

การศึกษาความสามารถในการตัดเฉือนแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง  
บนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C

MACHINABILITY STUDY OF HARDFACING WELDING BEAD  
ON JIS-S50C CARBON STEEL SURFACE



สหัส มีชะคะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การศึกษาความสามารถในการตัดเนื้อแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง  
บนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การศึกษาความสามารถในการตัดเฉือนแนวเชื่อมพอกแข็ง  
บนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C  
Machinability Study of Hardfacing Welding Bead on JIS-S50C  
Carbon Steel Surface


ชื่อ - นามสกุล      นายสหัส มีชะคะ

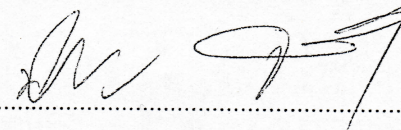
สาขาวิชา      วิศวกรรมการผลิต


อาจารย์ที่ปรึกษา      ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.

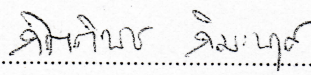
ปีการศึกษา      2559

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล, Dr.-Ing.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิชัย จันทร์มณี, Ph.D.)

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

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

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

วันที่ 22 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความสามารถในการตัดเนื้อแนวเชื่อมพอกแข็งบนผิวเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C
ชื่อ- นามสกุล	นายสหัส มีชะคะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมการผลิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติพงษ์ กิมะพงศ์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2559

## บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการสำคัญที่ทำให้เกิดการเพิ่มสมบัติทางกลของผิวชั้นส่วนเครื่องจักรกลเกษตร อย่างไรก็ตามผิวหน้าที่มีความหยาบของแนวเชื่อมมีความจำเป็นต้องทำให้มีความเรียบก่อนนำไปใช้งาน ด้วยเหตุผลนี้การศึกษาหาค่าตัวแปรการตัดตกแต่งผิวสำเร็จโลหะเชื่อมพอกแข็งจึงมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรการกัดต่อความหยาบผิวโลหะเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C และสมบัติการสึกหรอของเครื่องมือตัด

โลหะเชื่อมพอกแข็งถูกสร้างขึ้นด้วยการเชื่อมอาร์คด้วยลวดหุ้มฟลักซ์บนแผ่นวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง JIS S50C ขนาดกว้าง 20 มิลลิเมตรยาว 80 มิลลิเมตรและหนา 20 มิลลิเมตร โลหะเชื่อมที่ได้ถูกนำไปทำการกัดผิวหน้าด้วยเครื่องมือตัดทำจากวัสดุคาร์ไบด์ (P40) ตัวแปรการกัดประกอบด้วยวิธีการกัดแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็น ความเร็วตัด 100-220 เมตรต่อนาทีอัตราป้อน 0.05-0.20 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร ผลของการกัดผิวหน้าประกอบด้วย รูปร่างเศษตัด การสึกหรอของคมตัด และความหยาบผิวการกัดถูกทำการศึกษาและวิเคราะห์

ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การสึกหรอของคมตัดที่ใช้ในการกัดโลหะเชื่อมที่มีชั้นรองพื้นมีค่าต่ำกว่าโลหะเชื่อมที่ไม่มีชั้นรองพื้น การกัดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกแข็งไม่จำเป็นในการใช้สารหล่อเย็นเนื่องจากการสึกหรอของคมตัดมีค่าสูง ตัวแปรการกัดที่เหมาะสมทำให้เกิดความหยาบผิวเฉลี่ย 0.506 ไมโครเมตรและระยะการสึกหรอเฉลี่ยของคมตัด 680.65 ไมโครเมตรคือ แนวเชื่อมที่มีการสร้างชั้นรองพื้น การไม่ใช้สารหล่อเย็นความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาทีอัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร

**คำสำคัญ:** การเชื่อมพอกแข็ง การกัดผิวหน้า ความหยาบผิว การสึกหรอ สารหล่อเย็น

<b>Thesis Title</b>	Machinability Study of Hardfacing Welding Bead on JIS-S50C Carbon Steel Surface
<b>Name – Surname</b>	Mr. Sahath Meechaka
<b>Program</b>	Manufacturing Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Kittipong Kimapong, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2016

## ABSTRACT

Hardfacing welding is one of the successful methods for increasing the mechanical property of a machine part. However, a high rough surface of the welding line is required to be smoothly machined before applying it as a part in the machine. Therefore, the optimized machined process parameters for finishing the hard-faced weld metal are still being investigated and developed. This research aims to study the effect of the milling process parameters on the hard-faced surface roughness on JIS-S50C carbon steel and the wear property of a cutting tool.

The hard-faced welding metal was made by Arc welding on the carbon steel JIS-S50C plate sized 20 mm. wide, 80 mm. long and 20 mm. thick. The resulting welding metal was adjusted for any variations in milling by cutting tools made from carbide P40 following on coolant and non-coolants, cutting speed of 100-220 m/min, feed rate of 0.05-0.20 mm/tooth and depth of cut of 2 mm. The results of this milling including cutting conditions, wear of the cutting tool, and surface roughness were investigated and analyzed.

The final results were as follows: the wear of the cutting tool edge that was applied to the hard-faced welding metal with the buffer layer, was lower than that of the hard-faced welding metal without the buffer layer. The face-milling on the hard-faced welding metal was not necessary with the cutting fluid because of a high wear at the cutting edge. The optimized milling process parameter that produced the surface roughness of 0.506  $\mu\text{m}$  and the wear distance of 680.65  $\mu\text{m}$  was a welding bead with a buffer layer, no cutting-fluid, cutting speed of 180 m/min, feed rate of 0.05 mm/tooth and depth of cut of 2 mm.

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

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยได้ตั้งวัตถุประสงค์ไว้อย่างสำคัญ เพื่อให้ค้นพบองค์ความรู้ใหม่ ๆ และเพื่อแก้ปัญหาอุปสรรคบางประการที่เกิดขึ้นจากวัตถุประสงค์ชิ้นส่วนอันจะนำมาซึ่งประโยชน์ต่อการผลิตในภาคส่วนต่างๆของเครื่องจักร การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ไปด้วยดีซึ่งได้รับความเมตตาอนุเคราะห์คำแนะนำจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นฤฤทธิ์ กษฤทธิ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงษ์ กิมะพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยะ ปราณิตพลกรัง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ต่อสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี คณะกรรมการสอบ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์วิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์วิทยาลัยวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี แผนกวิชาช่างเชื่อมโลหะ และวิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง แผนกวิชาช่างเทคนิคอุตสาหกรรม พร้อมทั้งบุคลากรทุกสถาบัน

ขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ความรู้ ผู้วิจัยได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ ประโยชน์และคุณค่าอันเกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์และผู้มีพระคุณทุกท่าน



สหัส มีชะคะ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(13)
บทที่ 1 บทนำ.....	14
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	14
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	15
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	16
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน.....	18
2.2 แผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน.....	18
2.3 กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือ (Manual Metal Arc Welding ; MMAW).....	23
2.4 กระบวนการกัดขึ้นรูป (Milling).....	28
2.5 สารหล่อเย็นและการหล่อเย็นชนิดอื่น ๆ.....	33
2.6 สมบัติของวัสดุเครื่องมือตัด.....	33
2.7 ประเภทการสึกหรอของเครื่องมือตัด.....	37
2.8 ลักษณะการคายเศษตัด.....	41
2.9 ความหยาบผิว (Surface Roughness).....	43
2.10 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	46
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	49
3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	49
3.2 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	52

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	54
3.4 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในทดสอบการกัดปาดผิวหน้า.....	55
3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองการกัดปาดผิวหน้า.....	58
3.6 ขั้นตอนการทดสอบ.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล.....	63
4.1 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งแบบรองพื้นและไม่รองพื้นต่อสมบัติ ของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน S50C.....	58
4.2 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถ ในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	68
4.3 อิทธิพลของความเร็วในการตัดแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถ ในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	76
4.4 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถ ในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	87
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
บรรณานุกรม.....	89
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	108



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051 .....	22
ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) .....	23
ตารางที่ 2.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อทางเลือกกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ .....	26
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) .....	28
ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อม (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) .....	50



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 อุปกรณ์จับยึดคมตัดและเครื่องมือคมตัดที่ใช้สำหรับกัดปาดผิวหน้า.....	14
รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมมูลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ .....	20
รูปที่ 2.2 ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลอง .....	23
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์การเชื่อมอาร์กสวดหุ้มฟลักซ์ .....	24
รูปที่ 2.4 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยสวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์.....	25
รูปที่ 2.5 การกัดปาดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเครื่องมือตัดรูปทรงสี่เหลี่ยม .....	29
รูปที่ 2.6 การกัดชิ้นรูปในงานประเภทต่างๆ .....	30
รูปที่ 2.7 เทคนิคการกัดชิ้นรูปในแบบต่างๆ.....	30
รูปที่ 2.8 ลักษณะมุมของคมตัดที่ตัดเนื่องชิ้นงาน .....	31
รูปที่ 2.9 วิธีการระบายความร้อนในกระบวนการกัดชิ้น.....	33
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเครื่องมือตัดชนิดคาร์ไบด์ .....	35
รูปที่ 2.11 อิทธิพลของ WC และ CO ที่มีต่อสมบัติทางกลของซีเมนต์คาร์ไบด์.....	36
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของขนาดเกรนต่อความแข็งและความเหนียวของซีเมนต์คาร์ไบด์ .....	37
รูปที่ 2.13 รูปแบบการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด.....	38
รูปที่ 2.14 ประเภทการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด.....	38
รูปที่ 2.15 รูปแบบการสึกหรอตามของเครื่องมือคาร์ไบด์ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977.....	40
รูปที่ 2.16 ลักษณะต่างๆของการเกิดเศษตัด 3 แบบ.....	41
รูปที่ 2.17 การจำแนกประเภทของรูปแบบเศษตัดตามมาตรฐาน ISO 3685-1977.....	42
รูปที่ 2.18 การจำแนกประเภทของประเภทเศษตัด .....	43
รูปที่ 2.19 ลักษณะความหยาบผิวของชิ้นงาน .....	44
รูปที่ 2.20 แสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยของผิว .....	44
รูปที่ 2.21 แสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง .....	45
รูปที่ 2.22 แสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม.....	45
รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลอง .....	49
รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง.....	51
รูปที่ 3.3 การอบสวดเชื่อมและชิ้นงาน .....	51

## สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง .....	52
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง .....	53
รูปที่ 3.6 การออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบ .....	54
รูปที่ 3.7 เครื่องเจียรระโนแนวราบ .....	55
รูปที่ 3.8 เครื่องกัดอัตโนมัติแบบเพลงานแนวตั้ง .....	56
รูปที่ 3.9 เครื่องมือคมตัด .....	57
รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตั้งค่าชิ้นงานทดสอบ .....	58
รูปที่ 3.11 การทดสอบการกัดปาดหน้า .....	59
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด .....	60
รูปที่ 3.13 การวัดพื้นที่สึกหรอตามของเครื่องมือคาร์ไบด์ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 .....	60
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความหยาบผิว .....	61
รูปที่ 3.15 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ .....	62
รูปที่ 4.1 โครงสร้างมหาโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง .....	63
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคโลหะฐาน .....	64
รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้น .....	65
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น .....	66
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทดสอบและจำนวนชั้นที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง .....	67
รูปที่ 4.6 ลักษณะของเศษตัดแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็น ความเร็วตัด 180 เมตร ต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	69
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นที่ส่งผลต่อความหนาของ เศษตัด ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	69
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นส่งผลต่อพื้นที่การสึก หรอของคมตัด ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 ลักษณะการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดของแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็น ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร ..	71
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นส่งผลต่อความหยาบผิว...	72
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุของเครื่องมือตัดแบบมีการใช้สารหล่อเย็น.....	74
รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุของเครื่องมือตัดแบบไม่มีสารหล่อเย็น.....	75
รูปที่ 4.13 ลักษณะของเศษตัดภายใต้เงื่อนไขความเร็วตัดที่อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	77
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหนาของเศษตัดที่อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร.....	77
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความเร็วตัดและระยะทางในการตัดที่ส่งผลต่อพื้นที่สึกหรอ ของคมตัดที่อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	78
รูปที่ 4.16 ลักษณะการสึกหรอของคมตัดภายใต้เงื่อนไขความเร็วตัดที่อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตร ต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	79
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด. อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร.....	80
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและการสึกหรอ คมตัด อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร .....	81
รูปที่ 4.19 ลักษณะของเศษตัดภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อนที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	82
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์อัตราป้อนที่ส่งผลต่อความหนาของเศษตัดที่ความเร็วในการตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร.....	82
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของอัตราป้อนและระยะทางในการตัดที่ส่งผลต่อพื้นที่สึกหรอของคม ตัดที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	83
รูปที่ 4.22 ลักษณะการสึกหรอของคมตัดภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อนในการตัดที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร.....	84

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอคมตัด ตัดที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	85
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของ คมตัดที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร .....	86



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	กระแสนเชื่อม
BM	โลหะเดิม (Base Metal)
SMAW	กระบวนการเชื่อมอาร์กสวัดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding)
HAZ	บริเวณกระทบร้อน (Heat Affect Zone)
HV	หน่วยความแข็ง (Micro Hardness Viker)
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope)
WM	บริเวณแนวเชื่อม (Weld Metal)
Kgf	แรงกด (กิโลกรัม)
Mm	มิลลิเมตร



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

การเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นกรรมวิธีหนึ่งในการซ่อมบำรุงที่มีความนิยมมากกว่าวิธีการอื่น ๆ เนื่องจากการเชื่อมเป็นวิธีการที่มีความยุ่งยากและสลับซับซ้อนในการเตรียมเครื่องมือวัสดุและอุปกรณ์การทำงานน้อยกว่า การนำเอาผิวเชื่อมพอกแข็งที่เชื่อมด้วยการอาร์กกลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ไปใช้งาน ผิวพอกแข็งจำเป็นต้องมีการปรับแต่งด้วยกรรมวิธีทางกล เช่น การกัดผิวหน้า หรือการกรัด เพื่อให้ได้ผิวงานที่มีความสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามความสามารถในการตัดเฉือน (Machinability) เนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็งนั้นมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากสมบัติของผิวพอกแข็งที่มีความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) และความสามารถในการต้านทานการสึกกร่อนสูง (Wear resistance) การตัดเฉือนเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็งจึงเกิดขึ้นได้ค่อนข้างยาก ส่งผลทำให้เกิดความหยาบผิวที่สูง มีดกัดที่ใช้ในการกัดผิวหน้าเกิดการสึกหรอและความเสียหายสูง นอกจากนี้ระบบการหล่อเย็นที่ใช้อยู่เป็นแบบเปียกอาจทำให้เกิดการสั่นเปลื้องและทำลายสิ่งแวดล้อมได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าว โครงการวิจัยนี้จึงมีกรอบแนวคิดในการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเฉือนเนื้อโลหะเชื่อมพอกแข็งที่เกิดจากการเชื่อมอาร์กกลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทำให้เกิดอุณหภูมิและความเครียดที่เพิ่มขึ้นสูงบริเวณคมตัดส่งผลต่อการสึกหรอและความเสียหายของเครื่องมือตัดได้ง่ายก่อนเวลาอันควร [1] จากปัญหาที่เกิดขึ้นกับการสึกหรอและความเสียหายของเครื่องมือตัดมีผลกระทบต่อในภาคอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องมีการหาค่าตัวแปรการตัดเฉือนที่เหมาะสมเพื่อยืดอายุการใช้งานเครื่องตัดเพิ่มขึ้น [2]



รูปที่ 1.1 อุปกรณ์จับยึดคมตัดและเครื่องมือคมตัดที่ใช้สำหรับกัดปาดผิวหน้า [3]

ที่ผ่านมาการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการตัดเฉือน ความเร็วการตัด อัตราการป้อน และความลึกการตัด ที่มีผลต่อการสึกหรอเครื่องมือตัด รูปร่างของเศษก๊ัด และแรงตัด พบว่าแรงในการตัดเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกการตัดและอัตราการป้อนเพิ่มขึ้น ความเร็วการตัดคือตัวแปรในการเร่งการเกิดการสึกหรอของคมตัด [4] การศึกษาการแสดงแบบจำลองการกัดผิวหน้า (Face milling) 3 มิติ เหล็กกล้า S152-3 และ Ck60 จากผลการจำลองสถานการณ์พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาจาก CAD (Computer Aided Design) มีความเที่ยงตรงสามารถนำมาใช้ในการพยากรณ์สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการกัดผิวหน้าชิ้นงานได้ [5] และการศึกษาวัสดุประกอบนาโนผิวเหล็กกล้าหลัก (105 W Cr 6 Steel) ที่นำไปทำการอบชุบด้วยความร้อน พบว่าความแข็งของชั้นวัสดุประกอบนาโนที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร มีค่าสูงกว่าวัสดุประกอบหลักเริ่มต้นวัสดุตัดที่ผลิตใหม่จากวัสดุประกอบนาโน โดยคือ CBN (Cubic-Boron Nitride) มีค่าความต้านทานการสึกหรอสูงกว่าและอายุการใช้งานยาวกว่า [6] เป็นต้น

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาผลกระทบจากการระบายความร้อนแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นของกรรมวิธีการกัดปาดผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง ที่มีผลต่อการสึกหรอบริเวณคมตัดของเครื่องมือตัดและความเรียบผิวของ โลหะเชื่อมพอกผิวแข็งเพื่อประยุกต์ใช้ในการซ่อมบำรุงในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลตัวแปรการกัดปาดหน้าที่มีผลต่อสมบัติผิวพอกแข็งการเชื่อมอาร์ก ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์เหล็กกล้าคาร์บอน S50C

1.2.2 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการกัดปาดหน้าและสมบัติของชั้นพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน S50C

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 การเชื่อมอาร์ก ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shielded metal arc welding: SMAW) ในการเชื่อมชิ้นงานทดลอง

1.3.2 ลวดเชื่อม 2 ประเภท คือ ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer Electrode) เป็นลวดประเภทไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Electrode) และลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกแข็ง (Hard-Facing Layer Electrode) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั้ง 2 ชนิด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 350 มิลลิเมตร การเชื่อมแบบรองพื้น (Buffering) และการเชื่อมแบบไม่รองพื้น (Non-Buffering)



1.3.3 การเชื่อมพอกแข็งดินเหนวนบนแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอน S50C จำนวน 3 ชั้น

1.3.4 ตัวแปรการเชื่อมประกอบด้วย กระแสไฟเชื่อม ชั้นรองผิวพอกแข็ง เป็นตัวแปรที่มีการกำหนดค่าของปริมาณกระแสเชื่อมในการสร้างชั้นรองพื้นที่ 100 แอมแปร์ และปริมาณกระแสเชื่อมในการสร้างชั้นพอกผิวแข็งที่ 115 แอมแปร์ กำหนดให้มีอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน (Pre-Heat Temperature) และอุณหภูมิขณะที่ยาวเชื่อม (Interphase temperature) การเชื่อมที่ 150 องศาเซลเซียส

1.3.5 ทำการกัดปาดหน้าผิวพอกแข็งการเชื่อมอาร์กลดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ โดยมีตัวแปรการกัดปาดหน้าประกอบด้วย

1.3.5.1 ความเร็วตัด 100, 140, 180 และ 220 เมตรต่อนาที [39]

1.3.5.2 อัตราป้อนต่อฟุต 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 มิลลิเมตรต่อฟุต [39]

1.3.5.3 ความลึกที่ 2.0 มิลลิเมตร

1.3.5.4 เครื่องมือตัดรูปทรงเรขาคณิตทำจากวัสดุคาร์ไบด์ (Carbide) ตามมาตรฐาน ISO (International Standards Organization) ระดับ P40 เคลือบผิวด้วย  $TiN+TiCN+Al_2O_3$

1.3.5.5 การกัดปาดหน้าแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็น

1.3.5.6 สารหล่อเย็นชนิด Soluble oils อัตราส่วนผสม 1 : 20

1.3.6 ศึกษาสมบัติผิวพอกแข็ง

1.3.7 ศึกษาความหยาบผิว รูปร่างผิว เศษการกัด การสึกหรอของเครื่องมือคมตัด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 แก้ปัญหาในการดำเนินงานของหน่วยงานที่ทำการวิจัย โดยการเพิ่มศักยภาพการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเฉือนของชั้นผิวพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S50C

1.4.2 เป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาองค์ความรู้พื้นฐานของการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเฉือนของชั้นผิวพอกแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S50C ให้แก่ภาคอุตสาหกรรมการซ่อมบำรุงเครื่องกล

1.4.3 บริการความรู้แก่ภาครัฐกิจเพื่อนำไปสู่การผลิตเชิงพาณิชย์ โดยการจัดเตรียมข้อมูลวิธีการและผลการทดลองเบื้องต้น ที่สามารถนำเสนอให้แก่ภาคอุตสาหกรรมการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล และสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อทำการซ่อมบำรุงได้ทันที

1.4.4 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต โดยคาดว่าผลการทดลองที่ได้จะเป็นหนึ่งทางเลือกในการใช้เป็นข้อมูลพิจารณาการใช้การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเนื้องอกของชั้นผิวหนังแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S50C ให้แก่ภาคอุตสาหกรรมการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล เพื่อลดเวลาการทำงานทดลองหรือการเลือกใช้ตัวแปรการต่างๆ เพื่อให้ได้ตัวแปรการกัดที่มีความเหมาะสมต่อไป และทำให้ได้การทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงที่มีต้นทุนการผลิตต่ำขึ้น

1.4.5 กลุ่มช่างซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล ได้ข้อมูลในการศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการตัดเนื้องอกของชั้นผิวหนังแข็งเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง S50C ให้แก่ภาคอุตสาหกรรมการซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เหล็กกล้าคาร์บอน [7]

เหล็กกล้าคาร์บอน แบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ

2.1.1 เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีความเหนียวแต่ไม่มีความแข็งแรงมากนักสามารถนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องจักร เช่น งานกลึง งานกัด งานไส งานเจาะได้ง่าย เนื่องจากเป็นเหล็กที่อ่อนสามารถนำมารีดหรือตีเป็นแผ่นได้ง่ายเหมาะกับงานที่ไม่ต้องการทนต่อแรงดึงสูงมากนักโดยไม่สามารถนำมาชุบแข็งได้ แต่ถ้าต้องการนำมาชุบแข็งต้องใช้วิธีการเติมคาร์บอนที่ผิวชิ้นงานก่อน เพราะเหล็กกล้าคาร์บอนชนิดนี้มีคาร์บอนผสมอยู่น้อยมีไม่เกิน 0.2% การนำไปใช้งาน เช่น เหล็กแผ่น ท่อประปา เหล็กเส้นในงานอุตสาหกรรม เหล็กเส้นในงานก่อสร้าง กระจังบรรจุอาหาร แผ่นสังกะสี ตัวถังรถยนต์ ถังน้ำมัน หมุดย้ำ สกรู ลวด สลักเกลียว ชิ้นส่วนอะไหล่เครื่องจักรกล โซ่ บานพับประตู เป็นต้น

2.1.2 เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรงและทนต่อแรงดึงมากกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ 0.2-0.59% แต่มีความเหนียวน้อยกว่า นอกจากนี้ยังให้คุณภาพการขึ้นรูปที่ดีกว่าและสามารถนำไปชุบผิวแข็งได้ เหมาะกับงานที่ต้องการทนต่อแรงดึงปานกลาง ต้องทนต่อการสึกหรอที่ผิวหน้า และต้องมีความแข็งแรง แต่ต้องมีความแข็งบ้างพอสมควร เช่น ทำชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ทำรางรถไฟ เพลาเครื่องจักรกล เฟือง หัวค้อน ก้านสูบ สปริง ชิ้นส่วนอุปกรณ์การเกษตร ไช้ควง ท่อเหล็ก น็อต สกรูที่ต้องการความแข็งแรง เป็นต้น

2.1.3 เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (High Carbon Steel) เป็นเหล็กที่มีความแข็งแรง และทนต่อแรงดึงสูง มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนผสมอยู่ 0.6-2.0% สามารถนำไปชุบแข็งได้แต่จะมีความเปราะ เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความทนทานต่อการสึกหรอ เช่น ดอกสว่าน สกัด กรรไกร มีดกลึง ใบเลื่อยตัดเหล็ก ดอกทำเกลียว ใบมีดโกน ตะไบ แผ่นเกจ เหล็กสกัด สปริงแหนบ ลูกบอล แบร็ง เป็นต้น

#### 2.2 แผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน [8]

เฟสโครงสร้างและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน การศึกษาแผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน มีความสำคัญเพราะคุณสมบัติของเหล็กที่ใช้ในงานวิศวกรรมจะ

เปลี่ยนแปลงตามปริมาณคาร์บอนที่ผสมอยู่ในเหล็ก การที่รู้และเข้าใจถึงคุณสมบัติต่าง ๆ ของเหล็กได้  
ดีนั้นจะต้องเข้าใจเรื่องของแผนภูมิสมดุลของเหล็ก-คาร์บอน ก่อนเป็นหลักในการศึกษาแผนภูมินี้  
จะต้องทำความเข้าใจความหมายของสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องก่อนดังต่อไปนี้

เฟอร์ไรท์ (Ferrite) หรือ เหล็กอัลฟา ( $\alpha$ ) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กอัญรูป  $\alpha$  กับ  
คาร์บอน ซึ่งคาร์บอนสามารถละลายได้ในเหล็กอัลฟา ( $\alpha$ ) มากที่สุด 0.0218% ที่อุณหภูมิ 727 องศา  
เซลเซียส มีระบบผลึกแบบ bcc. (Body Centered Cubic)

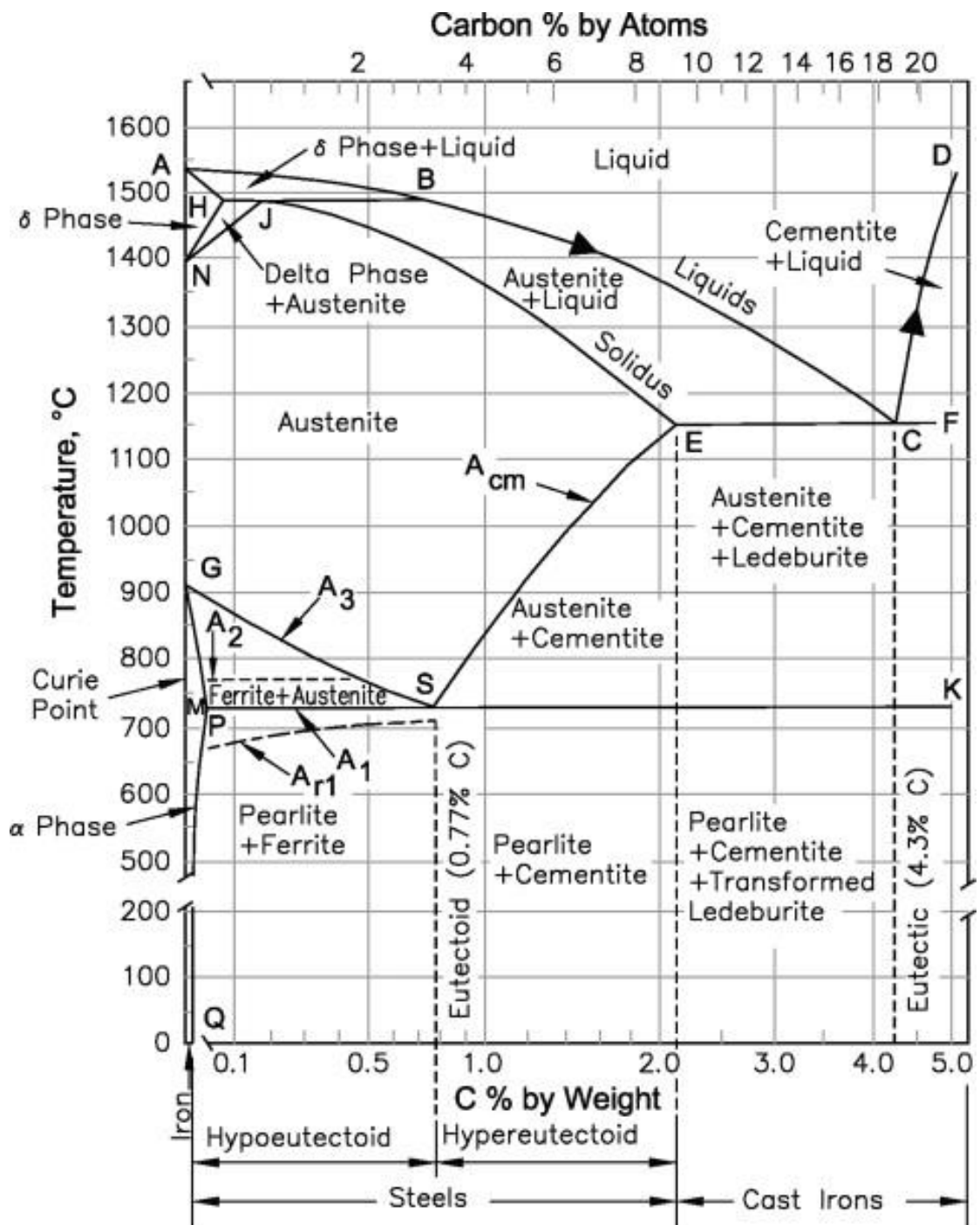
ออสเทนไนท์ (Austenite) หรือ เหล็กแกมมา ( $\gamma$ ) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กอัญรูป  
แกมมา ( $\gamma$ ) กับคาร์บอน ซึ่งคาร์บอนละลายในเหล็กแกมมา ( $\gamma$ ) นี้ได้มากที่สุด 2.11% ที่อุณหภูมิ 1148  
องศาเซลเซียส มีระบบผลึกแบบ fcc. (Face Centered Cubic) ซึ่งสังเกตได้ว่า คาร์บอนเป็นตัวที่ช่วยให้  
ออสเทนไนท์มีความสมดุลมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลเหล็ก-คาร์บอน เหล็กบริสุทธิ์มี  
ช่วงเป็นออสเทนไนท์ที่อุณหภูมิ 912-1394 องศาเซลเซียส แต่ขอบเขตนี้จะกว้างขึ้นเมื่อมีคาร์บอน  
ละลายอยู่

เฟอร์ไรท์ หรือ เหล็กเดลต้า ( $\delta$ ) คือ สารละลายของแข็งของเหล็กกับคาร์บอน ในช่วง  
อุณหภูมิใกล้จุดหลอมตัวของเหล็กที่อุณหภูมิ 1394-1538 องศาเซลเซียส คาร์บอนสามารถละลายใน  
เหล็กได้สูงสุด 0.09% ที่อุณหภูมิ 1495 องศาเซลเซียส มีระบบผลึกแบบ BCC (Body Centered Cubic)  
เช่นเดียวกับ เฟอร์ไรท์หรือเหล็กอัลฟา ( $\alpha$ )

ซีเมนไตท์ (Cementite หรือ Iron Carbide) เมื่อปริมาณคาร์บอนแผนภูมิสมดุลเหล็ก-  
คาร์บอน มีมากเกินไปที่จะละลายได้ในเฟอร์ไรท์หรือออสเทนไนท์ได้หมดคาร์บอนที่เหลือจะจับตัว  
กับเหล็กเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะระหว่างเหล็กกับคาร์บอนโดยมีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67% มีสูตร  
ทางเคมี  $Fe_3C$  มีความแข็งสูงแต่จะเปราะและแตกหักได้ง่าย เมื่อได้รับแรงกระแทก

เพิร์ลไลท์ (Pearlite) คือ ผลึกที่เกิดร่วมกันระหว่างเฟอร์ไรท์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.0218% กับ  
ซีเมนไตท์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67% เกิดจากปฏิกิริยา Eutectoid ในขณะที่ทำให้เหล็กเย็นตัวช้าๆ  
ตรงอุณหภูมิ 727 องศาเซลเซียส การเกิดเฟอร์ไรท์และซีเมนไตท์จะเกิดพร้อมกันที่อุณหภูมิคงที่ที่เกิด  
ผลึกเป็นแถบยาว ๆ สลับกันระหว่างเฟอร์ไรท์กับซีเมนไตท์ ดังนั้นเพิร์ลไลท์จึงไม่ใช่เฟสเดี่ยวแต่เป็น  
โครงสร้างที่เกิดจากสองเฟสรวมกัน

แผนภูมิสมดุลของเหล็กกับคาร์บอนเป็นแผนภูมิประเภทที่เกิดการละลายเข้ากันเป็นเฟส  
เดียวในสภาพของเหลวแต่มีการแยกเป็นหลายเฟสในสภาพของแข็งกล่าวคือ ในสภาพของแข็ง  
คาร์บอนจะรวมตัวกับเหล็กทั้งในสภาพสารละลายของแข็ง (Ferrite  $\alpha$ , Austenite  $\gamma$  และ Ferrite  $\delta$ )  
และสารประกอบเชิงโลหะ ( $Fe_3C$ ) จากแผนภูมิสมดุลจะปรากฏปฏิกิริยา 3 ปฏิกิริยา คือ



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมดุลเหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ [8]

ที่อุณหภูมิ 1495°C จะทำให้เกิดปฏิกิริยา Peritectic โดยเฟอร์ไรต์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.09 % รวมตัวกับเหล็กหลอมเหลวที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.53% และรวมตัวกับออสเตนไนต์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.17%

ที่อุณหภูมิ 1148°C ให้ปฏิกิริยา Eutectic โดยเหล็กหลอมเหลวที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 4.3% เกิดการแข็งตัวให้สารละลายของแข็งออสเตนไนต์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 2.11% รวมกับซีเมนไตต์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67%

ที่อุณหภูมิ 727°C ให้ปฏิกิริยา Eutectoid โดยออสเตนไนต์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.77% แยกตัวให้เฟอร์ไรต์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 0.0218% กับซีเมนไตต์ที่มีคาร์บอนผสมอยู่ 6.67% จะได้โครงสร้างสุดท้ายเป็นเพิร์ลไลท์

เส้นแบ่งบริเวณของเขตต่าง ๆ ที่ปรากฏบนแผนภูมิสมมูลมีดังนี้

A<sub>1</sub> คือ เส้นแสดงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา Eutectoid คือ ที่อุณหภูมิ 727°C

A<sub>2</sub> คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะแม่เหล็กของเฟอร์ไรต์ ซึ่งจะอยู่ที่อุณหภูมิ 770°C เมื่อเหล็กร้อนเกินกว่าอุณหภูมินี้แม่เหล็กจะไม่ดูดเส้น A<sub>2</sub> ไม่มีการเปลี่ยนโครงสร้างดังนั้นจึงมักไม่ค่อยปรากฏในแผนภูมิสมมูล

A<sub>3</sub> คือ เส้นอุณหภูมิแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างออสเตนไนต์กับเฟอร์ไรต์  $\alpha$

A<sub>4</sub> คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างออสเตนไนต์กับเฟอร์ไรต์  $\delta$

A<sub>cm</sub> คือ เส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงระหว่างออสเตนไนต์กับซีเมนไตต์

เหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับโครงสร้างเครื่องจักรมาตรฐาน JIS G4051 มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่นกำหนดให้เหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับโครงสร้างเครื่องจักรซึ่งผลิตจากการขึ้นรูปร้อน เช่น การรีดร้อนหรือการตีขึ้นรูปร้อนหลังจากนั้นนำไปทำการตัดและปรับปรุงคุณสมบัติด้วยความร้อนเรียกลักษณะนี้ว่าเหล็กกล้า เหล็กกล้าแบ่งออกเป็น 23 กลุ่ม มีสัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีดังแสดงตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ส่วนผสมต่างๆจากเป้าหมายหลอม เช่น Cu Ni Cr และ Ni + Cr สำหรับกลุ่ม S09CK S15CK S20CK มีปริมาณไม่เกิน 0.25%, 0.20%, 0.20% และ 0.30% สำหรับเหล็กกล้ากลุ่มอื่นๆ Cu Ni Cr และ Ni + Cr ไม่ควรเกิน 0.30%, 0.20%, 0.20% และ 0.35%

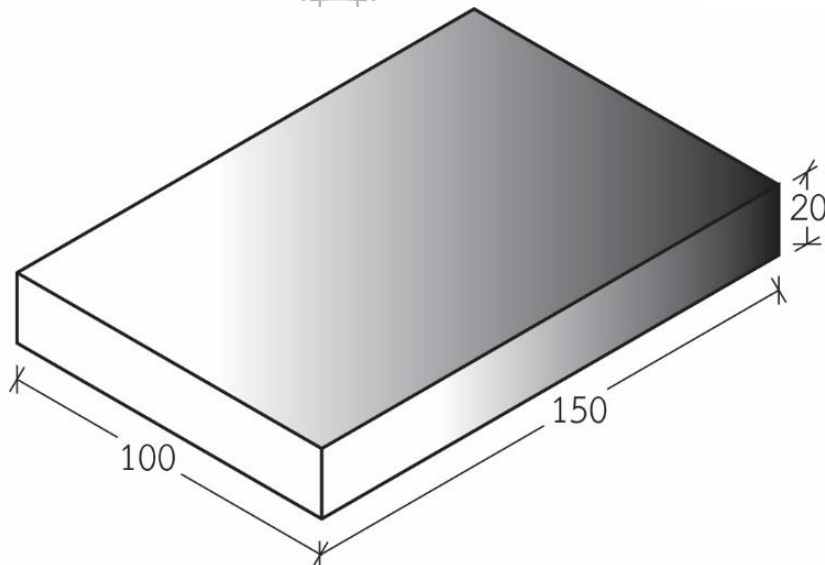
ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้ามาตรฐาน JIS G4051

ส่วนผสมทางเคมี (% โดยน้ำหนัก)					
สัญลักษณ์	C	Si	Mn	P	S
S 10C	0.08-0.13	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max.	0.035 max.
S 12C	0.10-0.15	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max	0.035 max.
S 15C	0.13-0.18	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max	0.035 max.
S 17C	0.15-0.20	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max	0.035 max.
S 20C	0.18-0.23	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max	0.035 max.
S 22C	0.20-0.25	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max	0.035 max.
S 25C	0.22-0.28	0.15-0.35	0.30-0.60	0.030 max	0.035 max.
S 28C	0.25-0.31	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 30C	0.27-0.33	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 33C	0.30-0.36	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 35C	0.32-0.38	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 38C	0.35-0.41	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 40C	0.37-0.43	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 43C	0.40-0.46	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 45C	0.42-0.48	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 48C	0.45-0.51	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 50C	0.47-0.53	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 53C	0.50-0.56	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 55C	0.52-0.53	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 58C	0.55-0.61	0.15-0.35	0.60-0.90	0.030 max	0.035 max.
S 09C K	0.07-0.12	0.15-0.35	0.30-0.60	0.025 max	0.025 max.
S 20C K	0.18-0.23	0.15-0.35	0.30-0.60	0.025 max	0.025 max.

โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (JIS S50C) ที่มีส่วนเคมีดังแสดงในตารางที่ 2.1 แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนถูกตัดให้มีลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร และความหนา 20 มิลลิเมตร ดังแสดงรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)

Material		Chemical composition (%)						
Type	Standard	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	
Medium carbon steel	JIS G 4051 S50C	0.52	0.35	0.99	0.04	0.04	0.20	



รูปที่ 2.2 ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลอง (หน่วย : มิลลิเมตร)

### 2.3 กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือ (Manual Metal Arc Welding ; MMAW) [9]

กระบวนการเชื่อมอาร์คโลหะด้วยมือ (Manual Metal Arc Welding ; MMAW) มักจะถูกเรียกว่าการเชื่อมอาร์คลวดหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding; SMAW) มันเป็นรูปแบบที่โดดเด่นของการเชื่อมแบบหลอมละลายจนถึงต้นปี 1980 จะใช้แท่งอิเล็กโทรดที่ประกอบด้วยแกนลวดที่มีการเคลือบภายนอกที่มีส่วนผสมของสารเช่นสารเคมี, แร่ธาตุและผงเหล็ก จะทำในช่วงของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางแกนกับแต่ละขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถูกผลิตไว้ใช้งานให้เหมาะสมกับเวลาปัจจุบัน



โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมเกี่ยวข้องกับการอาร์ระหว่างขั้วไฟฟ้าและชิ้นงานที่มีความร้อนจากจาก ลวดเชื่อมจะถ่ายเทไปที่ชิ้นงานเพื่อให้เกิดการหลอมละลาย โดยจะเกิดเป็นแก๊สเพื่อปกคลุมบ่อ หลอมเหลวเพื่อป้องกันบรรยากาศจากภายนอกเข้าทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อมเมื่อเย็นตัวลงจะ กลายเป็นสแลกปกคลุมแนวเชื่อมเพื่อลดอัตราการเย็นตัวและสุดท้ายจะโดนกำจัดออกไป

อุปกรณ์การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ตามที่แสดงในรูปที่ 2.2 เป็นวิธีการเตรียม อุปกรณ์ที่ง่ายต่อการใช้งานที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับงานเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เช่น งานเชื่อม โครงสร้าง นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานกลางแจ้งได้ การเปลี่ยนแท่งอิเล็กโทรดง่ายต่อการใช้งานและ เวลาจะใช้สำหรับการเอาตะกรันออกไปหลังจากที่เชื่อมเสร็จค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ ที่ ต้องการกำจัดป้องกันซึ่งความเหมาะสมกับการทำงานขึ้นอยู่กับกระแส

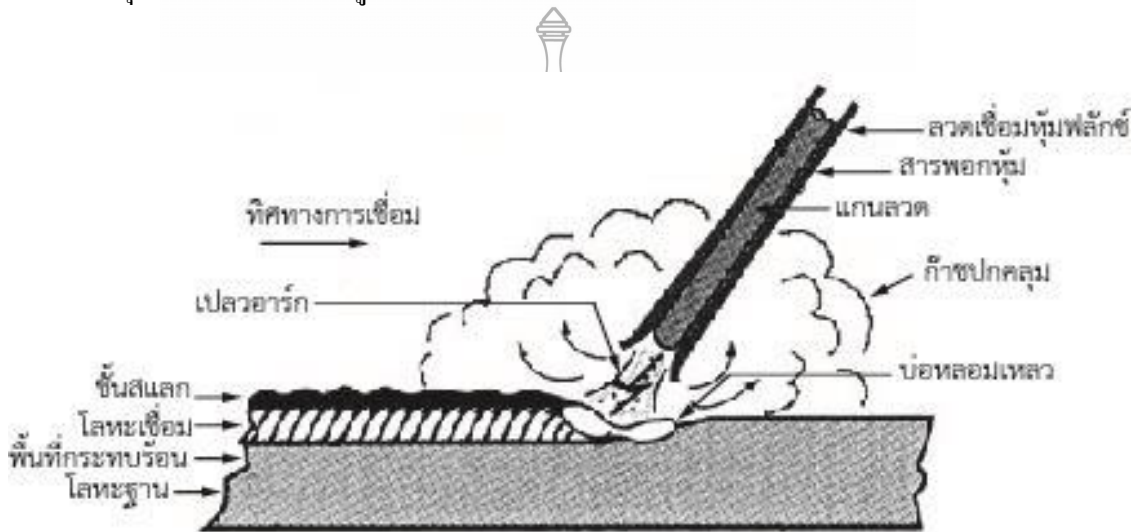


รูปที่ 2.3 อุปกรณ์การเชื่อมอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding; SMAW) [10]

กระบวนการเชื่อมแบบอาร์กลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเชื่อมไฟฟ้ามี 2 ชนิดคือ กระแสไฟฟ้าสลับ (Alternating current : AC) และ กระแสไฟฟ้าตรง (Direct current : DC) กระแสตรง (DC) กระแสไฟเชื่อมแบบกระแสสลับ (AC) ซึ่งเป็นกระแสไฟที่มีทิศทางเคลื่อนที่ สลับกันเป็นเส้นโค้งไซน์ การเคลื่อนที่ของกระแสสลับดังกล่าวจะมีผลทำให้เปลวอาร์กเปลี่ยนขนาด ตลอดเวลา เปลวอาร์กจึงไม่นิ่งขณะเชื่อมดังนั้นช่างเชื่อมจึงต้องใช้ทักษะฝีมือในการควบคุมอาร์ก และ จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงเพียงพอน้อย 50 V หรือยิ่งมากกว่า กระแสไฟฟ้าตรง (Direct current : DC) กระแสตรง (DC) ซึ่งเป็นกระแสไฟที่มีทิศทางเคลื่อนที่ เดียวจากขั้วหนึ่งไปยังอีกขั้วหนึ่ง ในกรณีที่ใช้กระแสเชื่อมเป็นกระแสตรงซึ่งเกิดจากการบังคับ กระแสสลับให้ไหลได้ทางเดียวเพื่อให้ได้กระแสเชื่อมที่ต่อเนื่องไม่เป็นคลื่นทำให้กระแสเชื่อมเรียบ

เปลวอาร์กมีความเสถียรภาพและสม่ำเสมอให้ความร้อนในการหลอมเหล็กที่มากกว่ากระแสไฟ สลัด

ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [9] มีชนิดให้เลือกของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์หลากหลายชนิดที่มีอยู่ให้ เลือกใช้ เพื่อให้ตรงกับความต้องการใช้งานมากที่สุด การเคลือบรอบแกนลวดประกอบด้วยผสมต่างๆ ของสารเคมีที่เป็นผงละเอียดและแร่ธาตุไว้ด้วยสารยึดเกาะที่เหมาะสมกับกระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วย ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการเชื่อมไฟฟ้าด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [11]

2.3.1 หน้าทีของสารเคลือบผิว สารเคลือบผิวที่นำมาใช้มีเป็นจำนวนมากโดยทำหน้าที่ที่สำคัญ ได้แก่

2.3.1.1 ความร้อนจากการอาร์กจะหลอมเหลวปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงานอาร์กหลอมรวมกันและแข็งตัวเป็นแนวเชื่อมและจะเกิดเป็นแก๊สเนื้อปกคลุมบ่อหลอมเหลว เพื่อป้องกันบรรยากาศจากภายนอกเข้าทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อม

2.3.1.2 ช่วยปรับปรุงความคงที่ของการอาร์กถ้าไม่มีสารเคลือบผิวจะทำให้การอาร์กไม่คงที่การควบคุมการอาร์กจะเป็นเรื่องยากโดยจะทำให้เกิดสะเก็ดเชื่อมมากเกินไป โดยเฉพาะเมื่อเชื่อมกับกระแสไฟเชื่อมแบบกระแสสลัด AC การอาร์กแบบคงที่ที่จะสร้างสารปกคลุม ได้แก่ โทเทเนียม เซอร์โคเนียมและแมกนีเซียม

2.3.1.3 ช่วยสร้างตะกรันแข็งบนผิวหน้าของแนวเชื่อม การใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะก่อให้เกิดชั้นของตะกรันที่ด้านบนของการเชื่อมที่ต้องมีเอาออกหลังจากการเชื่อม นี้ต้องใช้ค้อนหรือแปรงลวดและการเอาออกจะง่ายหรือยากขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคลือบผิวของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์

2.3.1.4 การประยุกต์ใช้สารผสมหรือสารป้องกันการออกซิไดซิงลงในบ่อหลอมการเชื่อม สารเคลือบผิวอาจมีผงเหล็กเพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพ (ผลผลิต)

2.3.2 ชนิดของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ ช่วยให้การซึมผ่านเข้าไปในวัสดุฐานในขณะที่เชื่อม การซึมผ่านจะถูกกำหนดโดยวัสดุที่สามารถปล่อยปริมาณก๊าซที่สำคัญของร้อนเช่นคาร์บอนหรือสารประกอบเซลลูโลส ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะแบ่งออกเป็นสามกลุ่มหลักขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของตะกรัน: กรดรูไทล์และค่าพื้นฐานปัจจัยที่มีอิทธิพลทางเลือกของทั้งสามประเภทหลักจะสรุปในตารางที่ 2.2 ประเภทอื่นๆ ของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ซึ่งจะมีการหารือในส่วนนี้เซลลูโลสและการซึมลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ประสิทธิภาพของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะถูกคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของโลหะเชื่อมทั้งหมดจากขั้วไฟฟ้าในสัดส่วนที่น้ำหนักของลวดแกน หนึ่งสามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพปกติมีอัตราผลตอบแทนที่ขึ้นประมาณ 130% และขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงที่มีอัตราผลตอบแทนในส่วนที่เกิน 130% มักจะได้ถึง 150 ถึง 250%

2.3.2.1 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดกรด (Acid) สารเคลือบชนิดกรดรวมถึงเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ประสิทธิภาพของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยการผสมผงเหล็กที่มีการเคลือบผิวแกนของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ กรดเป็นสิ่งที่ดีเพราะมีผงเหล็กสูง กรดที่เคลือบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์จะทำให้การทำงานราบรื่น, แนบเชื่อมมันเงาตะกรันแข็งตัวช้าเป็นรูพรุนและง่ายที่จะเอาออก การเชื่อมโลหะมีความแข็งแรงและความต้านทานแรงดึงที่ดีที่สุดกว่าที่ผลิตโดยสารรูไทล์และสารพื้นฐานที่มีแตกร้าวที่สูงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ประเภทนี้มีลักษณะการเชื่อมที่ดีเยี่ยมและมีความเหมาะสมสำหรับการเชื่อมในตำแหน่งแนวนอน การประยุกต์ใช้หลักของพวกเขาคือการเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ

2.3.2.2 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูไทล์ (Rutile) สารเคลือบชนิดรูไทล์มีปริมาณส่วนผสมของรูไทล์ ( $TiO_2$ ) ประมาณ 25-45% ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ประเภทนี้การอาร์คที่เป็นเรื่องง่ายต่อการใช้งานและแนวเชื่อมที่ประณีตกับตะกรันที่เอาออกได้อย่างง่ายดาย ความสมดุลของการเชื่อมที่ดีจะส่งผลให้โลหะพื้นฐาน โดยทั่วไปมีความแข็งแรงสูงแต่น่าเสียดายที่ขั้วไฟฟ้าเหล่านี้ผลิตสารไฮโดรเจนที่สูงขึ้นในการเชื่อมโลหะซึ่งนำเสนอความเสี่ยงของไฮโดรเจน Embrittlement และแตกร้าวข้อจำกัดการใช้ในการเพื่อเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำมีความต้านทานแรงดึงที่ดีที่น้อยกว่า 440 เม

กะปาศคาล ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดรูไทต์ (Rutite) มีความเหมาะสมสำหรับโครงสร้างเหล็กที่ได้มาตรฐานและการต่อเรือเหล็ก

2.3.2.3 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดต่าง (Basic) มีแคลเซียมฟลูออไรด์ (fluorspar - CaF<sub>2</sub>) ในการเคลือบ ตะกรันทำปฏิกิริยาเป็นฐานที่ออกจากกำมะถันและออกซิเจนต่ำในโลหะเชื่อม ความแข็งแรงและความทนทานของการเชื่อมจึงรอยเชื่อมที่แข็งแกร่งที่สุดที่ผลิตโดยประเภทของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์อื่นๆ และความต้านทานต่อการแตกร้าวร้อนยังสูงลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดต่าง (Basic) จะผลิตตะกรันมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจากรูไทต์และกรดซึ่งหมายความว่ามีความเสี่ยงของการรวมตะกรันเล็กน้อยแม้ว่าตะกรันยังไม่ได้ถูกเอาออกอย่างสมบูรณ์ จึงมีความเหมาะสมดีสำหรับการเชื่อมตำแหน่งในทุกตำแหน่งเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงมากถึง 500 องศาเซลเซียส ที่เกี่ยวข้องในการผลิตลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดต่าง (Basic) ปริมาณความชื้นของสารเคลือบผิวอยู่ในระดับต่ำเป็นผลให้ปริมาณไฮโดรเจนในลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดต่าง (Basic) อยู่ในระดับต่ำจึงให้ประสิทธิภาพการทำงานแตกในที่ยื่นแต่จุดความชื้นซึ่งหมายความว่าจะต้องถูกเก็บไว้ในที่แห้งและใส่หีบห่อแบบพิเศษ ทุกครั้งที่เชื่อมควรมีการอุ่นลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ในเตาอบที่อุณหภูมิ 50-80 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาการทำงานหลังจากใช้งานเสร็จแล้วลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ไม่ได้ใช้ให้เก็บไว้ในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส ข้อเสียของเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดต่าง (Basic) คือ แนวเชื่อมค่อนข้างหยาบและมีรูปร่างนูนการใช้งานทั่วไปที่มีงานโครงสร้างการต่อเรือและงานทนต่อความดัน

2.3.2.4 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส (Cellulose) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส (Cellulose) มีสัดส่วนที่ค่อนข้างสูงของสารเซลลูโลสทำให้มีการซึมที่ขุดเยียมโดยการให้สารไฮโดรเจนสูงในการอาร์กเมื่อเชื่อมในตำแหน่งต่างๆ เคลือบมีความชื้นสูงซึ่งหมายถึงการเชื่อมโลหะส่งผลให้มีปริมาณไฮโดรเจนที่ละลายในน้ำสูง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องจำเป็นที่จะต้องใช้วิธีการพิเศษของการเชื่อมและการทำงานที่อุณหภูมิสูง 100-250 องศาเซลเซียสแม้ในขณะที่เชื่อมวัสดุที่ค่อนข้างบาง (> 8-10 มิลลิเมตร) การประยุกต์ใช้หลักของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดเซลลูโลส (Cellulose) ในการเชื่อมท่อน้ำมันหรือท่อก๊าซธรรมชาติโดยใช้ตำแหน่งเชื่อมในแนวตั้ง

2.3.2.5 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดหลอมลึก (Penetration) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดหลอมลึก (Penetration) เคลือบด้วยสารเคลือบฟิวไรด์/กรดผสม ที่มีสัดส่วนที่สูงของสารเซลลูโลส โดยจะมีการปล่อยก๊าซที่เพิ่มการซึมลึกในวัสดุพื้นฐานที่รองรับลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ชนิดหลอมลึก (Penetration) จะใช้เฉพาะในตำแหน่งแนวนอนและสำหรับการเชื่อมเข้ามุมฉาก

ตารางที่ 2.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อทางเลือกกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมของลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ [9]

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	-	-	++

วัสดุลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยลวดเชื่อม 2 ประเภท คือ ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer Electrode) เป็นลวดประเภทไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Electrode) และลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกแข็ง (Hard-Facing Layer Electrode) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั้ง 2 ชนิด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 350 มิลลิเมตร มีส่วนผสมเคมีดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 2.4

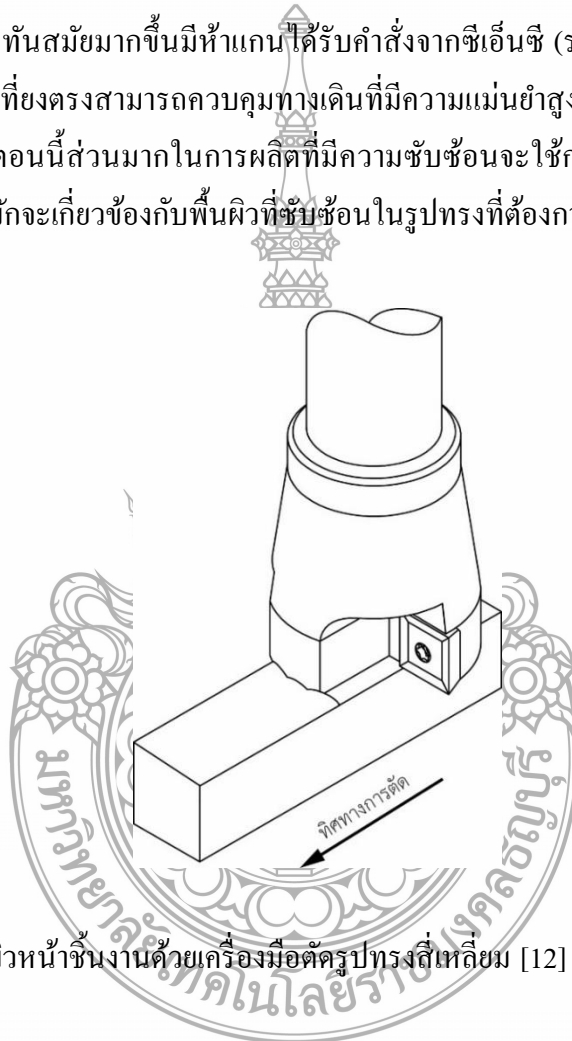
ตารางที่ 2.4 ส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Material	Standard	Chemical composition (%)					
		C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr
Buffer electrodes	JIS Z 3212 : D5016	0.07	0.62	1.18	0.01	-	0.01
Hardfacing electrodes	JIS Z 3251 : DF2B-600-B	0.45	0.50	1.15	0.60	-	5.00

## 2.4 กระบวนการกัดขึ้นรูป (Milling) [3]

กระบวนการกัดขึ้นรูป (Milling) คือ การทำงานของเครื่องจักรกลที่ทำการหมุนเครื่องมือตัดหลายคมตัดโดยจะใช้โปรแกรมเป็นเครื่องมือดำเนินการทำให้เคลื่อนที่ของอัตราป้อนในเกือบทุก

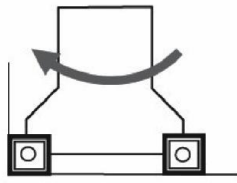
ทิศทางสำหรับการกำจัดเศษวัสดุจากชิ้นงานจนมีรูปร่างสม่ำเสมอหรือรูปแบบอิสระการกัดสามารถทำงานได้หลากหลายมาก เช่น การเจาะ การกลึง การกัดร่อง หรือการดำเนินการกำจัดเศษของวัสดุอื่น ๆ เครื่องมือกัดแต่ละคมตัดจะเอาเศษชิ้นส่วนขนาดเล็กของวัสดุที่มีการตัดเฉือนลงไปในพื้นที่ตัด โดยทั่วไปในการผลิต การกำจัดเศษขนาดเล็กมันเป็นเรื่องง่ายที่จะตัดเฉือนออกจากพื้นที่ตัด ในขณะที่กระบวนการของเครื่องจักรทั้งหมดวัสดุที่มีความแข็งแรงมากขึ้นในการกำจัดเศษวัสดุโดยการตัดเฉือนจากต้นปี 1900 ไปจนถึงปี 1960 (López de La Calle and Lamikiz 2008), การกัดที่ถูกลำเอียงมาใช้กับการสร้างพื้นผิว แต่วันนี้มีความทันสมัยมากขึ้นมีห้าแกนที่ได้รับคำสั่งจากซีเอ็นซี (ระบบควบคุมเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์) มีความเที่ยงตรงสามารถควบคุมทางเดินที่มีความแม่นยำสูงได้ แม้ในอัตราป้อนที่สูงดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในตอนนี้ส่วนมากในการผลิตที่มีความซับซ้อนจะใช้กรรมวิธีการกัดตัวอย่าง เช่น แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก มักจะเกี่ยวข้องกับพื้นผิวที่ซับซ้อนในรูปทรงที่ต้องการ เป็นต้น



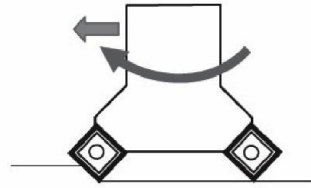
รูปที่ 2.5 การกัดแปดผิวหน้าชิ้นงานด้วยเครื่องมือตัดรูปทรงสี่เหลี่ยม [12]

2.4.1 ประเภทการกัดชิ้นงาน ประเภทหลักของการทำงานเกี่ยวกับการกัดชิ้นงานรูปทรงเรขาคณิตหรือรูปร่างที่ซับซ้อนของเครื่องมือตัด แสดงในรูปที่ 2.6 โดยคำนึงถึงการปฏิบัติงานในปัจจุบันกับเครื่องกัด CNC หรือเครื่องแมชชีนนิ่งเซ็นเตอร์ (Machining Center)

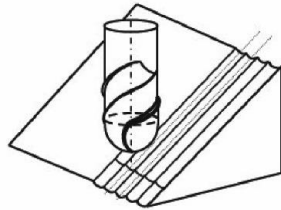
ก) การกัดปาดผิว



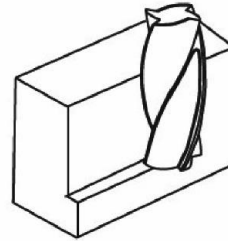
ข) การกัดบ่าฉาก



ค) การกัดผิวด้านข้าง



ง) การกัดด้วยดอกหัวกลม



รูปที่ 2.6 การกัดขึ้นรูปในงานประเภทต่างๆ [3]

2.4.1.1 การกัดร่องบางครั้งใช้สำหรับตัดเนื้องาน ในบางกรณีเครื่องมือตัดสามารถมีส่วนที่เป็นส่วนหนึ่งของเครื่องจักร; เครื่องมือที่จะเรียกว่ากัดเซาะร่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เทคนิคการกัดในแบบต่างๆ

2.4.1.2 การกัดแบบต่อเนื่องซึ่งในการเคลื่อนของอัตราป้อนเป็นส่วนหนึ่งหมุนแทนการเคลื่อนไหวเชิงเส้น

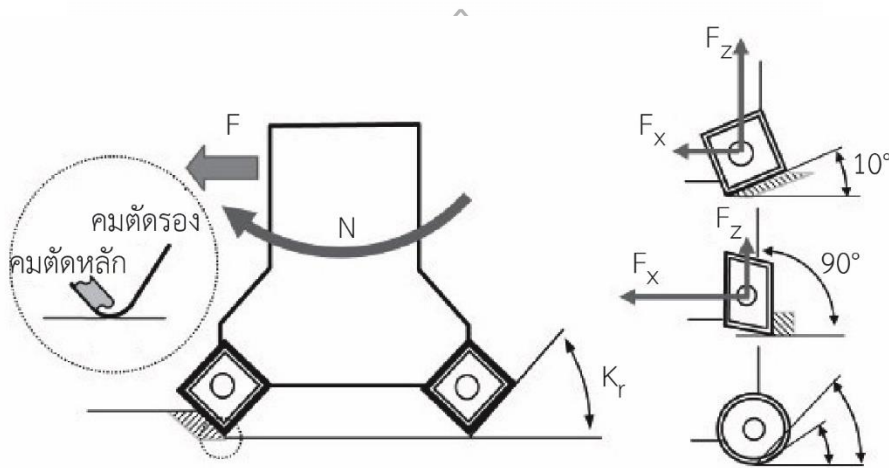
2.4.1.3 การกัดเกลียว ในการผลิตเกลียวในหรือเกลียวนอกนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2.4.1.4 การกัดด้วยอัตราป้อนที่สูง การดำเนินการปาดผิวพิเศษด้วยเครื่องมือตัดกับตำแหน่งมุมที่ต่ำมาก



รูปที่ 2.7 เทคนิคการกัดขึ้นรูปในแบบต่างๆ [3]

เกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิตเครื่องมือการกัดมีค่ากำหนดบางอย่างที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือตัดที่มีรูปแบบที่เกี่ยวกับประเภทของการทำงาน เครื่องมือตัดมีคมตัดหลายคมตัดมีลักษณะเป็นวงกลมและขอบเครื่องมือตัดแต่ละชนิดมีสองด้าน โดยที่รู้อักกันมักจะเป็นขอบหลักและขอบรองดังแสดงในรูปที่ 2.8 หลักคือการสัมผัสกับชิ้นงานโดยการให้ผิวหน้าที่ตั้งฉากกับแกนเครื่องมือ



รูปที่ 2.8 ลักษณะมุมของคมตัดที่ตัดเฉือนชิ้นงาน [3]

2.4.2 สูตรคำนวณการตัดเฉือนในงานกัด เกี่ยวกับการกัด, สูตรการตัดเฉือนพื้นฐาน การกำหนดในดำเนินการมีดังนี้

2.4.2.1 ความเร็วตัด (Cutting Speeds) ( $V_c$ ) หมายถึงความเร็วตัดปาดผิวโลหะเมื่อชิ้นงานหรือมีดกัดหมุนตัดเศษวัสดุใน 1 รอบ จะเท่ากับความเร็วของเส้นรอบวง ความยาวของเศษวัสดุที่มีดกัดในเวลา 1 นาที เรียกว่า ความเร็วตัด

$$V_c = \pi DN/1000$$

กำหนดให้

$V_c$  = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( มม.)

N = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

2.4.2.2 อัตราป้อนต่อฟัน ( $F_z$ ) หมายถึง หมายถึง ระยะการป้อนชิ้นงานหรือมีดตัดเข้าหาชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานหรือมีดตัดหมุนครบหนึ่งรอบหารด้วยจำนวนฟันของเครื่องมือตัด



$$V_f = f_z \cdot z \cdot N$$

กำหนดให้

$V_f$  = ความเร็วของโต๊ะงาน

$f_z$  = อัตราป้อนต่อรอบ ( มม./รอบ)

$z$  = จำนวนของฟันเครื่องมือตัด

$N$  = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

2.4.2.3 ความเร็วรอบ (N) คือ การหาว่าชิ้นงานหรือเครื่องมือตัดหมุนไปเป็นจำนวนกี่รอบในเวลา 1 นาที โดยการคำนวณหาได้จากสูตรเดียวกันกับการคำนวณหาความเร็วตัดแต่อาศัยหลักการย้ายสมการ

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

กำหนดให้

$V_c$  = ความเร็วตัด (เมตร/นาที)

$D$  = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)

$N$  = ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

2.4.2.4 การกำจัดเศษวัสดุ MRR (Q) คือการหาอัตราการกำจัดเศษวัสดุของชิ้นงานในเวลา 1 นาที

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

กำหนดให้

$AP$  = ความลึก

$a_c$  = ความกว้างหน้าตัด

$V_f$  = ความเร็วป้อนโต๊ะงาน

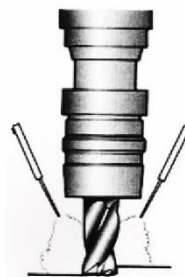
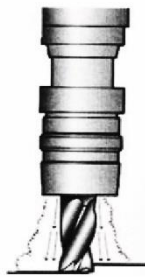
ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกับจำนวนของฟันและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเครื่องมือการกัดการดำเนินการได้ถูกกำหนดไว้อย่างรอบคอบร่วมกับขอบเขตของเครื่องโดยกำหนดเป็นความเร็วในการหมุนของแกนหมุนและอัตราป้อนของเครื่องจักรและอัตราการป้อนเชิงเส้นได้ถูกนำมาใช้ในโปรแกรม CNC สำหรับคำสั่งเครื่องระหว่างการดำเนินการหรือได้รับการแนะนำให้ผู้จึกและควบคุมโดยผู้ประกอบการในโรงงานทั่วไป ค่าที่ได้มาจากอื่น ๆ เช่น การกำจัดเศษวัสดุ (MRR) หรือความหนาพิวทางทฤษฎีสามารถได้รับจากค่าการกัดพื้นฐานข้างต้น

## 2.5 สารหล่อเย็นและการหล่อเย็นชนิดอื่น ๆ [13]

สารหล่อเย็นสามารถทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพถ้าจะถูกส่งไปยังบริเวณในการตัด โดยทั่วไปของเหลวที่มีการทำงานการหล่อเย็นเด่นจะต้องถูกส่งไปในรูปแบบฟิล์มบนพื้นผิวเพื่อป้องกันการสึกหรอ ในขณะที่สารหล่อเย็นต้องถูกส่งตรงไปยังคมตัดเครื่องมือวิธีการใช้ของเหลวที่ใช้ในการปฏิบัติงานสำหรับงานตัดเฉือนทั่วไป คือ แบบควบคุมด้วยมือ แบบท่วมชิ้นงาน แบบแรงดันสูง และแบบละอองปกคลุม โดยปกติจะใช้วิธีการหล่อเย็นแบบภายนอกและแบบภายใน (ผ่านเครื่องมือ) โดยมีวิธีที่แตกต่างกันดังแสดงในรูป 2.9 สำหรับการทำงานกัดโดยใช้ดอกเอ็นมิล สังเกตเห็นว่าความแตกต่างกันเนื่องจากการระบายความร้อนในบริเวณการตัดเฉือนดังแสดงในรูปที่ 2.8 อุณหภูมิการตัดเฉือนในการกัดสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดย 40-50%

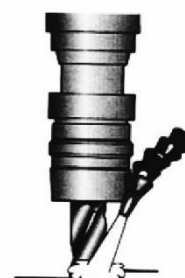
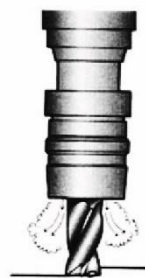
(ก) การระบายด้วยระบบลม

(ข) การระบายด้วยละอองน้ำมัน



(ค) การระบายความร้อนภายใน

(ง) การระบายความร้อนภายนอก



รูปที่ 2.9 วิธีการระบายความร้อนในกระบวนการกัดขึ้น [13]

## 2.6 สมบัติของวัสดุเครื่องมือตัด [14]

2.6.1 สมบัติของวัสดุเครื่องมือตัดที่ประกอบด้วยกลุ่มพิเศษของวัสดุเครื่องมือเพราะต้องทนกับสภาวะที่รุนแรงของกระบวนการที่ใช้สำหรับการตัดคือ อุณหภูมิสูง ความเครียดสูง แรงเสียดทานบนพื้นผิวชิ้นงาน โดยที่เศษตัดเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการตัดวัสดุเครื่องมือต้องมีคุณสมบัติ

บางอย่างขึ้นอยู่กับชนิดของการดำเนินงานการตัดเฉือนวัสดุชิ้นงานที่ถูกกระทำโดยเครื่องจักรโดยรวม สภาพกระบวนการวิศวกรรมคือ

2.6.1.1 ความแข็งสูงที่อุณหภูมิสูง (ความแข็งร้อน) ที่จะต้านทานการสึก

2.6.1.2 ต้านทานการเปลี่ยนรูปสูงเพื่อป้องกันคมตัดจากการเปลี่ยนรูปพลาสติก ภายใต้ความเครียดสูงและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการก่อตัวของเศษตัด

2.6.1.3 ต้านทานการแตกหักสูงต่อคมตัดที่เกิดการบิ่นขนาดเล็กและแตกหัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตัดไม้ต่อเนื่อง

