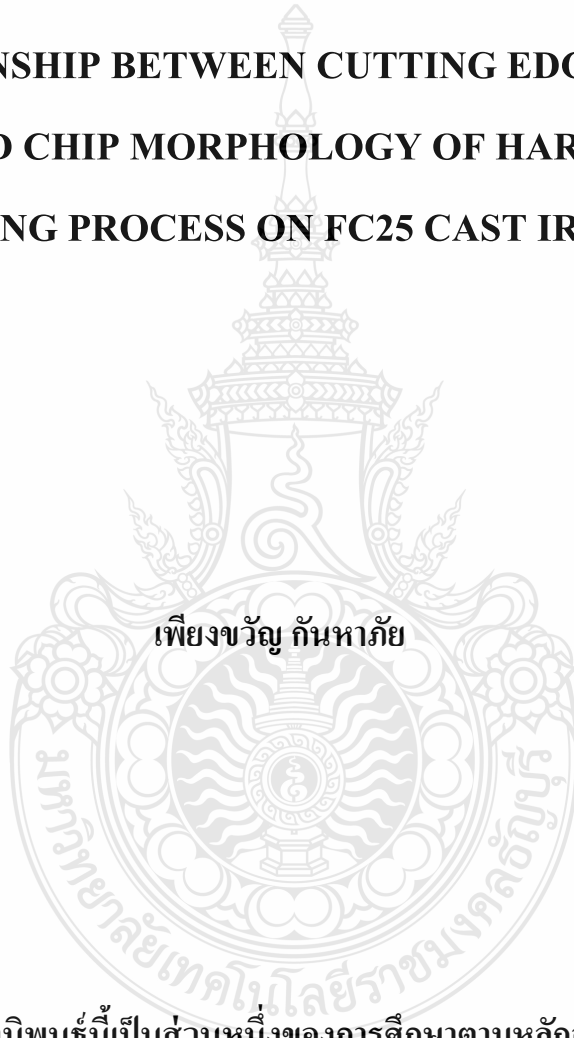


ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอคมตัด ความหยาบผิว
และรูปร่างเศษการตัดในการกัดโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง
บนพื้นผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25

RELATIONSHIP BETWEEN CUTTING EDGE WEAR,
ROUGHNESS AND CHIP MORPHOLOGY OF HARD-FACED WELD
METAL MILLING PROCESS ON FC25 CAST IRON SURFACE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี

ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอคมตัด ความหยาบผิว
และรูปร่างเศษการตัดในการกัดโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง
บนพื้นผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25

เพียงขวัญ กัณหากัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอคมตัด ความหยาบผิว และรูปร่างเศษการตัด
ในการกัดโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25
Relationship between Cutting Edge Wear, Roughness and Chip Morphology
of Hard-faced Weld Metal Milling Process on FC25 Cast Iron Surface

ชื่อ - นามสกุล

นางสาวเพียงขวัญ ก้นหาภัย

สาขาวิชา

วิศวกรรมการผลิต

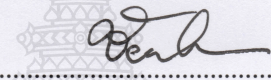
อาจารย์ที่ปรึกษา

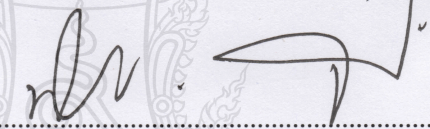
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.

ปีการศึกษา


2560

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยยะ ปราณีตพลกรัง, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทน์มณี, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, D.Eng.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิวกอ อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 12 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอคมตัด ความหยาบผิว และรูปร่างเศษการตัดในการกัดโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวเพียงขวัญ ก้นหากัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกแข็งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมซ่อมพื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตร อย่างไรก็ตามการใช้ผิวโลหะเชื่อมพอกแข็งเป็นผิวสำเร็จของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้นเป็นไปได้ยากเนื่องจากผิวหน้าแนวเชื่อมมีความหยาบสูง ด้วยเหตุนี้ในงานเชื่อมซ่อม การปรับผิวให้มีความละเอียด เช่น การกัด หรือการเจียรระไน แนวเชื่อมจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวชิ้นส่วนให้ดีขึ้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาการเปรียบเทียบการสึกหรอของคมตัด รูปร่างเศษการตัดและความหยาบผิวในการกัดแนวแนวเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25

ชั้นโลหะเชื่อมพอกแข็งถูกสร้างขึ้นบนพื้นผิวเหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25 ด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กคลวดหุ้มฟลักซ์ด้วยตัวแปรการเชื่อมเฉพาะ โลหะเชื่อมพอกแข็งที่ได้ถูกนำไปทำการกัดปาดหน้าด้วยตัวแปรการกัดประกอบด้วยความเร็วรอบการกัด อัตราป้อน และความลึกการตัด ผลการการกัดปาดผิวหน้าที่ประกอบด้วยรูปร่างเศษการกัด การสึกหรอของคมตัด และความหยาบผิวการกัดถูกทำการศึกษาและรายงานต่อไป

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ ตัวแปรการกัดที่เหมาะสมของการศึกษาทดลองนี้พบได้เมื่อทำการกัดผิวหน้าด้วยความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาที โดยไม่มีการใช้สารหล่อเย็น สภาวะนี้แสดงการสึกหรอของคมตัดมีค่าต่ำสุด 86.78 ไมโครเมตร ค่าความหยาบผิว 0.435 ไมโครเมตร เศษกัดมีรูปร่างยาวต่อเนื่องเป็นเกลียว ความหนาและความยาวของเศษกัดเท่ากับ 0.746 และ 5.410 มิลลิเมตร ความเร็วรอบการตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การสึกหรอเพิ่มขึ้น ความหยาบผิวลดลง เศษกัดมีรูปร่างลักษณะความหนาและความยาวลดลง

คำสำคัญ: การเชื่อมพอกแข็ง การกัดปาดผิวหน้า ความหยาบผิว การสึกหรอ สารหล่อเย็น

Thesis Title	Relationship between Cutting Edge Wear, Roughness and Chip Morphology of Hard-faced Weld Metal Milling Process on FC25 Cast Iron Surface
Name – Surname	Miss Piangkwan Kanhapai
Program	Manufacturing Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
Academic Year	2017

ABSTRACT

A hard-faced welding is an effective method for repairing the worn surface of the agricultural machine parts. Unfortunately, the application of hard-faced surface as a finished surface of the machine parts was not possible because of high rough surface of weld bead. Therefore, in the repaired welding unit, the surface finishing such as milling or grinding of the weld bead is always performed to get higher quality of part surface. This research aimed to compare cutting edge wear, chip morphology and roughness in the milling process of a hard-faced weld metal on the JIS-FC25 grey cast iron surface.

Hard-faced weld metals were produced on JIS-FC25 grey cast iron using the shielded metal arc welding (SMAW) process with a specific welding condition. Then they were face-milled by using the milling process parameters including cutting speed, feed rate, and depth of cut. The experimental results including milling chip morphology, cutting tool edge wear and roughness surface were finally investigated and reported.

It was found that the optimized milling process parameter was the rotating speed of 1100 rpm and the feed rate of 100 mm/min without using cutting-fluid. This condition brought about the minimum cutting edge wear of 86.78 μm , the roughness of 0.435 μm , the continuous spiral chip, as well as the chip thickness and length of 0.746 and 5.410 millimeters, respectively. Increasing rotating speed resulted in increasing cutting edge wear, but reducing roughness and chip morphology thickness and length.

Keywords: hard-faced welding, face milling, roughness, wear, cutting-fluid

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ตามเป้าหมายได้ด้วยความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูงจากท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปรานีตพลกรัง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ที่ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านเครื่องมือ เครื่องจักร และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่เคยได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในด้านวิชาการ ผู้วิจัยจึงขอแสดงความดีทั้งหมดนี้แก่ บิดา มารดา ครู อาจารย์ และท่านผู้มีพระคุณทุกท่าน

เพียงขวัญ กันทากัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป	(9)
บทที่ 1 บทนำ	13
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	14
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	14
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.1 เหล็กหล่อสีเทา.....	16
2.2 ทฤษฎีกระบวนการเชื่อมโลหะ (Manual Metal Arc Welding: MMAW)	27
2.3 ทฤษฎีของกระบวนการกัดโลหะ	30
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	48
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	50
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	50
3.2 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง	51
3.3 ขั้นตอนการกัดปาดผิวหน้าโลหะ.....	54
3.4 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล	62
4.1 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการ ตัดเนื้อของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 อิทธิพลของความเร็วในการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการตัด เฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง	68
4.3 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการตัด เฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง	75
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	83
5.1 สรุปผลการวิจัย	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก การสึกหรอของเม็ดมีด.....	92
ภาคผนวก ข เปรียบเทียบความหนาและความยาวเศษตัด.....	101
ภาคผนวก ค ผลการเปรียบเทียบค่าความหยาบผิวและการสึกหรอคมตัด.....	106
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	111
ประวัติผู้เขียน	127

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานญี่ปุ่น (JIS)	22
ตารางที่ 2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อทางเลือกกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์....	30
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ JIS-FC25	51
ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง	52



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพสมมูลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์	18
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะ โครงสร้างของเหล็กหล่อเทา	20
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะ โครงสร้างของเหล็กหล่อขาว	22
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะ โครงสร้างของเหล็กหล่อกราไฟท์กลม แบบไม่กักรด	24
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะ โครงสร้างของเหล็กหล่ออบเหนียวดำ	25
รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์กลม มีเทมเปอร์คาร์บอนของเหล็กหล่ออบ เหนียวขาวได้จากการอบอ่อน	26
รูปที่ 2.7 ลักษณะ โครงสร้างของเหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษพิเศษ	27
รูปที่ 2.8 แสดงหลักการเชื่อมอาร์คลวดหุ้มฟลักซ์	28
รูปที่ 2.9 การกัดปาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเครื่องมือตัดรูปทรงสี่เหลี่ยม	31
รูปที่ 2.10 การกัดขึ้นรูปในงานประเภทต่างๆ	32
รูปที่ 2.11 ลักษณะมุมของคมตัดที่ตัดเดือนชิ้นงาน	32
รูปที่ 2.12 รูปร่างต่างๆ ของเม็ดมีดมีด	35
รูปที่ 2.13 ลักษณะความหยาบผิวของชิ้นงาน	37
รูปที่ 2.14 แสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยของพื้นผิว	38
รูปที่ 2.15 แสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง	39
รูปที่ 2.16 แสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม	39
รูปที่ 2.17 วิธีการระบายความร้อนในกระบวนการกัดขึ้น	40
รูปที่ 2.18 รูปแบบการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด	41
รูปที่ 2.19 ประเภทการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด	41
รูปที่ 2.20 รูปแบบการสึกหรอของเครื่องมือคาร์ไบด์ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977	43
รูปที่ 2.21 ลักษณะต่างๆของการเกิดเศษตัด 3 แบบ	44
รูปที่ 2.22 การจำแนกประเภทของรูปแบบเศษตัดตามมาตรฐาน ISO 3685-1977	45
รูปที่ 2.23 การจำแนกประเภทของเศษตัด	46
รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานเหล็กหล่อ JIS-FC25	50
รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง	51

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.3 ตู้อบลวดเชื่อมและชิ้นงาน	52
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง	53
รูปที่ 3.5 การออกแบบการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปทำการทดสอบ	54
รูปที่ 3.6 เครื่องตัดไมโครไฟเบอร์	55
รูปที่ 3.7 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ	56
รูปที่ 3.8 เครื่องมือตัดตัด	57
รูปที่ 3.9 อุปกรณ์การจับยึดชิ้นงาน	58
รูปที่ 3.10 การวัดพื้นที่การสึกหรอ ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977	59
รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความหยาบผิว	60
รูปที่ 3.12 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ	61
รูปที่ 4.1 ลักษณะของเศษตัดแบบใช้สารหล่อเย็นและแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	63
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์แบบไม่ใช้สารหล่อเย็นและแบบใช้สารหล่อเย็น ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	64
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคม ตัด ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	65
รูปที่ 4.4 ลักษณะการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดแบบใช้สารหล่อเย็นและแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น ที่ ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	65
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นและแบบใช้สารหล่อเย็นที่ส่งผลต่อค่าความ หยาบผิว	66
รูปที่ 4.6 ลักษณะการสึกหรอของเครื่องมือตัดแบบใช้สารหล่อเย็น	67
รูปที่ 4.7 ลักษณะการสึกหรอของเครื่องมือตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น	68
รูปที่ 4.8 ลักษณะของเศษตัดภายใต้ความเร็วรอบ 800, 1100, 1400 และ 1700 รอบ/นาที อัตรา ป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	69

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตรา ป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	70
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและระยะทางในการตัดที่มีผลต่อพื้นที่สึกหรอของ คมตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	71
รูปที่ 4.11 ลักษณะการสึกหรอของคมตัดภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบในการตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	72
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคม ตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาทีและความลึก 1 มิลลิเมตร	73
รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความหยาบผิวที่มีความหยาบผิวน้อย สุด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	73
รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความหยาบผิวที่มีความหยาบผิวมากที่สุด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	74
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการตัดที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดวัสดุและ การสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร ...	75
รูปที่ 4.16 ลักษณะของเศษตัดภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อน ที่ความเร็ว 1100 รอบ/นาที และความ ลึก 1 มิลลิเมตร	76
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์อัตราป้อนที่ส่งผลต่อความหนาของเศษตัด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/ นาที ความลึก 1 มิลลิเมตร	77
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของอัตราป้อนและระยะทางในการตัดที่ส่งผลต่อพื้นที่การสึกหรอของ คมตัดที่ความเร็วรอบในการตัดเฉลี่ย 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	78
รูปที่ 4.19 ลักษณะการสึกหรอของคมตัดภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อน ที่ความเร็วรอบในการตัด เฉลี่ย 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	79
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและการสึกหรอคมตัดที่ ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	80
รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความหยาบผิวที่มีความหยาบผิวน้อย สุดที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	80

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความหยาบผิวที่มีความหยาบผิวมากที่สุด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	81
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดวัสดุและการสึกหรอของ คมตัด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร	82



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยส่วนใหญ่นิยมใช้กังงานเชื่อมแก๊สที่เกิดการสึกหรอจากการเสียดสีระหว่างโลหะกับโลหะ หรือการสึกหรอของรอยแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง ลักษณะงานเชื่อมพอกผิวแข็งสามารถพบได้ทั่วไป เช่น การเชื่อมพอกเฟือง ล้อขับ เพลา การเชื่อมพอกแม่พิมพ์ตัดและใบกวน ใบมีดตัดในอุตสาหกรรมโรงงานน้ำตาล ฯลฯ เนื่องจากการเชื่อมแก๊สขึ้นส่วนที่เกิดการสึกหรอมีความต้องการคุณสมบัติเชิงกลของรอยเชื่อมที่แตกต่างจากการเชื่อมประสานทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติด้านความแข็ง (Hardness) เพื่อความต้านทานการสึกหรออันจะเกิดขึ้นหลังการนำกลับมาใช้งานอีก ซึ่งในปัจจุบันงานเชื่อมพอกผิวแข็งได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของงานทางด้านอุตสาหกรรมการผลิตเป็นอย่างมาก จึงได้มีการแข่งขันกันในด้านประสิทธิภาพของชิ้นงาน ในส่วนของการใช้งานผิวเชื่อมพอกผิวแข็ง ผิวพอกจำเป็นต้องมีการปรับแต่งด้วยกรรมวิธีทางกล อย่างไรก็ตามความสามารถในการตัดเนื้อโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากสมบัติของผิวพอกผิวแข็งมีความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรงและความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนสูง การตัดเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็งจึงเกิดขึ้นได้ค่อนข้างยาก ส่งผลทำให้เกิดความเสียหายผิวที่สูง มีดกัดที่ใช้ในการกัดผิวหน้าเกิดการสึกหรอและความเสียหายสูง [1] ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการกัดปาดผิวหน้าโลหะ เพื่อศึกษาหาการสึกหรอคมตัดของมีดกัดและเปรียบเทียบรูปร่างเศษการตัดในการกัดผิวหน้าโลหะ และหาค่าตัวแปรในการตัดเนื้อที่เหมาะสมเพื่อยืดอายุการใช้งานของเครื่องมือตัดเพิ่มขึ้น [2]

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยหลายๆ งานที่ได้กล่าวถึงงานเชื่อมพอกผิวแข็งและการสึกหรอของคมตัด รูปร่างเศษการตัด เช่น การศึกษาอิทธิพลของการเคลือบผิวด้วย aCN/TiAlN บนการสึกหรอของมีดกลึง แรงตัด พื้นผิวสำเร็จและรูปร่างเศษการกัดผิวหน้าของโลหะผสมพิเศษเกรด Ti6Al4V ในงานวิจัยนี้ได้สรุปว่าการเคลือบผิวด้วย aCN/TiAlN ทำให้มีความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้นและมีดกลึงมีอายุการใช้งานยืดออกไปอีกประมาณ 15%ของอายุการใช้งาน และพิสูจน์ได้ว่ามีประสิทธิภาพในรูปร่างเศษชิ้นงานและพื้นผิวสำเร็จ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในแง่ของการยึดเกาะความต้านทานการสึกหรอของพื้นผิวสำเร็จและรูปร่างเศษ [3] นอกจากนี้มีงานวิจัยหนึ่งได้กล่าวในเรื่องของการสังเกตการณ์ทดลองการสึกหรอของเครื่องมือตัด แรงตัดและรูปร่างเศษการตัดในการกัดผิวหน้าของโคบอลต์ตามโลหะผสมพิเศษกับลักษณะทางกายภาพแบบที่มีการเคลือบผิวและไม่มีการเคลือบผิว ซึ่งได้กล่าวถึงการตรวจสอบผลกระทบเงื่อนไขที่มีผลต่อการตัดเนื้อ (ความเร็วตัด, อัตราป้อนและความลึกในการตัด บนการสึกหรอของเครื่องมือตัด รูปร่างเศษการตัดและแรงตัดในการกัด

ผิวหน้า [4], และอีกงานวิจัยได้กล่าวถึง อิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคในการสึกหรอแบบขัดสีของ โลหะผสมพอกผิวแข็งผิวชุบ Fe-Cr-C-Nb โดยกระบวนการเชื่อมแบบเปิด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้รับการ พัฒนาสำหรับวัสดุหุ้มด้วยเทคนิคการเชื่อมแบบเปิดขึ้นส่วนภายใต้การสึกหรอแบบขัดสี แสดงให้เห็น ว่าการพัฒนาโลหะผสมพอกผิวแข็ง Fe-Cr-C-Nb มีแนวโน้มที่ดีขึ้น ความต้านทานการสึกหรอแบบขัด สี เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนสูงธรรมดา / โครเมียมสูง โลหะผสมพอกผิวแข็งมีค่าความแข็งที่สูงขึ้น และมีปริมาณ M_7C_3 ที่สูงขึ้นจากระดับ [5]

ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการศึกษาความสามารถในการตัด เือนโลหะเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อเทา ซึ่งเป็น โลหะสำคัญที่ใช้ในการผลิตชิ้นส่วน เครื่องจักรกลเกษตร และมีปริมาณการเกิดการเสียหายเนื่องจากการใช้งานเพิ่มขึ้น การประยุกต์การ เชื่อมพอกแข็งและการตกแต่งพื้นผิวโลหะเชื่อมด้วยวิธีทางกล เช่น การกัดผิวหน้า สามารถทำให้ผิว โลหะเชื่อมพอกแข็งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทดแทนชิ้นส่วนที่เกิดการเสียหาย เป็นการเพิ่มมูลค่า ชิ้นส่วนที่เสียหายจากการใช้งาน และเป็นการลดต้นทุนในการผลิตของภาคเกษตรกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการสึกหรอของคมตัดโดยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ แบบเพลงานแนวตั้งใน กระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบรูปร่างเศษการตัดในการกัดผิวหน้าโลหะและเปรียบเทียบ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25 โดยกระบวนการ เชื่อมอาร์คคลวดหุ้มฟลักซ์

1.3.2 วัสดุที่ใช้เหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25 ขนาด 160 x 110 x 20 มิลลิเมตร

1.3.3 ลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง ยี่ห้อ YAWATA เกรด H-350C (JIS Z 3251: DF2A-350-B) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 350 มิลลิเมตร

1.3.4 ตัวแปรการเชื่อม กระแสเชื่อมที่ 130 แอมแปร์ เป็นกระแส DC ซึ่งกำหนดให้มีการ อุ้มน้ำงาน (Pre-heat Temperature) ที่ 350 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิระหว่างเชื่อมที่ 250 องศา เซลเซียส

1.3.5 กระบวนการกัดปาดหน้าผิวโลหะโดยเครื่องจักรกลอัตโนมัติ แบบเพลงานแนวตั้ง โดยใช้ตัวแปรการกัดปาดผิวหน้า ประกอบด้วย

- 1.3.5.1 ความลึกในการกัด (Depth of cut) คือ 1 มิลลิเมตร
- 1.3.5.2 อัตราป้อน (Feed rate) คือ 100, 300, 500 และ 700 มิลลิเมตร/นาที
- 1.3.5.3 ความเร็วรอบ (Speed) คือ 800, 1100, 1400 และ 1700 รอบ/นาที
- 1.3.5.4 เครื่องมือตัดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสทำจากวัสดุคาร์ไบด์ (Carbide) ตามมาตรฐาน ISO (International Standards Organization) ระดับ P40 เคลือบผิวด้วย $TiN+TiCN+Al_2O_3$
- 1.3.5.5 การกัดปาดผิวหน้าโลหะแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็น (สารหล่อเย็นชนิด Soluble oils อัตราส่วนผสมต่อน้ำ 1:20)
- 1.3.6 ศึกษาความหยาบผิว การสึกหรอของเม็ดมีดและรูปร่างเศษการกัดในการกัดปาดผิวหน้าโลหะ

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้ที่ต้องการจะศึกษาการเปรียบเทียบการสึกหรอคมตัดรูปร่างเศษการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25
- 1.4.2 เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการเชื่อมพอกผิวแข็งหรือในกระบวนการกัดผิวหน้าโลหะ
- 1.4.3 ในงานทางด้านอุตสาหกรรมที่มีการซ่อมแซมชิ้นงานซึ่งการเกิดสึกหรอจากการเสียดสีโลหะกับโลหะ ในงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงค่าความแข็งแรงและการสึกหรอที่น้อยที่สุดของเครื่องมือตัดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาต่อไป
- 1.4.4 เพื่อนำความรู้ที่ได้จากการทำโครงการนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานการเปรียบเทียบการสึกหรอของคมตัดและรูปร่างเศษการกัดผิวหน้าโลหะ และเป็นความรู้ในงานวิจัยต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เหล็กหล่อสีเทา

2.1.1 ความหมายของเหล็กหล่อ [6]

เหล็กหล่อเป็นเหล็กชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายเป็นระยะเวลานานลักษณะเหล็กหล่อจะคล้ายกับเหล็กกล้า (Steels) ตรงที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่เช่นเดียวกัน ซึ่งสามารถศึกษาโครงสร้างได้จากแผนภาพสมดุล (Phase equilibrium diagram) ระหว่างเหล็กกับคาร์บอนได้เช่นเดียวกัน แต่ต่างกันเพียงปริมาณของคาร์บอนในเหล็กหล่อจะมีมากกว่าเหล็กกล้า คือมีคาร์บอนตั้งแต่ร้อยละ 2-6.67 แต่ในทางอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะผลิตเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนอยู่ระหว่างร้อยละ 2.5-4.0 ถ้าปริมาณคาร์บอนมากกว่านี้เหล็กจะสูญเสียคุณสมบัติทางด้านความเหนียว (Ductility) ก็จะเปราะและแตกหักได้ง่ายเมื่อถูกแรงกระแทก ปกติแล้วเหล็กหล่อส่วนมากจะขาดคุณสมบัติทางด้านความเหนียวเมื่อเทียบกับเหล็กกล้า จึงไม่สามารถขึ้นรูปด้วยการรีดหรือการดึงขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงได้ การขึ้นรูปเหล็กหล่อที่อุณหภูมิสูงนั้นทำได้ยาก แต่วิธีที่ใช้ในการขึ้นรูปแม้ว่ารูปร่างจะซับซ้อนก็สามารถทำได้ โดยการหลอมเหล็กให้ละลายแล้วเทลงแบบหล่อที่ทำด้วยทรายหรือวัสดุทนความร้อน จึงได้ชื่อตามกรรมวิธีว่า เหล็กหล่อ

เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่นิยมใช้ในการผลิตทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก นอกจากมีราคาถูกกว่าเหล็กกล้าแล้ว ยังมีจุดหลอมตัวที่ต่ำและหล่อขึ้นรูปได้ง่ายเหล็กกล้า เหล็กหล่อยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ โดยการเติมธาตุผสมที่เหมาะสมและผ่านการอบชุบที่ดี ก็จะทำให้ได้เหล็กหล่อที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง มีการปรับปรุงพัฒนาจนเหล็กหล่อบางชนิดมีคุณสมบัติใกล้เคียงเหล็กกล้า จึงทำให้ปัจจุบันนี้ได้มีปริมาณการผลิตเหล็กหล่อในปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

แผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน [7] มีความสำคัญเพราะคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ในงานวิศวกรรมเปลี่ยนแปลงตามปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก การที่รู้และเข้าใจถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเหล็กได้ดังนั้นจะต้องเข้าใจเรื่องของแผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน ก่อนเป็นหลักในการศึกษา แผนภูมินี้จะต้องทำความเข้าใจความหมายของสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องก่อนดังต่อไปนี้

เฟอร์ไรต์ (Ferrite) หรือเหล็กอัลฟา (α) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กอัญรูปกับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กอัลฟา (α) มากที่สุด 0.0218% ที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส มีระบบผลึกแบบ bcc. (Body Centered Cubic)

ออสเตนไนท์ (Austenite) หรือเหล็กแกมมา (γ) คือสารละลายของแข็งของเหล็กอัญรูป แกมมา (γ) กับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนละลายในเหล็กแกมมา (γ) นี้ได้มากที่สุด 2.11% ที่

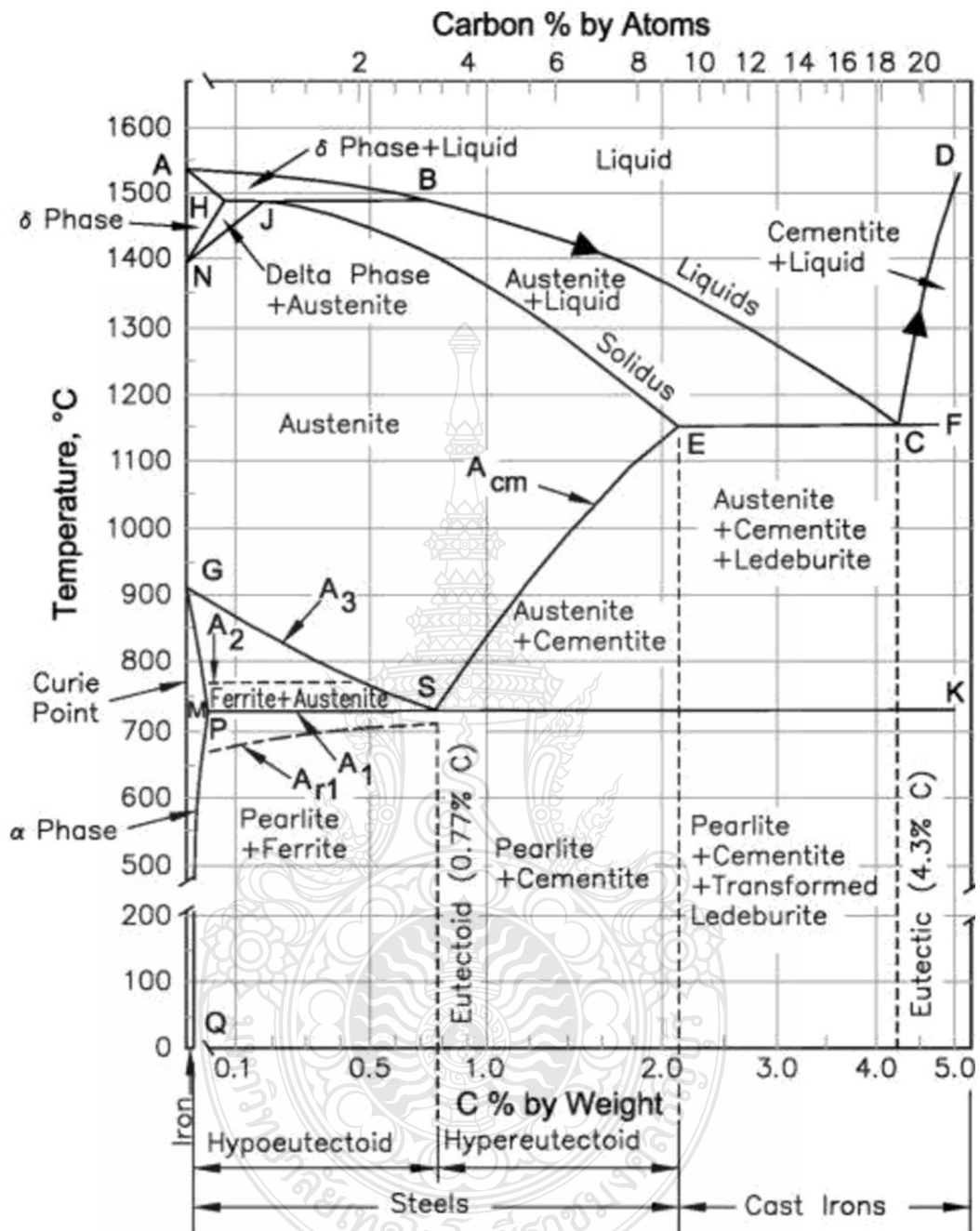
อุณหภูมิ 1148 องศาเซลเซียส มีระบบผลึกแบบ fcc. (Face Centered Cubic) ซึ่งสังเกตได้ว่าคาร์บอนเป็นตัวที่ช่วยให้ออสเทนไนต์ มีความสมดุลมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลเหล็ก-คาร์บอน เหล็กบริสุทธิ์มีช่วงเป็นออสเทนไนต์ที่อุณหภูมิ 912-1394 องศาเซลเซียส แต่ขอบเขตนี้จะกว้างขึ้นเมื่อมีคาร์บอนละลายอยู่

เฟอร์ไรต์หรือเหล็กเคลต้า (δ) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอน ในช่วงอุณหภูมิใกล้จุดหลอมตัวของเหล็กที่อุณหภูมิ 1394-1538 องศาเซลเซียส คาร์บอนสามารถละลายในเหล็กได้สูงสุด 0.09% ที่อุณหภูมิ 1495 องศาเซลเซียส มีระบบผลึกแบบ BCC (Body Centered Cubic) เช่นเดียวกับเฟอร์ไรต์หรือเหล็กอัลฟา (α)

ซีเมนไตต์ (Cementite หรือ Iron Carbide) เมื่อปริมาณคาร์บอนแผนภูมิสมดุล เหล็ก-คาร์บอน มีมากเกินไปที่จะละลายได้ในเฟอร์ไรต์หรือออสเทนไนต์ได้หมด คาร์บอนที่เหลือจะจับตัวกับเหล็กเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับคาร์บอน โดยมีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67% สูตรทางเคมี Fe_3C มีความแข็งสูง แต่จะเปราะและแตกหักได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกระแทก

เพิร์ลไลต์ (Pearlite) คือผลึกที่เกิดร่วมกันระหว่างเฟอร์ไรต์ มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.0218% กับซีเมนไตต์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67% เกิดจากปฏิกิริยา Eutectoid ในขณะที่ทำให้เหล็กเย็นตัวช้าๆ ตรงอุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส การเกิดเฟอร์ไรต์และซีเมนไตต์ จะเกิดพร้อมกันที่อุณหภูมิก่อนที่ เกิดผลึกเป็นแถบยาวๆ สลับกันระหว่างเฟอร์ไรต์กับซีเมนไตต์ ดังนั้นเพิร์ลไลต์ จึงไม่เป็นเฟสเดี่ยวแต่เป็นโครงสร้างที่เกิดจากสองเฟสรวมกัน

แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนเป็นแผนภูมิประเภทที่เกิดการละลายเข้ากันเป็นเฟสเดียวในสภาพของเหลว แต่มีการแยกเป็นหลายเฟสในสภาพของแข็ง กล่าวคือในสภาพของแข็ง คาร์บอนจะรวมตัวกับเหล็กทั้งในสภาพสารละลายของแข็ง (Ferrite α , Austenite γ และ Ferrite δ) และสารประกอบเชิงโลหะ (Fe_3C) จากแผนภูมิสมดุลจะปรากฏปฏิกิริยา 3 ปฏิกิริยา คือ



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ [7]

ที่อุณหภูมิ 1495 องศาเซลเซียส จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Peritectic โดยเฟอร์ไรต์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.09% รวมตัวกับเหล็กหลอมเหลวที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.53% และรวมตัวกับออสเทนไนต์ ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.17%

ที่อุณหภูมิ 1148 องศาเซลเซียส ให้ปฏิกิริยา Eutectic โดยเหล็กหลอมเหลวที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 4.3% เกิดการแข็งตัวให้สารละลายของแข็งออสเตนไนท์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 2.11% รวมกับซีเมนไตท์ ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67%

ที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส จะทำปฏิกิริยา Eutectoid โดยออสเตนไนท์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.77% แยกตัวให้เฟอร์ไรท์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.0218% กับซีเมนไตท์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67% จะได้โครงสร้างสุดท้ายเป็นเพิร์ลไลท์

เส้นแบ่งบริเวณของเขตต่างๆ ที่ปรากฏบนแผนภูมิสมมูลมีดังนี้

A_1 คือ เส้นแสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา Eutectoid คือที่อุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส

A_2 คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะแม่เหล็กของเฟอร์ไรท์ ซึ่งจะอยู่ที่อุณหภูมิ 770 องศาเซลเซียส เมื่อเหล็กร้อนเกินกว่าอุณหภูมินี้แม่เหล็กจะไม่ดูดเส้น A_2 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังนั้นจึงมักไม่ค่อยปรากฏในแผนภูมิสมมูล

A_3 คือ เส้นอุณหภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างออสเตนไนท์กับเฟอร์ไรท์ α

A_4 คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างออสเตนไนท์กับเฟอร์ไรท์ δ

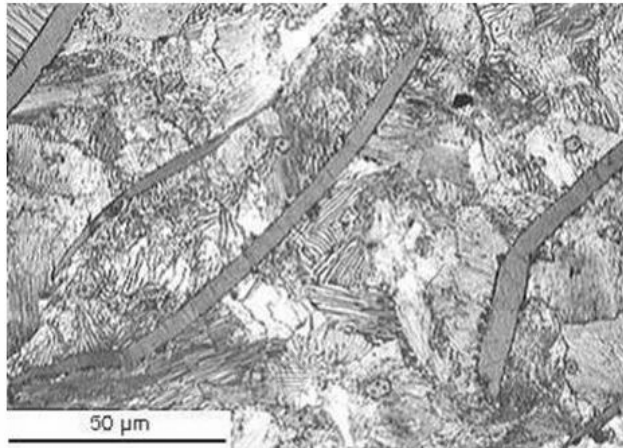
A_{cm} คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างออสเตนไนท์กับซีเมนไตท์

2.1.2 รูปแบบของเหล็กหล่อ

เหล็กหล่อมียหลายชนิด สามารถจำแนกตามลักษณะโครงสร้างพื้นฐาน รูปร่าง และการกระจายตัวของคาร์บอน หรือ กราไฟท์ (Graphite) แบ่งได้ดังนี้

2.1.2.1 เหล็กหล่อสีเทา (Grey cast iron) [8]

เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสมและโครงสร้างใกล้เคียงกับเหล็กดิบ (Pig iron) ที่ถลุงจากเตาสูง (Blast furnace) ในบางโอกาสอาจจะผลิตเหล็กหล่อสีเทาจากเหล็กดิบโดยตรงโดยปราศจากการปรับปรุงส่วนผสมใดๆ หรือไม่ก็อาจจะนำเหล็กดิบมาหลอมใหม่ในเตาพ่นลม (cupola) หรือเตาไฟฟ้า แล้วปรับปรุงส่วนผสมบ้างเล็กน้อย เพื่อให้เหล็กหล่อมียคุณภาพที่ดีขึ้น ทำให้เหล็กหล่อสีเทามีราคาถูกเมื่อเทียบกับโลหะอื่นๆ นอกจากนี้เหล็กหล่อสีเทายังมีคุณสมบัติอื่นๆ ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในอุตสาหกรรมอีกหลายประการ เช่น มีความแข็งไม่สูงสามารถกลึงหรือไส ตบแต่งให้ได้ขนาดตามต้องการได้ง่าย มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำ และมีความสามารถในการไหล (Fluidity) ดีสามารถหล่อลอมให้ได้รูปร่างชนิดซับซ้อนได้ง่าย มีอัตราการขยายตัวน้อย สามารถใช้ทำส่วนประกอบของเครื่องจักรกลที่ต้องการรูปร่างและขนาดที่แน่นอน มีความต้านทานต่อแรงอัดและรับแรงสั่น (Damping Capacity) ได้ดีใช้ทำแท่นรองรับอุปกรณ์เครื่องมือกลต่างๆ ได้ดี สามารถที่จะปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงได้มากขึ้นอยู่กับการปรับปรุงส่วนผสมและการอบชุบ ทำให้ใช้งานได้กว้างขวาง ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเหล็กหล่อสีเทา แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่อเทา [6]

[8] ที่เรียกว่าเหล็กหล่อสีเทาก็เพราะเหล็กหล่อชนิดนี้เมื่อตีหักดูเนื้อเหล็กตรงรอยหักจะมีลักษณะเป็นสีเทาซึ่งต่างกับเหล็กหล่อสีขาว ซึ่งความจริงเหล็กหล่อสีเทาก็เป็นเหล็กหล่อที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับเหล็กหล่อสีขาว ต่างกันตรงที่เหล็กหล่อสีเทาในขณะที่เปลี่ยนสภาวะจากของเหลวไปเป็นของแข็งจะเป็นระบบสแตเบิล (Stable) กล่าวคือปริมาณคาร์บอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของคาร์บอนบริสุทธิ์ แยกตัวออกมารวมเป็นแผ่น (flakes) ซึ่งเรียกว่าแกรไฟต์ และกระจายอยู่ทั่วไปในเนื้อเหล็ก ทำให้มองดูรอยหักเป็นสีเทา

จุดเด่นของเหล็กหล่อเทาในด้านความสามารถในการดูดกลืนพลังงาน การนำความร้อน ความสามารถในการกัดกร่อนและความสามารถในการหล่อหลอมเหนือกว่าเหล็กหล่อเหนียวซึ่งสมบัติเหล่านี้เป็นที่ต้องการสำหรับผลิตเสื้อสูบ (engine block) กล่าวคือ ต้องการผลิตเสื้อสูบที่มีความสามารถในการดูดกลืนการสั่นสะเทือนและการถ่ายเทความร้อนได้ดี ถึงแม้ว่าในปัจจุบันอะลูมิเนียมได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น แต่เหล็กหล่อเทายังคงนิยมนำมาผลิตในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โครงสร้างที่มีแกรไฟต์ขนาดกลางสามารถรักษาระดับความสามารถในการดูดกลืนการสั่นสะเทือน ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนมีความแข็งแรง สามารถต้านทานต่อความล้า และสามารถหล่อขึ้นรูปชิ้นงานที่มีลักษณะรูปร่างซับซ้อน

[9] เหล็กหล่อเป็นเหล็กที่ผลิตจากเหล็กดิบสีเทา (Grey Pig Iron) ที่ได้จากเตาสูง (Blast Furnace) มาหลอมหรือถลุงใหม่ในเตาคิวโปลา เตาแอร์เฟอร์เนซ หรือเตาไฟฟ้า ถ้าพิจารณาจาก Iron-carbon Equilibrium Diagram แล้วจะเห็นว่าเหล็กหล่อมีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 2% - 6.67% ส่วนเหล็กกล้ามีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 0.008% - 2% เท่านั้น แต่ทางปฏิบัติแล้วเหล็กหล่อจะมีปริมาณธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณ 2.5% - 4% ถ้ามีมากกว่านั้นจะขาดคุณสมบัติความเหนียว (Ductility) จะเปราะและแตกหักง่ายเมื่อถูกแรงกระแทกปกติ

[10] อิทธิพลของความหนาของชิ้นงานและส่วนผสมทางเคมีที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่อเทาขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ ระดับการเกิดนิวเคลียส และอัตราการเย็นตัวภายหลังการเทน้ำโลหะ เพราะตัวแปรทั้ง 3 ดังกล่าวจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างและปริมาณของกราฟไฟท์ และชนิดโครงสร้างเมทริกซ์ที่ได้ในโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหล่อ จากการที่โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติของชิ้นงานหล่อมีความสัมพันธ์กับความหนาของชิ้นงาน เหล็กหล่อเทาจึงถูกกำหนดเกรดในรูปค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุด โดยการหล่อในแท่งชิ้นงานทดสอบมาตรฐาน (โดยปกติใช้เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร) ในแบบหล่อทราย ยกตัวอย่างเช่น เหล็กหล่อเกรด FC25 (เกรด 250) อาจจะมีค่า UTS ต่ำสุด ที่ 250 N/mm^2 เมื่อหล่อในแท่งชิ้นงานเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร แต่หากทำการหล่อในแท่งชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร แล้ว อาจจะได้ค่า UTS ต่ำสุดเพียง 200 N/mm^2

