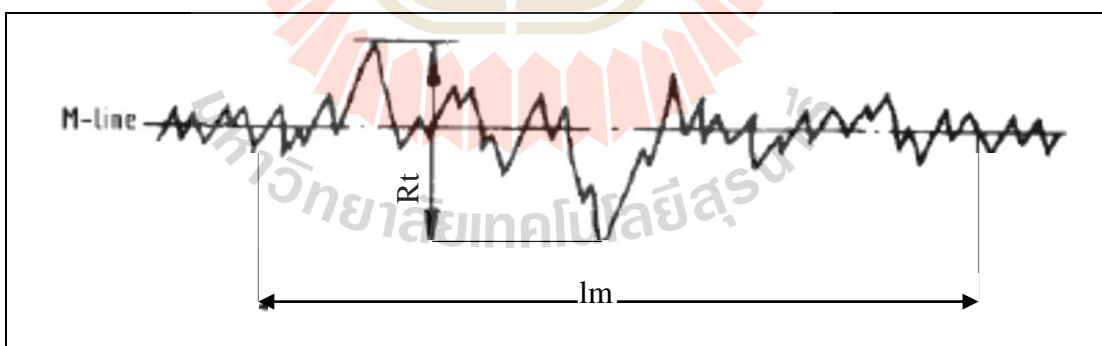
ตารางที่ 2.3 การออกแบบการทดลองที่ 3 ปัจจัยในระดับสูงและต่ำ

ทรีทเมนต์คอม บิเนชั่น	อิทธิพลของปัจจัย						
	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
(1)	-	-	+	-	+	+	-
a	+	-	-	-	-	+	+
b	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	-	-	-	-
c	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	-	-	+	+	-	-
bc	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+

## 2.9 ความหยาบผิวชิ้นงาน

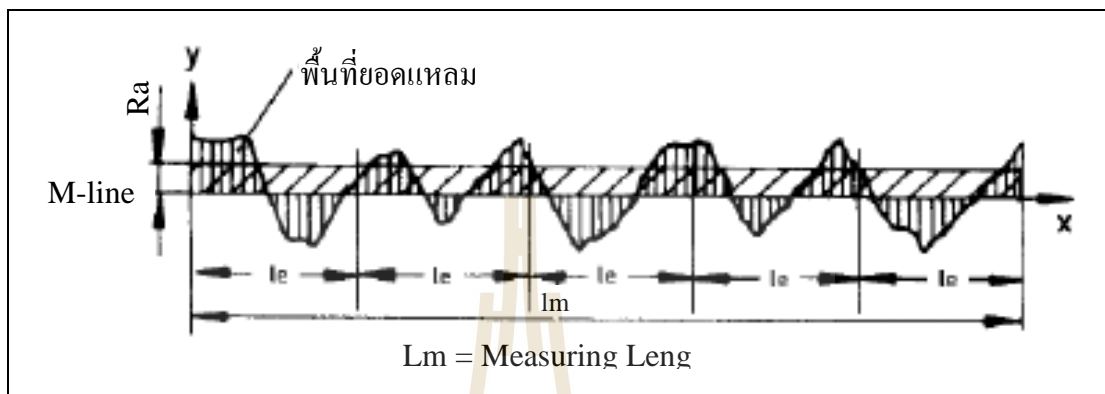
2.9.1 ความหยาบผิวชิ้นงาน (Roughness) คือความผิดปกติของผิวงานที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูป อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิต การวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานประกอบด้วย ค่า  $R_t$ ,  $R_a$  และ  $R_z$  ซึ่งมีหน่วยเป็นไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) โดยแต่ละค่ามีวิธีการวัด ดังนี้

- 1) ค่า  $R_t$  หมายถึง ค่าวัดจากจุดสูงสุดไปยังถึงจุดต่ำสุดของผิวงาน



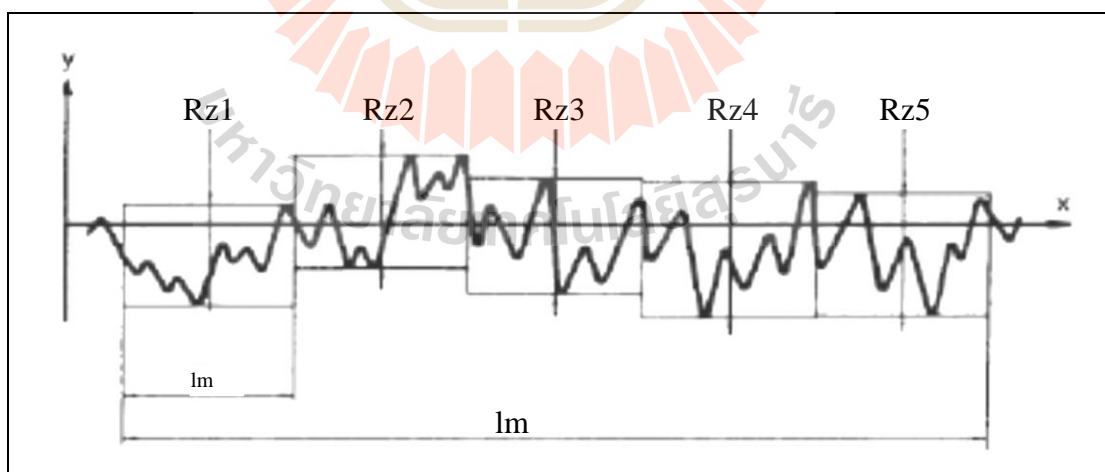
รูปที่ 2.23 การวัดค่า  $R_t$

2) ค่า Ra หมายถึง ค่าที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต ของพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (M - Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลาง หาด้วยความยาวเฉลี่ย ( $L_m$ ) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็น ไมโครเมตร



รูปที่ 2.24 การวัดค่า Ra

3) ค่าความหยาบ Rz หมายถึง ค่าหาได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่า ๆ กัน 5 ช่วง แล้วนำ ค่าที่ได้มารวมกันหาด้วย 5 โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็น ไมโครเมตร



รูปที่ 2.25 การวัดค่า Rz

## 2.9.2 เครื่องวัดความหยาบผิว

เครื่องวัดความหยาบผิวแบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่เครื่องวัดความหยาบผิวแบบเคลื่อนที่และ แบบตั้งอยู่กับที่ ในการเลือกใช้เครื่องวัดความหยาบผิวประกอบด้วยคุณลักษณะดังนี้

- 1) ช่วงการวัด (Measuring Range) ต้องดูว่าเครื่องสามารถวัดความหยาบผิวต่ำสุดและสูงสุดเท่าไร ตรงกับช่วงที่เราต้องการหรือไม่
- 2) ความละเอียดของเครื่องมือ ต้องมีความละเอียดถึง 0.01 ไมครอน
- 3) ความแม่นยำ หรือ ความคลาดเคลื่อนควรเกิน 10%
- 4) ขนาดจอแสดงผลต้องพอเหมาะ แสงต้องเพียงพอที่จะอ่านข้อมูลได้ง่าย
- 5) อุณหภูมิการใช้งาน เนื่องจากเครื่องมือเป็นแบบอิเล็กทรอนิกส์ จึงมีช่วงอุณหภูมิที่จะใช้งานได้แม่นยำ ปกติเครื่องวัดจะใช้ได้ดีใน อุณหภูมิ 10 - 45 องศาเซลเซียส
- 6) ขนาด น้ำหนัก รูปร่าง ควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานเพื่อประสิทธิภาพสูงสุด
- 7) ระยะเวลาวัด ขึ้นอยู่กับการใช้งานว่าต้องการใช้ ระยะเวลาว่างหรือแคบเพียงใด
- 8) แหล่งจ่ายไฟที่ใช้ โดยเฉพาะแบบเคลื่อนที่ แบตเตอรี่มีความสำคัญมาก มีทั้งแบบธรรมดาและชาร์จไฟได้ในตัว
- 9) แผ่นสอบเทียบ (Calibration Plate) มีความสำคัญมาก อย่างน้อยต้องมีจำนวนแผ่นเท่ากับความสามารถของเครื่องวัด

## 2.10 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากกระบวนการตัดเฉือนในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ได้มีการศึกษากันอย่างเป็นที่แพร่หลาย โดยการเลือกใช้รูปแบบการตัดเฉือน วัสดุที่ถูกตัดเฉือน และเครื่องมือสำหรับตัดเฉือนที่แตกต่างกันออกไป ในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนทั้งในประเทศและต่างประเทศไว้ดังนี้

Dewesa, R.C., et al. (1999) สหราชอาณาจักร ได้รายงานการศึกษาอุณหภูมิของการบวนการกัดขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความเร็วสูงกับโลหะแข็งจำพวกแม่พิมพ์ โดยใช้เครื่องมือตัดเฉือนแบบหัวบอลทำจากวัสดุ HSM ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร เคลือบผิวด้วย TiCN วัสดุที่ใช้เป็นโลหะเกรด AISI H13 ค่าความแข็งอยู่ที่ 52 HRC วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลเพื่อวัดอุณหภูมิบริเวณจุดสัมผัสของเครื่องมือตัดเฉือนกับชิ้นงาน และกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนเพื่อวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนเศษตัดพบว่า อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นที่ความเร็วตัดเฉือนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อใช้เครื่องมือตัดเฉือนที่สึกหรอ และชิ้นงานทำมุมเอียง 60 องศา

Dinca, C., et al. (2007) ประเทศตุรกี ได้รายงานการศึกษารวบรวมการวิเคราะห์ภาพถ่ายความร้อนที่ได้จากการถ่ายภาพรังสีความร้อนของกระบวนการกลึงโลหะ AISI 1050 พบว่าอุณหภูมิที่จุดสัมผัสระหว่างเครื่องมือตัดเฉือนกับชิ้นงาน (Tool–chip interface) จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการตัดเฉือนและอัตราการป้อนเพิ่มขึ้น

Lincoln, C. B., et al.(2008) ประเทศบราซิล ได้รายงานการศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชิ้นงานประเภท AISI H13 และ AISI D2 ที่มีค่าความแข็ง 52 ถึง 58 HRC ตามลำดับโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด T ผิงเข้าไปในชิ้นงานจำนวน 4 จุดภายใต้พื้นผิวที่ถูกตัดเฉือนลึกลงไป 2 มิลลิเมตร ในกระบวนการตัดเฉือนใช้เครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์หัวบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ที่ถูกเคลือบผิวด้วย (TiAl)N และ PcBN โดยใช้ภาวะการตัดเฉือนแบบแห้ง และระบายความร้อนด้วยอากาศที่มีแรงดันสูง ผลการศึกษาพบว่าชิ้นงานทดสอบที่เป็นวัสดุ AISI H13 ที่ถูกตัดเฉือนด้วยเครื่องมือตัดเฉือนที่เคลือบผิวด้วย (TiAl)N ที่ความเร็วตัด 200 เมตรต่อนาที อัตราการป้อน 0.1 มิลลิเมตรต่อฟัน ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี 0.2 มิลลิเมตร ระยะป้อนลึกในแนวแกน 0.2 มิลลิเมตร ภายใต้ภาวะการตัดเฉือนแบบแห้งเกิดอุณหภูมิตัดเฉือนสูงสุดที่ 48.9 องศาเซลเซียส เมื่อนำผลไปวิเคราะห์เพื่อหาพลังงานที่ใช้ในการตัดเฉือน (Estimations of the energy: Q) และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection coefficient: q) พบว่าวัสดุ AISI H13 ที่ถูกตัดเฉือนด้วยเครื่องมือตัดเฉือนที่เคลือบผิวด้วย (TiAl) มีพลังงานที่ใช้ในการตัดเฉือนสูงสุดที่ 4.5 J และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ 500 W/m<sup>2</sup>.°C นั้นแสดงว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนแปรผันตรงกับพลังงานที่ใช้ในการตัดเฉือน

Zgomiak, P., et al. (2012) ประเทศโปแลนด์ได้รายงานการศึกษาการตรวจสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการกัดโลหะผสมแมกนีเซียม Az91hp ซึ่งอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะถูกตรวจสอบด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้เป็น 295 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วตัดตัดเฉือน 105 เมตรต่อนาที ซึ่งเป็นสภาวะการตัดเฉือนที่ใช้เวลาน้อยที่สุด นำแสดงว่าการตัดเฉือนที่ใช้เวลามากอาจจะไม่ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงสุด

Banyat, P. (2012) ประเทศไทย ได้รายงานการศึกษาหาปัจจัยในการตัดเฉือนชิ้นงานโลหะ S45C ด้วยเครื่องมือตัดเฉือนที่ผ่านกระบวนการลับแล้วที่มีผลต่ออายุการใช้งานของคมตัด โดยปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ความเร็วตัด อัตราการป้อน และการลับคมตัดเฉือนภายใต้สภาวะการตัดเฉือนแบบแห้ง พบว่า การลับคมตัดเฉือน ความเร็วตัด และอัตราการป้อนมีผลต่อความเรียบผิวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการลับคมตัดแต่ละครั้งจะส่งผลต่ออายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเฉือนกับความเรียบผิว

Carlos, H. L., et al. (2013) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้รายงานการศึกษาการตรวจสอบอุณหภูมิของกระบวนการกัดขึ้นรูปด้วยการใช้กล้องอินฟราเรด โดยใช้วัสดุอลูมิเนียมเกรด 7050 ถูกทำให้มีขนาด 100 x 38 x 8 มิลลิเมตร ร่วมกับเครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์ 3 คมตัด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร วิธีการตัดเฉือนจะทำการตัดเฉือนแบบด้านข้างตามแนวระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ชิ้นงานทำถูกทำให้มีความหนาเหลือไว้ 2 มิลลิเมตร เพื่อสำหรับการวัดอุณหภูมิจากการตัดเฉือน โดยการตัดเฉือนครั้งแรกกำหนดให้ระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเป็น 6 มิลลิเมตร แล้วการตัดเฉือนครั้งที่ 2 จะทำการตัดเฉือนส่วนที่เหลือออกไป ด้วยรูปแบบทางเดินมีดกัดแบบทิศทางเดียว สำหรับพารามิเตอร์การตัดเฉือนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ กำหนด อัตราการป้อนต่อฟัน 0.1 และ 0.25 มิลลิเมตรต่อรอบ ความเร็วตัด 314 ถึง 628 เมตรต่อนาที ระยะป้อนลึกในแนวแกน 15 มิลลิเมตร เครื่องมือวัดอุณหภูมิ FLIR ถูกติดตั้งที่ระยะห่าง 840 มิลลิเมตรนับจากแหล่งความร้อน การถ่ายภาพความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ระยะคือ จุดเริ่มตัด จุดกึ่งกลาง และจุดสิ้นสุด พบว่าจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดคือจุดที่เครื่องมือตัดเฉือนทำการตัดเฉือนมายังจุดสิ้นสุดของกระบวนการซึ่งอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในกระบวนการที่กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนตรวจวัดได้มีค่าที่ 140.5 องศาเซลเซียสที่ระยะป้อนลึกในแนวแกน 6 มิลลิเมตร ความเร็วตัด 314 เมตรต่อนาที อัตราการป้อนต่อฟัน 0.1 มิลลิเมตรต่อรอบ ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี อัตราป้อน และทิศทางกัด นอกจากนี้การใช้กล้องอินฟราเรดในระหว่างกระบวนการกัดมีความยืดหยุ่น และง่ายต่อการเก็บข้อมูล

Paramet, B., et al. (2013) ประเทศไทย ได้รายงานการศึกษาการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพ ในอุตสาหกรรมการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ด้วยการออกแบบการทดลอง โดยใช้วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง (Response Surface Methodology) ใช้หาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยในการตัดเนื้อที่แปรเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเนื้อ ในกระบวนการกัดขึ้นรูปแม่พิมพ์ วัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กแม่พิมพ์ AISI P20 มีค่าความแข็ง 30 HRC ออกแบบให้มีการตัดเนื้อหลายพื้นผิว เครื่องมือตัดเนื้อใช้เครื่องมือตัดเนื้อไฮสปีดเอ็นมิลแบบหัวบอล (HSS Co 8%) เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ความเร็วรอบ 2500 และ 3500 รอบต่อนาที อัตราการป้อน 1200 และ 1800 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะป้อนลึกในแนวแกน 0.1 และ 0.2 และระยะป้อนลึกในแนวรัศมี 0.1 และ 0.2 มิลลิเมตร การออกแบบการทดลองแบบ  $2^4$  แฟกทอเรียล ถูกใช้ในการศึกษา พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหยาบผิวมากที่สุดคือ อัตราการป้อน

Takeshi, Y., et al. (2013) ประเทศญี่ปุ่น ได้รายงานการศึกษาการวัดอุณหภูมิของเครื่องมือตัดเนื้อและอุณหภูมิพื้นผิวสำหรับกระบวนการกัดขึ้นงานที่ทำจากวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์พลาสติก (CFRP) ขั้นตอนการวัดอุณหภูมิในกระบวนการกัดของ CFRP สามารถแบ่งการวัดอุณหภูมิออกได้เป็นสามกลุ่มคือ อุณหภูมิที่จุดตัด วัดอุณหภูมิโดยใช้วิธี Tool-work piece thermocouple คือการทำให้เครื่องมือตัดเนื้อและชิ้นงานเป็นเทอร์โมคัปเปิลโดยอาศัยหลักการของ Seebeck อุณหภูมิพื้นผิวของเครื่องมือตัดเนื้อเอ็นมิลล์ วัดอุณหภูมิโดยใช้กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน อุณหภูมิชิ้นผิวของชิ้นงานที่ถูกกัด วัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิลฝังเข้าไปในชิ้นผิว ผลการศึกษาพบว่า การวัดอุณหภูมิด้วยถ่ายภาพรังสีความร้อน จะได้รับผลกระทบจากการกระจายของเศษกัด และการวัดอุณหภูมิตัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลจะได้ค่าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว

Abdil, K., et al. (2015) ประเทศตุรกี ได้รายงานการศึกษาเกี่ยวกับการใช้เทอร์โมคัปเปิลและอินฟราเรดเซนเซอร์ สำหรับวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิในกระบวนการตัดเนื้อโลหะ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K และถ่ายภาพรังสีความร้อน (IR) ถูกนำมาใช้ในการทดลอง การทดลองดำเนินการในเครื่องกลึงใช้เครื่องมือตัดเนื้อแบบเล็บเหยี่ยวที่เคลือบผิวด้วย TiAlN-TiN สภาวะการตัดเนื้อเป็นแบบแห้ง วัสดุทดสอบเป็นอลูมิเนียมเกรด 4010 ที่มีความแข็ง 50 HRC วิเคราะห์ผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเร็วในการตัด, อัตราการป้อน, ความลึกการตัด มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเครื่องมือตัดเนื้อ ความเร็วในการตัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มของอุณหภูมิมากที่สุด



Ali M., et al. (2016) ประเทศตุรกี ได้รายงานการศึกษาการวิเคราะห์ความร้อนสำหรับกระบวนการกัดขนาดเล็กกับไทเทเนียมอัลลอยด์ (Ti-6AL-4V) โดยเครื่องมือตัดเฉือนทั้งสแตนคาร์ไบด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 800 ไมโครเมตร 2 คมตัด การดำเนินงานร่วมกับเครื่องกัด CNC แบบ 5 แกน แรงที่เกิดขึ้นจะถูกวัดด้วยไดนาโมมิเตอร์ และอุณหภูมิจะถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 130 ไมโครเมตร ที่เวลาตอบสนอง 0.15 วินาที เทอร์โมคัปเปิลจะถูกดำเนินการในชิ้นงานที่จุดทางออกของเครื่องมือตัดเฉือนจำนวน 2 จุด โดย T1 จะมีตำแหน่งการวางตัวตามแนวแกน Z ตั้งฉากกับเครื่องมือตัดเฉือน เมื่อเครื่องมือตัดเฉือนเคลื่อนที่ผ่านจะอยู่ที่กึ่งกลางพอดีซึ่งมีระยะห่างจากคมตัดเป็น 25 ไมโครเมตร และ T2 จะวางตัวตั้งฉากกับปลายของคมตัด ขนานกับแกน Y มีระยะห่างจากคมตัดเป็น 15 ไมโครเมตร สารนำความร้อน (Thermal Compound MX-2) ถูกใช้เพื่อลดการสูญเสียอุณหภูมิ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการตัดเฉือน ความเร็วรอบ 10000 รอบต่อนาที ความเร็วตัดเฉือนที่ 25.1 เมตรต่อนาที ระยะป้อนลึกในแนวแกน 100 ถึง 150 ไมโครเมตร อัตราการป้อนต่อฟัน 5 ถึง 15 ไมโครเมตร รูปแบบการตัดเฉือนเป็นแบบร่องลิ้ม การทดลองแบ่งออกเป็น 6 กรณี ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง T2 ที่ 79.5 องศาเซลเซียส เมื่อนำผลไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองพบที่เกิดข้อผิดพลาดไม่เกิน 12%



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

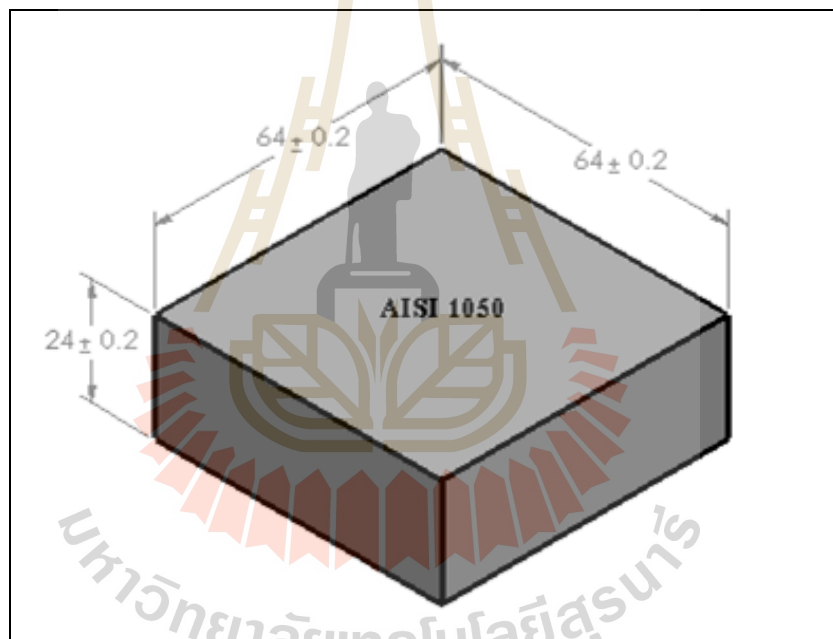
จากปรัศวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 ได้นำมาสู่วิธีการดำเนินงานสำหรับการศึกษาอนุกรมจากการตัดเฉือนในกระบวนการกัดโลหะ ซึ่งรายละเอียดวิธีการดำเนินงานวิจัยได้แสดงดังต่อไปนี้

- 3.1 วัสดุ (Materials)
- 3.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์
- 3.3 การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการกัดโลหะ
- 3.4 การกำหนดปัจจัยการทดลอง
- 3.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $2^3$  แฟกทอเรียล 2 ชั้น
- 3.6 การกำหนดรูปแบบการตัดเฉือน (Tool path operation)
- 3.7 การกำหนดวิธีการวัดอนุกรม
- 3.8 การกำหนดพื้นที่สำหรับวัดค่าความหยาบผิว
- 3.9 การกำหนดรูปแบบการวัดค่าการสึกหรอ
- 3.10 ขั้นตอนการทดลอง
- 3.11 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 3.1 วัสดุ (Materials)

#### 3.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050

เหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 จัดเป็นกลุ่มเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางที่นิยมใช้ในงานผลิตชิ้นส่วนพื้นฐาน งานโครงสร้าง งานอุปกรณ์การเกษตร งานเครื่องจักรกล งานแม่พิมพ์ชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ เป็นต้น โดยทั่วไปเหล็กกล้าคาร์บอน เกรด AISI 1050 ที่มีคุณสมบัติที่ดีในหลายด้านเช่น ด้านความแข็งแรงที่มีค่าความแข็งอยู่ที่ 235 HB ความเหนียวแกร่ง และที่สำคัญมีราคาถูก ในการศึกษาวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนเกรด AISI 1050 จะถูกตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Spark Emission Spectrometer ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และถูกทำให้มีขนาดกว้าง 64 มิลลิเมตร ยาว 64 มิลลิเมตร และหนา 24 มิลลิเมตรสำหรับการศึกษา



รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานทดสอบ AISI 1050

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานทดสอบ AISI 1050

องค์ประกอบทางเคมี	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%Wt.)	0.5320	0.2630	0.7770	0.0187	0.0017	0.0947	Bal.

## 3.2 เครื่องจักรและอุปกรณ์

### 3.2.1 เครื่องกัดอัตโนมัติหรือเครื่องกัด CNC (Vertical Machining Center)

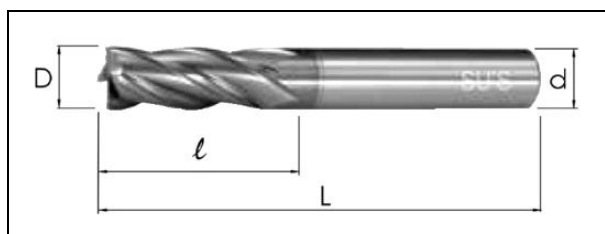
เครื่องกัด CNC ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ยี่ห้อ BRIDGEPORT รุ่น VMC 500-16 ที่มีชุดควบคุม (Controller) โดยสามารถทำงานได้แบบ 3 แกนคือ แกน X แกน Y และแกน Z



รูปที่ 3.2 เครื่องกัดอัตโนมัติยี่ห้อ BRIDGEPORT รุ่น VMC 500-16

### 3.2.2 เครื่องมือตัดเฉือน (Cutting Tool)

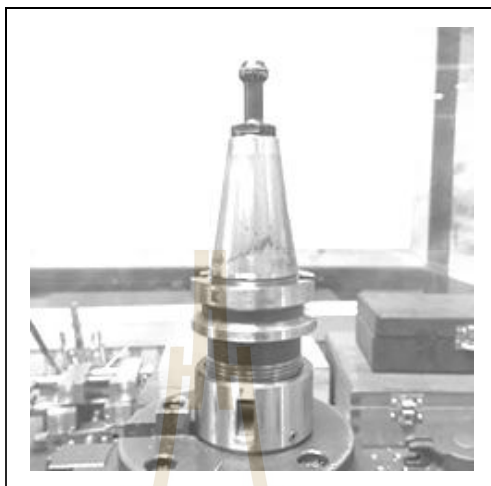
เครื่องมือตัดเฉือนที่ใช้ในการศึกษาเป็นแบบเอ็นมิลล์ (End Mill) 4 คมตัด ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไฮสปีดที่มีส่วนผสมของ Co 8% (HSE) และผ่านการเคลือบผิวด้วยไทเทเนียม คาร์ไบด์ (TiCN) เส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 10 มิลลิเมตร ความยาวคมตัด (l) 25 มิลลิเมตร ความโตค้ำจับ (d) 10 มิลลิเมตร ความยาวทั้งหมด (L) 75 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.3 เครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์ HSE End Mill 4 Flutes + TiCN

### 3.2.3 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือตัดเฉือน (Spindle Taper)

อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือตัดเฉือนแบบ BT 40 มาพร้อมก๊ับชุด COLLET ER 32



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือตัดเฉือนแบบ BT 40

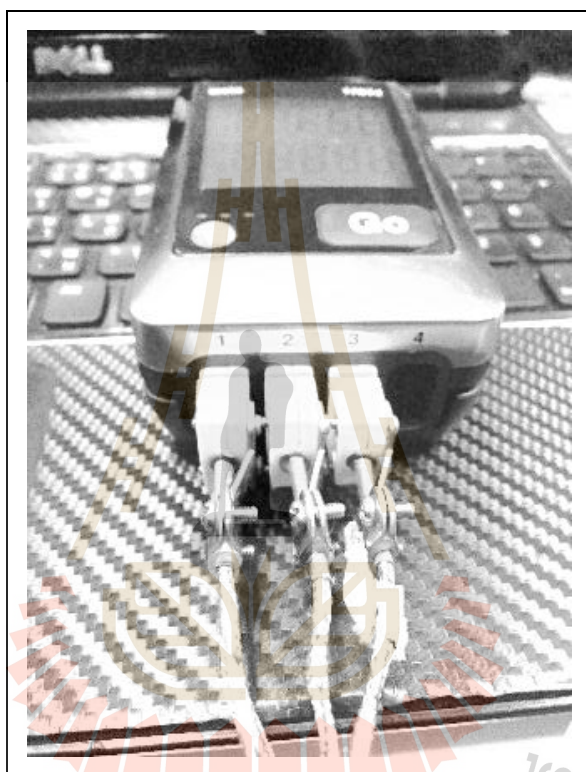
### 3.2.4 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermometer)

1) เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบชนิด K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร หัวป้องกันทำจากวัสดุ Inconel 600 ยาว 30 มิลลิเมตร หัวต่อสัญญาณส่งออกแบบ Miniature Small Male



รูปที่ 3.5 เทอร์โมคัปเปิลชนิด K

2) เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ (Data logger Temperature) เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ ใช้ร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ผลิตโดย TESTO รุ่น 176 T4 สำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -195 ถึง +1000 °C ค่าความถูกต้อง  $\pm 0.3$  °C (-100 ถึง +70°C) ค่าความละเอียด 0.1°C ความสามารถในการบันทึกข้อมูลในเครื่อง 2,000,000 ข้อมูล ความถี่ในการบันทึกข้อมูล ทุกๆ 1 วินาที ถึง 24 ชั่วโมง



รูปที่ 3.6 เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ TESTO 176 T4

3) กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน (Thermal Imaging Infrared Camera: IR) ยี่ห้อ FLIR รุ่น E50 ความละเอียด 240 x 180 Pixels ความแม่นยำ  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  or  $\pm 2\%$  of reading ฟังก์ชัน MSX® Thermal Image Enhancement Auto hot/cold spot ค่าขอบเขตการมองเห็น  $25^{\circ} \times 19^{\circ}$  ช่วงการวัดอุณหภูมิ -20 ถึง +650°C



รูปที่ 3.7 กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50

### 3.2.5 สารนำความร้อน (Thermal Compound)

สารนำความร้อน รุ่น HTK-002-U1 ใช้สำหรับลดช่องว่างในรูเจาะ มีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)  $0.8 \text{ W/cm}\cdot^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 3.8 สารนำความร้อน รุ่น HTK-002-U1

### 3.2.6 เครื่องวัดความหยาบผิว (Surface roughness tester)

เครื่องวัดความหยาบผิวชิ้นงานแบบพกพา ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น Surfrest SJ-210



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดความหยาบผิว ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น Surfrest SJ-210

### 3.2.7 เครื่องมือวิเคราะห์และประมวลภาพถ่าย (Optical Microscope)

กล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD-Motorized ใช้เพื่อตรวจสอบการสึกหรอที่เกิดขึ้นบนคมตัดของเครื่องมือตัดเฉือนที่กำลังขยาย 5 เท่า



รูปที่ 3.10 กล้องจุลทรรศน์แบบแสงยี่ห้อ Olympus รุ่น BX51M-BD-Motorized



### 3.2.8 เครื่องมือเจาะ (Drilling Tool)

เครื่องมือเจาะเป็นแบบดอกสว่านที่ทำจากวัสดุเหล็กไฮสปีด ยี่ห้อ NACHI ความยาวทั้งหมด 50 มิลลิเมตร ความยาวคมตัด 25 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.7 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.11 เครื่องมือเจาะ (Drilling Tool)

### 3.2.9 เครื่องมือกำหนดขอบชิ้นงาน (Optical Edge Finder)

เครื่องมือกำหนดขอบชิ้นงานเป็นแบบหัวบอลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เมื่อเคลื่อนที่สัมผัสกับชิ้นงานจะส่งเสียงและแสงในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 3.12 เครื่องมือกำหนดขอบชิ้นงาน (Optical Edge Finder)

### 3.3 การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการกัดโลหะ

การศึกษาค้นคว้าหาค่าพารามิเตอร์การตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโลหะ ในการทดลอง พารามิเตอร์การตัดเฉือนได้กำหนดจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดเฉือน และชิ้นงานทดสอบ ที่ได้แนะนำสำหรับเครื่องมือตัดเฉือนแบบไฮสปีดเอ็นเอ็มแอล 4 คมตัด ที่ถูกเคลือบผิวด้วยไทเทเนียม-คาร์ไบด์-ไนไตร ที่ต้องการตัดเฉือนวัสดุเหล็กเกรด AISI 1050 ได้แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์การตัดเฉือนจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือตัดและชิ้นงานทดสอบ (บริษัท ไทย-เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด.)

พารามิเตอร์	ขนาด	หน่วย
ความเร็วตัดเฉือน (Vc)	25-40	mm/min
อัตราการป้อน (F)	20-60	mm/min
ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae)	2.5-5	mm
ระยะป้อนลึกในแนวแกน (Ap)	10	mm

### 3.4 การกำหนดปัจจัยการทดลอง

การกำหนดปัจจัยสำหรับการทดลอง จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาคาดว่าปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากตัดเฉือนมีทั้งหมด 3 ปัจจัย ประกอบด้วยความเร็วรอบ (Spindle Speed) อัตราการป้อน (Feed Rate) และระยะป้อนในแนวรัศมี (Radial Depth of Cut) แต่ละปัจจัยจะมี 2 ระดับ โดยกำหนดให้ระดับสูงใช้สัญลักษณ์เป็น (+) และระดับต่ำใช้สัญลักษณ์เป็น (-) ภายใต้ภาวะการตัดเฉือนแบบแห้ง (Dry cutting condition) ซึ่งระยะป้อนในแนวแกน (Radial Depth of Cut) ถูกกำหนดให้เป็น 10 มิลลิเมตร คงที่ตลอดการทดลอง พารามิเตอร์การตัดเฉือนที่ใช้ในการทดลองถูกกำหนดตามตารางที่ 3.2 หลังจากเปลี่ยนค่าความเร็วตัดเฉือนให้อยู่ในรูปแบบความเร็วรอบ (Spindle Speed) จะมีค่าเท่ากับ 800 และ 1270 รอบต่อนาที ดังปรากฏในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์การตัดเฉือนที่ใช้ในการทดลอง

Factor	Symbol	Level		Unit
		Low ( - )	High ( + )	
Spindle Speed	S	800	1270	rpm
Feed Rate	F	20	60	mm/min
Radial Depth of Cut	Ae	2.5	5	mm
Axial Depth of Cut	Ap	10		mm

ตารางที่ 3.4 ผลการออกแบบการทดลอง  $2^3$  แฟกทอเรียล 2 ซ้ำ ด้วยโปรแกรม Minitab

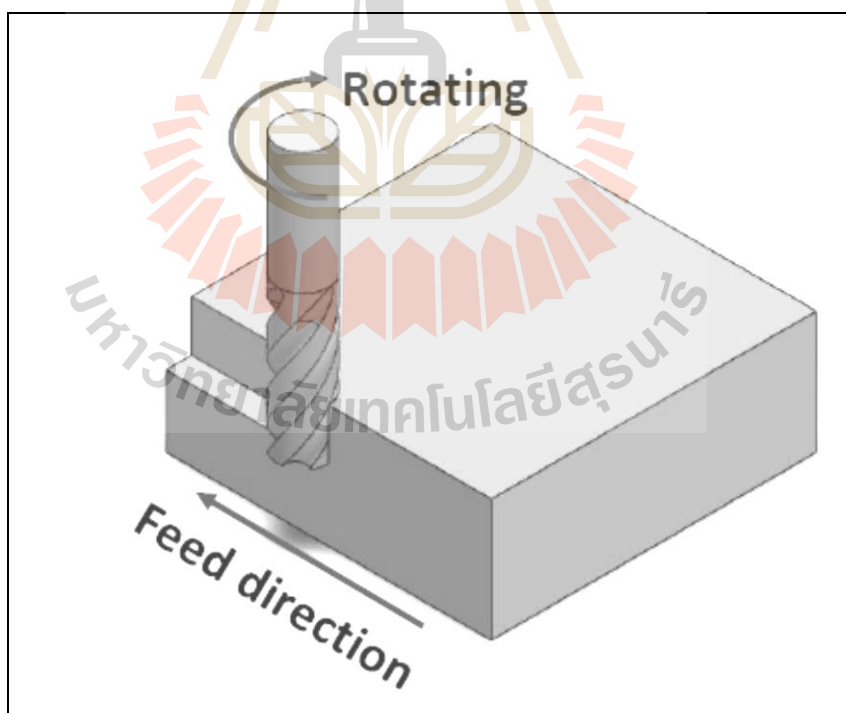
Full Factorial Design					
StdOrder	RunOrder	S	F	Ae	Ap
1	1	800	20	2.5	10
2	2	1270	20	2.5	10
3	3	800	60	2.5	10
4	4	1270	60	2.5	10
5	5	800	20	5	10
6	6	1270	20	5	10
7	7	800	60	5	10
8	8	1270	60	5	10
9	9	800	20	2.5	10
10	10	1270	20	2.5	10
11	11	800	60	2.5	10
12	12	1270	60	2.5	10
13	13	800	20	5	10
14	14	1270	20	5	10
15	15	800	60	5	10
16	16	1270	60	5	10

### 3.5 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล $2^3$ แฟกทอเรียล 2 ชั้น

การทดลองจะเกิดขึ้นทั้งหมด 16 การทดลอง ในแต่ละการทดลองจะใช้ชิ้นงานทดสอบ AISI 1050 และเครื่องมือตัดเฉือนแบบเอ็นมิลล์ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน และผลตอบสนองที่ได้จากการทดลองประกอบด้วย 1) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทดสอบ 2) อุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน 3) ระยะการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน และ 4) ความหยาบผิวชิ้นงาน โดยผลการออกแบบการทดลองด้วยโปรแกรม Minitab ได้แสดงในตารางที่ 3.4

### 3.6 การกำหนดรูปแบบการตัดเฉือน (Tool path operation)

ในการศึกษาการเลือกใช้รูปแบบการตัดเฉือนจะมีลักษณะการตัดเฉือนเป็นแบบงานกัดทวน โดยทิศทางการหมุนของเครื่องมือตัดจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของชิ้นงานได้แสดงในรูปที่ 3.13 โดยกำหนดพิกัดเริ่มต้นของกระบวนการตัดเฉือนที่พิกัด  $X = -5$ ,  $Y = \text{Radial depth of cut}$  และ  $Z = -10$  และสิ้นสุดกระบวนการตัดเฉือนที่พิกัด  $X = 69$ ,  $Y = \text{Radial depth of cut}$  และ  $Z = -10$  ตามระบบระบบแกนเครื่องกัด CNC