2.6.1.4 สมบัติความเหนียวทางเคมี (ความสัมพันธ์กับเสถียรภาพทางเคมีต่ำหรือเสถียรภาพทางเคมีสูง) ที่เกี่ยวข้องกับวัสดุชิ้นงานเพื่อป้องกันความร้อนของชนิดการสึกหรอที่ได้รับผลกระทบเช่น การแพร่กระจายของสารเคมีและการสึกหรอจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน

2.6.1.5 การนำความร้อนสูงเพื่อลดอุณหภูมิบริเวณคมตัด

2.6.1.6 ต้านทานความล้าสูงสำหรับปลายคมตัดของเครื่องมือตัดที่ทนจากแรงของเครื่องจักร

2.6.1.7 ต้านทานความร้อนสูงที่เป็นธรรมชาติจากการกระทำของเครื่องจักร

2.6.1.8 ความมั่นคงสูงที่จำเป็นในการทำงานอย่างแม่นยำ

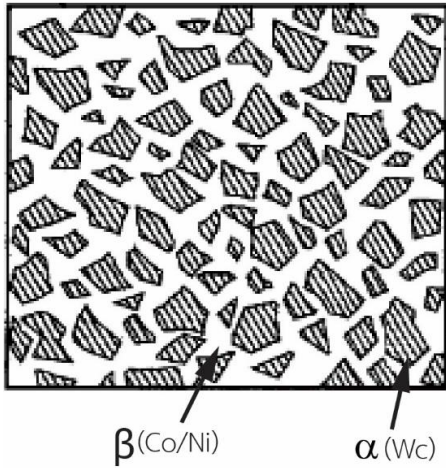
2.6.1.9 การหล่อลื่นเพียงพอ (แรงเสียดทานต่ำ) เพื่อเพิ่มความต้านทานการประสาน และเพื่อป้องกันไม่ให้ยึด (การก่อตัวของคมตัด)

2.6.2 วัสดุเครื่องมือตัด [14] ทั้งสแตนเลสคาร์ไบด์หรือซีเมนต์คาร์ไบด์ที่พบมากที่สุดคือในวัสดุเครื่องมือตัดที่ใช้ในปัจจุบันและตอนนี้เป็นวัสดุของทางเลือกมากกว่าครึ่งหนึ่งของเครื่องมือตัดทั้งหมดที่ผลิตทั่วโลก คิดเป็นสัดส่วนเหล็กไฮสปีดประมาณ 40% ส่วนที่เหลืออีก 10% หรือมากกว่านั้นจะเพิ่มขึ้นจากวัสดุอื่นๆ ทั้งหมดซีเมนต์คาร์ไบด์จะทำโดยวิธีการซินเตอร์ริงสารประกอบคาร์ไบด์ของธาตุ 9 ชนิดคือ W, Mo, Cr, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta ด้วยโลหะในตระกูล Fe (Fe, Co, Ni) โดยทั่วไปจะหมายถึงโลหะผสม WC-Co อย่างไรก็ตามนอกจากนี้คาร์ไบด์ยังละลายได้ในสารประกอบอื่น ๆ และสามารถขึ้นรูปซีเมนต์คาร์ไบด์โดยไม่ต้องใช้สารยึดเกาะโลหะแยกต่างหาก

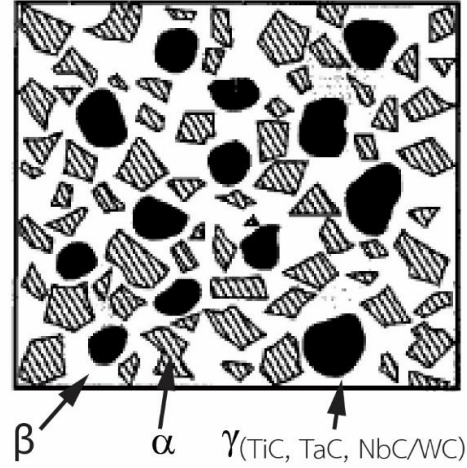
อัตราส่วนของอนุภาคในวัสดุเครื่องมือคาร์ไบด์จะแตกต่างจากประมาณ 60 ถึง 90% โดยการปรับประเภทขนาดและความเข้มข้นของอนุภาคผลิตสามารถปรับแต่งคุณสมบัติของวัสดุเครื่องมือเหล่านี้เพื่อตอบสนองความต้องการที่หลากหลายของความต้องการใช้ระบบ ISO ของการจำแนกประเภทใช้สัญลักษณ์ P (สีฟ้า), M (สีเหลือง) และ K (สีแดง) เพื่อแสดงถึงกลุ่ม การประยุกต์ใช้สำหรับความยาวของเศษตัดวัสดุส่วนมากเช่น เหล็กและโลหะผสม, เหล็กสแตนเลส, โลหะผสมทนความร้อน

และความยาวของเศษตัดวัสดุเช่น เหล็กหล่อ โลหะที่ไม่ใช่เหล็กและวัสดุที่ไม่ใช่โลหะ จะกำหนดตัวอักษรกับตัวเลข

ก) โครงสร้างแบบสองเฟส



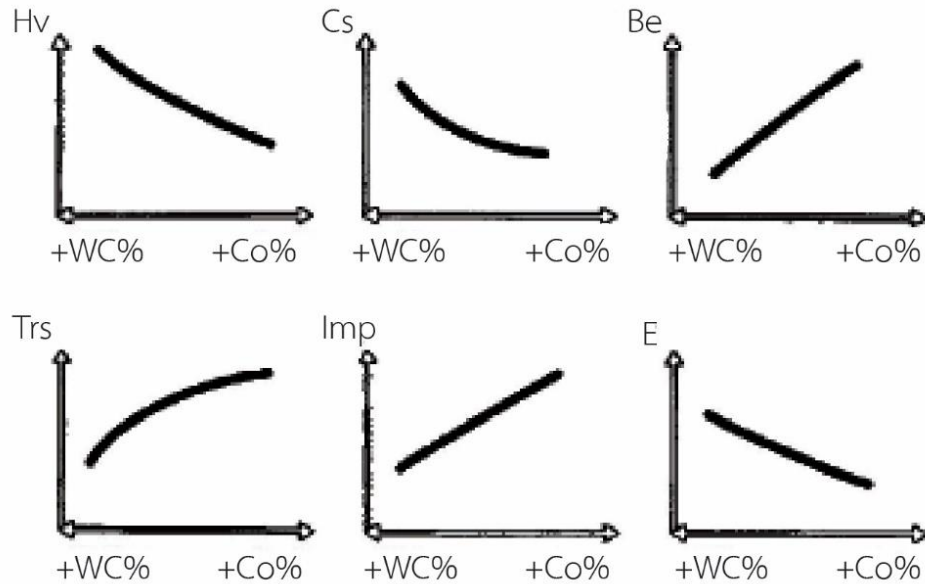
ข) โครงสร้างแบบสามเฟส



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางโลหะวิทยาของเครื่องมือตัดชนิดคาร์ไบด์ [14]

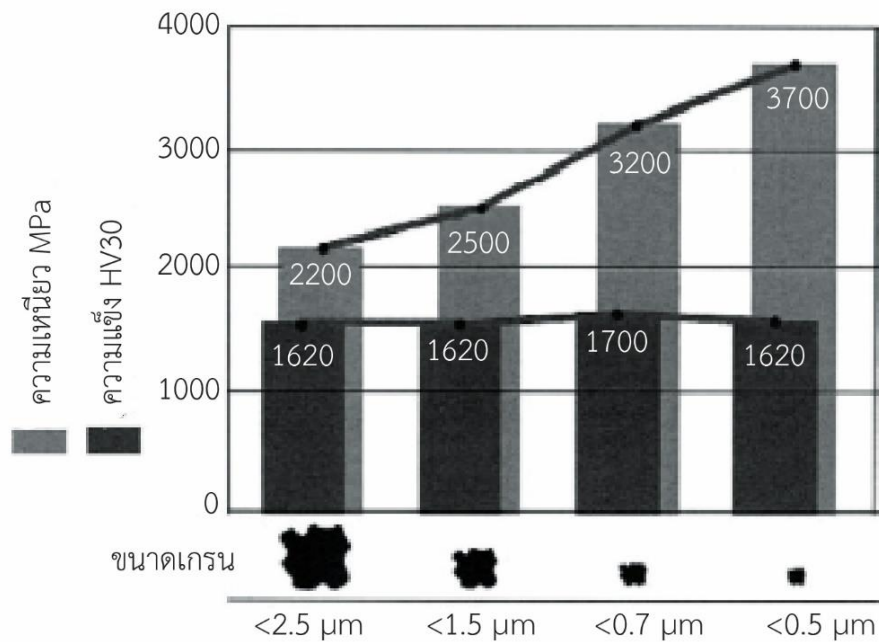
แสดงถึงความเหมาะสมของเกรดสำหรับประยุกต์ตกแต่งในขั้นตอนสำเร็จถึงงานหยาบหนักตามรูปที่ 2.10 ทั้งสองกลุ่มของซีเมนต์คาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันมีความสามารถโดดเด่นคือ สองเฟสและสามเฟสซีเมนต์คาร์ไบด์ สองเฟสคาร์ไบด์ซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.10 ก มีขั้นตอน (WC) ยากที่เรียกว่าอัลฟาเฟส ( $\alpha$ ) และ โคบอลต์สังรอยึดเกาะที่เรียกว่าเบต้าเฟส ( $\beta$ ) ความสัมพันธ์ของคาร์บอนและออกซิเจนนำไปสู่การไหลของคาร์บอนไดออกไซด์จากเครื่องมือและสร้างหลุมบนผิวหน้า การเสาะหาที่เพื่อที่จะปรับปรุงความต้านทานต่อการสึกหรอบนหลุมที่อุณหภูมิสูงที่เกิดจากเครื่องจักรกลมากขึ้นความเร็วทางเคมีไททานเนียมและแทนทาลัมคาร์ไบด์ที่มีการเพิ่มการสร้างโครงสร้างสามเฟสที่แสดงในรูปที่ 2.10 ข ขั้นตอนที่สามซีเมนต์คาร์ไบด์มีเพิ่มอีกแกมมาเฟส ( $\gamma$ ), ตัวแทนจาก TiC, TaC และ NbC คาร์ไบด์ พารามิเตอร์ที่สองคืออัตราส่วนของ Co WC และ WC ขนาดอนุภาคคุณสมบัติของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ปริมาณที่สูงขึ้นของอนุภาคยากที่จะทำให้ซีเมนต์คาร์ไบด์ทนทานต่อการสึกหรอเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของทั้งสองมีความแข็ง (HV) และความแข็งแรงอัด (CS) นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่น (E) เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามสัดส่วนที่สูงขึ้นจากโลหะที่มีผลผูกพันทำให้ซีเมนต์คาร์ไบด์ทนทานและทำให้เกิดความแข็งแรงดัด (BE) จะเพิ่มขึ้น ผลกระทบที่

คล้ายกันในการปรับปรุงการจัดการที่มีความเหนียววัสดุที่มีการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของการแตกตามขวาง (Trs) และส่งผลกระทบต่อความแข็งแรง (Imp)



รูปที่ 2.11 อิทธิพลของ WC และ CO ที่มีต่อสมบัติทางกลของซีเมนต์คาร์ไบด์ [14]

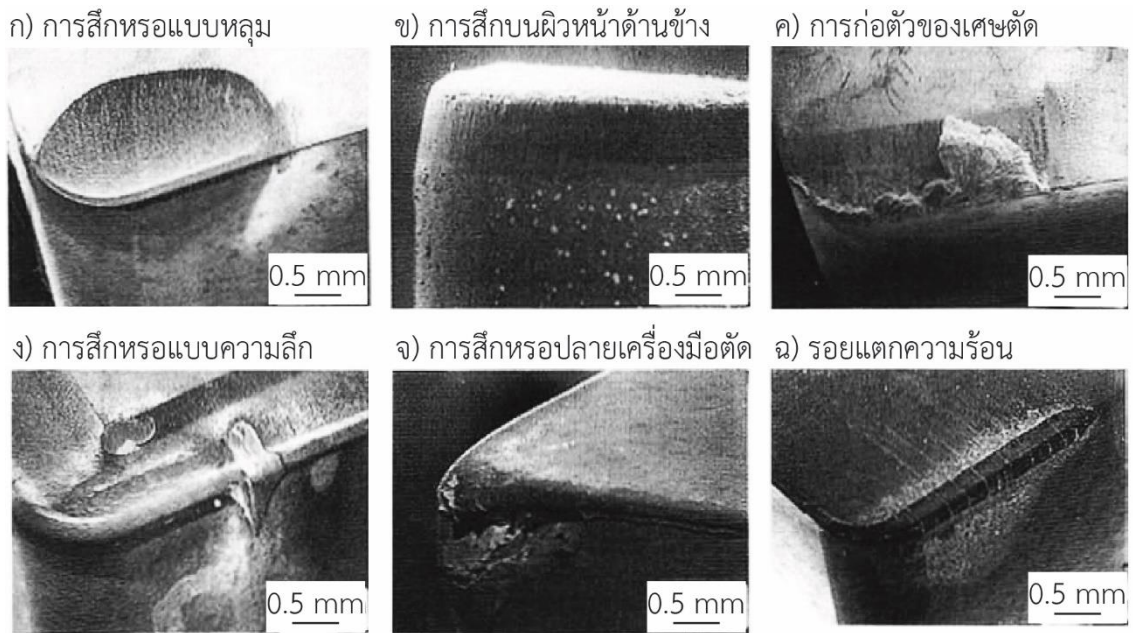
โดยทั่วไปขนาดของเม็ดผงคาร์ไบด์ได้หดจาก 10- $\mu$ m ถึง 1  $\mu$ m ในขณะที่ P/M ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กกว่าเม็ดผงในคาร์ไบด์ส่งผลให้เกิดช่องว่างขนาดเล็กและเป็นวัสดุที่บดสำเร็จรูป ความเป็นไปได้ที่มีนัยสำคัญมากที่สุดในการเพิ่มความแข็งแรงและความทนทานในกรณีของคาร์ไบด์ WC-Co เป็นโครงสร้างเล็กกว่าไมครอนและพิเศษปรับ (นาโนเฟส) ที่มีขนาดเม็ดเล็ก WC 0.5-0.8  $\mu$ m และ 0.2 (0.1) - 0.5  $\mu$ m ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ที่มีเนื้อหาที่เกี่ยวข้องของ 6-16% โดยมวลระยะทางระหว่างอนุภาคในคาร์ไบด์นาโนเฟสมีขนาดเล็กเพื่อให้อนุกรมการเผาสามารถลดลงไปยับยั้งการเจริญเติบโตของเม็ดผงที่อาจเกิดขึ้นที่อุณหภูมิในการประมวลผลที่สูงขึ้น คาร์ไบด์นาโนเฟสจะได้รับการตรวจสอบเรียบร้อยแล้วเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในรอบสำหรับวัสดุที่แปลกใหม่ เช่นคาร์ไบด์วานาเดียมและโครเมียมคาร์ไบด์มีแนวโน้มที่จะยับยั้งการเจริญเติบโตของเม็ดผงที่เล็กกว่าไมครอนระหว่างการประมวลผลและการเผา



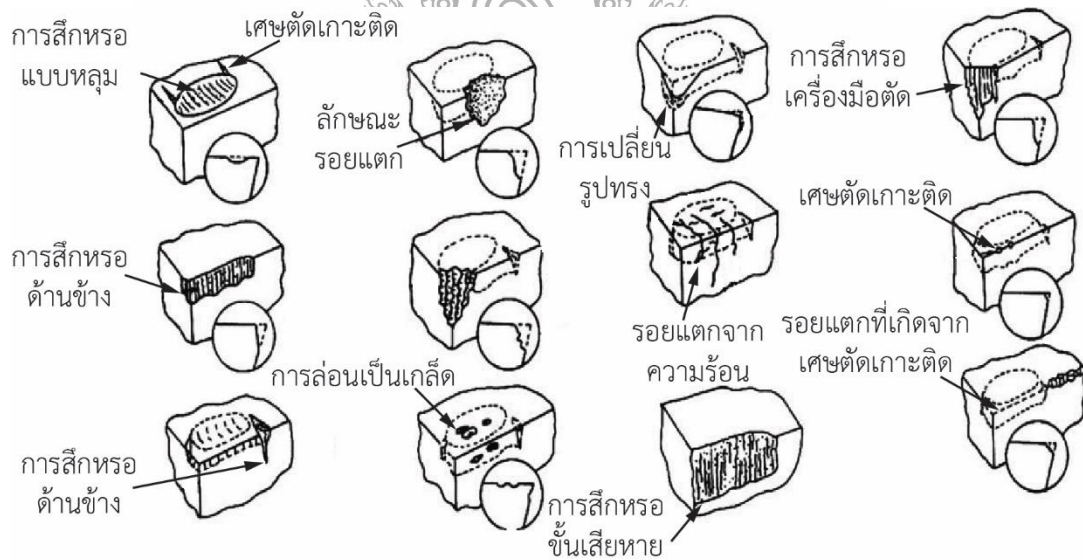
รูปที่ 2.12 อิทธิพลของขนาดเกรนต่อความแข็งแรงและความเหนียวของซีเมนต์คาร์ไบด์ [14]

## 2.7 ประเภทการสึกหรอของเครื่องมือตัด [14]

ความเสียหายของเครื่องมือตัดได้รับอิทธิพลจากสภาวะความเครียดและอุณหภูมิที่พื้นผิวเครื่องมือตัดซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการตัดตัวอย่างเช่น งานกลึง งานกัดหรืองานเจาะ เงื่อนไขการตัดและการมีหรือไม่มีของเหลวช่วยในการตัด ในการตัดเนื้อรูปแบบของเครื่องมือทำให้เกิดความเสียหายและอัตราของความเสียหายที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงในการดำเนินงานตัดและเงื่อนไขการตัดเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการตัดเนื้อมันเป็นสิ่งจำเป็น ไม่เพียงแต่จะหาเครื่องมือที่เหมาะสมที่สุดและวัสดุผสมการทำงานของเครื่องจักรกลสำหรับการดำเนินงานที่กำหนดแต่ยังเชื่อถือได้ทำนายอายุการใช้งานความเสียหายเครื่องมือสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ การสึกหรอและการแตกหัก (รูปที่ 2.13 และ 2.14) แต่น่าเสียดายที่ในทางปฏิบัติทั้งสองกลุ่มของความเสียหายของเครื่องมือตัดจะไม่ได้โดดเด่นอย่างเห็นได้ชัด การสึกหรอคือการสูญเสียของวัสดุซึ่งมักจะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับความรุนแรงต่ออนุภาคที่มีขนาดเล็กอย่างต่อเนื่องหรือขนาดเล็กกลงไปกลไกการกำจัดโมเลกุลหรืออะตอมสำหรับการแตกหักในมืออื่นๆ ที่มีคลื่นความถี่อย่างต่อเนื่องของเครื่องวัดความเสียหายจากการสึกหรอจุลภาค ในการแตกหักขั้นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และ 2.14 ความก้าวหน้าของการสึกหรอของเครื่องมือตัดที่จะเกิดขึ้นส่วนใหญ่ใน 2 วิธีที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.13 รูปแบบการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด [15]



รูปที่ 2.14 ประเภทการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด [15]

โดยปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างคาร์บอนหรือผิวหน้าด้านข้างของเครื่องมือตัดและความร้อนของเศษตัดในหลายๆครั้งเกิดจากความร้อนเช่น การยึดเกาะที่แพร่กระจายหรือการสลายตัวมีส่วนร่วมในกระบวนการการสึกหรอดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ข) เป็นที่สังเกตบนด้านข้างหรือช่องว่างด้านข้างเป็นผลมาจากการขัดสี โดยอย่างรุนแรงของวัสดุชิ้นงาน ความสึกหรอของกลไกนี้จะสังเกตทั่วไประหว่างเครื่องจักรกลของเหล็กและเหล็กหล่อที่อนุภาคขัดเป็นซีเมนไคท์ส่วนใหญ่เป็น  $Fe_3C$  และไม่ใช้โลหะผสม

การก่อตัวของขอบคมตัด (BUE) ที่แสดงในรูป 2.13 (ค) ก็จะเรียกเมื่อเกิดการหลอมรวมของเศษตัด มักจะเกิดขึ้นเมื่อเหล็กคาร์บอนต่ำหรือสแตนเลสที่มีความเหนียวและวัสดุโลหะ (ส่วนใหญ่อลูมิเนียมนิกเกิล โคบอลต์และไททาเนียมอัลลอยด์) ถูกตัดเฉือนด้วยความเร็วต่ำและอัตราการป้อนที่น้อยซึ่งส่งผลในการสึกหรอการขัดสีที่รุนแรงหากชิ้นส่วนเล็กๆ ของวัสดุเครื่องมือที่มีการดำเนินการไปเป็นวงจรการก่อตัวของขอบคมตัด (BUE)

รอยการสึกหรอ (ความสึกของการตัดเฉือน) ที่แสดงในรูป 2.13 (ง) มักจะมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของวัสดุเครื่องมือจากด้านข้างของขอบตัดทั้งเล็กและใหญ่หรือการเสียดสีอย่างรุนแรงโดยเฉื่อยพื้นขอบด้านนอกของเศษตัด (ตัวอย่างเช่น ในเครื่องจักรกลหนัก) รอยบากเป็นปัญหาร้ายแรงกับเทคโนโลยีวัสดุชิ้นงานที่มีแนวโน้มสูงที่จะมีเคลือบการทำงานที่แข็งและสร้างอุณหภูมิสูงเช่น เหล็กสแตนเลสอสเทนนิติกและนิกเกิลซูเปอร์อัลลอย รอยการสึกหรอที่เห็นได้ชัดสามารถนำไปสู่การแตกหักของเครื่องมือตัด สามารถลดลงได้โดยการใช้เครื่องมือที่มีขอบมุมโค้งมนเพื่อหลีกเลี่ยงความสึกของการตัดขนาดเล็ก

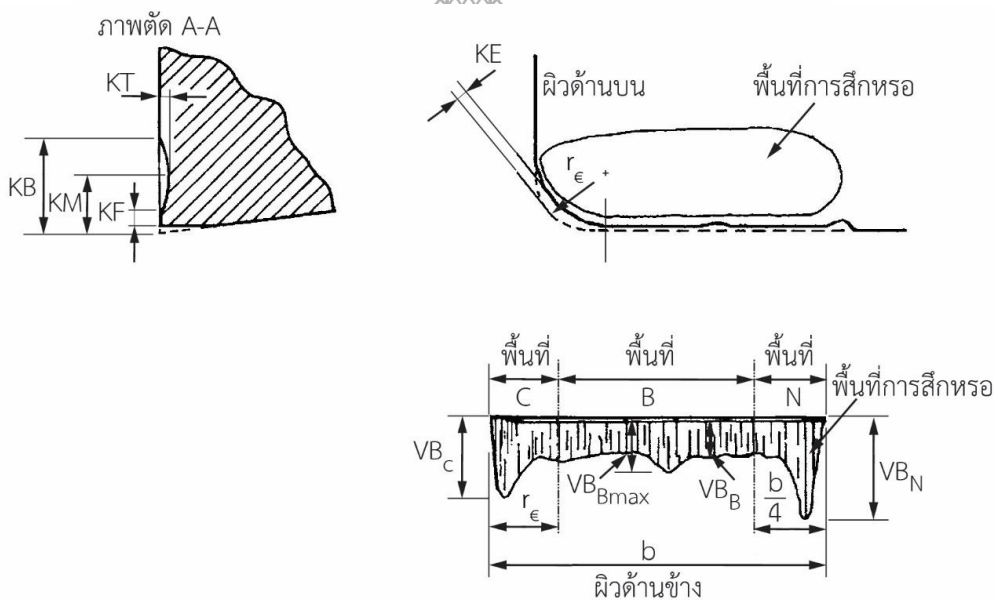
การสึกหรอปลายคมตัดดังรูปที่ 2.13 (จ) มีเคลือบที่ทำให้เครื่องมือตัดเกิดการด้านทานการเปลี่ยนรูปของวัสดุเครื่องมือตัดในการดำเนินงานเครื่องจักรกลที่กำหนด

รอยแตกด้วยความร้อนดังรูปที่ 2.13 (ฉ) พัฒนาเมื่อความร้อนเกิดซ้ำและการระบายความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการตัดไม่ต่อเนื่อง เช่น การกัดสร้างระดับอุณหภูมิสูงในคมตัด ด้วยเวลาที่นานรอยแตกด้านข้างอาจปรากฏขนานไปกับคมตัด รอยแตกด้วยความร้อนและด้านข้างอาจรวมด้วยกันและทำให้เกิดชิ้นส่วนเล็กๆ ของวัสดุเครื่องมือในการทำลายออกไป

โหมดที่ต้องการการการสึกหรอเป็นเครื่องมือที่สึกหรอเพราะมันดำเนินไปและค่อยๆสามารถตรวจสอบได้อย่างง่ายดายสำหรับโปรโตคอลเครื่องมือที่เปลี่ยนแปลงในโปรแกรม NC ในทางปฏิบัติบางวัดได้โดยตรงลักษณะมิติของรูปแบบการสึกหรอทั่วไปเช่น การสึกหรอแบบหลุม การสึกหรอด้านข้างและการสึกหรอแบบรอยลึกของการตัดสำหรับเครื่องมือตัดเช่น เหล็กไฮสปีด คาร์ไบด์และเซรามิก มีมาตรฐานใน ISO 3685-1977 ดังแสดงในรูปที่ 2.14 การสึกหรอแบบหลุมที่เติบโตขึ้นทั้งใน



เชิงลึก (KT) และความกว้าง (KF-KB) ดังแสดงในรูป 2.13 (ก) เป็นหลักในการอธิบายลักษณะของความคืบหน้าของหลุมที่ KT ลึกของหลุมเป็นวัดที่จุดที่ลึกที่สุดของหลุม (ส่วน A-A) ระยะทางกึ่งกลางของหลุมถึงขอบตัด KM จะเห็นได้ว่าการสึกหรอด้านข้างมักจะเสียหายมากที่สุด (มุมเครื่องมือและจุดที่สอดคล้องกับความลึกสูงสุดของการตัด) ของคมตัดตามที่ระบุไว้ในรูปที่ 2.13 (ข) การใช้งานตัดขอบที่สำคัญของความยาว  $b$  แบ่งออกเป็นสามโซนสำหรับวัตถุประสงค์ของการวัดการสึกหรอ (1) โซน C ของความยาว  $r_{\epsilon}$  ซึ่งรวมถึงส่วนที่โค้งมนของคมตัดที่มุม (2) โซน N ของความยาว  $b/4$  ในอีกฟากหนึ่งของคมตัดที่ใช้งานอยู่ที่ร่องหรือรอยการสึกหรอจะเกิดขึ้นนั้น และ (3) โซน B ศูนย์รวมทั้งส่วนที่เหลือของคมตัดระหว่างโซน A และ โซน N ในเขตศูนย์กลาง B, บริเวณการสึกหรอมักจะค่อนข้างสม่ำเสมอและบริเวณการสึกหรอเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องจะกำหนด  $VB_B$  อย่างไรก็ตามเพื่อให้การเปลี่ยนแปลงที่อาจเกิดขึ้น, ความกว้างบริเวณการสึกหรอสูงสุดจะแสดงโดย  $VB_{Bmax}$



รูปที่ 2.15 รูปแบบการสึกหรอตามของเครื่องมือคาร์ไบด์ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 [15]

## 2.8 ลักษณะการคายเศษตัด [16]

การจำแนกประเภทของเศษตัดในการใช้เครื่องจักรตัดปาดผิวระนาบด้วยเครื่องมือตัด การก่อตัวของเศษตัดสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.16

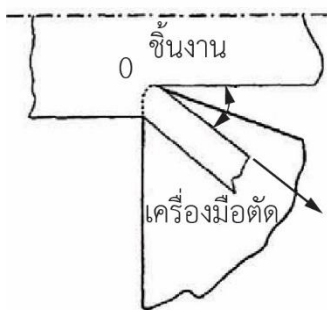
2.8.1 รูปแบบเส้นตรงบนผิวหน้าเครื่องมือตัดแสดงทิศทางมุมเอียงการไหลของเศษตัด (รูปที่ 2.16 ก)

2.8.2 รูปแบบโค้งบนผิวหน้าเครื่องมือตัด เรียกว่าแบบโค้งด้านข้าง (รูปที่ 2.16 ข)

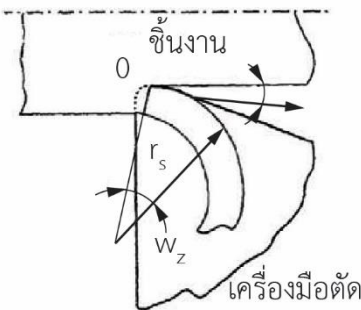
2.8.23 รูปแบบโค้งบนระนาบตั้งฉากกับผิวหน้าเครื่องมือตัดที่เรียกว่าแบบโค้งด้านบน (รูปที่ 2.16 ค)

ลักษณะรูปร่างของเศษตัดที่เกิดขึ้นได้โดยต่อเนื่องสามารถถูกสร้างขึ้นโดยการรวมกันของทั้งสามมุม ปัจจัยทั้งสามของรูปทรงที่มีอิทธิพลต่อรูปร่างของเศษตัดทั้งหมดคือ มุมของเศษตัดไหลด้าน ( $\eta$ ), เศษตัดโค้งด้านข้าง ( $r_s$ ) เศษตัดโค้งด้านบน ( $r_u$ ) ที่ขึ้นอยู่กับขนาดของการตัดรูปทรงของเครื่องมือตัด ลักษณะการทำงานและวัสดุของเครื่องมือ ในทางปฏิบัติรูปร่างเศษตัดจะถูกควบคุมบนผิวหน้าเครื่องมือตัด ซึ่งขั้นตอนเศษตัดหรือรูปร่างเศษตัดที่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16

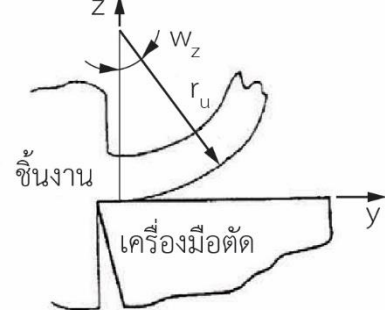
ก) เศษตัดตรง



ข) เศษตัดโค้งด้านข้าง




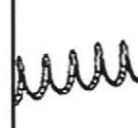




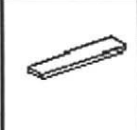


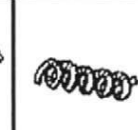
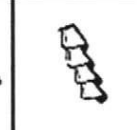

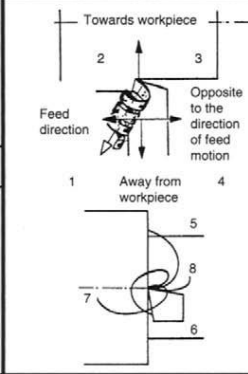

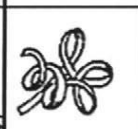
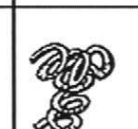



ค) เศษตัดโค้งด้านบน



รูปที่ 2.16 ลักษณะต่างๆของการเกิดเศษตัด 3 แบบ [16]

มาตรฐาน ISO 3685-1977 จะช่วยให้การจัดหมวดหมู่ที่ครอบคลุมของรูปแบบของเศษตัดที่มีการผลิตโดยทั่วไปในการทำงานขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของเครื่องจักรกล ระบบการจำแนกนี้แสดงในรูปที่ 2.17 ประกอบด้วยรูปร่าง 8 กลุ่มแต่ละกลุ่มเหล่านี้จะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยอีก 1-4 กลุ่มย่อย การกำหนดขนาด (เช่น ยาว สั้น เป็นต้น) และสภาพทางกายภาพ (เช่น ความต่อเนื่อง เป็นต้น) นอกจากนี้ยังรวมถึงรหัสตัวเลข 3 ตัวสำหรับรูปร่างเศษตัดบางอย่างที่จะอธิบายลักษณะทิศทางการไหลของเศษตัด (ตัวเลข 1-4) และรูปแบบการแตกหักที่ (ตัวเลข 5-8)

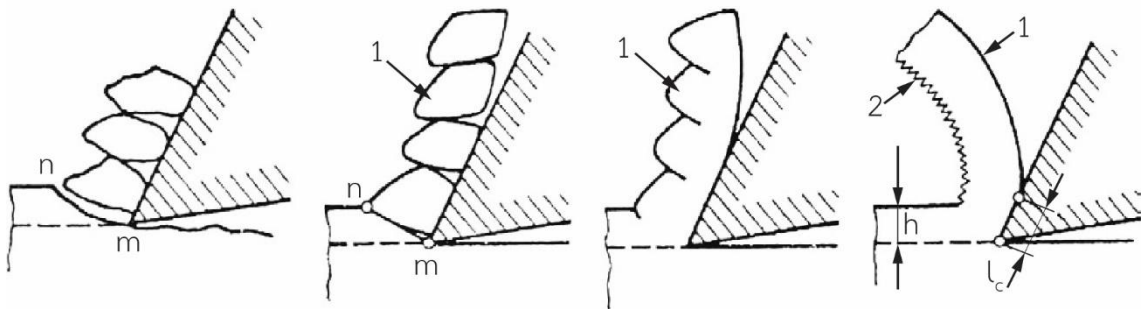
1. RIBBON CHIPS	2. TUBULAR CHIPS	3. SPIRAL CHIPS	4. WASHER-TYPE HELICAL CHIPS	5. CONICAL HELICAL CHIPS	6. ARC CHIPS	7. ELEMENTAL CHIPS	8. NEEDLE CHIPS
							
1.1. Long	2.1. Long	3.1. Flat	4.1. Long	5.1. Long	6.1. Connected		
							
1.2. Short	2.2. Short	3.2. Conical	4.2. Short	5.2. Short	6.2. Loose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

รูปที่ 2.17 การจำแนกประเภทของรูปแบบเศษตัดตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 [16]

การจำแนกประเภทความเป็นไปได้ของเศษตัดได้สามรูปแบบดังแสดงในรูปที่ 2.17 จะขึ้นอยู่กับกลไกของการเสีรูปของวัสดุและการแตกหักที่เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้งานและเงื่อนไขการทำงาน การจำแนกประเภทนี้มักจะเกี่ยวข้องกับการ หักหรือฉีกขาดออก โดยจะเรียกว่าเศษตัดไม่ต่อเนื่องและประเภทการตัดเฉือนของเศษตัดที่แสดงในรูปที่ 2.17 (ก) และรูปที่ 2.17 (ข)-(ง) ตามลำดับ กลุ่มสุดท้ายของเศษตัดสามารถแบ่งออกเป็นสาม (ที่เรียกว่ารอยหยักหรือประเภทเลื่อยฟัน) และความต่อเนื่องเศษตัดซึ่งบ่งบอกถึงระดับที่แตกต่างของความต่อเนื่องวัสดุที่นำมาใช้