การลดลงของค่าความแข็งแรง เป็นผลสืบเนื่องจากอัตราการเย็นตัวที่ต่ำระหว่างการแข็งตัวในชิ้นงานที่หนา อัตราการเย็นตัวที่ต่ำนี้ส่งผลให้เกิดจำนวนอนุภาคขึ้นน้อยในระหว่างการแข็งตัวของยูเทคติกออสเทนไนต์-กราฟไฟท์ ซึ่งในสภาพดังกล่าวนี้จะทำให้มีจำนวนเซลล์ยูเทคติกเกิดขึ้นน้อย ส่งผลให้ขนาดของเซลล์ยูเทคติกที่ได้มีขนาดใหญ่ ในแต่ละเซลล์ยูเทคติกเกิดกราฟไฟท์จะตกผลึกอย่างต่อเนื่องเป็นกิ่งก้านสาขา ดังนั้นในชิ้นงานที่มีความหนามากซึ่งเซลล์ยูเทคติกมีขนาดใหญ่ จะประกอบไปด้วยเกล็ดแกรไฟท์ที่มีความต่อเนื่องมาก มีผลทำให้ความต้านทานแรงดึงลดลง โดยทั่วไปในการผลิตเหล็กหล่อเทาเกรดต่ำ-ปานกลาง เช่น FC20 และ FC25 เป็นต้น ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเติมธาตุผสมลงไป เพราะเหล็กหล่อเกรดเหล่านี้ถูกกำหนดให้มีคุณสมบัติในค่าความต้านทานแรงดึงต่ำสุดเท่านั้น การควบคุมส่วนผสมทางเคมี มีความสำคัญในกรณีที่ต้องการผลิตเหล็กหล่อที่มีคุณสมบัติพิเศษ และในการผลิตเหล็กเกรดที่มีความแข็งแรงสูง (FC30 – 40) ซึ่งจำเป็นต้องเติมธาตุ निकิล ทองแดง และ โมลิบดีนัม ในปริมาณเล็กน้อย เพื่อให้ได้โครงสร้างเมทริกซ์ที่มีความแข็งแรงสูง

มาตรฐานของเหล็กหล่อสีเทา [8] เหล็กหล่อสีเทาเป็นเหล็กที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ และคาร์บอนส่วนใหญ่เกิดอยู่ในรูปของแกรไฟท์ ส่วนคาร์บอนที่เหลือจะเกิดอยู่ในรูปของสารประกอบกับเหล็กที่เรียกว่า ซีเมนไตต์ (Cementite) เพราะฉะนั้นมาตรฐานเหล็กหล่อสีเทาจึงมีหลายเกรด ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเหล็กหล่อ ตัวอย่างที่จะนำมากล่าวต่อไปนี้เป็นมาตรฐานของประเทศต่างๆ ซึ่งเกรดที่แบ่งตามมาตรฐานญี่ปุ่น ดังตารางที่ 2.1

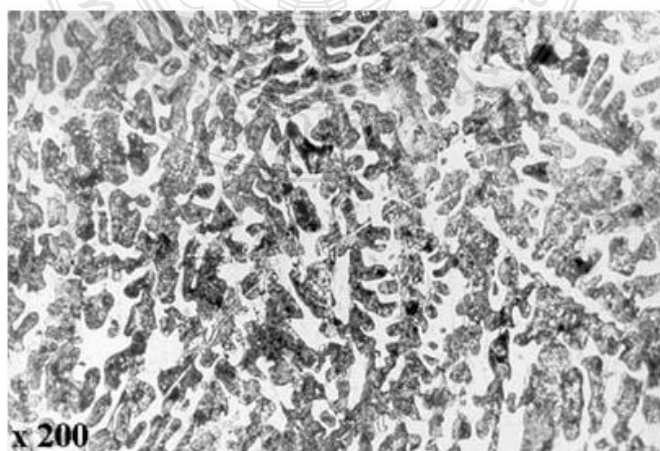
ตารางที่ 2.1 มาตรฐานญี่ปุ่น (JIS)

ชั้นคุณภาพ (Fc)	10	15	20	25	30	35
ความเค้นแรงดึง (ต่ำสุด) (Kg/mm ²)	10	15	20	25	30	35

2.1.2.2 เหล็กหล่อขาว (White cast iron) [6]

เหล็กหล่อสีขาวเป็นเหล็กหล่อที่ไม่ได้ใช้กันอย่างกว้างขวางเหมือนเหล็กหล่อสีเทา เหล็กหล่อขาว คือเหล็กหล่อที่มีธาตุคาร์บอนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 1.8-3.6 และยังมีธาตุที่ผสมอยู่อีกเช่นกำมะถัน, ซิลิกอน, แมงกานีสและฟอสฟอรัส ผลิตได้จากเตาคิวโปลา การเปลี่ยนสภาวะของเหล็กหล่อชนิดนี้จากสภาวะของเหลวไปสู่สภาวะของแข็ง จะเป็นระบบเมตาสเตเบิล (Metastable) กล่าวคือ คาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็กทั้งหมดจะอยู่ในรูปของเหล็กคาร์ไบด์หรือซีเมนไทต์ (Fe_3C) ทำให้เหล็กหล่อขาวมีคุณสมบัติแข็งและเปราะ แตกหักง่าย รอยแตกหักจะเป็นสีขาว เหตุที่รอยแตกมีสีขาวเป็นเพราะการหลอมเหล็กเข้าแม่พิมพ์แล้วทำการปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว เหล็กหล่อขาวเหมาะกับการนำไปใช้ในงานที่ต้องการความต้านทานการสึกหรอสูง ทนทานต่อการเสียดสี แต่ไม่สามารถรับแรงกระแทกได้ ยกตัวอย่างเช่น แบริ่ง ล้อรถไฟ งานเจียรระไนเพชรพลอย อุปกรณ์การผลิตซีเมนต์ งานแม่พิมพ์เครื่องตัดเหล็กตัดท่อ ล้อรถบดถนน เป็นต้น

คุณสมบัติเด่นของเหล็กหล่อขาว มีความแข็งสูง นำมาถึง กัด เจาะ ใสได้ มีความเปราะสูง ทนแรงกระแทกได้น้อย ทนการเสียดสีได้ดี การสึกหรอระหว่างการใช้น้อย มีโครงสร้างทางจุลภาค แสดงดังรูปที่ 2.3 เหล็กหล่อขาวนี้มีความแข็งอยู่ประมาณ 380-550 HB ความแข็งนี้จะแปรเปลี่ยนไปตามธาตุผสมอื่น ๆ อีกด้วย เช่น โครเมียม หรือโมลิบดีนัม [11]



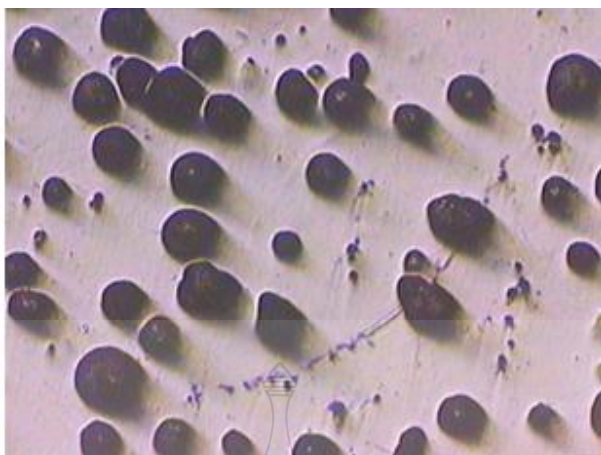
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่อขาว [6]

2.1.2.3 เหล็กหล่อกราไฟท์กลม (Spheroidal graphite cast iron) [6]

เหล็กหล่อกราไฟท์กลมหรือที่มีชื่อเรียกกันหลายชื่อ เช่น Nodular cast iron, Spheroidal graphite cast iron, Ductile cast iron โดยเกรดเหล็กที่ผลิตกันทั่วไป จะขึ้นต้นด้วย GGG หรือ FCD โดยเหล็กหล่อเกรดนี้จะมีรูปร่างลักษณะของ กราไฟท์ที่ตกผลึกอยู่ในเนื้อเหล็กเป็นลักษณะกลม (Nodule หรือ Spheroid) ด้วยลักษณะดังกล่าวนี้ ทำให้เหล็กเกรดนี้มีคุณสมบัติเหนียว รับแรงกระแทกได้ดีกว่าเหล็กหล่อเทา (Grey cast iron)

เหล็กหล่อกราไฟท์กลมมีคาร์บอนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 3-3.5 และยังมีธาตุอื่นที่ผสมอยู่ เช่น แมกนีเซียมและนิกเกิล เหล็กหล่อชนิดนี้ได้มาจากเหล็กหล่อสีเทาอีกที โดยการผสมแมกนีเซียม-นิกเกิลลงในน้ำเหล็กก่อนเทลงแบบ ซึ่งจะทำให้กราไฟท์ (คาร์บอนบริสุทธิ์ที่รวมตัวอยู่ในเนื้อเหล็ก) มีลักษณะเป็นวงกลม เหล็กหล่อกราไฟท์กลมต่างกับเหล็กหล่อสีเทาตรงที่คาร์บอนรวมตัวเป็นกราไฟท์ในลักษณะกลม (กราไฟท์ของเหล็กหล่อสีเทาอยู่ในลักษณะยาวๆ) คุณสมบัติที่ได้จึงเหนียวและรับแรงกระแทกได้ดีกว่าเหล็กหล่อสีเทา จึงเป็นที่นิยมใช้มาก โครงสร้างของเหล็กชนิดนี้จะมีโครงสร้างพื้นเป็นเฟอร์ไรท์ (Ferrite) และเพิร์ไลต์ (Pearlite) ลักษณะโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.4

คุณสมบัติเด่นของเหล็กหล่อกราไฟท์กลม ในการทดสอบแรงดึงเหล็กหล่อเหนียวจะพบว่าคล้ายคลึงกับเหล็กกล้าคือ จะมีความยืดหยุ่น (Elastic) แต่จะไม่ปรากฏจุดคราก (Yield Point) นอกจากนั้นยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลโดยวิธีทางความร้อนได้ดีอีกด้วย [11] เหล็กหล่อกราไฟท์กลมสามารถทนต่อแรงดึงได้สูงประมาณ 540-700 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร มีอัตราการยืดตัวประมาณร้อยละ 1-5 เหล็กหล่อกราไฟท์กลมสามารถนำไปชุบแข็ง อบลดความเคียดหรือชุบผิวแข็งได้ ความแข็งและเปราะลดลงสามารถทำให้งัด กัด ไส เจาะได้ง่าย ทนทานต่อการสึกหรอได้ดี ทนต่อความร้อนได้ดี สามารถนำไปตีขึ้นรูปได้ สามารถรับแรงกระแทกได้ดี เหล็กหล่อกราไฟท์กลมนำไปใช้ในการทำชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ เช่น เพลาข้อเหวี่ยง เครื่องมือการเกษตร ชิ้นส่วนเรือเดินทะเล โครงสร้างเครื่องจักรขนาดใหญ่ ท่อส่งน้ำ ท่อส่งแก๊ส เป็นต้น

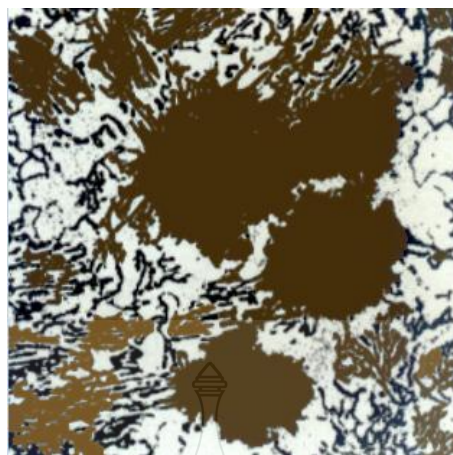


รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่อกราไฟท์กลม แบบไม่กัดกรด [12]

2.1.2.4 เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast iron) [6]

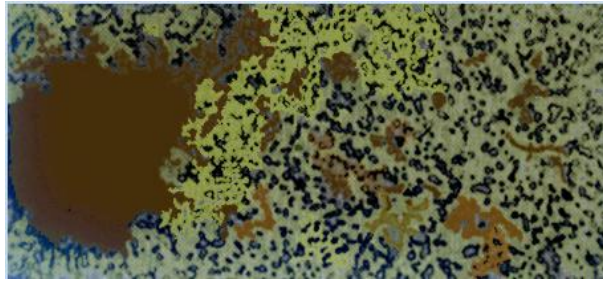
เหล็กหล่ออบเหนียวหรือเหล็กหล่อมัลดีเบิ้ล (Malleable iron) มีความแข็งแรงดึงสูงกว่าเหล็กหล่อเทา (Grey iron) และเหล็กหล่อขาว (White iron) แต่จะต่ำกว่าเหล็กหล่อเหนียว (Ductile iron) เล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีความเหนียวทนต่อแรงกระแทกได้ดี (Ductility and shock resistance) เหล็กหล่ออบเหนียวแบ่งออกได้เป็น 2 ตามประเภทตามลักษณะของโครงสร้างพื้นฐาน (Matrix) ดังนี้

- เหล็กหล่ออบเหนียวดำ (Ferritic หรือ Blackheart malleable cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่ผลิตโดยการนำเหล็กหล่อขาวมาอบความร้อนภายในเตาที่มีบรรยากาศเป็นก๊าซเฉื่อย หรืออาจใช้ทรายมาปิดคลุมชิ้นงานไว้ในขณะทำการอบ เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันบริเวณผิว (non-decarburised) โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 900-1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลานานประมาณ 30-50 ชั่วโมง และอบที่อุณหภูมิ 720-740 องศาเซลเซียส ในช่วงที่สอง โดยเวลาในการอบช่วงที่สองนี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างพื้นฐานที่ต้องการ อบในบรรยากาศปกคลุมจะทำให้เหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) แยกตัวเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) และกราไฟท์ (Graphite) โดยกราไฟท์ที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนคล้ายดอกไม้กระจายอยู่ทั่ว และถูกล้อมรอบด้วยผนังโครงสร้างพื้นฐานเฟอร์ไรต์ (Ferrite) หรือเพิร์ลไลท์ (Pearlite) ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) ในช่วงการอบครั้งที่สอง โดยทั่วไปนิยมใช้งานอยู่ 2 เกรด คือเกรดแรกมีความเค้นแรงดึง (Tensile strength) 300 MPa (M/mm^2) และมีค่า elongation มากกว่า 10% ส่วนเกรดที่สองจะมีความเค้นแรงดึง 800 MPa (M/mm^2) และมีค่า elongation ประมาณ 1% ลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่ออบเหนียวดำ แสดงดังรูปที่ 2.5 การนำไปใช้ส่วนใหญ่จะเป็นชิ้นส่วนชุดโซ่ลำเลียง ฟันเฟือง ลูกสูบ ชิ้นส่วนขับเคลื่อน เป็นต้น



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่ออบเหนียวดำ [13]

- เหล็กหล่ออบเหนียวขาว (Pearlito-ferritic หรือ Whiteheart malleable cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่ผลิตโดยการนำเหล็กหล่อขาวมาอบความร้อนภายในเตาที่ไม่มีการควบคุมบรรยากาศเหมือน Blackheart malleable cast iron หรือคือการอบความร้อนภายใต้บรรยากาศที่เป็น decarburising คือมีการลดปริมาณคาร์บอนในเนื้อเหล็กลงในขณะอบด้วยความร้อนแบบอบอ่อน (Annealing) โดยการใช้ผงเหล็กออกไซด์ (Iron oxide) มาปิดคลุมชิ้นงานเหล็กหล่อ โดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 850-950 องศาเซลเซียส จะทำให้เหล็กคาร์ไบด์ (Fe_3C) แยกตัวเป็นออสเทนไนต์ (Austenite) และกราไฟท์ (Graphite) โดยกราฟไฟท์ที่เกิดขึ้นจะจับกลุ่มเช่นเดียวกับ Blackheart malleable cast iron แต่ต่างกันที่ผิวของเหล็กจะมีการลดปริมาณคาร์บอนลง โดยโครงสร้างพื้นฐานจะมีทั้งเฟอร์ไรต์ (Ferrite) หรือเพิร์ลไลท์ (Pearlite) ขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัว (Cooling rate) โดยทั่วไปจะมีความเค้นแรงดึง (Tensile strength) 270-570 MPa (M/mm^2) และมีค่า elongation ประมาณ 10 ถึง 3% ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาของชิ้นงานหล่ออีกด้วย ลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่ออบเหนียวขาว แสดงดังรูปที่ 2.6 การนำไปใช้ประโยชน์ของเหล็กหล่อขาวเหมาะที่จะทำเป็น ลูกกุญแจ ท่อต่อ (fittings) โช้คันโยก ซีแลมป์ ครงเบรก เป็นต้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคพื้นฐานเป็นเพิร์ลไลต์กลม มีเทมเปอร์คาร์บอนของเหล็กหล่ออบเหนียว
ขาวได้จากการอบอ่อน [14]

ในปัจจุบันนี้เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast iron) ไม่ค่อยเป็นที่นิยม
หรือเป็นเหล็กหล่อที่ถูกลืม (the forgotten iron) เนื่องจากต้องใช้เวลาและพลังงานในการอบชุบ

มาตรฐาน JIS [15] ได้แบ่งชั้นคุณภาพของเหล็กหล่ออบเหนียวไว้ตาม
ลักษณะของการผลิต และสมบัติเชิงกลของเหล็กหล่ออบเหนียวนั้น โดยมีรายละเอียดของสัญลักษณ์ที่
ใช้แทนดังนี้ มาตรฐาน JIS ระบุมาตรฐานเหล็กหล่ออบเหนียวโดยใช้ตัวอักษร 4-5 ตัวและตามด้วยเลข
สองหลักที่บอกค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่รับได้ในหน่วย กิโลกรัม/ตารางมิลลิเมตร (kg/mm^2)
ตัวอักษร 4-5 ตัว บ่งบอกถึงกระบวนการผลิตเหล็กหล่ออบเหนียว ได้แก่ FCMB = Blackheart
malleable cast iron, FCMW = Whiteheart malleable cast iron, FCMWP = Pearitic whiteheart
malleable cast iron, FCMP = Pearitic malleable cast iron ยกตัวอย่างเช่น เหล็กหล่อ FCMB 28 คือ
เหล็กหล่ออบเหนียวที่มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดมากกว่า 28 kg/mm^2 หรือ 400 MPa

2.1.2.5 เหล็กหล่อพิเศษ (Special cast iron) [9]

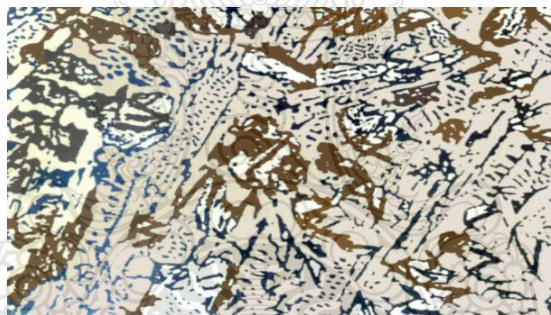
เหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษนี้เป็นเหล็กหล่อที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้มี
คุณสมบัติตามที่ต้องการ เหล็กหล่อชนิดนี้มีอยู่หลายประเภทขึ้นอยู่กับสารหรือโลหะที่ผสมในเนื้อ
เหล็กหล่อ ลักษณะ โครงสร้างของเหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษแสดงดังรูปที่ 2.7 เหล็กหล่อ
พิเศษนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

- เหล็กหล่อทนการเสียดสี (Abrasion resistance cast iron) เหล็กหล่อผสม
ทนการเสียดสีนี้เป็นเหล็กหล่อที่มีความแข็งสูง โดยการผสมโลหะโครเมียม-นิกเกิลและ
โมลิบดีนัม ในส่วนใหญ่มักจะมีลักษณะรอยแตกเป็นสีขาวคล้ายกับเหล็กหล่อสีเทา

- เหล็กหล่อทนความร้อนสูง (Heat resistance cast iron) มีคุณสมบัติเด่นที่มี
ความแข็งแรงที่อุณหภูมิสูง โดยไม่เกิดการแตกหักหรือเปลี่ยนแปลงรูปทรง มีความต้านทานต่อการ
เกิดออกซิเดชันแม้จะอยู่ในสภาพที่สัมผัสกับแก๊สร้อน มีความต้านทานต่อการเกิดการพองตัว

(Growth) และมีโครงสร้างที่คงสภาพไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงในช่วงของอุณหภูมิที่ใช้งานซึ่งจะสูงกว่า 600 °C

- เหล็กหล่อทนการกัดกร่อน (Corrosion resistant cast iron) เป็นเหล็กหล่อที่มีธาตุผสมในอัตราสูง แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ 1) เหล็กหล่อผสมนิกเกิลสูง เหล็กหล่อชนิดนี้มีนิกเกิลผสมอยู่ประมาณร้อยละ 14-30 เปอร์เซนต์คาร์บอน 2-3% เป็นเหล็กหล่อที่มีลักษณะแข็งแรงและทนการกัดกร่อนสูง มักใช้ในงานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับน้ำทะเล งานอุตสาหกรรมเคมี ลักษณะชิ้นงานผลิตปั๊ม ท่อ ข้อต่อต่างๆ เป็นต้น 2) เหล็กหล่อผสมซิลิกอนสูง เหล็กหล่อชนิดนี้มีซิลิกอนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 14 ขึ้นไป เปอร์เซนต์คาร์บอนประมาณ 2.4% คุณสมบัติของเหล็กหล่อชนิดนี้ต้านทานการกัดกร่อนโดยเฉพาะกรดชนิดต่างๆได้ดี ทุกความเข้มข้นที่อุณหภูมิห้อง ลักษณะการใช้งานพวกการทำปั๊มและท่อส่งสารละลายที่มีอำนาจในการกัดกร่อนสูง (High corrosive fluid) 3) เหล็กหล่อผสมโครเมียมสูง เป็นเหล็กหล่อที่มีโครเมียมผสมอยู่ประมาณ 20-30% เหล็กหล่อชนิดนี้มีคุณสมบัติทนต่อการสึกหรอได้ [16]



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของเหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษ [17]

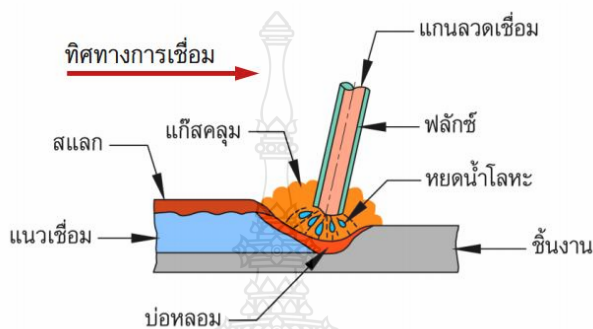
2.2 ทฤษฎีกระบวนการเชื่อมโลหะ (Manual Metal Arc Welding: MMAW)

2.2.1 ความหมายของการเชื่อมโลหะ [18]

การเชื่อมโลหะหมายถึง กรรมวิธีกระบวนการเชื่อมต่อโลหะ 2 ชิ้น ให้ติดกันอย่างแข็งแรงสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งแบบกรรมวิธีในการใช้แรงดันและกรรมวิธีการหลอมละลาย ช่างเชื่อมหรือผู้ที่เกี่ยวข้องจะต้องเลือกใช้วิธีการเชื่อมให้ถูกต้องและเหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงาน เพื่อให้ได้งานเชื่อมที่ถูกต้องสมบูรณ์ ประหยัดทั้งเวลา ค่าแรงงาน ค่าวัสดุ และค่าใช้จ่ายอื่นๆ

2.2.2 ความหมายของการเชื่อมอาร์คคลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) [19]

การเชื่อมอาร์คลวดหุ้มฟลักซ์ (Shielded Metal Arc Welding: SMAW) คือการเชื่อมด้วยไฟฟ้าในลักษณะที่ทำให้เกิดการอาร์คและได้รับความร้อนจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมชนิดมีสารพอกหุ้มกับชิ้นงาน สารพอกหุ้มบนลวดเชื่อมเมื่อละลายจะทำหน้าที่เป็นเกาะป้องกันบรรยากาศ ลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นโลหะเติมด้วย สารพอกหุ้มเมื่อแข็งตัวแล้วจะกลายเป็นสแลก (Slag) หรือจีเชื่อม แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงหลักการเชื่อมอาร์คลวดหุ้มฟลักซ์ [19]

การเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [20] ใช้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Electrode) กับชิ้นงานซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นที่ปลายลวดเชื่อมมีอุณหภูมิประมาณ 5,000-6,000 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมละลายโลหะให้ติดกัน โดยแกนของลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและเป็นโลหะเติมลงในแนวเชื่อม ส่วนฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมจะได้รับความร้อนและหลอมละลายปกคลุมแนวเชื่อมเอาไว้เพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้าทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อม พร้อมทั้งช่วยลดอัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อม เมื่อเย็นตัวฟลักซ์จะแข็งและเปราะเหมือนแก้ว เรียกว่า สแลก (Slag)

การเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding) หรือที่เรียกว่าการเชื่อมด้วยรูปเชื่อมซึ่งเป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากต้นทุนต่ำ งานที่เชื่อมด้วยกระบวนการนี้ได้แก่ ท่อส่งแก๊ส ท่อส่งน้ำมัน งานโครงสร้าง งานช่างกลเกษตร และงานอื่นๆ อีกข้อดีของกระบวนการเชื่อมแบบนี้คือสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 1.2 มิลลิเมตร ขึ้นไป และสามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม

2.2.2.1 กระแสเชื่อม [20] กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมไฟฟ้ามี 2 ชนิดคือ กระแสไฟฟ้าสลับ (Alternating current: AC) และกระแสไฟฟ้าตรง (Direct current: DC) กระแสไฟสลับ (AC) การเชื่อมไฟฟ้านั้นเครื่องเชื่อมจะเป็นตัวจ่ายกระแสไฟสลับซึ่งเป็นกระแสไฟที่มีทิศ

ทางการเคลื่อนที่สลับกันเป็นคลื่น (wave) โดยใน 1 ไซเกิล มีกระแสผ่าน 0 จำนวน 2 ครั้ง ผ่านคลื่น บวก 1 ครั้ง และผ่านคลื่นลบ 1 ครั้ง ในช่วงของคลื่นบวกอิเล็กทรอนิกส์จะไหลไปในทิศทางหนึ่ง และ ในช่วงคลื่นลบอิเล็กทรอนิกส์จะไหลในทิศทางที่ตรงข้ามกันที่ไหลในช่วงคลื่นบวก กระแสไฟปกติกจะมี ความถี่ 50 ไซเกิล ซึ่งหมายความว่าใน 1 วินาทีจะเกิดไซเกิลดังกล่าว 50 ครั้ง และกระแสไฟตรง (DC) กระแสไฟเชื่อมชนิดกระแสตรง เป็นกระแสที่มีอิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ในทิศทางตามยาวของตัวนำไป ทิศทางเดียวกันเท่านั้น ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กทรอนิกส์นั้นเปรียบเสมือนน้ำประปาที่ไหลในท่อ กระแสไฟฟ้าสลับ มีการเปลี่ยนขั้ว 100 ครั้งต่อวินาที (50 ไซเกิล) แต่กระแสไฟฟ้าตรงจะไหลจากขั้ว หนึ่งไปตลอด โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงขั้ว ดังรูปที่ 2.16 และสามารถเปลี่ยนกระแสไฟสลับเป็น กระแสตรงได้ โดยใช้เครื่องเรียงกระแส

2.2.2.2 ชนิดของลาวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Type of Flux) ชนิดของลาวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ สามารถแบ่งออกได้ ดังนี้ [21]

- ลาวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดกรด (Acid) ส่วนผสมของฟลักซ์ประกอบด้วย เหล็ก ออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์และซิลิกา สแลกจะมีลักษณะคล้ายรังผึ้งหลุดออกง่าย การหลอมลิก ใช้ได้ทั้งไฟกระแสตรงและกระแสสลับ ฟลักซ์ชนิดนี้มีแนวโน้มที่จะก่อให้เกิดแตกร้าาขณะร้อน (Hot Cracking) ได้ง่าย

- ลาวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส (Cellulose) ฟลักซ์จะมีส่วนผสมของ สารอินทรีย์เป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนปกคลุมบริเวณการอาร์ค แนวเชื่อมที่ได้จะมี ลักษณะเป็นคลื่นสแลกบางและหลุดออกได้ง่าย ใช้เชื่อมได้ทุกแนว เช่น แนวซิมลิก (แนวแรก) แนว เดิมและแนวทับหน้า ซึ่งมีลักษณะการส่งถ่ายน้ำโลหะเหลวขณะอาร์ค

- ลาวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูไทต์ (Rutile) หรือติตาเนีย (Titania) ฟลักซ์จะมี ส่วนผสมของรูไทต์หรือติตาเนียเป็นหลักแนวเชื่อมที่ได้จะเรียบไม่เหมาะสมกับการเชื่อมความ แข็งแรงสูงเพราะมีปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนสูง ทำให้แนวเชื่อมไม่แข็งแรงเท่าที่ควร

- ลาวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดด่าง (Basic) หรือไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen) ฟลักซ์จะมีส่วนผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตหรือคาร์บอเนตประเภทอื่นๆ และฟลูออรีสปาร์สแลกมี สีเข้มเป็นมันเงาหนาเคาะออกยาก ขณะอาร์คมีควันมาก ขณะใช้งานจะต้องนำลาวดเชื่อมไปอบไล่ความ ชื้นออกก่อน

- ลาวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดหลอมลิก (Penetration) ลาวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิด หลอมลิก (Penetration) เคลือบด้วยสารเคลือบผิวรูไทต์/กรดผสมที่มีสัดส่วนที่สูงของสารเซลลูโลส โดยจะมีการปล่อยก๊าซที่เพิ่มการซึมลิกในวัสดุพื้นฐานที่รองรับลาวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดหลอมลิก (Penetration) จะใช้เฉพาะในตำแหน่งแนวนอนและสำหรับการเชื่อมเข้ามุมฉาก

ตารางที่ 2.2 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อทางเลือกกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [22]

Factor	Rutile electrode	Acid electrode	Basic electrode
Arc stability	++	+	-
Appearance of the weld bead	+	++	-
Striking the arc	++	+	-
Different welding positions	-	-	++
Risk of slag inclusions	+	--	++
Resistance to corrosion	-	-	++
Fume formation	+	+	-
Slag removal	+	++	-
Hydrogen content in weld metal	-	-	++

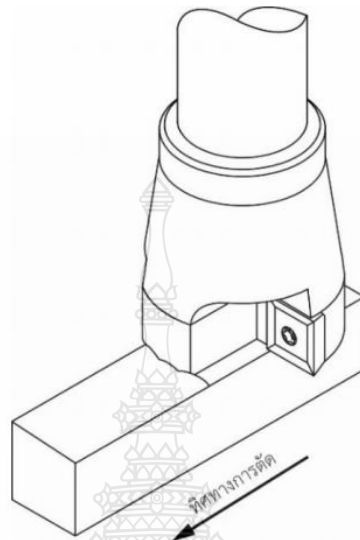
2.2.3 ความสามารถในการเชื่อม (Weldability) [23]

ความสามารถในการเชื่อม (Weldability) คือคุณสมบัติของชิ้นงานวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่เป็นโลหะ วัตถุประสงค์ของการเชื่อมเพื่อให้ชิ้นส่วนของวัสดุสองชิ้นหลอมติดกัน โดยการเชื่อมจะพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก

2.3 ทฤษฎีของกระบวนการกัดโลหะ [24]

2.3.1 กระบวนการกัดขึ้นรูป (Milling) คือการทำงานของเครื่องจักรกลที่ทำการหมุนเครื่องมือตัดหลายคมตัดโดยใช้โปรแกรมเป็นเครื่องมือในดำเนินการทำให้เคลื่อนที่ของอัตราป้อนในเกือบทุกทิศทางสำหรับการกำจัดเศษวัสดุจากชิ้นงานจนมีรูปร่างสม่ำเสมอหรือรูปแบบอิสระ การกัดสามารถทำงานได้หลากหลาย เช่น การเจาะ การกลึง การกัดร่อง หรือการดำเนินการกำจัดเศษของวัสดุอื่นๆ เครื่องมือกัดแต่ละคมตัดจะเอาเศษชิ้นส่วนขนาดเล็กของวัสดุที่มีการตัดเฉือนลงไปในพื้นที่วัสดุดิบ โดยทั่วไปในการผลิตการกำจัดเศษขนาดเล็กมันเป็นเรื่องง่ายที่จะตัดเฉือนออกจากพื้นที่ตัด ในขณะที่กระบวนการของเครื่องจักรทั้งหมดวัสดุที่มีความแข็งแรงมากขึ้นในการกำจัดเศษวัสดุ โดยการตัดเฉือนจากต้นปี 1900 ไปจนถึงปี 1960 (López de La Calle and Lamikiz 2008), การกัดที่ถูกนำมาใช้กับการสร้างพื้นผิว แต่วันนี้มีความทันสมัยมากขึ้นมีห้าแกนได้รับคำสั่งจากซีเอ็นซี (ระบบควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์) มีความเที่ยงตรงสามารถควบคุมทางเดินที่มีความแม่นยำสูงได้ แม้ในอัตรา

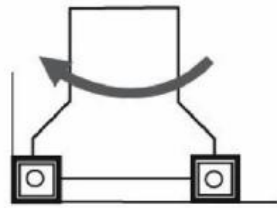
ป้อนที่สูงดังแสดงในรูปที่ 2.9 ในตอนนี้ส่วนมากในการผลิตที่มีความซับซ้อนจะใช้ กรรมวิธี การกัด ตัวอย่าง เช่น แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกมักจะเกี่ยวข้องกับพื้นผิวที่ซับซ้อนในรูปทรงที่ต้องการ เป็นต้น



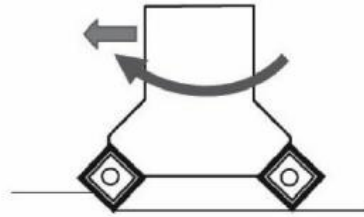
รูปที่ 2.9 การกัดปาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเครื่องมือตัดรูปทรงสี่เหลี่ยม [25]

ประเภทการกัดชิ้นงาน ประเภทหลักของการทำงานเกี่ยวกับการกัดชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตหรือรูปร่างที่ซับซ้อนของเครื่องมือตัด แสดงในรูปที่ 2.10 โดยคำนึงถึงการปฏิบัติงานในปัจจุบันกับเครื่องกัด CNC หรือเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (Machining Center) แบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ 1) การกัดร่องบางครั้งใช้สำหรับตัดเงื่อนไขชิ้นงาน ในบางกรณีเครื่องมือตัดสามารถมีส่วนที่เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องจักร 2) การกัดแบบต่อเนื่องซึ่งในการเคลื่อนของอัตราป้อนเป็นส่วนหนึ่งหมุนแทนการเคลื่อนไปหิวเชิงเส้น 3) การกัดเกลียว ในการผลิตเกลียวในหรือเกลียวนอกนอก 4) การกัดด้วยอัตราป้อนที่สูง การดำเนินการปาดผิวพิเศษด้วยเครื่องมือตัดกับตำแหน่งมุมที่ต่ำมาก

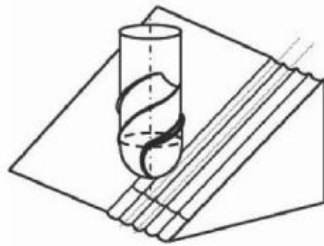
ก) การกัดผิวผิว



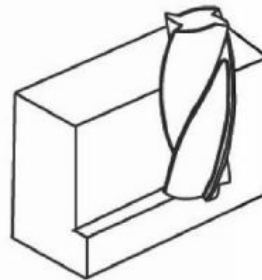
ข) การกัดบ่าฉาก



ค) การกัดผิวด้านข้าง

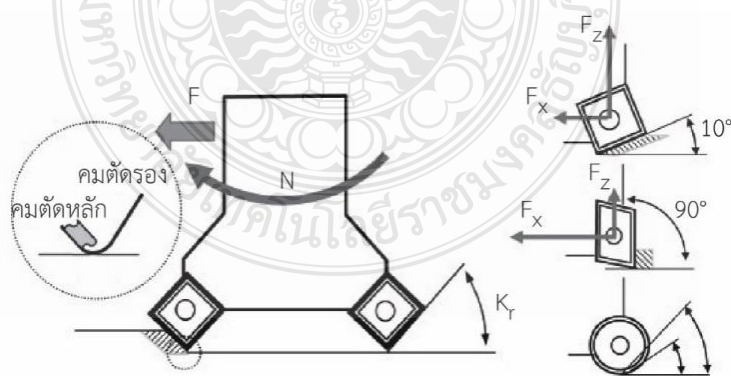


ง) การกัดด้วยดอกหัวกลม



รูปที่ 2.10 การกัดขึ้นรูปในงานประเภทต่างๆ [24]

เกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตเครื่องมือการกัดมีค่ากำหนดบางอย่างที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือตัดที่มีรูปแบบที่เกี่ยวกับประเภทของการทำงานเครื่องมือตัดมีคมตัดหลายคมตัดมีลักษณะเป็นวงกลมและขอบเครื่องมือตัดแต่ละชนิดมีสองด้าน โดยที่ รู้จักกันมักจะเป็นขอบหลักและขอบรองดังแสดงในรูปที่ 2.11 หลักคือการสัมผัสกับชิ้นงานโดยการให้ผิวหน้าที่ตั้งฉากกับแกนเครื่องมือ



รูปที่ 2.11 ลักษณะมุมของคมตัดที่ตัดเฉือนชิ้นงาน [24]

2.3.2 เครื่องมือตัด อาจจะมีหนึ่งหรือหลายคมตัดที่ใช้ในการกำจัดเศษตัดออกจากชิ้นงาน ในการทดลองนี้จะเป็นการใช้เครื่องมือตัดเป็นเม็ดฝัง (Inserts)

2.3.2.1 รูปแบบเครื่องมือตัด [26] ซึ่งวัสดุหลักที่ใช้ในการทำมีอยู่ 6 ชนิด ดังนี้

- เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) ใช้กันในช่วงที่ยังไม่มีการค้นพบเหล็กกล้าความเร็วสูง โดยวัสดุนี้จะมีปริมาณคาร์บอน 0.8% – 1.20% จึงสามารถทำการชุบแข็งได้ดีและด้วยกรรมวิธีทางความร้อนที่เหมาะสมอาจเพิ่มความแข็งของมันจนมีค่าใกล้เคียงกับเหล็กกล้าความเร็วสูงต่างๆ หรืออาจทำให้มีความเหนียวแน่นได้ตามต้องการ อย่างไรก็ตามเหล็กกล้านี้มีความสามารถในการชุบแข็งหรือความลึกในการชุบแข็งต่ำและจะสูญเสียความแข็งที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศา ดังนั้นจึงถูกจำกัดใช้เฉพาะเครื่องมือตัดขนาดเล็กที่มีความเร็วไม่เกิน 0.15 m/s (ไม่เหมาะสมในการตัดด้วยความเร็วสูง หรือใช้ในงานหนัก) แต่จะใช้ในการปฏิบัติกับวัสดุอ่อน และใช้ควบคู่กับสารหล่อเย็น (Coolant)

- เหล็กกล้าความเร็วสูง (High Speed Steel: HSS) หรือเหล็กโรบสูง จะมีส่วนประกอบของโลหะผสมพื้นฐาน เช่น คาร์บอน (Carbon) 7%, โครเมียม (Chromium) 4%, ทังสแตน (Tungsten), วานาเดียม (Vanadium), โมลิบดีนัม (Molybdenum), โคบอลต์ (Cobalt) มีความสามารถในการชุบแข็งได้ดีเป็นพิเศษ และสามารถรักษาสภาพของคมตัดที่ดีไว้ได้ถึงอุณหภูมิประมาณ 650 องศา ซึ่งสภาพนี้เป็นคุณสมบัติในด้านความต้านทานต่อการอ่อนตัวที่อุณหภูมิสูงหรือความแข็งขณะร้อนแดง (red hardness) อันเป็นคุณสมบัติที่ต้องการมากที่สุดในเครื่องมือตัดต่างๆ โดยเหล็กกล้าทำเครื่องมือตัดชนิดแรกที่มีคุณสมบัติดังกล่าวถูกพัฒนาขึ้นโดย Frederick W. Taylor และ M. White ในปี ค.ศ. 1900 ซึ่งทำโดยการเติมทังสแตน (Tungsten) 18% และโครเมียม 5.5% ลงเป็นธาตุผสมในเหล็กกล้า ส่วนผสมนี้สืบทอดมาจนถึง High Speed 5 ปัจจุบัน