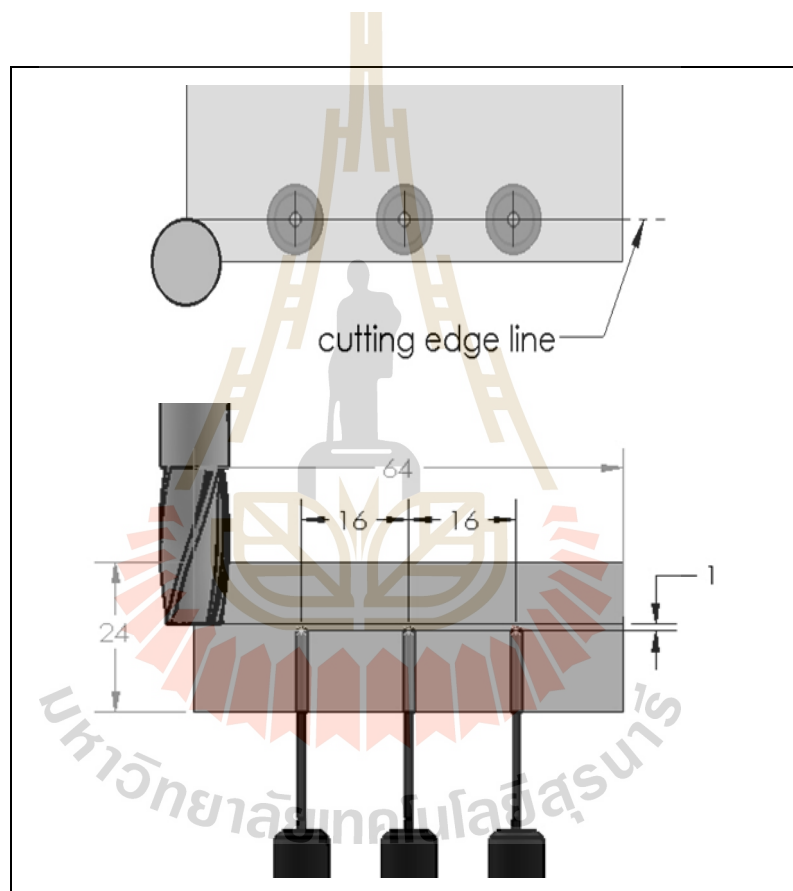


รูปที่ 3.13 ลักษณะการตัดเฉือนเป็นแบบงานกัดทวน (Climb Milling)

### 3.7 การกำหนดวิธีการวัดอุณหภูมิ

#### 3.7.1 การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน (Workpiece Temperature)

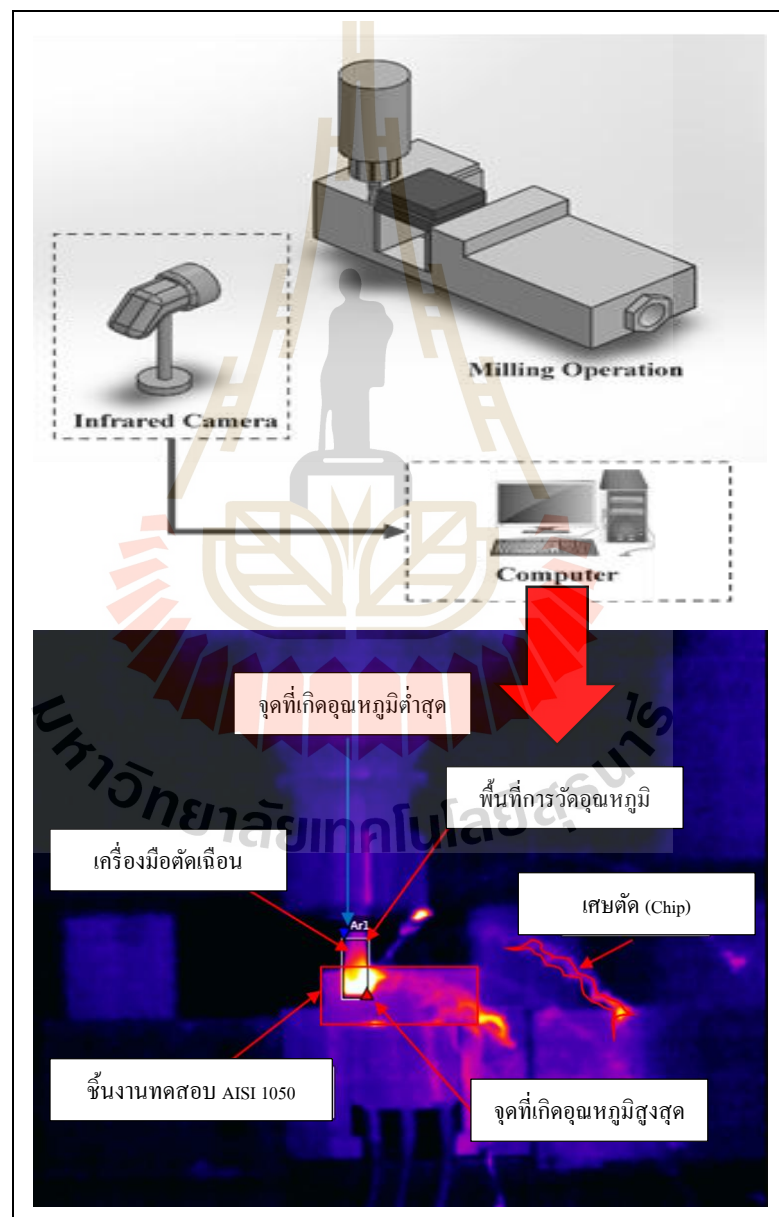
การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานจะถูกวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่ถูกฝังเข้าไปภายใต้พื้นผิวชิ้นงานที่ถูกตัดเฉือนที่ระยะห่าง 1 มิลลิเมตร ทั้งหมด 3 จุดวัด ซึ่งวางตัวขนานกับเครื่องมือตัดเฉือน ซึ่งจุดศูนย์กลางของเทอร์โมคัปเปิลจะอยู่ในแนวเดียวกันกับคมตัดของเครื่องมือตัดเฉือน และระยะการวางตัวในแนวแกน X ของเทอร์โมคัปเปิลมีระยะห่างเป็น 16 มิลลิเมตร เมื่อวัดจากจุดศูนย์กลางของเทอร์โมคัปเปิลถึงเทอร์โมคัปเปิลอีกตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แนวการวางตัวของเทอร์โมคัปเปิลในชิ้นงาน

### 3.7.2 การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน (End mill Surface Temperature)

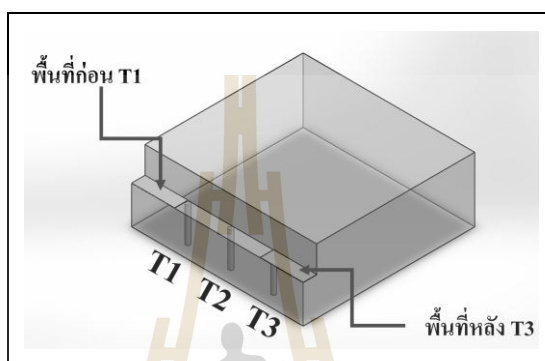
กล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนถูกนำมาใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน โดยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนจะถูกกำหนดให้บันทึกภาพแบบต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการตัดเฉือนจนถึงสิ้นสุดกระบวนการ โดยกำหนดพื้นที่การวัดอุณหภูมิให้มีขนาดเป็น กว้าง 10 มิลลิเมตร สูง 24 มิลลิเมตร ด้วยโปรแกรม FLIR Tool+



รูปที่ 3.15 ลักษณะการวัดอุณหภูมิด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน

### 3.8 การกำหนดพื้นที่สำหรับวัดค่าความหยาบผิว

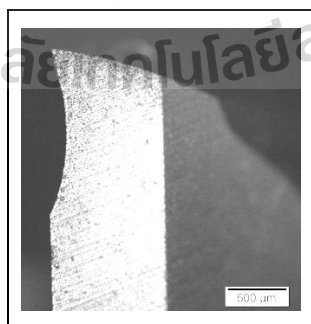
การวัดค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะถูกดำเนินการด้วยมือวัดความหยาบผิว โดยกำหนดพื้นที่สำหรับวัดค่าความหยาบผิวจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือบริเวณพื้นผิวก่อนจุดวัดอุณหภูมิที่ 1 (T1) และบริเวณพื้นผิวหลังจุดวัดอุณหภูมิที่ 3 (T3) ซึ่งในแต่ละบริเวณจะถูกวัดค่าความหยาบผิว 5 ครั้ง และนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 3.16 แสดงบริเวณที่ถูกวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ

### 3.9 การกำหนดรูปแบบการวัดค่าการสึกหรอ

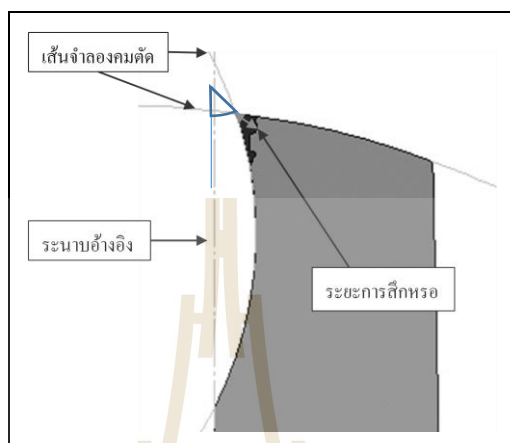
การวัดค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ สามารถตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง เครื่องมือตัดเฉือนที่ใช้ในการศึกษาจะมีลักษณะปลายคมตัดโค้ง



รูปที่ 3.17 ลักษณะคมตัดของเครื่องมือตัดเฉือนแบบ End Mill 4 F HSE TiCN Coated

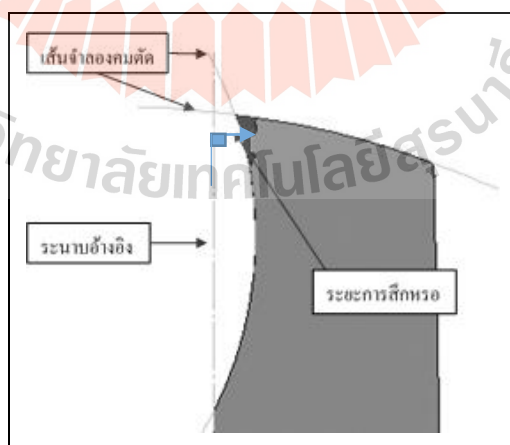
การพิจารณาการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะดังต่อไปนี้

1) แบบ Ref. Point คือการวัดระยะการสึกหรอจากเส้นจำลองคมตัดทำมุม  $45^\circ$  เข้าไปหาจุดที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด



รูปที่ 3.18 การวัดค่าการสึกหรอแบบ Ref. Point

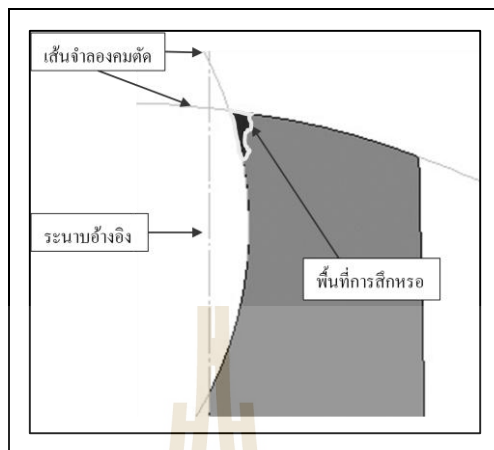
2) แบบ Ref. Plane คือการวัดระยะการสึกหรอจากเส้นระนาบอ้างอิงเข้าไปหาจุดที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด



รูปที่ 3.19 การวัดค่าการสึกหรอแบบ Ref. Plane



3) แบบ Area คือการวัดขนาดการสึกหรอในรูปแบบการวัดพื้นที่ที่เกิดการสึกหรอ

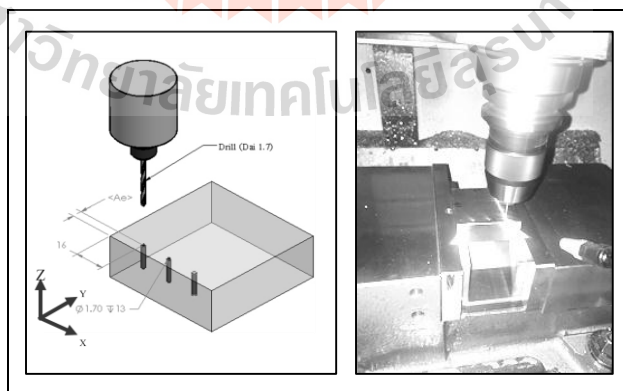


รูปที่ 3.20 การวัดค่าการสึกหรอแบบ Area

### 3.10 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.10.1 ขั้นตอนการเจาะรูชิ้นงาน

ชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 16 ชิ้น จะถูกดำเนินการเจาะรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.7 มิลลิเมตร เจาะลึก 13 มิลลิเมตร จำนวน 3 รูเจาะ ระยะห่างของรูเจาะตามแนวแกน X เจาะทุกๆ 16 มิลลิเมตร และตามแนวแกน Y จะขึ้นอยู่กับระยะการป้อนลิ้นในแนวรัศมี



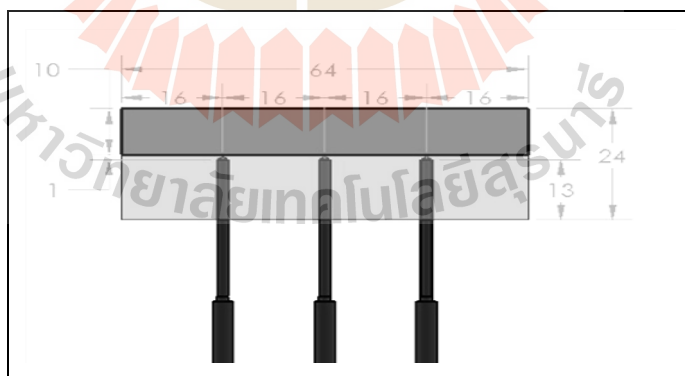
รูปที่ 3.21 ลักษณะการเจาะรูชิ้นงาน

### 3.10.2 ขั้นตอนการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

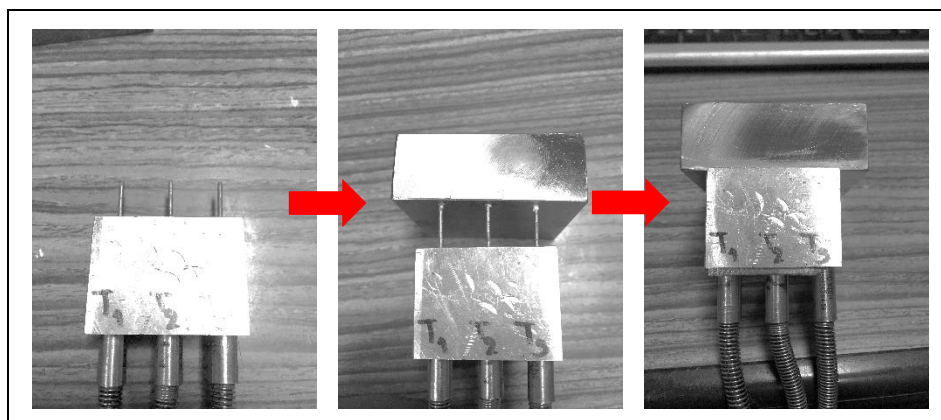
การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เข้าไปในรูเจาะที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ เริ่มต้นด้วยการฉีดสารนำความร้อน HTK-002-U1 เข้าไปในรูเจาะทั้ง 3 รูเจาะจนเต็ม เพื่อปิดช่องอากาศที่จะเกิดขึ้นหลังจากฝังเทอร์โมคัปเปิล หลังจากนั้นนำเทอร์โมคัปเปิลจับยึดด้วยฟิกเจอร์ (Fixture) ที่ถูกทำขึ้นมาเฉพาะใช้ในการศึกษานี้ และเสียบเข้าไปในรูเจาะพร้อมๆกัน



รูปที่ 3.22 ลักษณะการฉีดสารนำความร้อน HTK-002-U1 เข้าไปในชิ้นงาน



รูปที่ 3.23 การวางตัวของเทอร์โมคัปเปิลในชิ้นงาน

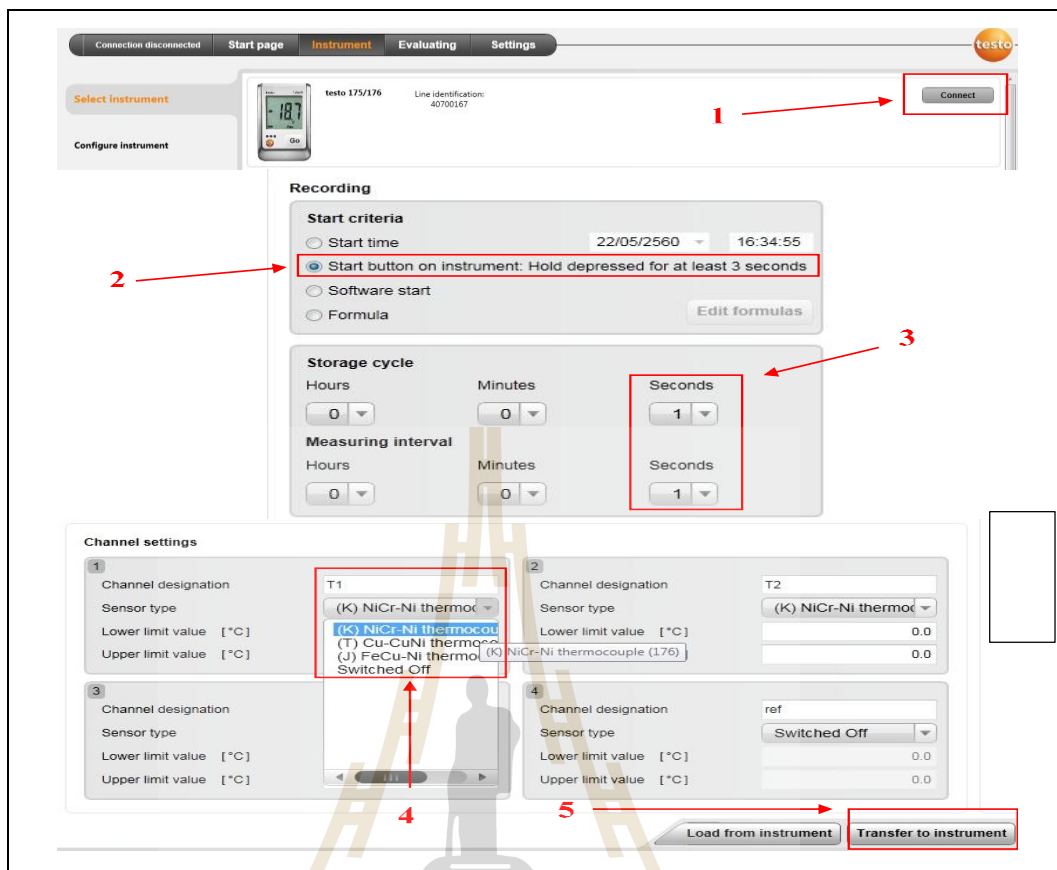


รูปที่ 3.24 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปในชิ้นงาน

### 3.10.3 ขั้นตอนการตั้งค่าเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ

หลังจากที่เทอร์โมคัปเปิลได้ติดตั้งกับชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการเชื่อมต่อเทอร์โมคัปเปิลกับเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ TESTO 176 T4 และตั้งค่าการทำงานของเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิด้วยการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ การตั้งค่าเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิจะต้องดำเนินการผ่านโปรแกรม TESTO Comfort Software Basic 5.0 สามารถทำได้ต่อไปนี้

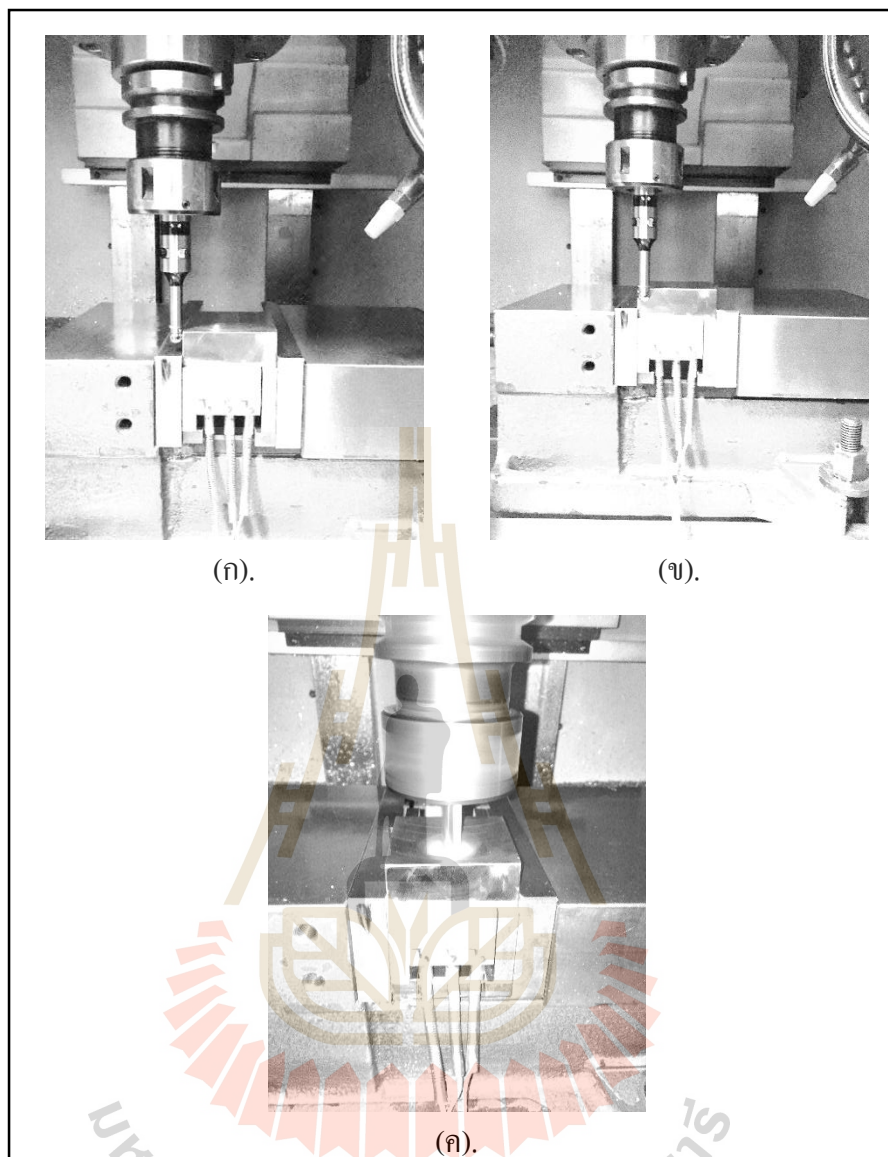
- 1) เชื่อมต่อเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ TESTO 176 T4 กับคอมพิวเตอร์
- 2) กำหนดการเริ่มต้นบันทึกค่าอุณหภูมิจะเริ่มบันทึกก็ต่อเมื่อกดปุ่ม Go บนตัวเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิไว้นาน 3 วินาที
- 3) กำหนดช่วงความถี่การบันทึกข้อมูลอยู่ที่ 1 ข้อมูลต่อ 1 วินาที
- 4) กำหนดชนิดเทอร์โมคัปเปิลโดยกำหนดช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ในช่วง 0 ถึง 1000 องศาเซลเซียส สำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K
- 5) ทำการส่งผ่านข้อมูลไปยังเครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ TESTO 176 T4



รูปที่ 3.25 การตั้งค่าโปรแกรมสำหรับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ TESTO 176 T4

### 3.10.4 ขั้นตอนการติดตั้งชิ้นงานเพื่อดำเนินการตัดเฉือน

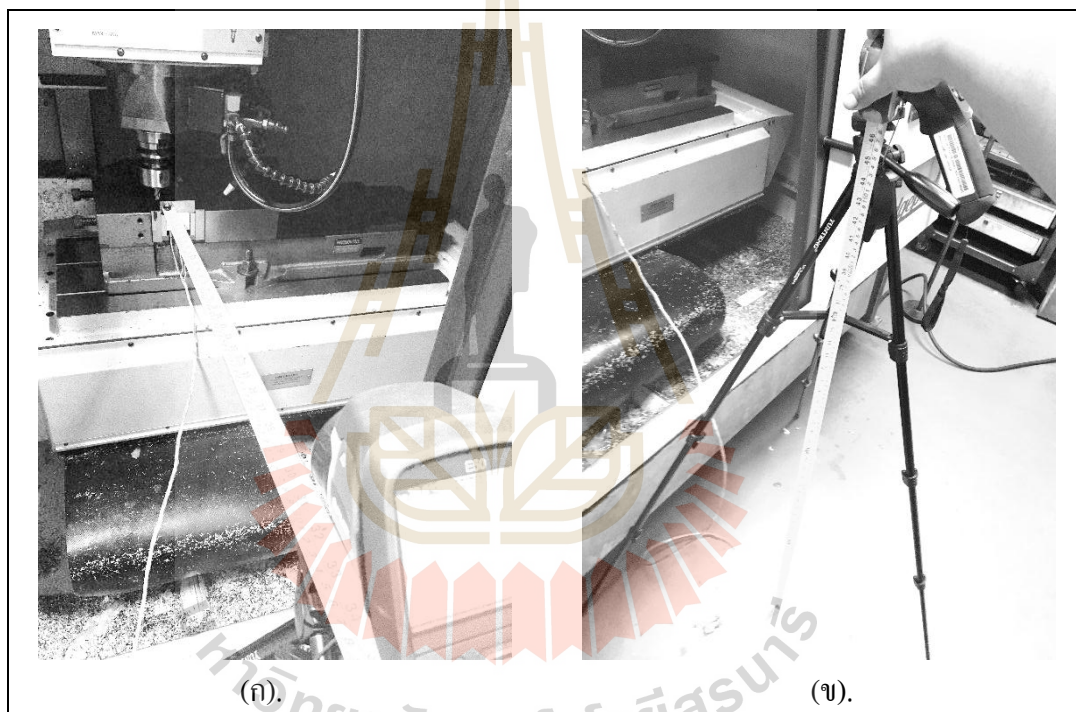
ชิ้นงานทดสอบ AISI 1050 ที่ถูกดำเนินการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแล้ว จะถูกจับยึดด้วยปากกาจับชิ้นงาน และทำการกำหนดจุดเริ่มต้นให้กับเครื่องมือตัดเฉือน สำหรับแกน X และแกน Y จะใช้เกจหาขอบชิ้นงาน (Optical Edge Finder) แบบหัวบอลเมื่อแตะกับชิ้นงานจะส่งเสียงและมีแสงไฟ สำหรับแกน Z จะใช้เครื่องมือตัดเฉือนเอ็นมิลล์เคลื่อนที่เข้าไปแตะกระดาษที่ติดอยู่บนชิ้นงานทดสอบซึ่งมีความหนาน้อยกว่า 0.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.26 ลักษณะวิธีการกำหนดขอบชิ้นงาน (ก).แกน X (ข).แกน Y (ค).แกน Z

### 3.10.5 ขั้นตอนการติดตั้งกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน

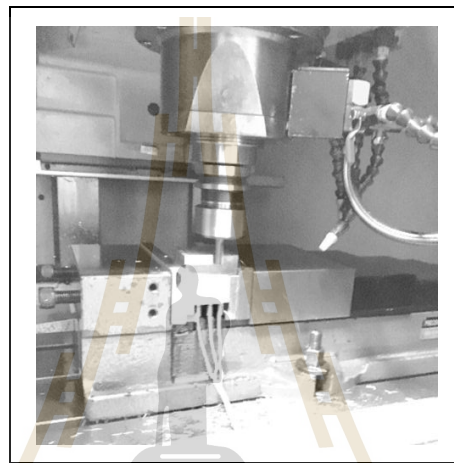
กล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50 จะถูกติดตั้งไว้ด้านหน้าของเครื่องกัด CNC โดยมีระยะห่างจากชิ้นงานทดสอบประมาณ 800 มิลลิเมตร และมีความสูงจากพื้นประมาณ 1200 มิลลิเมตร การตั้งค่าการทำงานของกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อนในการศึกษานี้จะต้องกำหนดการทำงานผ่านโปรแกรม FLIR Tool+ ซึ่งช่วงการวัดอุณหภูมิถูกกำหนดไว้ที่ 0 ถึง 650 องศาเซลเซียส ที่ความถี่ในการบันทึกข้อมูล 60 ภาพต่อวินาที (fps) และการบันทึกภาพเป็นแบบ Live stream



รูปที่ 3.27 ระยะการวางตัวของกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50 (ก).ระยะห่างจากชิ้นงาน (ข).ระยะความสูงจากพื้น

### 3.10.6 ขั้นตอนการตัดเฉือนชิ้นงาน

กระบวนการตัดเฉือนจะเริ่มขึ้นหลังจากติดตั้งเครื่องมือวัดเสร็จสิ้น อุณหภูมิห้องถูกควบคุมด้วยระบบปรับอากาศที่ 25 องศาเซลเซียส Code สำหรับเครื่องกัด CNC ถูกอัปโหลดลงตัวควบคุม ปุ่ม Cycle start ถูกกดเพื่อดำเนินการตัดเฉือน เครื่องบันทึกค่าอุณหภูมิ TESTO 176 T4 และกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน FLIR E50 เริ่มบันทึกอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือน การทดลองทั้งหมด 16 การทดลองจะถูกทำตามขั้นตอน 3.10.1 ถึง 3.10.6



รูปที่ 3.28 ลักษณะกระบวนการกัดโลหะเพื่อศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือน



รูปที่ 3.29 องค์ประกอบโดยรวมของกระบวนการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือน

### 3.11 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล  $2^3$  แฟกทอเรียล จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab รุ่น 16 เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิจากการตัดเฉือน การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน และความหยาบผิวชิ้นงาน ในกระบวนการตัดเฉือนโลหะ ที่ระดับนัยสำคัญ 95%





## บทที่ 4

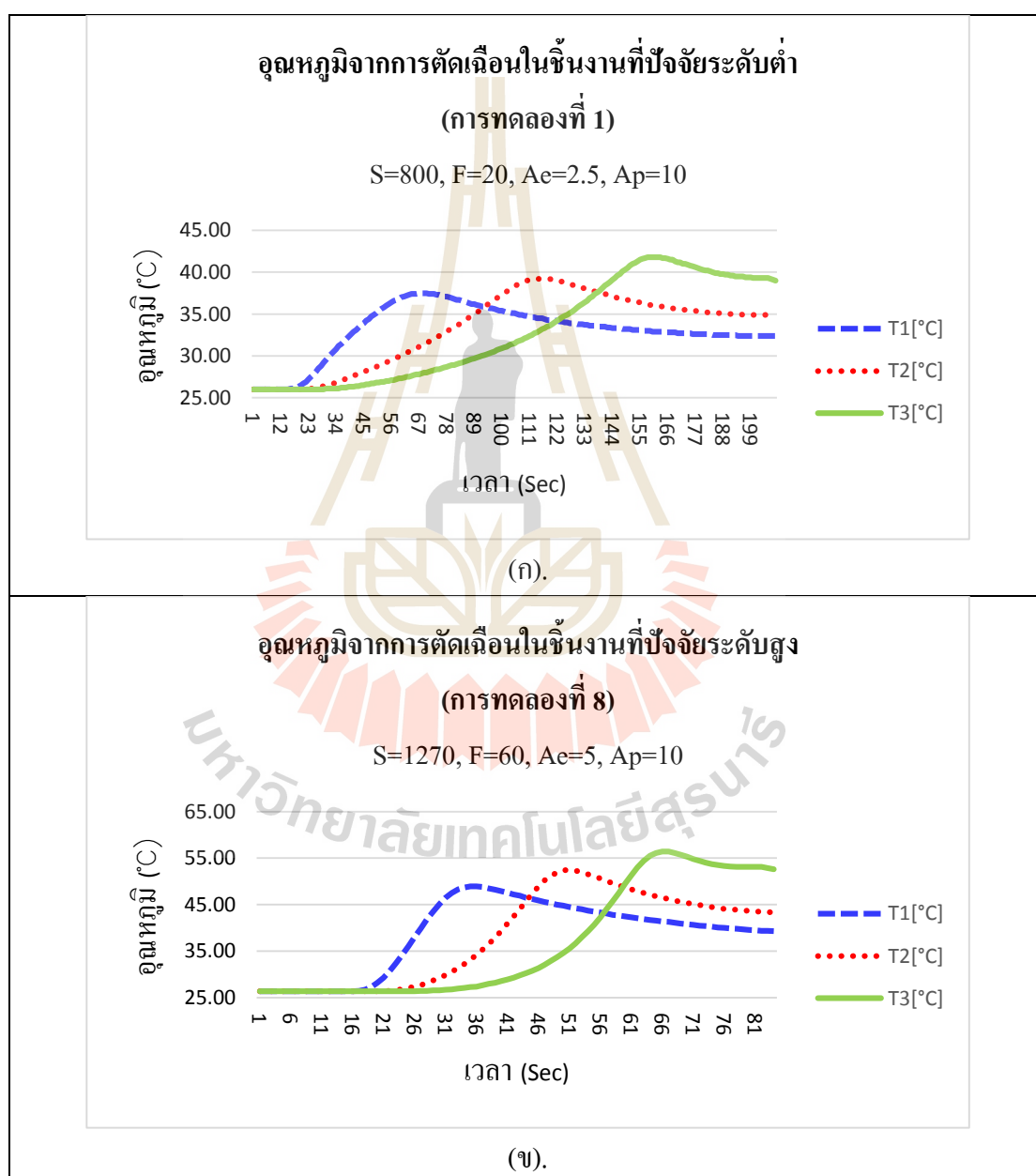
### ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 โดยได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินงานวิจัยในขั้นตอนต่างๆ สำหรับการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโลหะ ผลลัพธ์จากการดำเนินงานวิจัยสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

- 4.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน
- 4.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน
- 4.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเนื้อ
- 4.4 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเนื้อ
- 4.5 ผลการศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ
- 4.6 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ
- 4.7 ผลการศึกษาความหยาบผิวของชิ้นงาน
- 4.8 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน
- 4.9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลการศึกษา

#### 4.1 ผลการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

การศึกษาอุณหภูมิตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานถูกดำเนินการโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ผลการศึกษาพบว่าทั้ง 16 การทดลอง อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจุดที่วัดอุณหภูมิได้สูงสุดคือที่จุดวัดที่ 3 (T3) โดยจุดวัดที่ 3 จะมีระยะห่างจากจุดเริ่มต้นทำการตัดเฉือนมากที่สุด จึงเป็นสาเหตุทำให้จุดวัดที่ 3 วัดอุณหภูมิได้สูงกว่าจุดวัดที่ 2 (T2) และจุดวัดที่ 1 (T1)



รูปที่ 4.1 กราฟอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงาน (ก).การทดลองที่ 8 (ข).การทดลองที่ 8

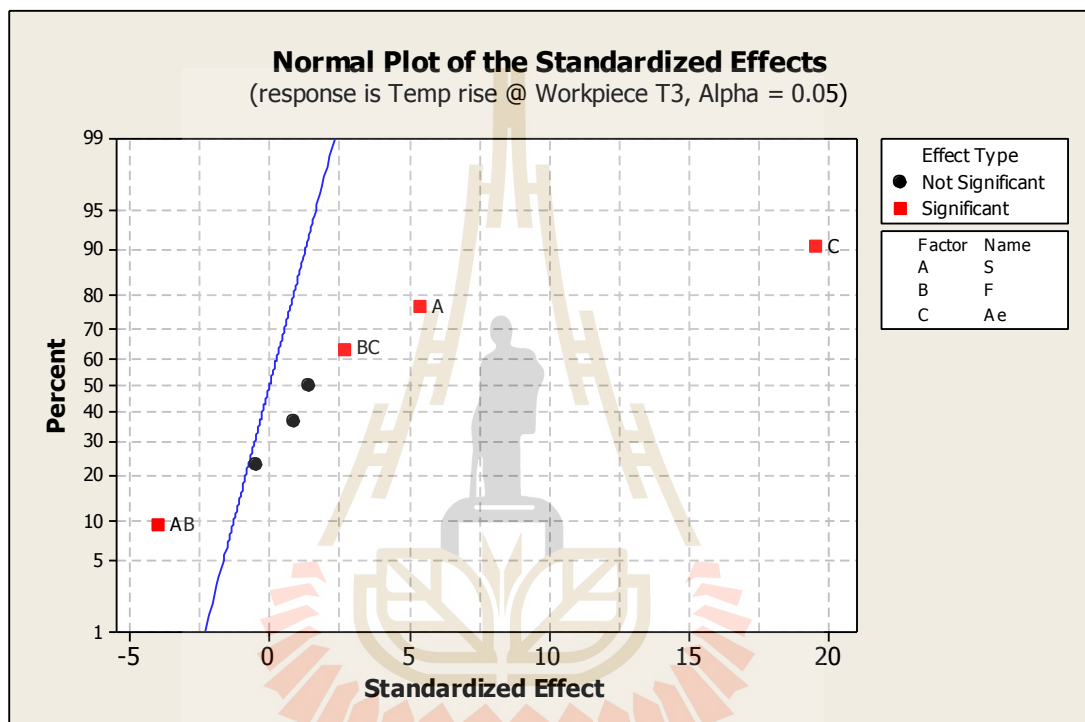
ตารางที่ 4.1 อุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

RunOrder	อุณหภูมิตัดเนื้อในชิ้นงาน (°C)								
	จุดวัดที่ 1 (T1)			จุดวัดที่ 2 (T2)			จุดวัดที่ 3 (T3)		
	T <sub>0</sub>	T <sub>Peak</sub>	T <sub>Rise</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>Peak</sub>	T <sub>Rise</sub>	T <sub>0</sub>	T <sub>Peak</sub>	T <sub>Rise</sub>
1	26.00	37.50	11.50	26.00	39.20	13.20	26.00	41.80	15.80
2	26.40	40.50	14.10	26.40	43.10	16.70	26.40	47.20	20.80
3	26.70	40.00	13.30	26.70	41.40	14.70	26.70	43.50	16.80
4	27.00	40.30	13.30	27.00	41.60	14.60	27.00	44.00	17.00
5	26.80	45.00	18.20	26.80	48.00	21.20	26.80	51.80	25.00
6	27.00	46.10	19.10	26.80	49.00	22.20	26.90	55.10	28.20
7	27.10	48.60	21.50	27.10	51.60	24.50	26.90	56.30	29.40
8	26.40	48.90	22.50	26.40	52.40	26.00	26.40	56.40	30.00
9	25.30	34.60	9.30	25.30	36.10	10.80	25.20	39.30	14.10
10	26.20	39.30	13.10	26.20	42.00	15.80	26.10	46.30	20.20
11	26.20	38.80	12.60	25.80	41.40	15.60	26.50	43.30	16.80
12	26.50	39.00	12.50	26.20	41.50	15.30	26.10	43.80	17.70
13	26.60	42.50	15.90	26.50	44.90	18.40	26.60	50.30	23.70
14	27.30	47.10	19.80	27.20	48.60	21.40	27.00	55.70	28.70
15	27.20	46.80	19.60	27.00	51.30	24.30	27.00	53.70	26.70
16	27.20	46.80	19.60	27.10	49.90	22.80	27.00	55.00	28.00