เศษตัดแบบไม่ต่อเนื่องแสดงในรูปที่ 2.17 (ก) โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นเมื่อการตัดเฉือนวัสดุเปราะหรือวัสดุที่มีจุดของระดับความเครียดสูงเช่นเกลือคกร้า ไฟท์เหล็กหล่อหรือการรวมซัลไฟด์แมงกานีส เหล็กเครื่องจักรกล นอกจากนี้ยังอาจจะมีการผลิตเมื่อตัดเฉือนวัสดุเหนียวที่ความเร็วต่ำมากและอัตราป้อนสูง การแตกหักเกิดขึ้นเมื่อเศษตัดไม่ได้รับการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกและแตกแพร่กระจายจากการตัดขอบ (จุด m) เพื่อผิวหน้าฟรี (จุด n) เป็นผลให้เศษแบ่งออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ในลักษณะซ้ำๆ

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



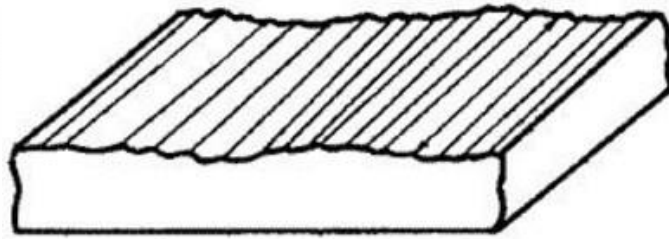
รูปที่ 2.18 การจำแนกประเภทของประเภทเศษตัด [16]

เศษตัดต่อเนื่องแสดงในรูปที่ 2.18 (ง) เป็นเรื่องธรรมดาเมื่อวัสดุที่เหนียวมากเช่นเหล็กตัดเหล็กอ่อน ทองแดงและอลูมิเนียมเครื่องจักรจะตัดที่ความเร็วค่อนข้างสูงเหตุผลก็คือโลหะและโลหะผสมเหนียวไม่การแตกหักกระนาบที่ตัดเฉือน เป็นที่น่าสังเกตว่าการตัดภายใต้เงื่อนไขนี้เป็นสภาวะที่คงของกระบวนการการก่อตัวของเศษอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นในโซนขยาย การก่อตัวอย่างต่อเนื่องในวัสดุเหนียวมีความเกี่ยวข้องกับแรงตัดที่ลดลงและผลโดยทั่วไปจะได้ผิวที่ดี เศษตัดต่อเนื่องอาจนำมาใช้หลายรูปทรงตรงหรือโค้งใกล้เคียงกับชนิดของที่เป็นมักจะมีแข็งแรงมากเนื่องจากการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกอย่างสูงและการควบคุมของรูปร่างเศษตัดเป็นหนึ่งในปัญหาในทางปฏิบัติที่ทำท่ายในการควบคุมเครื่องจักรและการออกแบบเครื่องมือ

## 2.9 ความหยาบผิว (Surface Roughness) [51]

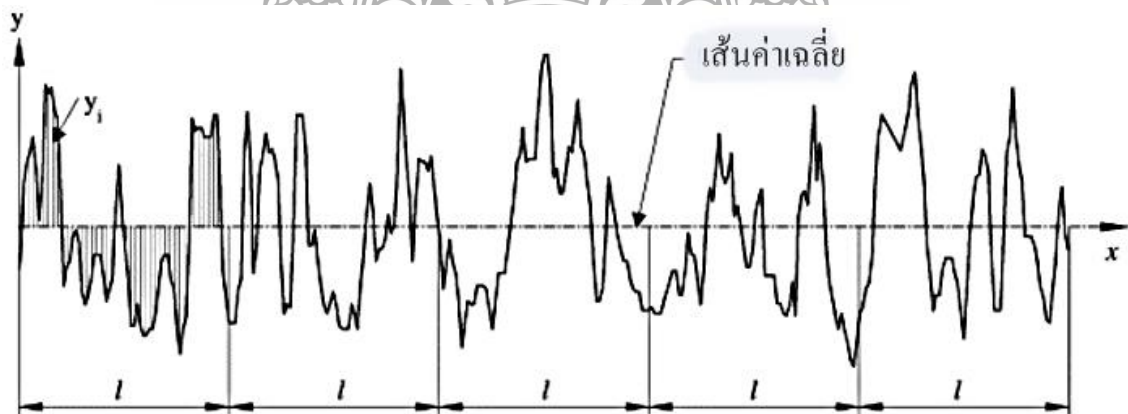
ความหยาบของผิวเป็นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการผลิตแบบหนึ่งความหยาบเกิดขึ้นจากรูปร่างของเครื่องมือตัดที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานและกรรมวิธีการขึ้นรูป ดังรูปที่ 2.19 ลักษณะความหยาบผิวของชิ้นงาน สำหรับการวัดความหยาบเราจะวัดลักษณะที่เกิดจากความขรุขระของพื้นผิวที่ความยาวคลื่นน้อย ดังนั้นในการวัดเราจะต้องจำกัดระยะในการวัดให้ต่ำลักษณะความป็นคลื่นระยะนี้เรียกว่า Cut-off length มีค่ามาตรฐานที่ใช้กันมากคือ 0.25 มิลลิเมตร, 0.8 มิลลิเมตร, และ 2.5 มิลลิเมตร ความหยาบของพื้นผิวมีความสำคัญต่อการใช้งานหลายๆอย่าง เช่น แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิว, การสึกหรอจากการเสียดสี, ความสวยงาม ความรู้สึกในการสัมผัส ความสามารถในการป้องกันการรั่วซึม (Sealing property)

ค่าความหยาบของพื้นผิวนั้นมีผลโดยตรงต่อความเงาของผิวชิ้นงาน เราอาจประมาณค่าความหยาบได้จาก ความเป็นเงา แต่ถ้าต้องการความแม่นยำแล้วเราจำเป็นต้องมีค่ากำหนดเป็นตัวเลข และมีวิธีการคำนวณที่ชัดเจนค่าความหยาบที่ใช้กันแพร่หลายเป็นค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ของค่าความแตกต่างของความสูงของพื้นผิวจากตำแหน่งความสูงเฉลี่ย



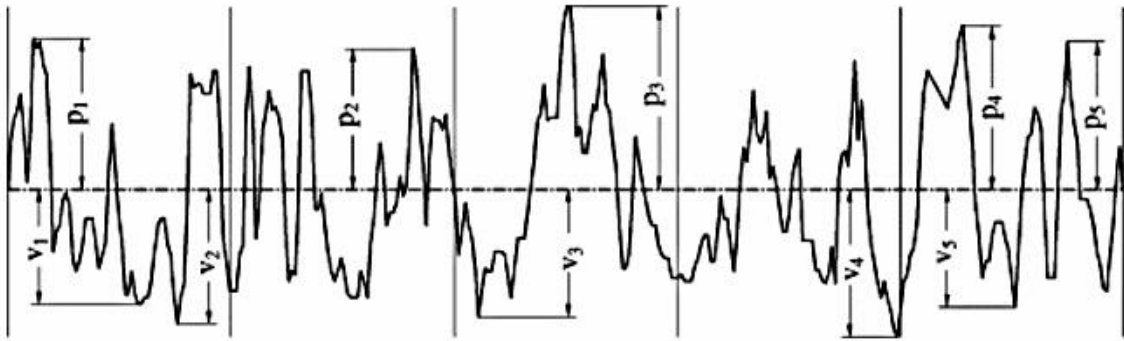
รูปที่ 2.19 ลักษณะความหยาบผิวของชิ้นงาน

2.9.1 ความหยาบผิวเฉลี่ย (Roughness average: Ra) เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยของผิวที่วัดดังรูปที่ 2.20 ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมากที่สุดและหลายมาตรฐานมักอ้างอิงค่านี้ในการกำหนดมาตรฐานความหยาบผิว การหาค่าความหยาบผิวเฉลี่ยเลขคณิตได้จากการรวมพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นเหนือเส้นกึ่งกลาง (Mean-Line) กับพื้นที่ยอดแหลมของคลื่นใต้เส้นกึ่งกลางหารด้วยความยาวเฉลี่ย (l) โดยที่ค่าของ Ra มีหน่วยวัดเป็นไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ดังรูปที่ 2.20



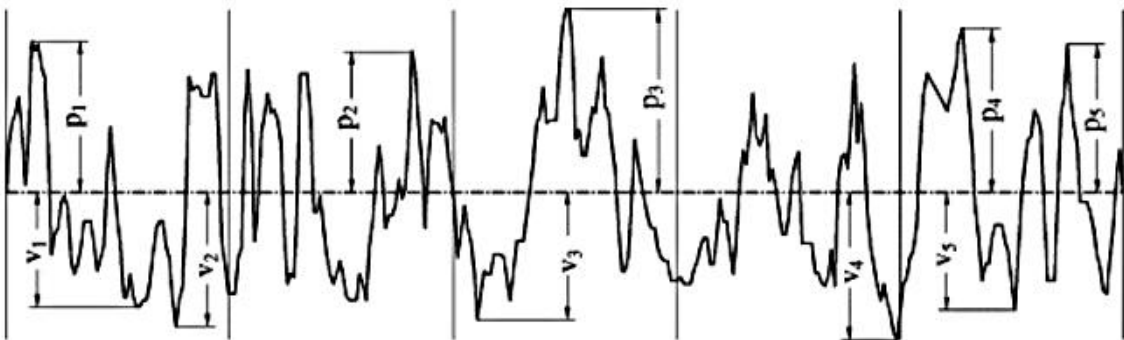
รูปที่ 2.20 แสดงความหยาบพื้นผิวด้วยค่าเฉลี่ยของผิว

2.9.2 ความหยาบผิวเฉลี่ยกำลังสอง (Roughness root mean square : Rq) รูปที่ 2.21 เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของผิวที่วัด



รูปที่ 2.21 แสดงความหยาบพื้นผิวด้วยรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง

2.9.3 ความหยาบผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness Ten-point mean : Rz) รูปที่ 2.22 เป็นการแสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุมโดยแสดงขนาดเฉลี่ยของระยะระหว่างความสูงของยอดกับความลึกของหลุมทั้งหมด 5 ชุด การวัดทดสอบเป็นช่วงเท่าๆ กัน 5 ช่วงแล้วนำค่าที่ได้มารวมกันหารด้วย 5 โดยที่ค่าของ Rz มีหน่วยเป็นไมโครเมตร



รูปที่ 2.22 แสดงความหยาบพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม

## 2.10 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 Pedersen and Ramulu [17] ทำการศึกษากัดปาดผิวหน้าวัสดุประกอบโลหะหลักแมกนีเซียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiCp/Mg MMC) ด้วยเครื่องมือตัดคาร์ไบด์ที่มีการเคลือบผิวด้วย TiCN/TiN ผลการศึกษาพบว่าเศษของของการกัดวัสดุประกอบโลหะหลักแมกนีเซียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์มีขนาดประมาณ 3-4 ไมโครเมตร มีลักษณะคล้ายพื้นเลื่อย มีลักษณะต่อเนื่องหรือกึ่งต่อเนื่อง กลไกการเกิดการสึกหรอปฐมภูมิ คือ การเกิดการสึกหรอแบบขัดสี เฟสเสริมแรงอนุภาคของซิลิกอนคาร์ไบด์ในวัสดุประกอบโลหะหลักแมกนีเซียมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ค่าความหยาบผิวอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ทางทฤษฎี

2.10.2 Ren *et al.* [18] ศึกษาการกัดตัดเฉือนผิวพอกแข็งที่มีส่วนประกอบหลัก คือ โครเมียมคาร์ไบด์ (Fe-Cr-C) ที่ถูกเชื่อมติดบนแท่งเหล็กกล้าอะลูมิเนียมด้วยลวดเชื่อมอาร์กที่มีตัวประสานภายใน ความสามารถในการตัดเฉือน (Machinability) ของผิวพอกแข็งโครเมียมคาร์ไบด์ขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏและการเกิดการสึกหรอของคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ การกัดผิวพอกแข็งนี้ประกอบไปด้วยเกิดการแตกร้าออกของคาร์ไบด์ขนาดใหญ่ก่อนหน้าคมตัด การกัดตัว และแตกร้าออกของคาร์ไบด์ที่พื้นผิวที่เกิดความเครียด การกัดทำให้เกิดเศษที่มีความบางที่อัตราการตัดสูง ในการตัดคาร์ไบด์เกิดความต้านทานการเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากคมตัดทำให้เกิดเศษเกล็ดคล้ายพื้นเลื่อย การเกิดเศษเกล็ดเกิดจากกลไกการเกิดการแตกร้าเป็นหลัก รูปแบบการเกิดการสึกหรอในคมตัดสี่ขอบ (Edge chipping) และการสึกหรอด้านคมตัด (Flank wear) โดยมีสาเหตุมาจากการขัดและเสียดสีกับเฟสคาร์ไบด์

2.10.3 Ren *et al.* [19] ทำการศึกษาอุณหภูมิของการกัดผิวพอกแข็งที่มีส่วนประกอบหลักคือ โครเมียมคาร์ไบด์ (Fe-Cr-C) ที่ถูกเชื่อมติดบนแท่งเหล็กกล้าอะลูมิเนียมด้วยลวดเชื่อมอาร์กที่มีตัวประสานภายใน ในการกัดไม่มีการหล่อเย็นและป้อนมีดมีการติดเทอร์โมคัพเพิลเพื่อทำการวัดอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิของการกัดผิวพอกแข็งคาร์ไบด์เฉลี่ยมีค่าประมาณ 650-700°C ขณะที่อุณหภูมิของการกัดผิวพอกแข็งคาร์ไบด์หยาบมีค่าประมาณ 600°C อุณหภูมิของการตัดเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วตัดและอัตราการป้อนเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการเพิ่มที่มีผลมาจากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน อุณหภูมิการกัดของผิวพอกแข็งที่มีคาร์ไบด์ละเอียดมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับผิวพอกแข็งที่มีคาร์ไบด์หยาบที่ความเร็วรอบและอัตราการป้อนสูง

2.10.4 Verezuba *et al.* [6] แสดงความสามารถในการตัดวัสดุประกอบนาโนผิวเหล็กกล้าหลัก (105WCr 6 steel) ที่มีการตกผลึกของคาร์ไบด์ขนาดนาโน (Fe,W)<sub>6</sub>C ที่ผลิตด้วยเทคโนโลยีการฉีดโลหะหลอมเหลวด้วยเลเซอร์ และนำไปทำการอบชุบด้วยความร้อน พบว่าความแข็งของชิ้นวัสดุ

ประกอบนาโนหนา 1 มิลลิเมตรมีค่าสูงกว่าวัสดุประกอบหลักเริ่มต้น ความสามารถในการตัดของวัสดุประกอบนาโนโดยลิวส์คิวบิกโบรอนไนไตรด์ (Cubic boron nitride: CBN) มีค่าต่ำกว่าแต่มีค่าที่มีเหตุผลที่ยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประกอบหลักเริ่มต้น วัสดุตัดที่ผลิตใหม่จากวัสดุประกอบนาโนโดยลิวส์ CBN มีค่าความต้านทานการสึกหรอสูงกว่า อายุการใช้งานยาวกว่า และทำให้เกิดแรงตัดต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างเหล็กกล้า C45 และวัสดุประกอบหลักเริ่มต้น

2.10.5 Lin *et al.* [20] ทำการกลึงเหล็กกล้าผสม AISI 4340 ด้วยมีดเล็บบที่ประกอบด้วย 50% CBN และ 45% TiC ผลการทดลองพบว่าอายุการใช้งานมีดเล็บบ CBN มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการตัดเพิ่มขึ้น ในการตัดที่ความเร็วรอบต่ำการสึกหรอเกิดจากขีดและถูของวัสดุที่สัมผัสกันเป็นหลัก เมื่อความเร็วในการตัดเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดพื้นผิวติดกับใบตัดและต่อต้านการเกิดการสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วรอบการกลึงสูงเศษการกลึงเปลี่ยนแปลงจากแบบต่อเนื่องเป็นร่องฟันเลื่อย แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นทำให้คมตัดเกิดการสึกหรอ เนื่องจากการแพร่ระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือตัดเกิดขึ้นรุนแรงที่ความเร็วตัดสูง การเกาะยึดระหว่างอนุภาคแข็งอ่อนแอลง และการสึกหรอของคมตัด

2.10.6 Da Silva *et al.* [52] ทำการกัดชิ้นงานเหล็กกล้า AISI 1047 ด้วยการใช้ความเร็วตัด 200-260 m/min ความลึกของการกัด 2 มม. อัตราการป้อนต่อฟัน 0.14-0.22 mm/rev การตัดเปียกและแห้ง ผลการทดลองพบว่าด้วยมีดเล็บบเคลือบผิวด้วย TiAlN อัตราการกัดชิ้นงานมีค่าสูงเมื่อเป็นการกัดแบบเปียกเนื่องจากคมตัดไม่เกิดการสึกหรอ การกัดเปียกที่ลดอัตราการไหลสารหล่อเย็นสามารถป้องกันการเกิดเศษ ความหนายของผิวกัดมีค่าประมาณ 0.15-1.1 ไมโครเมตร โดยค่าต่ำสามารถทำได้ ที่ค่าความเร็วตัดต่ำ สภาพการตัดที่เหมาะสมที่สุดคืออัตราการหล่อเย็น 15,000 ml/h ความเร็วตัด 200 m/min และอัตราการป้อน 0.14 mm/rev อัตราการไหล 15,000 ml/h ที่มีค่าเทียบเท่า 276,000 ml/h ในสภาพเปียก

2.10.7 Aykut *et al.* [4] ทำการศึกษาอิทธิพลความสามารถในการตัดเฉือน เช่น ความเร็วตัด อัตราป้อน และความลึกของการตัด ที่มีผลต่อการสึกหรอเครื่องมือตัด รูปร่างของเศษกัด และแรงตัด ในการกัดปาดผิวหน้าโลหะผสมพิเศษ โคบอลต์ โดยใช้มีดเล็บบที่เคลือบผิว TiN/TiCN/TiAlC ด้วย PVD และมีดเล็บบที่ไม่เคลือบผิว ผลการทดลองพบว่า แรงการตัดเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกในการตัดและอัตราการป้อนเพิ่มขึ้น ความเร็วการตัดคือตัวแปรในการเร่งการเกิดการสึกหรอของคมตัด การวัดแรงพบว่าแรงในแกน Z ของการกัดปาดผิวหน้ามีค่าสูงที่สุด เนื่องจากโลหะผสมพิเศษ โคบอลต์มีค่าความแข็งแรงครากสูง รูปร่างของเศษการตัดมีความแตกต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงสภาพการตัด สำหรับมีดเล็บบที่เคลือบผิว และมีดเล็บบที่ไม่เคลือบผิว



2.10.8 Tapoglou and Antoniadis [5] แสดงแบบจำลองการกัดผิวหน้า (face milling) 3 มิติ เหล็กกล้า St52-3 และ Ck60 ผลการจำลองที่ได้ถูกนำไปทำการวัดเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการกัด รูปร่างของพื้นผิว และความหยาบผิว ของการทดลองจริง ผลการจำลองสถานการณ์พบว่า แบบจำลอง ที่สร้างขึ้นมาจาก CAD มีความเที่ยงตรงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีเคลื่อนที่การตัด รูปร่างของการตัด และความหยาบผิว แบบจำลองมีความเที่ยงตรงสามารถนำมาใช้ในการพยากรณ์สถานะที่เหมาะสมสำหรับการกัดผิวหน้าชิ้นงานได้



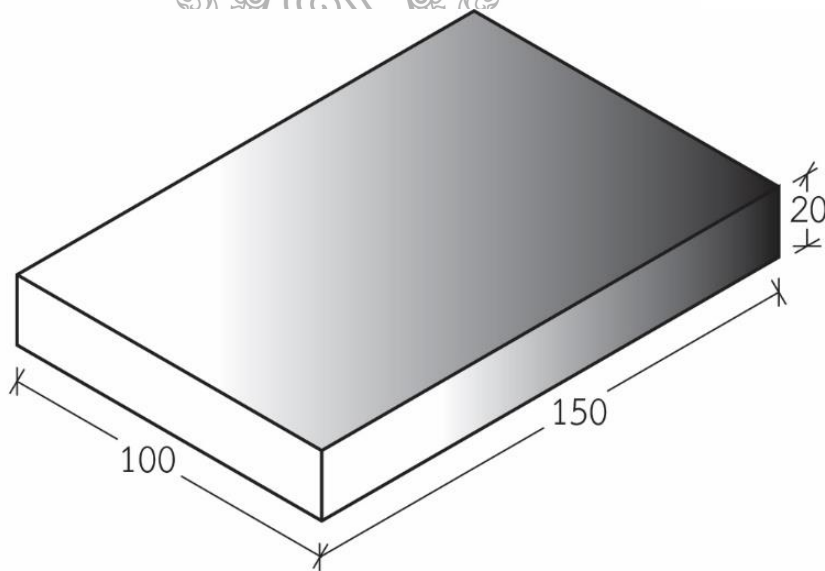
### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษากรรมวิธีการกัดปาดผิวหน้าแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น โดยการใช้เครื่องมือตัดชนิดคาร์ไบด์ โดยแบ่งออกเป็นชั้นทดลองที่มีการสร้างชั้นรองพื้นและชั้นที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นเป็นชั้นทดลองการกัดปาดผิวหน้า ลักษณะการกัดปาดผิวหน้าโดยใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นหลังจากนั้นนำเครื่องมือตัดมาตรวจสอบการสึกหรอและตรวจสอบความหยาบผิวการวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการดำเนินการดังนี้

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเชื่อมพอกผิวแข็ง

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง คือ เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (JIS S50C) ที่มีส่วนเคมีดังแสดงในตารางที่ 3.1 แผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนถูกตัดให้มีลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีขนาดความกว้าง 100 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร และความหนา 20 มิลลิเมตร ดังแสดงรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานก่อนทำการทดลอง (หน่วย : มิลลิเมตร)

3.1.2 ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (SMAW) วัสดุลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยลวดเชื่อม 2 ประเภท คือ ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ที่ใช้สำหรับการเชื่อมรองพื้น (Buffer Layer Electrode) เป็นลวดประเภทไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Electrode) และลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์พอกแข็ง (Hard-Facing Layer Electrode) ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั้ง 2 ชนิด มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 มิลลิเมตร ความยาว 350 มิลลิเมตร มีส่วนผสมเคมีดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุและลวดเชื่อม (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

Material		Chemical composition (%)						
Type	Standard	C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr	
Medium carbon steel	JIS G 4051 S50C	0.52	0.35	0.99	0.04	0.04	0.20	
Buffer electrodes	JIS Z 3212 : D5016	0.07	0.62	1.18	0.01	-	0.01	
Hardfacing electrodes	JIS Z 3251 : DF2B-600-B	0.45	0.5	1.15	0.6	-	5.0	

3.1.3 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในงานวิจัย เครื่องเชื่อมชนิดกระแสคงที่ (Constants Current : CC) ที่ใช้ในการทดลองมีเครื่องหมายทางการค้าชื่อ LONGWELL TIG AC/DC 315P แสดงดังรูปที่ 3.2 (ก) เป็นเครื่องเชื่อมทิก (TIG) ระบบอินเวอร์เตอร์มีแรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input Voltage) 380 โวลต์ กระแสไฟฟ้าขาออกขณะเชื่อม (OUTPUT CURRENT RANGE) 20-315 แอมแปร์ สามารถเชื่อมได้ทั้งกระแสตรง (DC) และกระแสสลับ (AC) โดยการกดสวิตช์ที่แผงควบคุมเครื่องเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.2 (ข) และเครื่องเชื่อมยังสามารถปรับระบบในการเชื่อมเป็นการเชื่อมทิก (TIG) และการเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (MMA) โดยในการทดลองนี้จะเลือกใช้การเชื่อมอาร์กโลหะด้วยมือ (Manual Metal Arc Welding : MMA)

ก) เครื่องเชื่อม

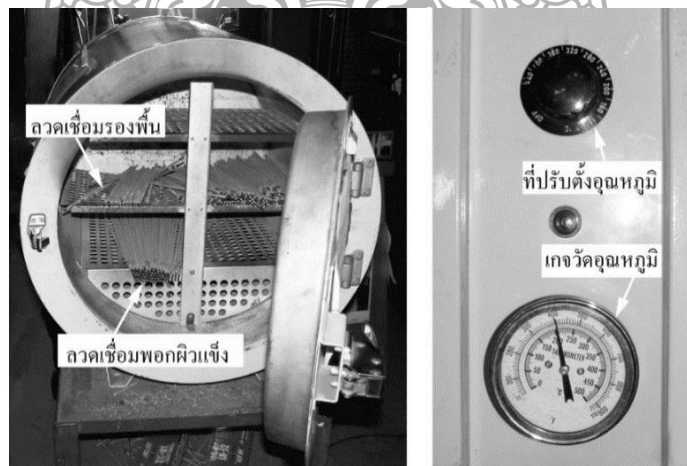


ข) แผงควบคุมเครื่องเชื่อม



รูปที่ 3.2 เครื่องเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

3.1.4 ตู้อบลวดเชื่อม ตู้อบที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถปรับตั้งอุณหภูมิได้ที่สวิตช์และมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 120-440 องศาเซลเซียส ลูกศรสีขาวในรูปที่ 3.3 และสามารถอ่านค่าของอุณหภูมิความร้อนได้ที่เกจตรวจจับอุณหภูมิตั้งลูกศรสีขาวในรูปที่ 3.3 สำหรับการอบแผ่นเหล็กกล้าคาร์บอนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที และทำการอบลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั้ง 2 ชนิด ที่อุณหภูมิ 300-350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที เพื่อกำจัดความชื้นออกจากลวดเชื่อมและวัสดุทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การอบลวดเชื่อมและชิ้นงาน

## 3.2 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานเชื่อม

3.2.1.1 ผิวหน้าด้านบนของเหล็กกล้าคาร์บอนนำมาขัดละเอียดด้วยเครื่องเจียรระโนมือเพื่อกำจัดผิวดิบของเหล็กกล้าโดยใช้เครื่องเจียรระโนมือมีเครื่องหมายการค้า MAKTEC MT958 และมีความเร็วรอบ 11,000 รอบต่อนาที และใช้ใบกระดาษทรายซ้อนเบอร์ 180 ขนาด 4 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ก)

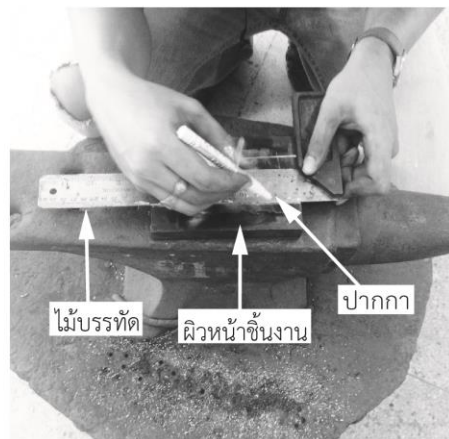
3.2.1.2 เมื่อได้ทำการเจียรระโนผิวดิบของเหล็กกล้าคาร์บอนตามขั้นตอนที่ 1 แล้วเสร็จในขั้นตอนต่อไป คือ การสร้างขอบเขตบนผิวเหล็กกล้าโดยการใช้ปากกาทำสัญลักษณ์บนผิวของเหล็กกล้าดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข) โดยให้มีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนานกับแผ่นเหล็กกล้าโดยมีขนาดความกว้าง 50 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร โดยปฏิบัติตามมาตรฐาน JIS Z3114 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ค)



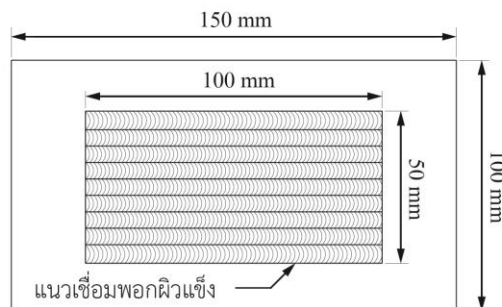
ก) การเจียรระโนผิวดิบ



ข) การสร้างขอบเขตแนวเชื่อม



ง) ระยะเวลาขอบเขตแนวเชื่อม



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

3.2.2 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง การเชื่อมพอกผิวแข็งในขั้นตอนแรกได้ทำการปรับตั้งของปริมาณกระแสเชื่อมในการสร้างชั้นรองพื้นที่ 100 แอมแปร์ และปริมาณกระแสเชื่อมในการสร้างชั้นพอกผิวแข็งที่ 115 แอมแปร์ กำหนดให้มีอุณหภูมิการอุ่นชิ้นงาน (Pre-Heat Temperature) และอุณหภูมิขณะเทียวเชื่อม (Interpass temperature) การเชื่อมที่ 150 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) การเชื่อมเป็นแบบเดินแนว (Autogeneous Welding) บนผิวของแผ่นเหล็กกล้าโดยไม่สายลวดเชื่อม (Non-waving) ทิศทางการเชื่อมขนานกับด้านความยาวของแผ่นเหล็ก โดยช่างเชื่อมที่ผ่านการสอบวัดฝีมือจากสถาบันพัฒนาฝีมือและแรงงานกระทรวงแรงงานและสวัสดิการสังคมในระดับที่ 1 และใช้ท่าราบในการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) และการเชื่อมพอกผิวแข็งจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ แบบที่ 1 ทำการเชื่อมด้วยลวดรองพื้นที่ในชั้นที่ 1 และทำการเชื่อมพอกผิวแข็งขึ้นไป 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ค) และแบบที่ 2 ทำการเชื่อมด้วยลวดพอกแข็งซ้อนกัน 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ง)



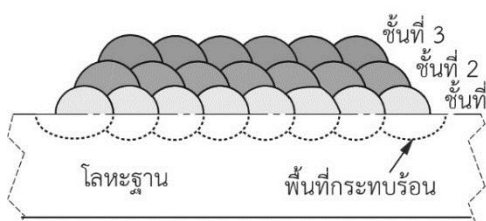
ก) การเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยท่าราบ



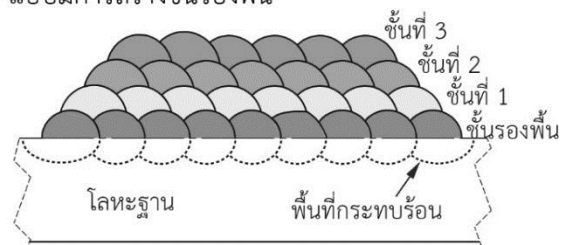
ข) การวัดอุณหภูมิ



ค) แบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น



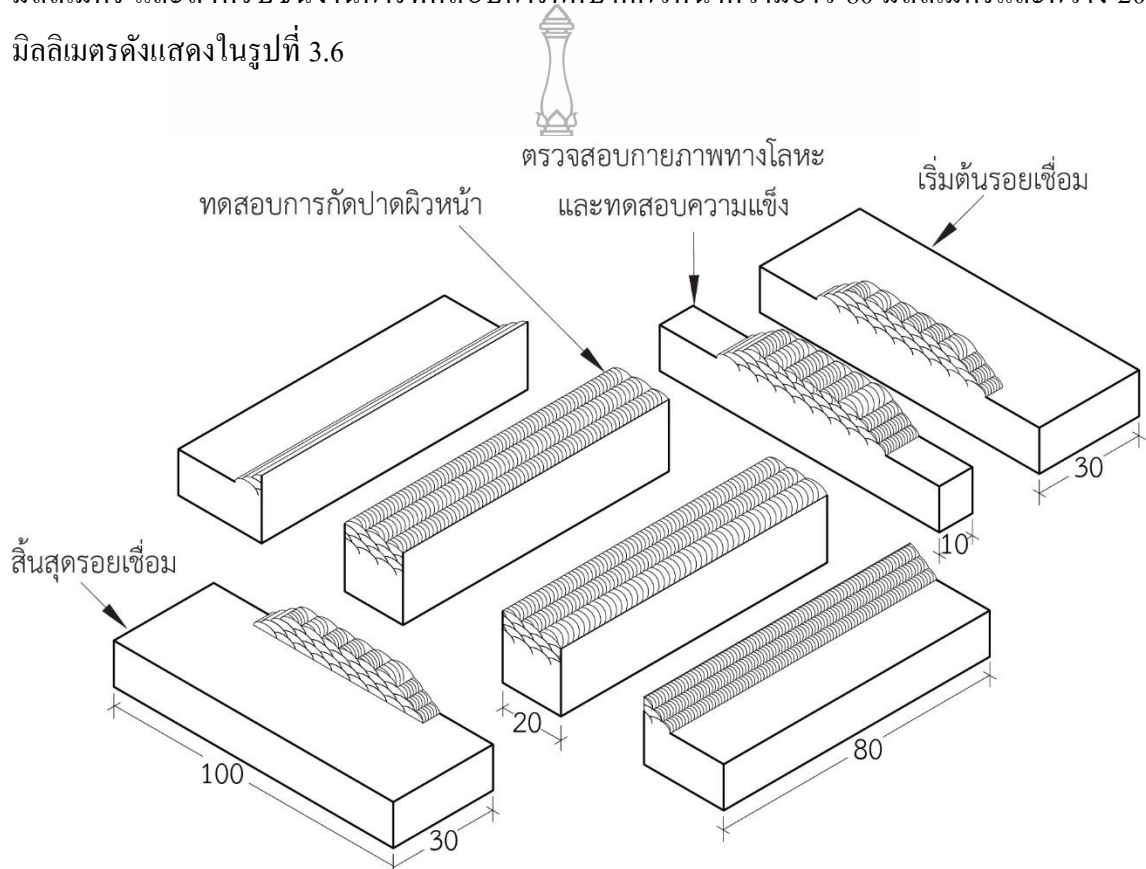
ง) แบบมีการสร้างชั้นรองพื้น



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

### 3.3 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

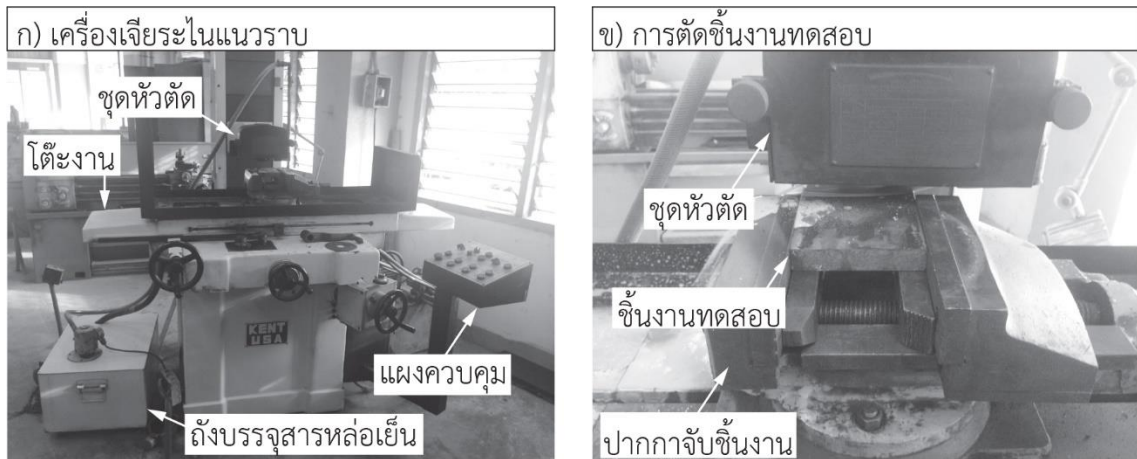
3.3.1 ออกแบบการตัดชิ้นงาน ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งตามหัวข้อ 3.2.1 ได้นำมาทำการออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมโดยจะตัดแบ่งชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมออกเป็น 4 ส่วน โดยกระทำการวัดระยะจากส่วนที่เริ่มต้นรอยเชื่อมเข้ามา 30 มิลลิเมตรและเว้นพื้นที่ไว้สำหรับชิ้นงานตรวจสอบกายภาพทางโลหะวิทยาและความแข็งของชิ้นงานที่ได้มีขนาด 10 มิลลิเมตร และสำหรับชิ้นงานการทดสอบการกัดปาดผิวหน้าความยาว 80 มิลลิเมตรและกว้าง 20 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบ

3.3.2 กระบวนการตัดชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อม ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ได้ผ่านขั้นตอนการออกแบบการตัดชิ้นงานทดสอบรอยเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 3.6 และในขั้นต่อไปจะนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการตัดทางกล โดยกระบวนการตัดนี้ใช้ประยุกต์ใช้เครื่องเจียรระโนแนวราบ (Surface Grinder) ที่มีเครื่องหมายการค้า KENT USA โดยมีความเร็วของโต๊ะงานตั้งแต่ 15-85 ฟุตต่อนาที มอเตอร์เพลงานขนาด 3 แรงม้าและความเร็วของเพลงาน 3,480 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูป 3.7 (ก)

แล้วนำชิ้นงานมาทำการจับยึดด้วยปากกาจับชิ้นงานดังแสดงในรูป 3.7 (ข) จากนั้นทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการตัดชิ้นงานที่ได้ออกแบบเอาไว้บนแผงควบคุมและเปิดปั๊มสารหล่อเย็นแล้วเปิดเครื่องที่แผงควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 3.7 (ก)

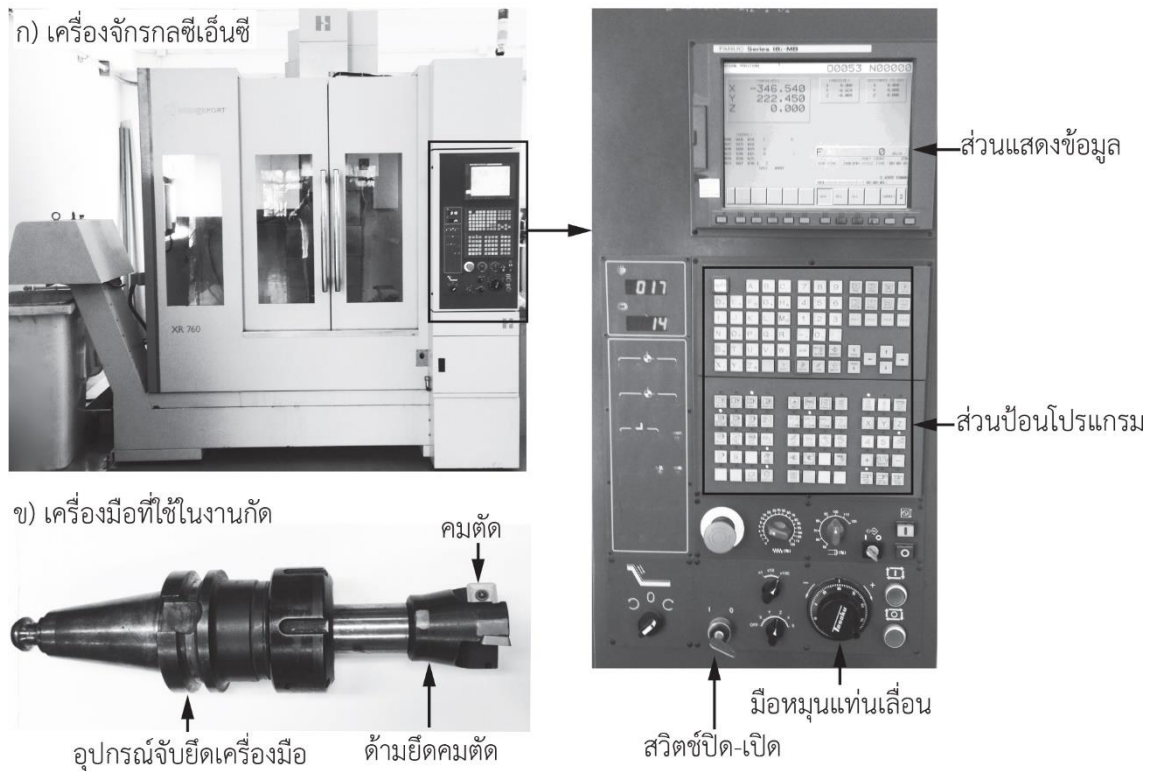


รูปที่ 3.7 เครื่องเจียระไนแนวราบ

### 3.4 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในทดสอบการกัดแปดผิวหน้า

3.4.1 เครื่องจักรกลที่ใช้ในทดสอบการกัดแปดผิวหน้า การทดสอบนี้ใช้เครื่องกัดอัตโนมัติแบบเพลงานแนวตั้ง โดยมีเครื่องหมายการค้า BRIDEPORT XR 760 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) บริเวณแผงควบคุมมีหน้าจอแสดงข้อมูลขนาด 10 นิ้วและมีแป้นพิมพ์ไว้สำหรับป้อนโปรแกรมในการควบคุมการตัดเฉือน โดยมีเครื่องกัดอัตโนมัติมีความเร็วรอบของเพลงาน (Work Spindle) สูงที่สุด 12,000 รอบต่อนาที ขนาดมอเตอร์ 18.5 กิโลวัตต์ มีอัตราป้อนในแนวแกน X,Y และแกน Z ตั้งแต่ 0.0025-25 เมตรต่อนาทีและขนาดโต๊ะงานมีความกว้าง 500 มิลลิเมตร ความยาว 900 มิลลิเมตร การระบายความร้อนสามารถใช้ได้ 2 แบบ คือ แบบใช้สารหล่อเย็นกับแบบใช้อากาศโดยมีความจุของถังเก็บสารหล่อเย็น 300 ลิตร อัตราการไหลของสารหล่อเย็นสูงสุด 60 ลิตรต่อนาที อุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tool holders) ได้มาทำการจับยึดกับค้ำยึดคมตัด (Tool Tip Carrier) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ข) ค้ำยึดคมตัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร อัตราการกัดลึก (Cutting depth) 10.7 มิลลิเมตร สามารถใส่เครื่องมือคมตัด (Insert) ได้จำนวน 3 เม็ด

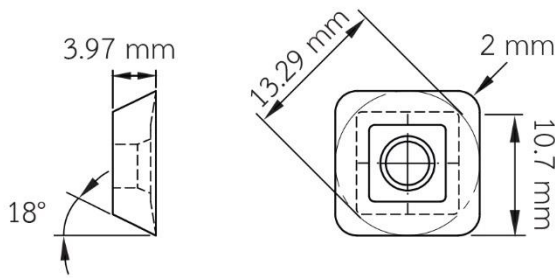




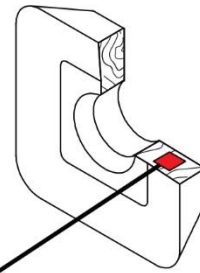
รูปที่ 3.8 เครื่องกัดอัตโนมัติแบบเพลางานแนวตั้ง

3.4.2 เครื่องมือตัดที่ใช้ในทดลองการกัดปาดผิวหน้า การทดสอบการกัดปาดผิวหน้าแนวเฉียงจะกำหนดให้ใช้เครื่องมือตัดรูปทรงเรขาคณิตมีขนาดความกว้าง 10.7 มิลลิเมตร และความหนา 3.97 มิลลิเมตร โดยมีเครื่องหมายการค้า SANDVIK ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ก) ที่ผลิตจากวัสดุคาร์ไบด์ (Carbide) ตามมาตรฐาน ISO เกรด P40 และเคลือบผิวด้วยกรรมวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD) โดยมีสารประกอบดังนี้ ดีบุก (TiN) ร่วมกับไทเทเนียมคาร์ไบด์ (TiCN) และอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) [21] และได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของเครื่องมือตัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด บริเวณเนื้อวัสดุของเครื่องมือคมตัด พบโครงสร้างจุลภาคในบริเวณเนื้อวัสดุของเครื่องมือตัดมีลักษณะเป็นเม็ดทรงเหลี่ยมขนาดเล็กจัดเรียงเป็นกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ค) และทำการตรวจสอบปริมาณส่วนผสมทางเคมีในตำแหน่งที่กำหนดดังในรูป 3.9 (ค) พบว่าโดยมีธาตุหลักจำนวน 4 ชนิด คือ คาร์บอน (C) โคบอลต์ (Co) ทังสเทน (W) และมีปริมาณส่วนผสมทางเคมีของธาตุคาร์บอน (C) 12.35 เปอร์เซ็นต์ ธาตุโคบอลต์ (Co) 2.49 เปอร์เซ็นต์ ธาตุทังสเทน (W) 85.16 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 (ง)

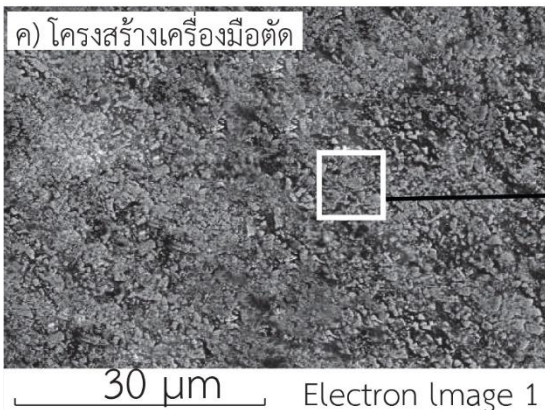
ก) ขนาดเครื่องมือตัด



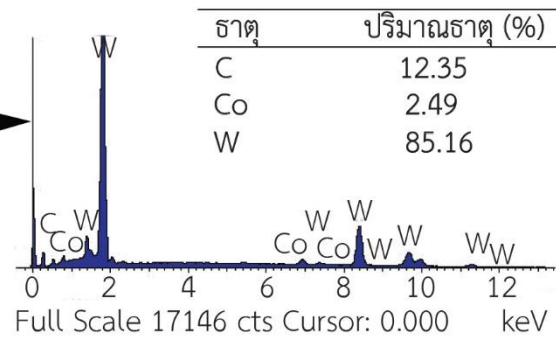
ข) ตำแหน่งการตรวจสอบ



ค) โครงสร้างเครื่องมือตัด

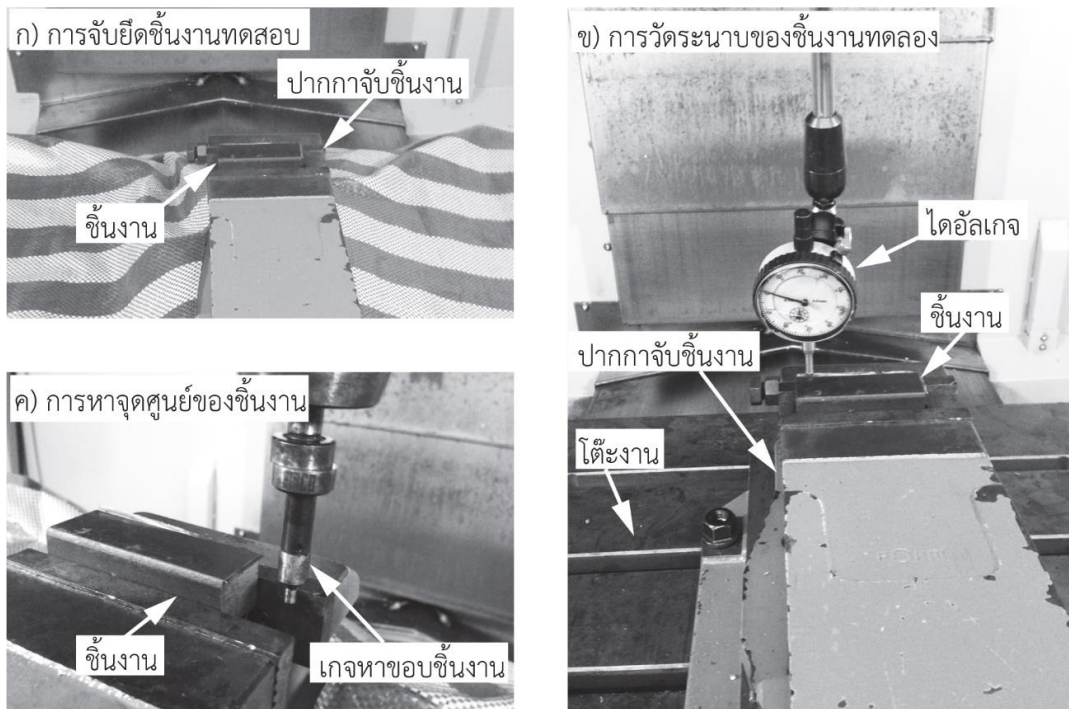


ง) ปริมาณส่วนผสมของเครื่องมือตัด



รูปที่ 3.9 เครื่องมือคมตัด

3.4.3 ขั้นตอนการจับยึดชิ้นงานทดสอบ ชิ้นงานเชื่อมพอกแข็งที่ผ่านกระบวนการเตรียมชิ้นงานทดสอบการกัดปาดหน้าในหัวข้อ 3.3.2 จะได้ชิ้นงานทดสอบการกัดปาดหน้าที่มีขนาดความกว้าง 20 มิลลิเมตรและความยาว 80 มิลลิเมตร ถูกนำมาทำการจับยึดด้วยปากกาจับชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ก) และนำนาฬิกาวัด (Dial Gauge) มายึดเกาะบริเวณเพลางานของเครื่องกัดแบบอัตโนมัติ เพื่อใช้วัดระดับความเป็นระนาบของชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ข) เพื่อทำการวัดระดับความเป็นระนาบของชิ้นงานทดสอบเสร็จแล้วก็ทำการหาจุดศูนย์ของชิ้นงาน (Workpiece zero point) โดยการใช้อุปกรณ์ขอบชิ้นงาน (Mechanical Edge Finder) และใช้ความเร็วรอบของเพลางานในการหาขอบชิ้นงานประมาณ 600 รอบต่อนาที ด้วยการเลื่อนโต๊ะงานในขอบของชิ้นงานทดสอบแต่ละกับปลายของขอบชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (ค)



รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตั้งค่าชิ้นงานทดสอบ

### 3.5 ขั้นตอนการดำเนินการทดลองการกัดปาดผิวหน้า

การดำเนินการทดลองการกัดปาดผิวหน้า โดยสามารถแบ่งตัวแปรในการกัดปาดผิวหน้า และการเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและดำเนินการทดลองรายละเอียดมีดังนี้

#### 3.5.1 ตัวแปรในการทดลองการกัดปาดผิวหน้า

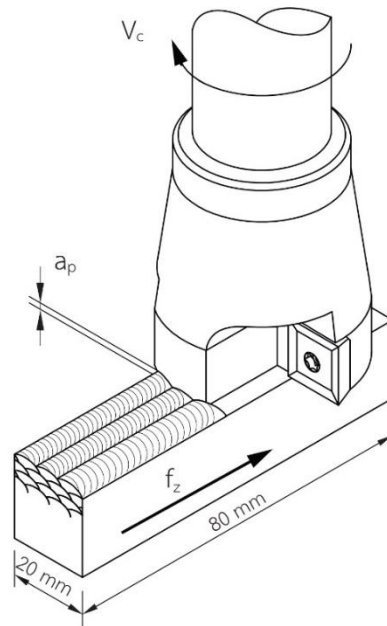
3.5.1.1 ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ค-ง) คือ แบบมีการสร้างชั้นรองพื้นด้วยลวดเชื่อมประเภทไฮโดรเจนต่ำและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น

3.5.1.2 การระบายความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือแบบที่มีการใช้สารหล่อเย็นประเภท Soluble oils โดยอัตราส่วนผสมของปริมาณของน้ำมันกับน้ำ 1 : 20 ส่วนและไม่ใช้สารหล่อเย็น [22]

3.5.1.3 ความเร็วในการตัดเฉือน ( $V_c$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 แบ่งออกเป็น 4 ระดับ คือ 100, 140, 180 และ 220 เมตรต่อนาที

3.5.1.4 อัตราป้อน ( $f$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 แบ่งออกเป็น 4 ระดับ คือ 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 มิลลิเมตร

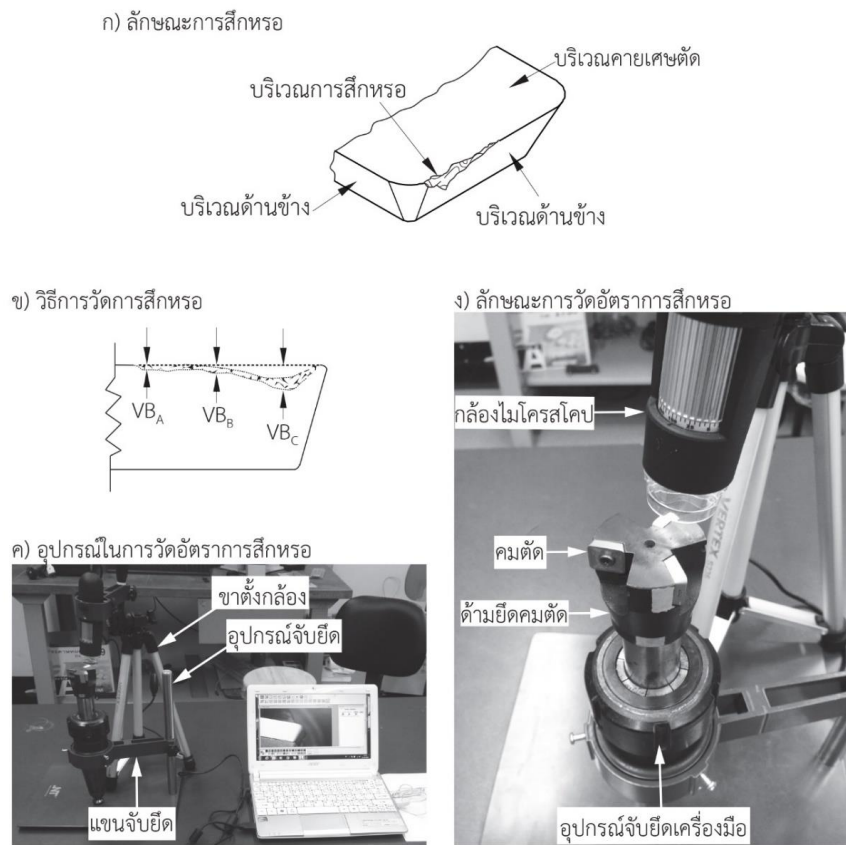
3.5.1.5 ความลึกที่ 2 มิลลิเมตร



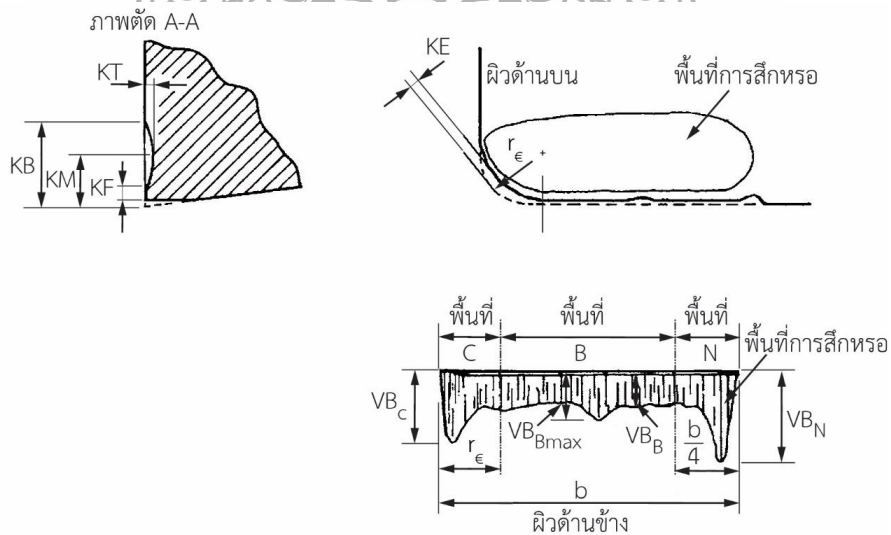
รูปที่ 3.11 การทดสอบการกัดปาดหน้า

### 3.6 ขั้นตอนการทดสอบ

3.6.1 การตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องมือตัด เครื่องมือคมตัดที่ผ่านกระบวนการทดสอบการตัดเฉือนในขั้นตอนทดสอบในหัวข้อ 3.5 ได้เกิดการสึกหรอที่บริเวณขอบคมตัดดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ก) จึงทำการตรวจสอบอัตราการสึกหรอของวัสดุคมตัดโดยจะทำการวัดบริเวณขอบคมตัดที่มีการสึกหรอโดยปฏิบัติตามเกณฑ์มาตรฐาน ISO 3685-1977 [15] ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ข) โดยในการตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดมีอุปกรณ์ในการตรวจสอบดังนี้ กล้องไมโครสโคปแบบ USB (USB Microscope) ขาดังกล้องและชุดจับยึดเครื่องมือจับยึดด้ามคมตัด อุปกรณ์ได้กล่าวถึงถูกนำมาประกอบเข้ากันดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ค) วิธีทำการตรวจสอบการสึกหรอโดยการนำอุปกรณ์จับยึดเครื่องมือ (Tool Holder) สวมเข้ากับแขนจับยึดและนำกล้องไมโครสโคปแบบ USB มาตรวจสอบบริเวณขอบคมตัดของเครื่องมือตัด ดังแสดงในรูปที่ 3.12 (ง)

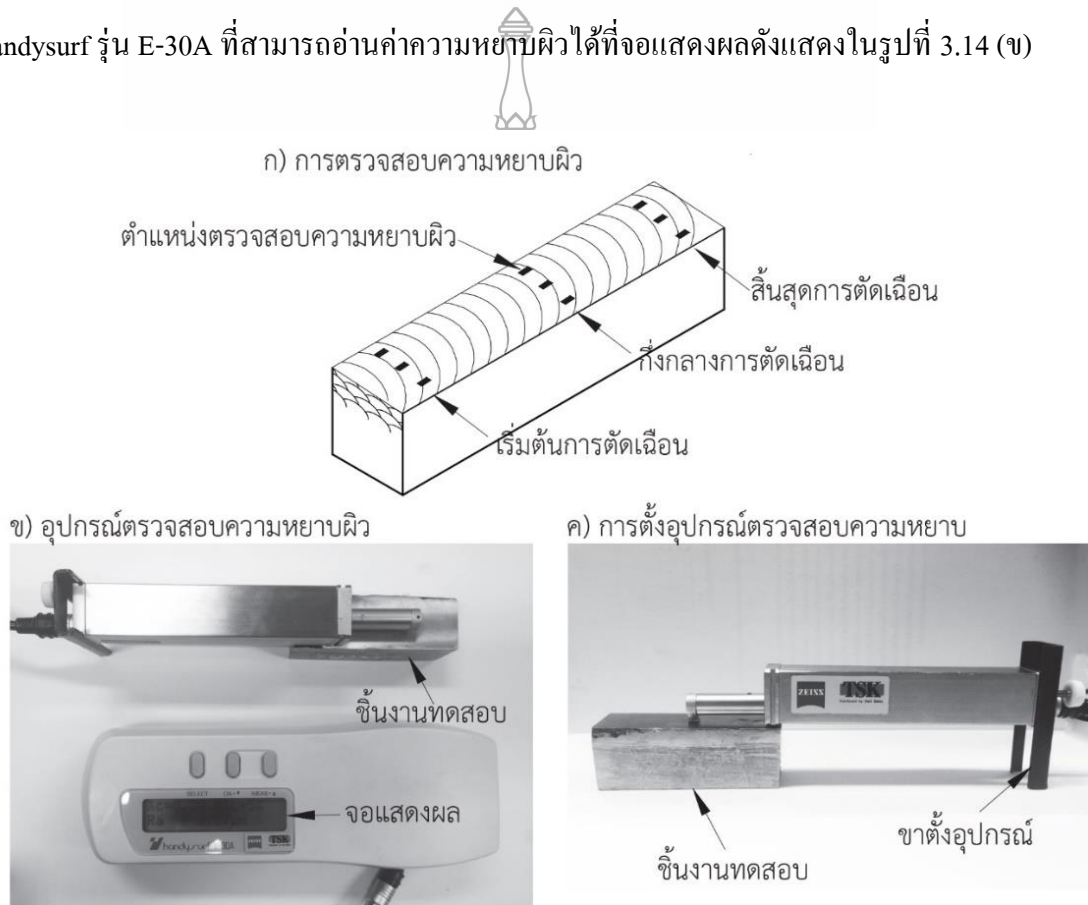


รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด



รูปที่ 3.13 การวัดพื้นที่สึกหรอตามของเครื่องมือคาร์ไบด์ตามมาตรฐาน ISO 3685-1977 [15]

3.6.2 การตรวจสอบความหยาบผิว ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านกระบวนการทดสอบความสามารถในการตัดเฉือนดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.10 ได้ถูกนำมาตรวจสอบความเรียบผิวและทำการตรวจสอบในตำแหน่งบริเวณเริ่มต้น กึ่งกลาง และสิ้นสุดกระบวนการตัดเฉือนและในทุกตำแหน่ง จะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ได้กำหนดทิศทางในการตรวจสอบขนานกับทิศทางในการตัด โดยกำหนดค่าในการวัดความเรียบผิว (Cutt-off length) 0.8 มิลลิเมตร [24] ดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ก) โดยการตรวจสอบความหยาบผิวในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องมือวัดความหยาบผิวที่มีเครื่องหมายทางการค้า Handysurf รุ่น E-30A ที่สามารถอ่านค่าความหยาบผิวได้ที่จอแสดงผลดังแสดงในรูปที่ 3.14 (ข)



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบความหยาบผิว

3.6.3 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ เครื่องมือตัดที่ทำการตรวจสอบการสึกหรอดังแสดงในรูปที่ 3.12 ได้ถูกนำมาทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ โดยจะทำการตรวจสอบในพื้นที่ที่เกิดการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดของเครื่องมือคมตัดที่ผ่านกระบวนการทดสอบความสามารถในการตัดเฉือนดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ก) การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีในงานวิจัยนี้โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด

เครื่องหมายการค้า JEOL รุ่น JSM-6510LV โดยมีกำลังขยายตั้งแต่ 15-200,000 เท่าและเครื่องวิเคราะห์กระจายการพลังโดยมีเครื่องหมายการค้า OXFORD ดังแสดงในรูป 3.15 (ข)

ก) ตำแหน่งการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมี



ข) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกวาด



รูปที่ 3.15 การตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีและวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ

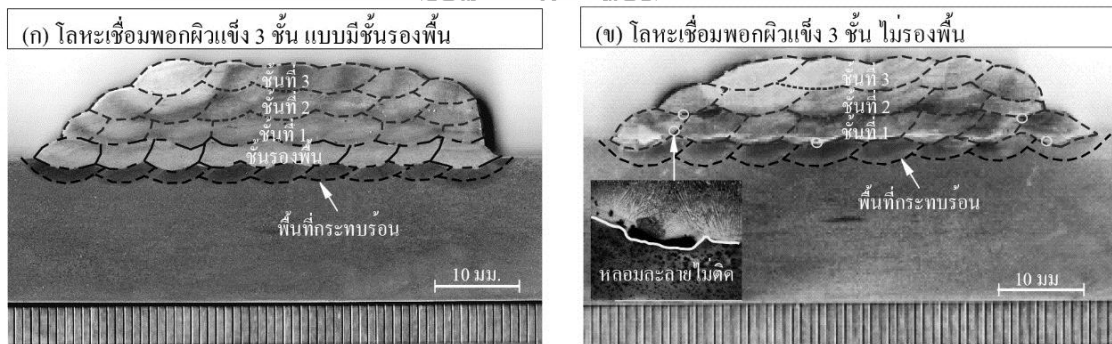


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูล

#### 4.1 อิทธิพลของจำนวนชั้นพอกผิวแข็งแบบรองพื้นและไม่รองพื้นต่อสมบัติของโลหะเชื่อมเหล็กกล้าคาร์บอน S50C

4.1.1 การตรวจสอบโครงสร้างมหภาค ผลการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคในรูปที่ 4.1 แสดงการเชื่อมทั้งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็งและแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ก) พบโลหะเชื่อมที่มีความสมบูรณ์ปราศจากจุดบกพร่องใดๆ ในโลหะเชื่อมหรือระหว่างชั้นแนวเชื่อม อย่างไรก็ตามเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างมหภาคของแนวเชื่อมที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง 3 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) พบโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีความสมบูรณ์ปราศจากจุดบกพร่องเช่นเดียวกับการเชื่อมทั้งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้น



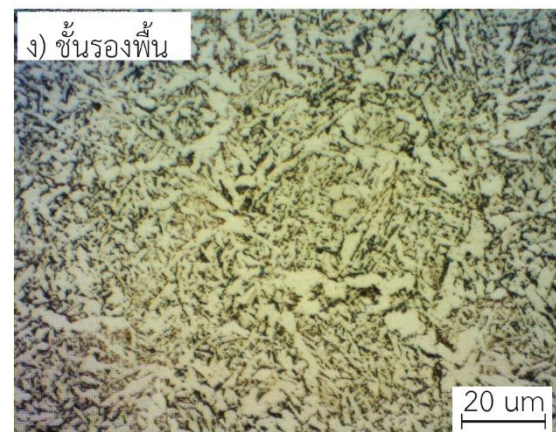
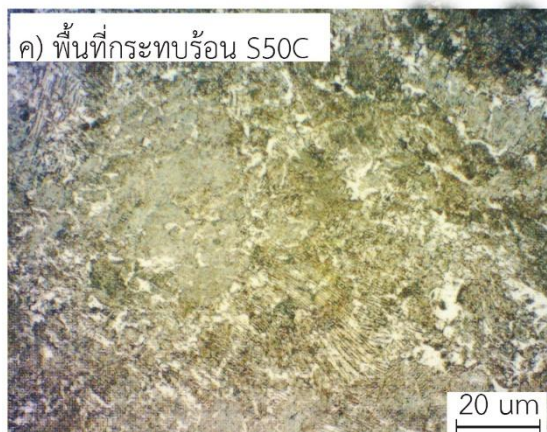
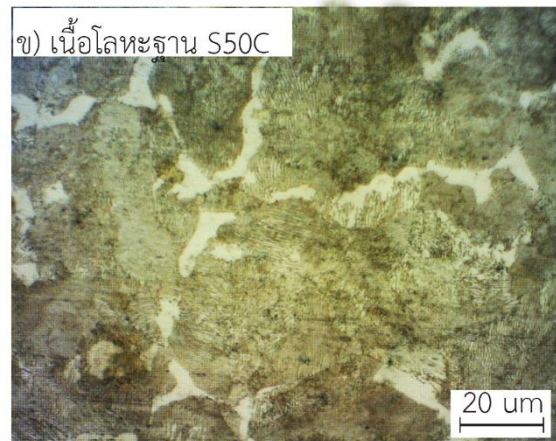
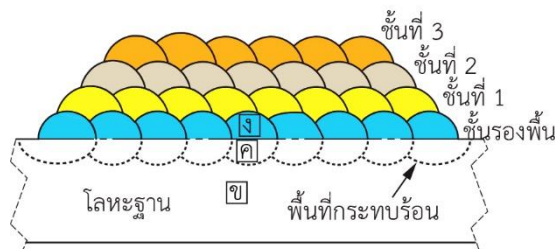
รูปที่ 4.1 โครงสร้างมหภาคโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง

4.1.2 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค รูปที่ 4.1 ในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งและโลหะฐานของชิ้นงานที่ทำการสร้างชั้นเชื่อมรองพื้นและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ถูกนำมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและแสดงให้เห็นรายละเอียดดังรูปที่ 4.2 ในตำแหน่งโลหะฐานในรูปที่ 4.2 (ก) พบว่าตำแหน่งโลหะคือเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ประกอบด้วยโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 เฟส คือพื้นที่สีขาวและพื้นที่สีเข้ม เมื่อเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าคาร์บอนที่มีส่วนผสมทางเคมีของธาตุคาร์บอน 0.52 % กับแผนภาพสมดุลเฟสระหว่าง เหล็ก-เหล็กคาร์ไบด์ พบว่าเฟสของ



เหล็กกล้าที่แสดงในรูปที่ 4.1 (ข) คือ เฟสของเฟอร์ไรต์ (สีขาว) และ เฟสซิเมนต์ไทต์ (สีเข้ม) นอกจากนั้นลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะฐานยังแสดงโครงสร้างแบบเดียวกันกับเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง AISI 1015 ที่เกิดการขึ้นต่อนหล่อแบบต่อเนื่อง [25] เฟสเฟอร์ไรต์ (สีขาว) และ เฟสซิเมนต์ไทต์ (สีเข้ม) มีขนาดเล็กลงในพื้นที่ที่กระตบร้อนของแนวเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ค) นอกจากนั้นความร้อนที่ได้จากการเชื่อมส่งผลให้ขนาดและรูปร่างของเฟสเฟอร์ไรต์และซิเมนต์ไทต์ในพื้นที่ที่กระตบร้อนเล็กน้อยและกระจายตัวทั่วทั้งพื้นที่ที่กระตบร้อน โครงสร้างจุลภาคของแนวเชื่อมชั้นรองพื้นในรูปที่ 4.2 (ง) โครงสร้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยโครงสร้างรูปร่างคล้ายไม้ระแนง และมีขอบเขตของเกรนเฟอร์ไรต์ที่ขนาดเล็กมาก มีลักษณะพิเศษเป็นกลุ่มสีเข้ม [26]

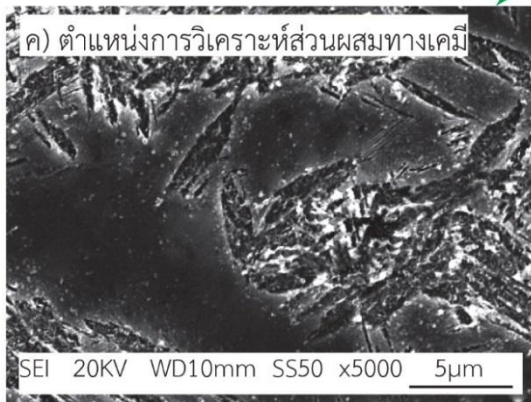
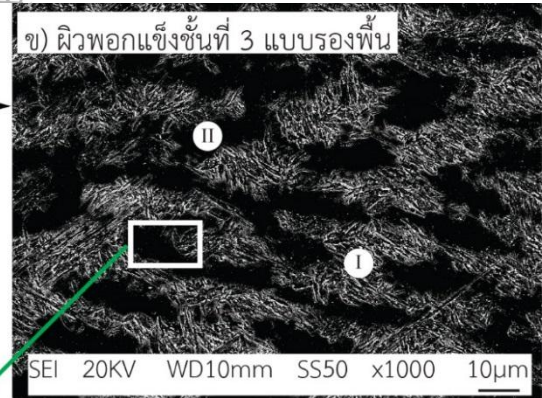
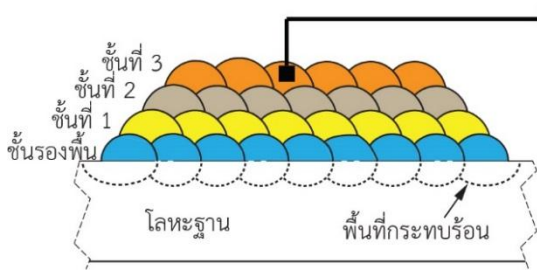
ก) ตำแหน่งการตรวจสอบ