- โลหะผสมหล่อนอกกลุ่มเหล็ก (Cast Nonferrous Alloys) โลหะผสมนอกกลุ่มเหล็กจำนวนมากประกอบด้วยส่วนผสมหลักโครเมียม โคบอลต์ และทังสแตน กับธาตุผสม เช่น แทนทาลัม (Tantalum) พลวง หรือ โบรอน (Boron) ซึ่งเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับทำเครื่องมือตัด เมื่อหล่อให้เข้ารูปแล้ววัสดุจะมีความแข็งขณะร้อนแดงสูง และสามารถรักษามุมตัดที่ดีไว้ได้ถึงอุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบกับเหล็กกล้าความเร็วสูงมันจะสามารถใช้ได้ที่อัตราเร็วตัดสูงกว่าถึง 2 เท่าที่อัตราการป้อนเดียวกัน แต่มีความเปราะมากกว่า ไม่ตอบสนองต่อกรรมวิธีทางความร้อนและทำการตัดปาดได้ด้วยการเจียรในเพียงวิธีเดียวเท่านั้น เครื่องมือตัดที่มีรูปร่างซับซ้อนสามารถขึ้นรูปได้โดยการหล่อในแม่แบบเซรามิกส์ หรือ โลหะแล้วทำผิวสำเร็จโดยการเจียรในคุณสมบัติของชิ้นงานภายหลังการหล่อจะแปรไปตามระดับของการหล่อเย็นที่เนื้อวัสดุได้รับในระหว่างการหล่อ ซึ่งส่วนผสมของเนื้อวัสดุเหล่านี้จะอยู่ในช่วงของทังสแตน 12% – 25% โคบอลต์ 40% – 50% และโครเมียม 15% – 35% ร่วมกับธาตุที่ทำให้เกิดการก่อตัวของคาร์ไบด์ เช่น คาร์บอน

ในช่วง 1% – 4% คุณสมบัติที่ได้คือ มีความต้านทานต่อการเกิดแอ่งและความต้านทานต่อการกระแทก ส่วนในด้านของประสิทธิภาพในการตัดนั้นจะอยู่ระหว่างเหล็กกล้าความเร็วสูง และเหล็กกล้าคาร์ไบด์

- คาร์ไบด์ (Carbide หรือ Cemented Carbide / Sintered Carbide) มีเคลือบคาร์ไบด์ (Carbide Cutting Tool) ทำขึ้นจากผงโลหะของทั้งสแตนคาร์ไบด์ และโคบอลต์ ซึ่งถูกอัดให้มีรูปร่างตามต้องการแล้วนำเข้าสู่กระบวนการกึ่งยัดเหนียวในเตาซึ่งมีบรรยากาศของไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 1550 องศา จากนั้นจึงทำผิวสำเร็จโดยการเจียรระไน เครื่องมือคาร์ไบด์นี้มีส่วนผสมของทั้งสแตนคาร์ไบด์ประมาณ 94 % และโคบอลต์ 6 % เหมาะสมกับการตัดปาดเหล็กหล่อและวัสดุอื่นๆ จำนวนมากยกเว้นเหล็กกล้า เนื่องจากเศษตัดจะยึดติดหรือเชื่อมตัวเข้ากับผิวหน้าคาร์ไบด์และฝังตัวลงในเครื่องมือตัดอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องนี้อาจแก้ไขได้โดยการเติมไททาทาเนียมและแทนทาลัมคาร์ไบด์ เข้าผสมพร้อมกันกับเพิ่มปริมาณของโคบอลต์ ซึ่งในเครื่องมือตัดของคาร์ไบด์ที่เหมาะสมแก่การปฏิบัติสำหรับเหล็กกล้าจะประกอบไปด้วย ทั้งสแตนคาร์ไบด์ 82% ไททาทาเนียมคาร์ไบด์ 10% และโคบอลต์ 8% มีค่าสัมประสิทธิ์ต่ำเหมาะสมกับการปฏิบัติการทั่วไป คาร์ไบด์ มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศา และเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่แข็งที่สุดเท่าที่ผลิตขึ้นได้ และยังมีความแข็งแรงทางด้านแรงอัดสูง แต่มีข้อเสียในด้านที่มีความเปราะสูง มีความต้านทานต่อการกระทบกระแทกต่ำ และต้องการฐานรองรับอย่างมั่นคงแข็งแรงเพื่อป้องกันการแตกร้าว ทั้งยังทำการเจียรระไนได้อย่างลำบาก เฉพาะกับล้อขัดซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือเพชรเท่านั้น โดยจะต้องรักษามุมห่าง (Clearance Angle) ไว้ให้ต่ำที่สุด เครื่องมือตัดคาร์ไบด์จะสามารถทำการตัดด้วยอัตราเร็ว 2 – 3 เท่า ของเครื่องมือตัดจากโลหะผสมหล่อแต่ในอัตราการป้อนที่น้อยกว่ามาก เครื่องมือคาร์ไบด์จึงมีประสิทธิภาพการทำงานสูง โดยเครื่องจักรสำหรับเครื่องมือคาร์ไบด์จะต้องมีความมั่นคงแข็งแรง มีกำลังพอเพียงและมีช่วงของการป้อน และอัตราเร็วรอบที่เหมาะสม ทั้งสแตนคาร์ไบด์ที่มีความละเอียดของเกรนสูง (Micrograin Carbide) มีความแข็งแรงสูง ใช้งานในที่ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือตัดคาร์ไบด์ปกติ เนื่องจากอัตราเร็วตัดที่ใช้มีค่าต่ำเกินไป ซึ่งเครื่องมือตัดโดยทั่วไปไม่สามารถทนต่อการสึกหรอได้ รวมทั้งปฏิบัติการขึ้นรูปหรือการตัดขาดเครื่องมือคาร์ไบด์อาจเคลือบด้วยชั้นตัวประสาน (Bonded layer) ที่ขนาดความหนา 0.05-0.08 มิลลิเมตร ของไททาทาเนียมคาร์ไบด์ อลูมินัมออกไซด์ (Aluminum Oxide) หรือไททาทาเนียมไนไตรด์ (Titanium Nitride) เพื่อลดความร้อนจากการวิ่งผ่านของเศษตัดบนเครื่องมือ อย่างไรก็ตามก็เครื่องมือตัดที่มีการเคลือบนี้ไม่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีสะเก็ดมากหรือมีทรายเจือปนอยู่

- เพชร (Diamond) เพชรใช้เป็นเครื่องมือตัดคมเดี่ยวสำหรับการตัดขนาดเบาที่อัตราเร็วสูง ซึ่งต้องมีการรองรับอย่างมั่นคงแข็งแรงเนื่องจากวัสดุเพชรมีความแข็งและเปราะสูงมากเป็นพิเศษ รูปแบบของการใช้งานคือ ใช้ในการตัดปาดวัสดุที่มีความแข็งจนยากต่อการปฏิบัติการด้วยเครื่องมืออื่น ๆ ทั้งยังต้องการความแม่นยำและผิวสำเร็จที่ดีเยี่ยมหรือใช้ในการตัดขนาดเบาที่

ความเร็วสูงสำหรับวัสดุอ่อนกว่า เช่น การตัดแปดพลาสติก ยางแข็ง คาร์บอนอัดและอลูมิเนียมที่อัตราเร็วตัด 5-25 เมตรต่อวินาที รวมทั้งสามารถใช้ในการตบแต่งล้อหินเจียรไน แม่แบบดิ่งลาดขนาดเล็ก การเจียรไนและการขัดถูจำเพาะอย่าง มีความทนทานกว่าคาร์ไบด์ถึง 10 เท่า (400 ชั่วโมง)

- เซรามิกส์ (Ceramic) เป็นส่วนผสมของผงอลูมิเนียมออกไซด์และสารตัวเติมจำพวก ไททานเนียม (Titanium) แมกนีเซียม (Magnesium) หรือโครเมียมออกไซด์ (Chromium Oxide) รวมตัวประสานที่นำผ่านเข้าขบวนการทำมิดเล็ก (Cutting Tool Insert) ตัวมิดเล็กที่ได้อาจยึดเข้ากับฐานมิดได้ทั้งโดยการใช้ตัวบีบจับ (Clamp) หรือการใช้อีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) โดยสมบัติของมิดเล็กคือมีความแข็งแรงในด้านการรับแรงอัดสูงเป็นอย่างยิ่งแต่ค่อนข้างเปราะ ดังนั้นมิดเล็กจึงต้องมีค่ามอดูลเป็นลบในช่วง 5-7 องศา เพื่อความแข็งแรงเช่นเดียวกับฐานการรองรับซึ่งต้องทำอย่างแน่นหนาเครื่องมือตัดซิลิกอนไนไตรด์ (Silicon Nitride) ซึ่งมีชื่อรหัสเป็น S-8 จะใช้ในการตัดแปดเหล็กหล่อวัสดุจากเซรามิกส์ชนิดนี้มีอายุการใช้งานถึง 1,500 ชั่วโมงเหล็กหล่อในขณะที่เครื่องมือทั้งสแตนคาร์ไบด์เคลือบผิวมีอายุงานเพียง 250 ชั่วโมง



รูปที่ 2.12 รูปร่างต่างๆ ของเม็ดมิด [27]

2.3.2.2 หลักการพิจารณาเลือกเม็ดมิด [28] เม็ดมิดโดยทั่วไปจะมีมาตรฐานในการบ่งชี้เป็นรหัสหรือพาร์ทัมเบอร์ ที่กำหนดด้วยตัวอักษรและตัวเลขวางเรียงกัน ยกตัวอย่างเช่น CNMG 120408 N-GE AC820P ซึ่งในแต่ละตัวอักษรและตัวเลขจะมีความสำคัญในการเลือกใช้ ดังนี้

- การเลือกรูปร่างเม็ดเม็ด ทัวไปเม็ดเม็ดมีหลากหลายรูปแบบ ที่สำคัญลำดับแรกที่ต้องคำนึงถึงคือมุมมองของเม็ดเม็ดซึ่งเป็นตัวบอกถึงความแข็งแรงของคมตัด การเลือกเม็ดเม็ดที่มีองศาที่ใหญ่จะให้ความแข็งแรงมากกว่าเม็ดเม็ดองศาเล็ก เพื่อความทนทานต่อการแตกบิ่นของคมตัด

- การเลือกมุมหลบเม็ดเม็ด มุมหลบของเม็ดเม็ดแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เม็ดเม็ดลบกับเม็ดเม็ดบวก เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของคมตัด เม็ดเม็ดลบจะมีความแข็งแรงมากกว่าและสามารถใช้งานในทั้ง 2 ด้าน คือด้านบนและด้านล่างของเม็ดเม็ดทำให้ประหยัดต้นทุนในการผลิต หลักในการเลือกมุมหลบควรเลือกเม็ดเม็ดที่มีขนาดมุมหลบน้อยที่สุด เพื่อให้ได้ความแข็งแรงของคมตัดมากที่สุด

- การเลือกขนาดค่าเผื่อของการผลิตเม็ดเม็ด ในสายการผลิตมีข้อผิดพลาดเกี่ยวกับการเลือกค่าเผื่อของการผลิตเม็ดเม็ดค่อนข้างมาก เช่น การเลือกใช้เม็ดเม็ดที่มีค่าเผื่อในการผลิตน้อย ซึ่งเป็นเม็ดเม็ดที่ผลิตขึ้นมาด้วยการเจียรขึ้นรูปและมีการควบคุมการผลิตอย่างใกล้ชิดจะทำให้ราคาของเม็ดเม็ดค่อนข้างสูง ดังนั้นในการเลือกขนาดค่าเผื่อของเม็ดเม็ดที่ดีควรจะคำนึงถึงกระบวนการผลิตและความเหมาะสมตามการควบคุมขนาดของชิ้นงานแต่ละประเภท

- การเลือกรัศมีมุมเม็ด (Nose Radius) รัศมีมุมเม็ดจะส่งผลถึงค่าความเรียบผิวของชิ้นงาน โดยเม็ดเม็ดที่มีรัศมีมุมเม็ดขนาดใหญ่จะให้ความเรียบผิวของชิ้นงานดีกว่ารัศมีมุมเม็ดขนาดเล็กที่อัตราป้อนเดียวกัน นอกจากนี้การที่มีรัศมีมุมเม็ดขนาดใหญ่จะมีความแข็งแรงของคมตัดมากเช่นกัน ดังนั้นควรจะพิจารณาเลือกเม็ดเม็ดที่รัศมีมุมเม็ดที่ใหญ่จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด

- การเลือกร่องคายเศษ (Chip Breaker) ในการเลือกร่องคายเศษเพื่อควบคุมเศษโลหะ ควรพิจารณาตามชื่อร่องคายเศษของผู้ผลิตแต่ละราย โดยชื่อของร่องคายเศษแต่ละแบบจะมีการออกแบบตามวัสดุชิ้นงาน และขนาดของความลึกกับอัตราการป้อนในแต่ละช่วงซึ่งถ้าเลือกผิดช่วงหรือระบุชื่อร่องคายเศษผิดจะควบคุมการคายเศษโลหะได้ค่อนข้างยาก จนทำให้เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมาอีกมากมาย เช่น เศษอุดตัน หรือเกิดความร้อนจนส่งผลเสียต่ออายุการใช้งานของเม็ดเม็ดได้

- การเลือกเกรดเม็ดเม็ด ผู้ผลิตเม็ดเม็ดแต่ละรายจะมีการบ่งชี้ชื่อ เกรดเม็ดเม็ดที่แตกต่างกันซึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนและเกิดความผิดพลาดของผู้ใช้งาน ดังนั้นหลักการในการเลือกเกรดเม็ดเม็ดควรต้องเลือกวัสดุของเม็ดเม็ดให้เหมาะสมกับตามวัสดุชิ้นงานเป็นอันดับแรก แล้วจากนั้นพิจารณาลักษณะกระบวนการ

- การเลือกสารเคลือบผิวของเม็ดเม็ด สารเคลือบผิวของเม็ดเม็ดจะมีอยู่ 2 แบบคือ 1) CVD coating (Chemical Vapor Deposition) เป็นการเคลือบผิวโดยใช้หลักการทางเคมีซึ่งคุณสมบัติคือความหนาของชั้นผิวเคลือบที่ 13-18 ไมครอน การยึดเกาะระหว่างผิวการเคลือบกับวัสดุแข็งแรงไม่หลุดร่อนง่าย จึงเหมาะสำหรับงานแบบต่อเนื่องที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอได้

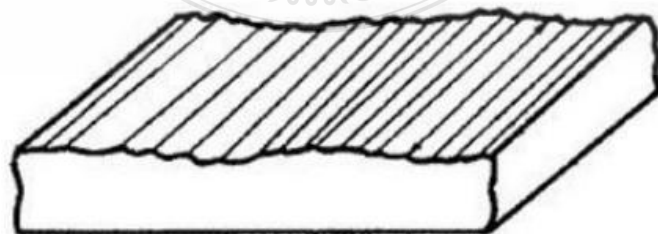
สูง 2) PVD coating (Physical Vapor Deposition) เป็นการเคลือบผิวโดยใช้หลักการการแตกประจุทางไฟฟ้า คุณสมบัติคือผิวเคลือบไม่หนามากเพียง 7-12 ไมครอน ทำให้ช่วยรักษาความคมของคมตัด แรงยึดเหนี่ยวของแต่ละชั้นของผิวเคลือบสูงมากกว่าแบบ CVD ทำให้มีความทนทานต่อการแตกบิ่นได้ดีกว่าจึงเหมาะสำหรับการงานแบบกระแทก

2.3.3 ความสามารถในการตัดเฉือน (Machinability) คือ ความสามารถของโลหะที่ถูกตัดเฉือน ตกแต่งได้ง่าย และมีผิวเรียบตามกระบวนการ การแปรรูปวัสดุให้มีลักษณะรูปร่างต่างๆ ตามที่ต้องการ ความสามารถในการตัดเฉือนวัสดุสามารถทำได้ด้วย การกลึง (Turning), การกัด (Milling), การไส (Planing or shaping), การเจาะ (Drilling), การเจาะคว้าน (Boring) และเครื่องมือกลประเภทอื่นๆ

2.3.3.1 ความหยาบผิว (Surface Roughness) [29]

ความหยาบของผิวเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการผลิตแบบหนึ่งความหยาบเกิดขึ้นจากรูปร่างของเครื่องมือตัดที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานและกรรมวิธีการขึ้นรูป ดังแสดงรูปที่ 2.13 ลักษณะความหยาบผิวของชิ้นงานสำหรับการวัดความหยาบเราจะวัดลักษณะที่เกิดจากความขรุขระของพื้นผิวที่ความยาวคลื่นสั้นๆ ดังนั้นในการวัดเราจะต้องวัดจากระยะในการวัดให้ต่ำลักษณะความเป็นคลื่นระยะนี้ เรียกว่า Cut-off length มีค่ามาตรฐานที่ใช้กันมากคือ 0.25 มิลลิเมตร, 0.8 มิลลิเมตร, และ 2.5 มิลลิเมตร ความหยาบของพื้นผิวมีความสำคัญต่อการใช้งานหลายๆอย่าง เช่น แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิว การสึกหรอจากการเสียดสี ความสวยงาม ความรู้สึกในการสัมผัส ความสามารถในการป้องกันการรั่วซึม (Sealing property)

ค่าความหยาบของพื้นผิวนั้นมีผลโดยตรงต่อความเงาของผิวชิ้นงาน เราอาจประมาณค่าความหยาบได้จากความเป็นเงา แต่ถ้าต้องการความแม่นยำแล้วเราจำเป็นต้องมีค่ากำหนดเป็นตัวเลขและมีวิธีการคำนวณที่ชัดเจน ค่าความหยาบที่ใช้กันแพร่หลายเป็นค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความแตกต่างของความสูงของพื้นผิวจากตำแหน่งความสูงเฉลี่ย

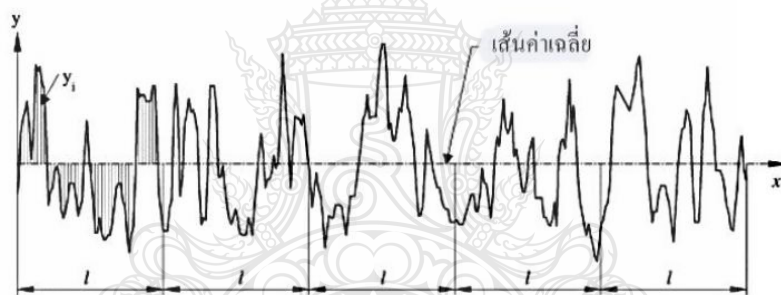


รูปที่ 2.13 ลักษณะความหยาบผิวของชิ้นงาน [29]

2.3.6.1 ความหยาบผิวเฉลี่ย (Roughness average: Ra) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยของผิวที่วัดดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุดและหลายมาตรฐานมักอ้างอิงค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความหยาบผิว การหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (Mean-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (l) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร (μm) ดังแสดงรูปที่ 2.14

วิธีการหาค่าความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยตามอนุกรมเลขาคณิต ดูจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิง ระยะค่าเฉลี่ยนี้จะอยู่ตามแนวแกน x ของเส้นอ้างอิง และแนวแกน y จะเป็นขนาดความหยาบผิว ค่า Ra จะหาได้จากสมการที่แสดง มีหน่วยเป็นไมโครเมตร ดังนี้

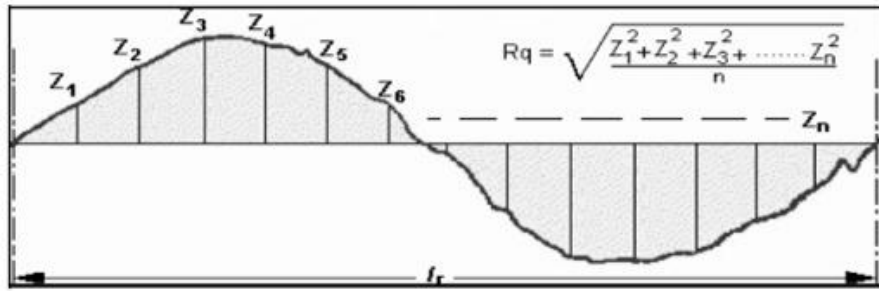
$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^e |f(x)| dx \dots \dots \dots (1)$$



รูปที่ 2.14 แสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยของพื้นผิว [29]

2.3.6.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness root mean square: Rq) ดังแสดงรูปที่ 2.15 เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัด วิธีการหาค่าความหยาบสูงสุดนี้วัดจากกราฟความหยาบผิวที่อยู่บนเส้นอ้างอิงเป็นระยะที่เกิดจากกราฟสูงสุดและต่ำสุด มีหน่วยเป็นไมครอน วิธีการหาค่าความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยกำลังสอง จะหาได้จากสมการที่แสดง ดังนี้

$$Rq = \sqrt{\frac{z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + \dots + z_n^2}{n}} \dots \dots \dots (2)$$

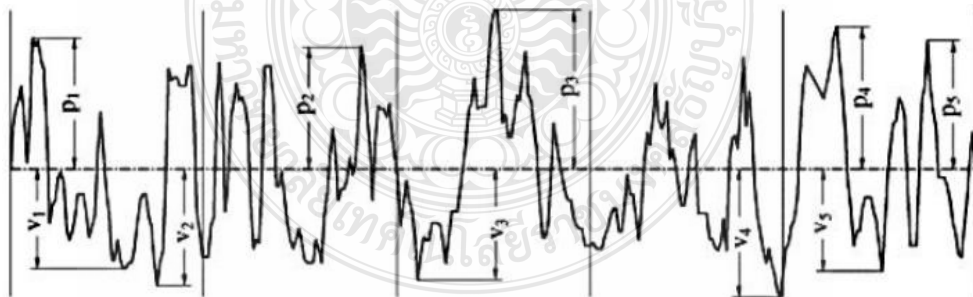


รูปที่ 2.15 แสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง [29]

2.3.6.3 ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness Ten-point mean: Rz) ดังแสดงรูปที่ 2.16 เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุมโดยแสดงขนาดเฉลี่ยของระยะระหว่างความสูงของยอดกับความลึกของหลุมทั้งหมด 5 ชุด การวัดทดสอบเป็นช่วงเท่าๆกัน 5 ช่วงแล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตร วิธีการหาค่าความหยาบพื้นผิวเฉลี่ยกำลังสอง จะหาได้จากสมการที่แสดง ดังนี้

$$Rz = \frac{|p1+p2+p3+p4+p5|+|v1+v2+v3+v4+v5|}{5} \dots\dots\dots(3)$$

กำหนดให้ p1-p5 = ยอดกราฟสูงสุด 5 กราฟ ในช่วงสุ่ม
v1-v5 = จุดต่ำสุดของกราฟ 5 จุด ในช่วงสุ่ม



รูปที่ 2.16 แสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม [29]

2.3.3.2 สารหล่อเย็นและการหล่อเย็นชนิดอื่นๆ [30]

สารหล่อเย็นสามารถทำหน้าที่ได้แบบมีประสิทธิภาพ ถ้าถูกส่งไปยังบริเวณการตัด ทั่วไปแล้วของเหลวที่มีการทำงานการหล่อเย็นเด่นจะต้องถูกส่งไปในรูปแบบฟิล์มบนพื้นผิว

เพื่อป้องกันการสึกหรอ ในขณะที่สารหล่อเย็นต้องถูกส่งตรงไปยังคมตัดเครื่องมือวิธีการใช้ของเหลวที่ใช้ ในการปฏิบัติงานสำหรับงานตัดเฉือนทั่วไป คือแบบควบคุมด้วยมือ แบบท่วมชิ้นงาน แบบแรงดันสูงและแบบละอองปกคลุม โดยปกติใช้วิธีการหล่อเย็นแบบภายนอกและแบบภายใน (ผ่านเครื่องมือ) โดยมีวิธีที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.17 สำหรับการทำงานกัดโดยใช้ดอกเอ็นมิลสังเกตเห็นว่าความแตกต่างกันเนื่องจากการระบายความร้อนในบริเวณการตัด อุณหภูมิการตัดเฉือนในการกัดสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดย 40-50%

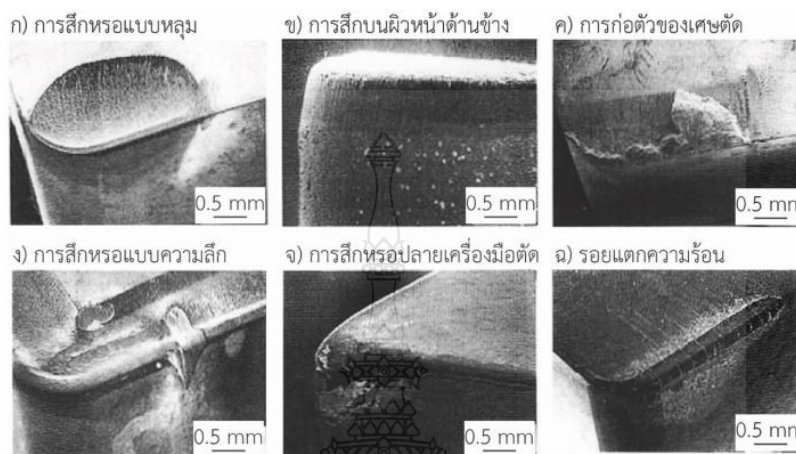


รูปที่ 2.17 วิธีการระบายความร้อนในกระบวนการกัดขึ้น [30]

2.3.3.3 ประเภทการสึกหรอของเครื่องมือตัด [31]

ความเสียหายของเครื่องมือตัดได้รับอิทธิพลจากสภาวะความเครียดและอุณหภูมิที่พื้นผิวเครื่องมือตัด ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบการตัด เช่น งานกลึง งานกัดหรืองานเจาะ เจ็อนไข การตัดและการมีหรือไม่มีของเหลวช่วยในการตัด ในการตัดเฉือนรูปแบบของเครื่องมือทำให้เกิดความเสียหายและอัตราของความเสียหายที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงในการดำเนินงานตัดและเจ็อนไข การตัดเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการตัดเฉือนมันเป็นสิ่งจำเป็นไม่เพียงแต่จะหาเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดและวัสดุผสมการทำงานของเครื่องจักรกลสำหรับการดำเนินงานที่กำหนดแต่ยังเชื่อถือได้ทำนายนอายุการใช้งานความเสียหายเครื่องมือสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ การสึกหรอและการแตกหัก (รูปที่ 2.18 และ 2.19) แต่ในทางปฏิบัติแล้วทั้งสองกลุ่มความเสียหายของเครื่องมือตัดจะไม่ได้โดดเด่นอย่างเห็นได้ชัด การสึกหรอคือการสูญเสียของวัสดุซึ่งมักจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับความรุนแรงต่ออนุภาคที่มีขนาดเล็กอย่างต่อเนื่องหรือขนาดเล็กลงไปกลไกการกำจัดโมเลกุลหรืออะตอมสำหรับการ

แตกหักในมืออื่นๆ ที่มีคลื่นความถี่อย่างต่อเนื่องของเครื่องวัดความเสียหายจากการสึกหรอจุลภาค ในการแตกหักขั้นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 ความก้าวหน้าของการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่จะเกิดขึ้นส่วนใหญ่ใน 2 วิธีที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.18 รูปแบบการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด [32]



รูปที่ 2.19 ประเภทการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด [32]

โดยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง การสึกหรอผิวหน้าด้านข้างของเครื่องมือตัดและความร้อนของเศษตัดในหลายๆ ครั้งเกิดจากความร้อน เช่น การยึดเกาะที่แพร่กระจายหรือการสลายตัวมี ส่วนร่วม ในกระบวนการการสึกหรอ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข) เป็นที่สังเกตบนด้านข้างหรือช่องว่างด้านข้างเป็นผลมาจากการขัดสีอย่างรุนแรงของวัสดุชิ้นงาน ความสึกหรอของกลไกนี้

สังเกตได้ทั่วไประหว่างเครื่องจักรกลของเหล็กและเหล็กหล่อที่อุณหภูมิเป็นซีเมนไต์ ส่วนใหญ่เป็น Fe_3C และไม่ใช่โลหะผสม

การก่อตัวของขอบคมตัด (BUE) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ค) จะเรียกเมื่อเกิดการหลอมรวมของเศษตัด มักจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเหล็กคาร์บอนต่ำหรือสแตนเลสที่มีความเหนียวและวัสดุโลหะ (ส่วนใหญ่อะลูมิเนียมนิกเกิลโคบอลต์และไททานเนียมอัลลอยด์) ถูกตัดด้วยความเร็วต่ำและอัตราการป้อนที่น้อย ซึ่งส่งผลให้การสึกหรอการขัดสีที่มีความรุนแรงหากชิ้นส่วนเล็กๆของวัสดุเครื่องมือที่มีการดำเนินการไปเป็นวงจรการก่อตัวของขอบคมตัด (BUE)

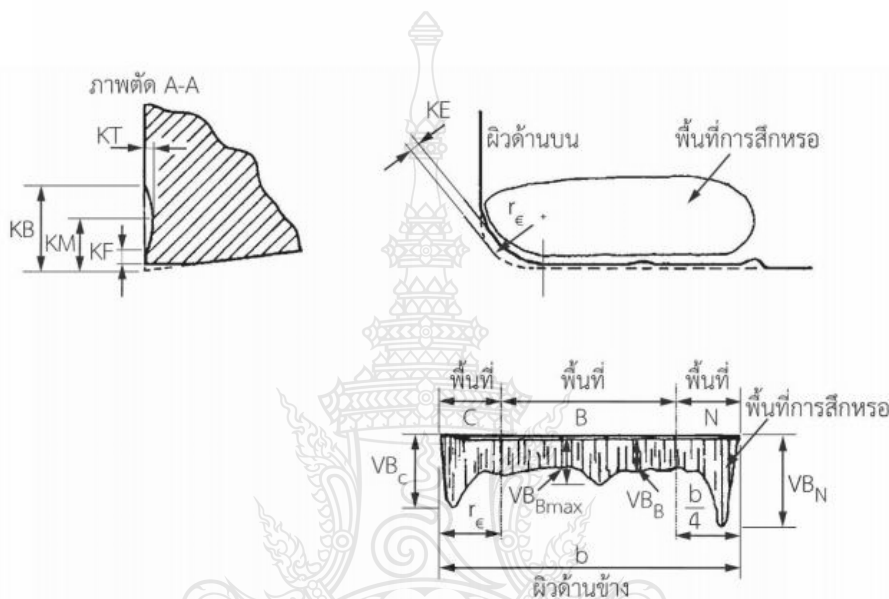
รอยการสึกหรอ (ความลึกของการตัดเฉือน) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ง) มักจะมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของวัสดุเครื่องมือตัดจากทางด้านข้างของขอบตัดทั้งเล็กและใหญ่ หรือการเสียดสีอย่างรุนแรงโดยเฉื่อยพื้นของขอบด้านนอกของเศษตัด (เช่น ในเครื่องจักรกลหนัก) รอยบากจะเป็นปัญหาร้ายแรงกับเทคโนโลยีวัสดุชิ้นงานที่มีแนวโน้มสูงที่จะมีเคลือบการทำงานที่แข็งและสร้างอุณหภูมิสูง เช่น เหล็กสแตนเลสอสเทนเนติกและนิกเกิลซูเปอร์อัลลอยด์ รอยการสึกหรอที่เห็นได้ชัดสามารถนำไปสู่การแตกหักของเครื่องมือตัด สามารถลดลงได้โดยการใช้เครื่องมือที่มีขอบมุมโค้งมนเพื่อต้องการหลีกเลี่ยงความลึกของรอยการตัดขนาดเล็ก

การสึกหรอปลายคมตัดแสดงดังรูปที่ 2.18 (จ) ทำให้เครื่องมือตัดเกิดการด้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุเครื่องมือตัดในการดำเนินงานเครื่องจักรกลที่กำหนด

รอยแตกด้วยความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.33 (ฉ) พัฒนารขึ้นเมื่อความร้อนเกิดขึ้นและการระบายความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการตัดไม่ต่อเนื่อง เช่น การกัดสร้างระดับอุณหภูมิสูงที่คมตัดด้วยเวลาที่นานรอยแตกด้านข้างอาจปรากฏนานไปกับคมตัด รอยแตกด้วยความร้อนและด้านข้างอาจรวมด้วยกันและทำให้เกิดชิ้นส่วนเล็กๆ ของวัสดุ เครื่องมือในการทำลาออกไป

โหมดที่ต้องการการสึกหรอเป็นเครื่องมือที่สึกหรอเพราะดำเนินไปและค่อยๆสามารถตรวจสอบได้อย่างง่ายสำหรับโปรโตคอลเครื่องมือที่เปลี่ยนแปลงในโปรแกรม NC ในทางปฏิบัติบ้างวัดได้ โดยตรงลักษณะมิติของรูปแบบการสึกหรอทั่วไป เช่น การสึกหรอแบบหลุม การสึกหรอด้านข้างและการสึกหรอแบบรอยลึกของการตัดสำหรับเครื่องมือตัด เช่น เหล็กไฮสปีดคาร์ไบด์และเซรามิก, มีมาตรฐานใน ISO 3685-1977 ดังแสดงในรูปที่ 2.19 การสึกหรอแบบหลุมเติบโตขึ้นทั้งในเชิงลึก (KT) และความกว้าง (KF-KB) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) จะเป็นหลักในการอธิบายลักษณะของความคืบหน้าของหลุมที่ KT ลึกของหลุมเป็นการวัดที่จุดที่ลึกที่สุดของหลุม (ส่วน A-A) ระยะทางกึ่งกลางของหลุมถึงขอบตัด KM จะเห็นได้ว่าการสึกหรอด้านข้างมักจะเสียหายมากที่สุด (มุมเครื่องมือและจุดที่สอดคล้องกับความลึกสูงสุดของการตัด) ของคมตัดตามที่แสดงในรูปที่ 2.18 (ข) การใช้งานตัดขอบที่สำคัญของความยาว b แบ่งออกเป็นสามโซนสำหรับวัตถุประสงค์ของ

การวัดการสึกหรอ (1) โซน C ของความยาว $r \sim$ ซึ่งรวมถึงส่วนที่โค้งมนของคมตัดที่มุม (2) โซน N ของความยาว $b/4$ ในอีกฟากหนึ่งของคมตัดที่ใช้งานอยู่ที่ร่องหรือรอยการสึกหรอจะเกิดขึ้นนั้น (3) โซน B ศูนย์รวมทั้งส่วนที่เหลือของคมตัดระหว่างโซน A และ โซน N ในเขตศูนย์กลาง B บริเวณการสึกหรอมักจะค่อนข้างสม่ำเสมอและบริเวณการสึกหรอเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องจะกำหนด VB_B ดังแสดงในรูปที่ 2.20 อย่างไรก็ตามเพื่อให้การเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้น ความกว้างบริเวณการสึกหรอสูงสุดจะแสดงโดย VB_{Bmax}



รูปที่ 2.20 รูปแบบการสึกหรอของเครื่องมือคาร์ไบด์ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 [32]

2.3.3.4 ลักษณะการกายเศษตัด [33]

การจำแนกประเภทของเศษตัดในการใช้เครื่องจักรตัดปาดผิวระนาบด้วยเครื่องมือตัดการก่อตัวของเศษตัดสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.21

- รูปแบบเส้นตรงบนผิวหน้าเครื่องมือตัดแสดงทิศทางมุมเอียงการไหลของเศษตัด (รูปที่ 2.21 ก)

- รูปแบบโค้งบนผิวหน้าเครื่องมือตัด เรียกว่า แบบโค้งด้านข้าง (รูปที่ 2.21 ข)

- รูปแบบโค้งบนระนาบตั้งฉากกับผิวหน้าเครื่องมือตัดที่ เรียกว่า แบบโค้งด้านบน (รูปที่ 2.36 ค)




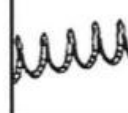


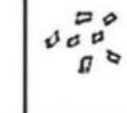
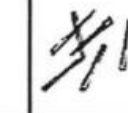




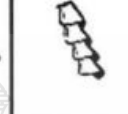

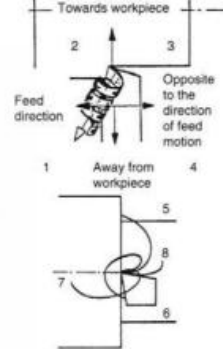




ลักษณะรูปร่างของเศษตัดที่เกิดขึ้นได้ โดยต่อเนื่องสามารถถูกสร้างขึ้นโดยการรวมกันของทั้งสามมุม ปัจจัยทั้งสามของรูปทรงที่มีอิทธิพลต่อรูปร่างของเศษตัดทั้งหมดคือมุม

ของเศษตัดไพลด้าน (n_s), เศษตัดโค้งด้านข้าง (r_s) เศษตัดโค้งด้านบน (r_u) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของการตัดรูปทรงของเครื่องมือตัด ลักษณะการทำงานและวัสดุของเครื่องมือ แต่ในทางปฏิบัติรูปร่างเศษตัดจะถูกควบคุมบนผิวหน้าเครื่องมือตัดในขั้นตอนเศษตัดหรือรูปร่างเศษตัดที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ลักษณะต่างๆของการเกิดเศษตัด 3 แบบ [33]

มาตรฐาน ISO 3685-1977 ช่วยให้การจัดหมวดหมู่ที่ครอบคลุมของรูปแบบของเศษตัดที่มีการผลิตโดยทั่วไป ในการทำงานจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเครื่องจักรกลระบบการจำแนกนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 จะประกอบไปด้วยรูปร่าง 8 กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มเหล่านี้ได้ถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยอีก 1-4 กลุ่มย่อยการกำหนดขนาด (เช่น ยาว สั้น เป็นต้น) และสภาพทางกายภาพ (เช่น ความต่อเนื่อง เป็นต้น) นอกจากนี้ยังได้รวมถึงรหัสตัวเลข 3 ตัวสำหรับรูปร่างเศษตัดบางอย่างที่ได้อธิบายลักษณะทิศทางการไหลของเศษตัด (ตัวเลข 1-4) และรูปแบบการแตกหักที่ (ตัวเลข 5-8)

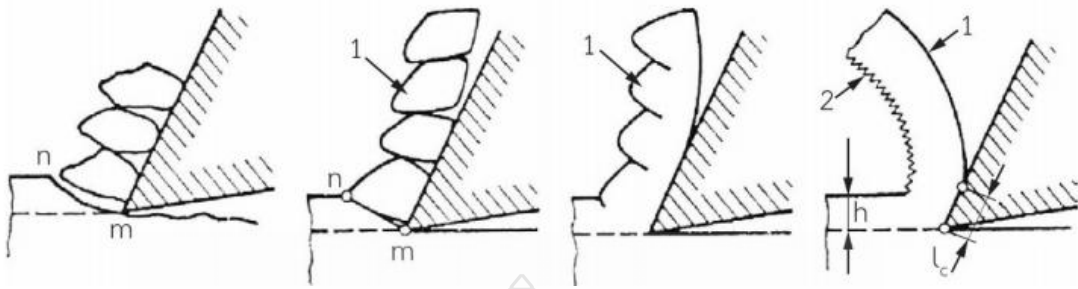
1. RIBBON CHIPS	2. TUBULAR CHIPS	3. SPIRAL CHIPS	4. WASHER-TYPE HELICAL CHIPS	5. CONICAL HELICAL CHIPS	6. ARC CHIPS	7. ELEMENTAL CHIPS	8. NEEDLE CHIPS
							
1.1. Long	2.1. Long	3.1. Flat	4.1. Long	5.1. Long	6.1. Connected		
							
1.2. Short	2.2. Short	3.2. Conical	4.2. Short	5.2. Short	6.2. Loose		
							
1.3. Snarled	2.3. Snarled		4.3. Snarled	5.3. Snarled			

รูปที่ 2.22 การจำแนกประเภทของรูปแบบเศษตัดตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 [33]

การจำแนกประเภทในความเป็นไปได้ของเศษตัดได้แบ่งออกเป็นสามรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับกลไกของการเสียรูปของวัสดุและการแตกหักที่เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานและเงื่อนไขการทำงาน การจำแนกประเภทนี้มักจะเกี่ยวข้องกับการหักหรือฉีกขาดออกโดยจะเรียกว่า เศษตัดไม่ต่อเนื่องและประเภทการตัดเฉือนของเศษตัด ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ก) และรูปที่ 2.22 (ข)-(ง) ตามลำดับกลุ่มสุดท้ายของเศษตัดสามารถแบ่งออกเป็นสาม (ที่เรียกว่า รอยหยักหรือประเภทเลื่อยฟัน) และความต่อเนื่องเศษตัดซึ่งบ่งบอกถึงระดับที่แตกต่างของความต่อเนื่องวัสดุที่นำมาใช้

เศษตัดแบบไม่ต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ก) โดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นเมื่อการตัดเฉือนวัสดุเปราะหรือวัสดุที่มีจุดของระดับความเครียดสูง เช่น เกล็ดกราไฟท์เหล็กหล่อหรือการรวม ซัลไฟด์แมงกานีส เหล็กเครื่องจักรกล นอกจากนี้ยังอาจจะมีผลผลิตเมื่อตัดเฉือนวัสดุเหนียวที่ความเร็วต่ำมากและอัตราป้อนสูง การแตกหักเกิดขึ้นเมื่อเศษตัดไม่ได้รับการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก และแตกแพร่กระจายจากการตัดขอบ (จุด m) เพื่อผิวหน้าฟรี (จุด n) เป็นผลให้เศษแบ่งออกเป็นส่วนเล็กๆในลักษณะซ้ำๆ

ก) เศษตัดแบบไม่ต่อเนื่อง ข) เศษตัดแบบเป็นชั้น ค) เศษตัดแบบเป็นชั้นใหญ่ ง) เศษตัดแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 2.23 การจำแนกประเภทของเศษตัด [33]