ตารางที่ 4.1 ได้แสดงผลการวัดอุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในชิ้นงานซึ่งตำแหน่งของจุดวัด T1 T2 และ T3 ได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 โดยกำหนดให้ T<sub>0</sub> เป็นอุณหภูมิเริ่มต้น T<sub>Peak</sub> เป็นอุณหภูมิจากการตัดเนื้อสูงสุดที่เกิดขึ้น และ T<sub>Rise</sub> เป็นผลต่างอุณหภูมิ (T<sub>Peak</sub>-T<sub>0</sub>) ซึ่งจะถูกนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานในหัวข้อที่ 4.2

## 4.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

จากตารางที่ 4.1 พบว่าการทดลองทั้ง 16 การทดลอง จุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดคือจุดวัดที่ 3 (T3) ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน คืออุณหภูมิที่เกิดขึ้น ณ จุดวัดที่ 3 (T3) จะแสดงให้อยู่ในรูปผลต่างอุณหภูมิ ( $T_{Rise}$ )



รูปที่ 4.2 ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานที่จุดวัดที่ 3 (T3)

จากรูปที่ 4.2 แสดงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ณ จุดวัดที่ 3 (T3) คือระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) ความเร็วรอบ (S) รวมไปถึงผลกระทบร่วมของอัตราการป้อนกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $F \cdot Ae$ ) และความเร็วรอบกับอัตราการป้อน ( $S \cdot F$ ) และสามารถตรวจสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล ของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานของจุดวัดที่ 3 (T3)

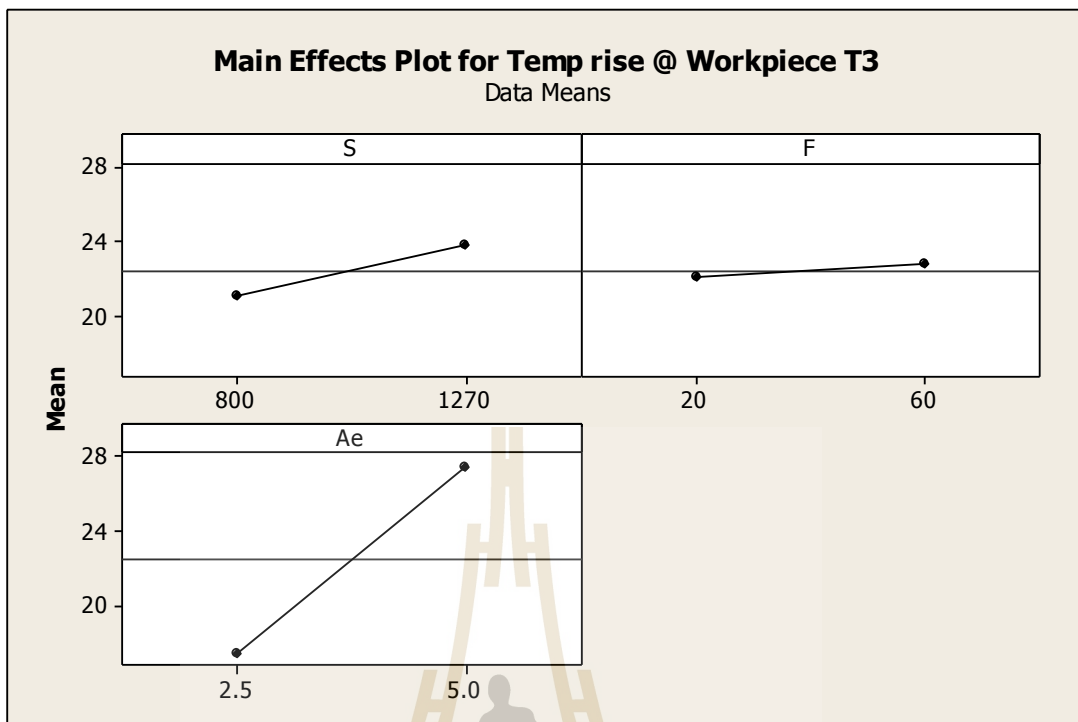
Analysis of Variance for Temp rise @ Workpiece T3 (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	438.272	438.272	146.091	137.74	0.000
S	1	31.081	31.081	31.081	29.30	0.001
F	1	2.176	2.176	2.176	2.05	0.190
Ae	1	405.016	405.016	405.016	381.87	0.000
2-Way Interactions	3	24.582	24.582	8.194	7.73	0.010
S*F	1	16.606	16.606	16.606	15.66	0.004
S*Ae	1	0.276	0.276	0.276	0.26	0.624
F*Ae	1	7.701	7.701	7.701	7.26	0.027
3-Way Interactions	1	0.856	0.856	0.856	0.81	0.395
S*F*Ae	1	0.856	0.856	0.856	0.81	0.395
Residual Error	8	8.485	8.485	1.061		
Pure Error	8	8.485	8.485	1.061		
Total	15	472.194				

S = 1.02987	PRESS = 33.94
R-Sq = 98.20%	R-Sq(pred) = 92.81%    R-Sq(adj) = 96.63%

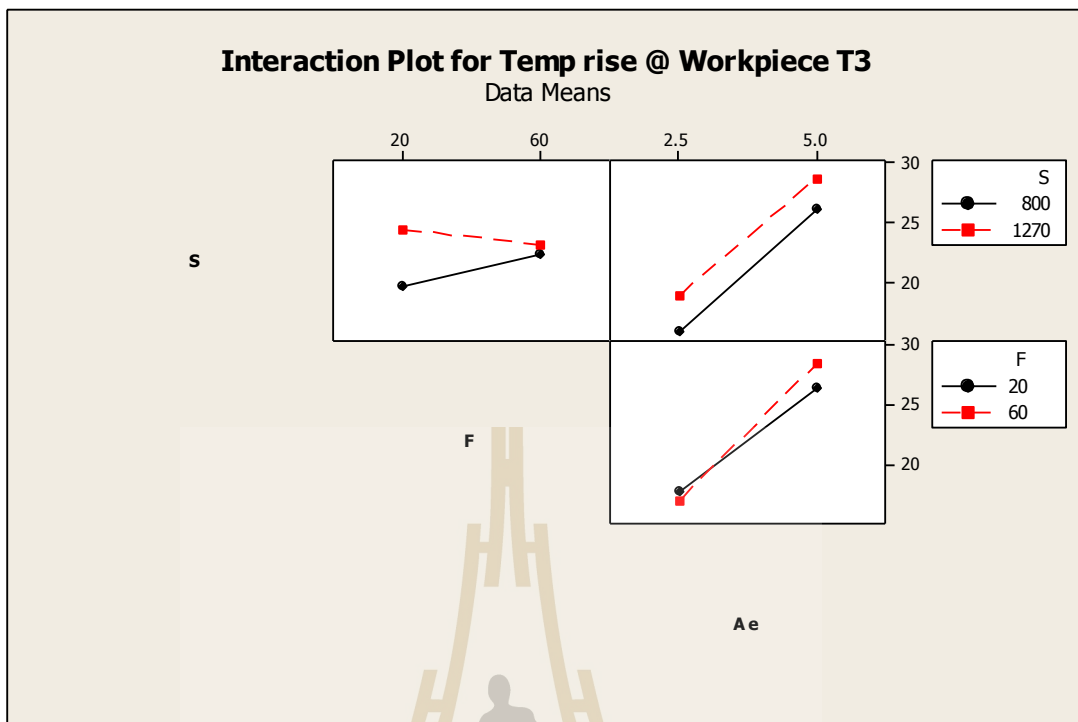
จากตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล อุณหภูมิตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นในชิ้นงานของจุดวัดที่ 3 (T3) โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha=0.05$ ) สังเกตจากค่า P-value ของปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการตัดเฉือนในชิ้นงาน ณ จุดวัดที่ 3 (T3) อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดดังต่อไปนี้

- 1) ระยะเวลาป้อนลิกในแนวรัศมี (Ae)
- 2) ความเร็วรอบ (S)
- 3) อันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนและระยะเวลาป้อนลิกในแนวรัศมี (F\*Ae)
- 4) อันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและอัตราการป้อน (S\*F)



รูปที่ 4.3 การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานที่จุดวัดที่ 3 (T3)

จากรูปที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect plot) จากกราฟจะเห็นได้ว่า ระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) ความเร็วรอบ (S) และอัตราการป้อน (F) เมื่อระดับปัจจัยเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางบวก จะส่งผลทำให้อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นงานมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานที่ระดับนัยสำคัญ 95% คือระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) และความเร็วรอบ (S) โดยเมื่อระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร และความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 800 เป็น 1270 รอบต่อนาที จะส่งผลให้อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานที่จุดวัดที่ 3 (T3)

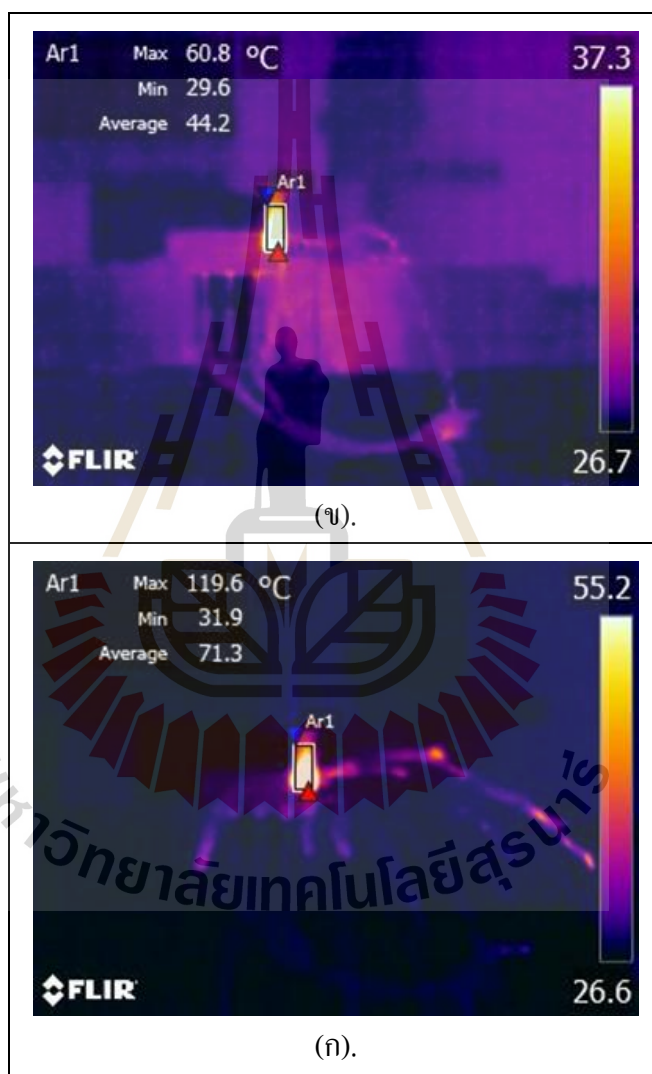
จากรูปที่ 4.4 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction plot) จากกราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้ 1) อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการป้อน ( $S \cdot F$ ) พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 มิลลิเมตรต่อนาที แต่ที่ความเร็วรอบ 1270 รอบต่อนาที อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนลดลงจาก 60 เป็น 20 มิลลิเมตรต่อนาที

2) อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $S \cdot Ae$ ) พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 หรือ 1270 รอบต่อนาที อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร

3) อิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการป้อนกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $F \cdot Ae$ ) พบว่าที่อัตราการป้อน 20 หรือ 60 มิลลิเมตรต่อนาที อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร

#### 4.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิตัดจากการเฉือนที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน

การศึกษารูปร่างอุณหภูมิตัดเฉือนที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน ด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน FLIR E50 พบว่าจากการทดลองทั้ง 16 การทดลอง ลักษณะการเกิดอุณหภูมิสูงสุดของเครื่องมือตัดเฉือนจะอยู่บริเวณจะมุมขวาล่างของพื้นที่ Ar1 (ในรูปที่ 4.5 คือจุดสามเหลี่ยมสีแดง) ซึ่งเป็นบริเวณปลายคมตัดของเครื่องมือตัดเฉือน ดังปรากฏในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายรังสีความร้อนของพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน (ก).RunOrder 1 @ S = 800 F = 20

Ae = 2.5 Ap = 10 (ข).RunOrder 8 @ S = 1270 F = 60 Ae = 5 Ap = 10

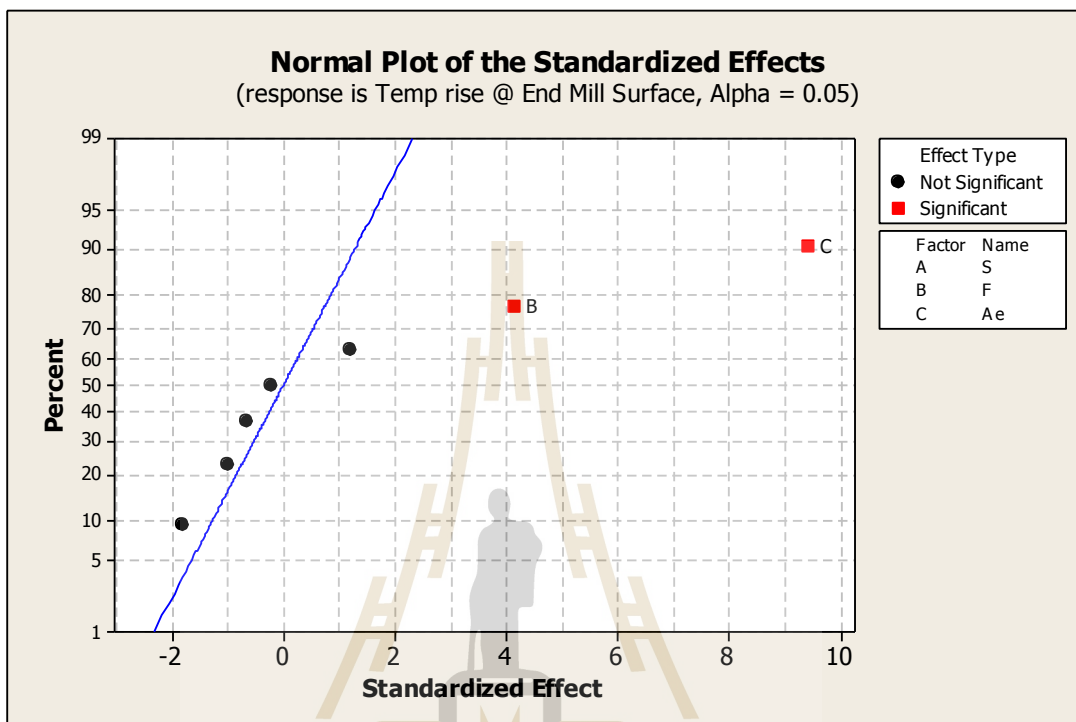


ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดด้วย FLIR E50

RunOrder	อุณหภูมิพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน (°C)		
	$T_0$	$T_{peak}$	$T_{Rise}$
1	26.6	60.8	34.2
2	26.4	72.1	45.7
3	26.4	86.2	59.8
4	26.4	80.6	54.2
5	26.9	115.7	88.8
6	27.8	122.5	94.7
7	24.4	137.2	112.8
8	27.3	119.6	92.3
9	25.2	57.1	31.9
10	25.6	59.1	33.5
11	26.1	72.3	46.2
12	26.4	73.9	47.5
13	27.2	88.1	60.9
14	27.1	102.3	75.2
15	27.9	150.7	122.8
16	27.3	131.5	104.2

จากตารางที่ 4.3 ได้แสดงค่าอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนจากกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50 โดยกำหนดให้  $T_0$  เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนเริ่มกระบวนการตัดเฉือน  $T_{Peak}$  เป็นอุณหภูมิตัดเฉือนสูงสุดที่วัดได้ภายในกรอบการวัดที่กำหนด ( $A_r1$ ) และ  $T_{Rise}$  คือผลต่างอุณหภูมิ ( $T_{Peak} - T_0$ ) และจะถูกนำไปวิเคราะห์ผลเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนด้วยวิธีการทางสถิติในหัวข้อที่ 4.4

#### 4.4 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน



รูปที่ 4.6 ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน

จากรูปที่ 4.6 แสดงปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นบนเครื่องมือตัดเฉือนคือระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) และอัตราการป้อน (F) ซึ่งสามารถตรวจสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน

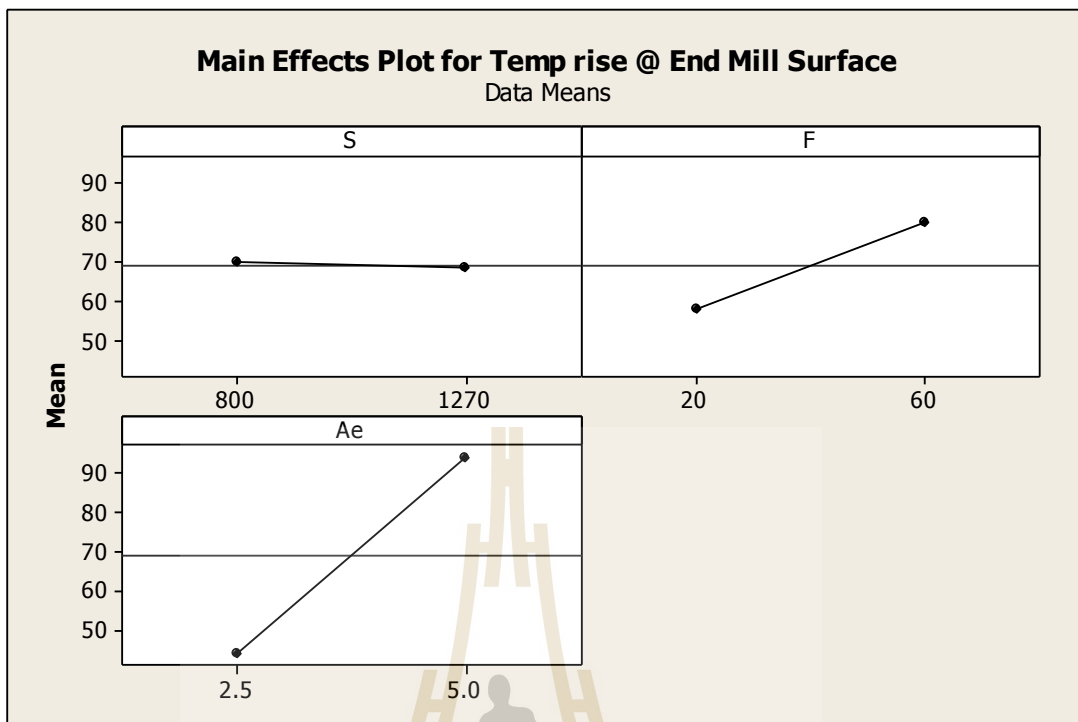
Analysis of Variance for Temp rise @ End Mill Surface (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	11853.4	11853.4	3951.12	35.43	0.000
S	1	6.4	6.4	6.38	0.06	0.817
F	1	1911.9	1911.9	1911.88	17.14	0.003
Ae	1	9935.1	9935.1	9935.11	89.09	0.000
2-Way Interactions	3	572.5	572.5	190.84	1.71	0.241
S*F	1	367.7	367.7	367.68	3.30	0.107
S*Ae	1	48.0	48.0	47.96	0.43	0.530
F*Ae	1	156.9	156.9	156.88	1.41	0.270
3-Way Interactions	1	109.7	109.7	109.73	0.98	0.350
S*F*Ae	1	109.7	109.7	109.73	0.98	0.350
Residual Error	8	892.1	892.1	111.52		
Pure Error	8	892.1	892.1	111.52		
Total	15	13427.7				

S = 10.5601	PRESS = 3568.5
R-Sq = 93.36%	R-Sq(pred) = 73.42%
	R-Sq(adj) = 87.54%

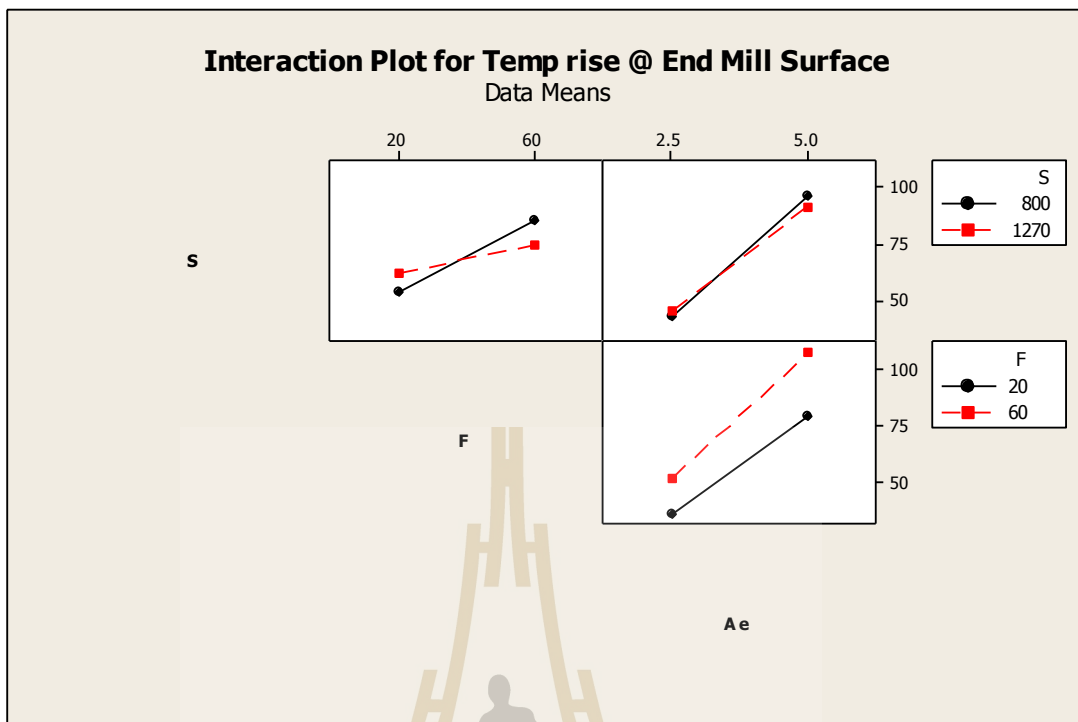
จากตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha=0.05$ ) สังเกตจากค่า P-value ของปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการตัดเฉือนบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดดังต่อไปนี้

- 1) ระยะเวลาป้อนลิ้นในแนวรัศมี (Ae)
- 2) อัตราการป้อน (F)



รูปที่ 4.7 การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน

จากรูปที่ 4.7 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect plot) จากกราฟจะเห็นได้ว่า ระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) และ อัตราการป้อน (F) เมื่อระดับปัจจัยเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางบวก จะส่งผลให้อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น แต่ความเร็วรอบ (S) ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนมีแนวโน้มที่ลดลง ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนที่ระดับนัยสำคัญ 95% คือระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) และอัตราการป้อน (F) โดยเมื่อระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร และอัตราการป้อนเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 มิลลิเมตรต่ออนาที จะส่งผลให้อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 การประมาณอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน

จากรูปที่ 4.8 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction plot) พบว่าอิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการป้อน ( $S \cdot F$ ) ความเร็วรอบกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $S \cdot Ae$ ) และอัตราการป้อนกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $F \cdot Ae$ ) จะส่งผลให้อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยไปในทิศทางบวก

ตารางที่ 4.5 อภิปรายผลการศึกษาดูอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในกระบวนการกัดโลหะ

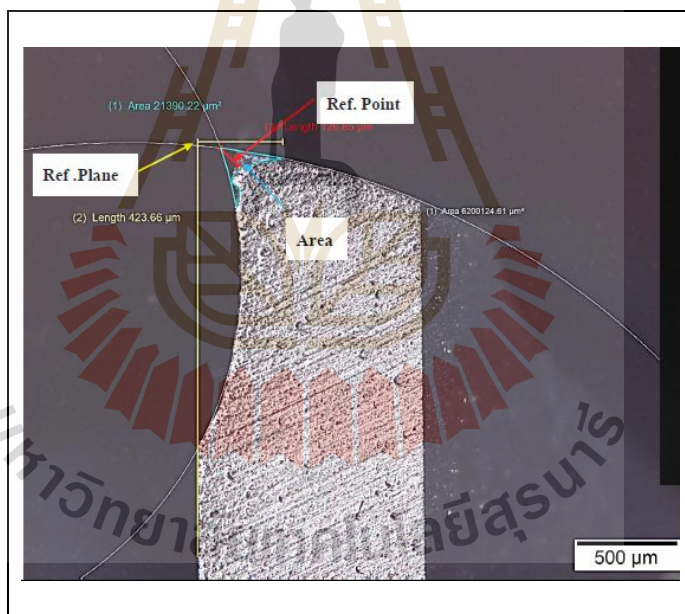
วิธีการวัดอุณหภูมิ	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบ					
	S	F	Ae	S*F	S*Ae	F*Ae
อุณหภูมิในชิ้นงาน (K-type Thermocouple)	✓		✓	✓		✓
อุณหภูมิมบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน (FLIR E50 Infrared camera)		✓	✓			

จากตารางอภิปรายผลที่ 4.5 การศึกษาดูอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในกระบวนการกัดโลหะ สามารถสรุปได้ว่า ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดเศษตัด (Chip) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เกิดการสูญเสียของเนื้อชิ้นงานมากขึ้น และเกิดการใช้พลังงานสำหรับการตัดเฉือนก็มากขึ้น จึงเป็นสาเหตุหลักทำให้ความร้อนจากการตัดเฉือนเพิ่มมากขึ้น โดยจะสอดคล้องตามทฤษฎีของ (พอลแลค, ฮอร์มัน ดับบลิว, 2537) ที่ได้กล่าวว่า “พลังงานที่ใช้ในการตัดเฉือนเกือบทั้งหมดจะเปลี่ยนไปเป็นความร้อน เนื่องจากการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรของเนื้อวัสดุที่ถูกตัดเฉือน ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการตัดเฉือนส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานความร้อน”

#### 4.5 ผลการศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน

การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือน จะถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope: OM) ที่กำลังขยาย 5 เท่า โดยการสึกหรอของคมตัดเครื่องมือตัดเฉือนทั้ง 4 คมตัดจะได้รับการตรวจสอบ และนำค่าการสึกหรอที่วัดได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์หาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนด้วยวิธีการทางสถิติ การวัดขนาดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนสามารถแบ่งวิธีการวัดออกเป็น 3 รูปแบบ

- 1) การวัดแบบ Ref. Point คือวัดจากจุดตัดของเส้นจำลองคมตัดทำมุม 45° เข้าไปหาจุดที่มีระยะที่มีการสึกหรอมากที่สุด
- 2) การวัดแบบ Ref. Plane คือวัดจากเส้นระนาบอ้างอิงตั้งฉากเข้าไปหาระยะที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด
- 3) การวัดแบบ Area คือวัดการสึกหรอในรูปแบบพื้นที่การสึกหรอ



รูปที่ 4.9 รูปแบบการวัดค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน

ผลจากการตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสงพบว่า ทั้ง 16 การทดลอง เครื่องมือตัดเฉือนลักษณะการสึกหรอที่ปลายฟันของคมตัดดังที่ได้ปรากฏในรูปที่ 4.9 และค่าการสึกหรอจะ ได้แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าการสึกหรอเฉลี่ยของเครื่องมือตัดเฉือน

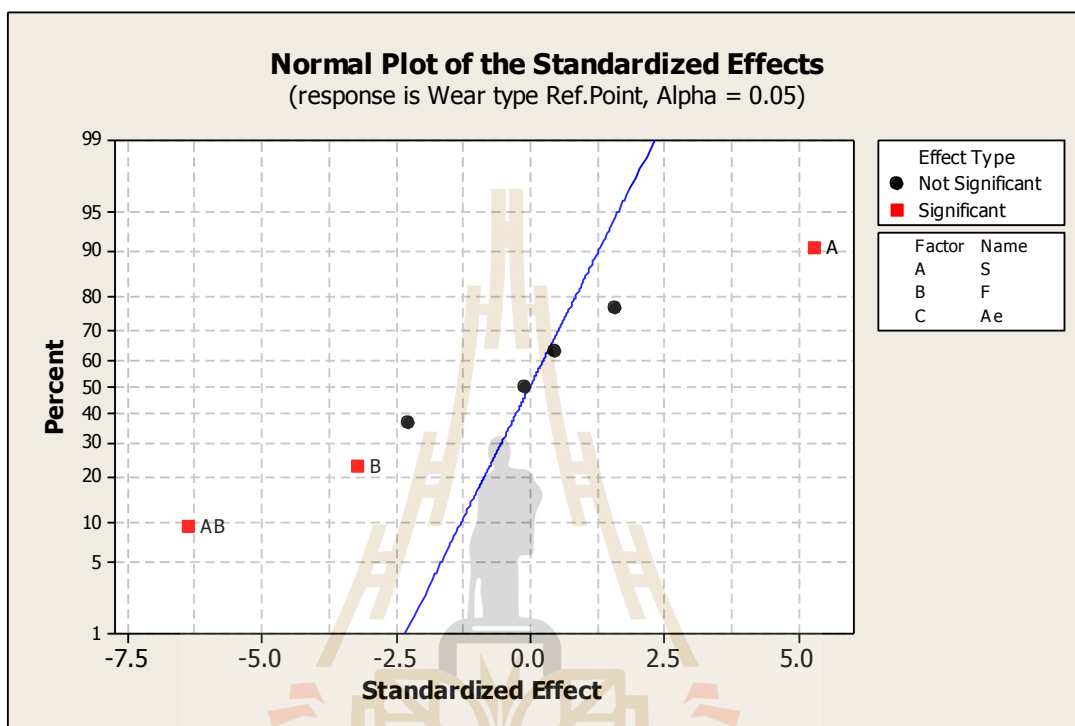
RunOrder	รูปแบบการวัดขนาดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน		
	Ref. Point ( $\mu\text{m}$ )	Ref. Plane ( $\mu\text{m}$ )	Area ( $\mu\text{m}^2$ )
1	37.63	137.81	1868.70
2	121.74	384.95	18453.16
3	60.50	182.48	3279.38
4	63.43	283.76	4315.37
5	64.90	224.67	4387.74
6	106.15	219.94	7369.08
7	66.84	166.59	4087.79
8	47.33	189.95	2912.31
9	39.03	126.82	2494.29
10	101.97	292.49	8108.46
11	61.97	170.28	3183.68
12	55.62	187.78	2790.90
13	53.67	167.48	2996.10
14	86.36	286.43	7489.05
15	65.60	170.52	3910.69
16	68.80	177.74	4909.07

จากตารางที่ 4.6 ได้แสดงค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนโดยใช้เทคนิคการวัด 3 รูปแบบ ค่าที่แสดงในตารางเกิดจากการวัดค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนเอ็นมิลล์ที่มี 4 คม ตัด นั้นหมายความว่าเครื่องมือตัดเฉือน 1 ชิ้น จะถูกกวัดค่าการสึกหรอทุกคมตัด และนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนในหัวข้อที่ 4.6



#### 4.6 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน

##### 4.6.1 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point



รูปที่ 4.10 ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point

จากรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point คือความเร็วรอบ (S) อัตราการป้อน (F) รวมไปถึงผลกระทบร่วมของ ความเร็วรอบกับอัตราการป้อน (S\*F) และสามารถตรวจสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2<sup>3</sup> แฟกทอเรียล การสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point

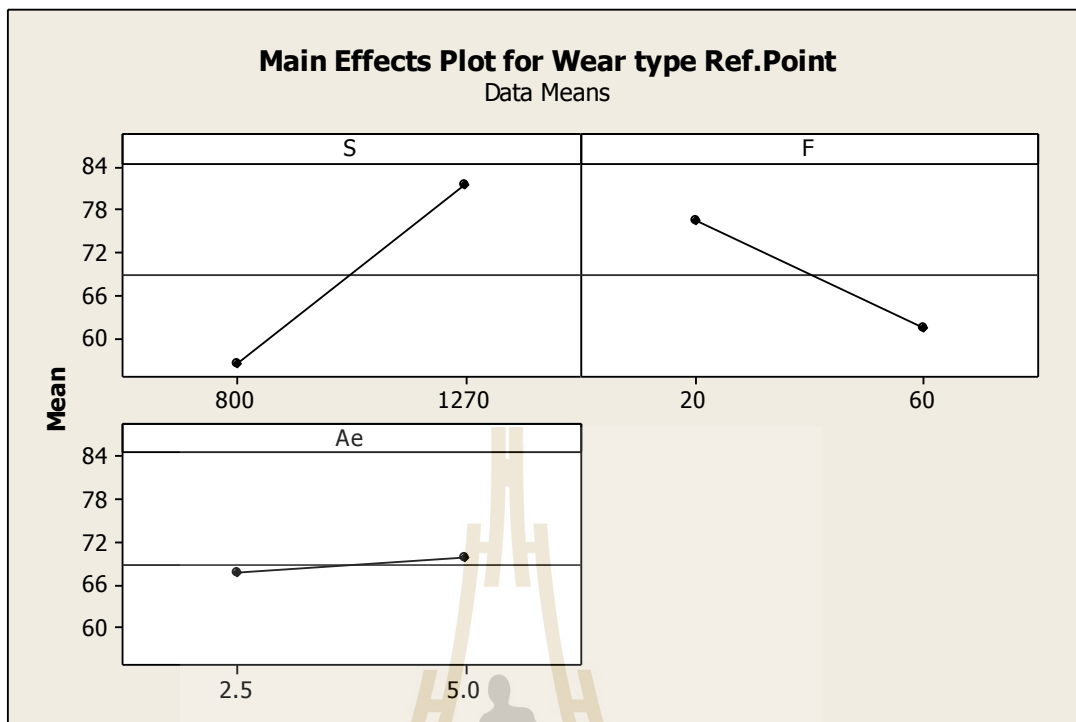
Analysis of Variance for Wear type Ref. Point (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	3471.67	3471.67	1157.22	12.90	0.002
S	1	2531.47	2531.47	2531.47	28.21	0.001
F	1	920.52	920.52	920.52	10.26	0.013
Ae	1	19.68	19.68	19.68	0.22	0.652
2-Way Interactions	3	4084.97	4084.97	1361.66	15.18	0.001
S*F	1	3621.93	3621.93	3621.93	40.37	0.000
S*Ae	1	462.20	462.20	462.20	5.15	0.053
F*Ae	1	0.84	0.84	0.84	0.01	0.925
3-Way Interactions	1	226.58	226.58	226.58	2.53	0.151
S*F*Ae	1	226.58	226.58	226.58	2.53	0.151
Residual Error	8	717.83	717.83	89.73		
Pure Error	8	717.83	717.83	89.73		
Total						

S = 9.47251	PRESS = 2871.31	
R-Sq = 91.56%	R-Sq(pred) = 66.22%	R-Sq(adj) = 84.17%

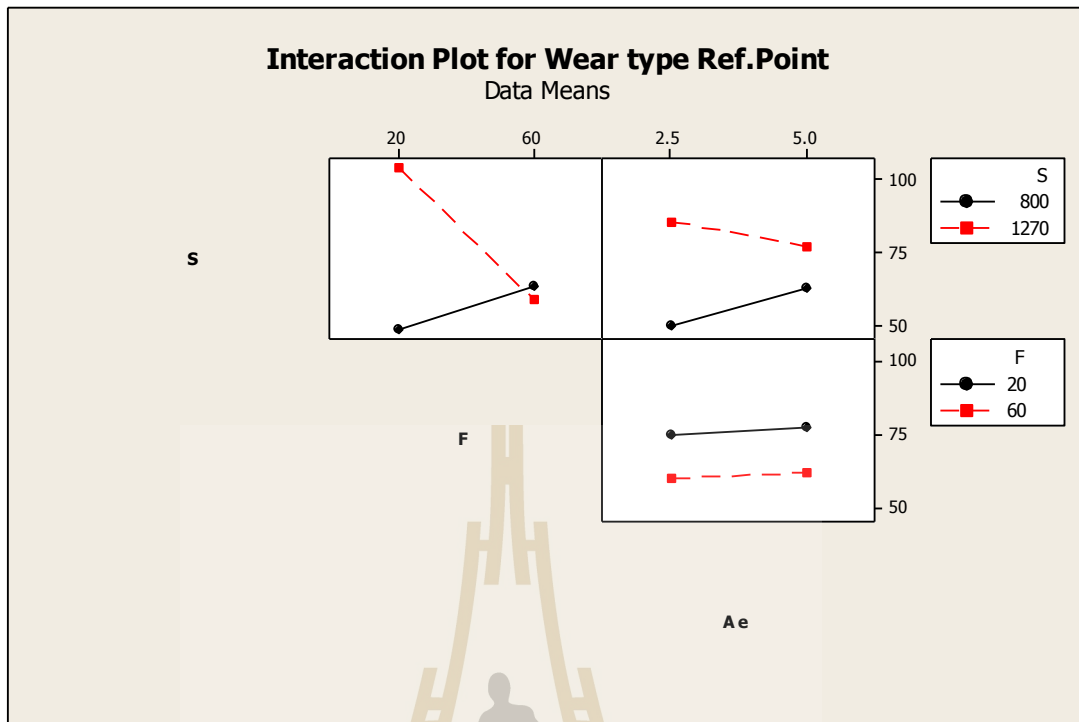
จากตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2<sup>3</sup> แฟกทอเรียล การสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha=0.05$ ) สังเกตจากค่า P-value ของปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้ออย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดดังต่อไปนี้

- 1) ความเร็วรอบ(S)
- 2) อัตราการป้อน (F)
- 3) อันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและอัตราการป้อน (S\*F)



รูปที่ 4.11 การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน ที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point