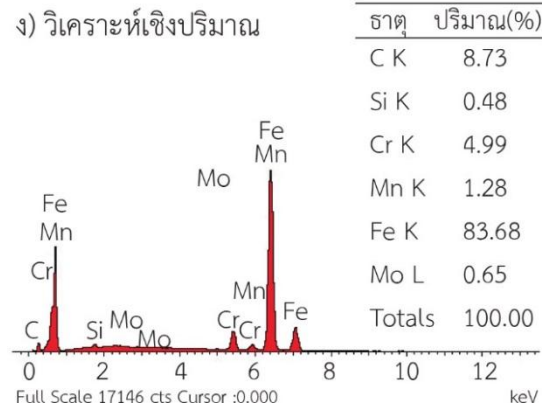
รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคโลหะฐาน

4.1.3 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมพอกผิวแข็ง การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งจะทำการตรวจสอบบริเวณตำแหน่งโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งบริเวณชั้นที่ 3 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในชิ้นงานแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) และ 4.4 (ก) พบว่า มีกลุ่มเฟสที่มีความสำคัญ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเฟสที่มีลักษณะเรียวยาวจับตัวเป็นกลุ่มและกลุ่มเฟสที่มีลักษณะเป็นพื้นสีดำ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) และ 4.4 (ข) เพื่อทำความเข้าใจพื้นเฟสในโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งจึงทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีของเฟสทั้งสองด้วยการวิเคราะห์การกระจายพลังงาน (Energy dispersive spectrometry : EDS) และใช้วิเคราะห์แบบเชิงคุณภาพ (Qualitative) ในบริเวณแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 พบว่าธาตุหลักในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 จำนวน 6 ธาตุคือ เหล็ก (Fe) คาร์บอน (C) โครเมียม (Cr) แมงกานีส (Mn) โมลิบดีนัม (Mo) ซิลิกอน (Si) ทั้งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ง) และ 4.4 (ง)

ก) ตำแหน่งการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

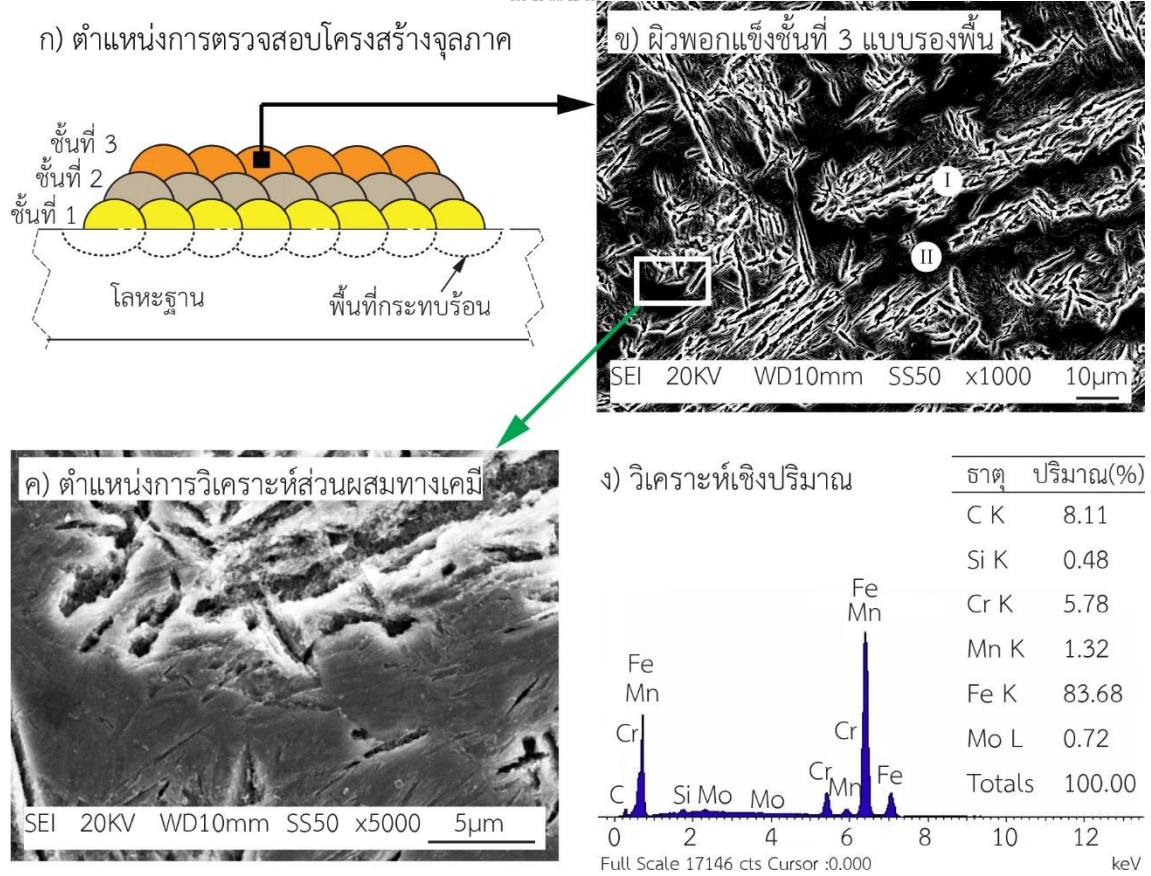


ข) ผิวพอกแข็งชั้นที่ 3 แบบรองพื้น



รูปที่ 4.3 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการสร้างชั้นรองพื้น

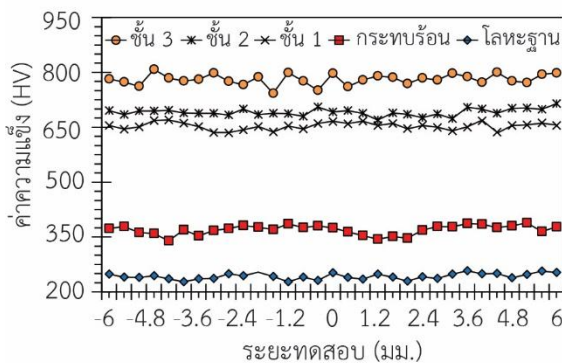
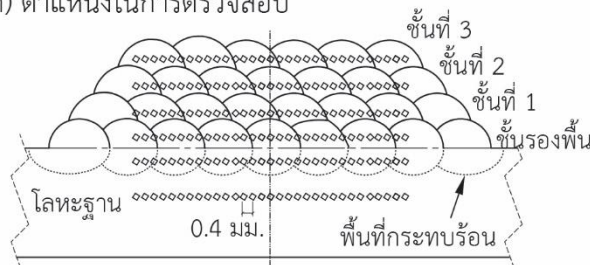
การวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ในชิ้นงานแบบมีการสร้างชั้นรองพื้น และไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น พบว่า ชิ้นงานแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นมีปริมาณของธาตุโครเมียม (Cr) 4.99 % และ โมลิบดีนัม (Mo) 0.65 % ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ง) และในชิ้นงานที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีปริมาณของธาตุ โครเมียม (Cr) 5.78 % และ โมลิบดีนัม (Mo) 0.72 % ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ง) จะแสดงให้เห็นว่าชิ้นงานในแบบมีการสร้างชั้นรองพื้นดังมีปริมาณธาตุที่ต่ำกว่าชิ้นงานในแบบไม่มี การสร้างชั้นรองพื้น ซึ่งธาตุเหล่านี้ได้มีอิทธิพลสูงในการเพิ่มความแข็งให้กับเนื้อเชื่อม ดังแสดงในรูป ที่ 4.5 ได้แสดงการทดสอบความแข็งของเฟสพื้นสีขาวมีค่าความแข็งที่มากกว่าและได้สอดคล้องกับ งานวิจัยของ Srinivasan, Muthupandi และคณะ [27] ที่ได้กล่าวว่าการเพิ่มขึ้นของธาตุโครเมียม (Cr) และ โมลิบดีนัม (Mo) ส่งผลต่อความความแข็งที่สูงขึ้นของแนวเชื่อม



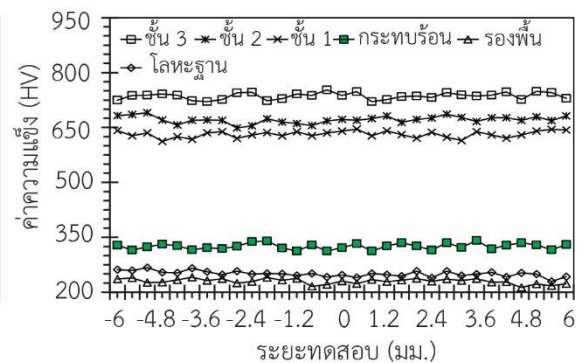
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น

4.1.4 การตรวจสอบค่าความแข็ง ผลการทดสอบค่าความแข็งของชิ้นงานเชื่อมแบบรองพื้นและแบบไม่รองพื้นพบว่าพื้นผิวโลหะฐาน มีค่าความแข็งประมาณ 250 HV และค่าความแข็งของพื้นที่กระทบบร้อนทั้งสองแบบ มีค่าประมาณ 310 HV และค่าความแข็งของแนวเชื่อมพอกผิว ชั้นที่ 1-3 พบว่า ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นตามจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นและเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งชั้นที่ 3 ในชิ้นงานแบบไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีค่าความแข็งที่สูงกว่าแบบมีการสร้างชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข และ ค) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลกระทบขั้นตอนการเชื่อมต่อสมบัติของผิวพอกแข็งบนโลหะฐานเหล็กหล่อที่พบว่าความแข็งของชั้นพอกผิวแข็งที่มีการรองพื้นมีความแข็งต่ำกว่าชั้นพอกผิวแข็งที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น [28] การลดค่าความแข็งที่ได้เกิดจากการให้ความร้อนซ้ำต่อชั้นรองพื้นคล้ายกับการอบอ่อนชิ้นงานขณะทำการเชื่อม [29] นอกจากนี้หากพิจารณาส่วนผสมทางเคมีของลวดเชื่อมที่ใช้ในการรองพื้นก่อนการเชื่อมพอกผิวแข็ง พบว่ามีปริมาณของธาตุคาร์บอนที่ต่ำกว่า ดังนั้นอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ความแข็งลดลงเนื่องจากการเกิดการเจือจาง (% Dilution) ของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งได้

ก) ตำแหน่งในการตรวจสอบ



ข) ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบไม่รองพื้น

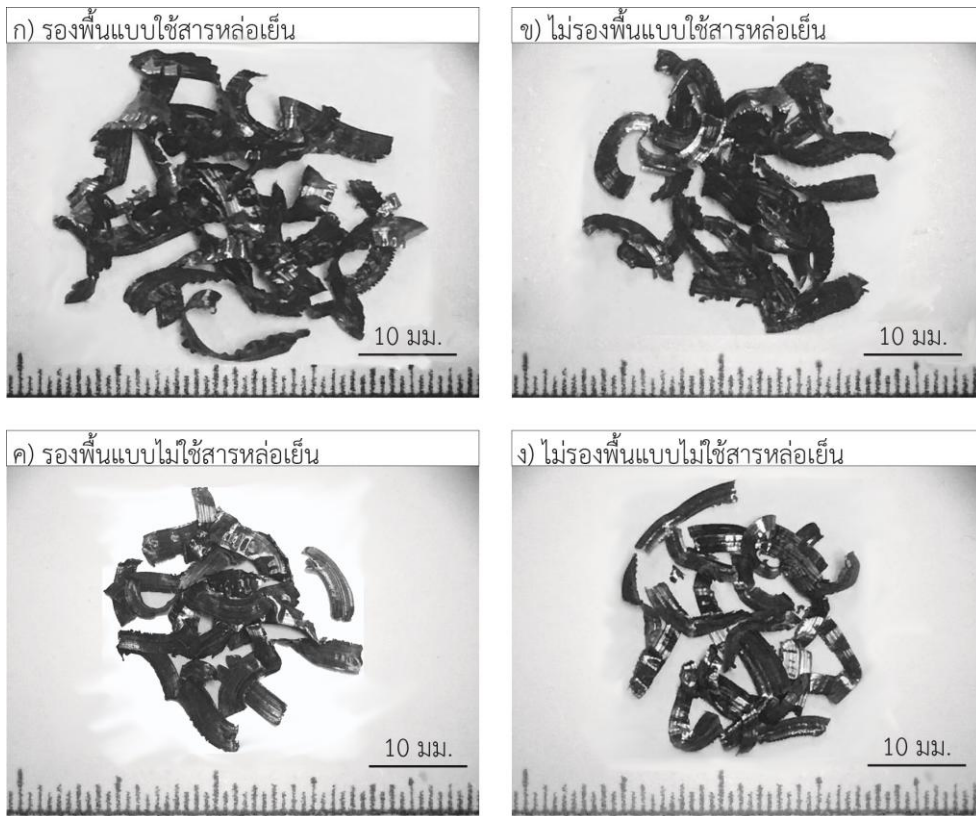


ค) ชิ้นงานเชื่อมพอกผิวแข็งแบบรองพื้น

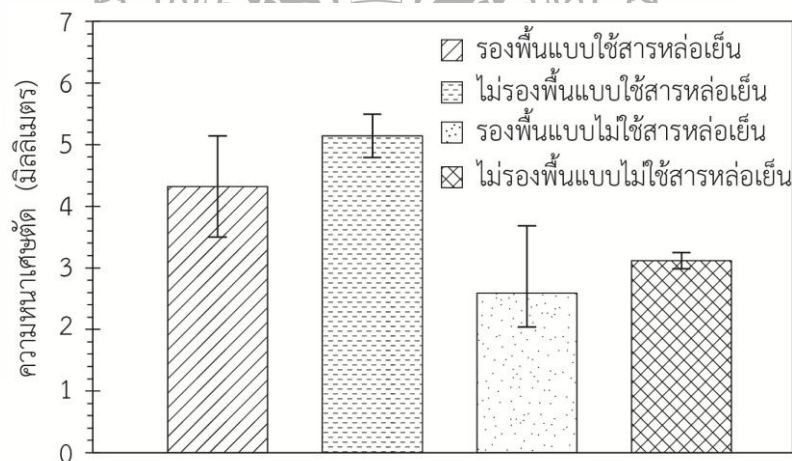
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทดสอบและจำนวนชั้นที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง

## 4.2 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง

4.2.1 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อลักษณะเศษตัด การเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่างของเศษตัดอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปแบบถาวรของวัสดุชิ้นงานทดสอบ การวิเคราะห์การก่อตัวของรูปร่างของเศษตัดจึงเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการตัดเฉือนและความสมบูรณ์ของพื้นผิว [30] ในรูปที่ 4.6 แสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างของเศษตัดของกระบวนการทดสอบความสามารถในการตัดเฉือนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นและแบบมีการใช้สารหล่อเย็นที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร ในชิ้นงานมีการสร้างชั้นรองพื้นและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น พบว่ากระบวนการตัดเฉือนที่ใช้สารหล่อเย็นมีลักษณะของเศษตัดคล้ายฟันเลื่อย (Saw-Tooth) [31] ที่สั้นและเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ก และ ข) โดยเศษตัดของชิ้นงานที่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีความหนาเฉลี่ย 4.39 มิลลิเมตร และแบบไม่สร้างชั้นรองพื้นมีความหนาเฉลี่ย 5.14 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7 อย่างไรก็ตามในกระบวนการตัดเฉือนที่ไม่มีการใช้สารหล่อเย็นมีลักษณะของเศษตัดเล็กและสั้นกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับกระบวนการตัดเฉือนที่มีการใช้สารหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 (ข และ ค) โดยเศษตัดของชิ้นงานไม่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีความหนาเฉลี่ย 3.12 มิลลิเมตร และเศษตัดของชิ้นงานมีการสร้างชั้นรองพื้นความหนาเฉลี่ย 2.59 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงให้เห็นการนำไปสู่การเปลี่ยนรูปแบบถาวรของรูปร่างของเศษตัด [32] โดยทั่วไปสภาพแวดล้อมในการตัดเฉือนแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็น มีแนวโน้มที่แตกต่างกันในอัตราส่วนระหว่างความหนาของเศษตัดและการชำระของเครื่องมือตัด [33] และในงานวิจัยของ El Mansori และ Nouari [34] ได้กล่าวถึงความหนาของเศษตัดที่เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นสภาวะการตัดเฉือนอย่างรุนแรงซึ่งจะส่งผลต่อคมตัด

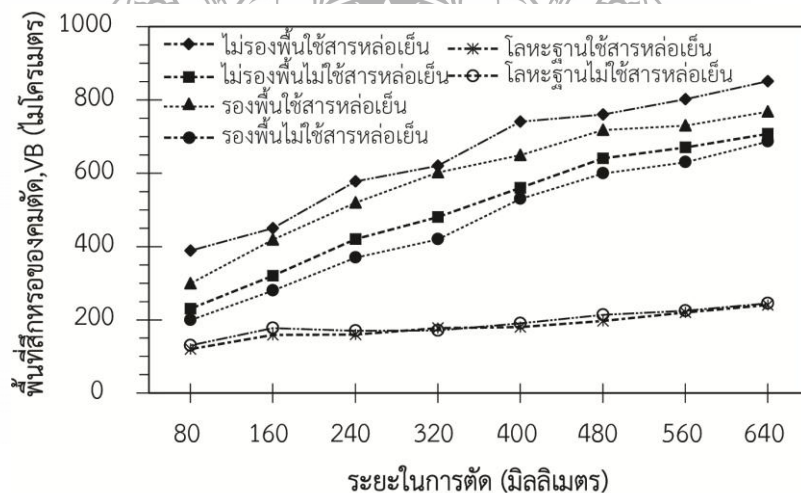


รูปที่ 4.6 ลักษณะของเศษตัดแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็น ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟ้น ความลึก 2 มิลลิเมตร

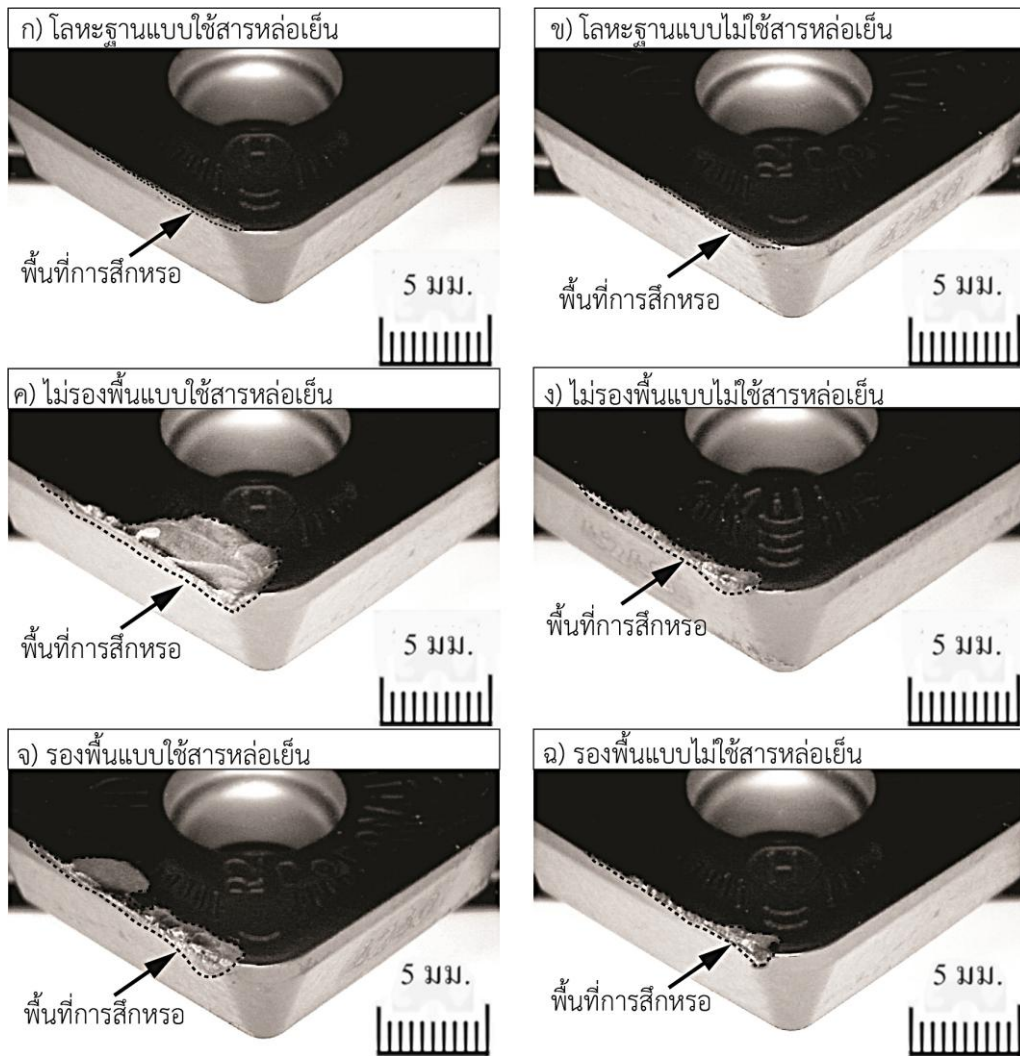


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นส่งผลต่อความหนาของเศษตัด ที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟ้น ความลึก 2 มิลลิเมตร

4.2.2 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด การทดสอบความสามารถในกระบวนการตัดเฉือนดังแสดงในรูปที่ 3.12 ได้ทำให้เกิดการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดที่ได้รับจากกระบวนการตัดเฉือนและแสดงให้เห็นการสึกหรอที่ได้รับอย่างมีนัยสำคัญจากผลกระทบจากการระบายความร้อนและเย็นใจในการหล่อเย็น [35] พบว่า การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดมีแนวโน้มที่สูงมากขึ้นตามระยะทางในการตัดเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และในอัตราการสึกหรอที่เกิดมากที่สุดในการกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงานที่ไม่มีการสร้างชั้นรองแบบใช้สารหล่อเย็นมีอัตราการสึกหรอของคมตัดประมาณ 850  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ค) และการสึกหรอที่เกิดน้อยที่สุดในกระบวนการตัดเฉือนชิ้นงานที่มีการสร้างชั้นรองแบบไม่ใช้สารหล่อเย็นมีอัตราการสึกหรอของคมตัดประมาณ 680  $\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (ง) ในงานวิจัยได้ทำการศึกษาการกัดปาดผิวหน้าด้วยเครื่องมือตัดชนิดคาร์ไบด์ (Carbide Tool) ได้กล่าวถึงการสึกหรอของขอบคมตัดไว้ว่า กลไกหลักของการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดเป็นการสึกหรอแบบเป็นการขจัดสีในบริเวณขอบคมตัดโดยมีอนุภาคหรือเศษที่สำคัญในการส่งผลให้เกิดการสึกหรอที่เป็นบริเวณกว้างขึ้นในบริเวณคมตัด [17] และศึกษาการระบายความร้อนในกระบวนการตัดเฉือนโดยใช้เครื่องมือตัดชนิดคาร์ไบด์ ได้อธิบายถึงอายุของเครื่องมือคมตัดไว้ว่าด้วยเหตุผลของอายุเครื่องมือคมตัดที่ไม่น่าพอใจเป็นอย่างมากในภายใต้เงื่อนไขของแบบมีการระบายความร้อนด้วยสารหล่อเย็น เนื่องจากการเกิดรอยแตกกว้างบนผิวหน้าบริเวณขอบคมตัดที่เกิดจากการระบายความร้อนด้วยสารหล่อเย็นจึงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว [24]



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นส่งผลต่อพื้นที่การสึกหรอของคมตัด ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร

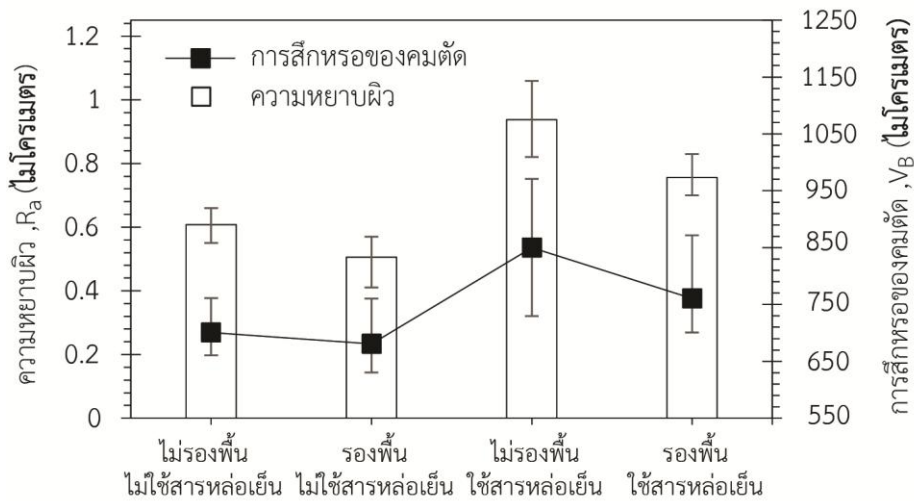


รูปที่ 4.9 ลักษณะการสึกหกร่อนบริเวณขอบคมตัดของแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร

4.2.3 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความหยาบผิว พื้นผิวโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือนภายใต้เงื่อนไขตัวแปรการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นที่มีความแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 3.12 ได้ถูกนำมาทำการตรวจสอบความหยาบผิวดังแสดงในรูปที่ 4.10 ผลการตรวจสอบพบว่าค่าความหยาบผิวของโลหะเชื่อมแบบไม่มีชั้นรองพื้นให้ค่าความหยาบผิวสูงกว่าแบบมีชั้นรองพื้น อันเนื่องมาจากค่าความแข็งของโลหะเชื่อมที่สูงกว่าซึ่งส่งผลทำให้เกิดสามารถตัดเฉือนที่ยากลำบากขึ้น นอกจากนี้การใช้สารหล่อเย็นในการช่วยในการตัดเฉือนไม่ส่งผลดีต่อคุณภาพผิวรอยตัด เนื่องจากค่าความหยาบผิวของโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งการผิวหน้า



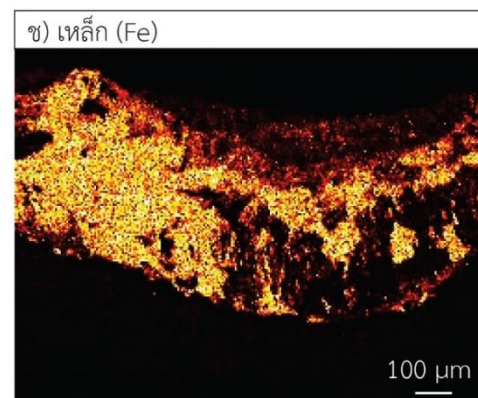
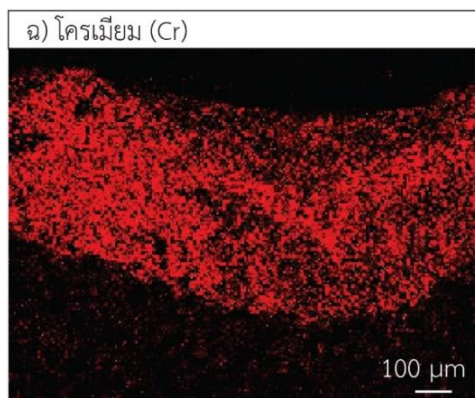
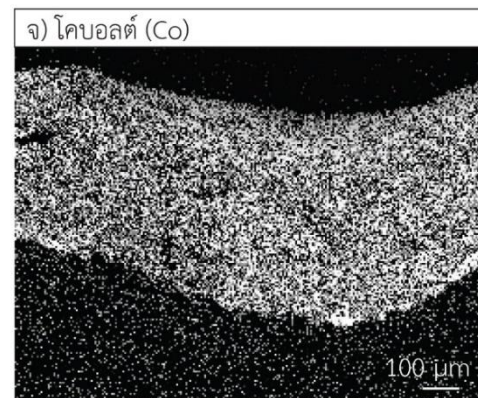
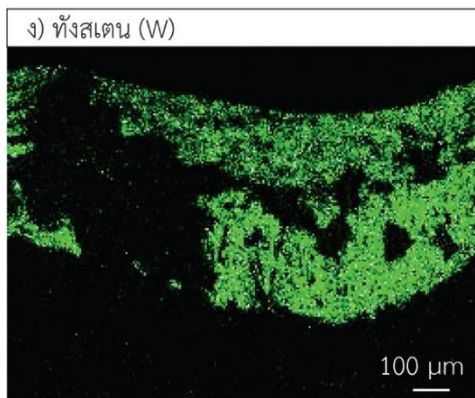
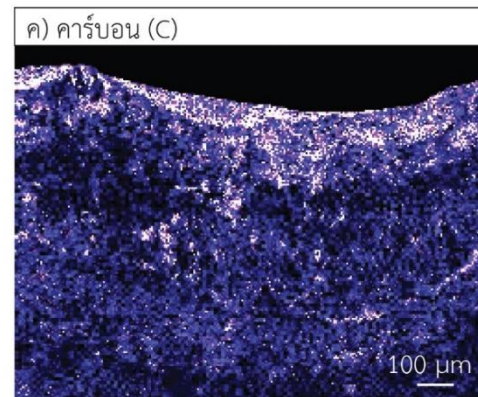
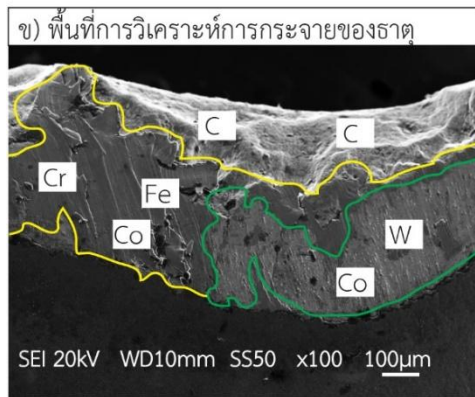
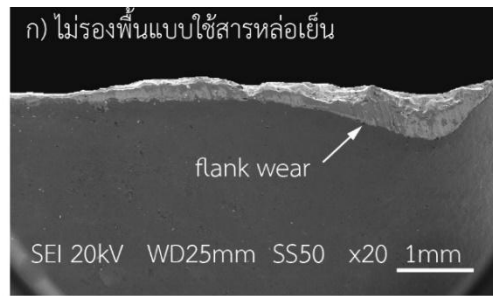
แบบไม่มีมีการใช้สารหล่อเย็นมีค่าต่ำกว่าผิวหน้าโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งแบบมีการใช้สารหล่อเย็นดังแสดงในรูปที่ 4.10 ผลการทดลองนี้ได้คล้ายกับงานวิจัยการศึกษาการกัดผิวเหล็กเครื่องมือ (AISI P20) โดยที่ใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นพบว่า หดของน้ำหล่อเย็นที่ขนาดใหญ่จึงไม่สามารถเข้าถึงโซนการตัดเฉือน จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการหล่อเย็นในพื้นที่ที่ไม่มีประสิทธิภาพได้นำไปสู่พื้นผิวที่มีค่าความหยาบที่สูงขึ้น [36] และงานวิจัยของ Perez [37] ได้กล่าวถึงความสมบูรณ์ของพื้นผิวไว้ว่าควรมีการเลือกใช้ความเร็วรอบและความเร็วในการป้อนให้เหมาะสมเพราะเป็นสาเหตุที่สำคัญของการเกิดการสึกหรอของคมตัดที่ก่อให้เกิดของสนเล็กน้อย บนพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบจึงทำให้ความหยาบผิวที่สูง และในงานวิจัยของ Tian, Zhao และคณะ [38] และคณะได้ทำศึกษาผลกระทบของความเร็วยรอบในการตัดและอัตราการสึกหรอของคมตัดได้กล่าวถึงเหตุผลสำคัญที่ทำให้เนื้อของวัสดุอ่อนตัวลงเนื่องมาจากผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้พื้นผิวมีเรียบดังนั้นความหยาบผิวจึงมีค่าที่ต่ำลง



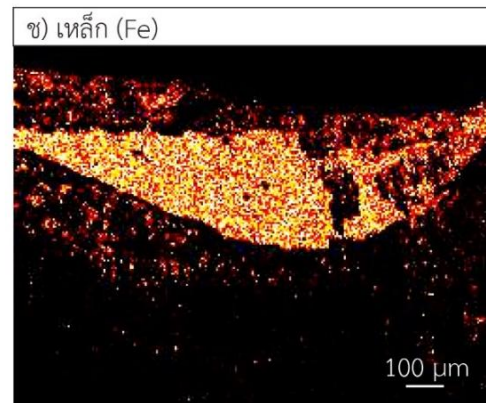
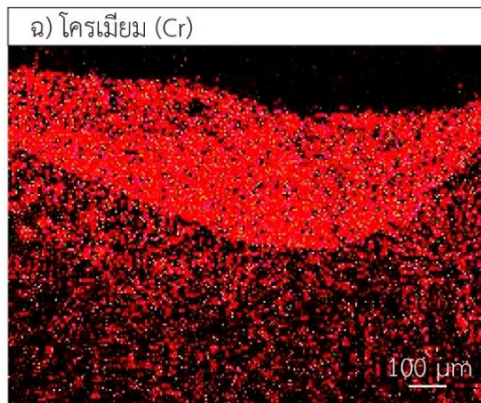
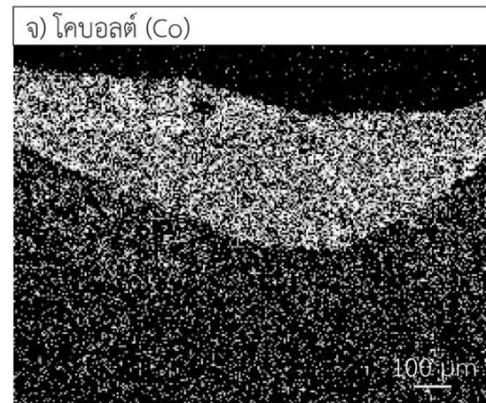
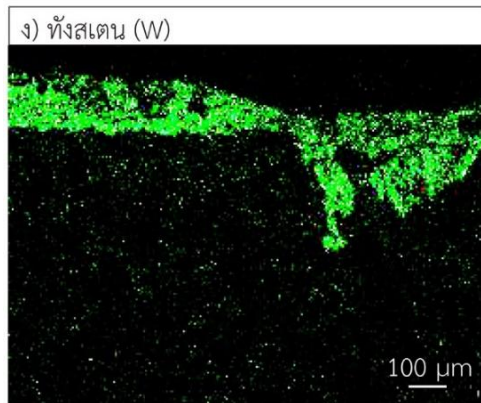
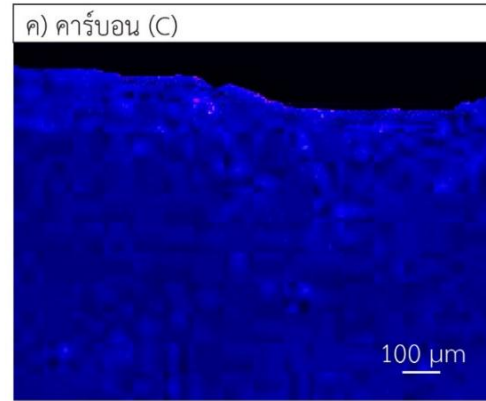
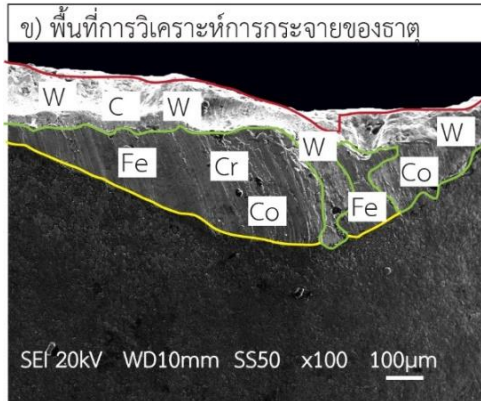
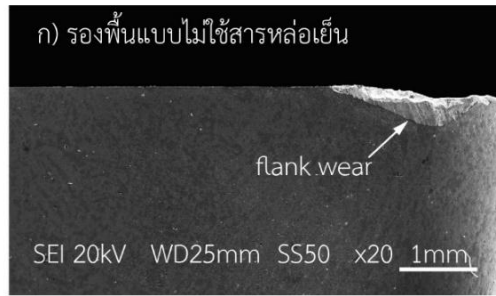
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของแบบใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นส่งผลต่อความหยาบผิว