เศษตัดต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.23 (ง) เป็นวัสดุที่เหนียวมาก เช่น เหล็กตัด เหล็กอ่อนทองแดงและอะลูมิเนียม เครื่องจักรจะตัดที่ความเร็วค่อนข้างสูงเหตุผลก็คือโลหะและโลหะผสมเหนียวไม่การแตกหักกระนาบที่ตัดเฉือนเป็นที่น่าสังเกตว่าการตัดภายใต้เงื่อนไขนี้เป็นสภาวะคงที่ของกระบวนการการก่อตัวของเศษอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นในโซนขยาย การก่อตัวชิปอย่างต่อเนื่องในวัสดุเหนียวมีความเกี่ยวข้องกับแรงตัดที่ลดลงและผลโดยทั่วไปจะทำให้ได้ผิวที่ดี เศษตัดต่อเนื่องอาจนำมาใช้หลายรูปทรงตรงหรือโค้งใกล้เคียงกับชนิดของที่เป็นมักจะมีแข็งแรงมากเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างสูงและการควบคุมของรูปร่างเศษตัดเป็นหนึ่งในปัญหาในทางปฏิบัติที่ท้าทายในการควบคุมเครื่องจักรและการออกแบบเครื่องมือ

2.3.4 สูตรคำนวณการตัดเฉือนในงานกัดเกี่ยวกับการกัด สูตรการตัดเฉือนพื้นฐานการกำหนดในดำเนินการมี [24] ดังนี้

- ความเร็วตัด (Cutting Speeds) (V_c) หมายถึงความเร็วตัดปาดผิวโลหะเมื่อขึ้นงานหรือมีดกัดหมุนตัดเศษวัสดุใน 1 รอบจะเท่ากับความยาวของเส้นรอบวง ความยาวของเศษวัสดุที่มีดกัดในเวลา 1 นาที เรียกว่า ความเร็วตัด

$$V_c = \pi DN/1000 \dots \dots \dots (4)$$

กำหนดให้ V_c = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)

N = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

- อัตราป้อนต่อฟัน (F_z) หมายถึง ระยะการป้อนขึ้นงานหรือมีดตัดเข้าหาขึ้นงานเมื่อขึ้นงานหรือมีดตัดหมุนครบหนึ่งรอบหารด้วยจำนวนฟันของเครื่องมือตัด

$$V_f = f_z \cdot z \cdot N \dots \dots \dots (5)$$

กำหนดให้ V_f = ความเร็วของโต๊ะงาน

F_z = อัตราป้อนต่อรอบ (มิลลิเมตร/รอบ)

z = จำนวนของฟันเครื่องมือตัด

N = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

- ความเร็วรอบ (N) คือ การหาว่าชิ้นงานหรือเครื่องมือตัดหมุนไปเป็นจำนวนกี่รอบในเวลา 1 นาที โดยการคำนวณหาได้จากสูตรเดียวกันกับการคำนวณหาความเร็วตัด แต่อาศัยหลักการย้ายสมการ

$$N = (1000 \cdot V_c) / (\pi \cdot D) \dots \dots \dots (6)$$

กำหนดให้ V_c = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)

N = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

- การกำจัดเศษวัสดุ MRR (Q) คือการหาอัตราการกำจัดเศษวัสดุของชิ้นงานในเวลา 1 นาที

$$Q = (AP \cdot a_c \cdot V_f) / 1000 \dots \dots \dots (7)$$

กำหนดให้ AP = ความลึก

a_c = ความกว้างหน้าตัด

V_f = ความเร็วป้อนโต๊ะงาน

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนของฟันและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเครื่องมือการกัดการดำเนินการได้ถูกกำหนดไว้อย่างรอบคอบร่วมกับขอบเขตของเครื่องโดยกำหนดเป็นความเร็วในการหมุนของแกนหมุนและอัตราป้อนของเครื่องจักรและอัตราการป้อนเชิงเส้นได้ถูกนำมาใช้ในโปรแกรม CNC สำหรับคำสั่งเครื่องระหว่างการดำเนินการหรือได้รับการแนะนำให้รู้จักและควบคุมโดยผู้ประกอบการในโรงงานทั่วไป ค่าที่ได้มาจากอื่นๆ เช่น การกำจัดเศษวัสดุ (MRR) หรือความหนาพิวทางทฤษฎี สามารถได้รับจากค่าการกัดพื้นฐานข้างต้น

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 Wang *et al.* [1] กล่าวถึงการใช้เครื่องจักรกลความเร็วสูงของการชุบแข็งเหล็กสำหรับงานอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ มีการกำหนดวิธีการลดการสึกหรอของเครื่องมือเคลือบคาร์ไบด์ปรับปรุงประสิทธิภาพของเครื่องจักรและความสำคัญเรื่องของคุณภาพ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เครื่องจักรกลเหล็กกล้าความเร็วสูง (SKD11 / HRC 62, S136 / HRC 51) โดยใช้เครื่องมือเคลือบคาร์ไบด์ PVD 2 ชนิด (TiAlN และ TiSiN) เพื่อหากลไกการตัดการสึกหรอของเครื่องมือและการแตกหักและผลกระทบของมุมเครื่องมือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเครื่องมือขยายความยาว, แรงตัดและการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการตัดด้วยเครื่องมือ

2.4.2 Da Silva *et al.* [2] เป็นการวิเคราะห์การสึกหรอของเครื่องมือเหล็กกล้าคาร์บอนกลางที่มีเม็ดเม็ดเคลือบคาร์ไบด์ โดยใช้ระบบหล่อลื่น/ระบายความร้อนด้วยเครื่องจักรที่แตกต่างกัน ปัจจุบันมีการแข่งขันทางอุตสาหกรรมมากจึงมีอัตราการผลิตที่สูงขึ้นจำเป็นต้องมีคุณภาพและต้นทุนต่ำเป็นหลักพื้นฐาน งานวิจัยนี้ใช้ความเร็วและอัตราป้อนสูง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นภายใต้เงื่อนไขนี้จะทำให้อายุการใช้งานที่สั้นลงและมีผลต่อความสมบูรณ์ของพื้นผิวของชิ้นส่วน ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ความแข็ง ความแข็งแรงและความต้านทานการสึกหรอของเครื่องมือ ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นต้องหาในงานวิจัยนี้คือเงื่อนไขการตัดที่เหมาะสม (ความเร็วในการตัด อัตราป้อน สภาพแวดล้อมในการตัด เนื้อวัสดุของเครื่องมือและรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องมือตัด)

2.4.3 Halil Çalıřkan *et al.* [3] การศึกษาอิทธิพลของการเคลือบผิวด้วย aCN/TiAlN บนการสึกหรอของมิดคิลิ่ง แรงตัด พื้นผิวสำเร็จและรูปร่างเศษการกัดผิวหน้าของโลหะผสมพิเศษเกรด Ti6Al4V ในงานวิจัยนี้ได้สรุปว่าการเคลือบผิวด้วย aCN/TiAlN ทำให้มีความต้านทานการสึกหรอสูงขึ้นและมีมิดคิลิ่งมีอายุการใช้งานยืดออกไปอีกประมาณ 15%ของอายุการใช้งาน และพิสูจน์ได้ว่ามีประสิทธิภาพในรูปร่างเศษชิ้นงานและพื้นผิวสำเร็จ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในแง่ของการยึดเกาะความต้านทานการสึกหรอของพื้นผิวสำเร็จและรูปร่างเศษ

2.4.4 Seref Aykut *et al.* [4] การสังเกตการณ์ทดลองการสึกหรอของเครื่องมือตัด แรงตัดและรูปร่างเศษการตัดในการกัดผิวหน้าของโคบอลต์ตามโลหะผสมพิเศษกับลักษณะทางกายภาพแบบที่มีการเคลือบผิวและไม่มีการเคลือบผิว ซึ่งได้กล่าวถึงการตรวจสอบผลกระทบเงื่อนไขที่มีผลต่อการตัดเนื้อ (ความเร็วตัด, อัตราป้อนและความลึกในการตัด บนการสึกหรอของเครื่องมือตัด รูปร่างเศษการตัดและแรงตัดในการกัดผิวหน้า

2.4.5 E.O. Correa *et al.* [5] อิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคในการสึกหรอแบบขัดสีของโลหะผสมพอกผิวแข็งผิวชุบ Fe-Cr-C-Nb โดยกระบวนการเชื่อมแบบเปิด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้รับการพัฒนาสำหรับวัสดุหุ้มด้วยเทคนิคการเชื่อมแบบเปิดชิ้นส่วนภายใต้การสึกหรอแบบขัดสี แสดงให้เห็น

ว่าการพัฒนาโลหะผสมพอกผิวแข็ง Fe-Cr-C-Nb มีแนวโน้มที่ดีขึ้น ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนสูงธรรมดา / โครเมียมสูง โลหะผสมพอกผิวแข็งมีค่าความแข็งที่สูงขึ้น และมีปริมาณ M_7C_3 ที่สูงขึ้นจากระดับ

2.4.6 Y. Su *et al.* [22] อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด ในการทดสอบความสามารถในกระบวนการตัดเฉือน ได้ทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่ได้รับจากกระบวนการตัดเฉือนและแสดงให้เห็นถึงการสึกหรอที่ได้รับอย่างมีนัยสำคัญจากผลกระทบจากการระบายความร้อนและเงื่อนงำในการหล่อเย็น

2.4.7 Schulz *et al.* [23] ด้านวัสดุของรูปร่างเศษในกระบวนการ HSC ในงานวิจัยได้กล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างเศษในการเพิ่มความเร็วในการตัดเพราะส่วนใหญ่ของงานทดลองได้ดำเนินการในวัสดุเดิม แต่ในทางกลับกันงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองบนอะลูมิเนียมในสภาวะความร้อนที่แตกต่างกัน ได้ยืนยันว่าการเพิ่มความแข็งโดยการตกตะกอนเป็นสำคัญในการเปลี่ยนแปลงในการสร้างรูปร่างเศษอย่างต่อเนื่องไปจนถึงแบบแบ่งส่วนและไม่เป็นเพียงแค่ค่าพารามิเตอร์ในการตัดทำให้ได้ความรู้ใหม่ในการตรวจสอบความถูกต้องความสัมพันธ์เศษตัดและแรงในการตัด



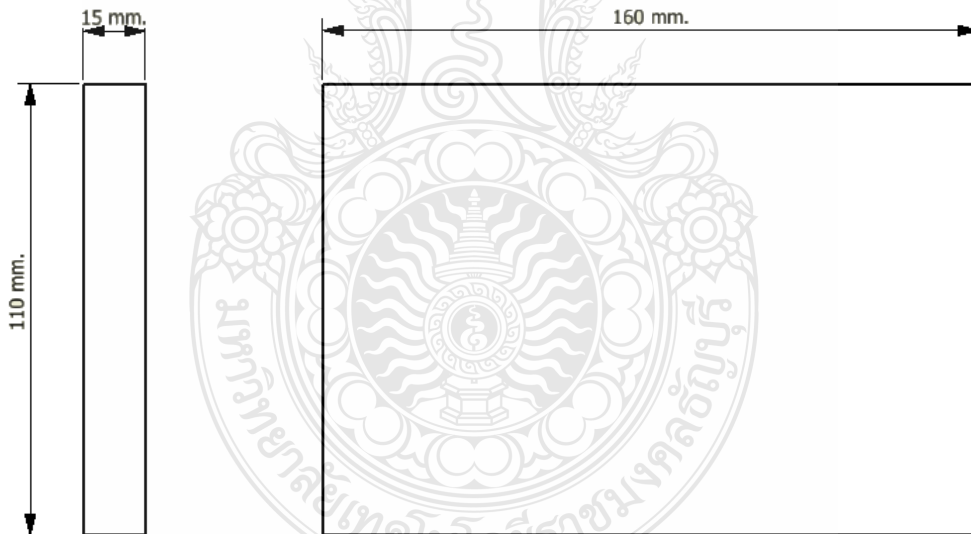
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษากระบวนการกัดปาดผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง เพื่อศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอของคมตัดที่ใช้ในการกัดเหล็กหล่อ JIS-FC25 และรูปร่างเศษการตัดในการกัดผิวหน้าเหล็กหล่อ JIS-FC25 นอกจากนี้ยังศึกษาในเรื่องความหยาบผิว และสมบัติทางกล ซึ่งพิจารณาจากค่าตัวแปรที่ได้ทำการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้การทดสอบ

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลองคือ เหล็กหล่อสีเทา (JIS-FC25) ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี ดังตารางที่ 3.1 แผ่นเหล็กหล่อ หล่อให้มีขนาดความหนา 15 มิลลิเมตร ความกว้าง 110 มิลลิเมตร และความยาว 160 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานเหล็กหล่อ JIS-FC25

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อ JIS-FC25

เหล็กหล่อสีเทา	%C	%Si	%Mn	%P	%S
wt%	2.4-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.002-1.0	0.02-0.25

3.2 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

3.2.1 กระบวนการเชื่อมใช้วิธีการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือ (Manuel Metal Arc Welding: MMAW) สามารถใช้ได้กับโลหะเกือบทุกชนิด ใช้ได้กับงานเชื่อมซ่อมแซมชิ้นส่วนโลหะที่ชำรุดหรือประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน

3.2.2 เครื่องเชื่อมในการทดลองที่ใช้เป็นเครื่องเชื่อมระบบอินเวอร์เตอร์ มีเครื่องหมายทางการค้าชื่อ LONGWELL MMA 215 HDPE (Digital) แสดงดังรูปที่ 3.2 มีแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input Voltage) 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้าขาออกขณะเชื่อม (Output Current Range) 10-215 แอมแปร์ เครื่องเชื่อมนี้สามารถเชื่อมได้ทั้งกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) ซึ่งในการทดลองครั้งนี้ใช้รูปแบบการเชื่อมเป็นการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือ (Manuel Metal Arc Welding: MMAW)



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

3.2.3 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding: SMAW) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้คือ ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกผิวแข็ง (Hardfacing electrode) สำหรับงานโลหะเสียดสีกับโลหะและเสียดสีกับทราย เป็นลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Electrode) ยี่ห้อ YAWATA เกรด H-350C (JIS Z 3251) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 350 มิลลิเมตร ส่วนผสมทางเคมีดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง

ลวดเชื่อมประเภท	ส่วนผสมทางเคมี (%)				Standard
	C	Si	Mn	Cr	
Hardfacing electrode	0.16	0.43	1.32	1.55	JIS Z 3251: DF2A-350-B

3.2.4 ตู้อบลวดเชื่อม ในการอบลวดเชื่อมเพื่อกำจัดความชื้นออกจากลวดเชื่อม ใช้อุณหภูมิที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และในการอบชิ้นงาน ใช้อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งตู้อบลวดนี้สามารถปรับตั้งอุณหภูมิได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ตู้อบลวดเชื่อมและชิ้นงาน

3.2.5 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเชื่อม

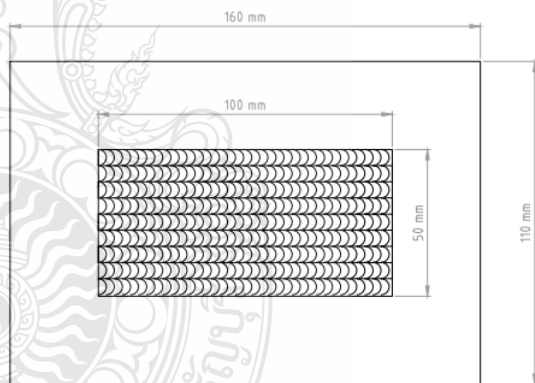
3.2.5.1 นำเหล็กหล่อมาขัดผิวหน้าด้วยเครื่องเจียรระไนราบ เพื่อกำจัดผิวดิบของเหล็กหล่อ

3.2.5.2 เมื่อทำการเจียรระไนผิวดิบของเหล็กหล่อแล้ว ต่อบนนำชิ้นงานมาทำขอบเขตการเชื่อมโดยใช้ปากกาทำสัญลักษณ์บนผิวของเหล็กหล่อ โดยเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนานกับแผ่นเหล็กหล่อ โดยมีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน JIS Z3114

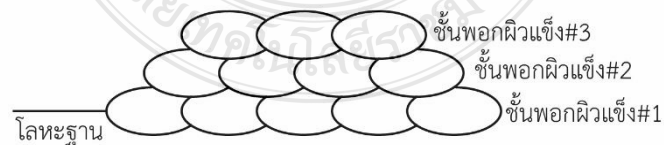
3.2.6 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง การเชื่อมพอกผิวแข็งในครั้งนี้ ใช้กระแสเชื่อมที่ 130 แอมแปร์ เป็นกระแส DC ก่อนทำการเชื่อมชิ้นงาน กำหนดให้มีการอุ่นชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมซึ่งอุณหภูมิที่ใช้คือ 350 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิระหว่างเชื่อมให้คงที่อยู่ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส การเชื่อมเป็นแบบเดินแนว (Autogeneous Welding) บนผิวของแผ่นเหล็กหล่อโดยไม่สายลวดเชื่อม (Non-waving) ทิศทางการเชื่อมจะขนานกับความยาวของแผ่นเหล็กหล่อ ใช้ท่าราบในการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) ซึ่งมีระยะขอบเขตของแนวเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข) และทำการเชื่อมพอกผิวแข็งทั้งหมด 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ค)



(ก) เชื่อมพอกผิวแข็งด้วยท่าราบ



(ข) ระยะขอบเขตแนวเชื่อม

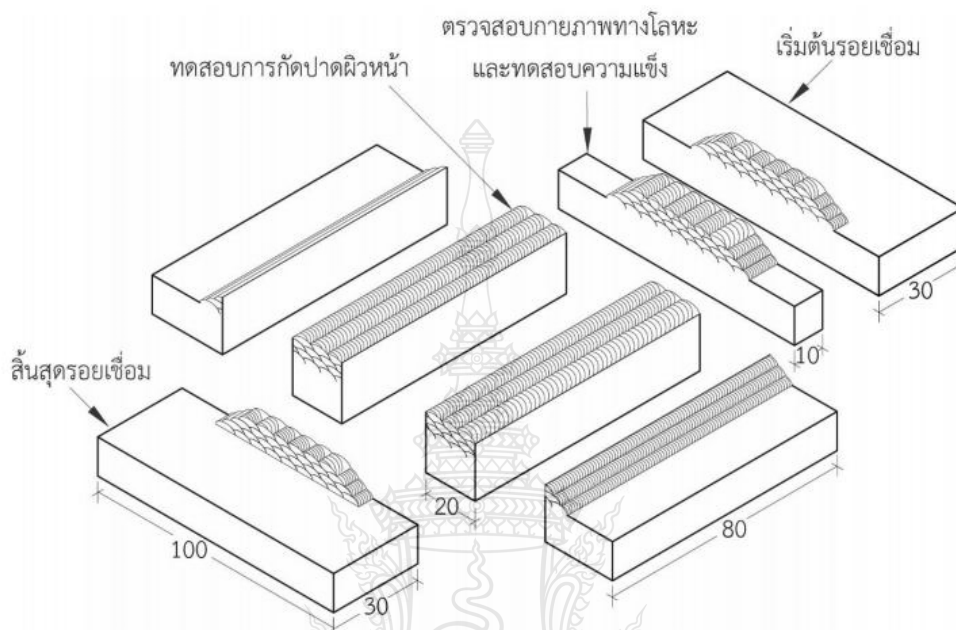


(ค) เชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้น เชื่อมพอกผิวแข็งทั้งหมด 3 ชั้น

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

3.3 ขั้นตอนการกัดปาดผิวหน้าโลหะ

3.3.1 การออกแบบการตัดชิ้นงาน ในการออกแบบการตัดชิ้นงานเพื่อนำชิ้นงานไปทำการทดสอบรอยเชื่อม โดยจะทำการตัดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การออกแบบการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปทำการทดสอบ

3.3.2 เครื่องที่ใช้ในการตัดชิ้นงาน ในการตัดชิ้นงานเพื่อนำไปทำการทดสอบในกระบวนการต่างๆ ใช้กระบวนการตัดทางกล โดยใช้เครื่องตัดไมโครไฟเบอร์ ชิ้นงานจะถูกจับยึดด้วยปากกาจับชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้การตัดชิ้นงาน โดยเริ่มจากตัดส่วนบนของชิ้นงานออก 30 มิลลิเมตร และตัดส่วนล่างออก 40 มิลลิเมตร จากนั้นตัดผ่ากลางชิ้นงาน ให้ชิ้นงานที่นำไปสู่กระบวนการกัดปาดผิวหน้าให้มีขนาดความยาว 80 มิลลิเมตร และความยาว 20 มิลลิเมตร ตามรูปที่ 3.5 ชิ้นงานการทดสอบการกัดปาดผิวหน้า



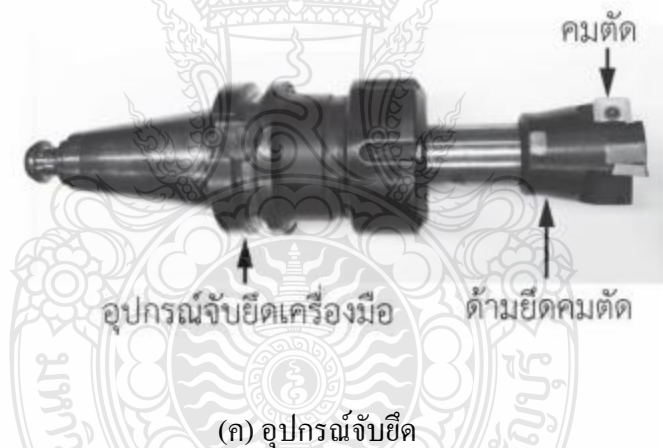
รูปที่ 3.6 เครื่องตัดไมโครไฟเบอร์

3.3.3 เครื่องกลที่ใช้ในการทดสอบการกัดปาดผิวหน้า ในการทดสอบการกัดปาดผิวหน้า โลหะนี้ใช้เครื่องจักรกลอัตโนมัติ แบบเพลางานแนวตั้ง ยี่ห้อ Le blond makino FNC60 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก) มีแผงควบคุมการตั้งค่าโปรแกรมในการควบคุมการตัดเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ข) ในการจับยึดใช้อุปกรณ์ด้ามยึดคมตัดซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร อัตราการกัดลึก (Cutting Depth) 10.7 มิลลิเมตร สามารถใส่เครื่องมือคมตัด (Inserts) ใส่ได้จำนวน 3 เม็ด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ค)



(ก) เครื่องจักรกลอัตโนมัติ

(ข) แผงควบคุม

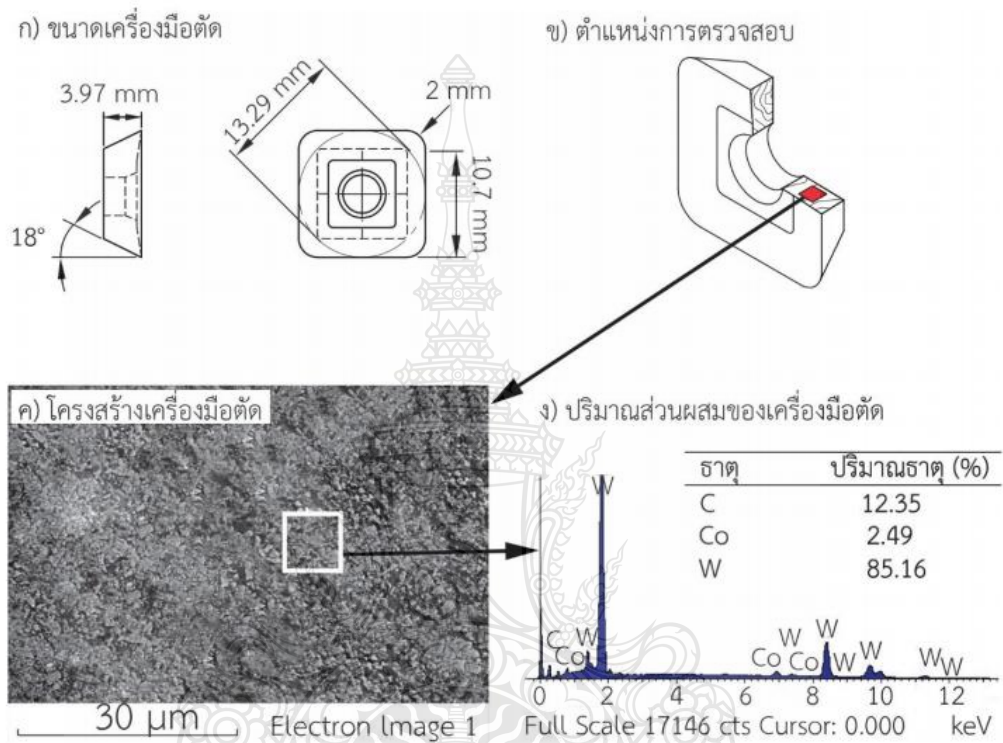


(ค) อุปกรณ์จับยึด

รูปที่ 3.7 เครื่องจักรกลอัตโนมัติ

3.3.4 เครื่องมือตัดที่ใช้ในการทดลอง เครื่องมือตัดที่ใช้เป็นเม็ดมีด (Inserts) ยี่ห้อ SANDVIK ที่ผลิตจากวัสดุคาร์ไบด์ (Carbide) ตามมาตรฐาน ISO เกรด P40 และเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD) โดยมีสารประกอบดังนี้ ดีบุก (TiN) ร่วมกับไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiCN) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเครื่องมือตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาดบริเวณเนื้อวัสดุของเครื่องมือคมตัด พบโครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อวัสดุของเครื่องมือตัดมีลักษณะเป็นเม็ดทรงเหลี่ยมขนาดเล็กจัดเรียงเป็นกลุ่ม แสดงในรูปที่ 3.8 (ค) และทำการตรวจสอบปริมาณ

ส่วนผสมทางเคมี ในตำแหน่งที่กำหนดในรูป 3.8 (ค) พบว่าโดยมี ธาตุหลักจำนวน 4 ชนิด คือ คาร์บอน (C) โคบอลต์ (Co) ทังสเตน (W) และมีปริมาณส่วนผสมทางเคมี ของธาตุคาร์บอน (C) 12.35 เปอร์เซ็นต์ ธาตุ โคบอลต์ (Co) 2.49 เปอร์เซ็นต์ ธาตุทังสเตน (W) 85.16 เปอร์เซ็นต์ แสดงในรูปที่ 3.8 (ง)



รูปที่ 3.8 เครื่องมือตัด [34]

3.3.5 ขั้นตอนการจับยึดชิ้นงาน การจับยึดชิ้นงานในกระบวนการกัดปาดผิวหน้าโลหะถูกจับยึดด้วยปากกาจับยึดชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.9 (ก) เมื่อชิ้นงานถูกจับยึดด้วยปากกาแล้ว นำแผ่นบลูซีทมาทำการปูบริเวณรอบปากกาจับชิ้นงานเพื่อการเก็บเศษในการคายเศษ แสดงดังรูปที่ 3.9 (ข)



(ก) การจับยึดอุปกรณ์



(ข) ปูแผ่นบลูชีท

รูปที่ 3.9 อุปกรณ์การจับยึดชิ้นงาน

3.3.6 การดำเนินการกัดปาดผิวหน้า มีการกำหนดตัวแปรในการทดสอบและการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้

3.3.6.1 ความลึกในการกัด ที่ 1 มิลลิเมตร

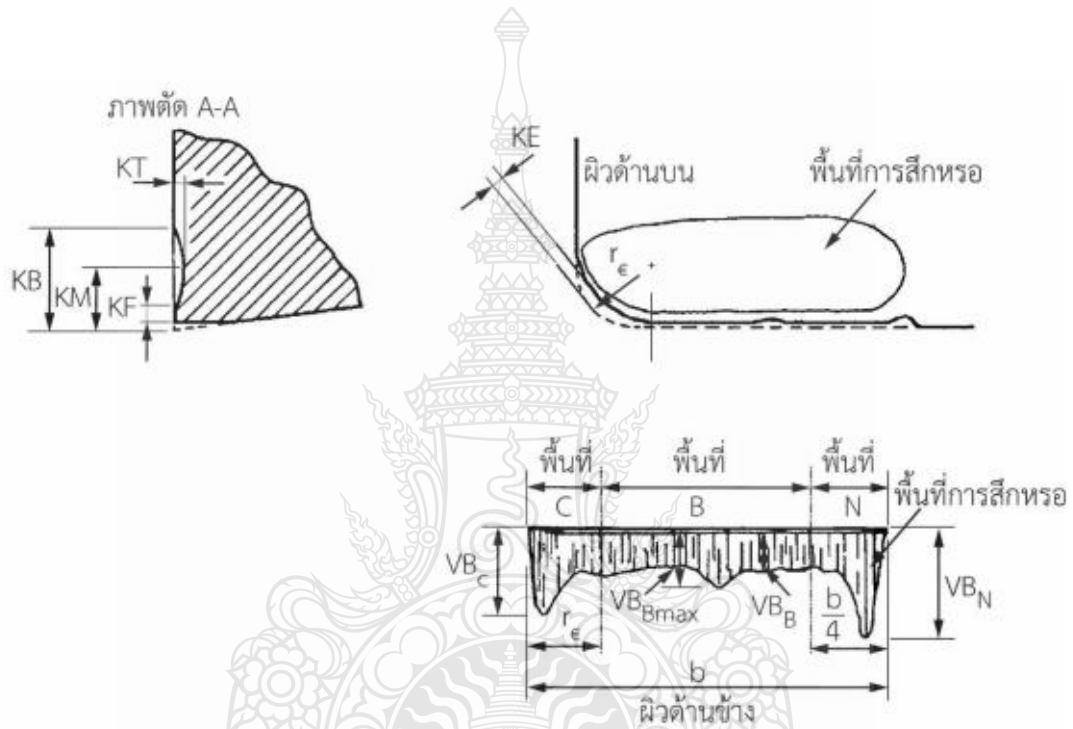
3.3.6.2 อัตราป้อน (f_z) คือ 100, 300, 400 และ 700 มิลลิเมตร/นาที

3.3.6.3 ความเร็วรอบ (Speed) คือ 800, 1100, 1400 และ 1700 รอบ/นาที

3.3.6.4 การระบายความร้อนแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ แบบไม่ใช้สารหล่อเย็นและแบบใช้สารหล่อเย็น ประเภท Soluble oils โดยอัตราส่วนผสมของปริมาณของน้ำมันกับน้ำ 1:20

3.4 ขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล

3.4.1 การทดสอบชิ้นงาน เริ่มทำงานทดสอบชิ้นงานที่ตัวแปรแรก เมื่อเข้าสู่กระบวนการกัดปาดผิวหน้าโลหะที่ตัวแปรแรกแล้ว ทำการเก็บเศษการกัดที่เกิดขึ้น จากนั้นตรวจสอบอัตราการสึกหรอวัสดุเครื่องมือตัดที่ขอบคมตัดที่มีการสึกหรอ ตรวจสอบตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 ในการตรวจสอบการสึกหรอจะใช้กล้องไมโครสโคปแบบ USB (USB Microscope) ขาดังกล้องและชุดจับยึดเครื่องมือคมตัด

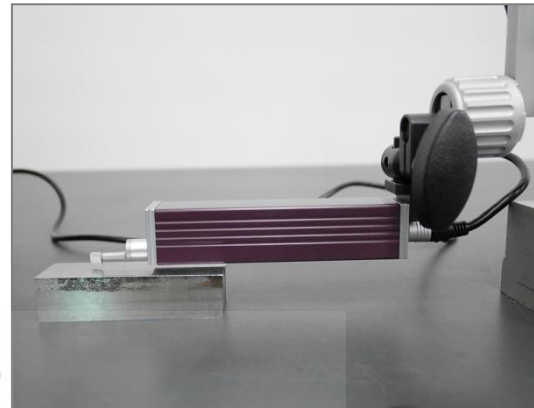


รูปที่ 3.10 การวัดพื้นที่การสึกหรอ ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977

3.4.2 การตรวจสอบความหยาบผิว ชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบความหยาบผิว จะเป็นชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดปาดผิวหน้าโลหะมาแล้ว แล้วนำมาทำการวัดความหยาบผิวโดยทำการตรวจสอบในตำแหน่งเริ่มต้น กึ่งกลางและสิ้นสุดกระบวนการตัดเฉือน ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะทำการตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง ทิศทางในการตรวจสอบจะขนานกับทิศทางในการตัดเฉือน



(ก) อุปกรณ์ตรวจสอบความหยาบผิว



(ข) การตั้งอุปกรณ์



(ค) การตรวจสอบความหยาบผิว

รูปที่ 3.11 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความหยาบผิว

3.4.3 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและการกระจายตัวของธาตุ ในการตรวจสอบ ส่วนผสมทางเคมีและการกระจายตัวของธาตุจะตรวจสอบกับเครื่องมือตัดที่เกิดการสึกหรอ ซึ่งจะ ตรวจสอบบริเวณคมตัดของเครื่องมือตัดที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือน โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอน แบบส่องกวาดเครื่องหมายการค้า JEOL รุ่น JSM-6510LV โดยมีกำลังขยายตั้งแต่ 15-200,000 เท่าและเครื่องวิเคราะห์กระจายการพลังโดยมี เครื่องหมายการค้า OXFORE



(ก) ตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี

(ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด

รูปที่ 3.12 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ

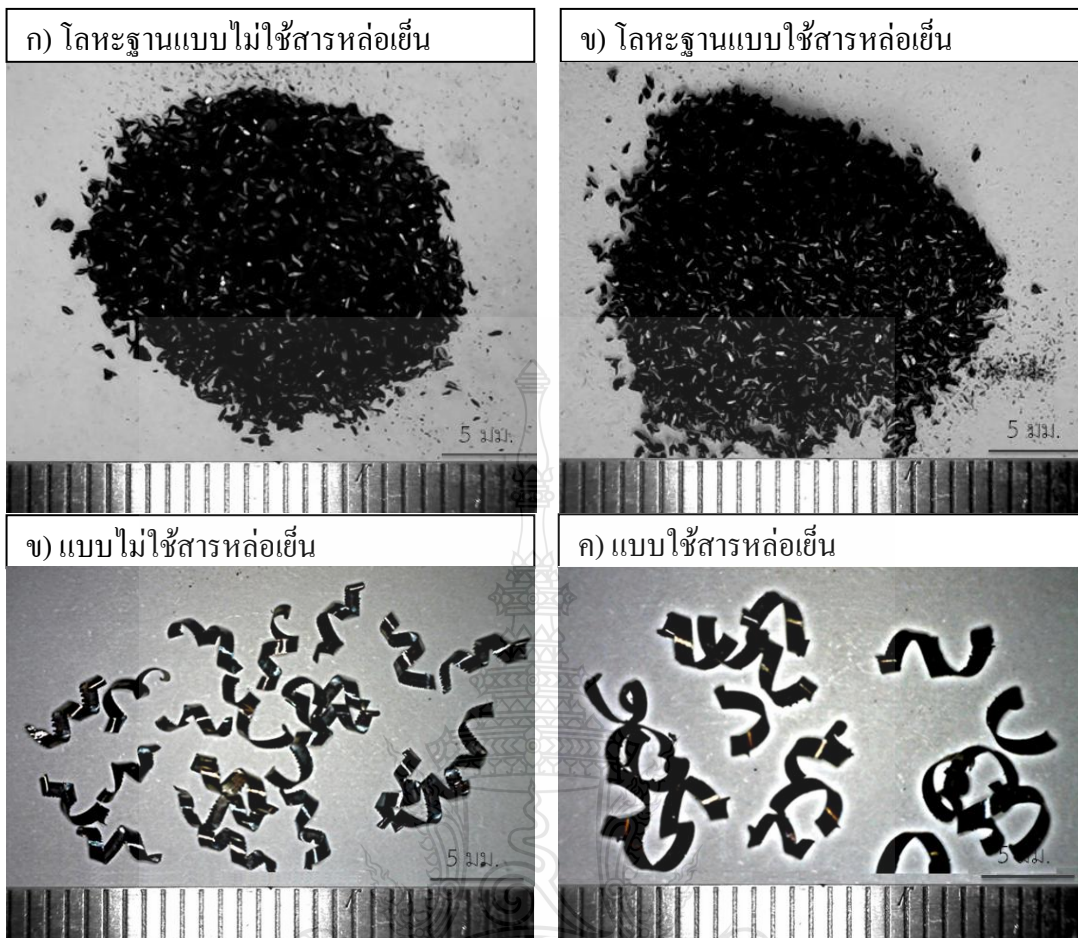


บทที่ 4

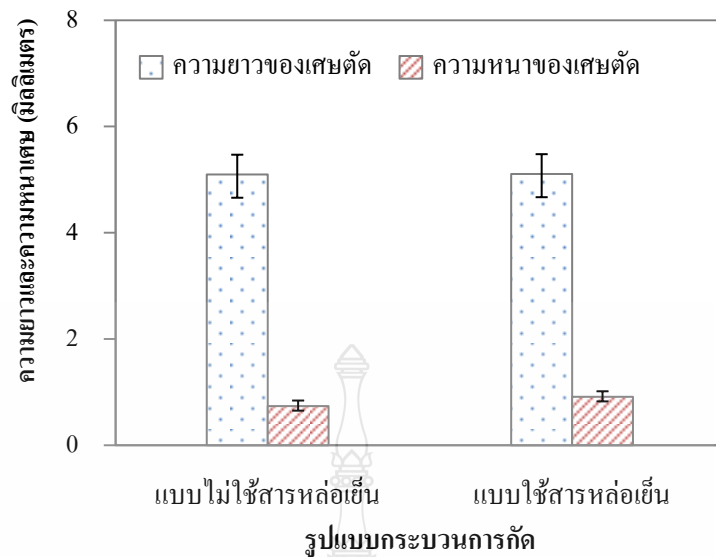
ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง

4.1.1 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อลักษณะเสียด การเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของเศษตัดมาจากการเปลี่ยนรูปแบบของวัสดุชิ้นงานทดสอบ การวิเคราะห์การก่อตัวของรูปร่างของเศษตัดเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการตัดเฉือนและความสมบูรณ์ของพื้นผิว [3] ในรูปที่ 4.1 แสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างเศษตัดของกระบวนการทดสอบความสามารถในการตัดเฉือนแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นและแบบใช้สารหล่อเย็นที่ความเร็วตัด 800 รอบต่อนาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึก 1 มิลลิเมตร พบว่า เมื่อกระบวนการตัดเฉือนผิวหน้าโลหะฐานลักษณะเศษตัดที่ได้เป็นผงละเอียดทั้งแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นและแบบใช้สารหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก และ ข) และกระบวนการตัดเฉือนที่ทำการกัดที่มีชั้นพอกผิวแข็งมีลักษณะเป็นทอเกลียว ที่สิ้นแบบต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ค และ ง) โดยเศษตัดของชิ้นงานมีความหนาเฉลี่ย 0.84 มิลลิเมตร และความยาวเศษเฉลี่ย 5.11 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 อย่างไรก็ตามในกระบวนการตัดเฉือนที่ไม่มีการใช้สารหล่อเย็นมีลักษณะของเศษตัดที่สั้นกว่าและบางกว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการตัดเฉือนที่ใช้สารหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ง) โดยเศษตัดของชิ้นงานมีความหนาเฉลี่ย 0.74 มิลลิเมตร และความยาวเศษเฉลี่ย 5.09 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงให้เห็นการนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงรูปแบบถาวรของรูปร่างเศษตัด [35] โดยทั่วไปสภาพแวดล้อมในการตัดเฉือนแบบใช้สารหล่อเย็นและแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น มีแนวโน้มที่แตกต่างกันในอัตราส่วนระหว่างความหนาของเศษตัดและการเสียหายของเครื่องมือตัด [36]

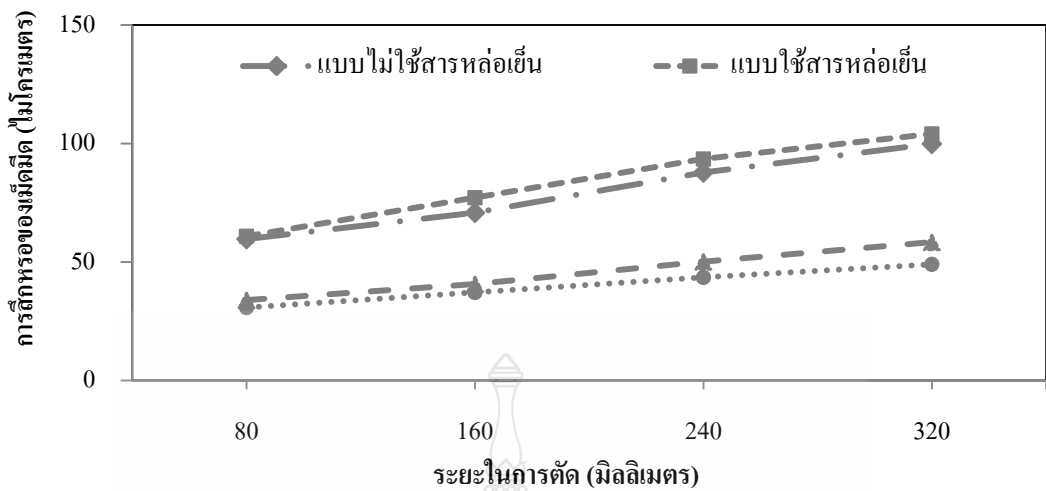


รูปที่ 4.1 ลักษณะของเศษตัดแบบใช้สารหล่อเย็นและแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