จากรูปที่ 4.11 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect plot) ที่จะส่งผลกระทบต่อ การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point จากกราฟจะเห็นได้ว่า ความเร็วรอบ (S) และระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) เมื่อระดับปัจจัยเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางบวก จะส่งผลทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น สำหรับอัตราการป้อน (F) เมื่อระดับ ปัจจัยเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางลบ จึงจะส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นปัจจัย หลักที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ระดับนัยสำคัญ 95% คือ ความเร็วรอบ (S) และอัตราการป้อน (F) โดยความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 800 เป็น 1270 รอบต่อนาที และอัตราการป้อนลดลงจาก 60 เป็น 20 มิลลิเมตรต่อนาที จะส่งผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด เฉือนที่เพิ่มขึ้น

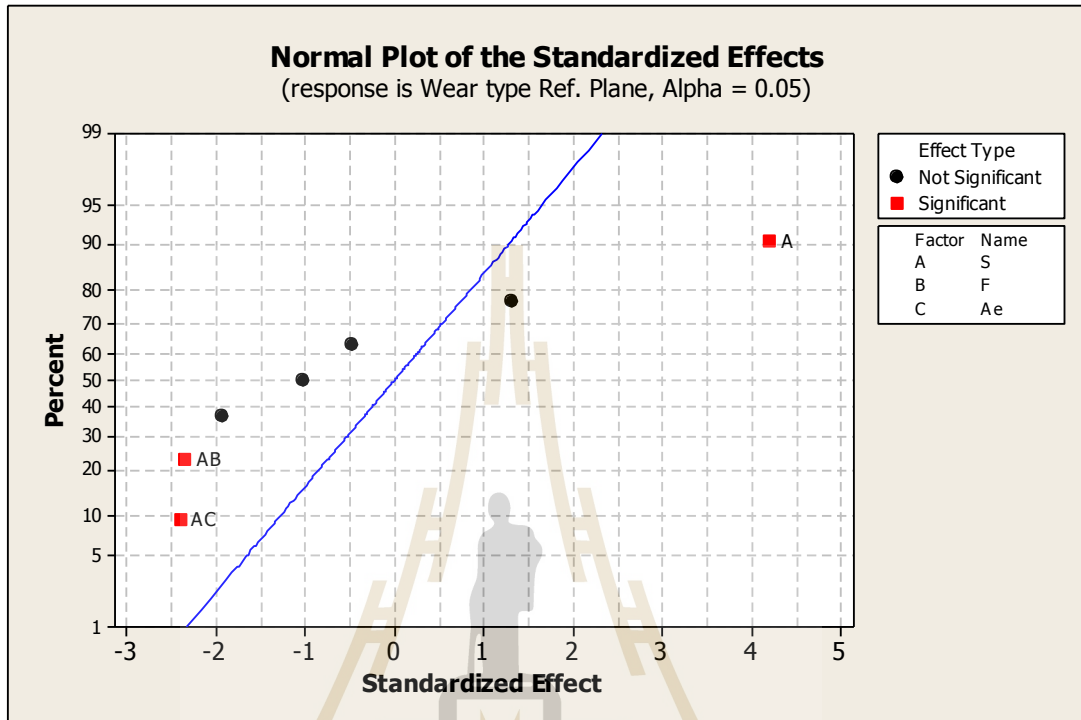


รูปที่ 4.12 การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาหรือของเครื่องมือตัด  
เดือนที่วัดขนาดการศึกษาหรือด้วยรูปแบบ Ref. Point

จากรูปที่ 4.12 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction plot) จากกราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้ 1) อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการป้อน ( $S \cdot F$ ) และความเร็วรอบกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $S \cdot Ae$ ) พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที จะส่งผลให้อัตราการศึกษาหรือของเครื่องมือตัดเดือนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ก็ต่อเมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร ในทางตรงกันข้ามที่ความเร็วรอบ 1270 รอบต่อนาที จะส่งผลให้อัตราการศึกษาหรือของเครื่องมือตัดเดือนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ก็ต่อเมื่ออัตราการป้อนลดลงจาก 60 เป็น 20 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะป้อนลึกในแนวรัศมีลดลงจาก 5 เป็น 2.5 มิลลิเมตร

2) อิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการป้อนกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $F \cdot Ae$ ) พบว่าที่อัตราการป้อน 20 หรือ 60 มิลลิเมตรต่อนาที จะส่งผลให้อัตราการศึกษาหรือของเครื่องมือตัดเดือนมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร

#### 4.6.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane



รูปที่ 4.13 ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane

จากรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane คือความเร็วรอบ (S) รวมไปถึงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการป้อน ( $S \cdot F$ ) และความเร็วรอบกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $S \cdot Ae$ ) ซึ่งสามารถตรวจสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล การสึกหรอของ  
เครื่องมือตัดเนื้อที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane

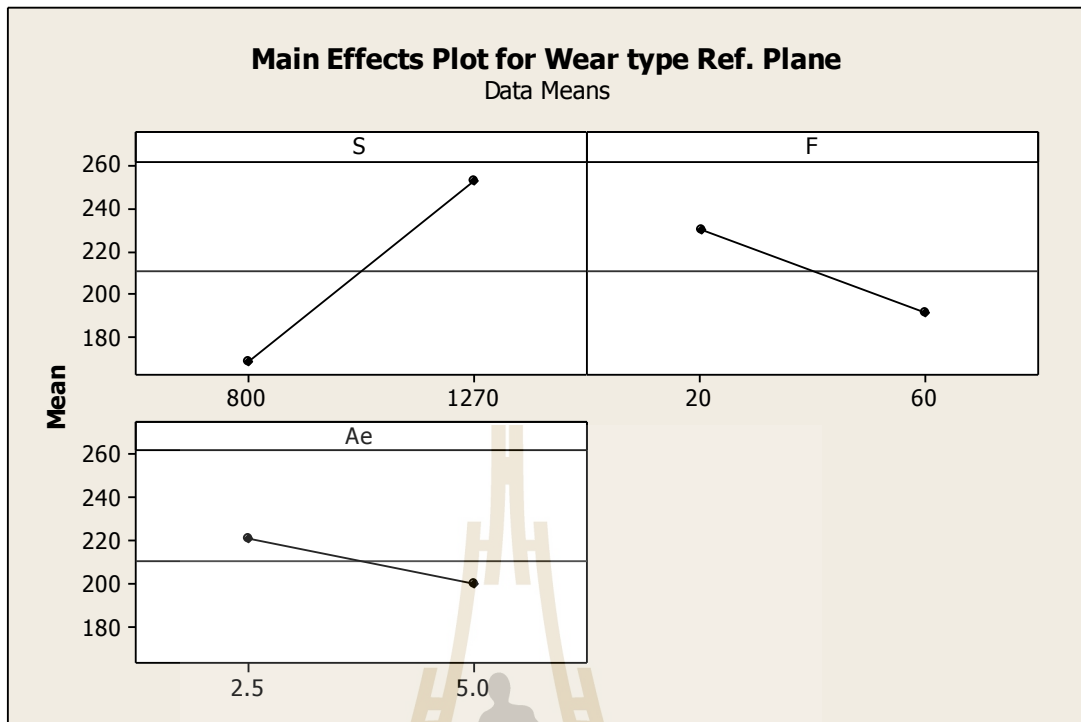
Analysis of Variance for Wear Type Ref. Plane (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	36321.6	36321.6	12107.2	7.48	0.010
S	1	28595.9	28595.9	28595.9	17.67	0.003
F	1	6064.0	6064.0	6064.0	3.75	0.089
Ae	1	1661.7	1661.7	1661.7	1.03	0.341
2-Way Interactions	3	18624.8	18624.8	6208.3	3.84	0.057
S*F	1	8913.8	8913.8	8913.8	5.51	0.047
S*Ae	1	9350.5	9350.5	9350.5	5.78	0.043
F*Ae	1	360.5	360.5	360.5	0.22	0.650
3-Way Interactions	1	2767.1	2767.1	2767.1	1.71	0.227
S*F*Ae	1	2767.1	2767.1	2767.1	1.71	0.227
Residual Error	8	12944.4	12944.4	1618.0		
Pure Error	8	12944.4	12944.4	1618.0		
Total	15	70657.9				

S = 40.2249	PRESS = 51777.4	
R-Sq = 81.68%	R-Sq(pred) = 26.72%	R-Sq(adj) = 65.65%

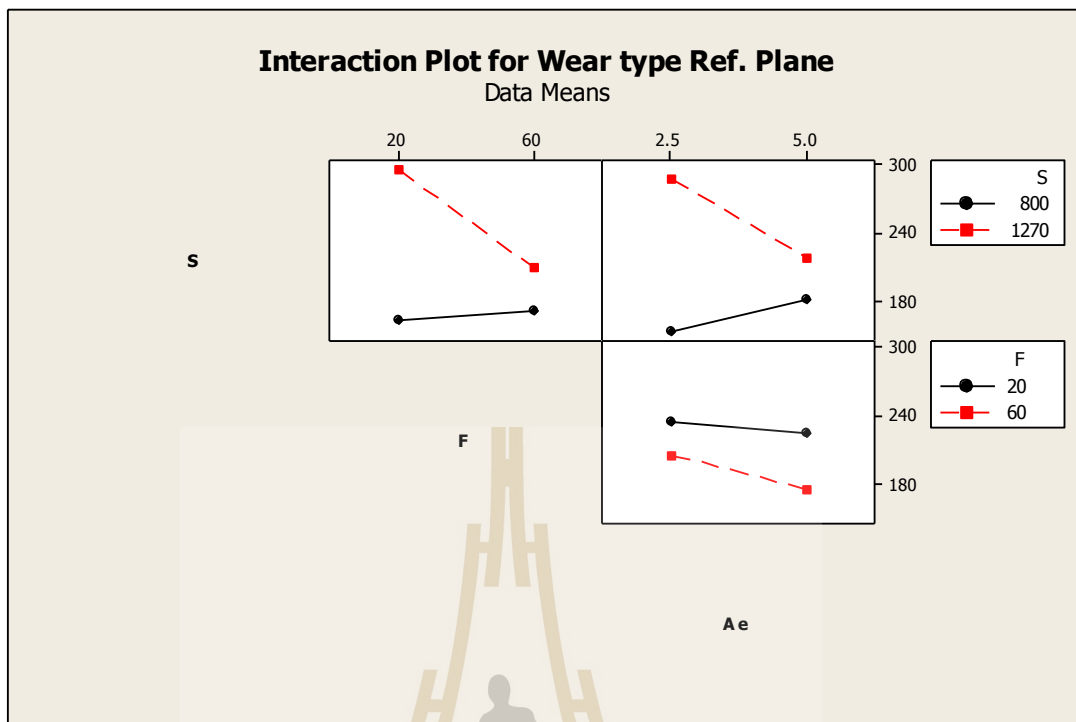
จากตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล การสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha=0.05$ ) ตั้งเกิดจากค่า P-value ของปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้ออย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดดังต่อไปนี้

- 1) ความเร็วรอบ (S)
- 2) อันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและอัตราการป้อน (S\*F)
- 3) อันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (S\*Ae)



รูปที่ 4.14 การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane

จากรูปที่ 4.14 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect plot) ที่จะส่งผลกระทบต่อ การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane จากกราฟจะเห็นได้ว่า ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) และอัตราการป้อน (F) เมื่อระดับของปัจจัยเปลี่ยนแปลงไปใน ทิศทางลบ จะส่งผลทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น สำหรับความเร็วรอบ (S) เมื่อระดับปัจจัยเปลี่ยนแปลงไปทางบวก จึงจะส่งผลทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่ เพิ่มขึ้น ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน ที่ระดับนัยสำคัญ 95% คือความเร็วรอบ (S) โดยความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 800 เป็น 1270 รอบต่อนาที จะส่งผลต่อการ สึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาหรือของเครื่องมือตัด  
เนื่องที่วัดขนาดการศึกษาหรือด้วยรูปแบบ Ref. Plane

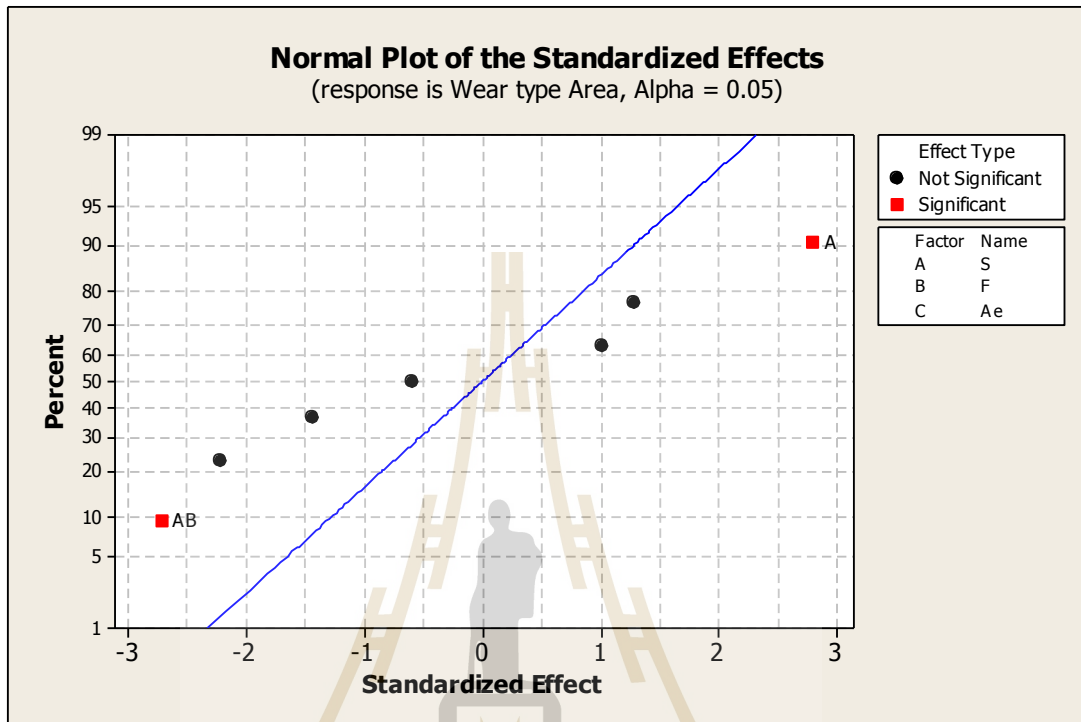
จากรูปที่ 4.15 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction plot) จากกราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้ 1) อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการป้อน ( $S \cdot F$ ) พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที อัตราการศึกษาหรือของเครื่องมือตัดเดือนจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 มิลลิเมตรต่อนาที และที่ความเร็วรอบ 1270 รอบต่อนาที อัตราการศึกษาหรือของเครื่องมือตัดเดือนจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนลดลงจาก 60 เป็น 20 มิลลิเมตรต่อนาที

2) อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $S \cdot Ae$ ) พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที อัตราการศึกษาหรือของเครื่องมือตัดเดือนจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร และที่ความเร็วรอบ 1270 รอบต่อนาที อัตราการศึกษาหรือของเครื่องมือตัดเดือนจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีลดลงจาก 5 เป็น 2.5 มิลลิเมตร

3) อิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการป้อนกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $F \cdot Ae$ ) พบว่าที่อัตราการป้อน 20 หรือ 60 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการศึกษาหรือของเครื่องมือตัดเดือนจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีลดลงจาก 5 เป็น 2.5 มิลลิเมตร



#### 4.6.3 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area



รูปที่ 4.16 ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area

จากรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area คือความเร็วรอบ (S) รวมไปถึงผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการป้อน (S\*F) ซึ่งสามารถตรวจสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญได้จากวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล การสึกหรอของ  
เครื่องมือตัดเนื้อที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area

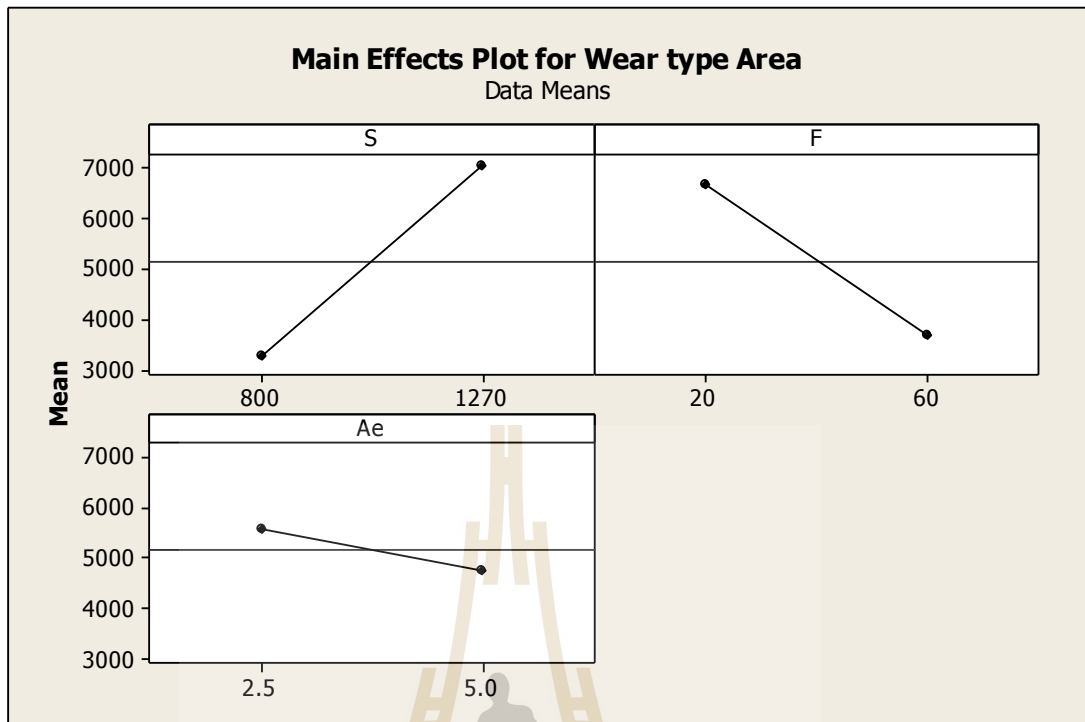
Analysis of Variance for Wear Type Area (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	94693628	94693628	31564543	4.36	0.042
S	1	56772589	56772589	56772589	7.85	0.023
F	1	35335282	35335282	35335282	4.89	0.058
Ae	1	2585756	2585756	2585756	0.36	0.566
2-Way Interactions	3	75888083	75888083	25296028	3.50	0.070
S*F	1	53314914	53314914	53314914	7.37	0.026
S*Ae	1	15102288	15102288	15102288	2.09	0.186
F*Ae	1	7470881	7470881	7470881	1.03	0.339
3-Way Interactions	1	12082619	12082619	12082619	1.67	0.232
S*F*Ae	1	12082619	12082619	12082619	1.67	0.232
Residual Error	8	57853416	57853416	7231677		
Pure Error	8	57853416	57853416	7231677		
Total	15	240517747				

S = 2689.18	PRESS = 231413664	
R-Sq = 75.95%	R-Sq(pred) = 3.79%	R-Sq(adj) = 54.90%

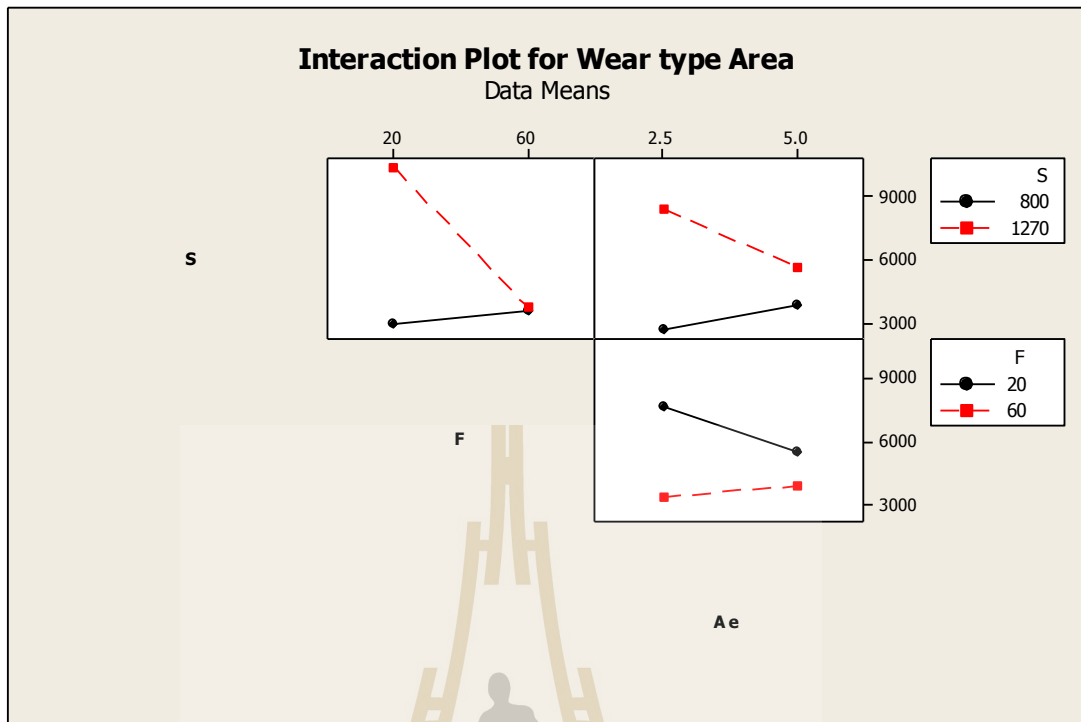
จากตารางที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล การสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha=0.05$ ) สังเกตจากค่า P-value ของปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้ออย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถเรียงลำดับจากปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากที่สุดดังต่อไปนี้

- 1) ความเร็วรอบ (S)
- 2) อันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและอัตราการป้อน (S\*F)



รูปที่ 4.17 การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area

จากรูปที่ 4.17 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect plot) ที่จะส่งผลกระทบต่อ การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area จากกราฟจะเห็นได้ว่า ความเร็วรอบ (S) จะส่งผลทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราป้อน (F) และ ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) เมื่อระดับปัจจัยเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางลบ จึงจะส่งผลทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน ที่ระดับนัยสำคัญ 95% คือความเร็วรอบ (S) โดยความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจาก 800 เป็น 1270 รอบต่อนาที จะส่งผลกระทบต่อ การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.18 การประมาณอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัด  
เดือนที่วัดขนาดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area

จากรูปที่ 4.18 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction plot) จากกราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้ 1) อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการป้อน ( $S \cdot F$ ) พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที อัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเดือนจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 มิลลิเมตรต่อนาที และที่ความเร็วรอบ 1270 รอบต่อนาที อัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเดือนจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนลดลงจาก 60 เป็น 20 มิลลิเมตรต่อนาที

2) อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $S \cdot Ae$ ) พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 รอบต่อนาที อัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเดือนจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร และที่ความเร็วรอบ 1270 รอบต่อนาที อัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเดือนจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีลดลงจาก 5 เป็น 2.5 มิลลิเมตร

3) อิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการป้อนกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $F \cdot A_e$ ) พบว่าที่อัตราการป้อน 20 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีลดลงจาก 5 เป็น 2.5 มิลลิเมตร และที่อัตราการป้อน 60 มิลลิเมตรต่อนาที อัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.10 อภิปรายผลการศึกษาศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน

วิธีการวัดการสึกหรอ	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบ					
	S	F	Ae	S*F	S*Ae	F*Ae
Ref. Point	✓	✓		✓		
Ref. Plane	✓			✓	✓	
Area	✓			✓		

จากตารางอภิปรายผลที่ 4.10 การศึกษาศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนสามารถสรุปได้ว่า ความเร็วรอบ เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนอย่างมีนัยสำคัญมากที่สุด เมื่อเครื่องมือตัดเฉือนหมุนด้วยความเร็วรอบที่สูง จำนวนคมตัดของเครื่องมือตัดเฉือนจะเกิดการตัดเฉือนด้วยความถี่ที่มากขึ้น แรงจากการตัดเฉือนเกิดกับเครื่องมือตัดเฉือนมากขึ้น ทำให้เครื่องมือตัดเฉือนมีอัตราการสึกหรอเพิ่มขึ้น เมื่อเครื่องมือตัดเฉือนเกิดการสึกหรอผลที่ตามมาก็คือแรงเสียดทานระหว่างเครื่องมือตัดเฉือนกับชิ้นงานก็จะมีค่าสูง จึงส่งผลต่ออุณหภูมิจากการตัดเฉือนให้มีความสูงขึ้นนั่นเอง

#### 4.7 ผลการศึกษาความหยาบผิวของชิ้นงาน

การศึกษาค่าความหยาบผิวของชิ้นงานจะแบ่งออกเป็น 2 บริเวณเพื่อวัดความหยาบผิวคือ บริเวณพื้นผิวก่อนถึงจุดวัดที่ 1 (T1) และบริเวณพื้นผิวหลังจุดวัดที่ 3 (T3) ซึ่งรายละเอียดการวัดความหยาบผิวได้แสดงไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.8

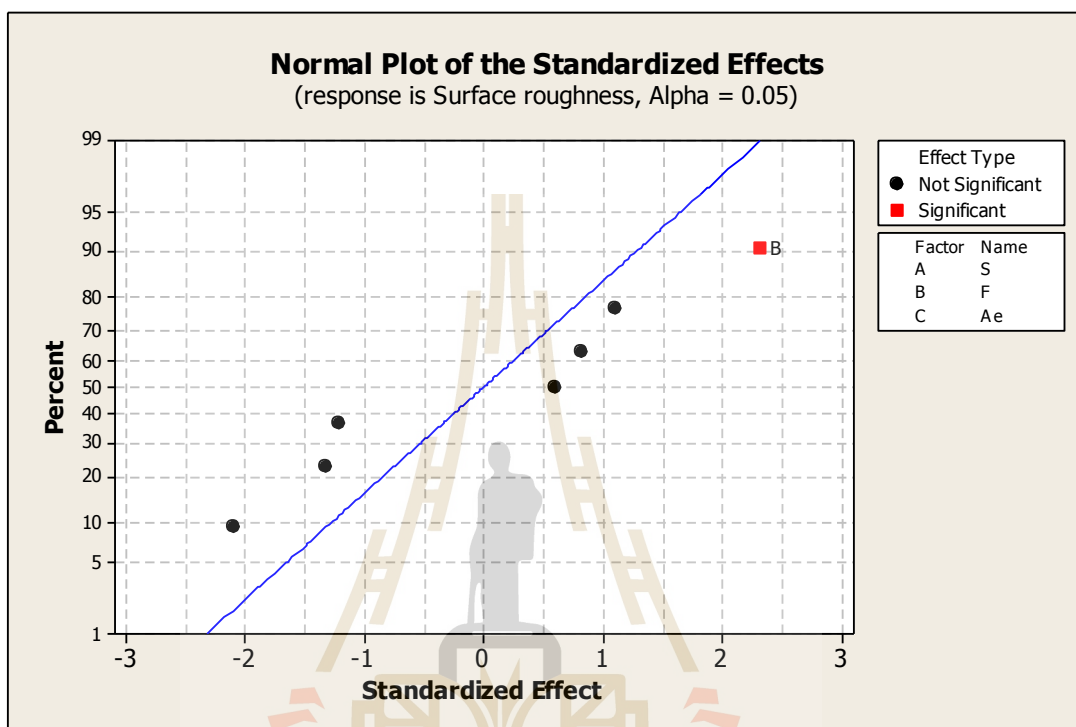
ตารางที่ 4.11 ค่าความหยาบผิวชิ้นงาน (Surface Roughness: Ra)

RunOrder	ค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ( $\mu\text{m}$ )										
	บริเวณก่อนจุดวัด T1					บริเวณหลังจุดวัด T3					ค่าเฉลี่ย
1	1.331	1.235	1.341	1.364	1.365	1.91	1.863	1.718	1.691	1.821	1.563
2	2.013	1.964	1.769	1.803	1.773	2.100	1.755	1.750	1.520	1.139	1.758
3	2.404	2.377	2.413	2.333	2.199	3.017	2.839	2.802	2.735	2.076	2.519
4	1.374	1.496	1.614	1.542	1.667	1.216	1.182	1.235	1.148	1.268	1.374
5	1.657	1.571	1.546	1.636	1.646	1.823	1.744	1.731	1.684	1.713	1.675
6	2.181	1.991	1.923	1.868	1.889	1.715	1.567	1.371	1.513	1.703	1.772
7	2.081	1.946	1.925	1.999	1.963	2.15	2.019	2.019	2.040	2.121	2.026
8	1.430	1.46	1.495	1.48	1.517	1.252	1.236	1.257	1.356	1.415	1.389
9	1.268	1.291	1.261	1.269	1.189	1.535	1.455	1.498	1.485	1.557	1.380
10	1.55	1.366	1.367	1.303	1.18	0.834	0.84	0.868	0.820	0.859	1.098
11	2.507	2.747	2.732	2.741	2.789	1.854	1.988	2.022	2.088	2.088	2.355
12	1.399	1.472	1.483	1.516	1.460	2.326	2.282	2.144	2.158	2.119	1.835
13	1.607	1.668	1.671	1.622	1.519	2.574	2.464	2.598	2.621	2.581	2.092
14	1.259	1.107	0.947	0.919	0.86	1.931	2.058	2.155	2.272	2.304	1.581
15	2.093	2.177	2.236	2.26	2.243	2.123	2.139	2.12	2.161	2.112	2.166
16	2.348	2.158	2.291	2.39	2.113	2.312	2.312	2.274	2.201	2.063	2.246

จากตารางที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่าความหยาบผิวของชิ้นงานบริเวณพื้นผิวก่อนถึงจุดวัด T1 จะมีค่าความหยาบผิวที่ต่ำกว่าบริเวณพื้นผิวหลังจุดวัด T3 ลักษณะการตัดเฉือนของการศึกษาค้นคว้านี้ เป็นการตัดเฉือนแบบหยาบ (Roughing) นับว่าเป็นเรื่องปกติที่จะได้ค่าความหยาบผิวที่สูง

#### 4.8 การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวของชิ้นงาน

การวิเคราะห์ความหยาบผิวของชิ้นงานได้นำค่าเฉลี่ยความหยาบผิวการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวดังที่จะได้แสดงต่อไปนี้



รูปที่ 4.19 ความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.19 แสดงความน่าจะเป็นแบบปกติของปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวชิ้นงานพบว่า ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวชิ้นงานคือ อัตราการป้อน (F) และสามารถตรวจสอบปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน Analysis of Variance (ANOVA) ในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล ค่าความ  
หยาบผิวชิ้นงาน

Analysis of Variance for Surface Roughness (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	1.09323	1.09323	0.36441	3.49	0.070
S	1	0.46356	0.46356	0.46356	4.43	0.068
F	1	0.55913	0.55913	0.55913	5.35	0.049
Ae	1	0.07054	0.07054	0.07054	0.67	0.435
2-Way Interactions	3	0.37818	0.37818	0.12606	1.21	0.368
S*F	1	0.18490	0.18490	0.18490	1.77	0.220
S*Ae	1	0.03816	0.03816	0.03816	0.37	0.562
F*Ae	1	0.15512	0.15512	0.15512	1.48	0.258
3-Way Interactions	1	0.12874	0.12874	0.12874	1.23	0.299
S*F*Ae	1	0.12874	0.12874	0.12874	1.23	0.299
Residual Error	8	0.83637	0.83637	0.10455		
Pure Error	8	0.83637	0.83637	0.10455		
Total	15	2.43652				

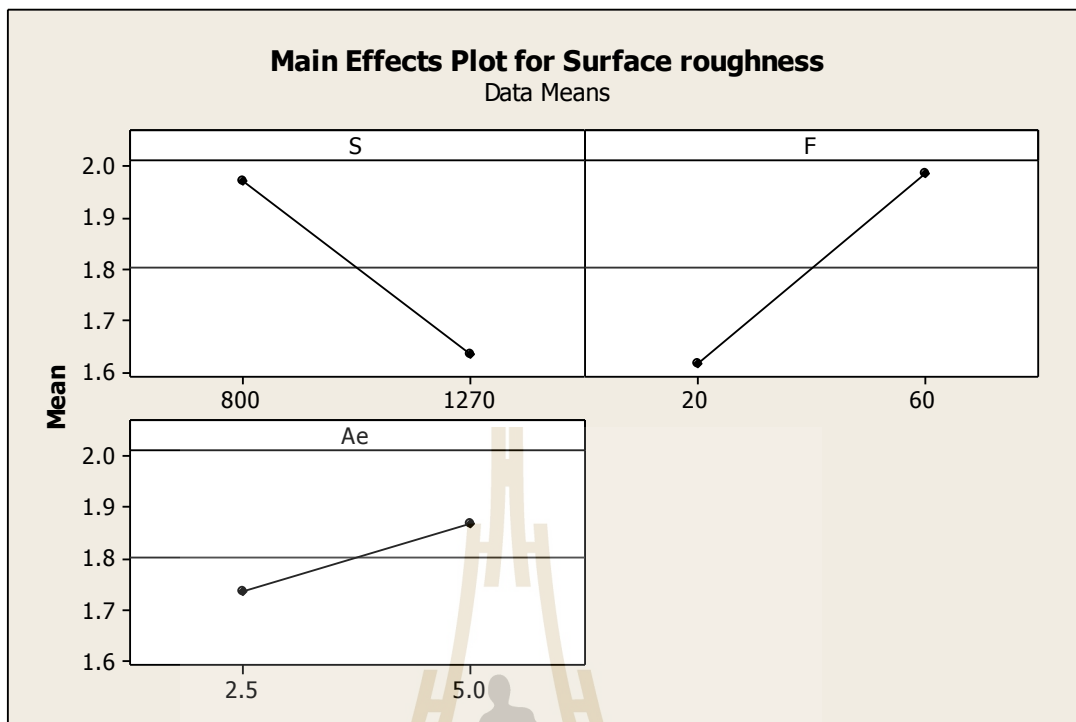
  

S = 0.323336	PRESS = 3.34548	
R-Sq = 65.67%	R-Sq(pred) = 0.00%	R-Sq(adj) = 35.64%

จากตารางที่ 4.12 ได้แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียลแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล ของค่าความหยาบผิวชิ้นงาน โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ( $\alpha=0.05$ ) สังเกตจากค่า P-value ของปัจจัยจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อความหยาบผิวชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวชิ้นงานมากที่สุดคือ

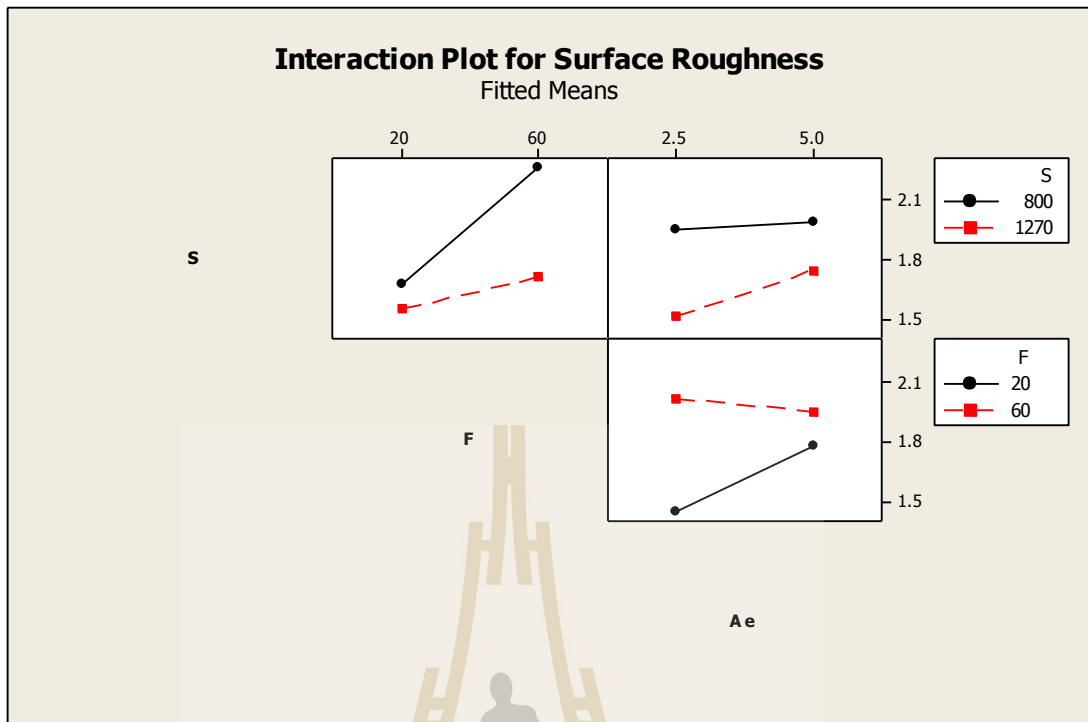
- 1) อัตราการป้อน (F)





รูปที่ 4.20 การประมาณอิทธิพลหลักของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.20 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลหลัก (Main effect plot) ที่จะส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน จากกราฟจะเห็นได้ว่าอัตราการป้อน (F) และระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) เมื่อระดับปัจจัยเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางบวก จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้น ส่วนความเร็วรอบ (S) เมื่อระดับปัจจัยเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางลบ จึงจะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานเพิ่มขึ้น ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน ที่ระดับนัยสำคัญ 95% คืออัตราการป้อน (F) โดยอัตราการป้อนเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 มิลลิเมตรต่อนาที จะส่งผลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่มากขึ้น



รูปที่ 4.21 การประมาณอิทธิพลร่วมของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.21 แสดงการวิเคราะห์อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย (Interaction plot) จากกราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้ 1) อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับอัตราการป้อน ( $S^*F$ ) พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 หรือ 1270 รอบต่อนาที ค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อนเพิ่มขึ้นจาก 20 เป็น 60 มิลลิเมตรต่อนาที

2) อิทธิพลร่วมระหว่างความเร็วรอบกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $S^*Ae$ ) พบว่าที่ความเร็วรอบ 800 หรือ 1270 รอบต่อนาที ค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร

3) อิทธิพลร่วมระหว่างอัตราการป้อนกับระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $F^*Ae$ ) พบว่าที่อัตราการป้อน 20 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจาก 2.5 เป็น 5 มิลลิเมตร และที่อัตราการป้อน 60 มิลลิเมตรต่อนาที ค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะป้อนลึกในแนวรัศมีลดลงจาก 5 เป็น 2.5 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.13 อภิปรายผลการศึกษาค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