4.2.4 อิทธิพลของการใช้สารหล่อเย็นและไม่ใช้สารหล่อเย็นต่อความหยาบผิว รูปที่ 4.9 ได้แสดงถึงเครื่องมือคมตัดที่ได้ผ่านการทดสอบความสามารถในกระบวนการตัดเฉือนแบบมีการใช้สารหล่อเย็นและแบบไม่มีมีการใช้สารหล่อเย็นในชิ้นงานที่ไม่มีมีการสร้างชั้นรองพื้นและแบบมีการสร้างชั้นรองพื้น พบว่าเครื่องคมตัดในกระบวนการตัดเฉือนแบบมีการใช้สารหล่อเย็นในชิ้นงานที่ไม่มีมีการสร้างชั้นรองพื้นมีการสึกหรอของขอบคมตัดสูงที่สุดและเครื่องคมตัดในกระบวนการตัดเฉือนแบบไม่

มีการใช้สารหล่อเย็นในชิ้นงานที่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีการสึกหรอของขอบคมตัดต่ำที่สุด เพื่อทำความเข้าใจกับกลไกในการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดของชิ้นงานทดสอบทั้งสองแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) และ 4.12 (ก) จึงได้นำมาทำการตรวจสอบด้วยการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุ (Energy dispersive spectrometry : EDS-maps) ซึ่งสามารถสังเกตได้ถึงกลไกการสึกหรอของขอบคมตัด พบว่า บริเวณขอบคมตัดที่เกิดการสึกหรอของชิ้นงานทั้งสองเงื่อนไขมีธาตุหลักอยู่ 5 ชนิด คือ คาร์บอน (C) ทังสแตน (W) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) และเหล็ก (Fe) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 โดยมีธาตุคาร์บอน (C) กระจายตัวทั่วบริเวณเครื่องมือตัด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 (ค) ในส่วนของธาตุทังสแตน (W) กับโคบอลต์ (Co) มีการกระจายตัวในบริเวณเนื้อเครื่องมือตัดที่เกิดการสึกหรอ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12 (ง-จ) และธาตุโครเมียม (Cr) กับเหล็ก (Fe) มีการกระจายตัวอยู่ที่ทางด้านซ้ายของขอบคมตัดรูปที่ 4.11 และ 4.12 (ฉ-ช) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบทางเคมีของธาตุโครเมียม (Cr) เหล็ก (Fe) ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในเนื้อโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 เช่นเดียวกับธาตุทังสแตน (W) และโคบอลต์ (Co) เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในเครื่องมือตัดดังแสดงในรูปที่ 2 นอกจากนี้ในรูป 3.10 ได้แสดงให้เห็นถึงอนุภาคที่ยึดติดบนพื้นผิวของขอบคมตัดที่สามารถสังเกตได้ อนุภาคเหล่านี้มาจากวัสดุที่ผ่านการขัดสีและมายึดเกาะบริเวณที่มีการสึกหรอ [39] งานวิจัยของ Wang, Xie และคณะ ได้กล่าวถึงการหลุดล่อนของสารเคลือบผิวที่เกิดขึ้นมาจากผลรวมของปัจจัยหลายประการ เช่น ความเค้นตกค้างบริเวณพื้นผิวสารเคลือบผิว และแรงกระแทกซึ่งส่งผลต่อรอยร้าวบนพื้นผิวสารเคลือบผิว [1] และเมื่อพิจารณาผลเหล่านี้ก็สรุปได้ว่าการขัดสีมีส่วนร่วมในการสึกหรอเพราะเนื้อวัสดุบริเวณคมตัดเกิดการอ่อนตัวลง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เครื่องมือตัดเกิดการเสียหาย [40]



รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุของเครื่องมือตัดแบบมีการใช้สารหล่อเย็น

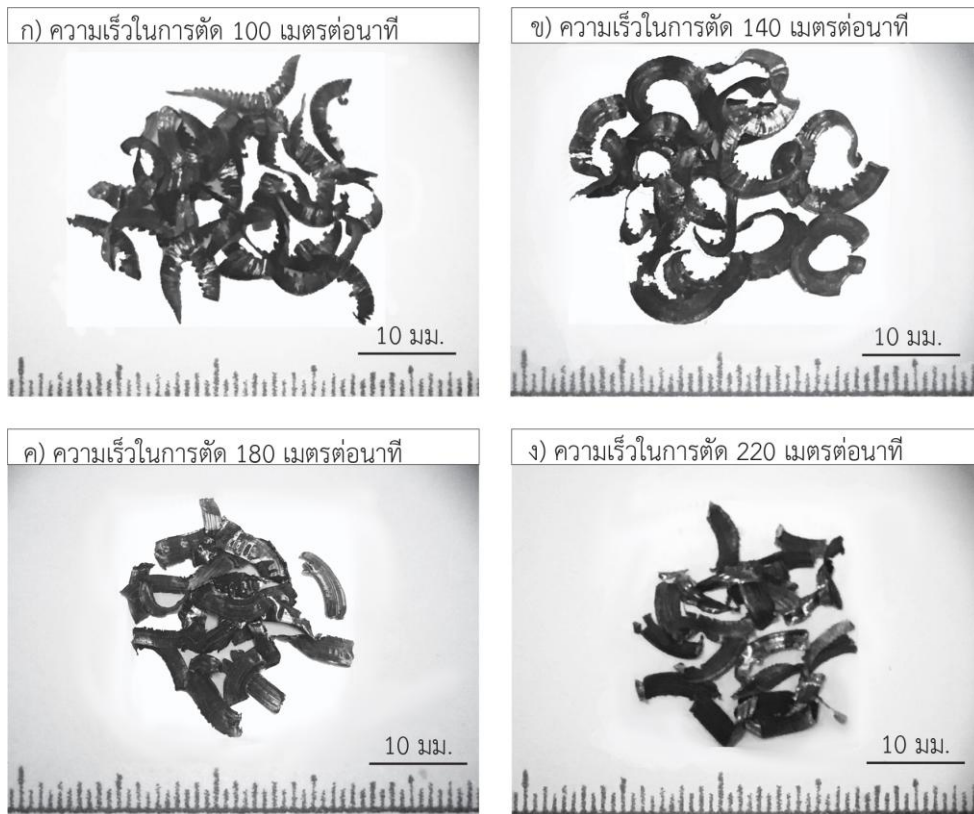


รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุของหัวของเครื่องมือตัดแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็น

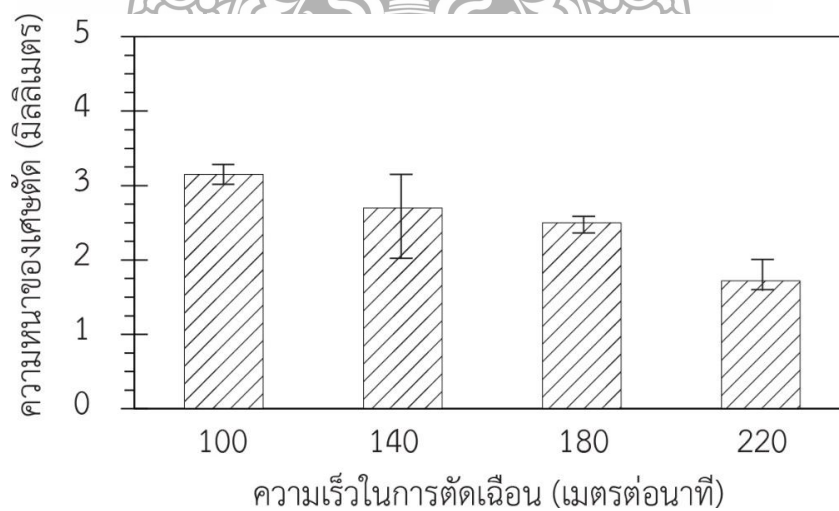
### 4.3 อิทธิพลของความเร็วในการตัดแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง

การทดลองในหัวข้อ 4.2 ได้การศึกษาตัวแปรการกัดปาดผิวหน้าแบบมีการใช้สารหล่อเย็นและไม่มีการใช้สารหล่อเย็นในแนวเชื่อมพอกผิวแข็งที่มีการสร้างชั้นรองพื้นและไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น ได้ตัวแปรที่ดีที่สุดคือ การกัดปาดผิวหน้าแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นในชิ้นงานที่มีการสร้างชั้นรองพื้น ในหัวข้อที่ 4.3 นี้จึงทำการทดลองเปลี่ยนแปลงความเร็วในการตัดเฉือนจำนวน 4 ค่า คือ 100 140 180 และ 220 เมตรต่อนาที ผลการทดลองที่ได้มีดังนี้

4.3.1 อิทธิพลของความเร็วในการตัดแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อเศษตัด ความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือตัดและชิ้นงานทดสอบได้นำไปสู่การเปลี่ยนรูปร่างของเศษตัด ดังนั้นรูปร่างลักษณะเศษตัดที่มีการพัฒนาที่แตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้ความเร็วการตัดเฉือนได้ชี้ให้เห็นกลไกการตัดเฉือนที่มีความแตกต่างกัน [41] รูปที่ 4.13 ได้แสดงถึงรูปร่างลักษณะของเศษตัดภายใต้เงื่อนไขความเร็วที่อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตรในการตัดเฉือนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็น ชิ้นงานมีการสร้างชั้นรองพื้น พบว่าความเร็วในการตัดเฉือนที่ 100 และ 140 เมตรต่อนาที มีรูปร่างลักษณะของเศษตัดที่มีลักษณะโค้งและบิดงอ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) โดยความเร็วในการตัดเฉือนที่ 100 เมตรต่อนาที มีความหนาของเศษตัด 3.15 มิลลิเมตร และความเร็วในการตัดเฉือนที่ 140 เมตรต่อนาที มีความหนาของเศษตัด 2.7 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.14 อย่างไรก็ตามรูปร่างเศษตัดของความเร็วในการตัดเฉือนที่ 180 และ 220 เมตรต่อนาที มีรูปร่างลักษณะของเศษตัดที่เป็นเส้นตรงและสั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ค) และ (ง) โดยความเร็วในการตัดเฉือนที่ 180 เมตรต่อนาที มีความหนาของเศษตัด 2.5 มิลลิเมตร และความเร็วในการตัดเฉือนที่ 220 เมตรต่อนาที มีความหนาของเศษตัด 1.75 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ความเร็วตัดนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงระหว่างความเร็วตัดและรูปร่างเศษตัด ได้อย่างชัดเจนและนี้ชี้ให้เห็นวิวัฒนาการของคุณภาพพื้นผิวที่สามารถได้จากการเปลี่ยนรูปร่างเศษตัด [42] และในงานวิจัยของ Zheng, Zhao และคณะ ได้กล่าวถึงความเร็วตัดที่เพิ่มขึ้นได้ส่งผลต่อพฤติกรรมการแตกหักแบบเปราะของเศษตัด ที่เชื่อว่าควรจะต้องมีอัตราความเค้นเฉือนที่สูงมากที่เป็นสาเหตุมาจากความเร็วในการตัดเฉือน [43]

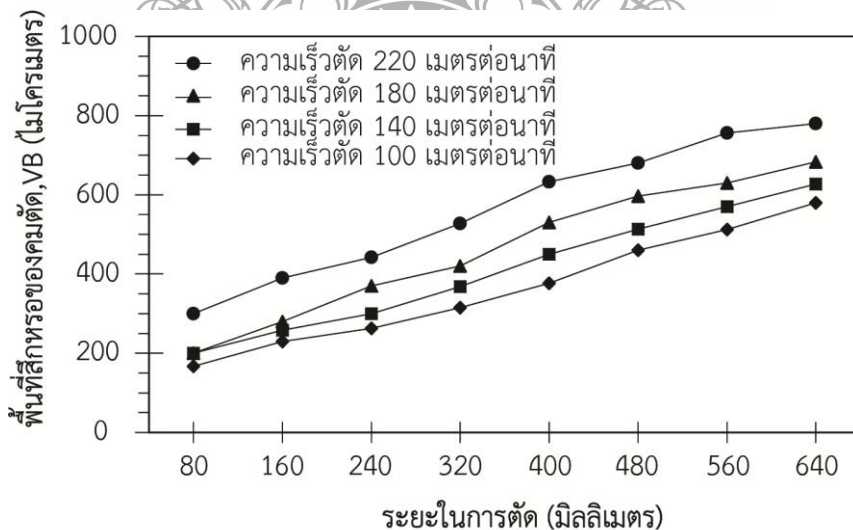


รูปที่ 4.13 ลักษณะของเศษตัดภายใต้เงื่อนไขความเร็วตัดที่อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร

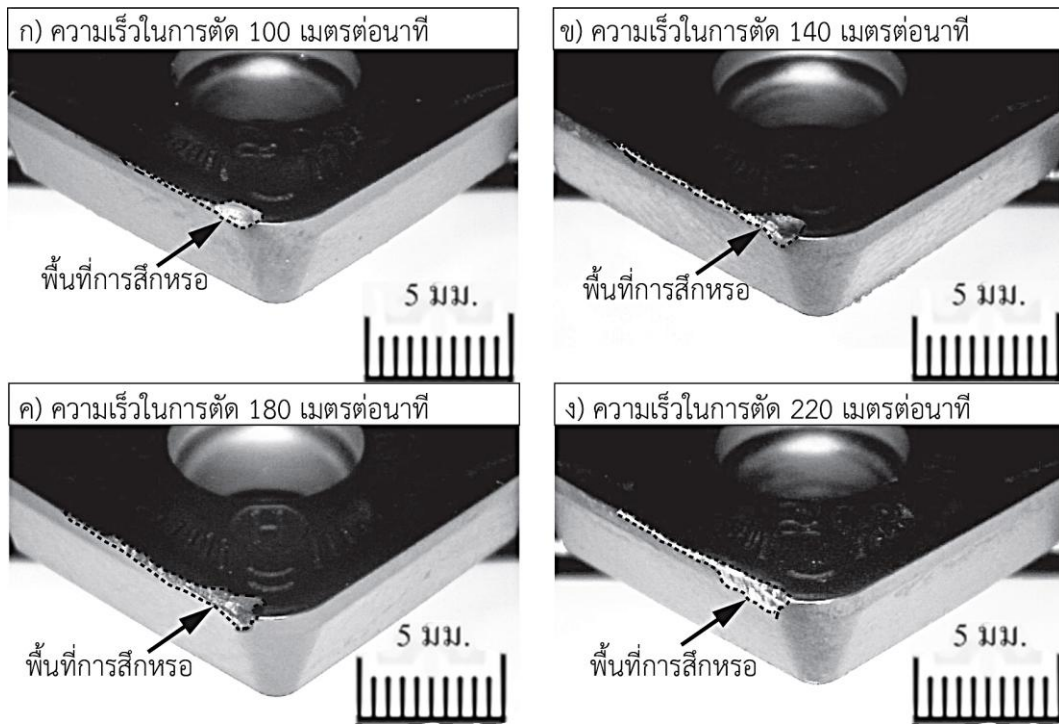


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหนาของเศษตัดที่อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร

4.3.2 อิทธิพลของความเร็วในการตัดแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อการสึกหรอของเครื่องมือตัด รูปที่ 4.15 ได้แสดงให้เห็นถึงลักษณะการเกิดการสึกหรอบริเวณขอบคมตัด ภายใต้เงื่อนไขความเร็วในการตัดเฉือนพบว่าการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะทางในการตัดเฉือนและอย่างไรก็ตามเมื่อทำการเพิ่มความเร็วในการตัดเฉือนพบว่าการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วในการเฉือนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.16 โดยความเร็วในการตัดเฉือนที่มีการสึกหรอต่ำที่สุดคือ ความเร็วในการตัดเฉือนที่ 100 เมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ก) มีการสึกหรอบริเวณขอบคมตัด 580.15 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และความเร็วในการตัดเฉือนที่มีการสึกหรอสูงที่สุดคือ ความเร็วในการตัดเฉือนที่ 220 เมตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.15 (ง) มีการสึกหรอบริเวณขอบคมตัด 782.54 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งลักษณะคล้ายในงานวิจัยของ Li, Zhao และคณะ [44] ที่ได้ทำการศึกษาการกัดปาดผิวหน้าด้วยความเร็วในการตัดเฉือนที่สูง พบว่าสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดการบิ่นหรือแตกหักของเครื่องมือตัด โดยให้เหตุผลว่ามาจากผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการตัดเฉือนในการกัดปาดผิวหน้า ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการตัดเฉือนได้ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงและอุณหภูมิในระหว่างกระบวนการตัดเฉือน จึงได้ทำให้เกิดการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดของเครื่องมือตัดที่ไม่เป็นไปตามปกติเพราะความทนทานที่มีขีดจำกัดที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของเครื่องมือตัด ที่มีความสำคัญต่อการแตกหักหรือการเสียหายของเครื่องมือตัด



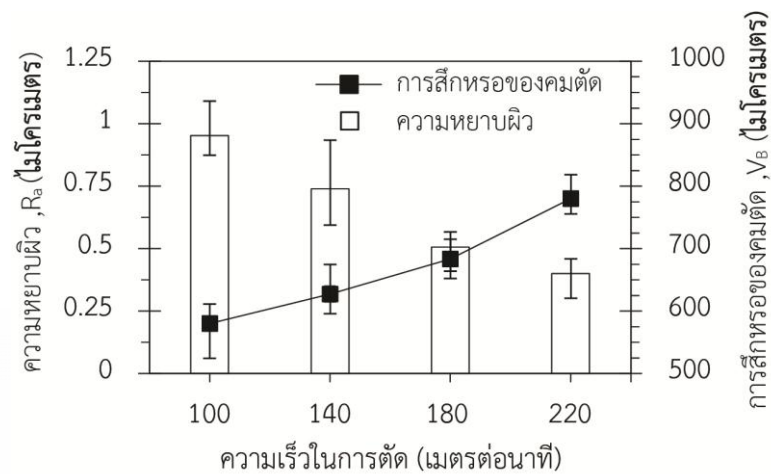
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของความเร็วตัดและระยะทางในการตัดที่ส่งผลต่อพื้นที่สึกหรอของคมตัด ที่อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.16 ลักษณะการสึกหกร่อนของคมตัดภายใต้เงื่อนไขความเร็วตัดที่อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร

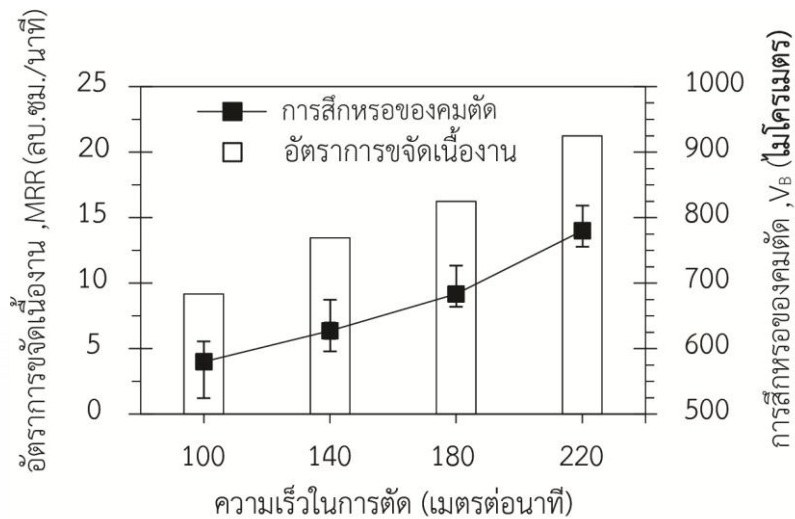
4.3.2 อิทธิพลของความเร็วในการตัดแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อความหยาบผิว ความหยาบผิวได้อธิบายรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวที่ผ่านกระบวนการตัดเฉือน พื้นผิวสำเร็จเป็นสิ่งสำคัญที่ได้ทำการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์และปัจจัยที่ผลต่อกระบวนการตัดเฉือนอย่างมาก [45] ในรูปที่ 4.17 ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหยาบผิวสำเร็จและความเร็วในการตัดเฉือน 100, 140, 180 และ 220 เมตรต่อนาทีอัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่าความหยาบผิวที่มีค่าสูงที่สุด คือ ความเร็วในการตัดเฉือน 100 เมตรต่อนาที มีค่าความหยาบเฉลี่ย 0.952 ไมครอน และการสึกหกร่อนของเครื่องมือคมตัด 582.56 ไมครอน แต่ในขณะที่ความเร็วในการตัดเฉือนเพิ่มขึ้นพบว่าค่าความหยาบผิวมีแนวโน้มลดลงแต่ค่าการสึกหกร่อนของเครื่องมือคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วในการตัดเฉือนที่เพิ่มขึ้น ค่าความหยาบผิวที่ต่ำที่สุดคือความเร็วในการตัดเฉือน 220 เมตรต่อนาที มีค่าความหยาบเฉลี่ย 0.412 ไมครอน และการสึกหกร่อนของเครื่องมือคมตัด 782.54 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความเร็วในการตัดเฉือนได้มีผลกระทบมากต่อความหยาบผิว ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของความเร็วในการตัดเฉือนที่จะนำไปสู่การลดลงของความหยาบของพื้นผิว [46]





รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอของคมตัด อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร

4.3.3 อิทธิพลของความเร็วตัดแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นที่ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของคมตัด ความสัมพันธ์ของอัตราการขจัดเนื้องานที่ส่งผลต่อการสึกหรอของคมตัด ความเร็วในการตัดเงื่อนไข 100, 140, 180 และ 220 เมตรต่อนาที อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน และความลึก 2 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่มีค่าสูงที่สุด คือ ความเร็วในการตัดเงื่อนไข 220 เมตรต่อนาที มีค่าอัตราการขจัดเนื้องาน 21 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด 782.54 ไมครอน แต่ในขณะที่ค่าอัตราการขจัดเนื้องานเพิ่มขึ้นพบว่าค่าการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ค่าอัตราการขจัดเนื้องานที่ต่ำที่สุดคือ ความเร็วในการตัดเงื่อนไข 100 เมตรต่อนาที มีค่าอัตราการขจัดเนื้องาน 9.552 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีและการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด 582.56 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.18



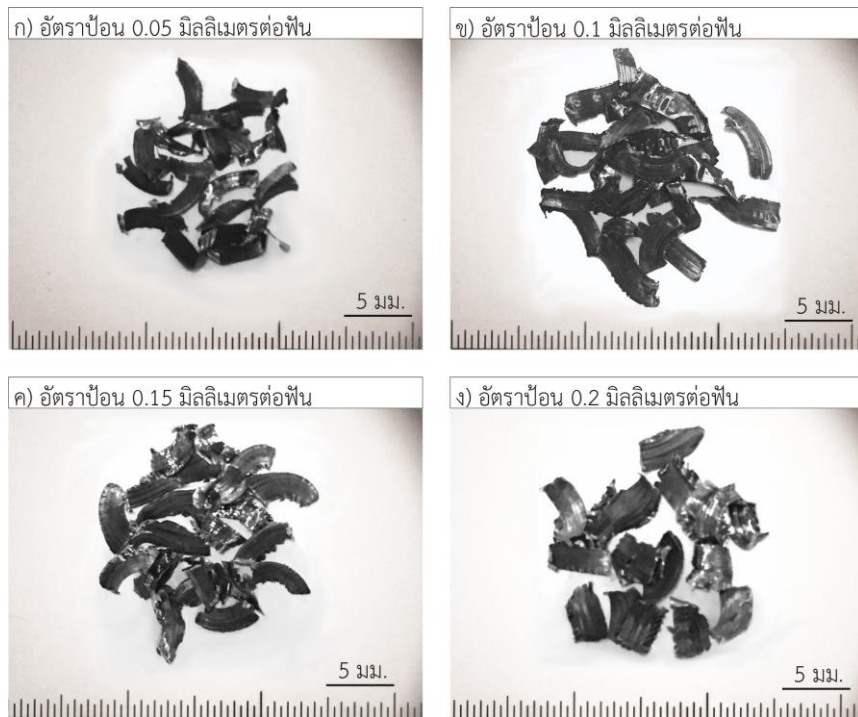
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วตัดที่ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของคมตัด อัตราป้อน 0.10 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึก 2 มิลลิเมตร

#### 4.4 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง

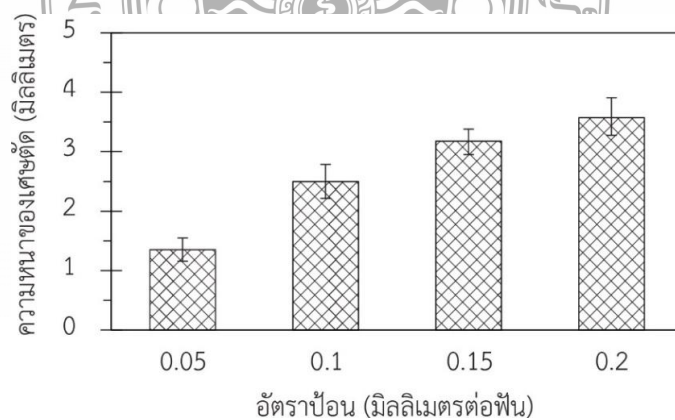
ในหัวข้อ 4.4 ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อความสามารถในการตัดเฉือนของแนวเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยทำการเลือกใช้ตัวแปรในการตัดเฉือนที่ดีที่สุดคือ ความเร็วในการตัดเฉือน 180 เมตรต่อนาที และการตัดเฉือนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็น

4.4.1 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อลักษณะเศษตัด จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่อลักษณะการคายเศษตัดและความหนาของเศษตัดพบว่าลักษณะการคายเศษตัดของอัตราป้อนที่ 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน มีลักษณะเศษตัดที่สั้นตรงและยาวที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเศษตัดที่ใช้อัตราป้อนอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ก) และมีความหนาของเศษตัดเฉลี่ย 1.35 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยเมื่อทำการเพิ่มอัตราป้อนในการตัดเฉือนพบว่าลักษณะการคายเศษตัดที่สั้นลง ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ข-ค) และความหนาของเศษตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งความหนาของเศษตัดที่มีมากที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขการตัดเฉือน โดยการใช้อัตราป้อนที่ 0.2 มิลลิเมตรต่อฟัน โดยมีความหนาของเศษตัดเฉลี่ย 3.57 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และเศษตัดมีลักษณะที่สั้นสุด เมื่อเปรียบเทียบกับเศษตัดที่ใช้อัตราป้อนอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 (ง) และได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hassanpour, Sadeghi และคณะ [47] ได้กล่าวถึงลักษณะการคายเศษตัดที่ได้จากกระบวนการตัดเฉือนในงานวิจัยไว้ว่า ความจริงแล้วความ

หนาของเศษตัดที่เพิ่มขึ้นในการใช้อัตราป้อนที่สูง จึงส่งผลให้ค่าความหยาบผิวเพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากการใช้แรงตัดที่สูงและการสั่นสะเทือน

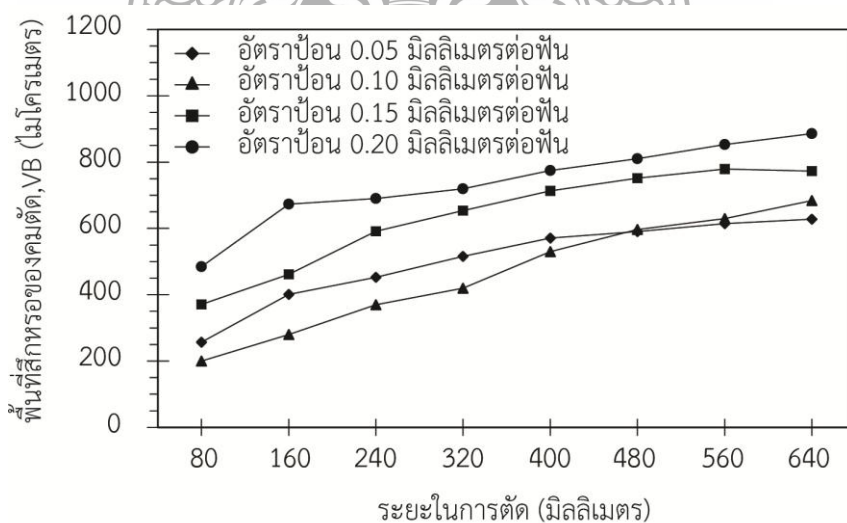


รูปที่ 4.19 ลักษณะของเศษตัดภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อนที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร

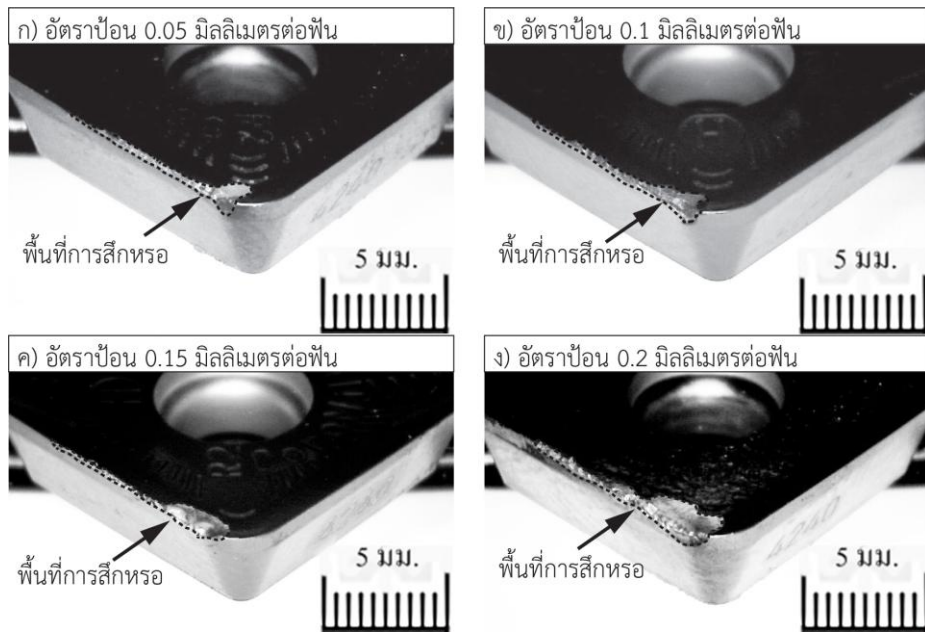


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์อัตราป้อนที่ส่งผลต่อความหนาของเศษตัด ที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร

4.4.2 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัด การศึกษาอิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นที่ส่งผลต่อพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัด ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.20 และ 4.21 (ก-ง) พบว่า การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดเริ่มต้นที่ระยะในการตัด 80 มิลลิเมตร ซึ่งในอัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน มีพื้นที่สึกหรอบริเวณขอบคมตัดเฉลี่ย 257 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และเมื่ออัตราป้อนในการตัดเพิ่มขึ้น พบว่า พื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 โดยอัตราป้อนที่มีการสึกหรอที่มากที่สุดคือ 0.2 มิลลิเมตรต่อฟัน ซึ่งมีพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดเฉลี่ย 485 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.20 อย่างไรก็ตามเมื่อระยะในการตัดเพิ่มขึ้นพบว่าพื้นที่ในการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดตัดเพิ่มสูงขึ้นตามระยะในการตัดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งในระยะการตัดเพิ่มขึ้นที่ 640 มิลลิเมตร มีการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดมากที่สุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.20 และ 4.21 (ก-ง) โดยอัตราป้อนในการตัดเพิ่มขึ้นที่มีพื้นที่ในการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดน้อยที่สุดคือ อัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน มีพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดเฉลี่ย 628.22 ไมครอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.20 และ 4.21 (ก) อัตราป้อนในการตัดเพิ่มขึ้นที่มีพื้นที่ในการสึกหรอบริเวณขอบคมตัดน้อยที่สุดคือ อัตราป้อน 0.2 มิลลิเมตรต่อฟัน มีพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดเฉลี่ย 886.06 ไมครอน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.20 และ 4.21 (ง) โดยในงานวิจัยของ Hassan, Hadi และคณะ [48] ได้กล่าวไว้ว่า เมื่ออัตราป้อนในการเพิ่มขึ้นโดยทั่วแล้วจะพบกับปัญหาการสึกหรอดังกล่าวเกิดขึ้นมาจากสาเหตุหลักที่มาจากแรงกดและอุณหภูมิที่สูงขึ้นระหว่างชิ้นงานและเครื่องมือคมตัด จึงส่งผลให้เกิดกลไกในการสึกหรอของเครื่องมือตัดชนิดคาร์ไบด์เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย



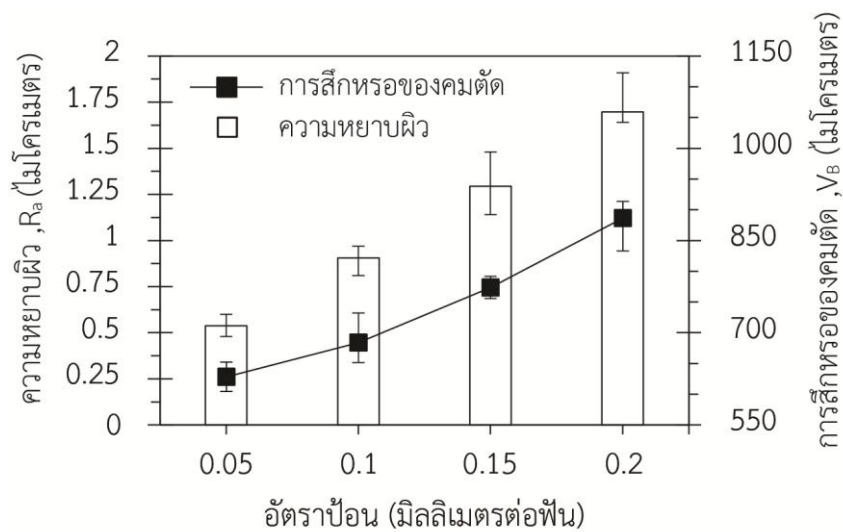
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของอัตราป้อนและระยะทางในการตัดที่ส่งผลต่อพื้นที่สึกหรอของคมตัดที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.22 ลักษณะการสีกหรือของคมตัดภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อนในการตัดที่ความเร็วตัด 180 เมตร ต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร