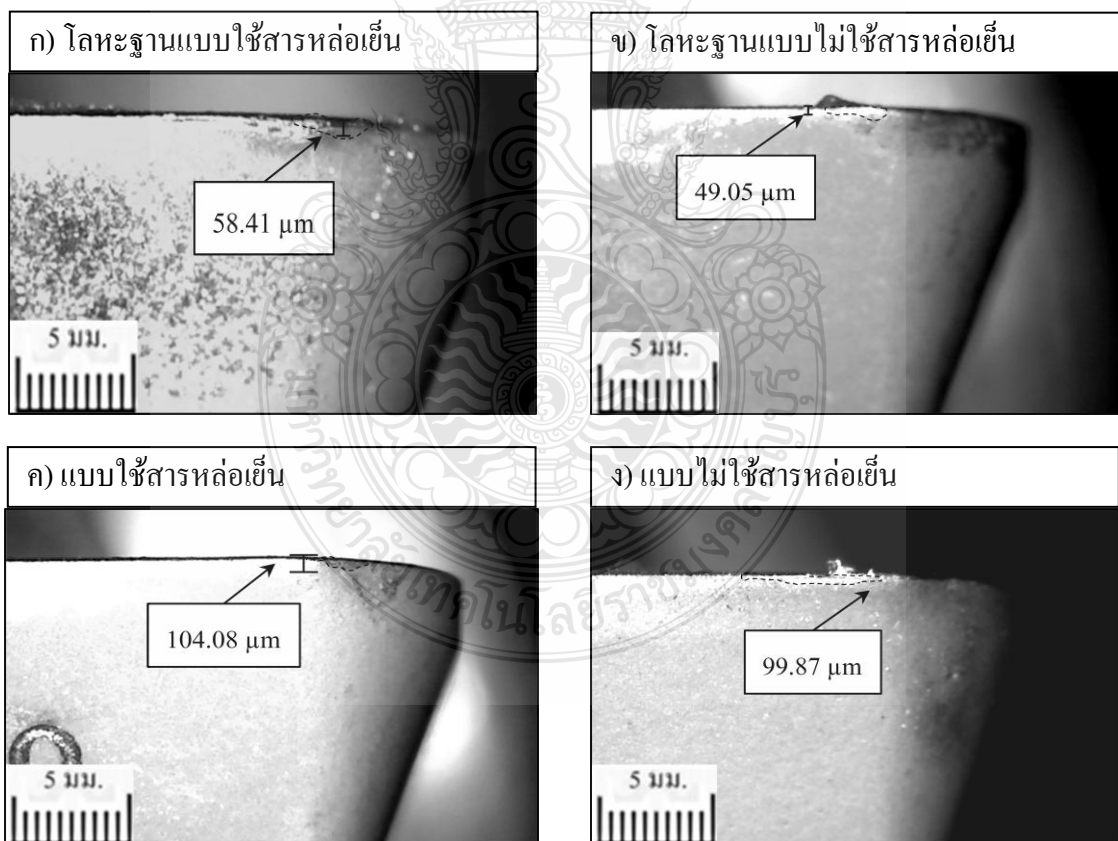


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์แบบไม่ใช้สารหล่อเย็นและแบบใช้สารหล่อเย็น ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

4.1.2 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด ในการทดสอบความสามารถในกระบวนการตัดเฉือน ได้ทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่ได้รับจากกระบวนการตัดเฉือนและแสดงให้เห็นถึงการสึกหรอที่ได้รับอย่างมีนัยสำคัญจากผลกระทบจากการระบายความร้อนและเงื่อนไขในการหล่อลื่น [37] พบว่า การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดมีแนวโน้มที่สูงมากขึ้นตามระยะทางในการตัดเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และในอัตราการสึกหรอที่เกิดมากที่สุดในการบวนการตัดเฉือนชิ้นงานที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร เกิดการสึกหรอมากที่สุดที่แบบใช้สารหล่อเย็นมีอัตราการสึกหรอของคมตัดประมาณ 104.91 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ค) และแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นมีอัตราการสึกหรอของคมตัดประมาณ 79.55 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ง)ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการกัดผิวหน้าโลหะด้วยเครื่องมือตัดชนิดคาร์ไบด์ (Carbide Tool) ได้กล่าวถึงการสึกหรอของคมตัดว่ากลไกหลักของการสึกหรอของเครื่องมือตัดคือการสึกหรอแบบการขัดสีบริเวณขอบคมตัด โดยมีอนุภาคหรือเศษเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่เป็นบริเวณกว้างขึ้นที่คมตัด [38]



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร



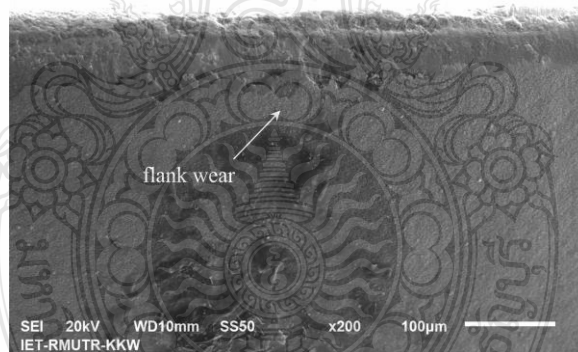
รูปที่ 4.4 ลักษณะการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดแบบใช้สารหล่อเย็นและแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

4.1.3 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความหยาบผิว พื้นผิวโลหะ เชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือนภายใต้เงื่อนไขที่มีแตกต่างกัน จึงได้ทำการตรวจสอบความหยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากการศึกษาพบค่าความหยาบผิวแบบใช้สารหล่อเย็นมีค่าความหยาบผิวสูงกว่าแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น ในการใช้สารหล่อเย็นช่วยในกระบวนการตัดเฉือนไม่ส่งผลดีต่อคุณภาพผิวรอยตัด เนื่องจากค่าความหยาบผิวของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นมีค่าความหยาบผิวที่ต่ำกว่าแบบใช้สารหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จากผลการทดลองนี้ได้คล้ายกับงานวิจัยซึ่งได้กล่าวถึงการศึกษาการกัดผิวเหล็กเครื่องมือ (AISI P20) โดยใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นพบว่า หดของน้ำหล่อเย็นที่ขนาดใหญ่จึงไม่สามารถเข้าถึงบริเวณการตัดเฉือน จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการหล่อเย็นในพื้นที่ที่ไม่มีประสิทธิภาพได้นำไปสู่พื้นผิวที่มีค่าความหยาบที่สูงขึ้น [39] และมิงงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงความสมบูรณ์ของพื้นผิวไว้ว่าควรมีการเลือกใช้ความเร็วรอบและอัตราป้อนให้เหมาะสมกับงานเพราะเป็นสาเหตุที่สำคัญของการเกิดการสึกหรอของคมตัดที่ก่อให้เกิดสันเล็ก ๆ บนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบจึงทำให้เกิดความหยาบผิวที่สูงขึ้น [40] และงานวิจัยของ Tian, Zhao และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเร็วยรอบในการตัดเฉือนและอัตราการสึกหรอของคมตัด กล่าวถึงเหตุผลสำคัญที่ทำให้เนื้อของวัสดุอ่อนตัวลงเนื่องมาจากผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้เกิดความหยาบผิวที่สูงขึ้น

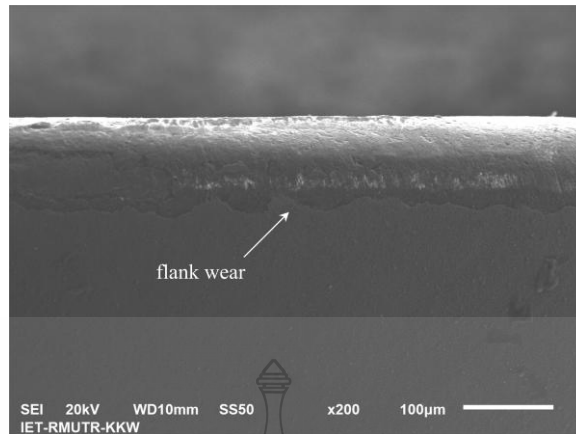


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นและแบบใช้สารหล่อเย็นที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิว

4.1.4 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความหยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ได้แสดงถึงเครื่องมือตัดที่ได้ผ่านการทดสอบความสามารถในการตัดเฉือนแบบใช้สารหล่อเย็นและแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น พบว่าเครื่องมือตัดในกระบวนการตัดเฉือนแบบใช้สารหล่อเย็นมีการสึกหรอของขอบคมตัดสูงที่สุด เพื่อทำความเข้าใจกับกลไกในการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดของชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7 จึงได้นำมาทำการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (Energy dispersive spectrometry: EDS-maps) สามารถสังเกตได้ถึงกลไกการสึกหรอของขอบคมตัด พบว่า บริเวณขอบคมตัดที่เกิดการสึกหรอของชิ้นงานมีธาตุหลักอยู่ 5 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ทังสแตน (W) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) และเหล็ก (Fe) นอกจากนี้ยังได้แสดงให้เห็นถึงอนุภาคที่ยึดติดบนพื้นผิวของขอบคมตัดที่สามารถสังเกตได้ อนุภาคเหล่านี้มาจากวัสดุที่ผ่านการขัดสีและมายึดเกาะที่บริเวณที่มีการสึกหรอ [52] ในงานวิจัยของ Wang, Xie และคณะ ได้กล่าวถึงการหลุดล่อนของสารเคลือบผิวที่เกิดขึ้นจากผลรวมของปัจจัยหลายๆประการ เช่น ความเค้นตกค้างบริเวณพื้นผิวสารเคลือบผิว และแรงกระแทกซึ่งส่งผลต่อรอยร้าวบนพื้นผิวของสารเคลือบผิว [1] และเมื่อพิจารณาผลเหล่านี้ก็สรุปได้ว่าการขัดสีมีส่วนร่วมในการสึกหรอเพราะเนื้อวัสดุบริเวณคมตัดเกิดการอ่อนตัวลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เครื่องมือตัดเกิดการเสียหาย [42]



รูปที่ 4.6 ลักษณะการสึกหรอของเครื่องมือตัดแบบใช้สารหล่อเย็น



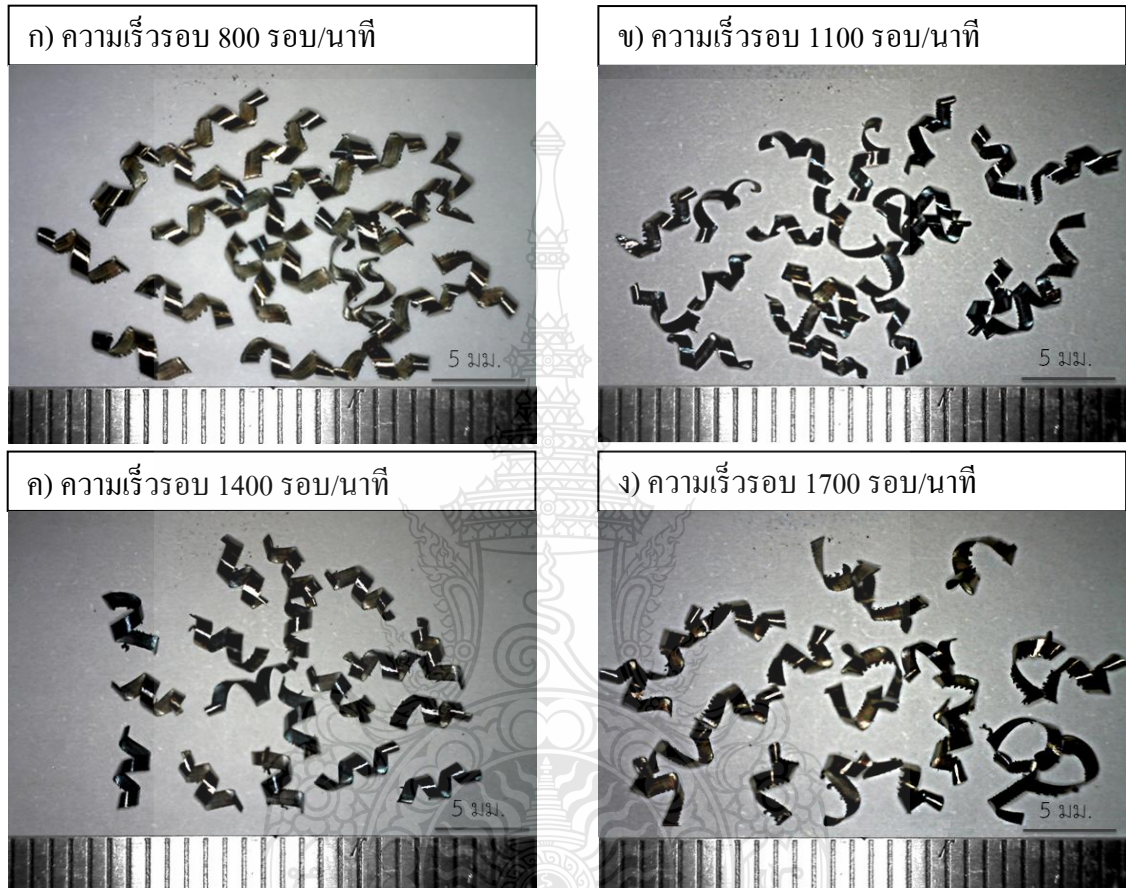
รูปที่ 4.7 ลักษณะการสึกหรอของเครื่องมือตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น

4.2 อิทธิพลของความเร็วในการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง

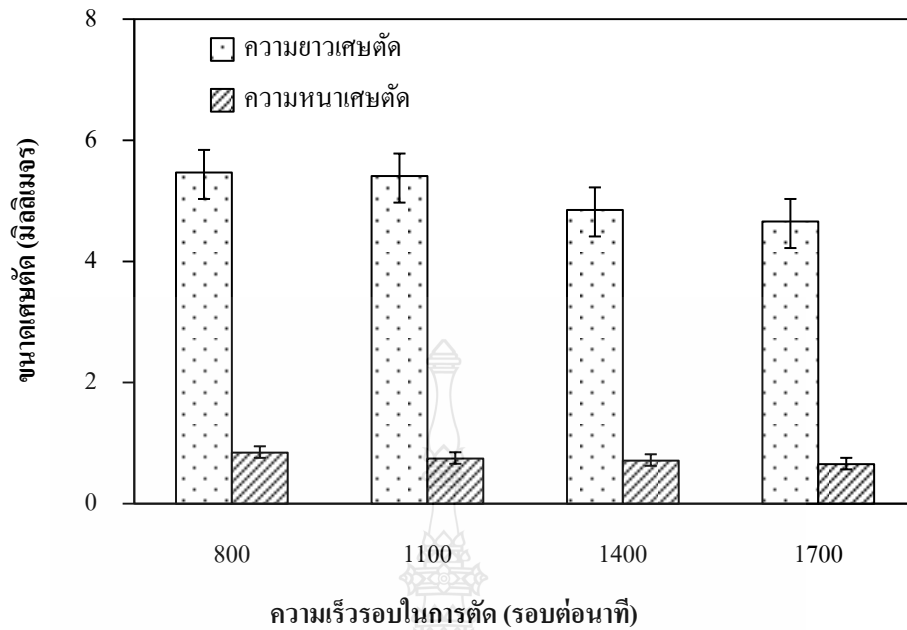
การทดลองในหัวข้อ 4.1 เป็นการศึกษาตัวแปรการกัดปาดผิวหน้าแบบใช้สารหล่อเย็นและแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง ได้ตัวแปรที่ดีที่สุดคือ การกัดปาดผิวหน้าแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น ในหัวข้อ 4.2 นี้ได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบ มีผลการทดลองดังนี้

4.2.1 อิทธิพลของความเร็วรอบในการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อเศษตัด ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงานทดสอบนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเศษตัด ดังนั้นรูปร่างลักษณะเศษตัดมีการพัฒนาที่แตกต่างกันออกไป ด้วยเหตุนี้ความเร็วในการตัดเฉือนได้ชี้ให้เห็นกลไกการตัดเฉือนที่มีความแตกต่างกัน [43] รูปที่ 4.8 ได้แสดงถึงรูปร่างลักษณะของเศษตัดภายใต้เงื่อนไขความเร็วในการตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร ในการตัดเฉือนแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น พบว่า ความเร็วรอบในการตัดเฉือนที่ 800, 1100 และ 1400 รอบ/นาที มีรูปร่างลักษณะของเศษตัดที่มีลักษณะเป็นท่อเกลียวแบบยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ก), (ข) และ(ค) โดยความเร็วรอบในการตัดเฉือนที่ 800 รอบ/นาที มีความหนาเศษเฉลี่ย 0.84 มิลลิเมตร และความยาวเศษเฉลี่ย 5.47 มิลลิเมตร ที่ความเร็วรอบในการตัดเฉือน 1100 รอบ/นาที ความหนาเศษเฉลี่ย 0.75 มิลลิเมตร และมีความยาวเศษเฉลี่ย 5.41 มิลลิเมตร และความเร็วรอบในการตัดเฉือน 1400 รอบ/นาที มีความหนาเศษเฉลี่ย 0.71 มิลลิเมตรและความยาวเศษเฉลี่ย 4.95 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9 อย่างไรก็ตามรูปร่างลักษณะของเศษตัดของความเร็วรอบในการตัดเฉือนที่ 1700 รอบ/นาที มีรูปร่างลักษณะเศษที่สั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ง) โดยความเร็วรอบในการตัดเฉือนที่ 1700 รอบ/นาที มีความหนาเศษตัด 0.65 มิลลิเมตร และความยาวเศษเฉลี่ย 4.76 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ความเร็วรอบในการตัดนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงระหว่างความเร็วตัดและรูปร่างเศษในการตัดอย่างชัดเจน

และชี้ให้เห็นถึงวิวัฒนาการของคุณภาพพื้นผิวที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเศษตัด [44] และในงานวิจัยหนึ่งได้กล่าวถึงความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นได้ส่งผลต่อพฤติกรรมการแตกหักของเศษตัด ที่เชื่อว่าควรจะต้องมีอัตราความเค้นเฉือนที่สูงมากที่เป็นสาเหตุมาจากความเร็วในการตัดเฉือน [45]



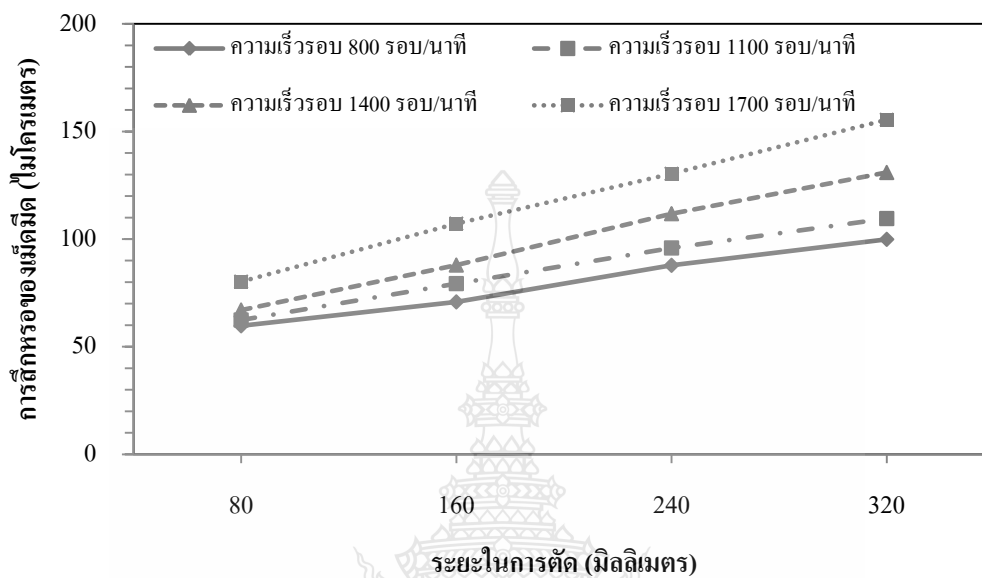
รูปที่ 4.8 ลักษณะของเศษตัดภายใต้ความเร็วรอบ 800, 1100, 1400 และ 1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

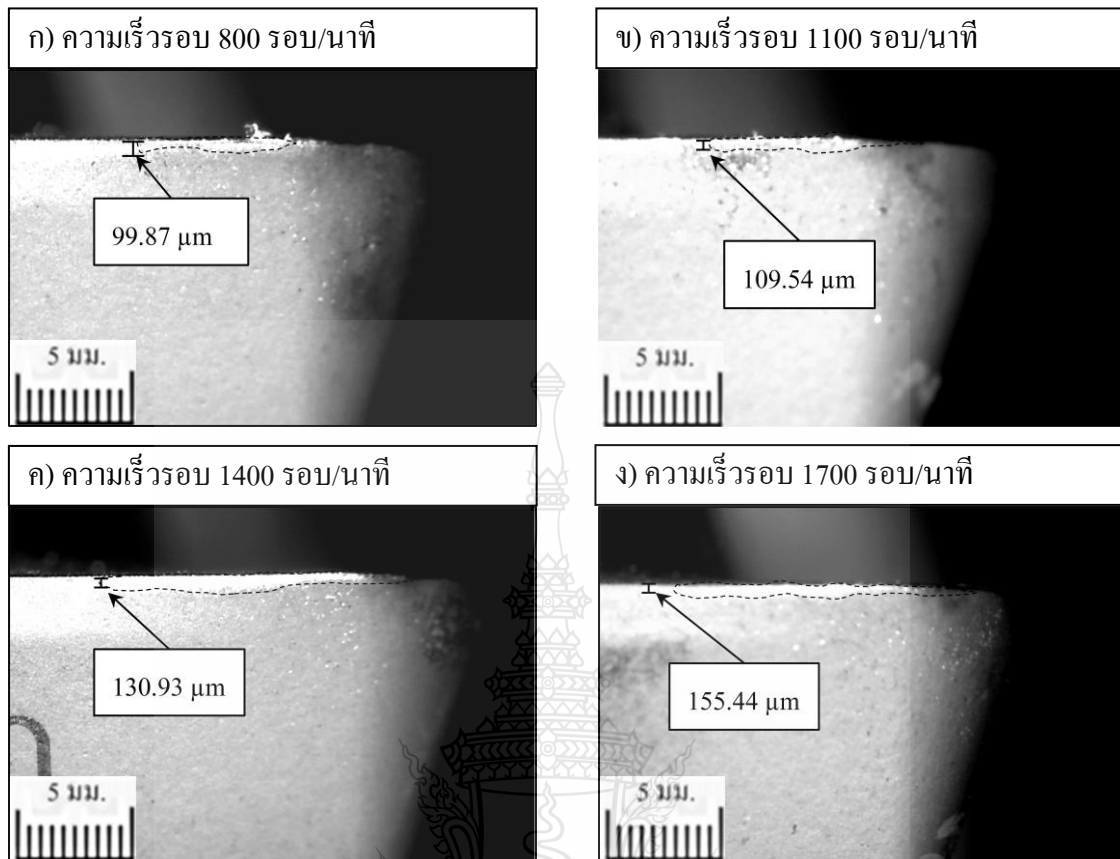
4.2.2 อิทธิพลของความเร็วรอบในการกัดปาดผิวหน้าโลหะแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด แสดงดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเกิดการสึกหรอบริเวณขอบคมตัด ภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบในการกัดปาดผิวหน้าโลหะ พบว่าการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะทางในการกัดปาดผิวหน้าโลหะและอย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบโดยการเพิ่มความเร็วรอบในการกัดปาดผิวหน้า พบว่าการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วรอบในการกัดปาดผิวที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 โดยความเร็วรอบในการตัดเฉือนที่มีการสึกหรอที่ต่ำที่สุดคือความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) มีการสึกหรอบริเวณคมตัด 79.55 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และความเร็วรอบในการตัดเฉือนที่มีการสึกหรอสูงที่สุดคือ ที่ความเร็วรอบในการตัดเฉือน 1700 รอบ/นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ง) มีการสึกหรอบริเวณคมตัด 118.31 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ในการทดลองนี้ได้คล้ายกับงานวิจัยหนึ่งได้ทำการศึกษาการกัดปาดผิวหน้าด้วยความเร็วในการตัดเฉือนที่สูง พบว่าสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการบิ่นหรือแตกหักของเครื่องมือคมตัด โดยให้เหตุผลมาจากผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของความเร็วเฉือนในการกัดปาดผิวหน้า ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการตัดเฉือนได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงและอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการตัดเฉือน จึงได้ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดของเครื่องมือตัดที่ไม่

เป็นไปตามปกติเพราะความทนทานที่มีขีดจำกัดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเครื่องมือตัดที่มีความสำคัญต่อการแตกหักหรือการเสียหายของเครื่องมือตัด [46]



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบและระยะทางในการตัดที่มีผลต่อพื้นที่สึกหรอของคมตัดที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

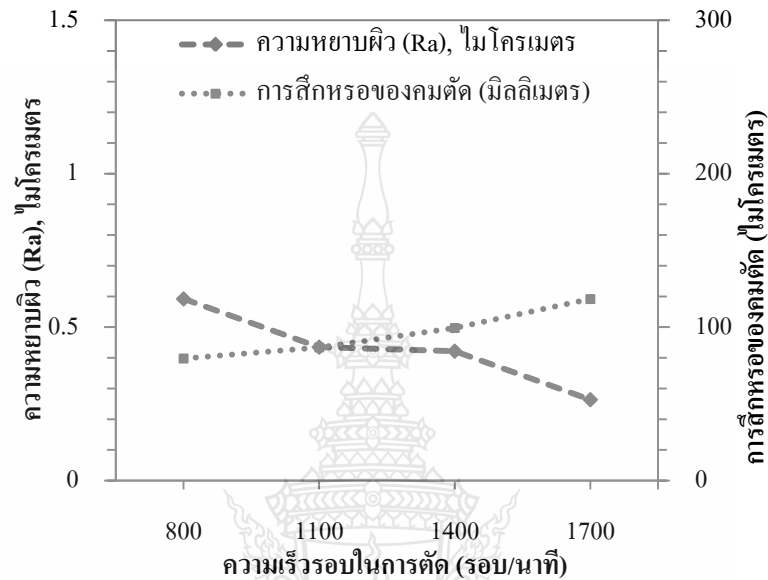




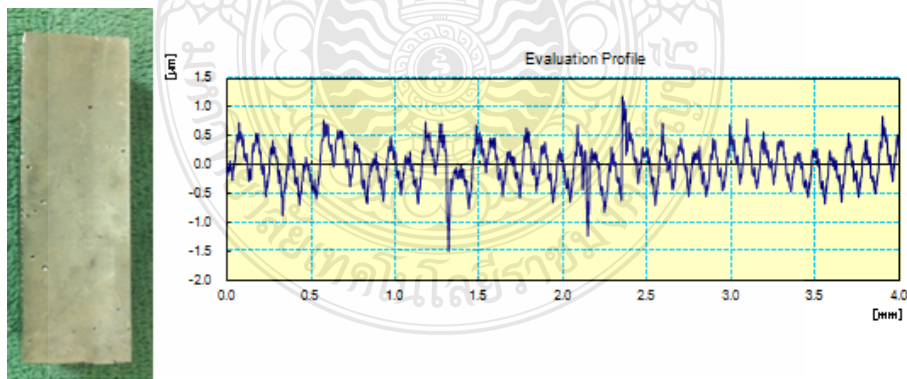
รูปที่ 4.11 ลักษณะการสึกหรอของคมตัดภายใต้เงื่อนไขความเร็วรอบในการตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

4.2.3 อิทธิพลของความเร็วรอบในการตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความหยาบผิว ความหยาบผิวได้อธิบายรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือน พื้นผิวสำเร็จจะเป็นสิ่งสำคัญที่นำมาทำการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์และปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการตัดเฉือนเป็นอย่างมาก [47] ในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวและความเร็วรอบในการตัดเฉือน 800, 1100, 1400 และ 1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่าความหยาบผิวสูงที่สุด คือ ที่ความเร็วรอบในการตัดเฉือน 800 รอบ/นาที ซึ่งมีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 0.59 ไมโครเมตร และการสึกหรอของเครื่องมือตัดมีค่าเฉลี่ย 79.55 ไมโครเมตร ลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟค่าความหยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.13 แต่ในขณะที่ความเร็วรอบในการตัดเฉือนเพิ่มขึ้นพบว่า ค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดน้อยลง แต่ค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วรอบในการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น ค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดคือ ความเร็วรอบในการตัดเฉือน 1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 1 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 0.26 ไมโครเมตร ลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความ

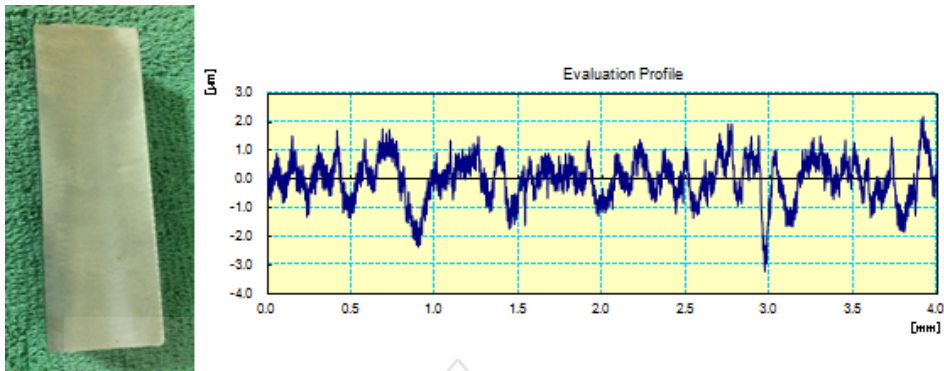
หยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดเฉลี่ย 118.31 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วรอบในการตัดเฉือนได้มีผลกระทบมากต่อค่าความหยาบผิวในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบในการตัดเฉือนที่จะนำไปสู่การลดลงของความหยาบผิว [48]



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

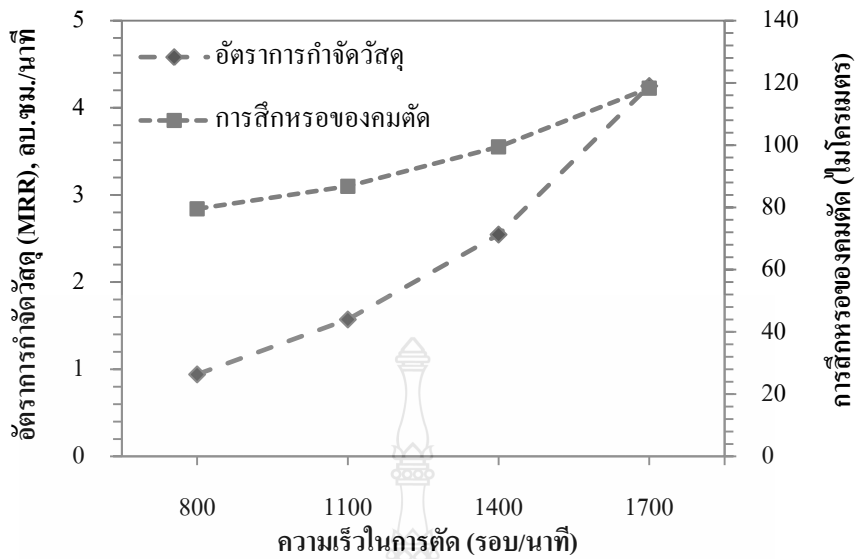


รูปที่ 4.13 แสดงลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความหยาบผิวที่มีความหยาบผิวน้อยสุด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.14 แสดงลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความหยาบผิวที่มีความหยาบผิวมากที่สุด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

4.2.4 อิทธิพลของความเร็วรอบในการตัดแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดวัสดุและการสึกหรอของคมตัด ความสัมพันธ์ของอัตราการกำจัดวัสดุที่ส่งผลต่อการสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบในการตัด 800, 1100, 1400 และ 1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่าอัตราการกำจัดวัสดุที่มีค่าสูงที่สุด ความเร็วในการตัด 1700 รอบ/นาที มีค่าอัตราการกำจัดวัสดุ 4.25 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และการสึกหรอของเครื่องมือตัด 118.31 ไมโครเมตร สังเกตได้ว่าขณะที่ค่าอัตราการกำจัดวัสดุเพิ่มขึ้นพบว่าค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในการทดลองที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตรนี้ ค่าอัตราการกำจัดวัสดุที่ต่ำที่สุดคือ ที่ความเร็วในการตัด 800 รอบ/นาที มีค่าอัตราการกำจัดวัสดุ 0.94 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และค่าการสึกหรอของคมตัด 79.55 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.15



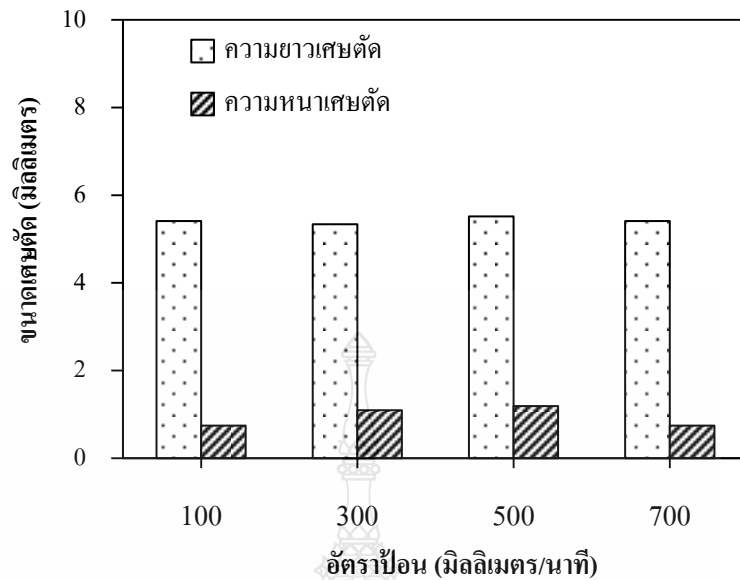
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบในการตัดที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดวัสดุและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

4.3 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง

4.3.1 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อลักษณะเศษตัด จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่อลักษณะการคายเศษและความหนาของเศษตัด พบว่าลักษณะการคายเศษของอัตราป้อนที่ 100 มิลลิเมตร/นาที มีลักษณะเป็นท่อเกลียวแบบยาว ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ก) มีความยาวเศษตัดเฉลี่ย 5.41 มิลลิเมตรและความหนาเศษเฉลี่ย 0.75 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.17 เมื่อทำการทดลองโดยการเพิ่มอัตราป้อนในการตัดเฉือนพบว่าลักษณะเศษตัดสั้นและโค้งงอ ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (ข-ง) ซึ่งความหนาเศษและความยาวของเศษที่มีค่ามากจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการตัดเฉือน ที่อัตราป้อน 500 มิลลิเมตร/นาที โดยมีความหนาเศษตัดเฉลี่ย 1.19 มิลลิเมตร และความยาวเศษตัดเฉลี่ย 5.52 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.17



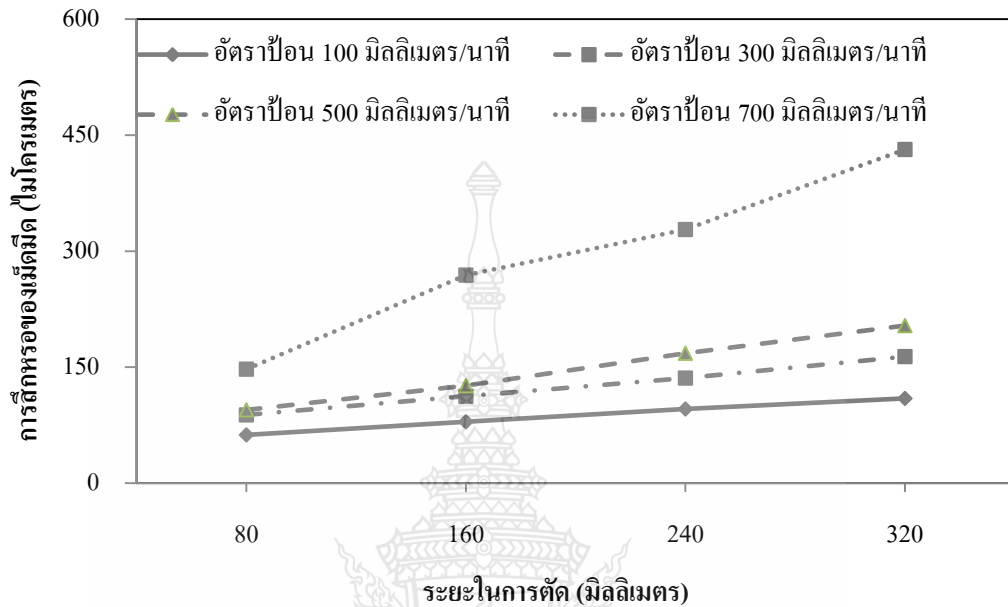
รูปที่ 4.16 ลักษณะของเศษตัดภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อน ที่ความเร็ว 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร



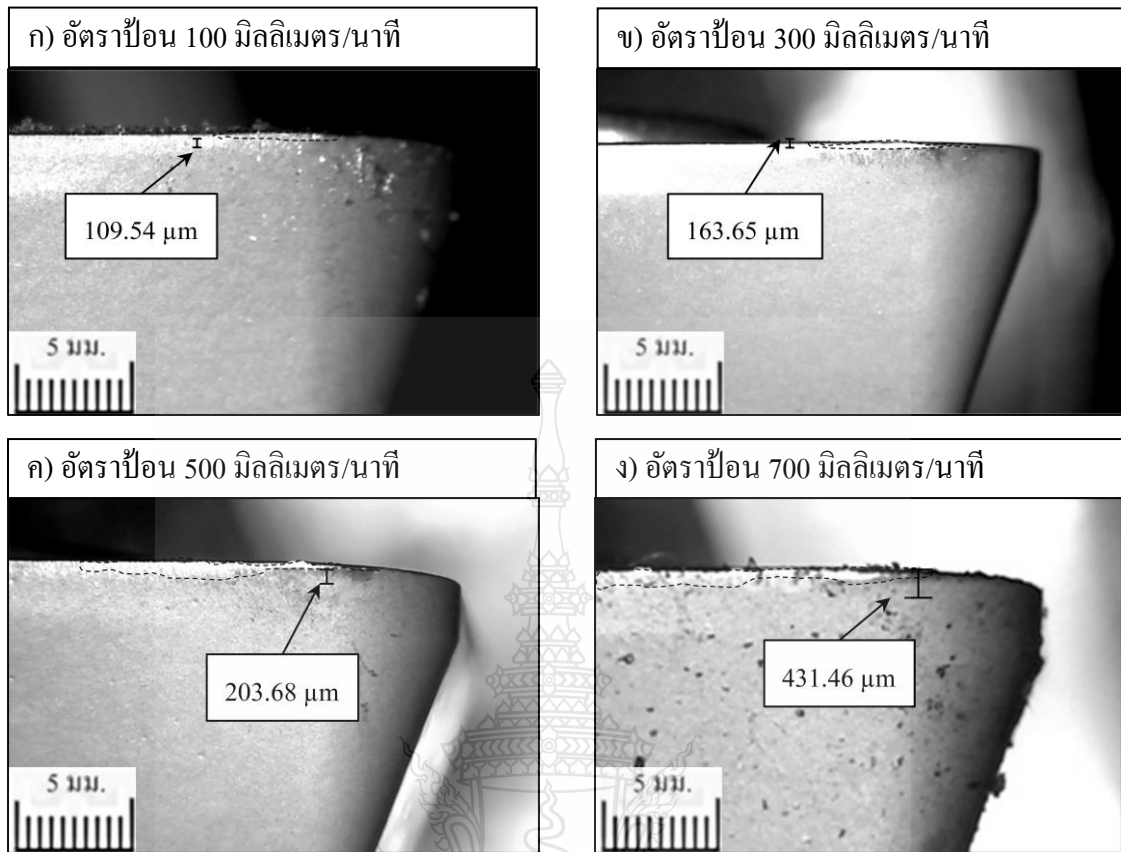
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์อัตราป้อนที่ส่งผลต่อความหนาของเศษตัด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที ความลึก 1 มิลลิเมตร

4.3.2 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัด การศึกษาอิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นที่ส่งผลต่อพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัด แสดงดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่า การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดเริ่มต้นที่ระยะในการตัด 80 มิลลิเมตร ซึ่งที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร มีพื้นที่การสึกหรอของขอบคมตัดเฉลี่ย 62.40 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และเมื่ออัตราป้อนในการตัดเพิ่มขึ้น พบว่า พื้นที่ในการสึกหรอที่บริเวณขอบคมตัดเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยอัตราป้อนที่มีพื้นที่การสึกหรอของขอบคมตัดมากที่สุดคือ 700 มิลลิเมตร/นาที ซึ่งมีพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดเฉลี่ย 147.37 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.19 อย่างไรก็ตามเมื่อระยะในการตัดเพิ่มขึ้นพบว่า พื้นที่ในการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดเพิ่มสูงขึ้นตามระยะในการตัดเพิ่มขึ้น ซึ่งระยะในการตัดเฉือนที่ 320 มิลลิเมตร มีการสึกหรอที่บริเวณขอบคมตัดมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.16 (ก-ง) โดยอัตราป้อนในการตัดเฉือนที่มีพื้นที่ในการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดน้อยที่สุดคือ อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที มีพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดเฉลี่ย 86.78 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 (ก) และอัตราป้อนในการตัดเฉือนที่มีพื้นที่ในการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดมากที่สุดคือ อัตราป้อน 700 มิลลิเมตร/นาที มีพื้นที่การสึกหรอของขอบคมตัดเฉลี่ย 431.46 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 (ง) โดยงานวิจัยของ Hassan, Hadi และคณะ [49] กล่าวไว้ว่า เมื่ออัตราป้อนเพิ่มขึ้นโดยทั่วไปแล้วจะพบปัญหาการสึกหรอดังกล่าวเกิดขึ้น สาเหตุหลักมาจากแรงกดและอุณหภูมิที่สูงขึ้น

ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัด จึงส่งผลให้เกิดกลไกในการสึกหรอของเครื่องมือตัดชนิดคาร์ไบด์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย



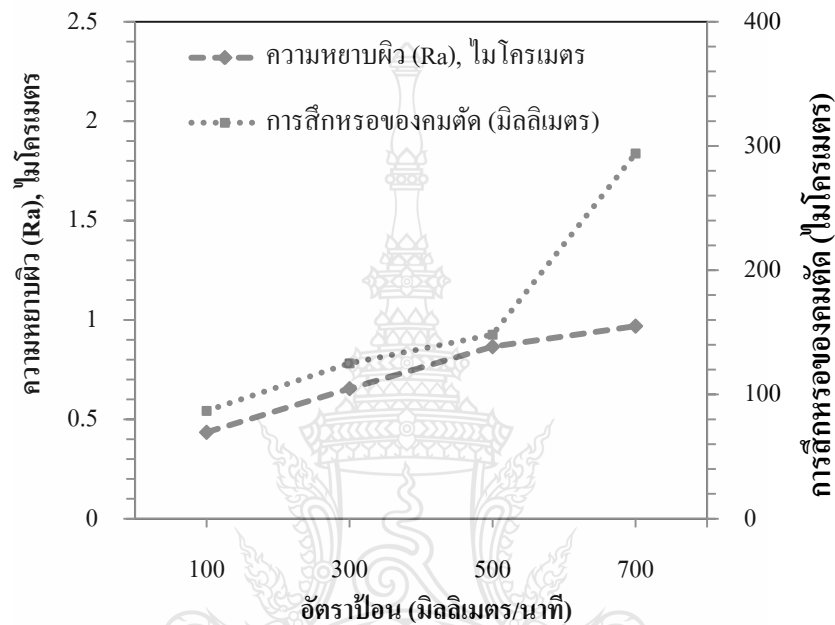
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของอัตราป้อนและระยะทางในการตัดที่ส่งผลต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัดที่ความเร็วรอบในการตัดเดือน 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร



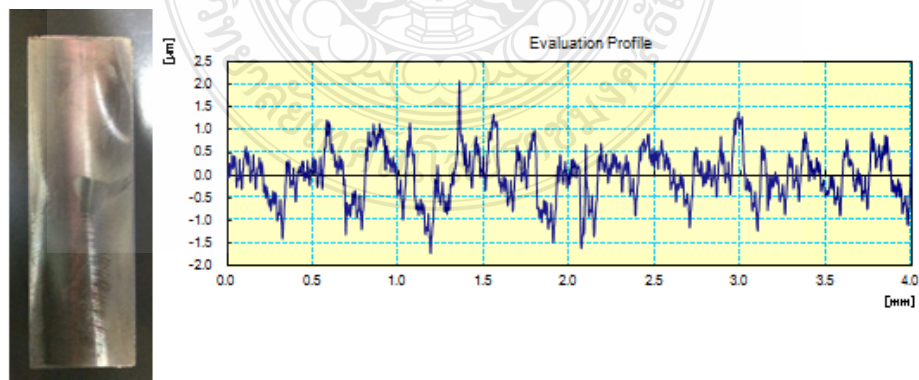
รูปที่ 4.19 ลักษณะการสึกหรอของคมตัดภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อน ที่ความเร็วรอบในการตัดเฉือน 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

4.3.3 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อค่าความหยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนในการตัดเฉือนที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบและพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัด พบว่า ชิ้นงานทดสอบที่ใช้อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 0.43 ไมโครเมตร และพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัด 86.78 ไมโครเมตร ลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความหยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มอัตราป้อนในการตัดเฉือนให้สูงขึ้น พบว่าค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบกับพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัด มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งอัตราป้อนในการตัดเฉือนที่ให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบและพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดที่มีค่ามากที่สุด อยู่ภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อน 700 มิลลิเมตร/นาที โดยมีค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบเฉลี่ย 0.97 ไมโครเมตร ลักษณะของพื้นผิวและกราฟแสดงค่าความหยาบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดของงานเฉลี่ย 293.95 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.20 สามารถสังเกตได้ว่าการใช้ค่าอัตราป้อนสูงในกระบวนการตัดเฉือนนั้น ส่งผลทำให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงาน

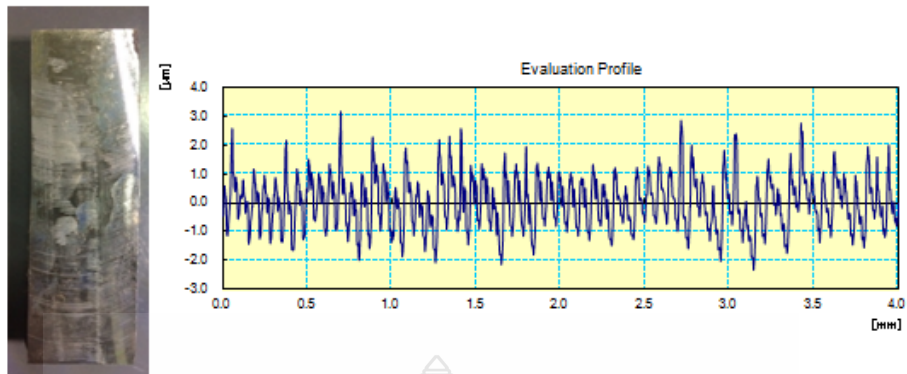
ทดสอบมากขึ้นไปด้วย [50] และในงานวิจัยของ Tangjitsitcharoen, Thesniyom และคณะ ได้กล่าวถึงค่าความหยาบผิวไว้ว่า เป็นที่ทราบกันดีว่าในอัตราป้อนที่มีค่าสูง ซึ่งจำเป็นต้องใช้แรงในการตัดเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการตัดในพื้นที่มีขนาดใหญ่ จะทำให้เกิดพื้นผิวที่มีความหยาบและการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดที่สูง [51]



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่อค่าความหยาบผิวและการสึกหรอคมตัดที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

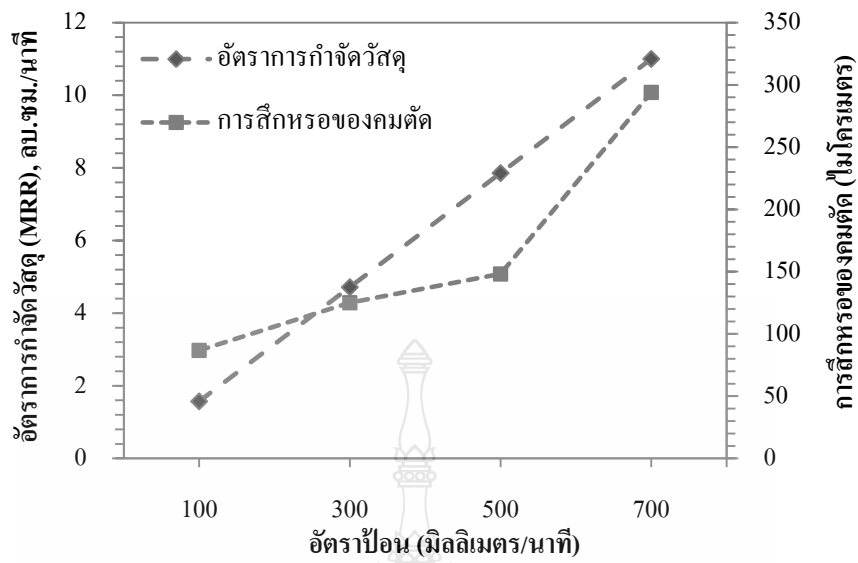


รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความหยาบผิวที่มีความหยาบผิวน้อยสุดที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

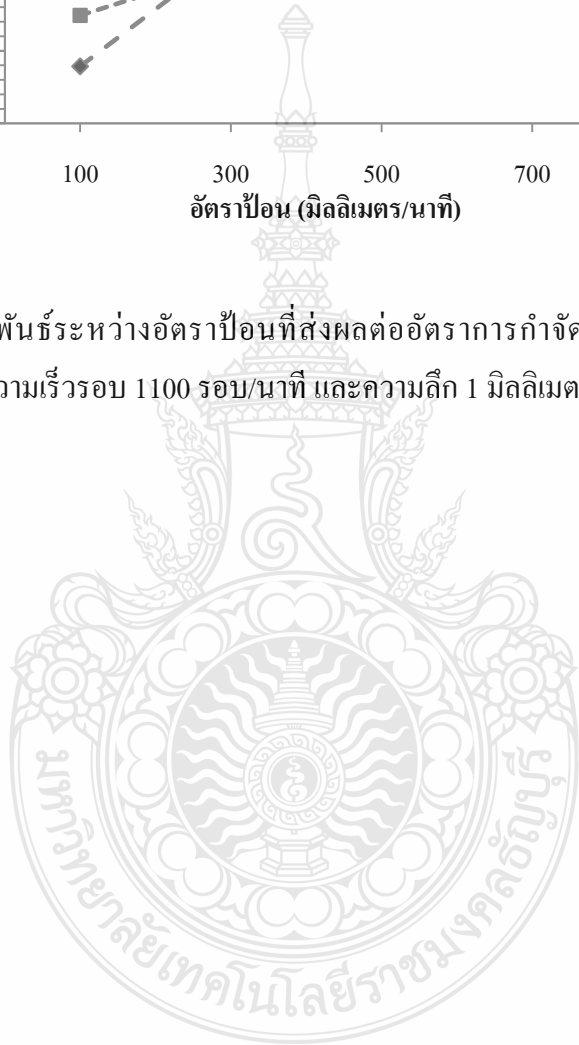


รูปที่ 4.22 แสดงลักษณะพื้นผิวสำเร็จและกราฟแสดงค่าความหยาบผิวที่มีความหยาบผิวมากที่สุด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร

4.3.4 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดวัสดุ และการสึกหรอของคมตัด ความสัมพันธ์ของอัตราการกำจัดวัสดุที่ส่งผลต่อการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 100, 300, 500 และ 700 มิลลิเมตร/นาที ความเร็วรอบในการตัด 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่าอัตราการกำจัดวัสดุที่มีค่าสูงที่สุด อัตราป้อน 700 มิลลิเมตร/นาที มีค่าอัตราการกำจัดวัสดุ 11 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และการสึกหรอของเครื่องมือตัด 293.95 ไมโครเมตร สังเกตได้ว่าขณะที่ค่าอัตราการกำจัดวัสดุเพิ่มขึ้นพบว่าค่าการสึกหรอของเครื่องมือตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ในการทดลองที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตรนี้ ค่าอัตราการกำจัดวัสดุที่ต่ำที่สุดคือ ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร/นาที มีค่าอัตราการกำจัดวัสดุ 1.57 ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และค่าการสึกหรอของคมตัด 86.78 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่ออัตราการกำจัดวัสดุและการสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที และความลึก 1 มิลลิเมตร



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอคมตัด ความหยาบผิว และรูปร่างเศษการตัดในการกัดโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25 โดยใช้ตัวแปรในการทดสอบ ได้แก่ การใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็น ความเร็วรอบในการตัดเดือน 800-1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 100-700 มิลลิเมตร/นาที และความลึกที่ 1 มิลลิเมตร ที่ส่งผลต่อการสึกหรอของคมตัด รูปร่างเศษการตัดและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ความเร็วรอบในการตัดเดือนและอัตราป้อนที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าความเร็วรอบในการตัดเดือนส่งผลต่อพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดมีค่าน้อยที่สุดที่ค่าความเร็วรอบในการกัด 800 รอบ/นาที

5.1.2 การเพิ่มขึ้นของชิ้นงานความเร็วรอบในการตัดเดือน ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวน้อย ซึ่งค่าความหยาบผิวที่น้อยที่สุดมีค่า 0.43 ไมโครเมตร ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที

5.1.3 อัตราป้อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวสูงขึ้น ซึ่งค่าความหยาบผิวที่มีค่ามากที่สุดเฉลี่ย 1.33 ไมโครเมตร ที่อัตราป้อน 700 รอบ/นาที

5.1.4 เมื่อความเร็วในการตัดเดือนสูง รูปร่างเศษการตัดมีลักษณะเกลียวแบบต่อเนื่อง จะมีลักษณะความหนาเศษตัดบางและความยาวเศษที่สั้นลง

5.1.5 การเพิ่มขึ้นของอัตราป้อน รูปร่างของเศษตัดมีลักษณะโค้งและบิดงอ จะมีความหนาเศษที่หนามากขึ้นและความยาวเศษที่สั้นลง

5.1.6 จากการทดลองค่าที่ยอมรับได้ทั้งการสึกหรอของคมตัด รูปร่างเศษและค่าความหยาบผิว ที่ความเร็วรอบในการตัดเดือน 1100 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 รอบ/นาที และที่ความลึก 1 มิลลิเมตร มีพื้นที่การสึกหรอของขอบคมตัดเฉลี่ย 86.78 ไมโครเมตร และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 0.43 ไมโครเมตร รูปร่างเศษเป็นเกลียวแบบต่อเนื่อง มีความหนาเฉลี่ย 0.75 ไมโครเมตรและความยาวเศษตัดเฉลี่ย 5.41 ไมโครเมตร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอคมตัด ความหยาบผิว และรูปร่างเศษการตัดในการกัดโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25 ด้วยการเชื่อมอาร์คลวดเชื่อมพอกผิวแข็ง เกิดปัญหาในระหว่างการทดลองจึงต้องมีการปรับปรุงหรือใช้ในการทดลองครั้งต่อไป โดยมีข้อเสนอแนะไว้ในงานวิจัย ดังนี้

5.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบของกระบวนการกัดปาดผิวหน้าโลหะให้ได้ตามขนาดที่กำหนดทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งมีค่าความแข็งสูง

5.2.2 ตัวแปรที่ใช้สารหล่อเย็นในกระบวนการกัดปาดผิวหน้าโลหะ ไม่สามารถปรับตั้งอัตราการไหลของสารหล่อเย็น เนื่องจากเครื่องกัดอัตโนมัติที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถปรับตั้งค่าได้

5.2.3 ในขั้นตอนกระบวนการกัดปาดผิวหน้าโลหะ การจับยึดชิ้นงานทดสอบกับเครื่องกัดอัตโนมัติควรที่จะจับยึดชิ้นงานให้แน่น

5.2.4 ขั้นตอนการวัดค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดลองที่ผ่านกระบวนการกัดปาดผิวหน้ามาแล้วนั้น การใช้เครื่องมือในการตรวจสอบค่าความหยาบผิวควรตั้งเครื่องมือให้ได้ระนาบขนานกับพื้นผิวชิ้นงานทดสอบให้มากที่สุด

บรรณานุกรม

- [1] C. Y. Wang, Y. X. Xie, Z. Qin, H. S. Lin, Y. H. Yuan, and Q. M. Wang, "Wear and breakage of TiAlN- and TiSiN-coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel," *Wear*, vol. 336–337, pp. 29-42, 8/15/ 2015.
- [2] R. B. Da Silva, J. M. Vieira, R. N. Cardoso, H. C. Carvalho, E. S. Costa, A. R. Machado, et al., "Tool wear analysis in milling of medium carbon steel with coated cemented carbide inserts using different machining lubrication/cooling systems," *Wear*, vol. 271 , pp. 2459 - 2465 , 7/29/ 2011.
- [3] Halil Çalı and Meriç Küçükköse, "The effect of aCN/TiAlN coating on tool wear, cutting force, surface finish and chip morphology in face milling of Ti6Al4V super alloy", *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, pp.304-312, 2015.
- [4] Seref Aykut , Eyup Bagci, Aykut Kentli, and Osman Yazıcıog, "Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool", *Materials and Design*, pp.1880-1888, 2007.
- [5] E.O. Correa, N.G. Alcântara, L.C. Valeriano, N.D. Barbedo, R.R. Chaves, "The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe–Cr–C–Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process" *Surface & Coatings Technology*, pp.479-484, 2015.
- [6] เหล็กหล่อ (Online), Available: <http://www.ifoundryman.com/cast-iron/> (9 กุมภาพันธ์ 2559).
- [7] R. Singh, "Chapter 4 - Structure of Materials," in *Applied Welding Engineering*, ed Boston: Butterworth-Heinemann, 2012, pp. 23-32.
- [8] มนต์ สติรจินดา, เหล็กหล่อ, กรุงเทพมหานครสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2539.
- [9] เหล็กหล่อ (Online), Available: <http://www.sincharoenloha.com/164140/%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B9%87%E0%B8%81%E0%B8%AB%E0%B8%A5%E0%B9%88%E0%B8%AD> (9 กุมภาพันธ์ 2559).
- [10] พีระกิตต์ วิริยะรัตนศักดิ์, โลหะวิทยาของเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียว. กรุงเทพมหานคร: เทคโนโลยีสถิตโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2545.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] สมบัติทางกลของเหล็กหล่อขาว (Online), Available: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/metalswu/lesson2-3.htm> (10 ธันวาคม 2560).
- [12] เหล็กหล่อกราไฟท์กลม (Online), Available: <http://www.leelafoundry.com/articles/537351/Nodular-Cast-Iron,-Ductile-Iron.html> (10 ธันวาคม 2560).
- [13] เหล็กหล่ออบเหนียว (Online), Available: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/metalswu/lesson5-10.htm> (10 ธันวาคม 2560).
- [14] เหล็กหล่ออบเหนียวขาว(Online), Available: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/metalswu/lesson5-9.htm> (10 ธันวาคม 2560).
- [15] รัตน์ บริสุทธิ์กุล, เหล็กหล่ออบเหนียว (Online), Available: eng.sut.ac.th/metal/images/stories/pdf/malleable_iron.pdf (10 ธันวาคม 2560).
- [16] ประกิจ มารรัมย์, เหล็กหล่อ (Online), Available: <https://sites.google.com/site/sutinsorattaworn/bth-thi-4-helk-hl> (29 ธันวาคม 2560).
- [17] เหล็กหล่อพิเศษ (Online), Available: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/metalswu/lesson5-4.htm> (29 ธันวาคม 2560).
- [18] วันชัย ลีลาทวิวงศ์, งานเชื่อมโลหะ (Online), Available: engfanatic.tumcivil.com/tumcivil_1/media/Welding/Welding.pdf (29 ธันวาคม 2560).
- [19] กระบวนการอาร์คลวดหุ้มฟลักซ์ (Online), Available: www.swicec.ac.th/DATA/palmon/3/6.pdf (29 ธันวาคม 2560).
- [20] กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือ (Online), Available: www.meeboard.com/user/weld/imgupload/4-3.pdf (25 กุมภาพันธ์ 2560).
- [21] ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Online), Available: <http://archive.wunjun.com/krupongclub/19/99.html> (4 มีนาคม 2560).
- [22] K. Weman, "9 - Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes," in Welding Processes Handbook (Second edition), ed: Woodhead Publishing, 2012, pp. 99-103.
- [23] ความสามารถในการเชื่อม (Online), Available: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=30&bookID=1818&read=true&count=true (4 มีนาคม 2560).

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [24] L. Norberto López de Lacalle, F. J. Campa, and A. Lamikiz, "3 - Milling A2 - Davim, J. Paulo," in Modern Machining Technology, ed: Woodhead Publishing, 2011, pp. 213-303.
- [25] P. Muñoz-Escalona and P. G. Maropoulos, "A geometrical model for surface roughness prediction when face milling Al 7075 - T 7351 with square insert tools," Journal of Manufacturing Systems, vol. 36, pp. 216-223, 7// 2015.
- [26] **มีดกลึง** (Online), Available: <http://secuttingtool.blogspot.com/2012/08/insert.html> (11 พฤษภาคม 2560).
- [27] **เทคโนโลยีการตัดเฉือนวัสดุ** (Online), Available: <http://www.viboon.org/2009/11/14/เทคโนโลยีการตัดเฉือนวัสดุ> (11 พฤษภาคม 2560).
- [28] **หลักการพิจารณาเลือกเม็ดมีด** (Online), Available: <http://tools-article.sumipol.com/basic-guide-to-inserts-selection/> (11 พฤษภาคม 2560).
- [29] N.O. Myers, Characterization of surface roughness, Wear, Volume 5, Issue 3, 1962, Pages 182-189, ISSN 0043-1648.
- [30] W. Grzesik, "Chapter Ten - Cutting Fluids," in Advanced Machining Processes of Metallic Materials, ed Amsterdam: Elsevier, 2008, pp. 141-148.
- [31] W. Grzesik, "Chapter Four - Cutting Tool Materials," in Advanced Machining Processes of Metallic Materials, ed Amsterdam: Elsevier, 2008, pp. 27-I.
- [32] W. Grzesik, "Chapter Twelve - Tool Wear and Damage," in Advanced Machining Processes of Metallic Materials, ed Amsterdam: Elsevier, 2008, pp. 163-VII.
- [33] W. Grzesik, "Chapter Seven - Chip Formation and Control," in Advanced Machining Processes of Metallic Materials, ed Amsterdam: Elsevier, 2008, pp. 85-IV.
- [34] ปราโมทย์ พูนนายน, วรญา วัฒนจิตศิริ, อรรถกร จันทร์ชนะ, สหัฐ มีชะคะและ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, "ความสามารถในการตัดเฉือนโลหะเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กกล้า JIS-S50C" การประชุมวิชาการรายงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2559, 7 – 8 กรกฎาคม 2559, ขอนแก่น, 2559.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [35] H. Schulz, E. Abele, and A. Sahn, "Material aspects of chip formation in HSC machining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 50, pp. 45-48, // 2001.
- [36] H. A. Kishawy, M. Dumitrescu, E. G. Ng, and M. A. Elbestawi, "Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high -speed machining of A356 aluminum alloy," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, pp. 219-227, 2// 2005.
- [37] Y. Su, N. He, L. Li, and X. L. Li, "An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6 Al-4 V," *Wear*, vol. 261 , pp. 760 -766, 10/20/ 2006.
- [38] W. Pedersen and M. Ramulu, "Facing SiCp/Mg metal matrix composites with carbide tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 172, pp. 417-423, 3/10/ 2006.
- [39] M. Rahman, A. S. Kumar, M.-U. Salam, and M. S. Ling, "Effect of Chilled Air on Machining Performance in End Milling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 787-795, 2003/07/01 2003.
- [40] R. G. V. Perez, "Wear mechanisms of WC inserts in face milling of gamma titanium aluminides," *Wear*, vol. 259, pp. 1160-1167, 7// 2005.
- [41] X. Tian, J. Zhao, J. Zhao, Z. Gong, and Y. Dong, "Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69 , pp. 2669 - 2678 , 2013/12/01 2013.
- [42] A. E. Diniz and J. A. G. Ferrer, "A comparison between silicon nitride-based ceramic and coated carbide tools in the face milling of irregular surfaces," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, pp. 294-304, 9/12/ 2008.
- [43] X. Cui and J. Zhao, "Cutting performance of coated carbide tools in high-speed face milling of AISI H13 hardened steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71, pp. 1811-1824, 2014/04/01 2014.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [44] X. Cui, J. Zhao, C. Jia, and Y. Zhou, "Surface roughness and chip formation in high-speed face milling AISI H13 steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 61, pp. 1-13, 2012/07/01 2012.
- [45] G. Zheng, J. Zhao, A. Li, X. Cui, and Y. Zhou, "Failure mechanisms of graded ceramic tool in ultra high speed dry milling of Inconel 718 ," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 14, pp. 943-949, 2013/06/01 2013.
- [46] A. Li, J. Zhao, D. Wang, J. Zhao, and Y. Dong, "Failure mechanisms of a PCD tool in high-speed face milling of Ti-6 Al-4 V alloy," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, pp. 1959-1966, 2013/08/01 2013.
- [47] Q. Niu, M. Chen, W. Ming, and Q. An, "Evaluation of the performance of coated carbide tools in face milling TC6 alloy under dry condition," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, pp. 623-631, 2013/02/01 2013.
- [48] I. Maher, M. E. H. Eltaib, A. D. Sarhan, and R. M. El -Zahry, "Investigation of the effect of machining parameters on the surface quality of machined brass (60/40) in CNC end milling-ANFIS modeling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 74, pp. 531-537, 2014/09/01 2014.
- [49] M. B. Hassan, M. A. Hadi, J. A. Ghani, C. H. C. Haron, and M. S. Kasim, "INTERNATIONAL TRIBOLOGY CONFERENCE MALAYSIA 2013 Comparison between Up-milling and Down-milling Operations on Tool Wear in Milling Inconel 718," *Procedia Engineering*, vol. 68, pp. 647-653, 2013/01/01 2013.
- [50] E. M. Arruda, L. C. Brandão, S. L. M. Ribeiro Filho, and J. A. de Oliveira, "Integrated optimization using mixture design to confirm the finishing of AISI P20 using different cutting strategies and ball nose end mills," *Measurement*, vol. 47, pp. 54-63, 1// 2014.
- [51] S. Tangjitsitcharoen, P. Thesniyom, and S. Ratanakuakangwan, "Prediction of surface roughness in ball-end milling process by utilizing dynamic cutting force ratio," *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1-9, 2014.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [52] P. Munoz-Escalona, N. Diaz, and Z. Cassier, "Prediction of Tool Wear Mechanisms in Face Milling AISI 1045 Steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 21 , pp. 797-808, 2012/06/01 2012.



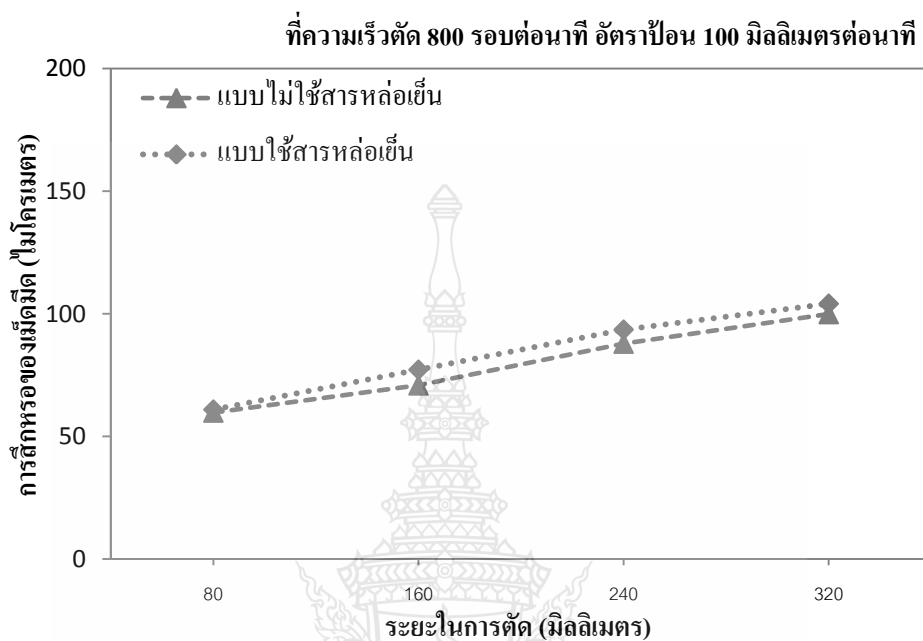
ภาคผนวก



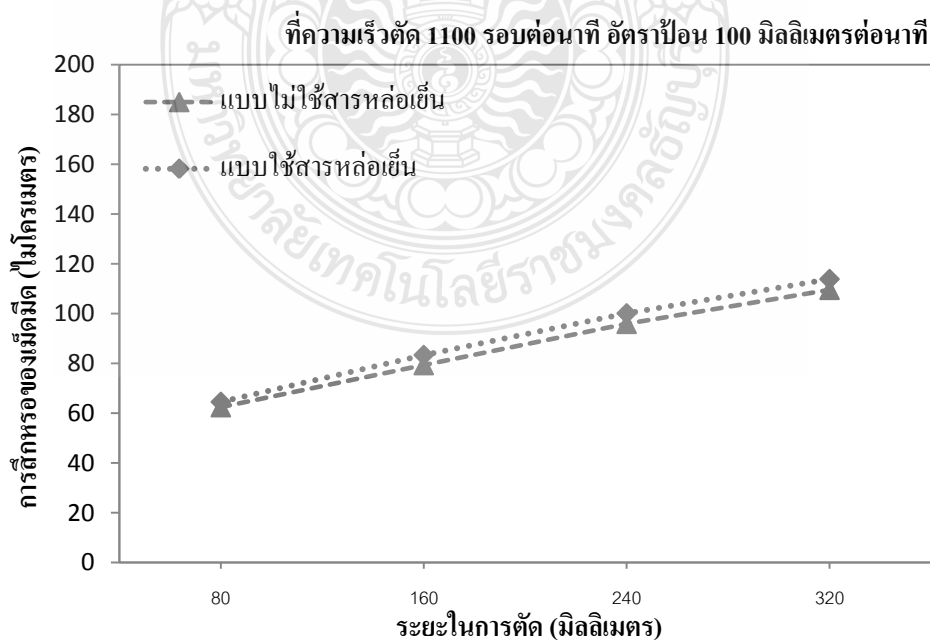
ภาคผนวก ก
การศึกษารอบของเม็คมีด



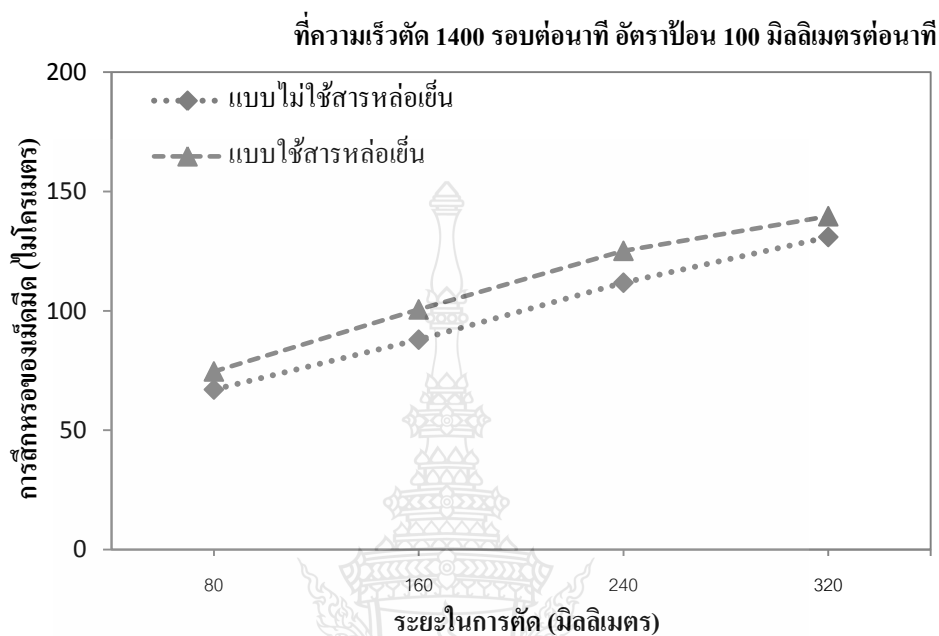
ก.1 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



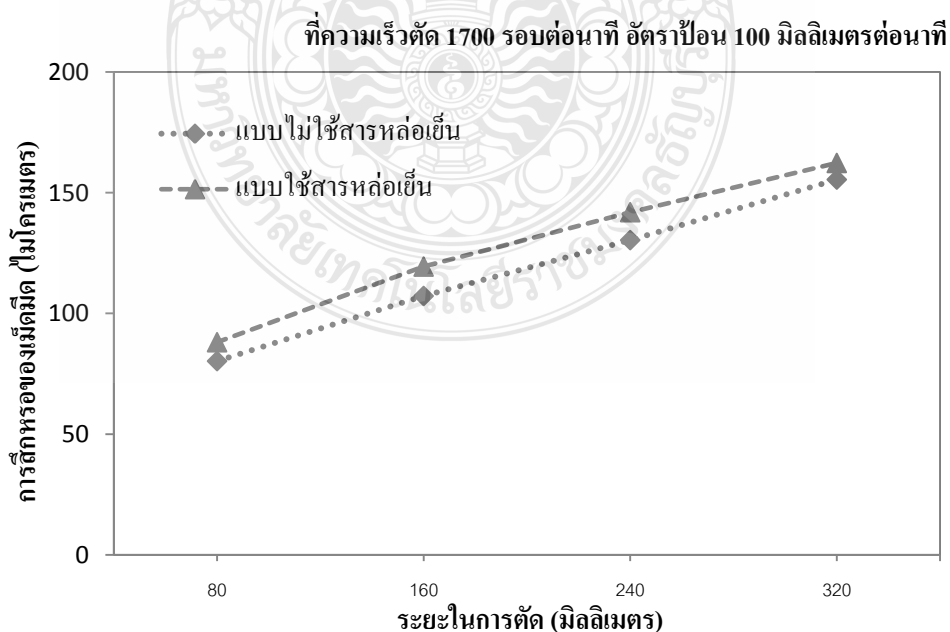
ก.2 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



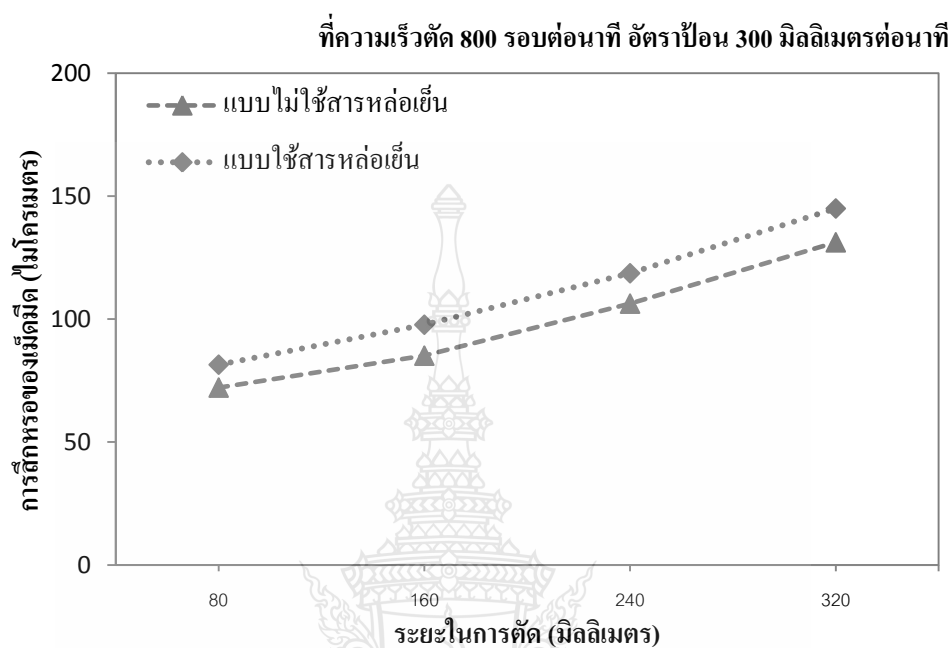
ก.3 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



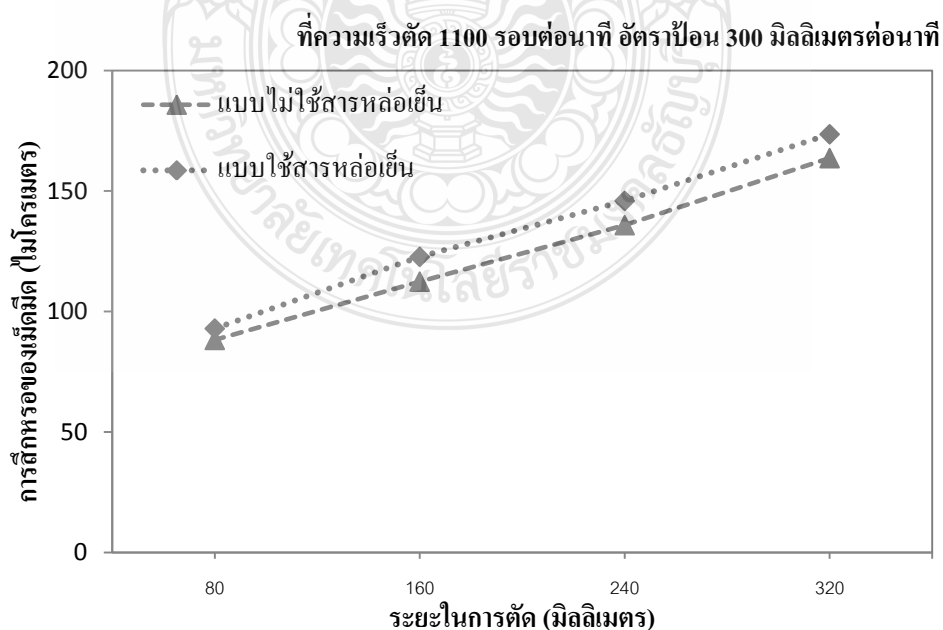
ก.4 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



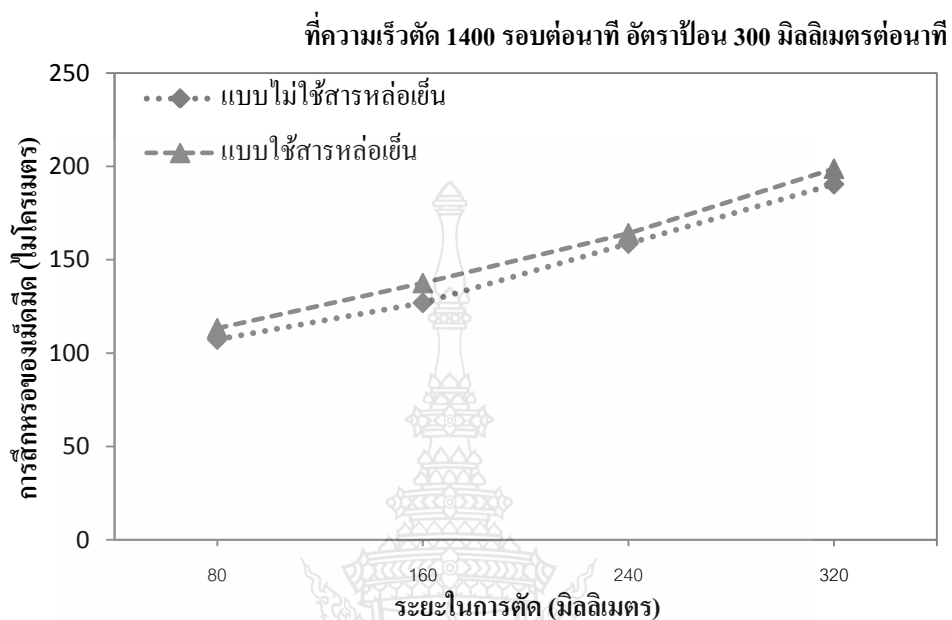
ก.5 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 300 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



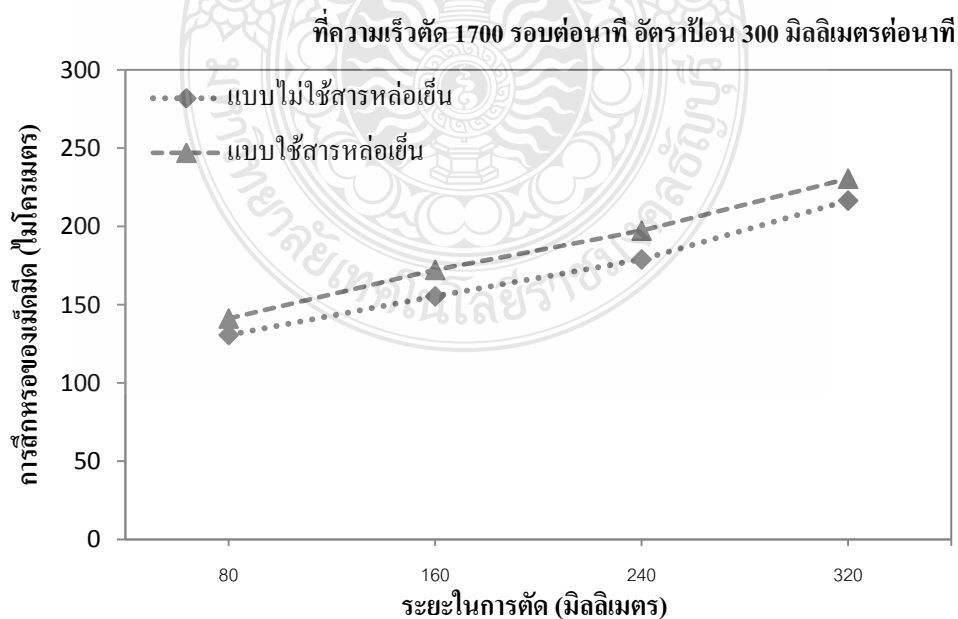
ก.6 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที อัตราป้อน 300 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