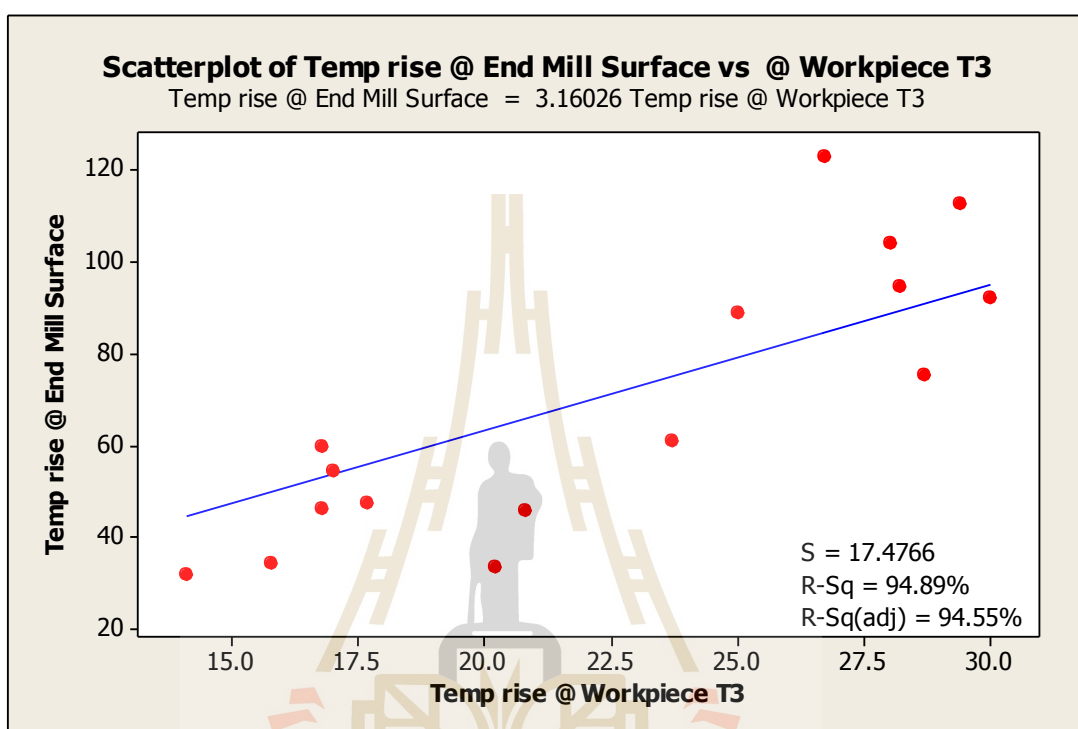
ค่าความหยาบผิวชิ้นงาน	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบ					
	S	F	Ae	S*F	S*Ae	F*Ae
ค่า Ra.		✓				

จากตารางอภิปรายผลที่ 4.13 การศึกษาค่าความหยาบผิวชิ้นงานสามารถสรุปได้ว่า อัตราการป้อนเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงาน เมื่อพิจารณาที่ความเร็วรอบ และระยะป้อนลึกคงที่ การตัดเฉือนที่มีอัตราการป้อนที่ต่ำชิ้นงานจะถูกตัดเฉือนซ้ำ ประกอบกับงานวิจันนี้ไม่เกิดการพอกติดของชิ้นงานบนคมตัด จึงส่งผลให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานมีค่าที่ดี



#### 4.9 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของผลการศึกษา

##### 4.9.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกับพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน

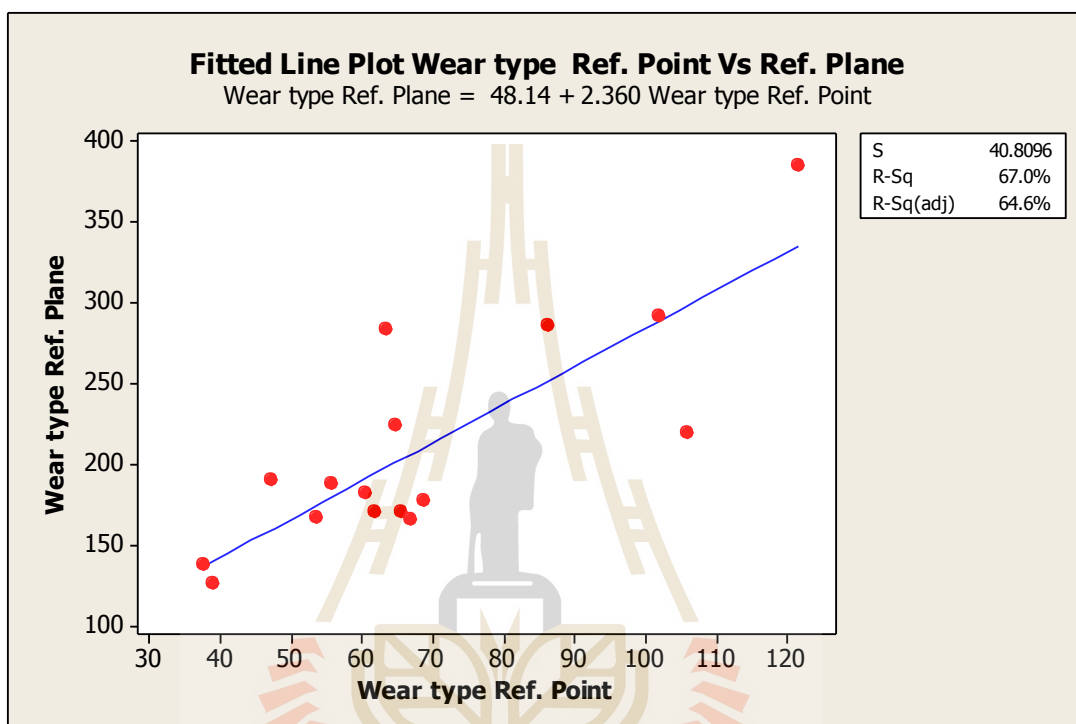


รูปที่ 4.22 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกับพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน

จากรูปที่ 4.22 ได้แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกับพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน โดยกำหนดให้แกน X เป็นอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน และแกน Y เป็นอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน จากแผนภูมิจะเห็นได้ว่า อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน และพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้ Temp rise @ End Mill Surface = 3.16020 Temp rise @ Workpiece T3 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 94.89%

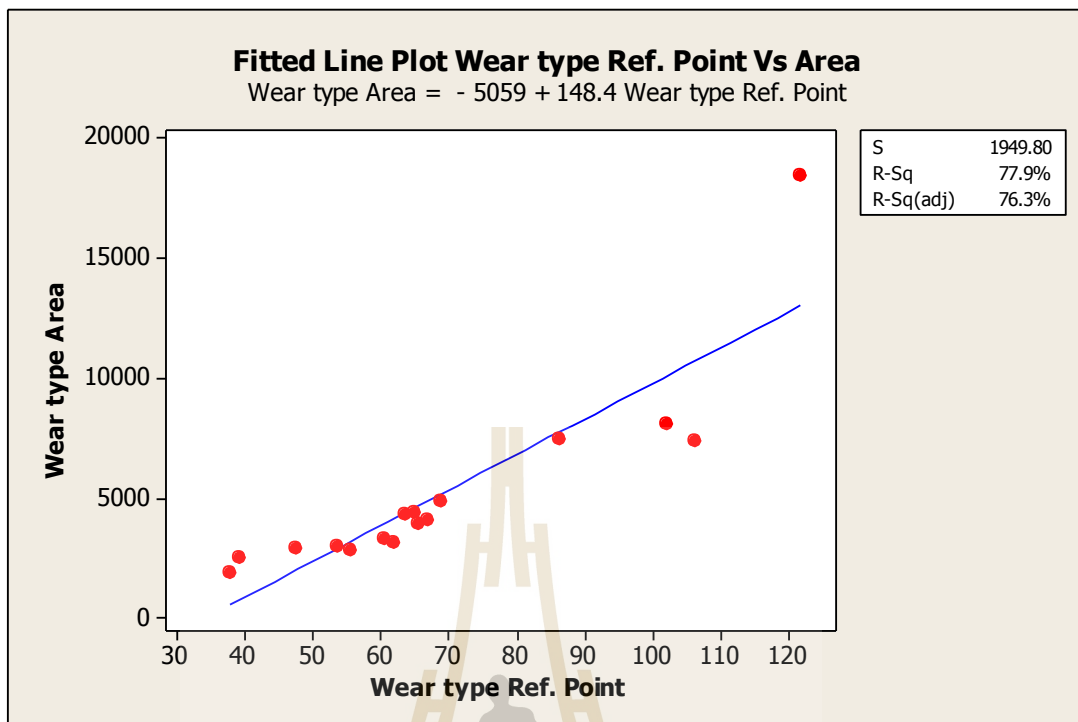
#### 4.9.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวิธีการวัดการสึกหรอ

วิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point, Ref. Plane และ Area ซึ่งจะทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลได้ดังนี้ 1) แบบ Ref. Point ต่อ แบบ Ref. Plane 2) แบบ Ref. Point ต่อ แบบ Area 3) แบบ Ref. Plane ต่อ แบบ Area



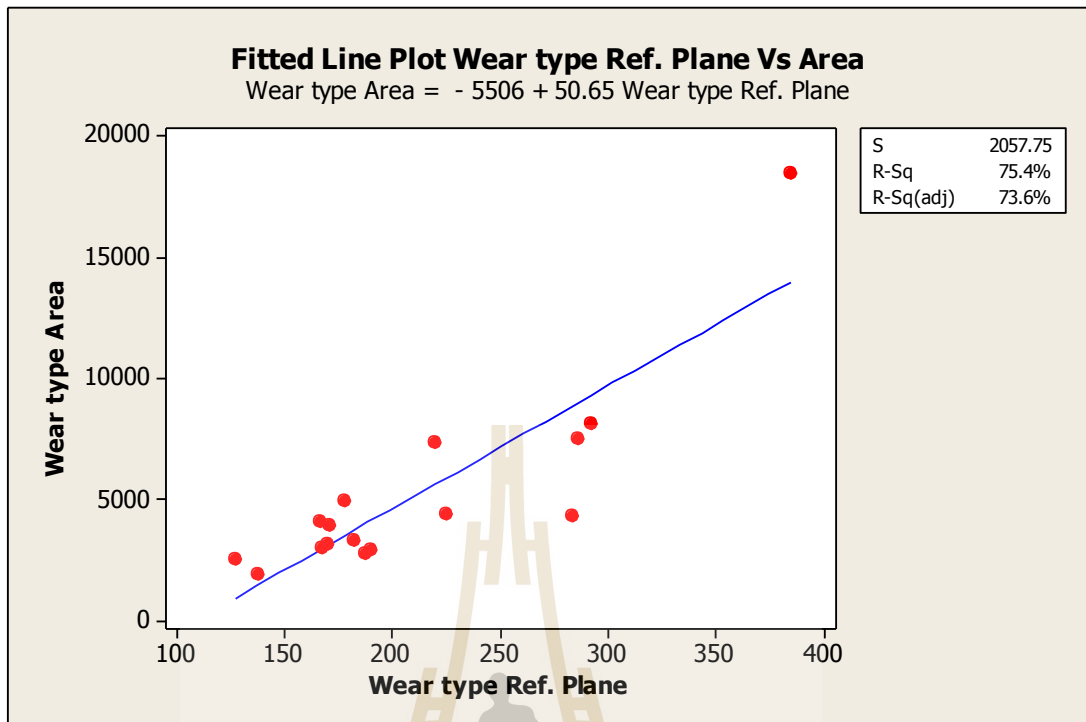
รูปที่ 4.23 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point กับ Ref. Plane

จากรูปที่ 4.23 ได้แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point กับ Ref. Plane โดยกำหนดให้แกน X เป็นการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point และแกน Y เป็นการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane จากแผนภูมิจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์กันของวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point กับรูปแบบ Ref. Plane คือ  $\text{Wear type Ref. Plane} = 48.14 + 2.360 \text{ Wear type Ref. Point}$  ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 67.0%



รูปที่ 4.24 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point กับ Area

จากรูปที่ 4.24 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point กับ Area โดยกำหนดให้แกน X เป็นการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point และแกน Y เป็นการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area จากแผนภูมิจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์กันของวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Point กับรูปแบบ Area คือ  $\text{Wear type Area} = - 5059 + 148.4 \text{ Wear type Ref. Point}$  ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 77.9%

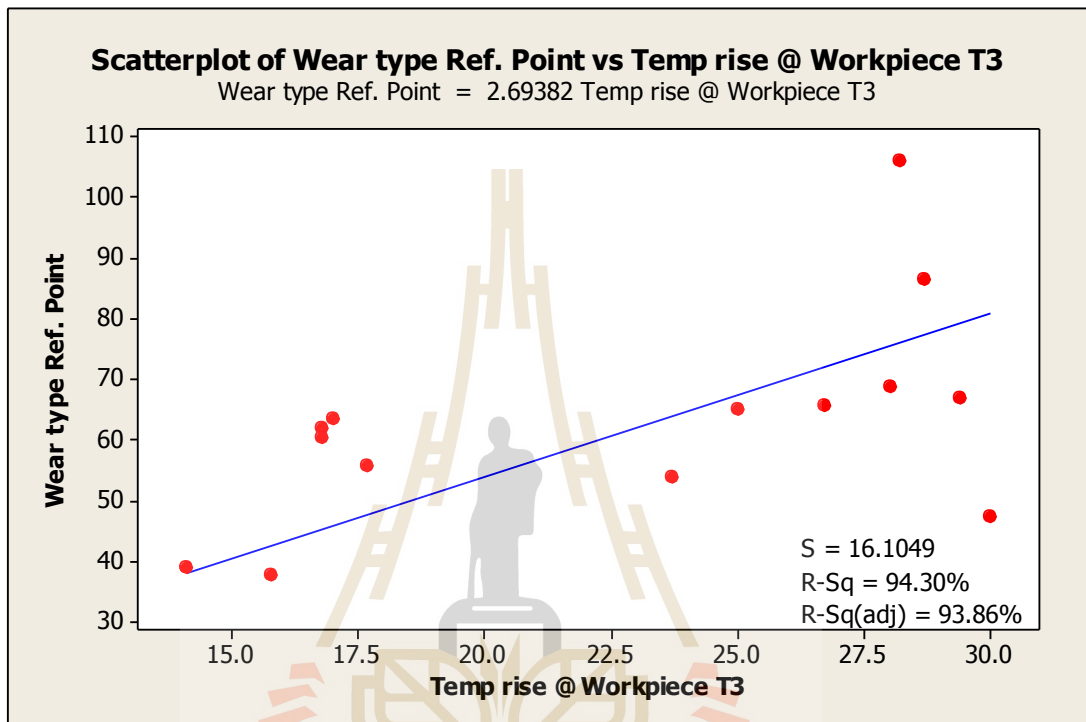


รูปที่ 4.25 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane กับ Area

จากรูปที่ 4.25 ได้แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Planet กับ Area โดยกำหนดให้แกน X เป็นการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane และแกน Y เป็นการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Area จากแผนภูมิจะเห็นได้ว่าฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์กันของวิธีการวัดการสึกหรอด้วยรูปแบบ Ref. Plane กับรูปแบบ Area คือ  $\text{Wear type Area} = - 5506 + 50.65 \text{ Wear type Ref. Plane}$  ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 75.4%

จากผลจากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของวิธีการวัดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนทั้ง 3 รูปแบบ พบว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับที่ดี และมีความน่าเชื่อถือที่สามารถนำไปวิเคราะห์ร่วมกับปัจจัยอื่นๆ ได้อย่างน่าเชื่อถือ

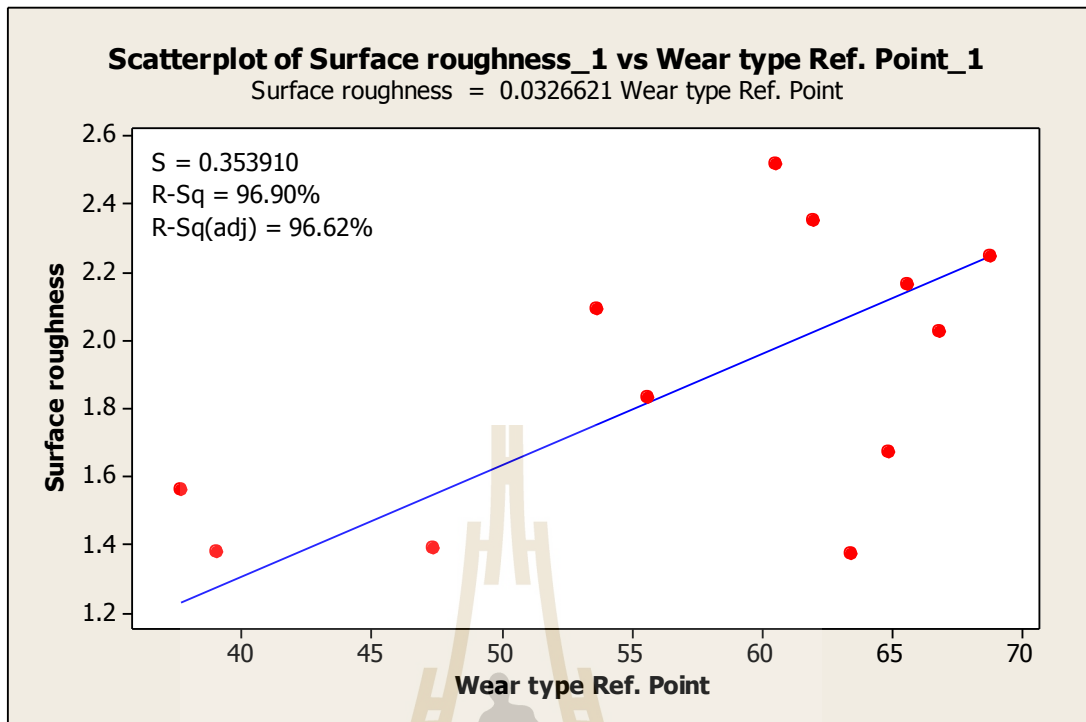
4.9.3 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนต่อการสึกหรอของ  
เครื่องมือตัดเฉือน และการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนต่อค่าความหนา  
ผิวชิ้นงาน



รูปที่ 4.26 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกับการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดด้วยวิธี Ref. Point

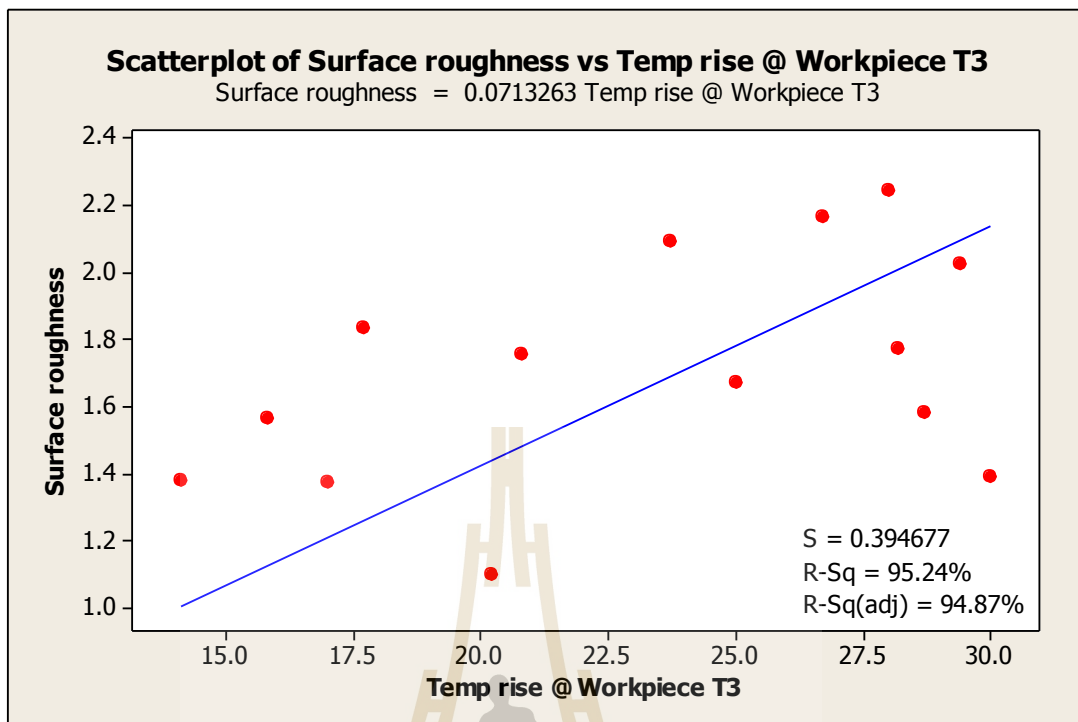
จากรูปที่ 4.26 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกับการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดด้วยวิธี Ref. Point จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน จะมีอิทธิพลต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนซึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันคณิตศาสตร์คือ  $\text{Wear type Ref. Point} = 2.69382 \text{ Temp rise @ Workpiece T3}$  ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 94.30% หรือกล่าวได้ว่าอัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานเพิ่มขึ้น





รูปที่ 4.27 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดด้วยวิธี Ref. Point กับค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.27 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนที่วัดด้วยวิธี Ref. Pint กับค่าความหยาบผิวชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนจะมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานซึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันคณิตศาสตร์คือ  $\text{Surface roughness} = 0.0326621 \text{ Wear type Ref. Point}$  ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 96.9% หรือกล่าวได้ว่าค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.28 แผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกับค่าความหยาบผิวชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.28 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานกับค่าความหยาบผิวชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน จะมีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวชิ้นงานซึ่งเป็นไปตามฟังก์ชันคณิตศาสตร์คือ  $\text{Surface roughness} = 0.0713263 \text{ Temp rise @ Workpiece T3}$  ที่ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) = 95.24% หรือกล่าวได้ว่าค่าความหยาบผิวชิ้นงานจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานเพิ่มขึ้น

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิจากการตัดเฉือน การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน และค่าความหยาบผิวชิ้นงาน จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน และความหยาบผิวชิ้นงานมีทิศทางที่เพิ่มขึ้น

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดโลหะ และหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือน ซึ่งผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้

- 5.1 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน
- 5.2 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน
- 5.3 การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน
- 5.4 ความหยابผิวของชิ้นงาน
- 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิจากการตัดเฉือน, การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน และความหยابผิวชิ้นงาน
- 5.6 ข้อเสนอแนะ
- 5.7 การประยุกต์ใช้งานวิจัยในอุตสาหกรรม

### 5.1 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

จากการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน AISI 1050 โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K พบว่า การทดลองทั้ง 16 การทดลอง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนจะมีค่าสูงสุด ณ จุดวัดที่ 3 (T3) รองลงมาคือจุดวัดที่ 2 (T2) และจุดวัดที่ 1 (T1) ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญคือ ระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) รองลงมาคือความเร็วรอบ (S) และยังมีอันตรกิริยาระหว่างอัตราการป้อนและระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมี ( $F \cdot Ae$ ) กับอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและอัตราการป้อน ( $S \cdot F$ )

### 5.2 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน

จากการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน ด้วยกล้องบันทึกภาพรังสีความร้อน FLIR E50 พบว่าอุณหภูมิจากการตัดเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนจะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งปลายคมตัดของเครื่องมือตัดเฉือน และยังพบอีกว่าอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนอย่างมีนัยสำคัญคือ ระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) รองลงมาคืออัตราการป้อน (F)

เมื่อนำอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน และอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน และบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือนจะมีความสัมพันธ์กันเป็นแบบเชิงเส้น โดยมีปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เหมือนกันคือ ระยะเวลาป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) และยังพบอีกว่าอุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

### 5.3 การสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือน

จากการศึกษาการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (OM) พบว่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนจะเกิดขึ้นที่ปลายของคมตัดเครื่องมือตัดเฉือน ซึ่งการเสียหายจะมีลักษณะเป็นแบบแตกหัก โดยรูปแบบการวัดการสึกหรอที่แตกต่างกันจะทำให้ทราบถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดการสึกหรอดังนี้

1) รูปแบบการวัดระยะการสึกหรอจากเส้นจำลองคมตัดทำมุม 45 องศา เข้าไปหาจุดที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด (Ref. Point) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้ออย่างมีนัยสำคัญคือ ความเร็วรอบ (S) รองลงมาเป็นอัตราการป้อน (F) และยังมีอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและอัตราการป้อน ( $S * F$ )

2) รูปแบบการวัดระยะการสึกหรอจากเส้นระนาบอ้างอิงเข้าไปหาจุดที่เกิดการสึกหรอมากที่สุด (Ref. Plane) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้ออย่างมีนัยสำคัญคือ ความเร็วรอบ (S) และยังมีอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและอัตราการป้อน ( $S * F$ ) กับอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและระยะป้อนลึกในแนวรัศมี ( $S * A_e$ )

3) รูปแบบการวัดขนาดการสึกหรอในรูปแบบพื้นที่ (Area) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้ออย่างมีนัยสำคัญคือ ความเร็วรอบ (S) และยังมีอันตรกิริยาระหว่างความเร็วรอบและอัตราการป้อน ( $S * F$ )

เมื่อนำค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อที่ได้จากการวัดการทั้งสามรูปแบบมาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ จะเห็นได้ว่าการวัดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อทั้งสามรูปแบบมีความสัมพันธ์กันเป็นอย่างดี และยังพบอีกว่าการวัดการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อไม่ว่าจะวัดด้วยวิธีการใดก็ตาม ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อการสึกหรอก็คือความเร็วรอบนั่นเอง

#### 5.4 ความหยาบผิวของชิ้นงาน

จากการศึกษาความหยาบผิวของชิ้นงานหลังจากกระบวนการตัดเนื้อ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความหยาบผิวชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญคือ อัตราการป้อน (F) และยังพบอีกว่าอัตราการสึกหรอของเครื่องมือนำมาซึ่งความหยาบผิวชิ้นงานมีแนวโน้มที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้รูปแบบการตัดเนื้อแบบหยาบ นับว่าเป็นเรื่องปกติสำหรับการตัดเนื้อชนิดนี้ที่จะให้ค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่มีค่าสูง

#### 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิจากการตัดเนื้อ, การสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ และความหยาบผิวชิ้นงาน

จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นอุณหภูมิจากการตัดเนื้อจะส่งผลกระทบต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อ และยังส่งผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานในลักษณะความสัมพันธ์เชิงเส้น

## 5.6 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า องค์ความรู้ที่ได้ในการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในกระบวนการกัดโลหะ จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในกระบวนการตัดเฉือนในรูปแบบอื่นๆ หรือแม้กระทั่งใช้เป็นแนวทางในการศึกษาอุณหภูมิจากการตัดเฉือนในกระบวนการกัดกับวัสดุชนิดอื่นๆ และจากการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยแนะนำให้นำผลการทดลองที่ได้จากการศึกษานี้ไปวิเคราะห์หาอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ณ จุดตัดเฉือนด้วยวิธีการไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อการพัฒนาวงการอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนสืบต่อไป

## 5.7 การประยุกต์ใช้งานวิจัยในอุตสาหกรรม

สำหรับกระบวนการกัดโลหะเกรด AISI 1050 ด้วยเครื่องมือตัดเฉือนแบบไฮสปีดเอ็นมิลล์ 4 คมตัด ที่ถูกเคลือบผิวด้วย TiCN ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สำหรับการกัดแบบหยาบ ผู้วิจัยขอแนะนำพารามิเตอร์การตัดเฉือนดังต่อไปนี้ ถ้าต้องการลดอุณหภูมิจากการตัดเฉือนควรเลือกใช้ความเร็วรอบ (S) ที่ 800 รอบต่อนาที อัตราการป้อน (F) ที่ 20 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) ที่ 2.5 มิลลิเมตร แต่ถ้าต้องการลดอัตราการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉือนควรเลือกใช้ความเร็วรอบ (S) ที่ 800 รอบต่อนาที อัตราการป้อน (F) ที่ 60 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) ที่ 5 มิลลิเมตร และถ้าต้องการค่าความหยาบผิวชิ้นงานที่ดีควรเลือกใช้ความเร็วรอบ (S) ที่ 1270 รอบต่อนาที อัตราการป้อน (F) ที่ 20 มิลลิเมตรต่อนาที ระยะป้อนลึกในแนวรัศมี (Ae) ที่ 2.5 มิลลิเมตร ซึ่งระยะป้อนลึกในแนวแกน (Ap) ควรอยู่ที่ 10 มิลลิเมตร

## รายการอ้างอิง

- เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป (2555). กระบวนการตัดเฉือนด้วยเครื่องมือกล. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 301 หน้า.
- เกษร หล่อบุญสม (2554). อิทธิพลของตัวแปรในการกัดด้วยเม็ดมีดคาร์ไบด์เคลือบผิวไทเทเนียม อลูมิเนียมไนไตรด์บนเหล็กหล่อขาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการพัฒนางานอุตสาหกรรม ภาควิชาอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์. 117 หน้า.
- คมสัน ภาชนเดช CNC .เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 431313 ปฏิบัติการขึ้นรูปโลหะ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 20 หน้า.
- จิราวัลย์ จิตรถเวช (2552). การวางแผนและการวิเคราะห์การทดลอง. สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์. 559 หน้า.
- ชาญณรงค์ สายแก้ว (2557). สถิติและการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. พิมพ์ครั้งที่ 3. 748 หน้า.
- ชาติ ตระการกุล (2539). เทคโนโลยีซีเอ็นซี. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 339 หน้า.
- นวกัทร่า หนูนา และทวีพล ชื้อสัตย์ (2556). การวัดและเครื่องมือวัด. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 310 หน้า.
- ปนัดดา นิรนาทลำพองศ์ และคณะ (2547). การศึกษาในงานอุตสาหกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 316 หน้า.
- พิพัฒน์ อมตฉายา (2556). การวัดและเครื่องมือวัด. ศูนย์ปฏิบัติการผลิตสิ่งพิมพ์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. 676 หน้า.
- ฮอว์มัน ดับบลิว พอลแลค, เทอร์เรนจ์ โรบินสัน ; เรียบเรียงโดย สมเกียรติ บุรณเจริญ (2537). ทฤษฎีและการใช้งาน CNC. ซีเอ็ดดูเคชั่น. 384 หน้า.
- คู่มือการสร้างงาน CAD 2D/3D และ CAM 2.5 axial. บริษัท คอร์ปอเรชั่น เทคโนโลยี โซลูชั่น จำกัด. 239/49 ถนนกาญจนาภิเษก แขวงดอกไม้วัด เขตประเวศ กรุงเทพมหานคร. 233 หน้า
- คู่มือ Carbon Steel S50C. บริษัท ไทย เยอรมันสเปเชียลสตีลเซ็นเตอร์ จำกัด. 234/40-42 ถนนสุขสวัสดิ์ ต.ในคลองบางปลากด อ.พระสมุทรเจดีย์ จ.สมุทรปราการ.

## รายการอ้างอิง (ต่อ)

- Abdil, K., Yahya, I., M. Cemal, C., Salih, C., Kadir Ö. (2015). Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting. **Journal Sensors** Vol.15 (1): 1274-1291.
- Ali, M., Ismail, L. (2016). Thermal analysis of micro milling titanium alloy Ti-6Al-4V. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol.229: 659-667.
- Banyat, P. (2012). The study of factor machining milling parts with cutting tool to cut through the sharpening process with the renewal of the cutting edged. **Silpakorn University Thailand**: 104.
- Carlos, H. L., Lincoln C. B., and Sergio L.F. (2013). Monitoring the temperature of the milling process using infrared camera. **Scientific Research and Essays**. Vol. 8(23): 1112-1120
- Dewesa, R.C., Nga, E., Chuaa, K.S., Newtona, P.G., Aspinwal, D.K., (1999). Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol.92-930: 293-301.
- Dinca, C., Lazoglua, I., Serpenguzel, A. (2007). Analysis of thermal fields in orthogonal machining with infrared imaging. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol.198: 147-154.
- Groover, M P. (2007). Fundamentals of modern manufacturing. **Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons**. 3rd ed: 1022.
- Lincoln, C. B., Reginaldo T. C., Alessandro, R. (2008). Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl)N-coated and PcBN-tipped tools. **Journal of Materials Processing Technology** Vol.199: 234-244.
- Paramet, B., Charnnarong, S. (2013). Quality Development and Improvement in Mold Making Industry with Designed of Experiments. **Graduate Research Conference KKU**.
- Takeshi, Y., Takayuki, O., Hiroyuki S. (2013). Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol.70: 63-69.
- Zgorniak, P., Grdulska, A. (2012). Investigation of Temperature Distribution during Milling Process of Az91hp Magnesium Alloys. **Mechanics and Mechanical Engineering**. Vol.16 (1): 33-40.



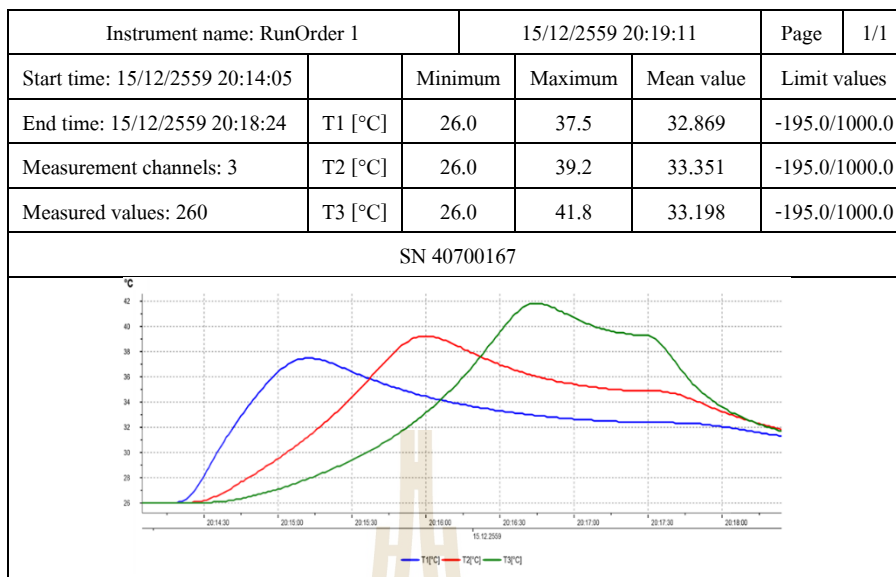


ภาคผนวก ก

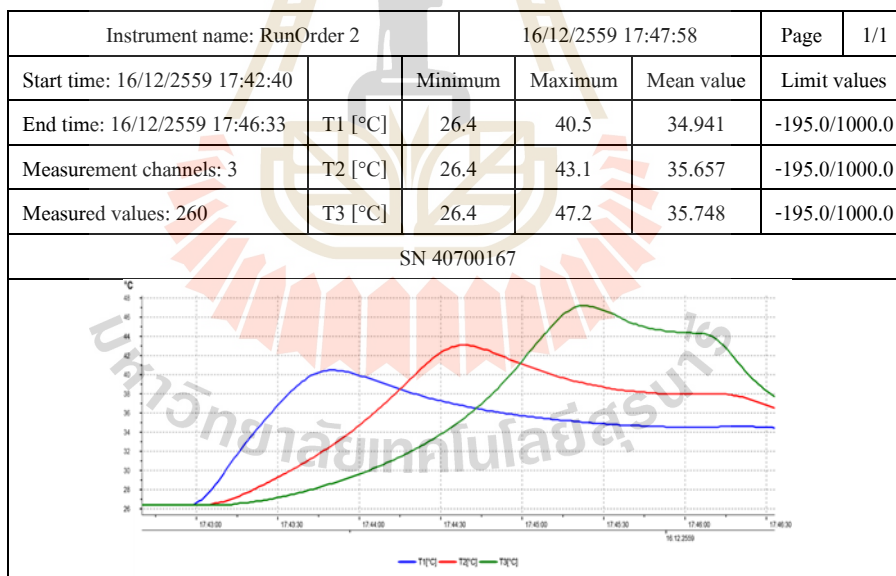
ข้อมูลจากเครื่องบันทึกอุณหภูมิ TESTO 146T4

อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

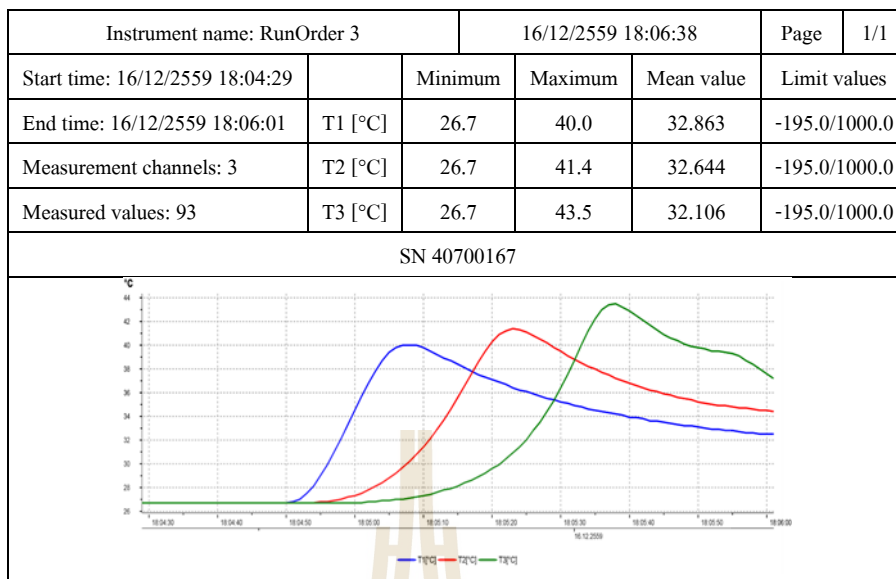
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



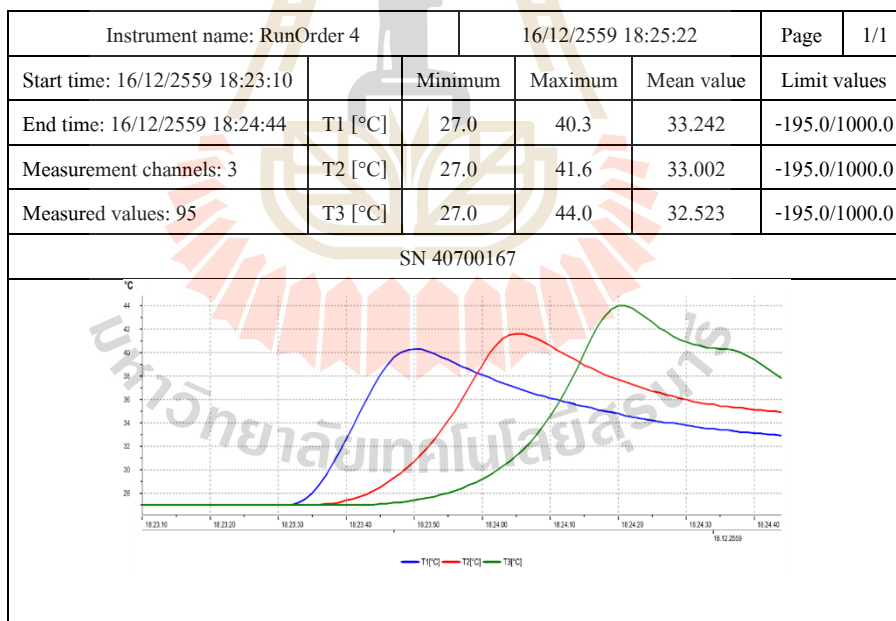
รูปที่ ก.1 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 1