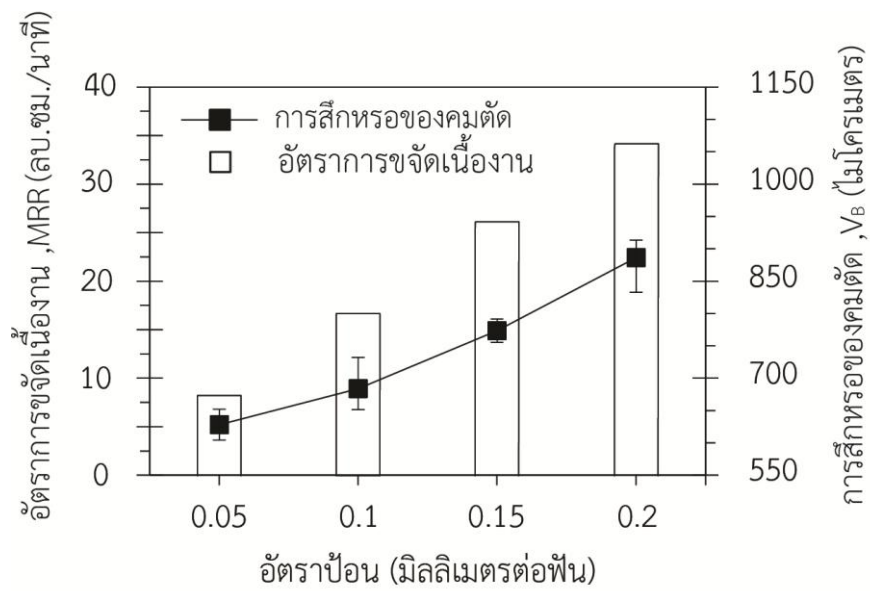
4.4.3 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบ ไม่มีการใช้สารหล่อเย็นต่อความหยาบผิว ในรูปที่ 4.22 ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนในการตัดเฉือนที่ส่งผลต่อความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบและพื้นที่การสีกหรือบริเวณขอบคมตัด พบว่า ชิ้นงานทดสอบที่อัตราป้อนใช้อัตราป้อนในการตัดเฉือน 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน มีค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ 0.538 ไมโครเมตร และพื้นที่การสีกหรือบริเวณขอบคมตัด 628.22 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งเมื่อทำการเพิ่มอัตราป้อนในการตัดเฉือนสูงมากขึ้นพบว่าค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบกับพื้นที่การสีกหรือบริเวณขอบคมตัด มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งอัตราป้อนในการตัดเฉือนที่ให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบและพื้นที่การสีกหรือบริเวณขอบคมตัดที่มีค่ามากที่สุด อยู่ในภายใต้เงื่อนไขอัตราป้อน 0.2 มิลลิเมตรต่อฟัน โดยมีค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบ 1.698 ไมโครเมตร และพื้นที่การสีกหรือบริเวณขอบคมตัด 886.069 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งสามารถสังเกตให้เห็นได้ว่าการใช้ค่าสำหรับอัตราป้อนที่สูงในกระบวนการตัดเฉือน จะส่งผลให้ค่าความหยาบผิวของชิ้นงานมากขึ้นไปด้วย [49] และในงานวิจัยของ Tangiitsicharoen, Thesniyom และคณะ [50] ได้กล่าวถึงค่าความหยาบผิวไว้ว่า เป็นที่ทราบกันดีว่าในอัตราป้อนที่มีค่าสูง ซึ่งจำเป็นต้องใช้แรงในการ

ตัดเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการตัดในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้เกิดพื้นผิวที่มีความหยาบและการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดที่สูง



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่อความหยาบผิวและการสึกหรอคมตัดที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร

4.4.4 อิทธิพลของอัตราป้อนแบบไม่มีการใช้สารหล่อเย็นที่ส่งผลต่ออัตราการจัดเนื้องานและการสึกหรอของคมตัด ความสัมพันธ์ของอัตราการจัดเนื้องานที่ส่งผลต่อที่ส่งผลต่อการสึกหรอของคมตัด อัตราป้อน 0.05, 0.10, 0.15 และ 0.20 มิลลิเมตรต่อฟัน ความเร็วในการตัด 180 เมตรต่อนาที และความลึก 2 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่าค่าอัตราการจัดเนื้องานที่มีค่าสูงที่สุด อัตราป้อน 0.20 มิลลิเมตรต่อฟัน มีค่าอัตราการจัดเนื้องาน 34.368 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด 886.069 ไมครอน แต่ในขณะที่ค่าอัตราการจัดเนื้องานเพิ่มขึ้นพบว่าค่าการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ค่าอัตราการจัดเนื้องานที่ต่ำที่สุดคืออัตราป้อน 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน มีค่าอัตราการจัดเนื้องาน 8.592 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที และการสึกหรอของเครื่องมือคมตัด 628.22 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราป้อนที่ส่งผลต่ออัตราการขจัดเนื้องานและการสึกหรอของคมตัด ที่ความเร็วตัด 180 เมตรต่อนาที ความลึก 2 มิลลิเมตร



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการกัดปาดผิวหน้าความหยาบผิวโลหะเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยการเชื่อมอาร์กสวดหุ้มฟลักซ์โดยใช้ตัวแปรในการทดสอบได้แก่ การใช้สารหล่อเย็นกับไม่ใช้สารหล่อเย็น ความเร็วในการตัดเฉือน 100-220 เมตรต่อนาที และอัตราป้อนในการตัดเฉือน 0.05-0.20 มิลลิเมตรต่อฟัน ความลึกที่ 2 มิลลิเมตร ที่ส่งผลต่อการสึกหรอของคมตัดและค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ชิ้นงานทดสอบที่มีการสร้างชั้นรองพื้นให้ค่าความหยาบผิวและพื้นที่การสึกหรอขอบคมตัดมีค่าที่น้อยกว่าชิ้นงานทดสอบที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น เนื่องจากชิ้นงานที่มีการสร้างชั้นรองพื้นมีค่าความแข็งที่ต่ำกว่าชิ้นงานทดสอบที่ไม่มีการสร้างชั้นรองพื้น

5.1.2 การใช้สารหล่อเย็นแบบไม่ส่งผลดีต่อกระบวนการตัดเฉือน เนื่องจากมีพื้นที่การสึกหรอและค่าความหยาบที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่ใช้สารหล่อเย็น

5.1.3 ในพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัดมีเนื้อวัสดุของโลหะเชื่อมเกาะติดอยู่บริเวณขอบเครื่องมือคมตัด

5.1.4 ความเร็วรอบในการตัดเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความหยาบผิวลดต่ำลง แต่ทำให้เกิดพื้นที่การสึกหรอแบบ Flank wear บริเวณขอบคมตัดเพิ่มสูงขึ้น

5.1.5 การเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนในกระบวนการตัดเฉือนได้ส่งผลให้ค่าความหยาบผิวและพื้นที่การสึกหรอขอบคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น โดยค่าความหยาบน้อยที่สุดอยู่ในอัตราป้อนที่ 0.05 มิลลิเมตรต่อฟัน มีค่าความหยาบผิวเฉลี่ย 0.538 ไมโครเมตร และพื้นที่การสึกหรอบริเวณขอบคมตัด 628.22 ไมโครเมตร

5.1.6 ค่าอัตราการขจัดเนื้องาน (MRR) เพิ่มขึ้นพบว่าค่าการสึกหรอของเครื่องมือคมตัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การทดลองศึกษาอิทธิพลตัวแปรในกระบวนการกัดปาดผิวหน้าความหยาบผิวโลหะเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C ด้วยการเชื่อมอาร์กโลหะเชื่อมหุ้มฟลักซ์ได้เกิดปัญหาในระหว่างการทดลองจึงต้องมีการปรับปรุงหรือใช้ในการทดลองครั้งต่อไปโดยมีข้อเสนอแนะไว้ในวิจัยดังนี้

5.2.1 ในการเตรียมชิ้นงานทดสอบการกัดปาดผิวหน้าให้ได้ตรงตามขนาดทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากโลหะเชื่อมพอกผิวแข็งมีค่าความแข็งที่สูง

5.2.2 การทดสอบกระบวนการกัดปาดผิวหน้าในตัวแปรใช้สารหล่อเย็นไม่สามารถปรับตั้งอัตราการไหลของสารหล่อเย็น เนื่องจากเครื่องกัดอัตโนมัติในงานวิจัยไม่สามารถปรับตั้งได้

5.2.3 ในขั้นตอนการตรวจสอบค่าความหยาบผิวของชิ้นงานทดสอบที่ได้ผ่านกระบวนการกัดปาดผิวหน้ามาแล้ว การใช้เครื่องมือในการตรวจสอบค่าความหยาบผิวควรปรับตั้งเครื่องมือให้ได้ระนาบขนาดกักับพื้นผิวชิ้นงานทดสอบให้มากที่สุด



## 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] 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.
- [4] S. Aykut, E. Bagci, A. Kentli, and O. Yazicioglu, "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*, vol. 28, pp. 1880-1888, // 2007.
- [5] N. Tapoglou and A. Antoniadis, "3 - Dimensional kinematics simulation of face milling," *Measurement*, vol. 45, pp. 1396-1405, 7// 2012.
- [6] O. Verezub, Z. Kálazi, A. Sytcheva, L. Kuzsella, G. Buza, N. V. Verezub, et al., "Performance of a cutting tool made of steel matrix surface nano-composite produced by in situ laser melt injection technology," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, pp. 750-758, 4/1/ 2011.
- [7] R. Singh, "Chapter 6 - Classification of Steels," in *Applied Welding Engineering*, ed Boston: Butterworth-Heinemann, 2012, pp. 51-56.
- [8] R. Singh, "Chapter 4 - Structure of Materials," in *Applied Welding Engineering*, ed Boston: Butterworth-Heinemann, 2012, pp. 23-32.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [9] K. Weman, "9 - Manual metal arc (MMA) welding with coated electrodes," in *Welding Processes Handbook* (Second edition), ed: Woodhead Publishing, 2012, pp. 99-103.
- [10] R. Singh, "Chapter 3 - Welding and Joining Processes," in *Applied Welding Engineering* (Second Edition), ed: Butterworth-Heinemann, 2016, pp. 163-195.
- [11] K. G. Swift and J. D. Booker, "Chapter 11 - Joining Processes," in *Manufacturing Process Selection Handbook*, ed Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013, pp. 291-349.
- [12] 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.
- [13] W. Grzesik, "Chapter Ten - Cutting Fluids," in *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, ed Amsterdam: Elsevier, 2008, pp. 141-148.
- [14] W. Grzesik, "Chapter Four - Cutting Tool Materials," in *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, ed Amsterdam: Elsevier, 2008, pp. 27-I.
- [15] W. Grzesik, "Chapter Twelve - Tool Wear and Damage," in *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, ed Amsterdam: Elsevier, 2008, pp. 163-VII.
- [16] W. Grzesik, "Chapter Seven - Chip Formation and Control," in *Advanced Machining Processes of Metallic Materials*, ed Amsterdam: Elsevier, 2008, pp. 85-IV.
- [17] 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.
- [18] X. J. Ren, Q. X. Yang, R. D. James, and L. Wang, "Cutting temperatures in hard turning chromium hardfacings with PCBN tooling," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 147, pp. 38-44, 3/30/ 2004.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [19] X. J. Ren, R. D. James, E. J. Brookes, and L. Wang, "Machining of high chromium hardfacing materials," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 115, pp. 423-429, 9/24/ 2001.
- [20] H. M. Lin, Y. S. Liao, and C. C. Wei, "Wear behavior in turning high hardness alloy steel by CBN tool," *Wear*, vol. 264, pp. 679-684, 3/15/ 2008.
- [21] J. L. S. Ribeiro and A. M. Abrao, "MILLING OF ANNEALED AND HARDENED TOOL STEEL WITH COATED CARBIDE AND CERMET INSERTS," *International Congress of Mechanical Engineering*, vol. 19, 2007.
- [22] S. Ravi and M. Pradeep Kumar, "Experimental investigations on cryogenic cooling by liquid nitrogen in the end milling of hardened steel," *Cryogenics*, vol. 51, pp. 509-515, 9// 2011.
- [23] J. Gu, G. Barber, S. Tung, and R.-J. Gu, "Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts," *Wear*, vol. 225-229, Part 1, pp. 273-284, 4// 1999.
- [24] 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*, vol. 47, pp. 1667-1676, 9// 2007.
- [25] Y. C. Lin and K. Y. Chang, "Elucidating the microstructure and wear behavior of tungsten carbide multi-pass cladding on AISI 1-0 5 0 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, pp. 219-225, 1/19/ 2010.
- [26] Y. Kitagawa, K. Ikeuchi, T. Kuroda, Y. Matsushita, K. Suenaga, T. Hidaka, et al., "Hydrogen embrittlement susceptibility of microstructures formed in multipass weld metal for HT780 class steel," *Journal of Materials Science*, vol. 43, pp. 12-22, 2008/01/01 2008.
- [27] P. B. Srinivasan, V. Muthupandi, W. Dietzel, and V. Sivan, "An assessment of impact strength and corrosion behaviour of shielded metal arc welded dissimilar weldments between UNS 31803 and IS 2062 steels," *Materials & Design*, vol. 27, pp. 182-191, // 2006.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [28] S. Chatterjee and T. K. Pal, "Weld procedural effect on the performance of iron based hardfacing deposits on cast iron substrate," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 173, pp. 61-69, 3/30/ 2006.
- [29] Q. Wu, F. Lu, H. Cui, X. Liu, P. Wang, and X. Tang, "Role of butter layer in low-cycle fatigue behavior of modified 9Cr and CrMoV dissimilar rotor welded joint," *Materials & Design*, vol. 59, pp. 165-175, 7// 2014.
- [30] H. Caliskan and M. Kucukkose, "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*, vol. 50, pp. 304-312, 5// 2015.
- [31] L. Zhu, J. Wu, Z. Li, and C. Liu, "Investigating chip morphology and its characteristics in the high-speed milling of a Ti-6 Al-4 V thin plate," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29, pp. 4359-4366, 2015/10/01 2015.
- [32] H. Schulz, E. Abele, and A. Sahm, "Material aspects of chip formation in HSC machining," *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 50, pp. 45-48, // 2001.
- [33] 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 A 356 aluminum alloy," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, pp. 219-227, 2// 2005.
- [34] M. El Mansori and M. Nouari, "Dry machinability of nickel-based weld-hardfacing layers for hot tooling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 47, pp. 1715-1727, 9// 2007.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

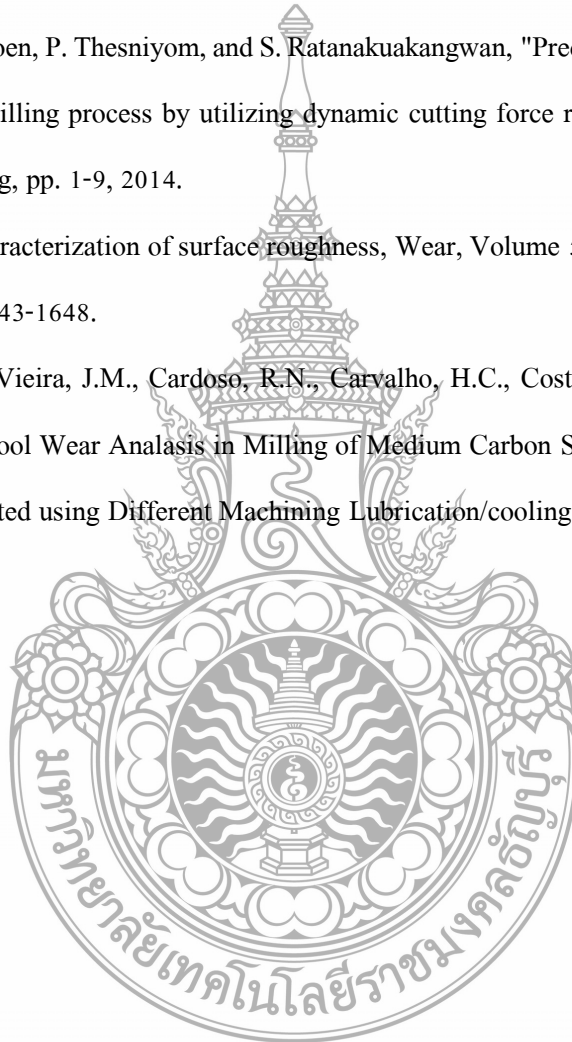
- [35] Y. Su, N. He, L. Li, and X. L. Li, "An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V," *Wear*, vol. 261, pp. 760-766, 10/20/ 2006.
- [36] M. Rahman, A. S. Kumar, M.-U. Salam, and M. S. Ling, "Effect of Chilled Air on Machining Performance in End Milling," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 21, pp. 787-795, 2003/07/01 2003.
- [37] R. G. V. Perez, "Wear mechanisms of WC inserts in face milling of gamma titanium aluminides," *Wear*, vol. 259, pp. 1160-1167, 7// 2005.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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)

- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] H. Hassanpour, M. H. Sadeghi, A. Rasti, and S. Shajari, "Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication," *Journal of Cleaner Production*, vol. 120, pp. 124-134, 5/1/ 2016.
- [48] 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.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] N.O. Myers, Characterization of surface roughness, *Wear*, Volume 5, Issue 3, 1962, Pages 182-189, ISSN 0043-1648.
- [52] Da Silva, R.B., Vieira, J.M., Cardoso, R.N., Carvalho, H.C., Costa, E.S. Machado, A.R., De Avila, R.F. Tool Wear Analysis in Milling of Medium Carbon Steel with Coated Cemented Carbide inserted using Different Machining Lubrication/cooling Systems. *Wear* 271 (2011) 2459-2465







ภาคผนวก

ภาคผนวก

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11

## **“พหุวัฒนธรรม : โอกาสและความท้าทาย”**

วันศุกร์ที่ 25 มีนาคม 2559

ห้องประชุม 1-1 ชั้น 1 (อาคารสนม สุทธิพิทักษ์อนุสรณ์)

มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

รายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11  
เรื่อง “พหุวัฒนธรรม : โอกาสและความท้าทาย”  
ศูนย์บริการวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ ร่วมกับ เครือข่ายวิจัยประชาชื่น

วันศุกร์ที่ 25 มีนาคม 2559  
ห้องประชุม 1-1 ชั้น 1 (อาคารสนม สุทธิพิทักษ์ อนุสรณ์)  
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

รวบรวมโดย  
ศูนย์บริการวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์  
Email: [conference.dpu@dpu.ac.th](mailto:conference.dpu@dpu.ac.th)  
<http://www.dpu.ac.th/conference>

- บทความทุกเรื่องได้รับการตรวจสอบทางวิชาการโดยผู้ทรงคุณวุฒิแต่ข้อความและเนื้อหา  
ของบทความที่ตีพิมพ์เป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว มิใช่ความคิดเห็นและ  
ความรับผิดชอบของ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
- การคัดลอก อ้างอิง ต้องดำเนินการปฏิบัติในหมู่นักวิชาการทั่วไป และสอดคล้องกับ  
กฎหมายที่เกี่ยวข้อง
- การเผยแพร่ผลงานวิชาการในรายงานสืบเนื่องการประชุมวิชาการฯ จะสมบูรณ์เมื่อต้องมี  
เอกสารการนำเสนอผลงานประกอบ

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาผลงานวิชาการ  
การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 11

---

- |   |   |
|---|---|
| 1. รองศาสตราจารย์ ดร.สรณัฐ ไตลังคะ                | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์                    |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.ปรียา บุญญสิริ               | นักวิชาการอิสระ                           |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.พัชรี ขยากรโศภิต             | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีภาคตะวันออกเฉียงเหนือ |
| 4. รองศาสตราจารย์คณิต เขียววิชัย                  | มหาวิทยาลัยศิลปากร                        |
| 5. รองศาสตราจารย์ยุทธนา ธรรมเจริญ                 | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมราชา                |
| 6. รองศาสตราจารย์วรินทร์ ววงค์                    | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์                     |
| 7. รองศาสตราจารย์สุวัฒนา เสียมประวัติ             | มหาวิทยาลัยศิลปากร                        |
| 8. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัศวิน เนตรโพธิ์แก้ว     | สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์              |
| 9. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุลศักดิ์ ชาญณรงค์       | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ                |
| 10. ดร.ศรภัช เพชรเชิดชู                           | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย                     |
| 11. รองศาสตราจารย์ ดร.บงการ หอมมาน                | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 12. รองศาสตราจารย์ ดร.สรชัย พิศาลบุตร             | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 13. รองศาสตราจารย์ ดร.อัศวิน แสงพิกุล             | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 14. รองศาสตราจารย์พินิจ ทิพย์มณี                  | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 15. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คม คัมภีรานนท์          | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัน บุญภาพ คอมมอน   | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธัญธัช วิภัติภูมิประเทศ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิภูรัตน์ ทิพรส         | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มณฑกานติ ชูชูวงศ์       | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลีลา เตียงสูงเนิน       | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพร โกมารทัต           | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 22. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุณี เดชมณี          | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |
| 23. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิลา ฟงศ์ยี่หล้า       | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                   |

- |  |                           |
|--|---------------------------|
| 24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนารัตน์ ลิ้ม    | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์นศัฟฟาณีน ชินปัญชณะ  | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไพรินทร์ ชลไพศาล     | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัญญรัตน์ หงส์วรรณท์ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุเทพ พันประสิทธิ์   | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 29. ดร.โชติ แยมแสง                         | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 30. ดร.ณรงค์เดช กิริติพรานนท์              | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 31. ดร.นักรบ หมี่แสน                       | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 32. ดร.รชฎ ชำบุญ                           | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 33. ดร.รอบทิศ ไวยสุศรี                     | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 34. ดร.เกียรติอนันต์ ล้วนแก้ว              | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 35. ดร.ศยามล นองบุญนาค                     | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |

คำสั่งมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต  
ที่ 0500/1201

เรื่อง แต่งตั้งคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการระดับชาติ การบริหารจัดการ ครั้งที่ 11


เพื่อให้การดำเนินงานจัดประชุมวิชาการระดับชาติ การบริหารจัดการ ครั้งที่ 11 ในวันที่ 25 มีนาคม 2559 เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ อาศัยอำนาจตามความในข้อ 18 แห่งระเบียบ ว่าด้วย การบริหารงานและการจัดส่วนงานมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต พ.ศ. 2555 จึงแต่งตั้งคณะกรรมการ “การประชุมวิชาการระดับชาติ การบริหารจัดการ ครั้งที่ 11” โดยประกอบด้วยบุคลากรของมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต และเครือข่ายวิจัย “ประชาชื่น” ดังนี้

- |   |               |
|---|---------------|
| 1. ศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูรย์ สีนลารัตน์<br>รองอธิการบดีสายงานวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                                       | ประธานกรรมการ |
| 2. ดร.เกียรติอนันต์ ล้วนแก้ว<br>ผู้ช่วยรองอธิการบดีสายงานวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต  | รองประธาน     |
| 3. ดร.อภิเทพ แซ่โค้ว<br>ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายวิชาการบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนานาชาติแสตมฟอร์ด                                | กรรมการ       |
| 4. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ศักดิ์ จักรกรณ์<br>ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร                           | กรรมการ       |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปราณี สวัสดิ์สรพ์<br>ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการวิจัยและพัฒนานวัตกรรม มหาวิทยาลัยกรุงเทพ                | กรรมการ       |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.ธงชัย สุวรรณสิขณณ์<br>ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ | กรรมการ       |
| 7. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วาภูมิ อริยวิริยะนันท์<br>ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี          | กรรมการ       |
| 8. ดร.สิงห์แก้ว ป็อกเที่ยง<br>ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร                                | กรรมการ       |
| 9. รองศาสตราจารย์นภัทร วจินเทพินทร์<br>ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ                   | กรรมการ       |
| 10. รองศาสตราจารย์ ดร.โกสุม สายใจ<br>ผู้อำนวยการสำนักวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยราชพฤกษ์                                     | กรรมการ       |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนะศึก ชินานนท์<br>ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสวนดุสิต                               | กรรมการ       |
| 12. รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์จันทร์ อยู่แพทย์<br>ผู้อำนวยการสถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต  | กรรมการ       |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุบิน ยุระรัช<br>ผู้อำนวยการศูนย์ส่งเสริมและพัฒนางานวิจัย มหาวิทยาลัยศรีปทุม                        | กรรมการ       |
| 14. รองศาสตราจารย์สุปนรรต พรหมอินทร์<br>ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช                           | กรรมการ       |

- |   |                     |
|---|---------------------|
| 15. อาจารย์ประสิทธิ์ชัย เดชช่า<br>อาจารย์ประจำ วิทยาลัยอินเตอร์เทคลำปาง   | กรรมการ             |
| 16. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิพย์พาพร มหาสินไพศาล<br>รองผู้อำนวยการสำนักวิจัยและพัฒนา สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ | กรรมการ             |
| 17. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารีย์ ชื่นวัฒนา<br>ผู้อำนวยการศูนย์สนเทศและหอสมุด มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต            | กรรมการ             |
| 18. นายณัฐสิทธิ์ พุฒิสารทภาคย์<br>หัวหน้าแผนกเทคโนโลยีห้องสมุด มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                          | กรรมการ             |
| 19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนารัตน์ ลิ้ม<br>ผู้อำนวยการสำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                        | กรรมการ             |
| 20. นายทองศักดิ์ ศิริยงค์<br>ผู้อำนวยการศูนย์บริการวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                                | กรรมการ             |
| 21. นางสาวปริญญา คล้ายเจริญ<br>นักวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต   | กรรมการ             |
| 22. นางสาวนันทวัน रामเดชะ<br>นักวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต   | กรรมการ             |
| 23. นางพรพิมล สิงหเสม<br>นักวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต   | กรรมการ             |
| 24. นางสกุลทิพย์ อนันตริกซ์<br>นักวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต   | กรรมการและเลขานุการ |
| 25. นายศักดิ์สิทธิ์ คณะชาติ<br>ผู้ช่วยนักวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต  | ผู้ช่วยเลขานุการ    |
| 26. นางสาวกรรณิการ์ วัชรภรณ์<br>ผู้ช่วยนักวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต   | ผู้ช่วยเลขานุการ    |
| 27. นายศราวุธ โภมธพันธุ์<br>เจ้าหน้าที่ศูนย์บริการวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                                 | ผู้ช่วยเลขานุการ    |
| 28. นางสาวศมภัส บัณฑิตมาลีกุล<br>เจ้าหน้าที่ศูนย์บริการวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต                            | ผู้ช่วยเลขานุการ    |
| 29. นางมณฑนา แจ่มลีโต<br>พนักงานศูนย์บริการวิจัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต  | ผู้ช่วยเลขานุการ    |

ทั้งนี้ ตั้งแต่วันที่ 26 พฤศจิกายน 2558 เป็นต้นไป

สั่ง ณ วันที่ 1 ธันวาคม พ.ศ. 2558

  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพฑูริย์ สินสาร์ตัน)  
รองอธิการบดีสายงานวิจัย ปฏิบัติการแทน  
อธิการบดี



## สารบัญ

	หน้า
สารจากอธิการบดี	3
กำหนดการประชุมวิชาการ	5
ตารางนำเสนอผลงาน	6
ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาผลงานวิชาการ	18
คณะกรรมการการประชุมวิชาการ	20
<b>บทความ</b>	
1. กลยุทธ์การจำและการสอนคำศัพท์ภาษาจีน	29
2. การใช้คำลักษณนามในภาษาจีน	42
3. การใช้สื่อแบบบูรณาการเพื่อการสื่อสารภายในองค์กรของพนักงานการทางพิเศษแห่งประเทศไทย	60
4. การถอดบทเรียนจากโครงการท่องเที่ยวสร้างสรรค์สัมผัสมิติปัญญาอาเซียน (Backpackto ASEAN) กรณีศึกษาสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว	71
5. การประเมินการปนเปื้อนของโลหะหนักบางชนิดในข้าวสารที่วางจำหน่ายในตลาดสดบริเวณภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย	83
6. การประเมินการปนเปื้อนโลหะหนักในผักที่จำหน่ายในตลาดสดบริเวณเขตภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย	95
7. การประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพจากการบริโภคผักที่มีการปนเปื้อนสารตะกั่วในเขตภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย	104
8. การประเมินความเสี่ยงด้านสุขภาพจากการบริโภคข้าวเหนียวที่มีการปนเปื้อนสารตะกั่วและแคดเมียมที่จำหน่ายในเขตภาคเหนือตอนล่างของประเทศไทย	117

9. การประเมินความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งจากการบริโภคผักที่ปนเปื้อน แคดเมียมกรณีศึกษาในเขตภาคเหนือของประเทศไทย	129
10. การประเมินทักษะผู้เรียนในศตวรรษที่ 21	141
11. การปรับตัวของผู้ประกอบการส่งออกผลไม้ในอำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงรายต่อการเปิดสะพานมิตรภาพแห่งที่ 4	146
12. การเปรียบเทียบพฤติกรรมการด้านทานการศึกษาระหว่างก่อนและ หลังการอบชุบด้วยความร้อนชั้นพอกผิวแข็ง JIS S50C ของลูกโรลเลอร์รถเกี่ยว และนวดข้าว	159
13. การพัฒนาความสามารถในการสื่อสารด้านการพูดภาษาไทยของ นักศึกษาชาวต่างชาติด้วยการสอนสัทสัมพันธ์	169
14. การพัฒนาโปสเตอร์เพื่อการประชาสัมพันธ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี	181
15. การพัฒนาระบบเว็บการสั่งรายการอาหารด้วยตนเอง	196
16. การพัฒนาเว็บระบบงานขายวัสดุออนไลน์ : กรณีศึกษา (ร้านยงยุทธค้าวัสดุ)	207
17. การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน เพื่อการประชาสัมพันธ์ บนเครือข่าย กลุ่มโรงเรียนพระปริยัติธรรม แผนกสามัญศึกษา กลุ่มที่ 14	220
18. การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันสำหรับวัดความถนัดทางการเรียน	234
19. การพัฒนาศักยภาพการแข่งขันของร้านค้าปลีกแบบดั้งเดิม (โชห่วย)	248
20. การวิเคราะห์อัตราผลตอบแทนความเสี่ยงและปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อราคาหุ้น กลุ่มทรัพยากรในตลาดหลักทรัพย์แห่งประเทศไทย	261
21. การศึกษาความรู้ความเข้าใจและพฤติกรรมการจัดการขยะของประชาชน ตำบลบางบุตร อำเภอบ้านค่าย จังหวัดระยอง	275
22. การศึกษาความสัมพันธ์ในการบริหารปัจจัยภายในองค์กรกับ ผลการดำเนินงานตามหลักการวัดแบบสมดุลของสถานประกอบการธุรกิจ นวดเพื่อสุขภาพที่ได้ผ่านการรับรองมาตรฐานจากกลุ่มส่งเสริมธุรกิจบริการสุขภาพ	287
23. การศึกษาความสามารถในการตัดเดือนแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้า คาร์บอน JIS-S50C	300
24. การศึกษาเพื่อพัฒนารูปร่างสรรค์ของตลาดน้ำขวัญ-เรียม ในกรุงเทพมหานคร.	313

## การศึกษาความสามารถในการตัดเฉือนแนวเชื่อมพอกผิวแข็งเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C Machinability Study of Hardfacing Welding Bead on JIS-S50C Carbon Steel

สหัส มีชะคะ  
อรรถกร จันทรชนะ  
นฤทธิ์ คชฤทธิ์  
กิตติพงษ์ กิมะพงศ์

### บทคัดย่อ

การเชื่อมพอกผิวแข็งเป็นหนึ่งในวิธีการสำคัญที่ทำให้เกิดการเพิ่มสมบัติทางกลของชิ้นส่วนเครื่องจักร อย่างไรก็ตามผิวหน้าที่มีความหยาบของแนวเชื่อมมีความจำเป็นต้องทำให้มีความเรียบก่อนนำไปใช้งานในเครื่องจักร ด้วยเหตุผลนี้การศึกษาค่าตัวแปรการตัดคมแต่งผิวสำเร็จโลหะเชื่อมพอกแข็งจึงมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษาผลกระทบของตัวแปรการกัดต่อความหยาบผิวโลหะเชื่อมพอกแข็งบนเหล็กกล้าคาร์บอน JIS-S50C และสมบัติการสึกหรอของเครื่องมือตัด ผลการทดลองโดยสรุปมีดังนี้ การสึกหรอของคมตัดที่ใช้ในการกัดโลหะเชื่อมที่มีชั้นรองพื้นมีค่าต่ำกว่าโลหะเชื่อมที่ไม่มีชั้นรองพื้น โดยปกติกระบวนการกัดไม่มีความจำเป็นในการใช้สารหล่อเย็นเนื่องจากการสึกหรอของคมตัดมีค่าสูง ตัวแปรการกัดที่ทำให้เกิดความหยาบผิวเฉลี่ย  $0.506 \mu\text{m}$  และระยะการสึกหรอเฉลี่ยของคมตัด  $680.65 \mu\text{m}$  ได้แก่ แนวเชื่อมที่มีการสร้างชั้นรองพื้นและการไม่ใช้สารหล่อเย็น

**คำสำคัญ:** การเชื่อมพอกผิวแข็ง การกัดผิวหน้า ความหยาบผิว การสึกหรอ สารหล่อเย็น

### **Abstract**

A hardfacing welding is one of successful methods for increasing mechanical property of a machine part. However, a high rough surface of the welding line is required to be smoothly machined before applying as a part in the machine. Therefore, the optimized machined process parameters for finishing the hard-faced weld metal are still investigated and developed. This research aims to effect study of a milling process parameters on a hard-faced surface roughness on JIS-S50C carbon steel and a wear property of a cutting tool. The summarized results are as follows. The wear of the cutting tool edge that applied to machine the hard-faced weld metal with the buffer layer was lower than that was unnecessary without buffer layer normally. an application of a cutting fluid in a milling process showed because of a high wear at the cutting edge. The optimized milling process parameter that produces the surface roughness of 0.506  $\mu\text{m}$  and the wear distance of 680.65  $\mu\text{m}$  was a welding bead with buffer layer and without cutting-fluid.

**Keywords:** Hard-faced Welding Face-milling Roughness Wear Cutting Fluid

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายสหัส มีชะคะ
วัน เดือน ปีเกิด	23 สิงหาคม 2522
ที่อยู่	19/173 หมู่ 5 ชุมชนสวนสัมพันธ์พัฒนาซอยสวนสัมพันธ์ ตำบลคูคต อำเภอลำลูกกา จังหวัดปทุมธานี 12130
การศึกษา	ปริญญาอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์การทำงาน	สำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา วิทยาลัยเทคนิคดอนเมือง แผนกช่างเทคนิคอุตสาหกรรม พ.ศ. 2544-ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	08-6044-8837
อีเมล	ourway002@hotmail.com