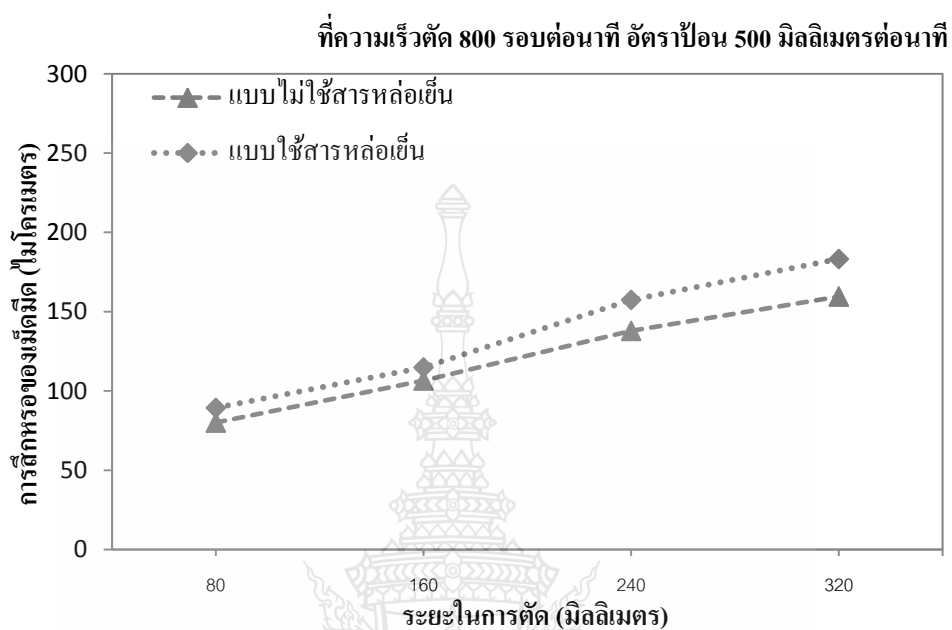
ก.7 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที อัตราป้อน 300 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



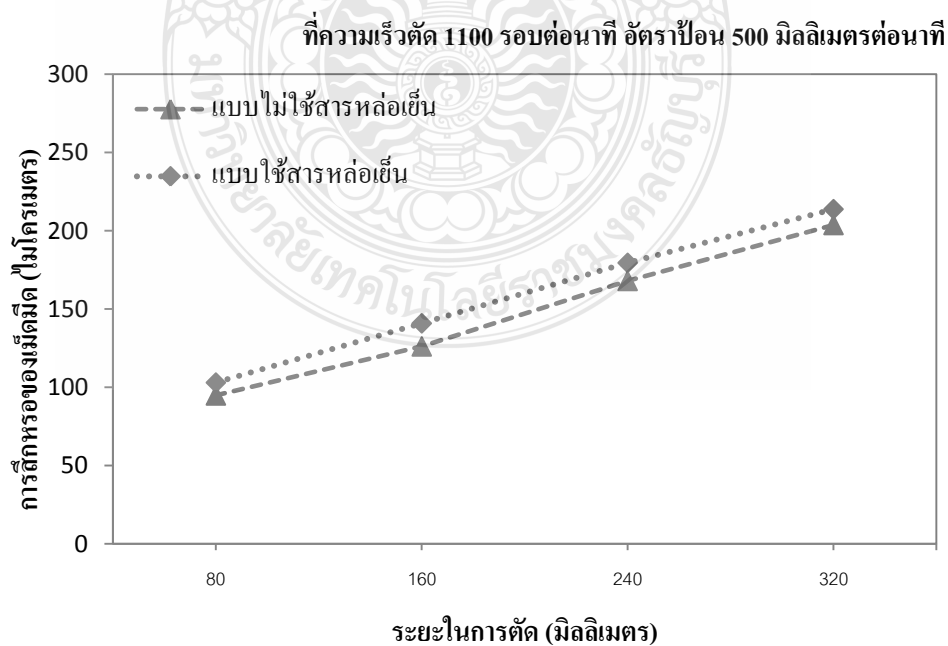
ก.8 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 300 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



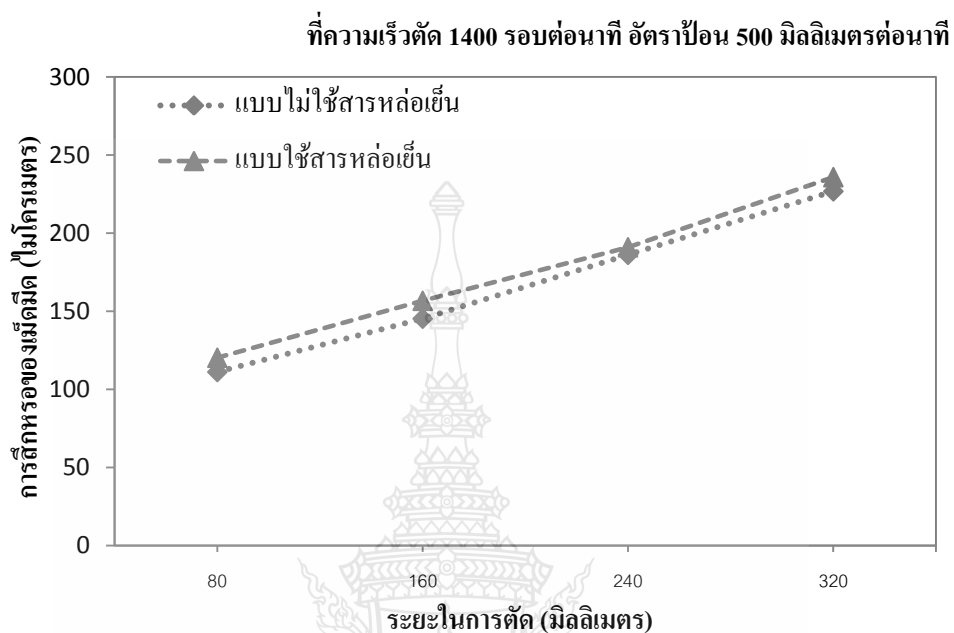
ก.9 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 500 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



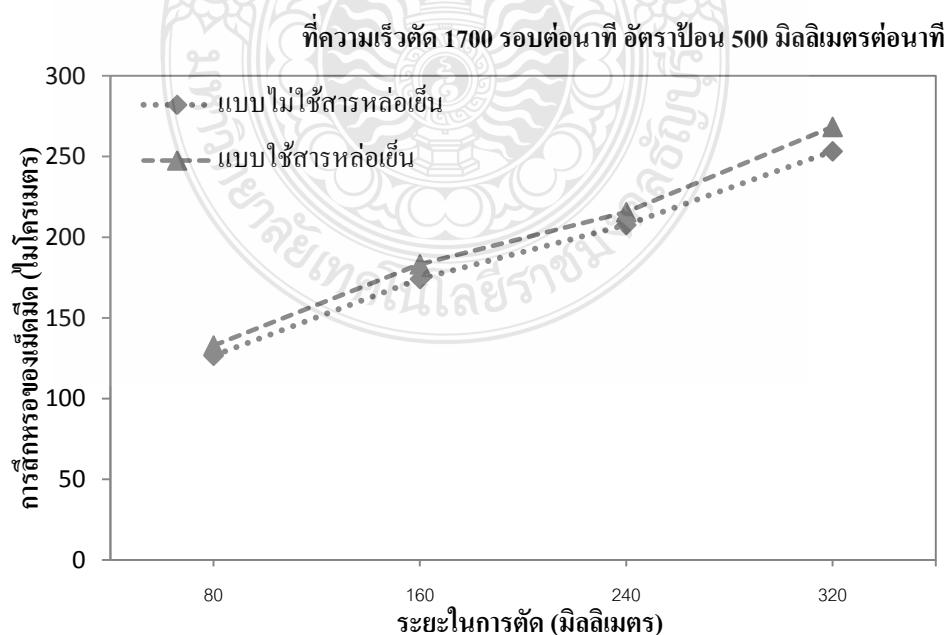
ก.10 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที อัตราป้อน 500 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



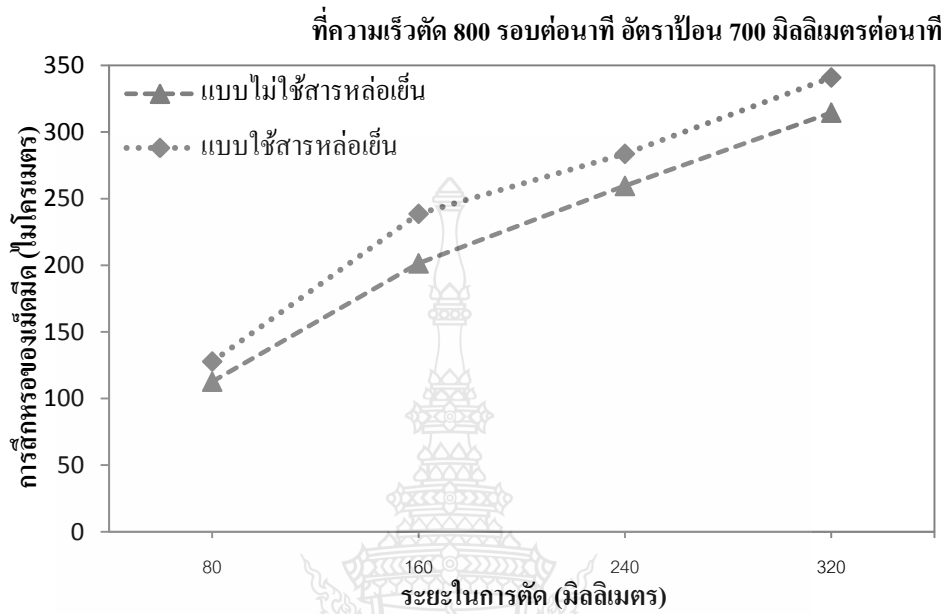
ก.11 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที อัตราป้อน 500 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



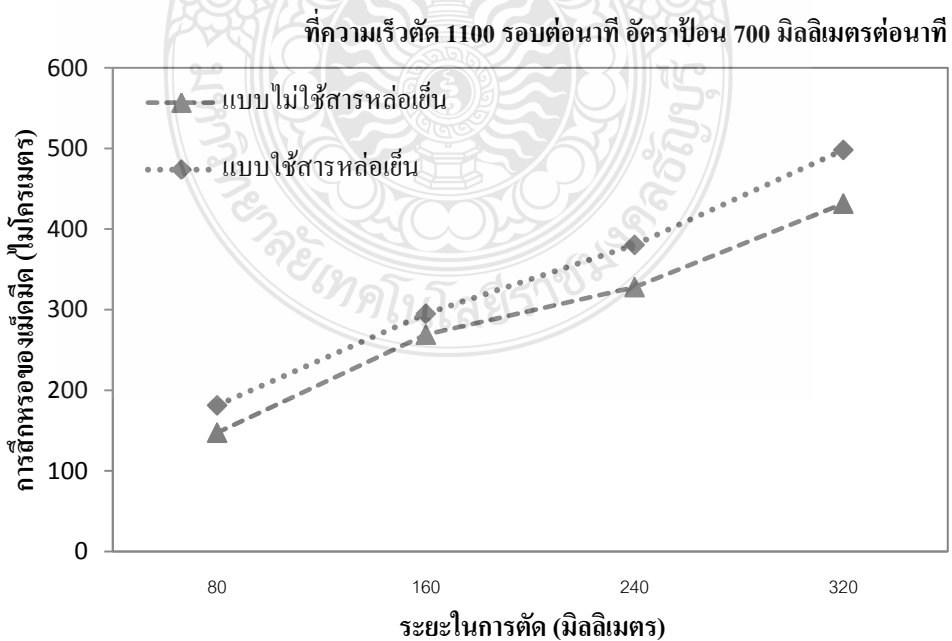
ก.12 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 500 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



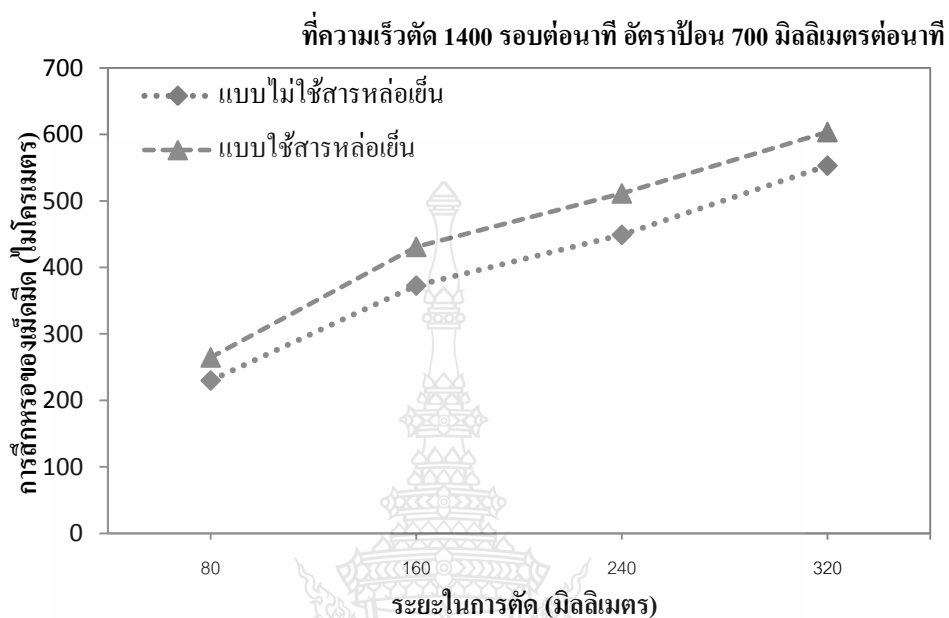
ก.13 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 800 รอบ/นาที อัตราป้อน 700 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



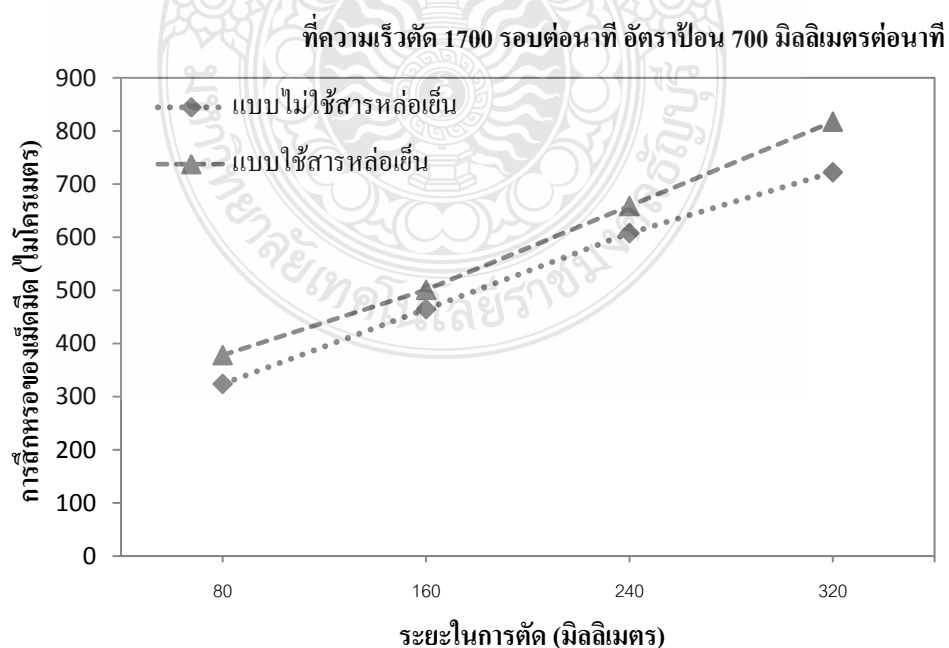
ก.14 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1100 รอบ/นาที อัตราป้อน 700 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



ก.15 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1400 รอบ/นาที อัตราป้อน 700 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร



ก.16 ความสัมพันธ์แบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบ 1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 700 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร

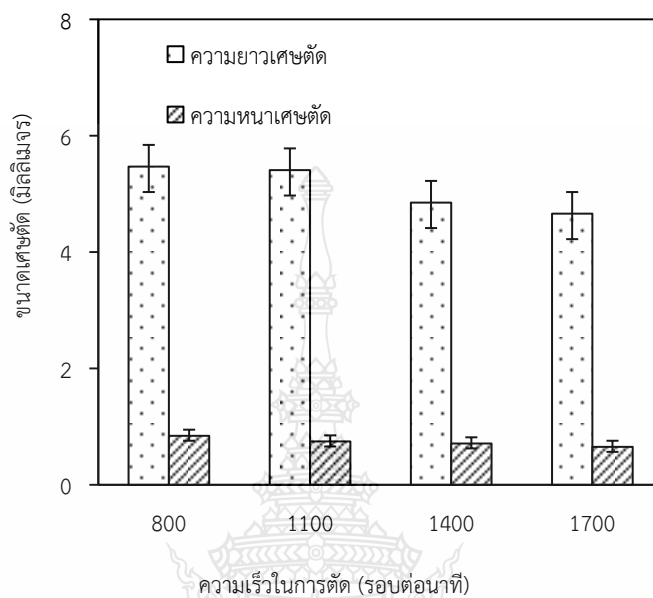




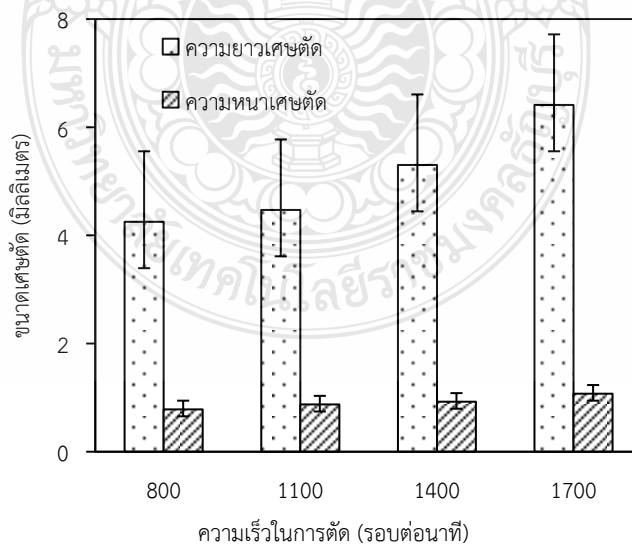
ภาคผนวก ข

เปรียบเทียบความหนาและความยาวเศษตัด

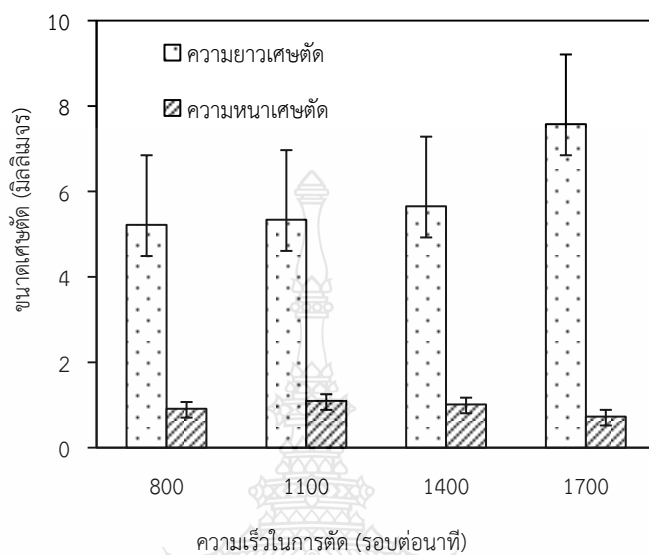
ข.1 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น



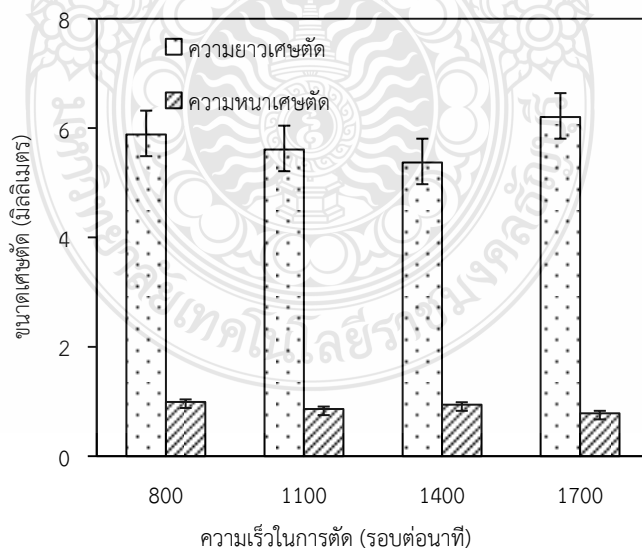
ข.2 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร แบบใช้สารหล่อเย็น



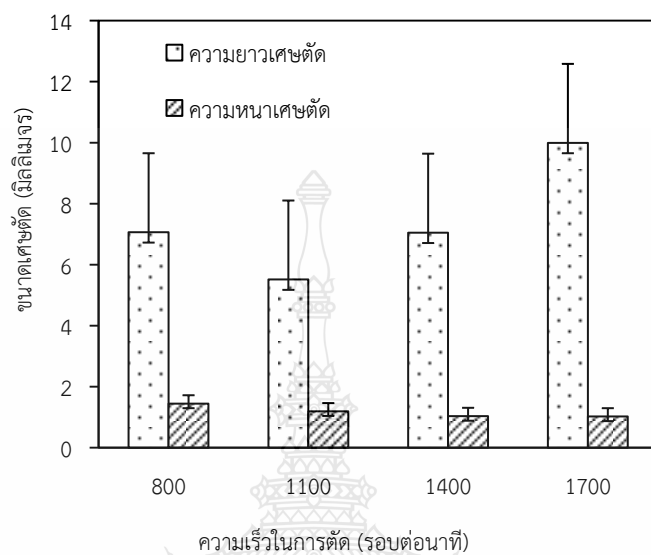
ข.3 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตราป้อน 300 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น



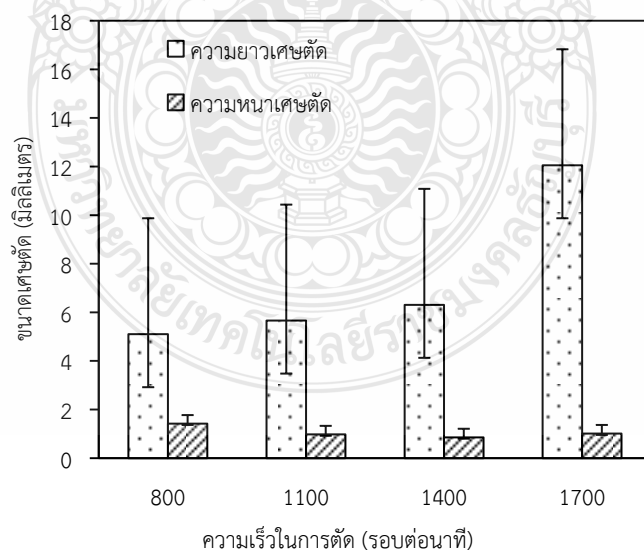
ข.4 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตราป้อน 300 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร แบบใช้สารหล่อเย็น



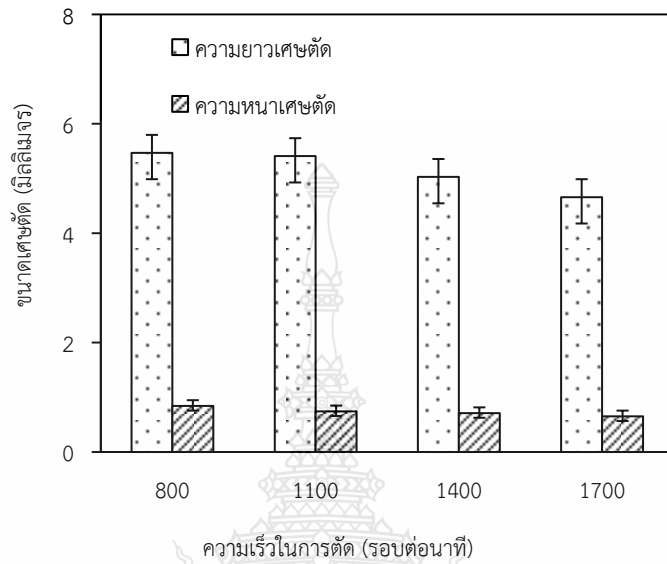
ข.5 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตราป้อน 500 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น



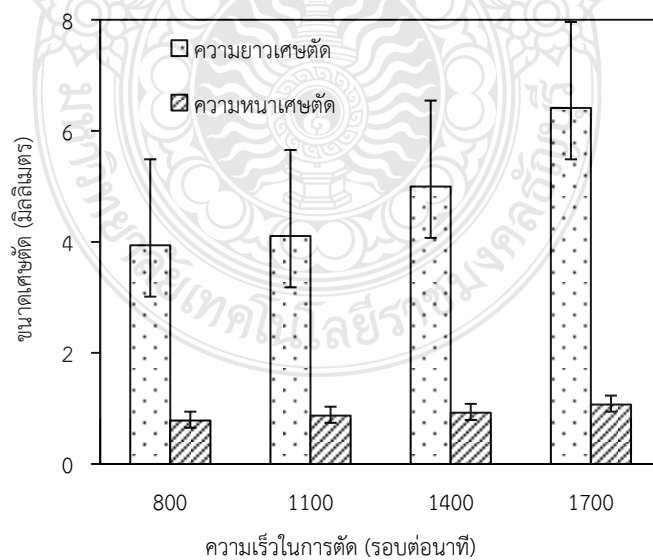
ข.6 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตราป้อน 500 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร แบบใช้สารหล่อเย็น



ข.7 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตราป้อน 700 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น



ข.8 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบที่ส่งผลต่อความหนาและความยาวของเศษตัด ที่อัตราป้อน 700 มิลลิเมตร และความลึก 1 มิลลิเมตร แบบใช้สารหล่อเย็น

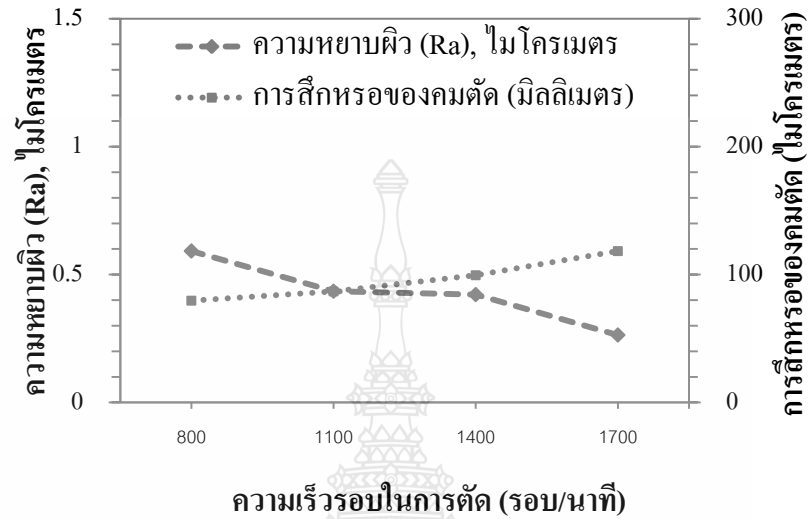


ภาคผนวก ค

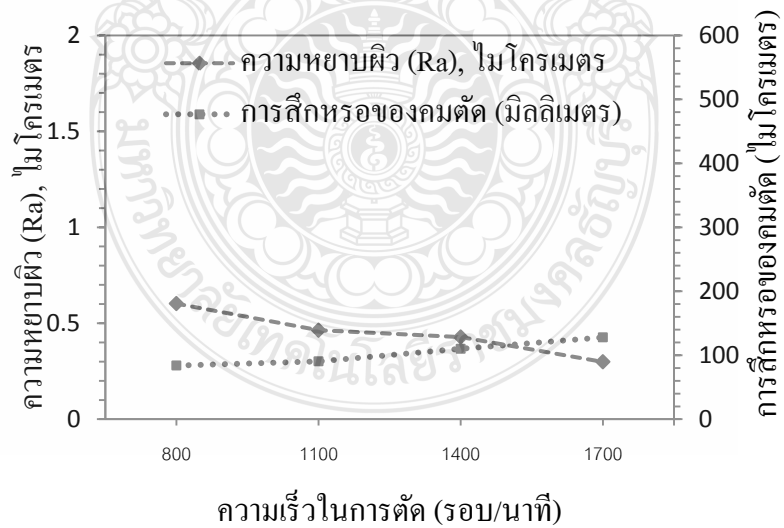
ผลการเปรียบเทียบค่าความหยابผิวและการสึกหรอคมตัด



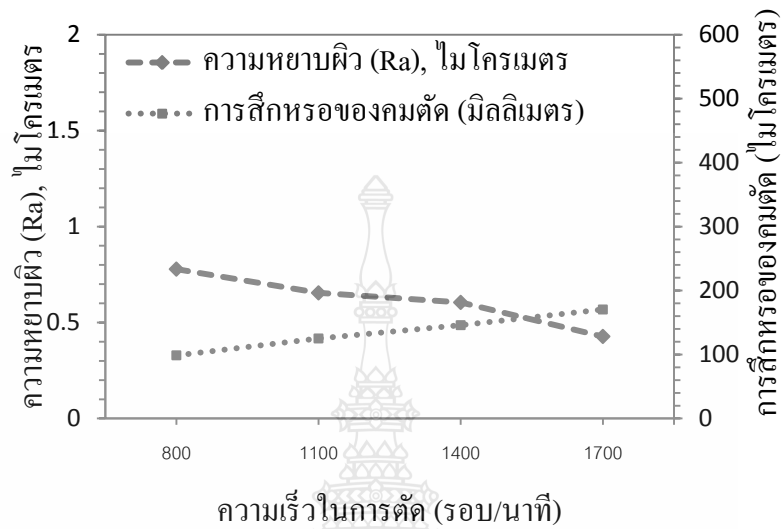
ค.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตรและความลึก 1 มิลลิเมตร แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น



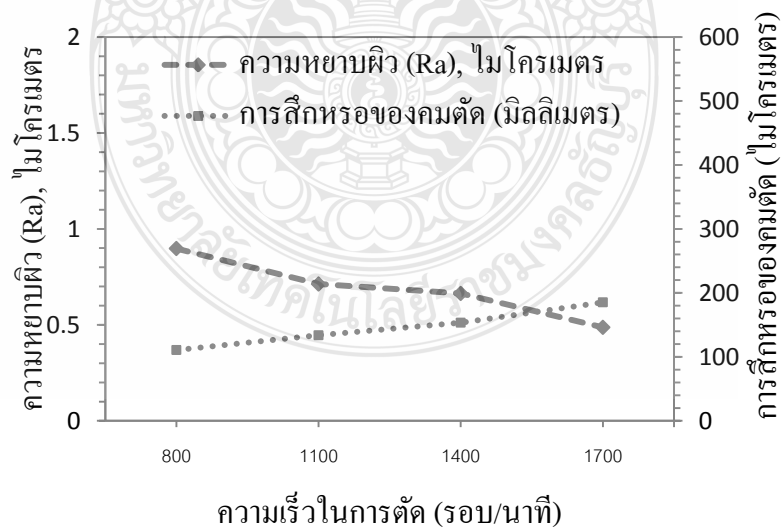
ค.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 100 มิลลิเมตรและความลึก 1 มิลลิเมตร แบบใช้สารหล่อเย็น



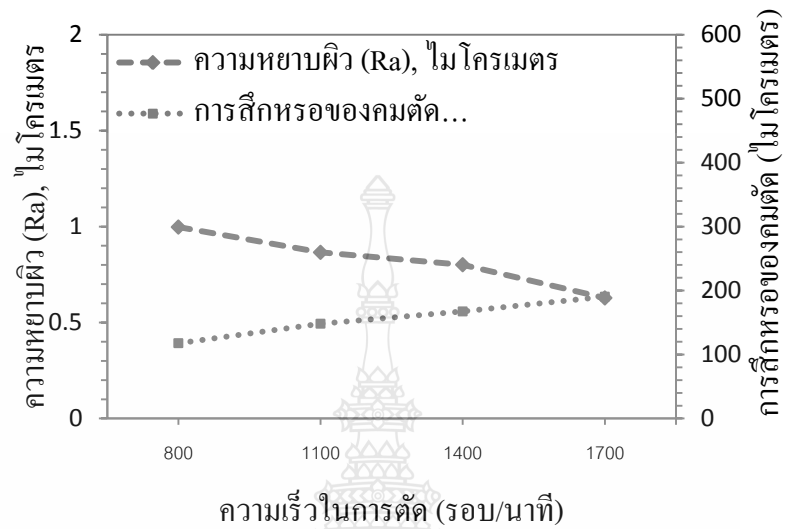
ค.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 300 มิลลิเมตรและความลึก 1 มิลลิเมตร แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น



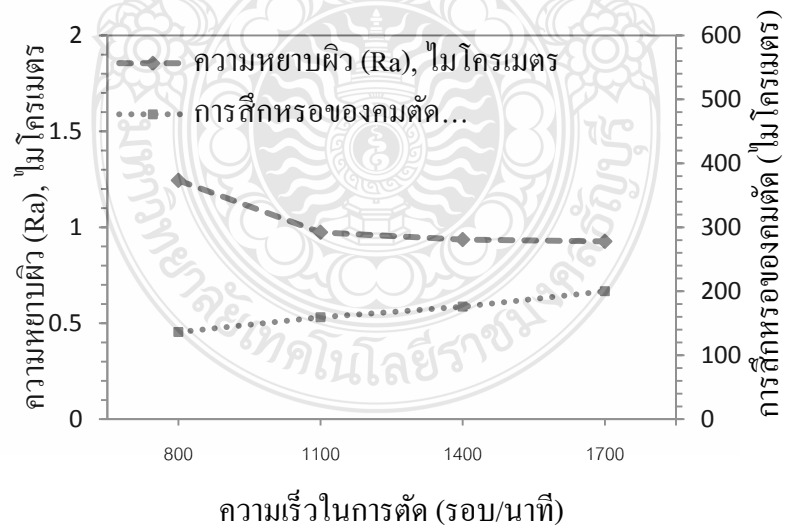
ค.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 300 มิลลิเมตรและความลึก 1 มิลลิเมตร แบบใช้สารหล่อเย็น



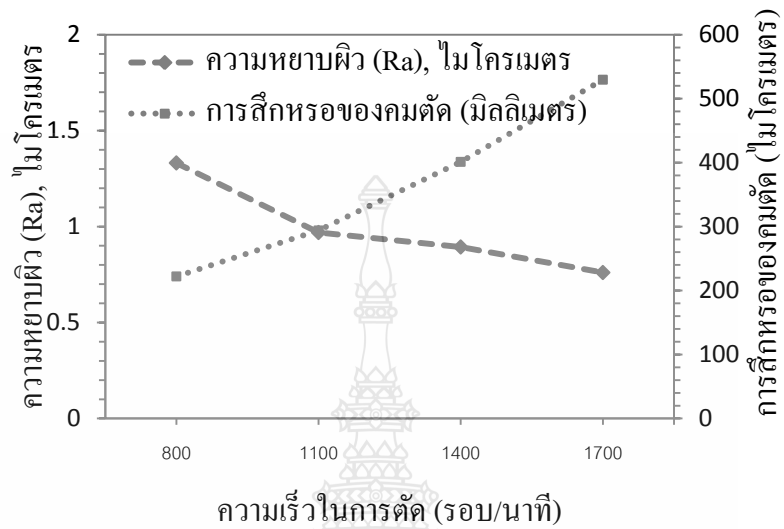
ค.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 500 มิลลิเมตรและความลึก 1 มิลลิเมตร แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น



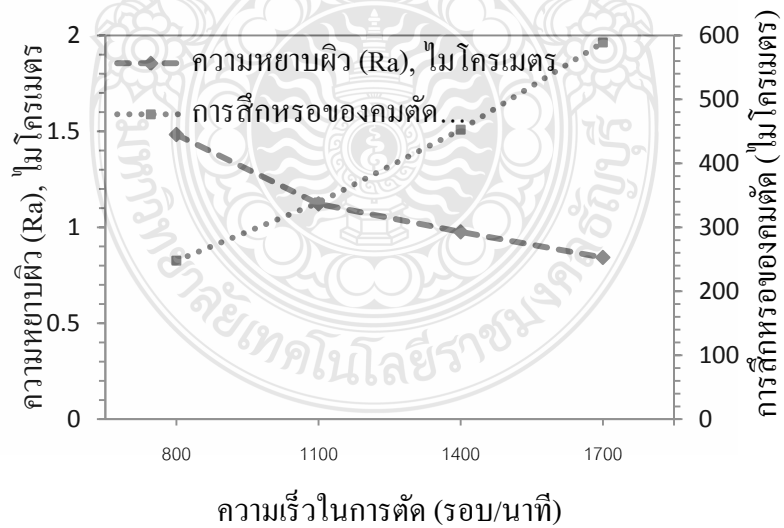
ค.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 500 มิลลิเมตรและความลึก 1 มิลลิเมตร แบบใช้สารหล่อเย็น



ค.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 700 มิลลิเมตรและความลึก 1 มิลลิเมตร แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น



ค.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 700 มิลลิเมตรและความลึก 1 มิลลิเมตร แบบใช้สารหล่อเย็น





ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

PROCEEDINGS IE Network Conference 2017

The Empress Hotel
Chiang Mai, July 12th-15th 2017.