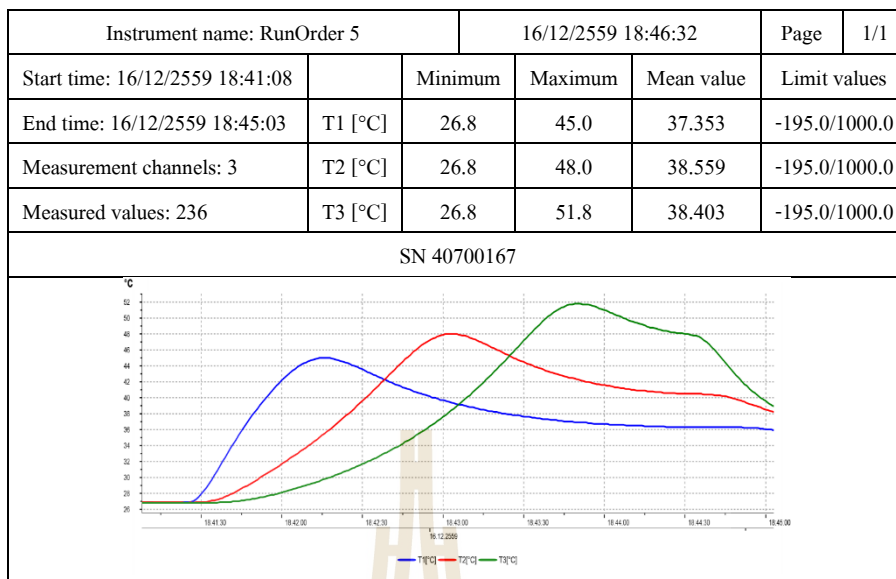
รูปที่ ก.2 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 2



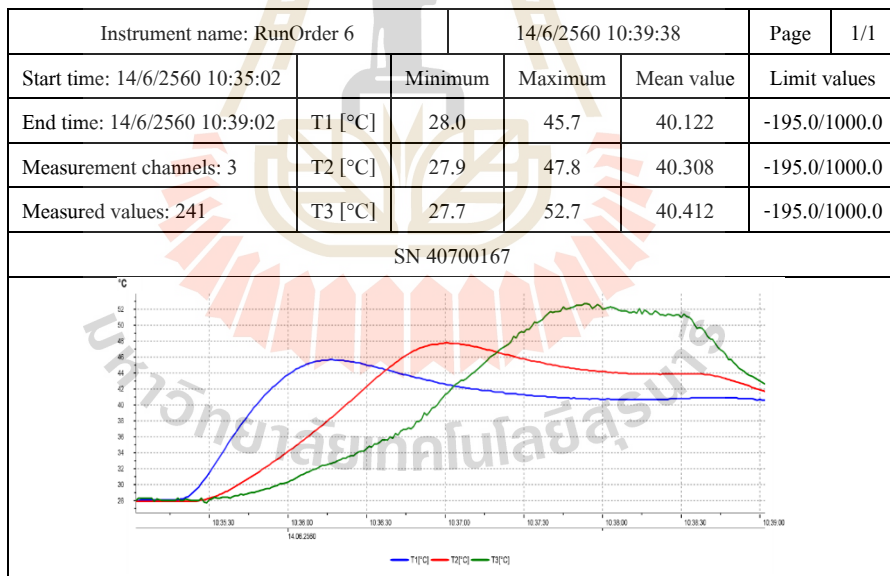
รูปที่ ก.3 อุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 3



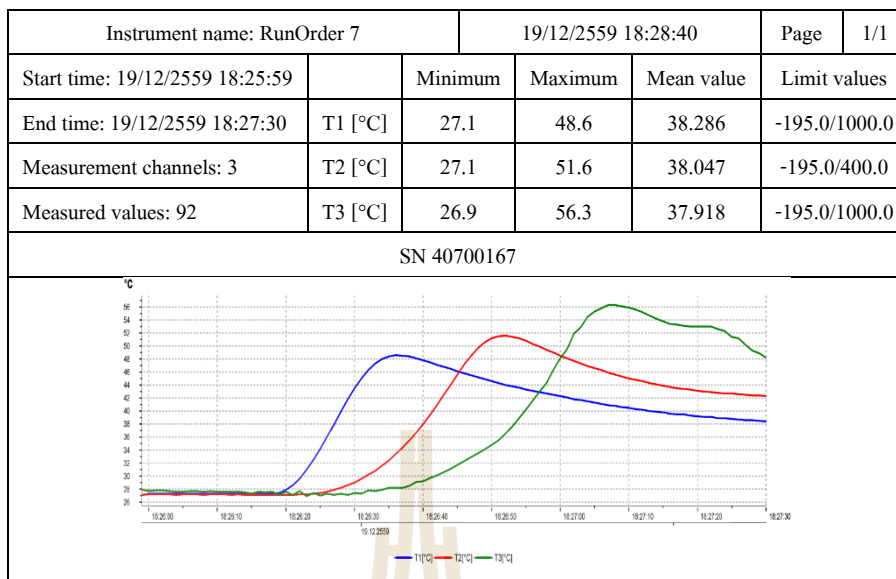
รูปที่ ก.4 อุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 4



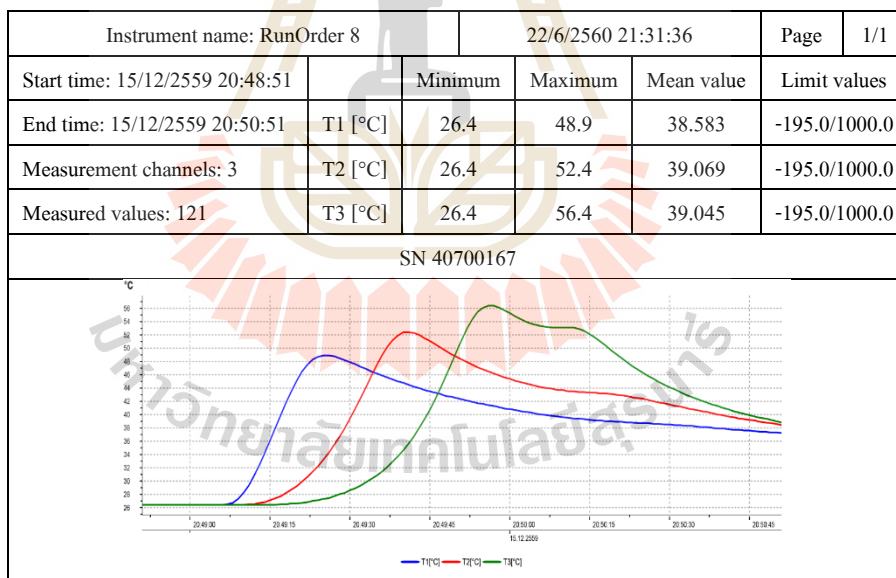
รูปที่ ก.5 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 5



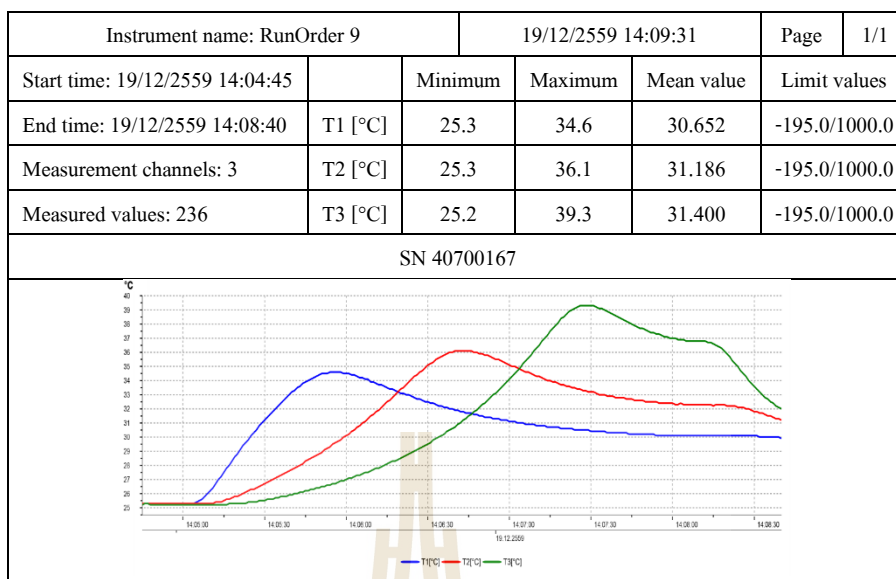
รูปที่ ก.6 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 6



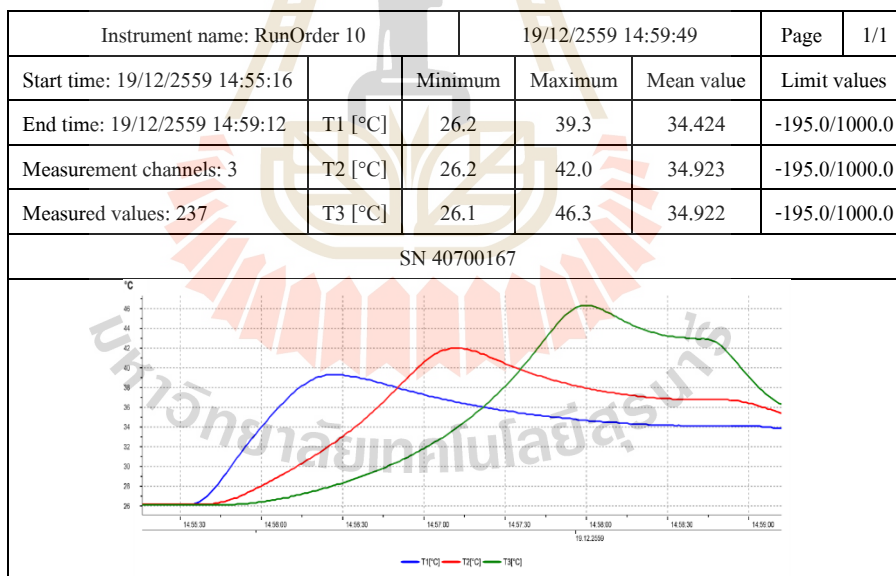
รูปที่ ก.7 อุณหภูมิจากการตัดเงื่อนไขที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 7



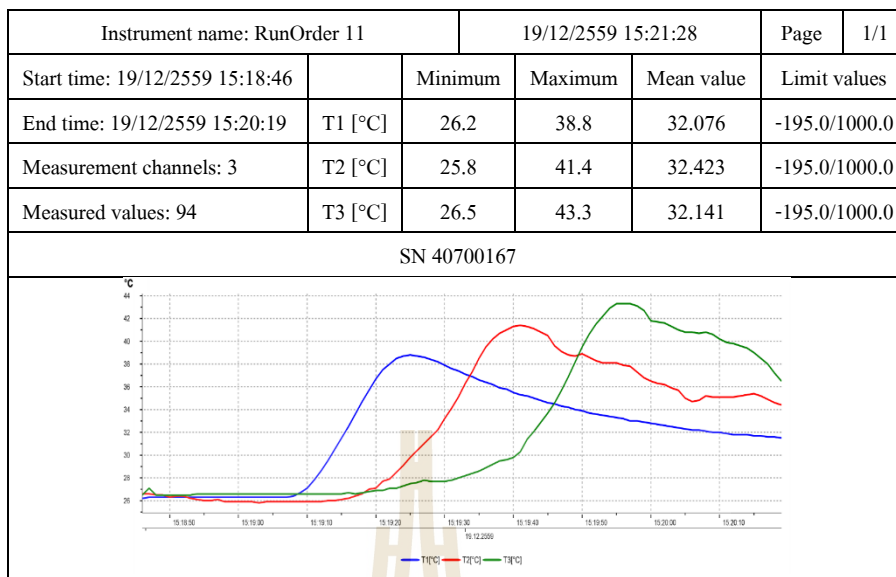
รูปที่ ก.8 อุณหภูมิจากการตัดเงื่อนไขที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 8



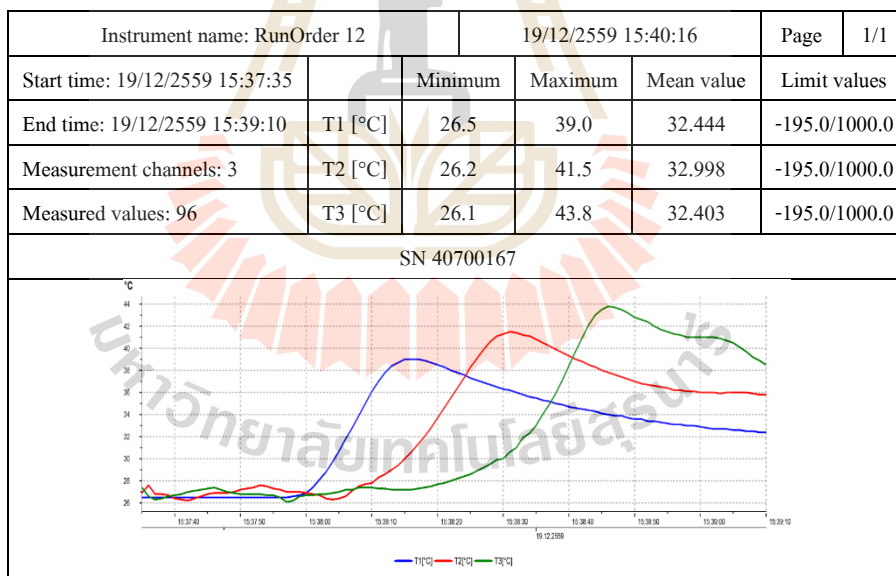
รูปที่ ก.9 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 9



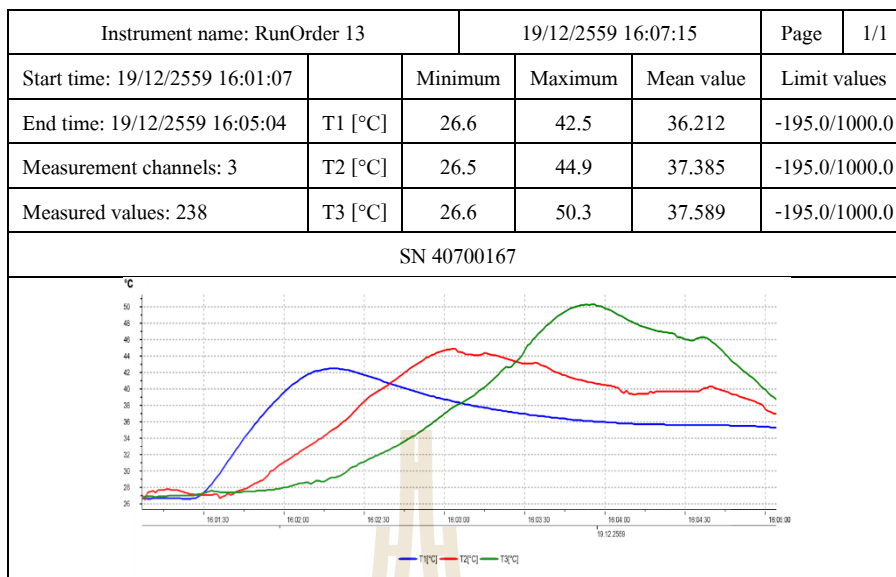
รูปที่ ก.10 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 10



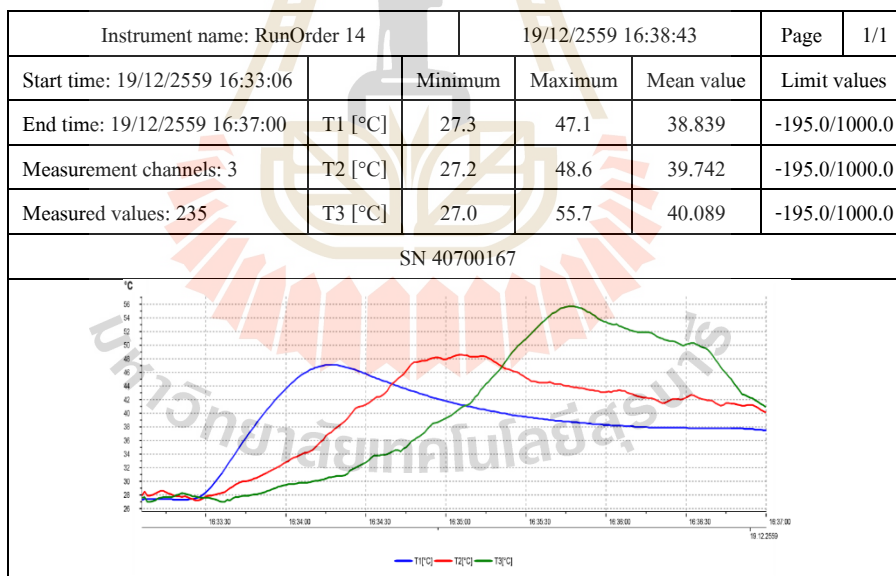
รูปที่ ก.11 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 11



รูปที่ ก.12 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 12

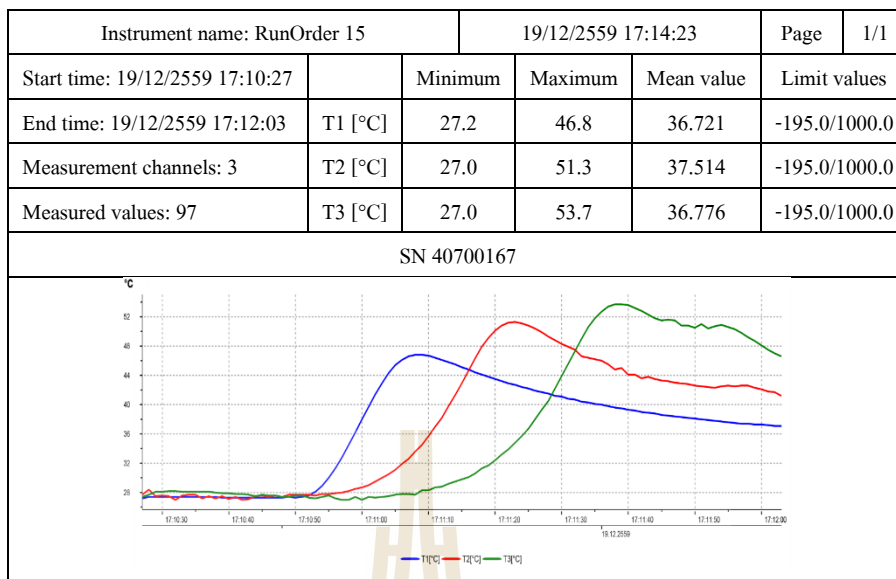


รูปที่ ก.13 อุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 13

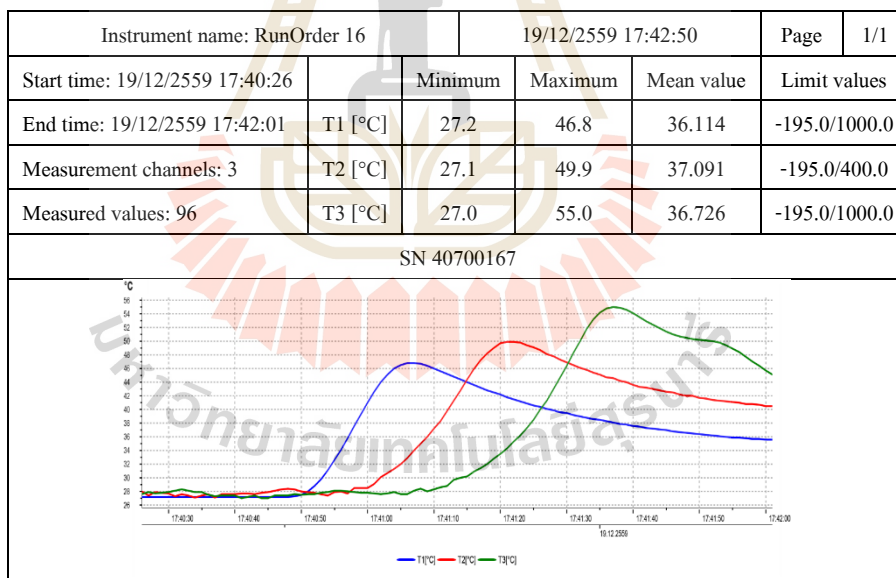


รูปที่ ก.14 อุณหภูมิจากการตัดเนื้อที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 14





รูปที่ ก.15 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 15



รูปที่ ก.16 อุณหภูมิจากการตัดเฉือนที่เกิดขึ้นในชิ้นงานการทดลองที่ 16

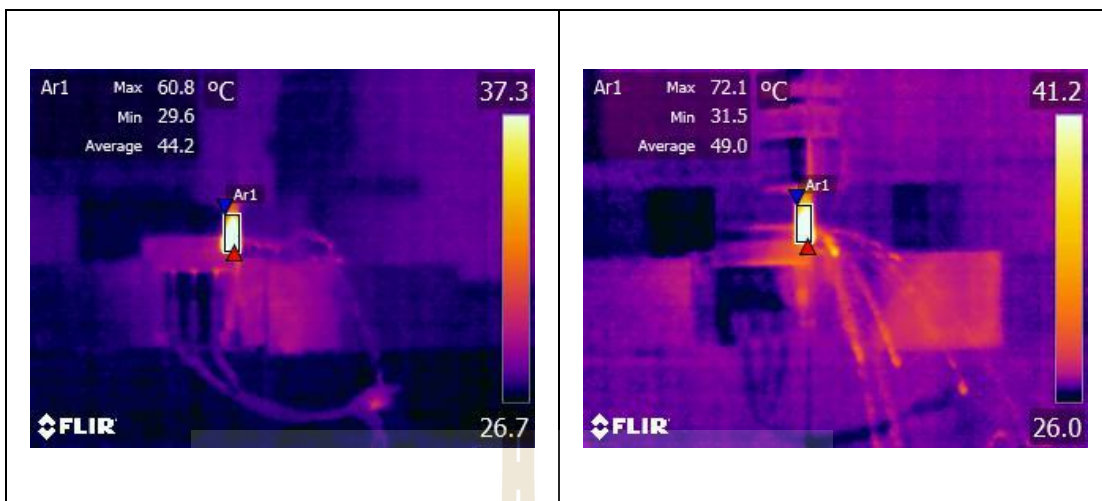


ภาคผนวก ข

ภาพถ่ายรังสีความร้อน

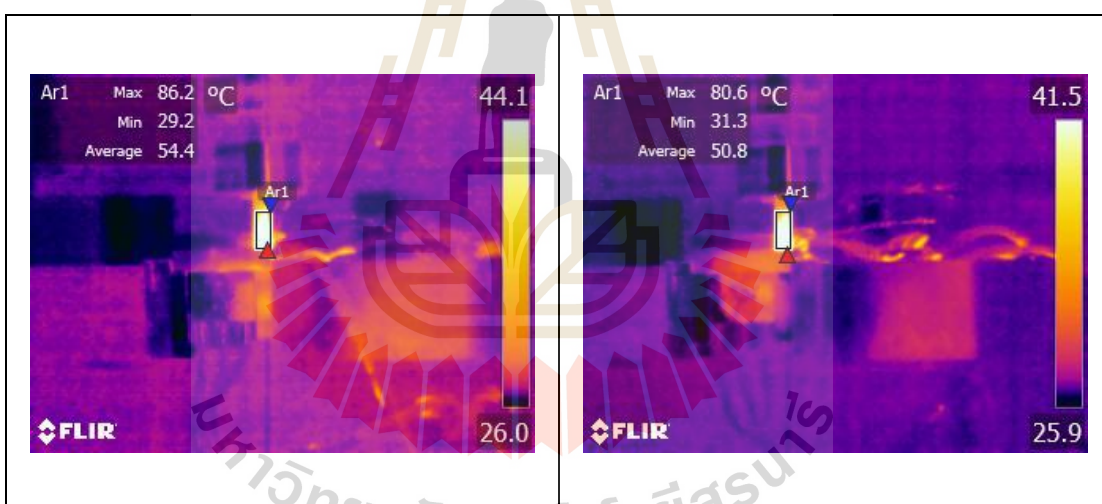
อุณหภูมิจากการตัดเฉือนสูงสุดที่เกิดบนพื้นผิวเครื่องมือตัดเฉือน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



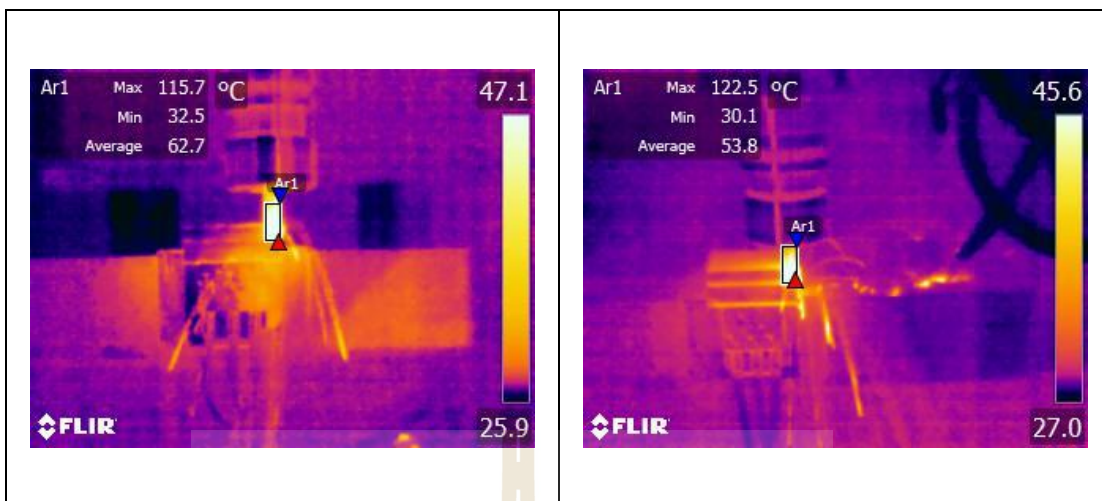
รูปที่ ข.1 RunOrder 1

รูปที่ ข.2 RunOrder 2



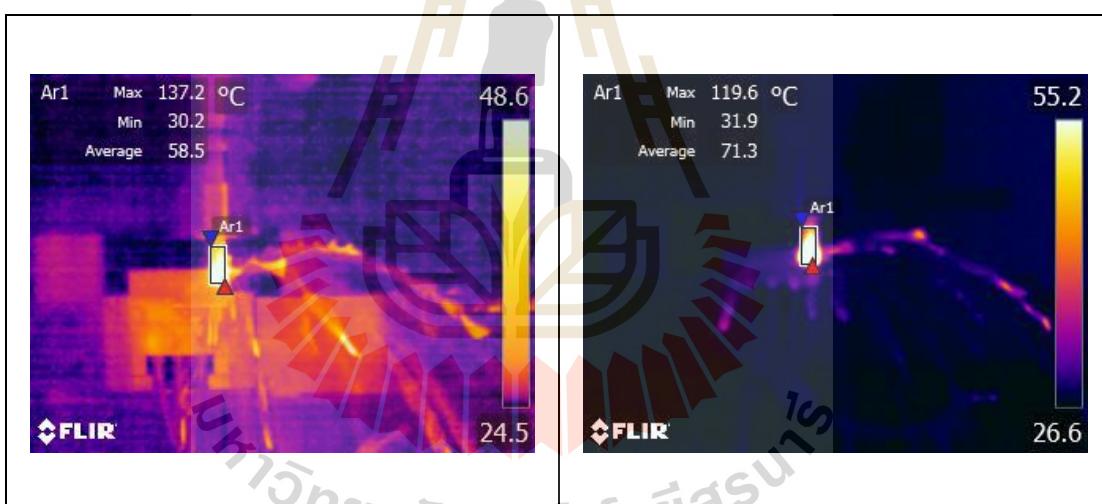
รูปที่ ข.3 RunOrder 3

รูปที่ ข.4 RunOrder 4



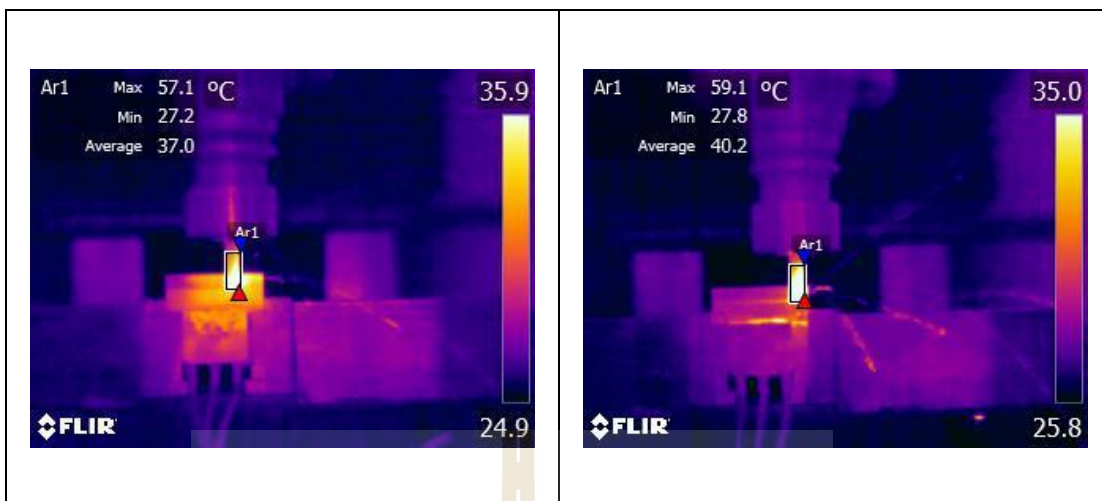
รูปที่ ข.5 RunOrder 5

รูปที่ ข.6 RunOrder 6



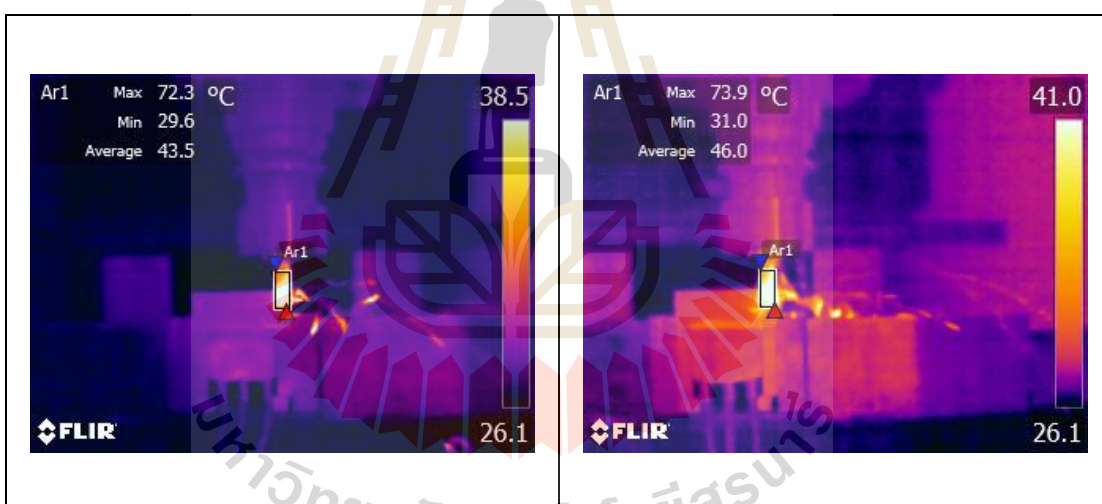
รูปที่ ข.7 RunOrder 7

รูปที่ ข.8 RunOrder 8



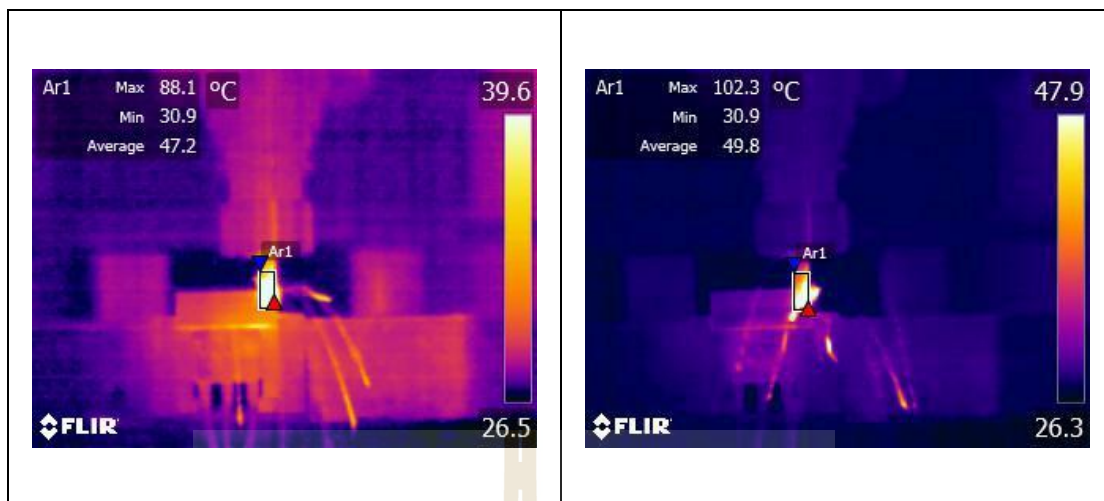
รูปที่ ข.9 RunOrder 9

รูปที่ ข.10 RunOrder 10



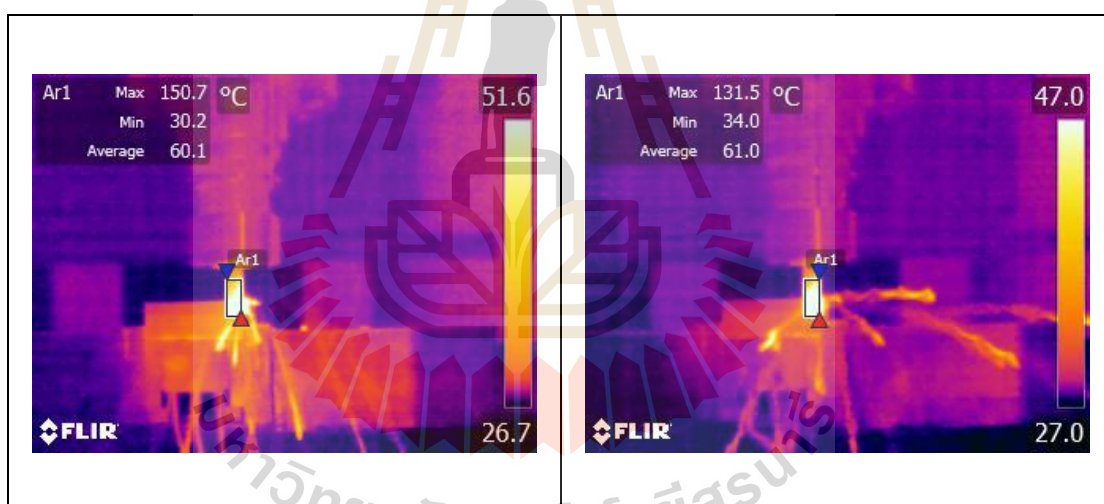
รูปที่ ข.11 RunOrder 11

รูปที่ ข.12 RunOrder 12



รูปที่ ข.13 RunOrder 13

รูปที่ ข.14 RunOrder 14



รูปที่ ข.15 RunOrder 15

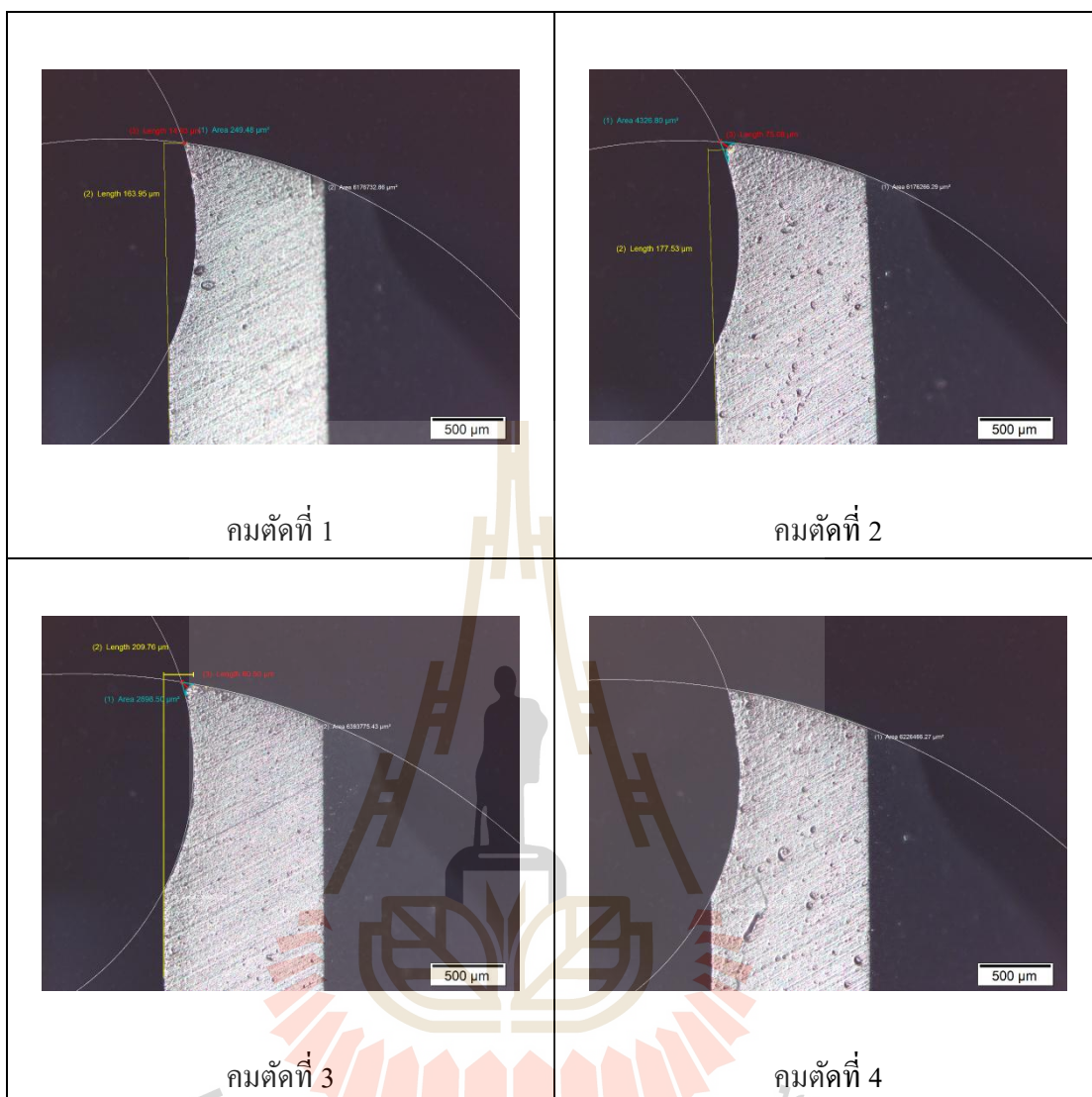
รูปที่ ข.16 RunOrder 16



ภาคผนวก ค

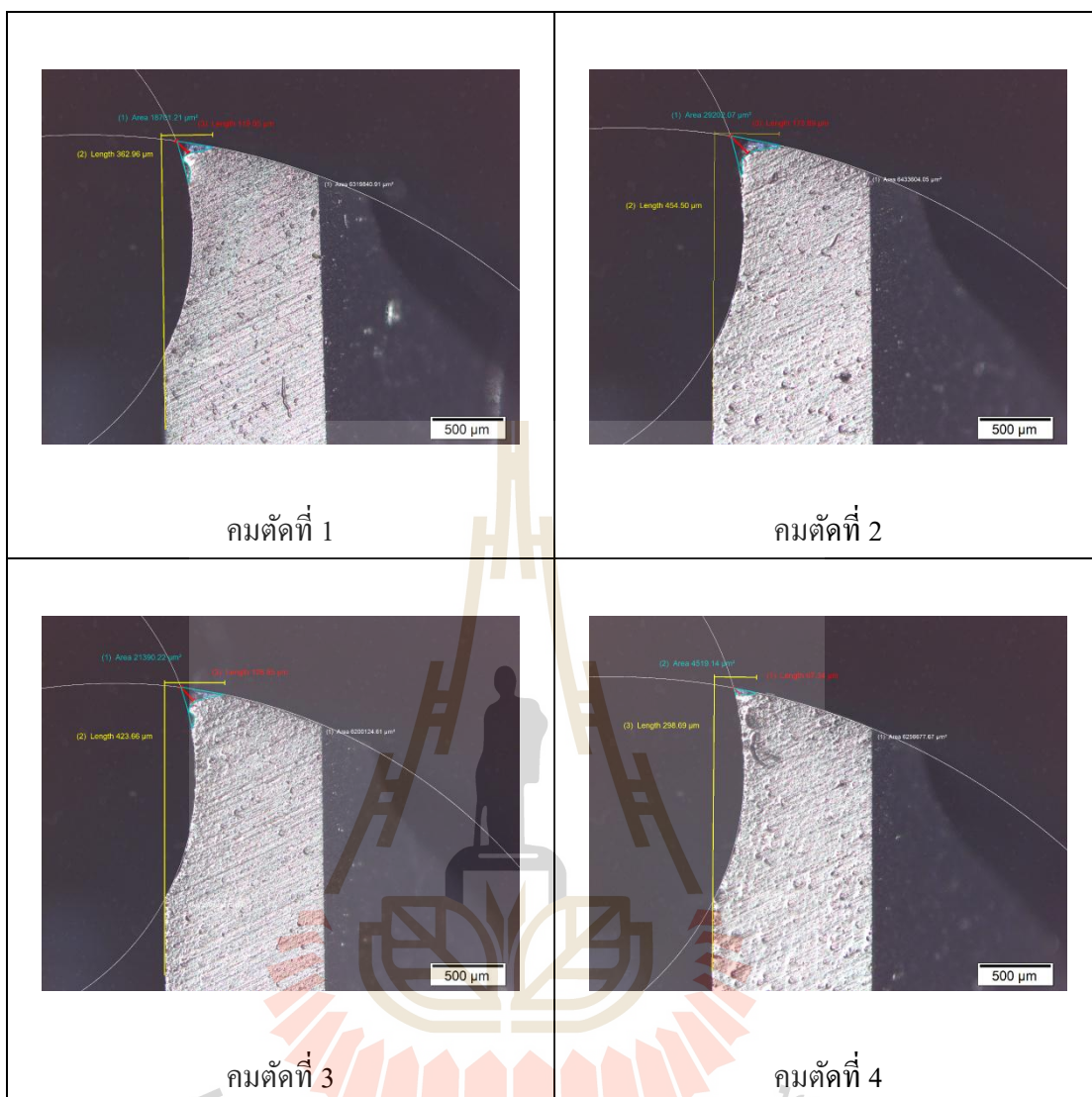
ภาพถ่ายกำลังขยาย 5 เท่า ของคมตัดเครื่องมือตัดเนื้อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

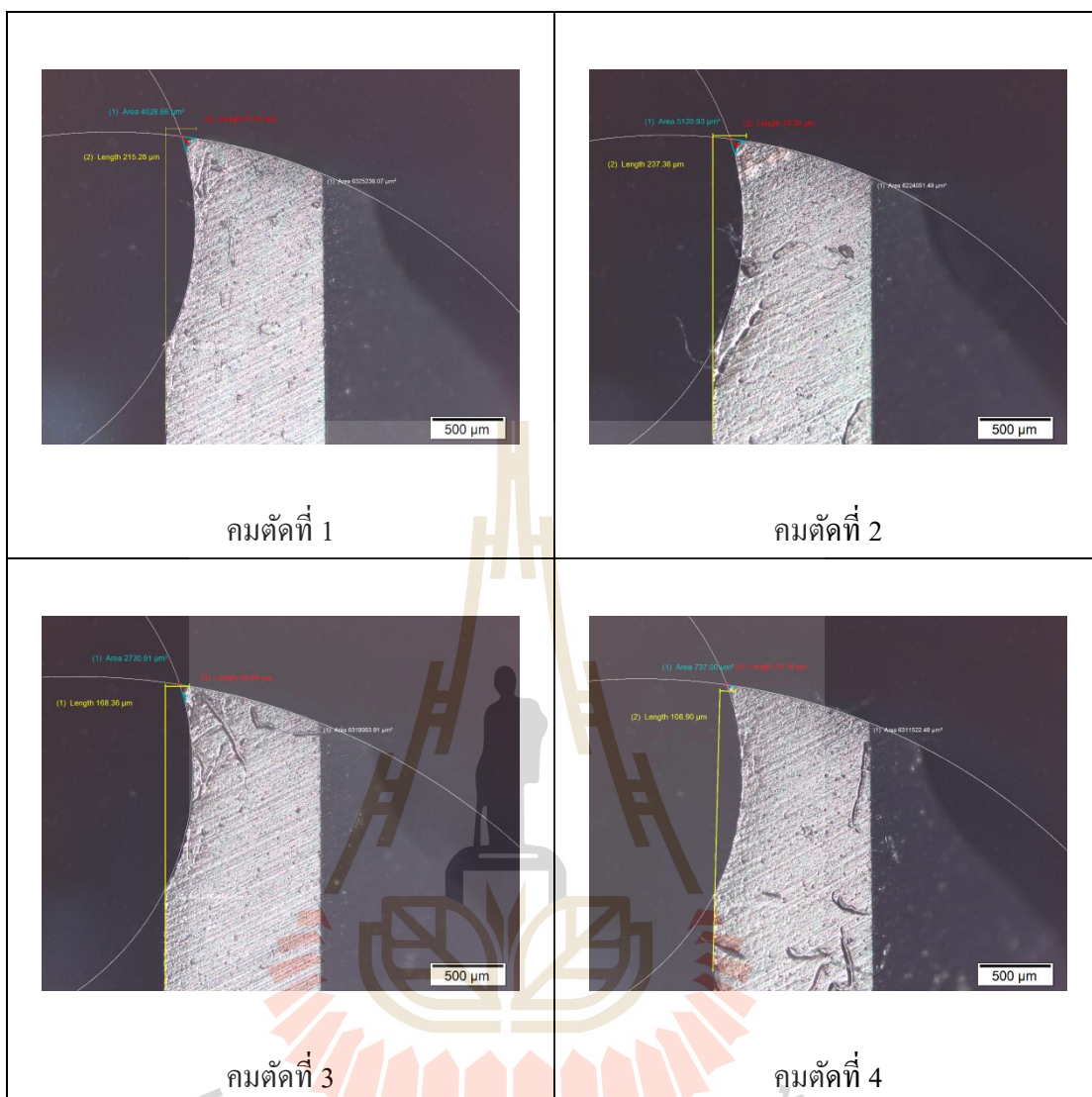


รูปที่ ค.1 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 1

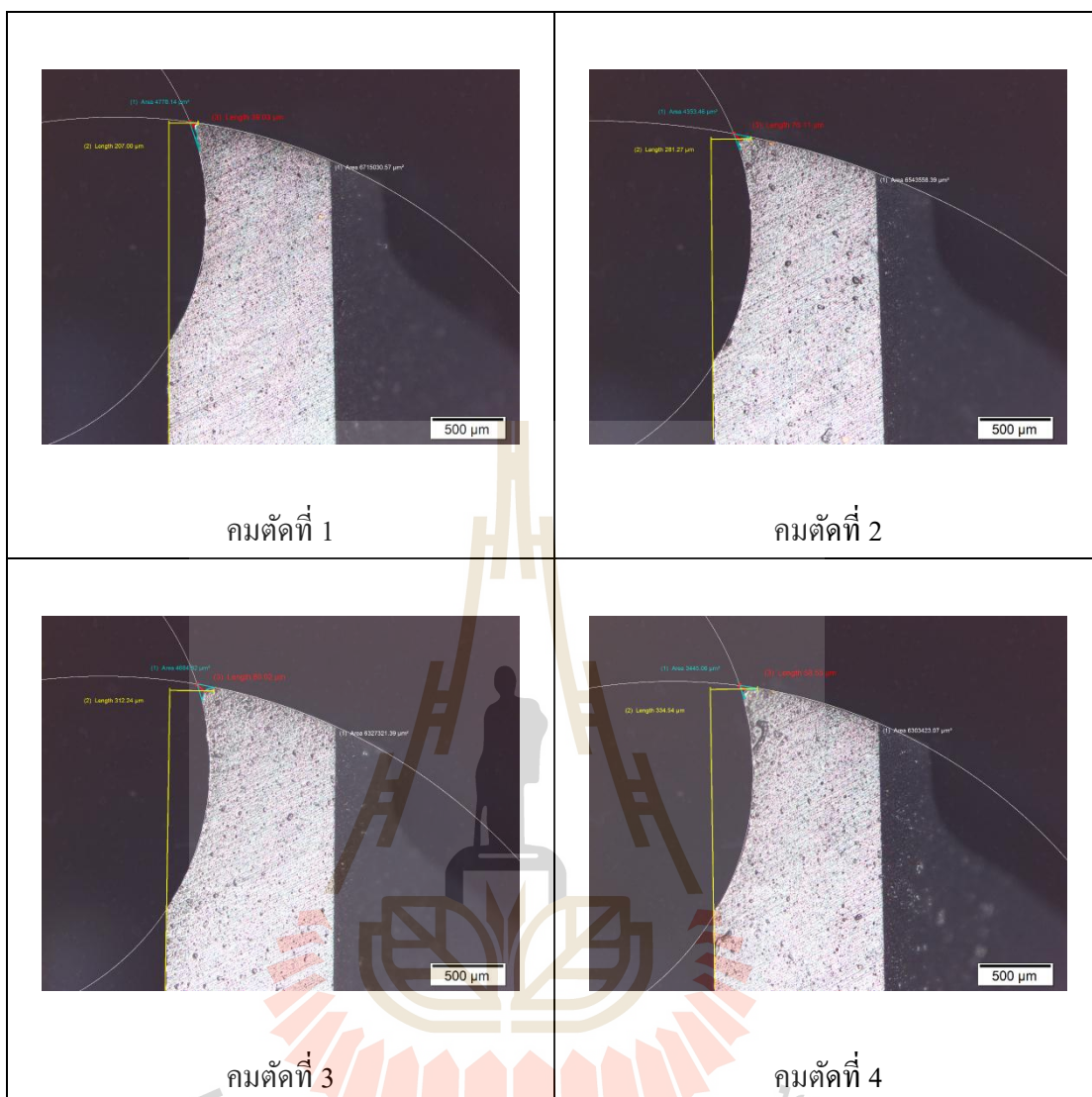




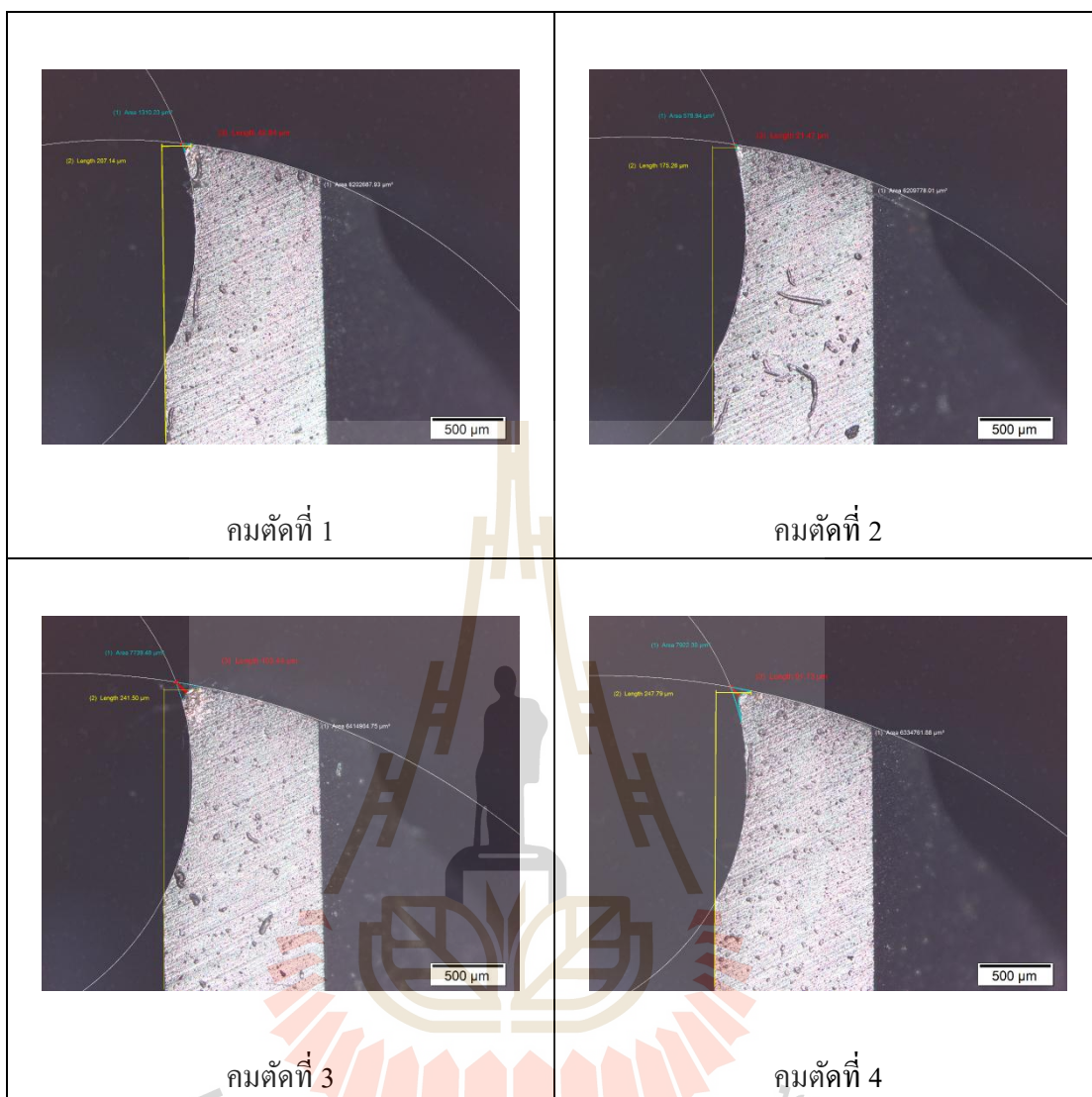
รูปที่ ค.2 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 2



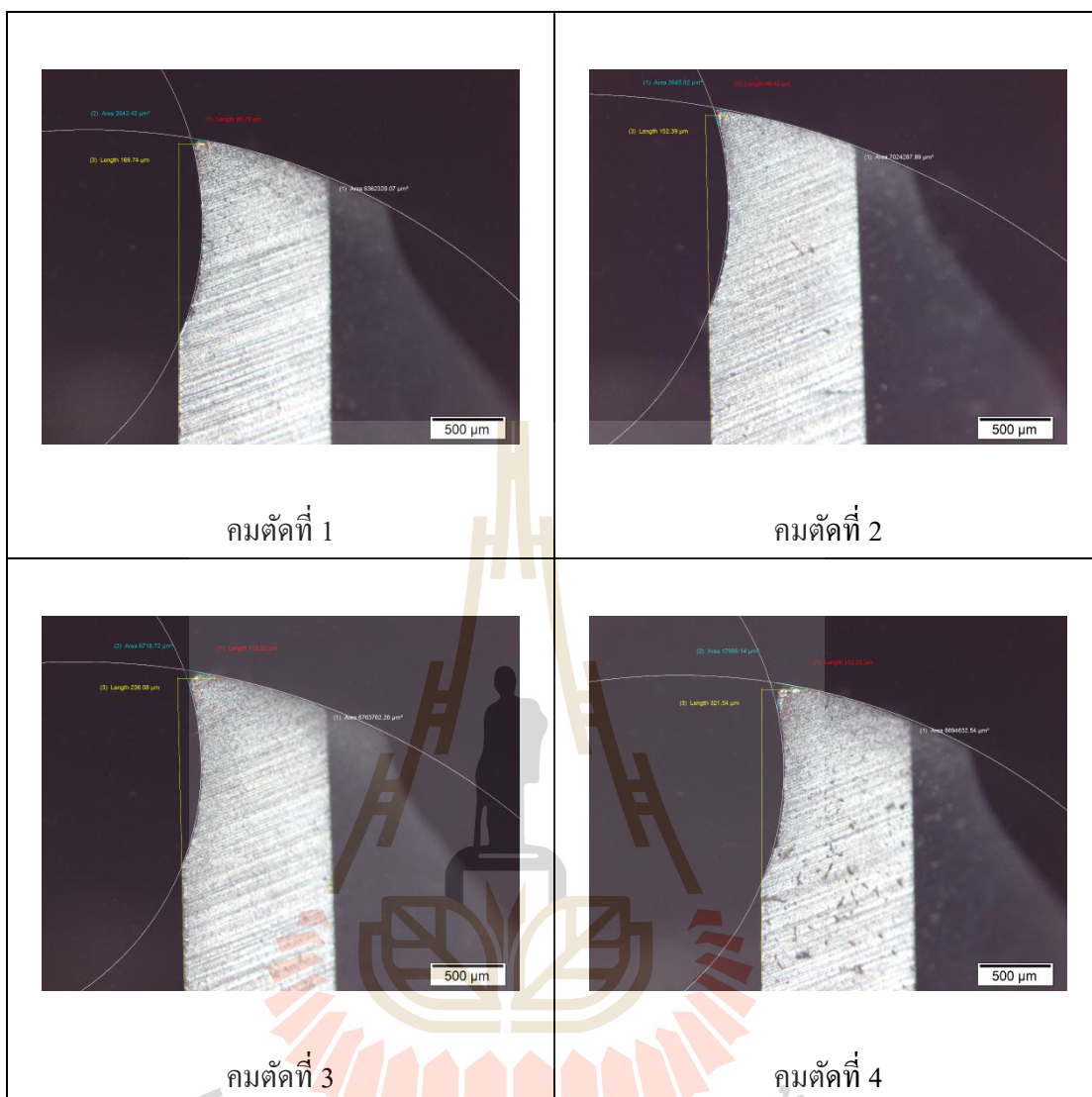
รูปที่ ค.3 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 3



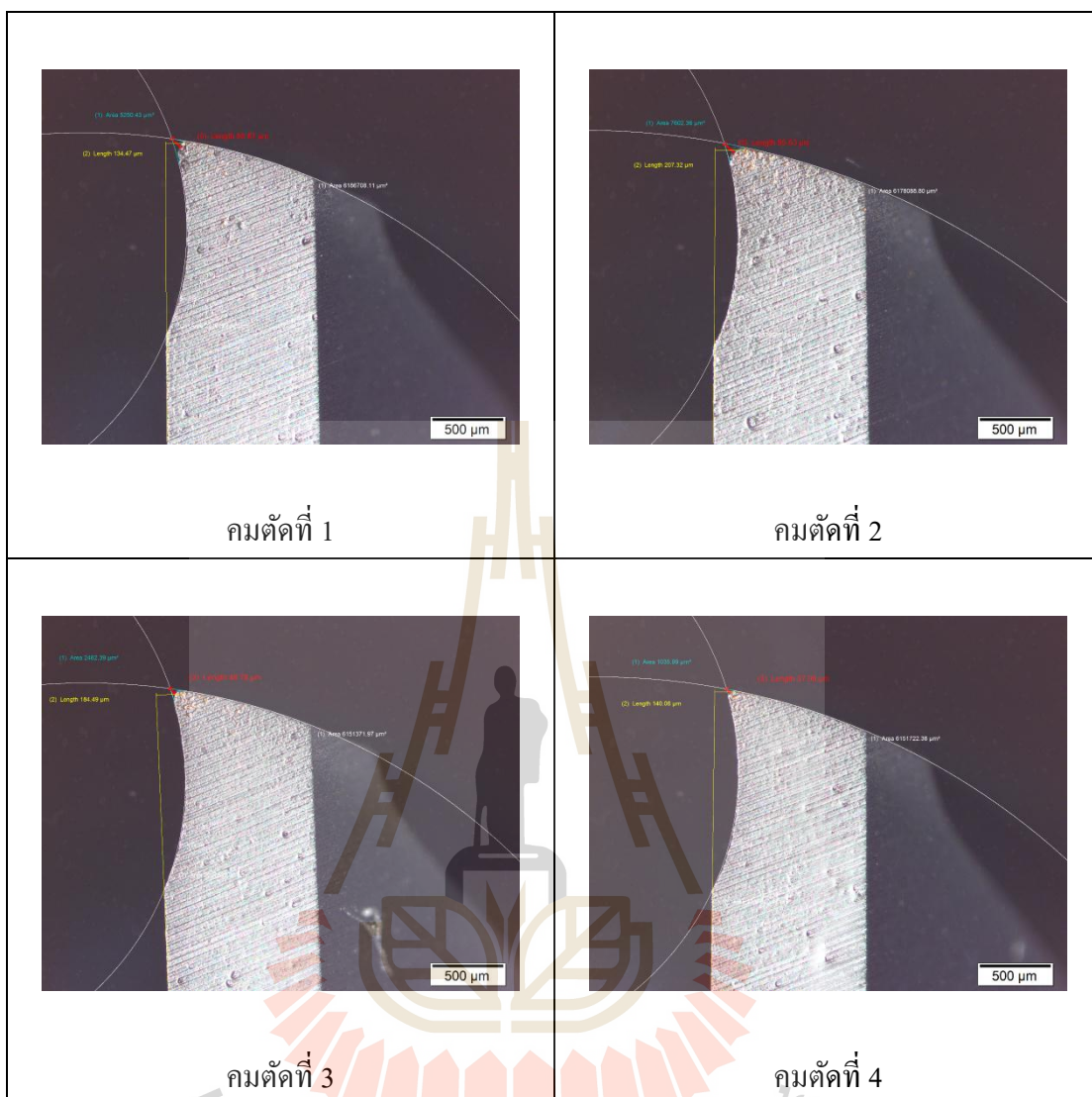
รูปที่ ค.4 ภาพถ่ายภาพการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 4



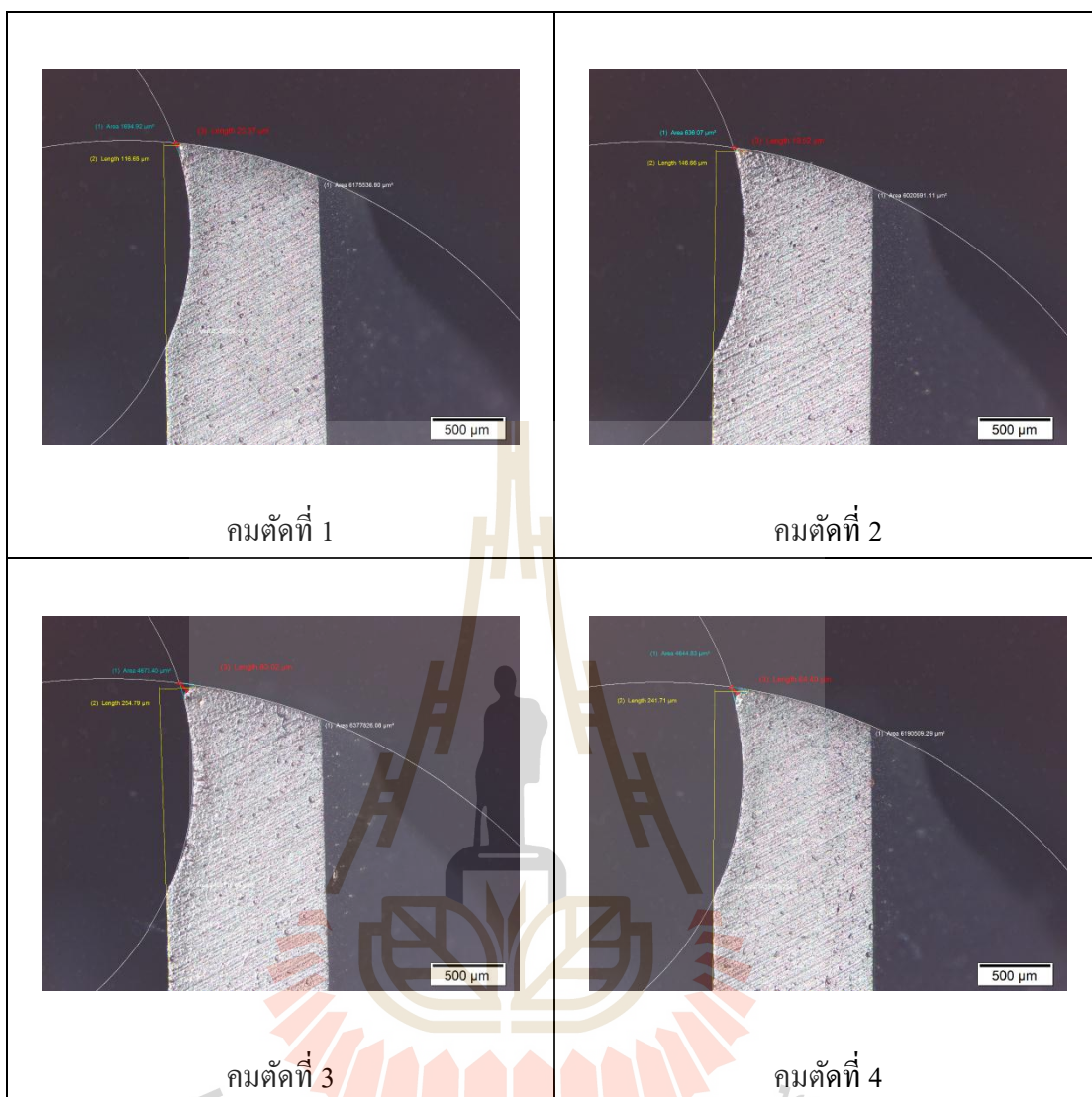
รูปที่ ค.5 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 5



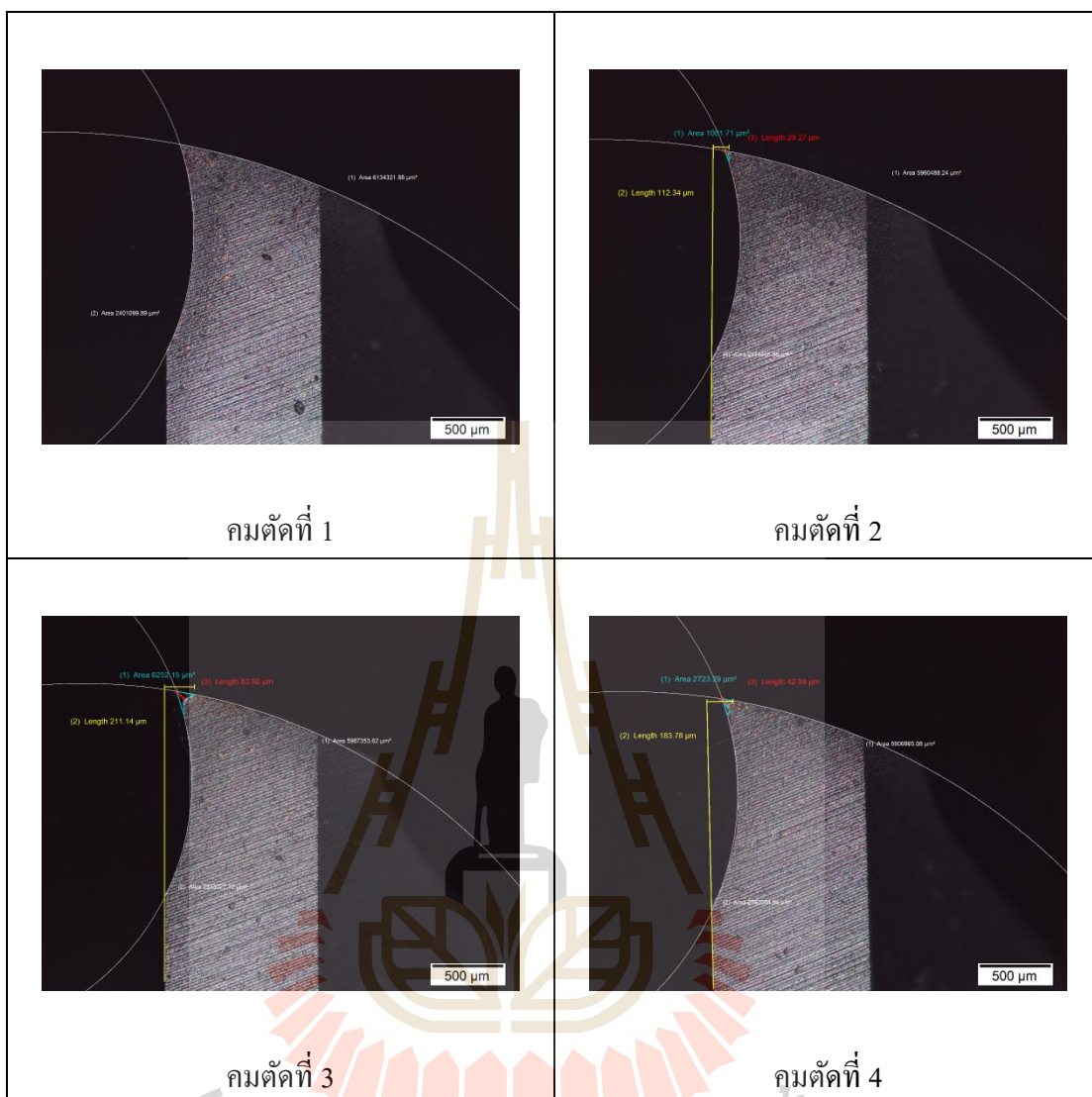
รูปที่ ค.6 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 6