INDUSTRY 4.0 CHALLENGES FOR THAILAND



Proceeding download link



IE Network
2017

รายชื่อคณะกรรมการจัดประชุม

1.	รองศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ	โสภานแดง	ประธานกรรมการจัดงาน
2.	รองศาสตราจารย์ ดร.ศักดิ์เกษม	ระมิงค์วงศ์	ประธานกรรมการวิชาการ
3.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ	ทิพย์าวงค์	ประธานกรรมการฝ่ายพิธีการต้อนรับและสถานที่
4.	รองศาสตราจารย์ ดร.เศรษฐ์	สัมภัตตะกุล	ประธานกรรมการฝ่ายประชาสัมพันธ์และสารสนเทศ
5.	รองศาสตราจารย์ ดร.เสริมเกียรติ	จอมจันทร์ยอง	กรรมการ
6.	รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	กรรมการ
7.	รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย	ฉัตรทิพย์วัฒน์	กรรมการ
8.	รองศาสตราจารย์ ดร.วิสนัย	วรรณจรรย์ยา	กรรมการ
9.	รองศาสตราจารย์ ดร.คมกฤต	เล็กสกุล	กรรมการ
10.	รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลลิน	เหล่าศิริถาวร	กรรมการ
11.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรรรุติชัย	ชีวสุทธิศิลป์	กรรมการ
12.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรณพล	สมทคุปต์	กรรมการ
13.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์	เสรีรัฐ	กรรมการ
14.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุ่งฉัตร	ชมภูอินไหว	กรรมการ
15.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วสวัชร	นาคเขียว	กรรมการ
16.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนิรุท	ไชยจารุณิษ	กรรมการ
17.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วริษา	วิสิทธิ์พานิช	กรรมการ
18.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท	เกษมเศรษฐ์	กรรมการ
19.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญญาณภาพ	อานันทนะ	กรรมการ
20.	อาจารย์ ดร.โปตี	เจ้า	กรรมการ
21.	อาจารย์ ดร.สาลินี	สันติธีรากุล	กรรมการ
22.	อาจารย์ ดร.อลงกต	ลิ้มเจริญ	กรรมการ
23.	อาจารย์ ดร.ชนม์เจริญ	แสวงรัตน์	กรรมการ
24.	อาจารย์อรรณพจน์	วงศ์พิงไชย	กรรมการ
25.	อาจารย์ณรงค์	เพชรขารี	กรรมการ

เลขานุการ ประสานงานและสนับสนุนการดำเนินงาน

1. นางสาวศศิธร ฉิมสวัสดิ์
2. นางสาวสุภารัตน์ แก้วแสงใจ
3. นางสาววิมูทิตา ปัญโญใหญ่
4. นางสาวนัยนา ยะสิงห์สาร
5. นางสาวพรพรรณ คำมัน
6. นางสาวสินีนุช พรหมมีจิตร
7. นางสาวปรียาภัทร ปาคำ
8. นางสาวณัฐนรี เชื้อนแก้ว
9. นายจิรวัดน์ ตียากม
10. นายสนธยา สุขสามัคคี
11. นางวุฒินันท์ อินทยศ
12. นายณัฐวุฒิ รินโน
13. นายนรินทร์ จักรปั้น

รายชื่อผู้ประเมินบทความ

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

(ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา)

1. ผศ. ดร. ชัยวัฒน์ นุ่มทอง
2. ผศ. ดร. นัฐวิภา จันทร์ศรี
3. ผศ. ดร. ศิริรัตน์ ชูติชูเดช
4. ผศ.ดร. สิริราชค์ กลั่นคำสอน
5. ดร. เพ็ญสุดา พันฤทธิ์ดำ
6. ผศ.ดร. รุติกร พัฒนพิบูล
7. ดร. เขมฐา ชำนาญหล่
8. ดร. จิราภรณ์ ประดับวงษ์

มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

1. อ.จรุงรัตน์ พันธุ์สุวรรณ
2. อ.จิตลดา หมายมัน

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

1. ดร.กิตติชัย อธิกุลรัตน์
2. อ.ปริญญา พัฒนวิสันต์พร
3. ดร.วราญา เนื่องมัจฉา
4. ดร.อธิวัฒน์ บุญมี
5. ดร.เลิศเลขา ศรีรัตน์นะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

1. ผศ.ดร.สุรัตน์ วรรณศรี
2. รศ.ดร.ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ
3. ผศ.ดร.พีรเดช สุวิทยารักษ์
4. ผศ.ดร.เฉลิมเกียรติ ศรีศิลา

มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

1. รศ. ดร.ไพโรจน์ เนียมนาค
2. รศ.ดร.สฤกษ์พร พรมสายใจ
3. ผศ. ดร.นพคุณ ชูทัน
4. ผศ.ดร.วิษณุ บัวเทศ
5. ดร.เทพ เกื้อทวีกุล
6. ดร.สุรเชษฐ์ ตุ่มมี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

1. อาจารย์ พัฒนพงษ์ แสงหัตถ์วัฒนา
2. อาจารย์ อรณิชา อนุชิตชาญชัย
3. อาจารย์ ธนกฤต โชติภาวริศ
4. อาจารย์ วรินทร์ เกียรติบุญกุล
5. ดร.ชนิภา สุนารักษ์
6. อาจารย์ ศุภพัฒน์ ปิงตา

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

1. ผศ.ดร.ไพฑูรย์ ศิริโอฬาร
2. อ.ชลิตา ชาญวิจิตร
3. อ.จุฑาทิพย์ สีสานาพิพัฒน์
4. อ.สุคนธ์ทิพย์ เพิ่มศิลป์

มหาวิทยาลัยนานาชาติแสตมฟอร์ด

1. ดร.อัคนันท์ พงศธรวิวัฒน์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

1. ผศ.ดร.ชูศักดิ์ พรสิงห์
2. รศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร
3. อ.ดร.สิทธิชัย แซ่เหล่ม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

1. ดร.บรรเจิด แสงจันทร์
2. ผศ.ดร.ภาคภูมิ จารุภูมิ
3. ผศ.มนวิภา อาวิพันธุ์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

1. ผศ.ดร.จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน
2. ผศ.ดร.วิสุทธิ์ สุพิทักษ์
3. อ.ดร.รมิตายุ อยู่สุข
4. ผศ.ดร.สุวิษกรณ์ วิชกุล
5. ผศ.ดร.จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์

มหาวิทยาลัยมหิดล

1. ผศ.ดร.สรนาถ ไกรภู
2. ผศ.ดร.ศุภชัย ราชภูริศิริ
3. ผศ.ธนา สาดรา
4. รศ.ศุภชัย นาทะพันธ์
5. อ.ดร.จิรพรรณ เลียงโรคาพาธ
6. อ.ดร.รณชัย ศิโรเวธกุล
7. อ.ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย

กองวิชาวิศวกรรมสรรพาวุธ ส่วนการศึกษาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

1. พ.อ.หญิง อัญพัชร คงวัฒนานันท์
2. พ.ต.เสกสรรค์ หมอยาดี

มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

1. ผศ.ดร.ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์
2. รศ.ดร.สถาพร อมรสวัสดิ์วัฒนา
3. ดร.รวินกานต์ ศรีนนท์

มหาวิทยาลัยรังสิต

1. ดร.พิษณุ มนต์ปิติ
2. ผศ.ดร. ธนวรรณ อิศวไพบูลย์
3. อาจารย์ พรรคพงษ์ แก่นณรงค์
4. อาจารย์ สายสุนีย์ พงษ์พัฒนศึกษา
5. อาจารย์ ประพล จิระพรทิพย์
6. ผศ.ดร.เพ็ญจันทร์ โกญจนาท

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้านครเหนือ

1. รศ.ดร.นันทกฤษณ์ ยอดพิจิตร

มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

1. ผศ.อริยพงษ์ พลวัพนธ์
2. ผศ.นราธิป ภาวะรี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

1. ดร.จรวัยพร แสนทวีสุข
2. ผศ.ดร.ธารชุตดา พันธันกุล
3. ผศ.ดร.คณิศร ภูนิคม
4. ดร.จริยาภรณ์ อุ่นวงษ์
5. ดร.กิตติมา ศิลปะษา
6. ดร.กสิณ รังสิกรรพุม
7. ผศ.ดร.นลิน เพียรทอง
8. รศ.ดร.นุชสรา เกรียงกรกฎ
9. รศ.ดร.ปรีชา เกรียงกรกฎ
10. ผศ.ดร.สมบัติ สิ้นธุเชาวน์
11. อาจารย์ ถนัดกิจ ศรีโชค

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

1. ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เหล่านภากุล
2. อ.ดร.ปนิทัศน์ สุริยธนาภาส

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

1. ผศ.ดร.อภิวัฒน์ มุตตามระ
2. ผศ.ดร.สวัสดี ภาระราช
3. รศ.ดร.เสมอจิตร์ หอมรสสุนธ์
4. รศ.ดร.วุฒิชัย วงษ์ทัศน์เกียรติ
5. รศ.ดร.ศุภชัย สุรพันธ์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ
2. รศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล
3. รศ.ดร.สกนธ์ คล่องบุญจิต
4. รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล
5. ผศ.ดร.วิภู ศรีสืบสาย
6. ผศ.ดร.ชุมพล ยวงใย
7. ผศ.ดร.อุดม จันทร์จรัสสุข
8. ผศ.ดร.กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข
9. ดร.เขาวลิต หามนตรี
10. ดร.นิรันดร์ พิสุทธอานนท์
11. ดร.เพชรพล ตัมทวิรุฬห์
12. ดร.จรัสวรรณ โกยวานิช
13. ดร.นพดล สุกแสงปัญญา
14. อาจารย์รณณ เจียรตระกุล

มหาวิทยาลัยพะเยา

1. ผศ.จักรทอง ทองจัต
2. ดร.อัจฉราวดี แก้ววรรณดี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

1. ผศ.ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์
2. ผศ.ดร.อภิวันทนา อุดมศักดิ์กุล
3. ผศ.พจมาน เตียวัฒน์รัฐติกาล
4. ดร.ไพบุลย์ ช่างทอง
5. ดร.อุษณีย์ คำพูล
6. ดร.ศุภฤกษ์ บุญเทียร
7. ดร.วิบูลย์ ตั้งโรตมณกุล

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

1. ผศ.ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ
2. อ.ดร.พงษ์เพ็ญ จันทนะ
3. อ.ร.ท.ดร.รัฐวุฒิ วงษ์วิทย์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1. ศ.ดร.ปารเมศ ชูติมา
2. รศ.ดร.จิตรา รุ้กิจการพานิช
3. รศ.ดร.ปวีณา เชาวลิทวงศ์
4. ผศ.ดร.ไพโรจน์ ลดาวิจิตรกุล
5. อ.ดร.พิศิษฐ์ จารุมณีโรจน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

1. ผศ.ดร.ภาสพิรุฬห์ วัชรศรีสำเร็จ
2. ผศ.ร่าพีง เจริญยศ
3. ผศ.จักรินทร์ น่วมทิม

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

1. รศ.ดร.ธเนศ รัตนวิไล
2. ผศ.ดร.อรุณ สังข์พงศ์
3. ผศ.ดร.นภิสพร มีมงคล
4. ผศ.ดร.รัฐชนา สีนธวัลย์

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

1. น.อ. รศ.ปัญญารักษ์ โกศลวัฒน์

มหาวิทยาลัยศรีปทุม

1. ผศ.ดร.สุพัฒตรา เกษราพงศ์
2. ผศ. พัฒนพงศ์ อริยสิทธิ์
3. อ.จักรพันธ์ กัณฑ์

มหาวิทยาลัยสยาม

1. อ.ชาณิดา พิทยานนท์
2. อ.ธนารักษ์ หีบแก้ว
3. อ.ณัฐพล พุดยางกูร
4. อ.อัมรินทร์ วงศ์เศรษฐี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

1. ผศ. สุรัตน์ ตริยวนพงศ์
2. ผศ. ดร. ศิริชัย ต่อสกุล
3. รศ. ดร. ณฐา คุปต์ชัยเชียร
4. ผศ. ประจักษ์ อ่างบุญตา
5. ผศ.ศุภเอก ประมูลมาก
6. ผศ. ดร. กิตติพงษ์ กิมะพงษ์
7. ผศ. ดร. ชัยยะ ประณีตพลกรัง
8. ดร. ประภส สิริสุวรรณ
9. ผศ. ดร. ระพี กาญจนะ
10. ดร. กุลชาติ จุลเพ็ญ

มหาวิทยาลัยนเรศวร

1. ผศ.ดร.ภาณุ บุรณจารุกร
2. ผศ.ดร.ภูพงษ์ พงษ์เจริญ
3. ผศ.ดร.ศรีสัจจา วิทยศักดิ์
4. ผศ.ดร.โพธิ์งาม สมกุล
5. ดร.สุธนิตย์ พุทธพนม
6. รศ.ดร.อภิชัย ฤตวิรุฬห์
7. ผศ.ดร.สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

1. รศ.ดร.เสริมเกียรติ จอมจันทร์ยอง
2. รศ.ดร.ชนนาล กฤตวรกาญจน์
3. รศ.ดร.นิวิธ เจริญใจ
4. รศ.ดร.อภิชาติ โสภาแดง
5. รศ.ดร.วิชัย ฉัตรทินวัฒน์
6. รศ.ดร.คมกฤต เล็กสกุล
7. รศ.ดร.วิมลีน เหล่าศิริถาวร
8. รศ.ดร.วิสนัย วรรณจรรย์ยา
9. รศ.ดร.ศักดิ์เกษม ระมิงค์วงศ์
10. ผศ.ดร.สรรฐดิษฐ์ ชิวสุทธิศิลป์
11. ผศ.ดร.อรธพล สมุทคุปต์
12. ผศ.ดร.รุ่งฉัตร ชมภูอินไหว
13. ผศ.ดร.กรกฎ ไยบัวเทศ ทิพย์าวงค์
14. ผศ.ดร.ชมพูนุท เกษมเศรษฐ์
15. ผศ.ดร.วรวพจน์ เสรีรัฐ
16. ผศ.ดร.วสวัชร นาคเขียว
17. ผศ.ดร.วิรัช วิสิทธิพานิช
18. ผศ.ดร.อนิรุท ไชยจรรุณิษ
19. อ.ดร.โปตี เจ้า
20. อ.ดร.ชนม์เจริญ แสงรัตน์
21. อ.ดร.อลงกต ลิ้มเจริญ
22. อ.ดร.สาลินี สันติธรากุล
23. อาจารย์ณรงค์ เพชรขารี

มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต

1. ผศ.ชานนท์ มุลวรรณ
2. รศ.ดร.ปราโมทย์ ศรีน้อย

Code	Title	Page
IM011	A New Design of One-handed Environmental-Friendly Lipstick Packaging using A Quick-Easy-Customer's Needs Quality Function Deployment (QECN-QFD) Method	216-216
IM013	Web Application to Support Construction Project Management	217-224
LC005	LCA of a Printing Toner Cartridge: Comparative Study for Three Different End of Life Scenarios	225-230
ME002	A Study of Al Alloy 6063 Aging Process Using Central Composite Design	231-237
ME003	Development and Improvement Process of Paper Petal Compression	238-246
ME004	Influence of Solution Treated, Welding Factors and Artificially Aged on Microstructure and Mechanical Properties of 6061 Aluminum Semi Solid Casting with Friction Stir Welded	247-256
ME005	Improving and Development Process of Compressed Bricks Synchronization	257-265
ME008	Improvement of a polyvinylchloride pipe extrusion process to reduce material cost	266-273
ME009	Influence of Copper and Tin onto Microstructure and Mechanical Properties of Silver Alloys 750	274-281
ME010	The Optimum Casting Condition of Manufacturing Jewelry Setting for Silver Alloys 750	282-288
ME012	Comparative Study of Materials Mechanical Properties for Manufacturing Palm Cutting blade	289-296
ME014	Relative Study of Cutting Edge Wear, Roughness and Chip Morphology in Hard-faced Weld metal Milling Process on Grey Cast Iron Surface	297-303
ME015	Effect of Gas Metal Arc Welding Parameter on Hard-faced Weld Metal on JIS-FC25 Grey Cast Iron Surface	304-310
ME018	Optimizing Condition of Soldering Temperature and Time on Wettability for SAC305 and SAC305-0.5In Solders on Copper Substrate	311-318
ME020	Development of the Wooden Plate Cutter for the Picture Frame Applying Reverse Engineering	319-325
ME021	Design for Computer Experiments to Determine the Optimal Condition in Stretch Blow Molding of Plastic Bottles	326-332
ME022	Effects of Cu and Ni on Microstructure and Mechanical Properties of Sn-Zn solder joints	333-338



การศึกษาความสัมพันธ์ของการสึกหรอคมตัด ความหยาบผิว และรูปร่างเศษในการกัด
โลหะเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อสีเทา
Relative Study of Cutting Edge Wear, Roughness and Chip Morphology in
Hard-faced Weld metal Milling Process on Grey Cast Iron Surface

เพียงขวัญ กันหาภัย^{1*} ทวี หมดสี² และ กิตติพงษ์ กิมะพงศ์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

E-mail: piangkwan_k@mail.rmutt.ac.th*

Piangkwan Kanhapai^{1*} Tavee Madsa² and Kittipong Kimapong¹

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Thanyaburi.

²Faculty of Industrial and Technology, Rajamangala University of Technology Rattanakosin,
Wangklaikangwon Campus.

E-mail: piangkwan_k@mail.rmutt.ac.th *

บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกแข็งเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการเชื่อมซ่อมพื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตร อย่างไรก็ตามการเชื่อมพอกแข็งเป็นผิวสำเร็จของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลนั้นเป็นไปได้ยากเนื่องจากผิวหน้าแนวเชื่อมมีความหยาบสูง ด้วยเหตุนี้ในงานเชื่อมซ่อมการปรับผิวให้มีความละเอียด เช่น การกัด หรือการเจียรไน แนวเชื่อมจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวชิ้นส่วนให้ดีขึ้น งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาการเปรียบเทียบการสึกหรอของคมตัด รูปร่างเศษการตัดและความหยาบผิวในการกัดแนวแนวเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25 ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ ตัวแปรการกัดที่เหมาะสมของการศึกษาทดลองนี้พบได้เมื่อทำการกัดผิวหน้าด้วยความเร็วรอบ 1100 รอบต่อนาที อัตราป้อน 100 มม.ต่อนาที โดยไม่มีการใช้สารหล่อเย็น สภาวะนี้แสดงการสึกหรอของคมตัดมีค่าต่ำสุด 86.78 ไมโครเมตร ค่าความหยาบผิว 0.435 ไมโครเมตร เศษกัดมีรูปร่างยาวต่อเนื่องเป็นเกลียว ความหนาและความยาวของเศษกัดเท่ากับ 0.746 และ 5.410 มิลลิเมตร ความเร็วรอบการตัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การสึกหรอเพิ่มขึ้น ความหยาบผิวลดลง เศษกัดมีความหนาและความยาวลดลง

คำสำคัญ การเชื่อมพอกแข็ง การกัดปาดผิวหน้า ความหยาบผิว การสึกหรอ สารหล่อเย็น

Abstract

A hard-faced welding is an effective method for repairing the worn surface of the agricultural machine part. Unfortunately, an application the hard-faced surface as a finished surface of the machine part was not impossible because of the high rough surface of the weld bead. Therefore, in the repaired welding unit, the surface finishing such as milling or grinding of the weld bead is always performed for improving



the higher part surface quality. This research aims to comparative study of a cutting edge wear, chip morphology and a roughness in a milling process of a hard-faced weld metal milling on the JIS-FC25 cast iron surface. The summarized results are as follows. The optimized milling process parameter in this experimental study was the rotating speed of 1100 rpm, the feed rated of 100 mm/min and the dry coolant. This condition showed the cutting edge wear of 86.78 μm , the roughness of 0.435 μm , the continuous spiral chip, and the chip thickness and length of 0.746 and 5.410 millimeters, respectively. The increase of the rotating speed affected to increase the cutting edge wear, decrease the roughness and decreased the chip thickness and length.

Keywords: hard-faced welding, face milling, roughness, wear, cutting-fluid

1. บทนำ

ในการซ่อมแซมพื้นผิวของชิ้นส่วนโลหะที่เกิดการเสียด มีกับวัสดุอื่นๆ ในงานอุตสาหกรรม สามารถทำได้หลายวิธีการ เพื่อจุดประสงค์หลักในการขจัดเศษโลหะที่สูญเสียไป อย่างไรก็ตามหากทำการเพิ่มเนื้อโลหะในตำแหน่งที่สูญหาย และสามารถเพิ่มสมบัติทางกล เช่นความแข็ง และความต้านทานการสึกหรอ (Wear resistance) ของชิ้นส่วนนั้นๆ สามารถส่งผลทำให้อายุการใช้งานของชิ้นส่วนยาวนานขึ้นได้ด้วยเหตุนี้การเลือกวิธีการในการเพิ่มเนื้อโลหะและสมบัติทางกลของพื้นผิวชิ้นส่วนโลหะที่เกิดการสึกหรอจึงมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องในงานอุตสาหกรรม [1, 2] การเพิ่มปริมาณเนื้อโลหะด้วยกระบวนการเชื่อมลวดหุ้มฟลักซ์เป็นหนึ่งในกระบวนการซ่อมแซมชิ้นส่วนที่เกิดการสึกหรอในเครื่องจักรกลเกษตรที่มีประสิทธิภาพ [1] สามารถพบได้ในการเชื่อมชิ้นส่วนต่างๆ เช่นลูกสูบที่ลัดอ้อยในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล อย่างไรก็ตามความหนาของผิวโลหะเชื่อมที่มีค่าสูงส่งผลให้ โลหะเชื่อมพอกแข็งมีข้อจำกัดในการนำชิ้นส่วนไปประยุกต์ใช้งาน ด้วยเหตุนี้ผิวหน้าแนวเชื่อมต้องมีการปรับสภาพให้มีความเรียบและละเอียดคงคาคง เพื่อที่สามารถประยุกต์ใช้งานได้ตามต้องการ [2]

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยหลายๆ งานที่ได้กล่าวถึงงานเชื่อมพอกแข็งและการสึกหรอของคมตัด รูปร่างเศษการตัด เช่น การศึกษาอิทธิพลของการเคลือบผิวด้วย aCN/TiAlN บนการสึกหรอของมีดกลึง แรงตัด พื้นผิวสำเร็จและรูปร่างเศษการกัดผิวหน้าของโลหะผสมพิเศษเกรด Ti6Al4V ในงานวิจัยนี้ได้สรุปว่าการเคลือบผิวด้วย aCN/TiAlN ทำให้มี

ความต้านทานการสึกหรอสูงชิ้นและมีดกลึงมีอายุการใช้งานยืดออกไปอีกประมาณ 15% ของอายุการใช้งาน และพิสูจน์ได้ว่ามีประสิทธิภาพในรูปร่างเศษชิ้นงานและพื้นผิวสำเร็จ เนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นในแง่ของการยึดเกาะความต้านทานการสึกหรอของพื้นผิวสำเร็จและรูปร่างเศษ [3] นอกจากนี้มีงานวิจัยหนึ่งได้กล่าวในเรื่องของการสังเกตการณ์ทดลองการสึกหรอของเครื่องมือตัด แรงตัดและรูปร่างเศษการตัดในการกัดผิวหน้าของโคบอลต์ตามโลหะผสมพิเศษกับลักษณะทางกายภาพแบบที่มีการเคลือบผิวและไม่มีการเคลือบผิว ซึ่งได้กล่าวถึงการตรวจสอบผลกระทบเงื่อนงำที่มีผลต่อการตัดเฉือน (ความเร็วตัด, อัตราป้อนและความลึกในการตัด บนการสึกหรอของเครื่องมือตัด รูปร่างเศษการตัด และแรงตัดในการกัดผิวหน้า [4] หรือการศึกษาอิทธิพลของโครงสร้างจุลภาคในการสึกหรอแบบขัดสีของ โลหะผสมพอกแข็งผิวชุบ Fe-Cr-C-Nb โดยกระบวนการเชื่อมแบบเปิด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้รับการพัฒนาสำหรับวัสดุหุ้มด้วยเทคนิคการเชื่อมแบบเปิดชิ้นส่วนภายใต้การสึกหรอแบบขัดสี แสดงให้เห็นว่าการพัฒนาโลหะผสมพอกแข็ง Fe-Cr-C-Nb มีแนวโน้มที่ดีขึ้น ความต้านทานการสึกหรอแบบขัดสี เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนสูงธรรมดา / โครเมียมสูง โลหะผสมพอกแข็งมีค่าความแข็งที่สูงขึ้นและมีปริมาณ M_7C_3 ที่สูงขึ้น [5]

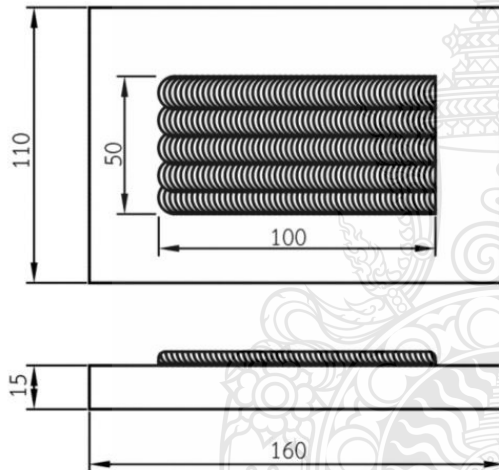
ข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น การเชื่อมพอกแข็งมีความสำคัญในงานซ่อมแซมชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอแต่ข้อมูลในการเตรียมพื้นผิวที่มีเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ทดแทนชิ้นส่วนต่างๆ มีค่อนข้างจำกัด ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีจุดประสงค์ในการศึกษาความสัมพันธ์ของการสึกหรอคมตัด



ความหยาบผิว และรูปร่างเศษการกัด ในการเตรียมพื้นผิว โลหะเชื่อมพอกแข็งบนพื้นผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25 ด้วยวิธีการกัด เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนางานเชื่อมพอกแข็งในอนาคตต่อไป

2. วิธีการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้คือ เหล็กหล่อสีเทา JIS-FC25 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีประกอบด้วย คาร์บอน 3.20% ซิลิกอน 2.30% แมงกานีส 0.55% และโครเมียม 0.40% แผ่นเหล็กหล่อมีขนาดความหนา 15 มิลลิเมตร ความกว้าง 110 มิลลิเมตรและความยาว 160 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขนาดชิ้นงานเหล็กหล่อ JIS-FC25

กระบวนการเชื่อมที่ใช้ในการสร้างชั้นโลหะพอกแข็งคือกระบวนการเชื่อมอาร์กโลหะหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) โดยใช้เครื่องเชื่อมอินเวอร์เตอร์แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input voltage) 220 โวลต์ กระแสไฟฟ้าขาออกขณะเชื่อม (Output Current Range) 10-215 แอมแปร์ เครื่องเชื่อมนี้สามารถเชื่อมได้ทั้งกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้ในการเชื่อมชั้นโลหะเชื่อมพอกแข็ง คือลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกแข็ง (Hardfacing electrode) สำหรับงานโลหะเสียดสีกับโลหะและเสียดสีกับทราย เป็นลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Electrode) ยี่ห้อ YAWATA เกรด H-350C (JIS Z 3251) ที่มีส่วนผสมประกอบด้วยคาร์บอน

0.16% ซิลิกอน 0.43% แมงกานีส 1.32% และโครเมียม 1.55% ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 350 มิลลิเมตร

การเตรียมชิ้นงานเพื่อการเชื่อมพอกแข็ง แผ่นชิ้นงานเหล็กหล่อถูกนำมาทำความสะอาดโดยกำจัดผิวดิบของเหล็กหล่อออกด้วยวิธีการขัดพื้นผิวด้วยกระดาษทรายเบอร์ 250 พื้นที่การเชื่อมกำหนดให้มีการเชื่อมในพื้นที่กึ่งกลางแผ่นงาน ขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ความยาว 100 มิลลิเมตร การเชื่อมพอกแข็งในครั้งนี้ ใช้กระแสเชื่อมที่ 130 แอมแปร์ เป็นกระแส DC [6] ก่อนทำการเชื่อมชิ้นงานกำหนดให้มีการอุ่นชิ้นงานก่อนทำการเชื่อมซึ่งอุณหภูมิที่ใช้คือ 350 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิระหว่างเชื่อมให้คงที่อยู่ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส การเชื่อมเป็นแบบเดินแนวบนผิวของแผ่นเหล็กหล่อโดยไม่ส่ายลวดเชื่อม ทิศทางการเชื่อมจะขนานกับความยาวของแผ่นเหล็กหล่อ ใช้ท่าราบในการเชื่อมทำการเชื่อมพอกแข็งทั้งหมด 3 ชั้น ดังรูปที่ 2 (หมายเลขในรูปที่ 2 แสดงลำดับการเชื่อมชิ้นงาน) และลวดเชื่อมต้องทำการรอบเพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 2 จำนวนชั้นในการเชื่อม [7]

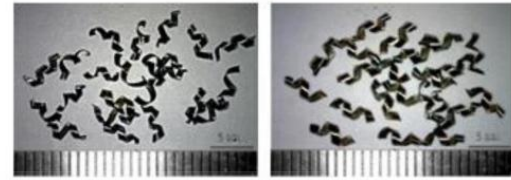
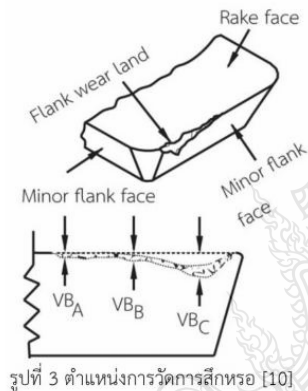
แผ่นเหล็กที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกแข็งนำมาตัดให้ได้ขนาดความยาว 80 มิลลิเมตร และความยาว 20 มิลลิเมตร โดยใช้บริเวณตรงกลางแนวรอยเชื่อม มีการปรับแต่งผิวหน้าชิ้นงานโดยเครื่องเจียรในราบที่บริเวณผิวหน้าพอกแข็งที่บริเวณชั้นที่ 3 การเตรียมเครื่องกัดอัตโนมัติ แบบพลังงานแนวตั้ง ทำได้โดยการจับยึดชิ้นงานด้วยปากกาจับยึดชิ้นงาน เครื่องมือตัดที่ใช้เป็นเม็ดเม็ดซีเมนต์คาร์ไบด์ (ISO class P40) เคลือบผิวด้วย $TiN+TiCN+Al_2O_3$

ตัวแปรในการกัดประกอบด้วยความเร็วตัด 800-1700 รอบ/นาที อัตราป้อน 100 รอบ/นาที และความลึกในการตัด 1 มิลลิเมตร การหล่อเย็นแบบแห้งและแบบเปียก แบบเปียกจะใช้สารหล่อเย็นชนิด Soluble oils (อัตราส่วนผสมตอนนี้

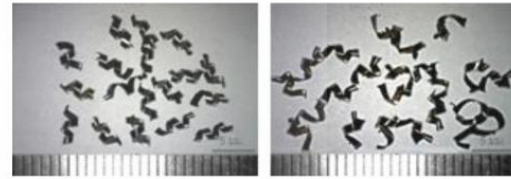


1:20) ในการกัดหนึ่งรอบทำการกัดพื้นที่กว้าง 20 มิลลิเมตร และยาว 80 มิลลิเมตร ความลึก 0.25 มิลลิเมตรรวมทั้งหมด 4 รอบ จะได้ที่ความลึก 1 มิลลิเมตร หลังจากทำการกัดปาดหน้าครบ 1 รอบจะทำการถอดเม็ดมีดออกมาเพื่อทำการวัดการสึกหรอของคมตัด ดังรูปที่ 3

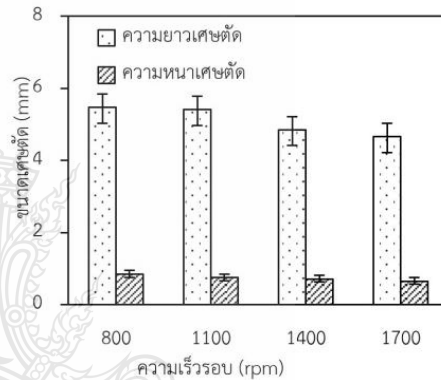
การวัดความหยาบผิวของแนวแกนการกัดแต่ละแนวถูกทำการศึกษาที่ตำแหน่งหัว กลาง และท้ายการทดสอบ [8] เศษกัดที่ได้จากการกัดนำมาวิเคราะห์รูปร่างและถ่ายรูปแบบกล้องไมโครสโคปตามมาตรฐาน ISO 8688-1:1989 (E) [9]



(ก) ความเร็วตัด 800 รอบต่อนาที (ข) ความเร็วตัด 1100 รอบต่อนาที



(ค) ความเร็วตัด 1400 รอบต่อนาที (ง) ความเร็วตัด 1700 รอบต่อนาที



(จ) ความยาวและความหนาเศษตัด
 รูปที่ 4 ลักษณะเศษตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น

3. ผลการทดลอง

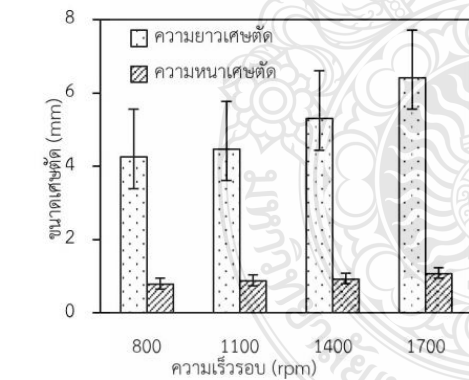
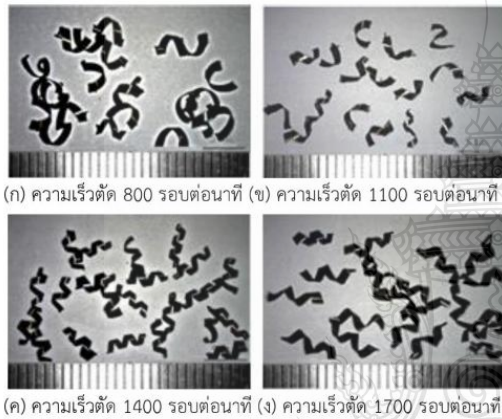
รูปที่ 4 (ก) ถึง (ง) แสดงถึงเศษที่ได้จากการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25 แบบไม่ใช้สารหล่อเย็น ที่ความเร็วในการตัด 800-1700 รอบต่อนาที และอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งเศษการกัดถูกนำมาตรวจสอบและวิเคราะห์ที่ความลึกในการกัด 1 มิลลิเมตรจากผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกแข็ง ในการตรวจสอบพบว่าเศษที่ได้มีรูปร่างลักษณะเป็นเกลียวแบบต่อเนื่อง เศษการกัดมีความหนาและความยาวที่ลดลงเมื่อความเร็วรอบในการกัดมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4 (จ) ที่ความเร็วในการตัด 800 รอบต่อนาที มีค่าความยาวเศษยาวที่สุดมีขนาด 5.470 มิลลิเมตร และความหนาเศษตัดขนาด 0.843 มิลลิเมตร ส่วนความยาวเศษและความหนาเศษที่มีขนาดสั้นที่สุด พบได้ที่ความเร็วในการตัด 1700 รอบต่อนาที ซึ่งแสดงความยาวเศษ 4.670 มิลลิเมตรและความหนาขนาด 0.652 มิลลิเมตร

รูปที่ 5 (ก) ถึง (ง) แสดงถึงลักษณะเศษการตัดที่ได้จากการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25 แบบใช้สารหล่อเย็น ความเร็วกัด 800-1700 รอบต่อนาที ความลึกในการกัด 1 มิลลิเมตรจากผิวตัดหน้าโลหะเชื่อมคล้ายกับรูปที่ 4 และอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาที พบว่าเศษที่ได้จากการกัดมีลักษณะเป็นเกลียวยาวต่อเนื่อง และมีค่าความยาวและความหนาของเศษการกัดเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบของการกัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นค่าที่สวนทางกับการกัดโดยไม่ใช้สารหล่อเย็นในรูปที่ 4 ความยาวเศษตัดที่สั้นที่สุดพบได้ที่ความเร็ว 800 รอบต่อนาที ซึ่งมีค่าความยาวเศษ 4.250 มิลลิเมตร และความหนาเศษ 0.782 มิลลิเมตร ขณะที่ความเร็วรอบที่ให้ค่าความยาวเศษตัดและความหนาเศษตัดที่ยาวที่สุด คือความเร็วรอบ 1700 รอบต่อนาที ที่ค่าความยาวเศษตัด 6.412 มิลลิเมตร และความหนาเศษ 1.072



มิลลิเมตร

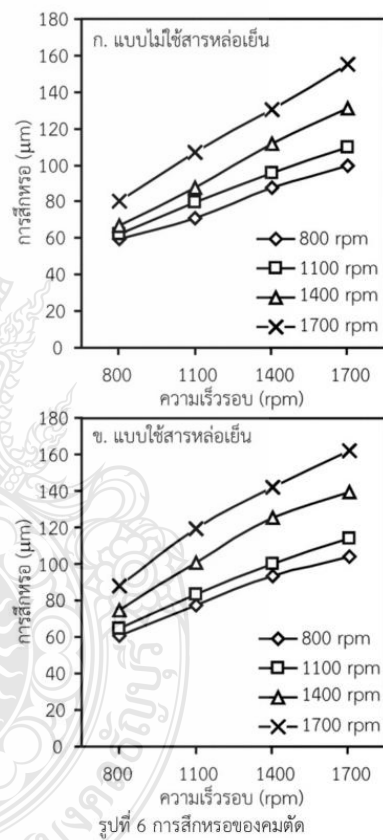
ในการทดสอบความสามารถในการตัดเดือนทั้งแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็น ลักษณะเศษการตัดรูปร่างจะแตกต่างกันออกไป สังเกตได้ว่าแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น ที่ความเร็วในการตัดต่ำความยาวเศษตัดและความหนาเศษตัดจะยาวมากกว่าความเร็วนอกในการตัดสูง และแบบใช้สารหล่อเย็นที่ความเร็วรอบต่ำความยาวเศษตัดและความหนาของเศษตัดจะสั้นกว่าความเร็วนอกสูง



(จ) ความยาวและความหนาเศษตัด
รูปที่ 5 ลักษณะเศษตัดแบบใช้สารหล่อเย็น

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการกัดและการสึกหรอของของคมตัดแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นและแบบใช้สารหล่อเย็น ผลการพบว่าในระบบการกัดในสภาวะแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นที่ความเร็วตัดต่ำทำให้คมตัดเกิดการสึกหรอน้อยกว่าสภาวะแบบใช้สารหล่อเย็น ผลการทดลองนี้ได้คล้ายกับบทความการเปรียบเทียบการสึกหรอคม

ตัดในสภาวะแห้งและเปียกพบว่าสภาวะแห้งทำให้เกิดการสึกหรอของคมตัดน้อยกว่าสภาวะเปียกการเกิดลักษณะนี้เนื่องจากในสภาวะแบบใช้สารหล่อเย็นประกอบด้วยหยดสารหล่อเย็นในปริมาณสูงแต่ไม่สามารถแทรกซึมเข้าสู่ผิวสัมผัสระหว่างคมตัดและชิ้นงานได้ ทำให้ไม่สามารถทำให้เกิดการระบายความร้อนที่เพียงพอเพื่อทำให้อุณหภูมิลดลงมาได้ จึงทำให้เกิดการสึกหรอที่คมตัดมากขึ้น [11]

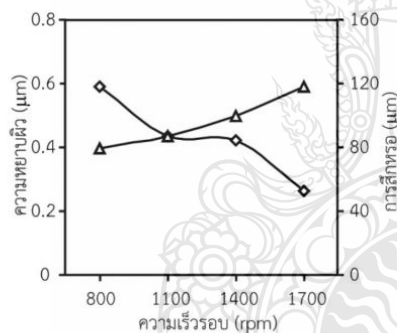


รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการกัด ค่าความหยาบผิวของโลหะเชื่อมที่ผ่านการกัด และการสึกหรอของคมตัด ผลการทดลองพบว่า ที่ความเร็วรอบในการตัดเดือน 1700 รอบต่อนาที มีค่าความหยาบผิว 0.264 ไมโครเมตร และการสึกหรอของคมตัด 118.308 ไมโครเมตร เมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นค่าความหยาบผิวแนวโน้มลดลง แต่ค่าการสึกหรอของคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วในการตัดเดือนที่เพิ่มขึ้น ค่าความหยาบผิวที่มีค่า



มากที่สุดจะอยู่ที่ 0.592 ไมโครเมตร ที่ความเร็วตัด 800 รอบต่อนาที และมีค่าการสึกหรอของคมตัด 79.550 ไมโครเมตร ผลการทดลองพบว่าความเร็วรอบในการกัดผิวหน้ามีผลกระทบต่อความหยาบผิว ความเร็วรอบในการกัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความหยาบผิวลดลง

เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ISO8688-1:1989 (E) พบว่าการสึกหรอคมตัดสามารถเลือกคมตัดวัสดุชนิดนี้มาทำการตัดเฉือนโลหะเชื่อมพอกแข็งเหล็กหล่อ JIS-FC25 ได้ เนื่องจากการสึกหรอคมตัดมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ซึ่งค่าที่ยอมรับโดยประมาณ 200 ไมโครเมตร แต่ค่าที่จะนำมาใช้ต้องอยู่ในตัวแปรที่กำหนดคือ ความเร็วในการตัดเฉือนตั้งแต่ 800 ถึง 1700 รอบต่อนาที และอัตราป้อน 100 มิลลิเมตรต่อนาที และความลึกในการตัด 1 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามการพัฒนาเพื่อหาชนิดวัสดุคมตัดที่ดีที่สุดนี้ ควรมีการพัฒนาต่อไป



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบการกัด ความหยาบผิวโลหะเชื่อม และการสึกหรอของคมตัดของการกัดแบบแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น

4. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสึกหรอคมตัด ความหยาบผิวและรูปร่างเศษการตัดในการกัดโลหะเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กหล่อ JIS-FC25 ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้

4.1 ในการกัดผิวหน้าพบเศษการกัดที่มีลักษณะเป็นเกลียว การกัดผิวหน้าสภาวะแบบใช้สารหล่อเย็นทำให้เกิดเศษการกัดที่ยาวและหนากว่าสภาวะไม่ใช้สารหล่อเย็น

4.2 การเปรียบเทียบการสึกหรอของคมตัดในสภาวะไม่ใช้สารหล่อเย็น พบว่าการกัดในสภาวะไม่ใช้สารหล่อเย็นให้

ค่าการสึกหรอที่ต่ำกว่า

4.3 ในความเร็วรอบในการกัดผิวหน้ามีผลกระทบต่อความหยาบผิวโลหะเชื่อม เมื่อความเร็วรอบในการกัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความหยาบผิวลดลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขตวังไกลกังวล

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Yang, S. Yu, Y. Li, and C. Li, Effect of carbonitride precipitates on the abrasive wear behaviour of hardfacing alloy, *Applied Surface Science*, 254, pp. 5023-5027, 2008.
- [2] M. El Mansori and M. Nouari, Dry machinability of nickel-based weld-hardfacing layers for hot tooling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 1715-1727, 2007.
- [3] H. Çalışkan and M. Küçükököse, The effect of aCN/TiAlN coating on tool wear, cutting force, surface finish and chip morphology in face milling of Ti6Al4V superalloy, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 50, pp. 304-312, 2015.
- [4] Ş. Aykut, E. Bağcı, A. Kentli, and O. Yazicioğlu, Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morphology in face milling of cobalt based super-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool, *Materials & Design*, 28, 1880-1888, 2007.
- [5] E. O. Correa, N. G. Alcântara, L. C. Valeriano, N. D. Barbedo, and R. R. Chaves, The effect of microstructure on abrasive wear of a Fe-Cr-C-Nb hardfacing alloy deposited by the open arc welding process, *Surface and Coatings Technology*, 276, 479-484, 2015.



- [6] กิตติพงษ์ กิมะพงศ์ สุรัตน์ ตริยวณพงศ์ สุรียา ประสมทอง และ วรญา วัฒนจิตสิริ อิทธิพลของการรองพื้นและการพอกผิวแข็งต่อสมบัติทางกลของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C, วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชชมงคลธัญบุรี, 14, 77-90, 2559.
- [7] ปราโมทย์ พูนนายม วรญา วัฒนจิตสิริ อรรถกร จันทร์ชนะ สหัส มีชะคะ และกิตติพงษ์ กิมะพงศ์, อิทธิพลของตัวแปรการกัดต่อรูปร่างเศษกัดและการสึกหรอของคมตัดในการกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กกล้า JIS-S50C, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 27, 37-42, 2559.
- [8] Y. S. Liao, H. M. Lin, and Y. C. Chen, Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47, 1667-1676, 2007.
- [9] J. Gu, G. Barber, S. Tung, and R.-J. Gu, Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts, Wear, 225-229, 273-284, 1999.
- [10] P. Poonayom, V. Wattanajitsiri, and K. Kimapong, A Machinability Study of Hard-Facing Weld Metal on JIS-S50C Carbon Steel, Key Engineering Materials, 728, 85-90, 2017.
- [11] M. Rahman, A. S. Kumar, M.-U. Salam, and M. S. Ling, Effect of Chilled Air on Machining Performance in End Milling, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21, 787-795, 2003.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล	นางสาวเพียงขวัญ ก้นหาภัย
วัน เดือน ปีเกิด	11 มิถุนายน 2535
ที่อยู่	52 หมู่ 2 ตำบล บ้านกล้วย อำเภอบ้านหมี่ จังหวัด ลพบุรี 15110
การศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	ลูกจ้างตาม โครงการแผนที่ภาษีและทรัพย์สิน องค์การบริหารส่วนตำบลบ้านกล้วย อำเภอบ้านหมี่ จังหวัดลพบุรี
เบอร์โทรศัพท์	08-6101-1885
อีเมลล์	piangkwan_k@mail.rmutt.ac.th