รูปที่ ค.7 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 7

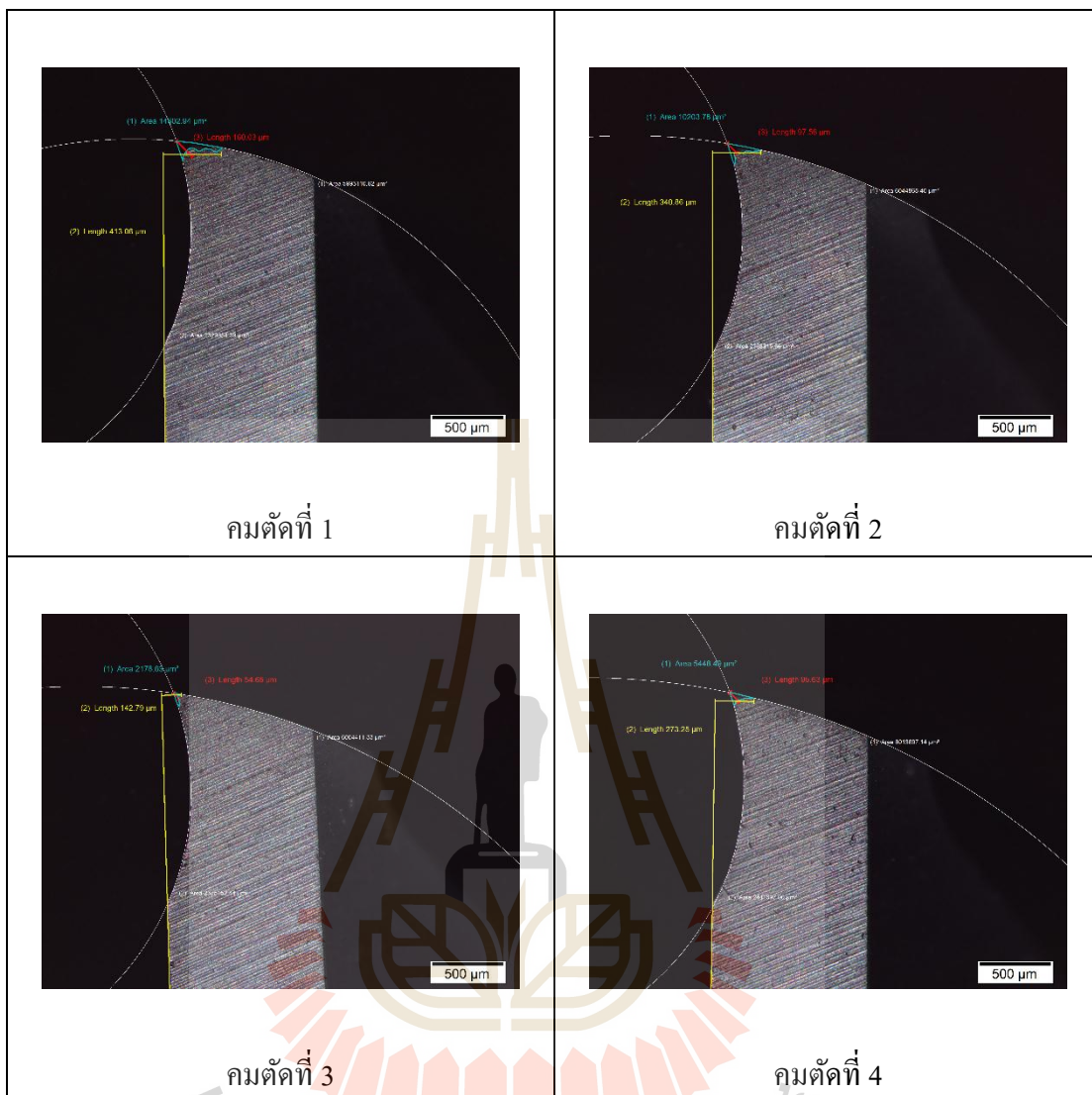


รูปที่ ค.8 ภาพถ่ายภาพการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 8

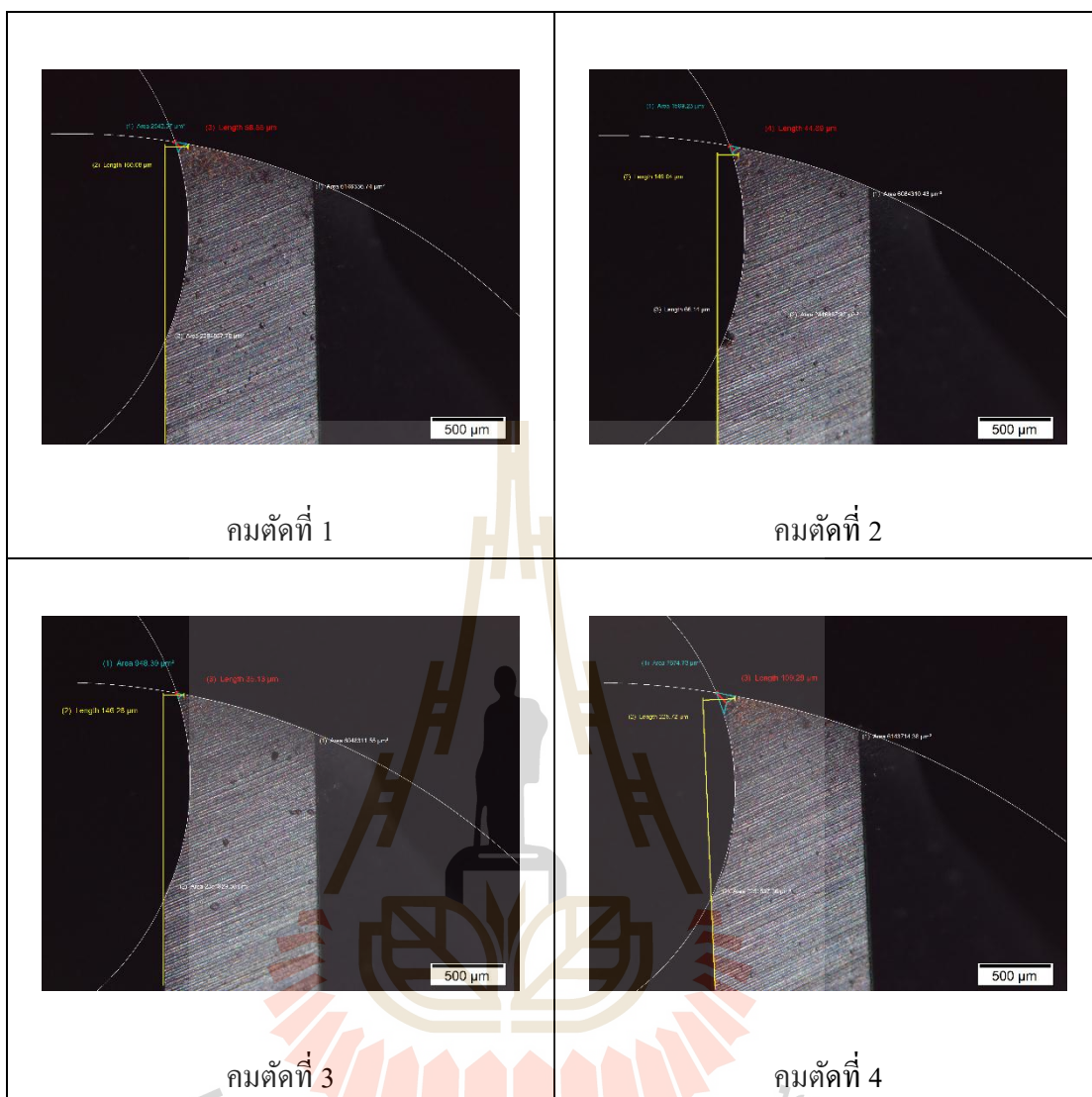


รูปที่ ค.9 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 9

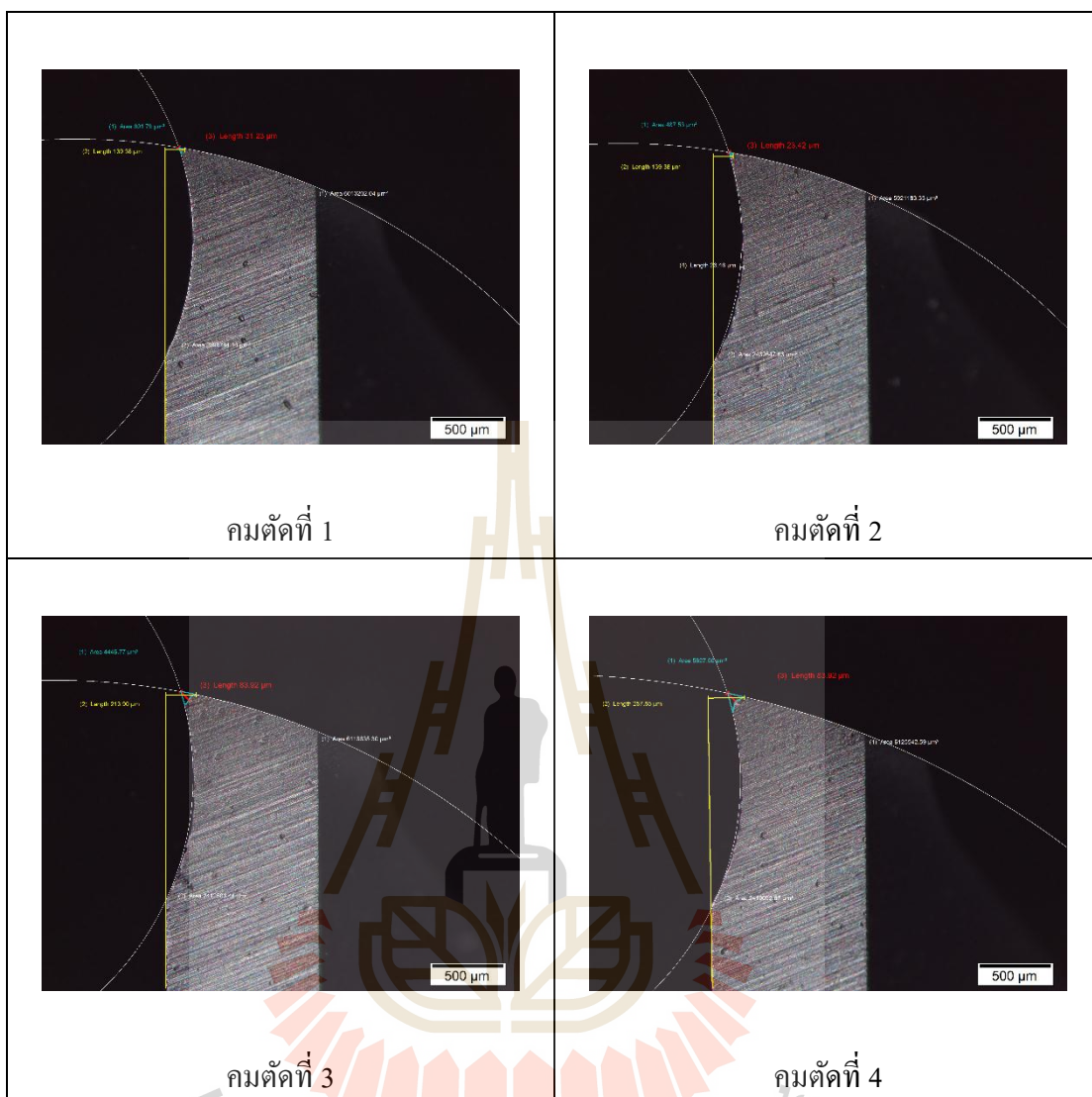




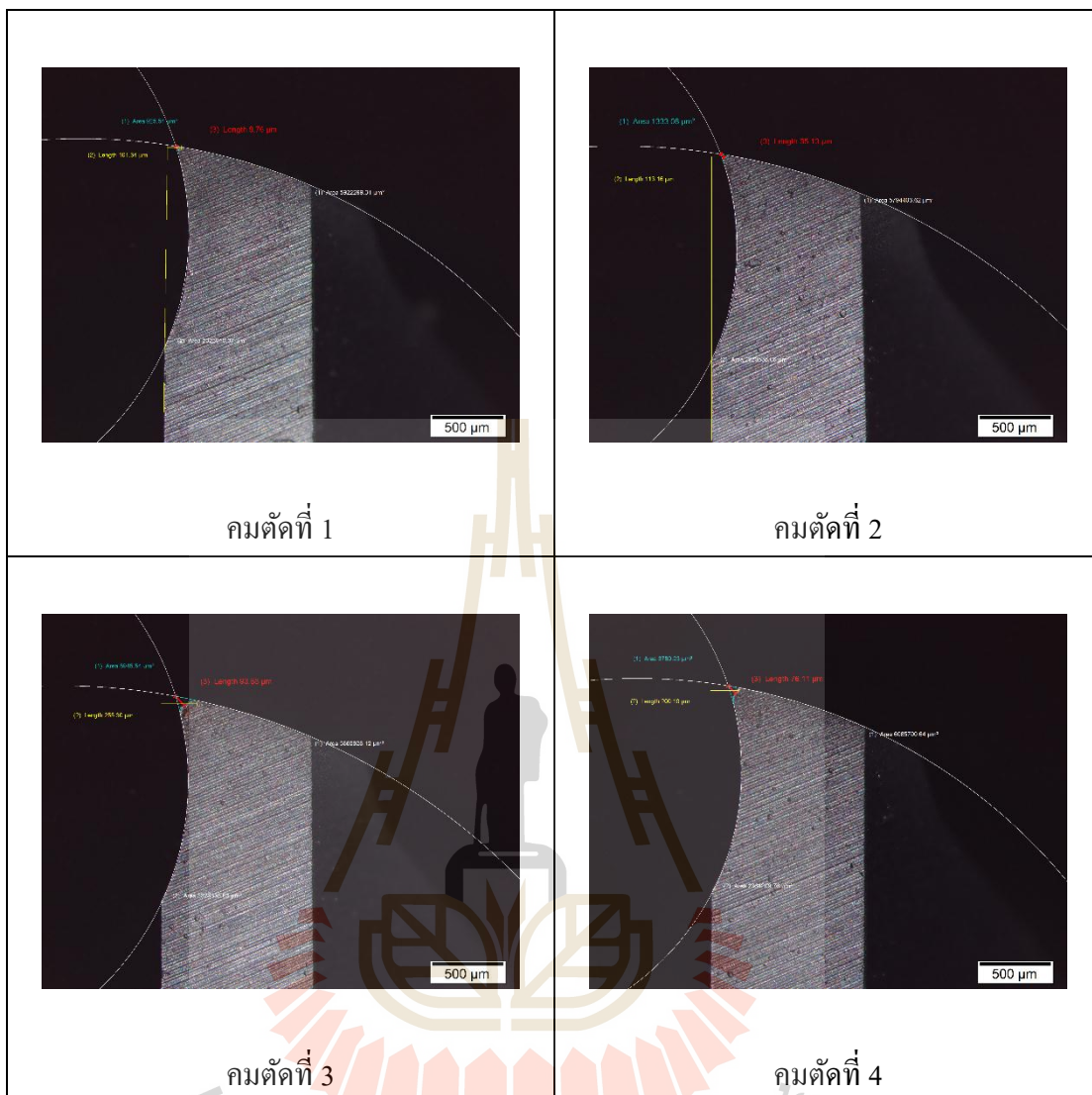
รูปที่ ค.10 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไข 10



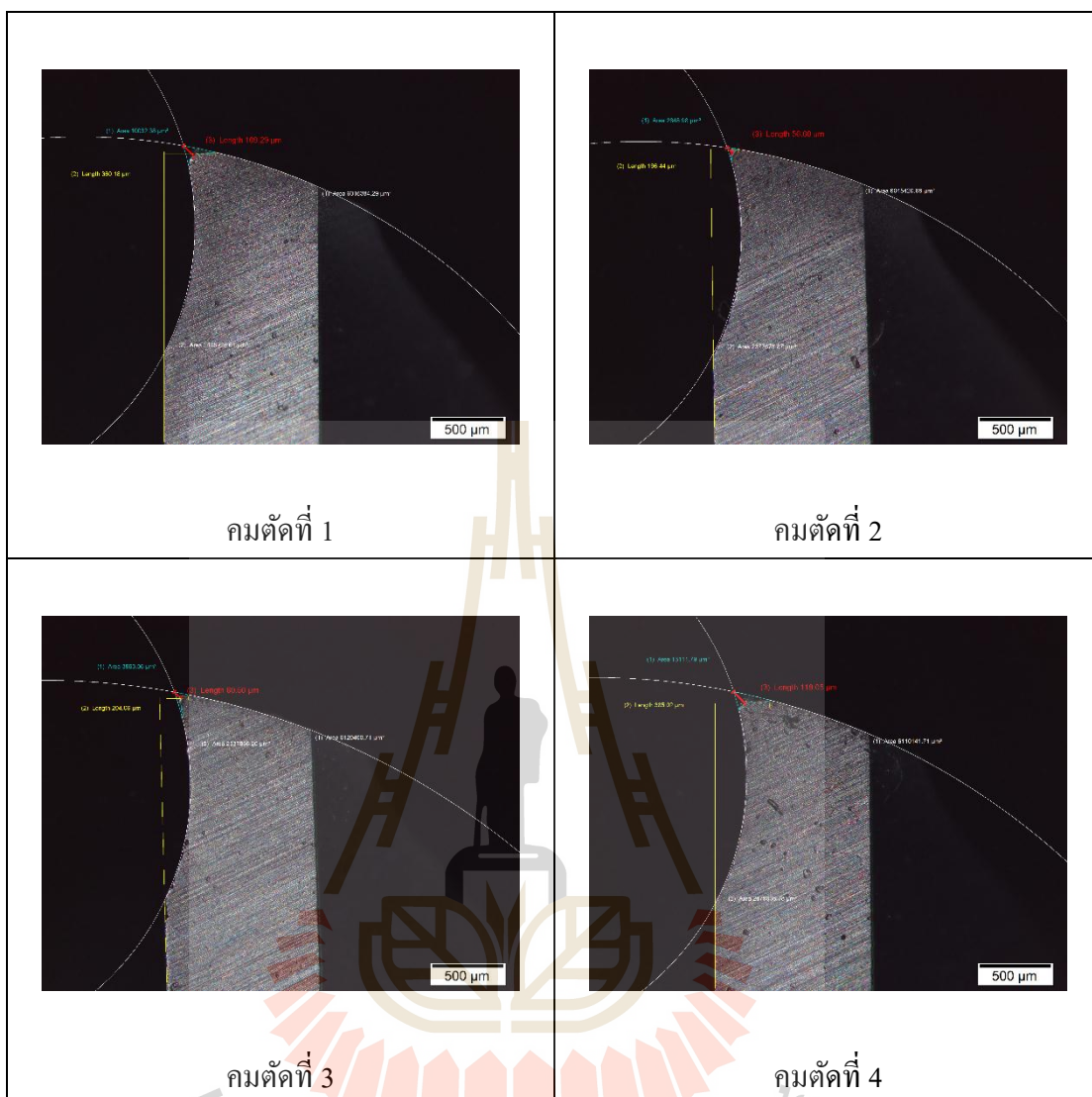
รูปที่ ค.11 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไข 11



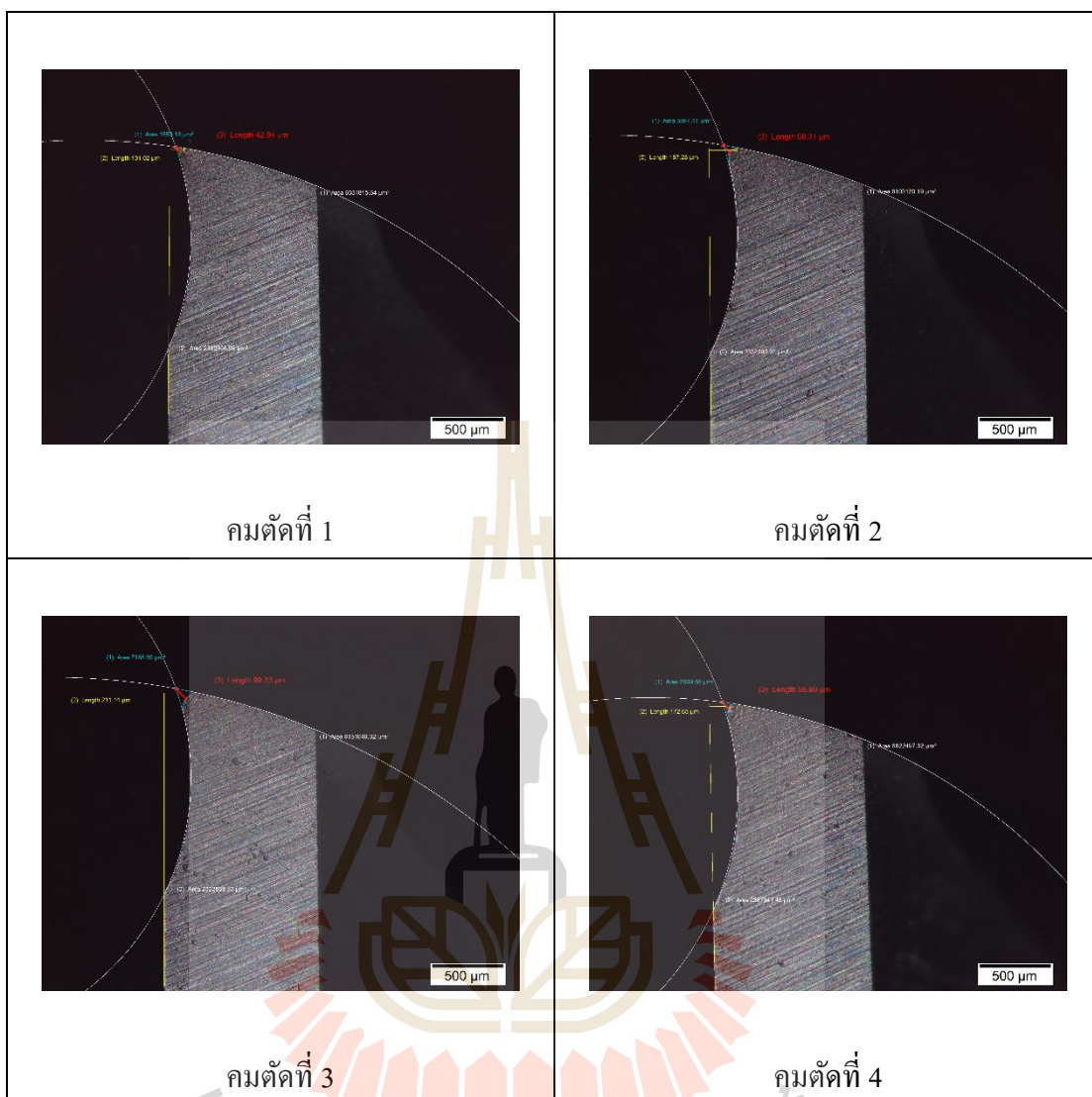
รูปที่ ค.12 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไข 12



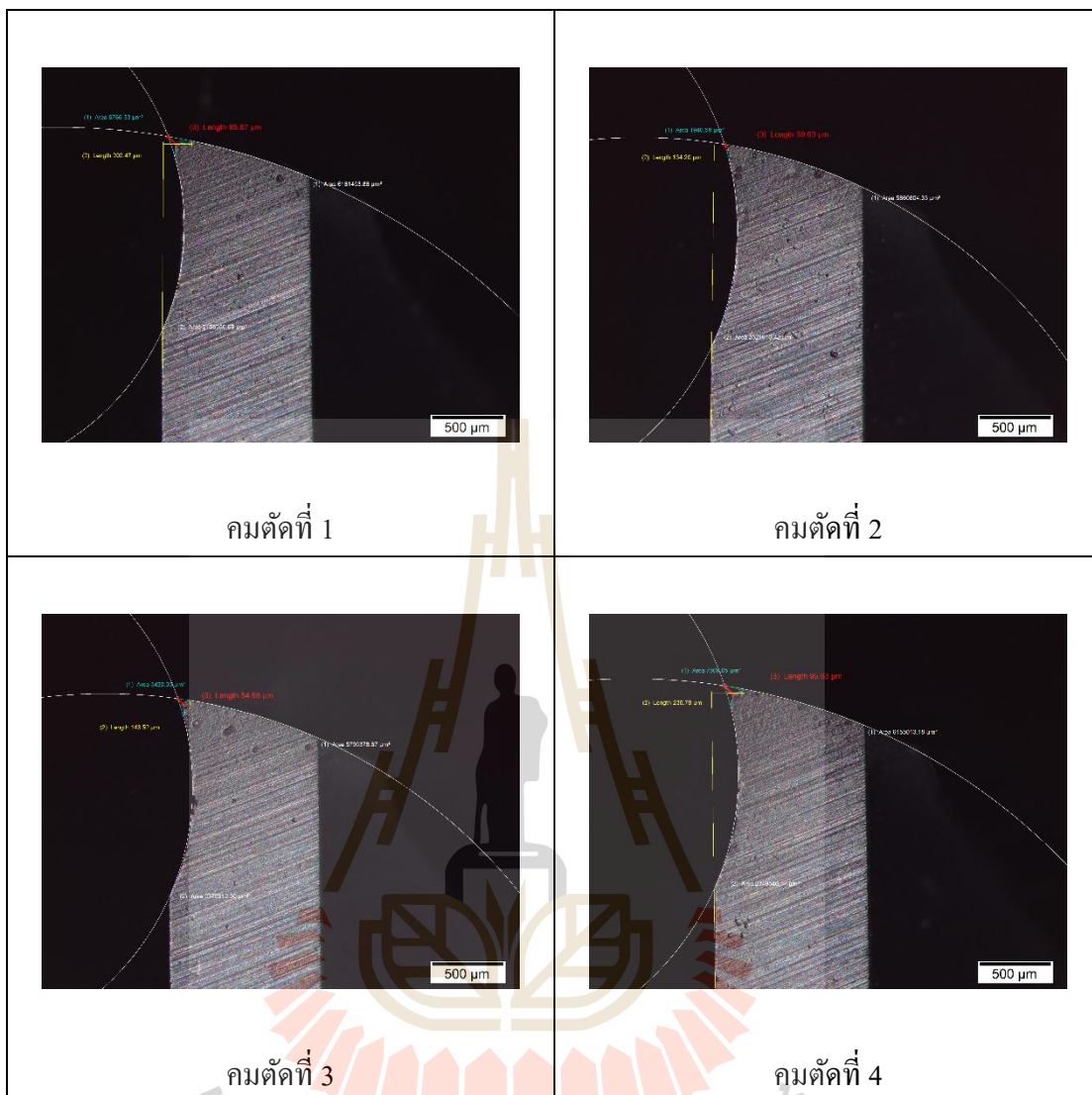
รูปที่ ค.13 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 13



รูปที่ ค.14 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 14



รูปที่ ค. 15 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเนื้อที่ 15



รูปที่ ค.16 ภาพถ่ายการสึกหรอของเครื่องมือตัดเงื่อนไขที่ 16



ภาคผนวก ง

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Taprap, T., Ingkawara, S. Thanasuptawee, U. + Siwadumrongpong, S. (2017). **A STUDY OF CUTTING TEMPERATURE RISE ON MILLING OPERATION.** The 11<sup>th</sup> South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium. 13-14 March 2017, Ho Chi Minh, Vietnam.





# SEATUC 2017



THE 11<sup>th</sup> SEATUC SYMPOSIUM TAKES PLACE FROM 13-14 MARCH 2017  
AT HO CHI MINH CITY UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (HCMUT) IN VIETNAM

**Proceedings of abstracts**



**ISSN: 1882-5796**

The 11<sup>th</sup> South East Asian Technical University Consortium Symposium  
Ho Chi Minh University of Technology (HCMUT), 13<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> March 2017

OS05 Robotics and  
Mechanical Engineering

OS05-09

## A STUDY OF CUTTING TEMPERATURE RISE ON MILLING OPERATION

Thanet Taprap <sup>(1)</sup>, Somdech Ingkawara <sup>(2)</sup>, Ukrit Thanasuptawee <sup>(1)</sup>,  
Somsak Siwadamrongpong <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

<sup>(2)</sup> School of Faculty of Science and Technology,  
Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Thailand

Email: [somsaksi@sut.ac.th](mailto:somsaksi@sut.ac.th)

### ABSTRACT

The aim of this research was to study the main factors affected the cutting temperature rise during end milling machining process in carbon steel AISI 1050 sized 64 mm x 64 mm x 24 mm. In this study, the work pieces were machined by the Bridgeport-VMC 500 CNC machining center controlled under dry cutting condition with TiCN coated 4 flutes high speed steel 10 mm diameters end mill tool. The cutting parameters were studied in this experiment including spindle speed, feed rate and radial depth of cut. The 2 levels full factorial experimental design was employed in this study. The cutting temperature rise in this study was measured by K-type thermocouple. The direct and interaction effect of parameters on temperature are analyzed with 95% level of confidence.

**KEYWORDS:** *cutting temperature rise, machining process, The 2 levels full factorial Experimental design, AISI 1050, TiCN coated tool.*

## A STUDY OF CUTTING TEMPERATURE RISE ON MILLING OPERATION

Thanet Taprap <sup>(1)</sup>, Somdech Ingkawara <sup>(2)</sup>, Ukrit Thanasuptawee <sup>(1)</sup>,  
Somsak Siwadamrongpong <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

<sup>(2)</sup>School of Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat

University, Thailand

Email: [Email: somsaksi@sut.ac.th](mailto:somsaksi@sut.ac.th)

### ABSTRACT

The aim of this research was to study the main factors affected the cutting temperature rise during end milling machining process in carbon steel AISI 1050 sized 64 mm x 64 mm x 24 mm. In this study, the work pieces were machined by the Bridgeport-VMC 500 CNC machining center controlled under dry cutting condition with TiCN coated 4 flutes high speed steel 10 mm diameters end mill tool. The cutting parameters were studied in this experiment including spindle speed, feed rate and radial depth of cut. The 2 levels full factorial experimental design was employed in this study. The cutting temperature rise in this study was measured by K-type thermocouple. The direct and interaction effect of parameters on temperature are analyzed with 95% level of confidence.

**KEYWORDS:** *cutting temperature rise, machining process, The 2 levels full factorial Experimental design, AISI 1050, TiCN coated tool*

### 1. INTRODUCTION

The machining is a one of the removal material process to become new surface and achieve the desired shape as standard manufacturer's requirements. This process was widely used in several industries such as automotive part, aerospace part and mold manufacturing. The temperature rise of the machining process has an affecting on surface quality of products and tool life.

Marinov (2010) explained that in cutting process, almost all of energy dissipated in plastic deformation is converted into heat that in turn raised the temperature in the cutting zone. He indicated that the heat generation has three main sources in the cutting zone including the heat from plastic deformation in the primary shear zone, the heat from the friction between chip and cutting tool and the heat from the friction between workpiece and

tool flank. Many researchers had studied on temperature measurement techniques in machining processes.

Norased (2015) studied that, factors had significantly effect on the heat in machining process are cutting velocity and feed per tooth but depth of cut had a little effect on heat in cutting zone.

R.C. Dewes et al. (1999) measured the cutting temperature in machining process with ball nose end mills TiCN coated using worn tool and new tool by thermocouple and infrared techniques. He found that tool wear affected temperature expansion. In addition, radial and axial depth of cut have influence on interface and chip temperature.

Branda et al. (2008) studied on heat flow when end milling, at high-speed hardened steels which widely applied to molds and dies. In this experiment, AISI H13 and AISI D2 steels were machined with two types of ball nose end mills: coated with (TiAlN) and tipped with PcBN. using thermocouple. The thermocouple were embedded in internal workpiece with 5 positions at 2 mm. below machined surface. The result showed that overall and higher temperatures were measured when cutting AISI D2, compared to AISI H13, mainly due to hardness of differences.

Abdill Kus et al. (2015) studied on the temperature distribution with the material A14140 on turning process. In this experiment the temperature was measured by K- type thermocouple and infrared sensor. The result showed that the cutting speed is a direct impact on the increasing of temperature. On the other hand, feed rate is not significant to the temperature.

Although, previous study has focused on the cutting temperature but no one study in the effect of machining parameters on cutting temperature rise in carbon steel grade AISI 1050 with TiCN coated 4 flutes high speed steel 10 mm. Thus, the aim of this research was to study the main factors affected the cutting temperature during end milling in this material by thermocouple which was widely used because of the cost is lower than existing methods.

It can be found that the thermocouple technique is widely used to measure temperature formed by machining processes. The aim of this research was to study the main factors affect the cutting temperature rise during end milling machining process in carbon steel AISI 1050 and would like to present the temperature measurement technique by using K-type thermocouple for temperature rise resulting from machining processes for this trial because there are less people studying on this topic.

**2. EXPERIMENT**

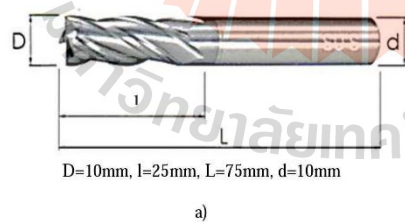
**2.1 Materials and Equipment**

**2.1.1 CNC machine and cutting tools**

In this study, the BRIDGEPORT VMC 500 Vertical Machining Center was used. It has a high potential that are used in most industries and it was shown in Fig. 1. The cutting tool used TiCN coated 4 flutes high speed steel 10 mm diameters end mill (Co 8%), the details of the components is shown in Fig. 2. It is commonly used with hard materials.



Fig. 1. BRIDGEPORT Vertical Machining Center.



a)

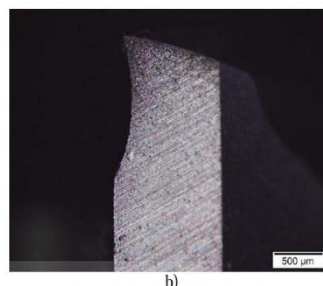


Fig. 2. a) Geometry of EM 4146, TiCN coated HSE. b) The cutting edge of cutting tool.

**2.1.2 Workpiece material**

The workpiece in this experiment is carbon steel AISI 1050 sized 64mm×64mm×24mm had the hardness between 185-210 HB. Table 1. shows the chemical composition of AISI 1050.

Table 1. Chemical composition AISI 1050.

%Fe	% C	% Si	% Mn	% P	%S
98.1	0.528	0.262	0.778	0.0187	0.0120

**2.1.3 Temperature Measurement**

The K-type thermocouple are sized 1.6 mm were embedded into the internal part of the workpiece at 1 mm below the milling surface is shown in Fig. 3. The cutting temperature rise in this research were recorded by TESTO model 176T4 data logger which is a frequency of measuring 1 second to 24 hour and accuracy ± 0.3 ° C at a temperature of -100 to +70 ° C.

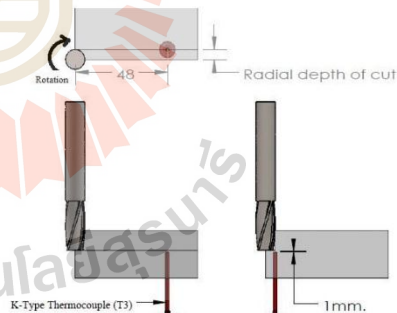


Fig. 3. Positions of K-type thermocouple.

**2.2 Experimental set up**

The experiments were designed and base on a 2<sup>3</sup> full factorial design with 2 replicates, which is the well known method for screening factors. These experiments were conducted as per the design matrix using a BRIDGEPORT VMC 500 Vertical Machining Center. Moreover, the whole experiments were carried out with a constant axial depth of cut (A<sub>p</sub>) = 10 mm. The experiments were conducted as shown in Fig. 4. The level of process parameters were identified by the recommendation of tool manufacturer. Table 2 shows the machining parameters and their levels for this experiment.

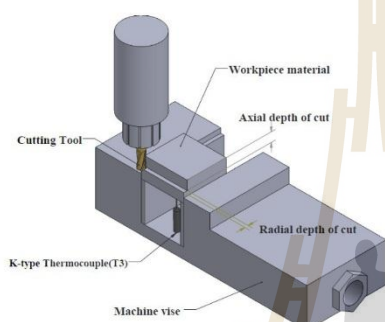


Fig. 4. Show the end-milling process.

Table 2. The machining parameters and their levels.

Parameter	Unit	Symbol	Level	
			Low	High
Spindle speed	RPM	S	800	1270
Feed rate	mm/min	F	20	60
Radial depth of cut	Mm	A <sub>e</sub>	2.5	5

**3. RESULTS AND DICUSSIONS**

**3.1 Temperature results**

The temperature was measured using a K-type thermocouple sized 1.6 mm, it was inserted into the hole and the initial temperature was noted using the data logger temperature. While machining, the maximum temperature was measured, the difference between the maximum and initial temperature gave the cutting temperature rise. The design matrix and the results of this experiment are shown in the table 3.

Table 3. Experimental design and the results

Std.	S	F	A <sub>e</sub>	A <sub>p</sub>	Temperature		
					Initial	Maximum	Rise
1	800	20	2.5	10	26.0	41.8	15.8
2	1270	20	2.5	10	26.4	47.2	20.8
3	800	60	2.5	10	26.7	43.5	16.8
4	1270	60	2.5	10	27.0	44.0	17.0
5	800	20	5.0	10	26.8	51.8	25.0
6	1270	20	5.0	10	26.9	55.1	28.2
7	800	60	5.0	10	26.9	56.3	29.4
8	1270	60	5.0	10	26.4	56.4	30.0
9	800	20	2.5	10	25.2	39.3	14.1
10	1270	20	2.5	10	26.1	46.3	20.2
11	800	60	2.5	10	26.5	43.4	16.9
12	1270	60	2.5	10	26.1	43.8	17.7
13	800	20	5.0	10	26.6	50.3	23.7
14	1270	20	5.0	10	27.0	55.7	28.7
15	800	60	5.0	10	27.0	53.7	26.7
16	1270	60	5.0	10	27.0	55.0	28.0

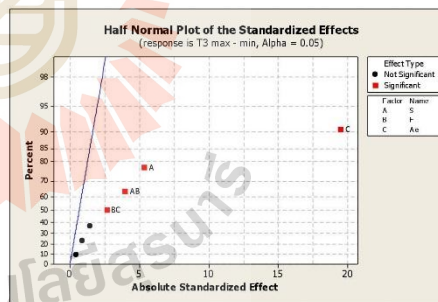


Fig. 5. Half normal plot.

The Fig 5. shows the half normal plot. This graph points that the significant main effects are radial depth of cut and spindle speed and the significant interaction effect are interaction of S \* F and interaction of S \* Ae.

Table 4. Analysis of variance of cutting temperature rise value.

Analysis of Variance for T3 max - min (coded units)						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<b>Main Effects</b>						
S	1	30.803	30.803	30.803	29.020	0.001
F	1	2.250	2.250	2.250	2.120	0.183
Ae	1	404.010	404.010	404.010	380.690	0.000
<b>2-Way Interactions</b>						
S * F	1	16.810	16.810	16.810	15.840	0.004
S * Ae	1	0.250	0.250	0.250	0.240	0.640
F * Ae	1	7.563	7.563	7.563	7.130	0.028
<b>3-Way Interactions</b>						
S * F * Ae	1	0.903	0.903	0.903	0.850	0.983
Residual Error	8	8.490	8.490	1.061		
Pure Error	8	8.490	8.490	1.061		
Total	15	471.077				
S = 1.03017		Press = 33.69				
R-Sq = 98.20%		R-Sq (pred) = 92.79%		R-Sq (adj) = 69.62%		

The ANOVA tables shown in Table 4. Indicates that factor have an effect to response (Cutting temperature rise) the significant model terms are those with 'Prob. > F' value of less than 0.05 and in this experiment, we can find that the main factor significantly influence on the cutting temperature rise are radial depth of cut, spindle speed with p-value of the such main factors less than 0.05. The interaction effect of the factors on the cutting temperature rise were between S \* F and S \* Ae which p-value of such interaction factors less than 0.05. Additionally, Table 4.illustrates that the regression model from the ANOVA analysis was revealed the excellent relation between significant parameters and cutting temperature rise. These could be implied from the decision coefficient (R<sup>2</sup>) of 98.2 % and the adjusted R<sup>2</sup> of 69.62 %. Fig. 6 shows the main factors affecting on the cutting temperature rise. The radial depth of cut was the highest significant effect and spindle speed was also significant effect on cutting temperature rise. The cutting temperature rise was increased when radial depth of cut and spindle speed increased from 800 to 1,270 rpm and 2.5 to 5 mm respectively. Fig. 7.shows the interaction effects plot of temperature rise. According to the figure, while we used the spindle speed at 1,270 rpm, the cutting temperature rise was reduced when feed rate increased from 20 to 60 mm/min on the other hand, while we used the spindle speed at 800 rpm, the cutting temperature rise was reduced when feed rate increase from 20 to 60 mm/min.

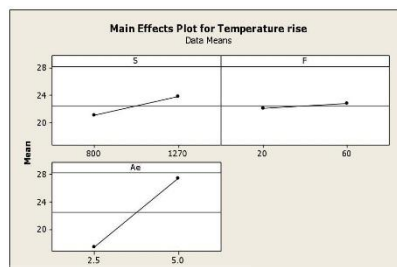


Fig 6. The main effects plot of temperature rise.

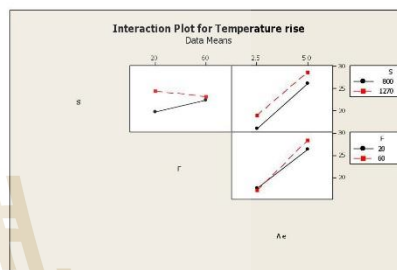


Fig. 7. The interaction effects plot of temperature rise

#### 4. CONCLUSIONS

From the study, the cutting temperature rise of end milling machining process in carbon steel AISI 1050 was investigated by full factorial design method. Three parameters were studied in this experiment. The results of the analysis are as follows:

- 1) The radial depth of cut was the highest significant effect and spindle speed was also significant effect on cutting temperature rise.
- 2) The interaction effects of the factors on the cutting temperature rise were between S \* F and S \* Ae.

*The 11th SEATUC Symposium***REFERENCES**

Marinov, V., Manufacturing Processes from Metal Products 1st Edition, pp.74-86, 2010.

Norased, K., Metal Cutting Technology, N-TRIS Solutions&Engineering.co.,ltd2015.<http://www.designengineerlife.com/2015/08/metal-cutting-technology/>

R.C. Dewes, E. Ng, E. Ng, P.G. Newton, D.K. Aspinwall, Temperature measurement when high speed machining hardened mould/die steel, School of Manufacturing and Mechanical Engineering, University of Birmingham, Birmingham, UK, Journal of Materials Processing Technology 92-93 (1999) 293-301.

Branda, L., Oelho, R., Rodrigues, A., Experimental and theoretical study of workpiece temperature when end milling hardened steels using (TiAl)N-coated and PcBN-tipped tools, Federal University of Brazil, journal of materials processing technology 199 (2008) 234-244.

Kus, A., Isik, Y., Cakir, M., Coşkun, S., Özdemir, K., Thermocouple and Infrared Sensor-Based Measurement of Temperature Distribution in Metal Cutting, Vocational School of Technical Science, Uludag University, 16059 Bursa, Turkey, Sensors 2015, 15, 1274-1291.

**PHOTOS AND INFORMATION**

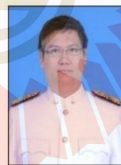
**Thanet Taprap** received the B.E. (2014) in Automotive Engineering from Suranaree University of Technology. He is studying in M.E., School of Manufacturing Engineering, Suranaree university of technology.



**Somdech Ingkawara** received the B.E (1992) degree in Industrial Engineering from Rajamangala University of Technology Lanna, M.PE (1999) in Production Engineering from King Mongkut's University of Technology North Bangkok. He is a lecturer, Department of Industrial Technology Management, Faculty of Science and Technology, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University.



**Ukrit Thanasuptawee** received the B.E. (2009) in Industrial engineering from Rajamangala university of technology Lanna, M.E. (2011) in Industrial Engineering from Chiang Mai University. He is studying in Ph.D. degree, School of Manufacturing Engineering, Suranaree university of technology.



**Somsak Siwadamrongpong** received the B.E. (1995) in Mechanical Engineering from Chulalongkorn University, M.E. (2001) in Environmental System from Nagaoka University of Technology, and D.E. (2004) in Energy and Environment from Nagaoka University of Technology. He is a lecturer, School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology



## ประวัติผู้เขียน

นายธนศ ตาปราบ เกิดเมื่อวันที่ 31 ตุลาคม 2533 ที่อำเภอหนองบัวแดง จังหวัดชัยภูมิ ปัจจุบันมีภูมิลำเนาอยู่ที่อำเภอมัญจาคีรี จังหวัดขอนแก่น เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านหนองขาม จังหวัดขอนแก่น มัธยมศึกษาตอนต้น ที่โรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย ชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ และมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนมััญจาคีรี จังหวัดขอนแก่น สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2557

หลังจากสำเร็จการศึกษา ในปี พ.ศ. 2557 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ณ สถาบันการศึกษาเดิม ขณะศึกษาระดับปริญญาโท ผู้วิจัยได้เป็นผู้สอนในรายวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ทั้งของสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และวิศวกรรมเครื่องกล จากที่มีประสบการณ์ด้านการสอนปฏิบัติการและการทำงานวิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ ความชำนาญทางด้านงานขึ้นรูปโลหะด้วยวิธีการตัดเฉือนเป็นอย่างดี โดยเฉพาะการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและผลิต (CAD/CAM) โดยมีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติดังปรากฏในภาคผนวก ก.