บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและอภิปรายผลการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จต่อการสึกหรอแบบขัดถูในการใช้งานของใบกวนสำหรับกระบวนการผสม สามารถแบ่งผลการทดลองได้ดังนี้

1. การทดสอบด้วยวิธีสารแทรกซึม
2. การทดสอบด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสี
3. การตรวจสอบรูพรุน
4. การการทดสอบเพื่อเลือกขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู
5. การทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู
6. การทดสอบความแข็ง
7. การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค
8. การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาค
9. การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

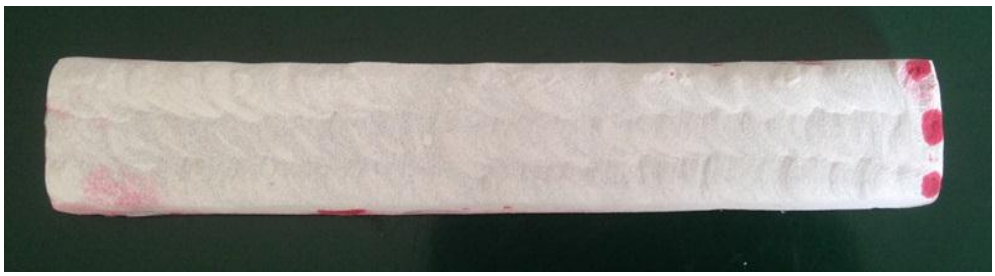
4.1 การทดสอบด้วยวิธีสารแทรกซึม

การทดสอบด้วยวิธีสารแทรกซึม (Penetrant Testing; PT) ทำเพื่อตรวจสอบผิวหน้าด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งมีความสมบูรณ์ดีหรือไม่ก่อนนำชิ้นงานไปทำการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู โดยชิ้นงานจะต้องไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่องใด ๆ เกิดขึ้นบนชิ้นงาน เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการทดสอบ นอกจากนั้นเป็นการยื่นยันว่าขั้นตอนและพารามิเตอร์ของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งที่ใช้ในการสร้างผิวแข็งสำเร็จมีความเหมาะสม โดยชิ้นงานทดสอบทุกชิ้นที่ผ่านกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งจะทำการทดสอบด้วยวิธีสารแทรกซึม

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบด้วยวิธีสารแทรกซึม

ชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง	ผลการทดสอบด้วยวิธีสารแทรกซึม
SMAW by Buttering + Hardfacing	ไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่อง
SMAW by Buttering + PWHT + Hardfacing	ไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่อง
SMAW by Buttering + Hardfacing + PWHT	ไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่อง
GTAW by Buttering + Hardfacing	ไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่อง
GTAW by Buttering + PWHT + Hardfacing	ไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่อง
GTAW by Buttering + Hardfacing + PWHT	ไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่อง

จากผลการทดสอบพบว่า ไม่พบรอยความไม่ต่อเนื่องใดๆ (Indication) บนผิวหน้าด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จึงสามารถนำชิ้นงานไปทำการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูในขั้นตอนต่อไปได้ทุกชิ้น แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการทดสอบด้วยวิธีสารแทรกซึมกับชิ้นงานผ่านสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

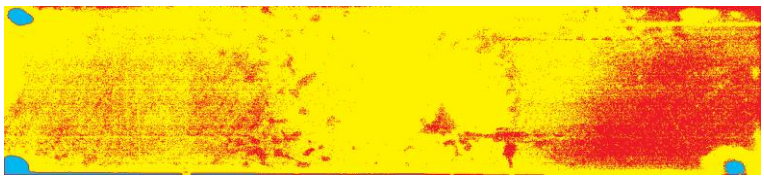
4.2 การทดสอบด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสี

การทดสอบด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiographic Testing; RT) เพื่อตรวจสอบชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนและการใช้ค่าตัวแปรกำหนดสำหรับกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการแล่นประสานมีความเหมาะสมหรือไม่ โดยนำฟิล์มที่ได้ไปทำการหาเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ต่าง ๆ ภายหลังจากการแล่นประสานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า “Scentis” ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ก่อนทำการตัดให้ได้ขนาดตามที่ได้กำหนดในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูก โดยเลือกตัดบริเวณที่มีการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์มากที่สุดไปใช้ในการทดสอบเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการทดสอบ ชิ้นงานทดสอบทุกชิ้นที่ผ่านกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยด้วยกระบวนการแล่นประสานจะทำการทดสอบด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วย

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซ็นต์พื้นที่ของแนวรอยแล่นประสาน

ชิ้นงานที่	%พื้นที่หลอมแผ่นเงินและฟลักซ์สมบูรณ์ (สีแดง)	%พื้นที่ไม่หลอมแผ่นเงินและฟลักซ์ (สีเหลือง)	%พื้นที่ที่มีการเยิ้มของแผ่นเงินและฟลักซ์ (สีฟ้า)
1	65	35	-
2	73	26	1
3	77	22	1

จากผลการทดสอบพบว่า ผลจากการนำไปคำนวณหาพื้นที่ภายหลังจากการแล่นประสานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 4.2 การหลอมละลายอย่างสมบูรณ์มีค่ามากกว่า 75 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ทำการแล่นประสานทั้งหมดจำนวน 1 ชิ้น แสดงว่า ขั้นตอนและการใช้ค่าตัวแปรกำหนดสำหรับกระบวนการแล่นประสานในงานวิจัยนี้ไม่มีความเมาะสม โดยฟิล์มที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีจะมีพื้นที่ 3 แบบ ประกอบด้วย พื้นที่หลอมแผ่นเงินและฟลักซ์สมบูรณ์ พื้นที่ไม่หลอมแผ่นเงินและฟลักซ์ และพื้นที่มีการเยิ้มของแผ่นเงินและฟลักซ์ ซึ่งแบ่งเป็น 3 สี คือ พื้นที่สีเทา พื้นที่สีดำ และพื้นที่สีขาว ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4.2 ภาพที่ได้จากการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

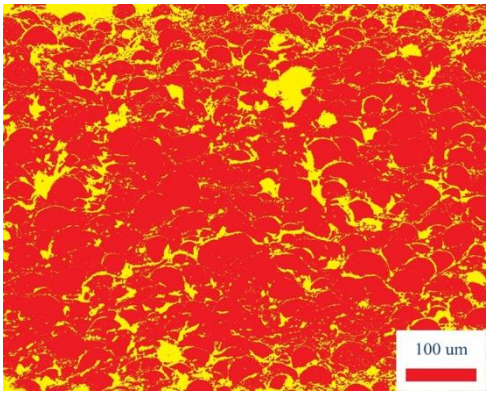
รูปที่ 4.3 ฟิล์มของชิ้นงานผ่านกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการแล่นประสาน

4.3 การตรวจสอบรูพรุน

การตรวจสอบรูพรุนทำเพื่อตรวจสอบชั้นผิวเคลือบที่ได้จากการใช้ค่าตัวแปรกำหนดในการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงสำหรับชิ้นงานมีความเหมาะสมหรือไม่ โดยนำภาพของชั้นผิวเคลือบที่ได้จากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical Microscope; OM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ไปทำการหาเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ของรูพรุนภายหลังจากการพ่นเคลือบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า “Scentis” ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยทำการสุ่มบริเวณของชั้นเคลือบผิวจำนวน 5 บริเวณ ผลการทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ของรูพรุนต้องมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสัมพัทธ์ (% Relative Accuracy) น้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดสอบพบว่า พื้นที่ของรูพรุนที่บริเวณชั้นผิวเคลือบมีพื้นที่ 20.93 เปอร์เซ็นต์ และค่ามีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องสัมพัทธ์ 5.14 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปกติทั่วไปกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงควรมีรูพรุนที่บริเวณของชั้นผิวเคลือบน้อยที่สุด ภาพที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่

ของรูพรุนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะมีพื้นที่ 2 แบบ ประกอบด้วย เนื้อของผิวเคลือบ และรูพรุน ซึ่งแบ่งเป็น 2 สี คือ พื้นที่สีแดง และพื้นที่สีเหลือง ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงว่า ตัวแปรกำหนดในการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงในงานวิจัยนี้ไม่มีคามเมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของชั้นการเคลือบผิว ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งมีลักษณะการหลอมเพื่อยึดเกาะแบบทางกลไม่สมบรูณ์



รูปที่ 4.4 ภาพที่ได้จากการหาเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่ของรูพรุนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

รูปที่ 4.5 ภาพของชั้นผิวเคลือบที่ผ่านกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง

4.4 การทดสอบเพื่อเลือกขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู

การทดสอบเพื่อเลือกขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู โดยนำชิ้นงานที่ถูกทำการสร้างผิวแข็งสำเร็จทั้งหมด 8 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 4.3 มาทำการทดสอบเพื่อเลือกขั้นตอนที่เหมาะสม ซึ่งตัวแปรกำหนดในการทดสอบตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.12 ภายหลังการทดสอบจะทำการหาค่าปริมาณการสึกหรอ สำหรับการทดสอบการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู โดยคำนวณจากปริมาตรที่หายไป (Volume Loss) ของชิ้นงานแต่ละชิ้นงานทดสอบ ดังแสดงสมการที่ 2-4

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขของการสร้างผิวแข็งสำเร็จ

No.	Process	Condition
1	SMAW	E309L-16 + ECoCr-A
2		E309L-16 + PWHT + ECoCr-A
3		E309L-16 + ECoCr-A + PWHT
4	GTAW	ER309L + ERCoCr-A
5		ER309L + PWHT + ERCoCr-A
6		ER309L + ERCoCr-A + PWHT
7	Thermal Spray	HVOF
8	Brazing	Stellite 6 Plate

ตารางที่ 4.4 ปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทั้ง 2 กรณี ภายหลังการทดสอบเพื่อยืนยันเลือกขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู

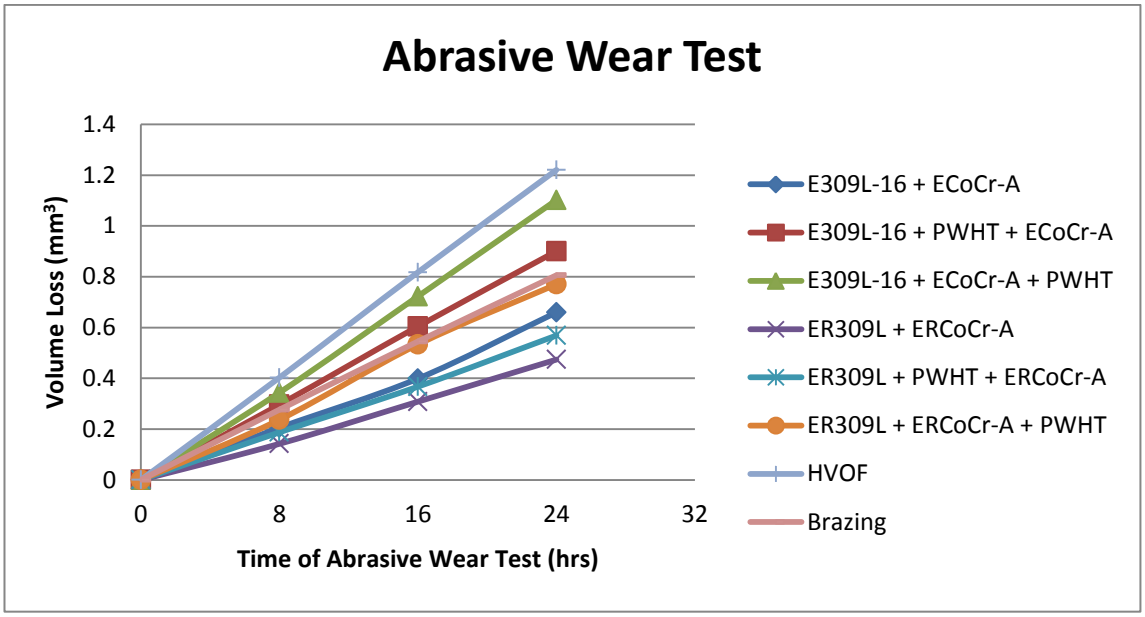
No.	Volume Loss (mm^3)					
	Case 1			Case 2		
	1st (8 hrs)	2nd (8 hrs)	3rd (8 hrs)	1st (8 hrs)	2nd (8 hrs)	3rd (8 hrs)
1	0.2054	0.3989	0.6596	0.3199	0.4423	0.8728
2	0.2962	0.6043	0.9005	0.2844	0.4028	0.6635
3	0.3436	0.7227	1.1019	0.2330	0.4463	0.8452
4	0.1422	0.3081	0.4739	0.1698	0.3002	0.5964
5	0.1896	0.3673	0.5687	0.2370	0.3791	0.6872
6	0.2370	0.5332	0.7701	0.3318	0.4897	0.7385
7	0.4028	0.8175	1.2204	0.2844	0.5687	0.6991
8	0.2765	0.5450	0.8057	0.2844	0.3436	0.6161

จากตารางที่ 4.4 และ รูปที่ 4.6 พบว่า ขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู แบบทำการเปลี่ยนทรายทุก ๆ 8 ชั่วโมง ให้ค่าปริมาณการสึกหรอที่คำนวณจากปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานแต่ละชิ้นงานทดสอบที่มีความคงที่มากกว่าแบบไม่ทำการเปลี่ยนแปลงทราย และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.6(ก) และ 4.6(ข) จะเห็นได้ว่า กราฟเส้นตรงของปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา แบบทำการเปลี่ยนทรายทุก ๆ 8 ชั่วโมง มีความเป็นเส้นตรงมากกว่า ซึ่งแสดงถึงปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทดสอบมีปริมาณคงที่มากกว่าแบบไม่ทำการเปลี่ยนทราย

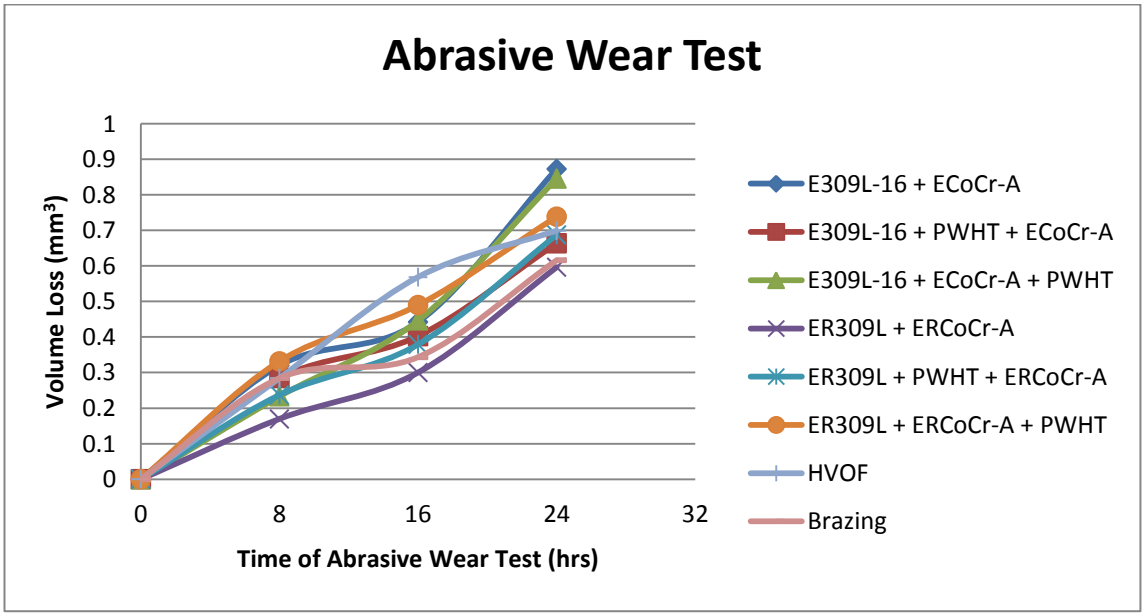
ตารางที่ 4.5 อัตราการสึกหรอของชิ้นงานทั้ง 2 กรณี ภายหลังการทดสอบเพื่อยืนยันเลือกขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู

No.	Wear Rate (g/hr)							
	Case 1				Case 2			
	1st (8 hrs)	2nd (8 hrs)	3rd (8 hrs)	Variance (R^2)	1st (8 hrs)	2nd (8 hrs)	3rd (8 hrs)	Variance (R^2)
1	0.0257	0.0242	0.0326	0.9992	0.0400	0.0153	0.0538	0.9595
2	0.0370	0.03850	0.0370	0.9999	0.0356	0.0148	0.0326	0.9756
3	0.0430	0.0474	0.0474	0.9949	0.0291	0.0267	0.0499	0.9732
4	0.0178	0.0207	0.0207	0.9978	0.0212	0.0163	0.037	0.9645
5	0.0235	0.0225	0.0252	0.9995	0.0296	0.0178	0.0385	0.9810
6	0.0296	0.037	0.0296	0.9981	0.0415	0.0197	0.0311	0.9760
7	0.0504	0.0518	0.0504	1.0000	0.0356	0.0355	0.0163	0.9709
8	0.0346	0.0336	0.0326	0.9998	0.0356	0.0074	0.0341	0.9450

จากตารางที่ 4.5 พบว่า การทดสอบเพื่อเลือกขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู แบบทำการเปลี่ยนทรายทุก ๆ 8 ชั่วโมง มีปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลามีอัตราการสึกหรอที่สม่ำเสมอและค่าความแปรปรวน (R^2) จะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าแบบไม่ทำการเปลี่ยนแปลงทราย เนื่องจากการทดสอบแบบไม่ทำการเปลี่ยนแปลงทราย ส่งผลทำให้เม็ดทรายลักษณะความกลมของเม็ดทรายเพิ่มขึ้นภายหลังผ่านการให้งานไปแล้ว 8 ชั่วโมง ซึ่งความกลมของเม็ดทรายส่งผลต่อค่าการสึกหรอที่ผิวหน้าชิ้นงาน ทำให้กราฟเชิงเส้นของปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลาของการทดสอบแบบทำการเปลี่ยนทรายทุก ๆ 8 ชั่วโมง มีความเป็นเส้นตรงมากกว่าดังแสดงในรูปที่ 4.6



(ก)



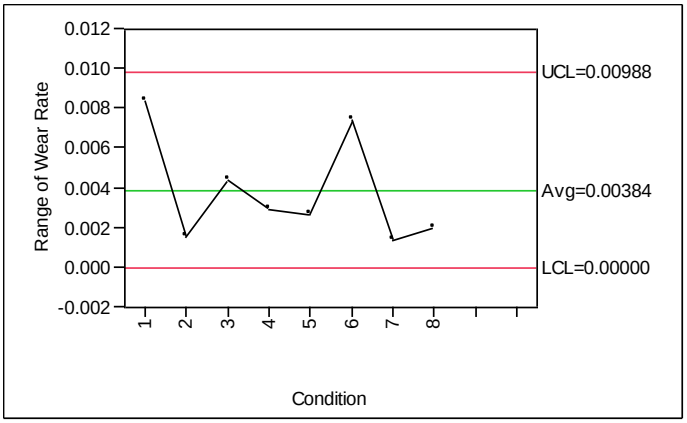
(ข)

รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบเพื่อเลือกขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จ

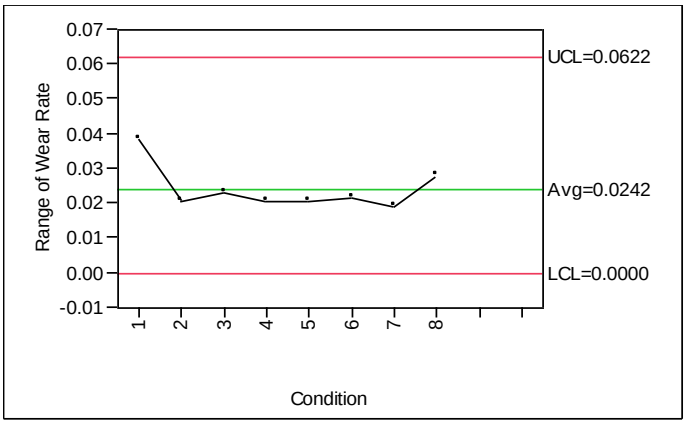
ก) กรณีที่ 1 ปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา แบบทำการเปลี่ยนทรายทุก ๆ 8 ชั่วโมง

ข) กรณีที่ 2 ปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา แบบไม่ทำการเปลี่ยนทรายทุก ๆ 8 ชั่วโมง

นอกจากนั้น นำเครื่องมือทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อเลือกขั้นตอนและกำหนดพารามิเตอร์ในการทดสอบที่มีความเหมาะสมก่อนทำการทดสอบการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จ ในการวิเคราะห์เพื่อเลือกขั้นตอนจะอาศัยการประเมินความสามารถของกระบวนการวัดจากความผันแปรของระบบการวัด (Gauge Repeatability and Reproducibility; GR&R) เพื่อทำการเปรียบเทียบทั้ง 2 กรณี โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า JMP ดังแสดงในภาคผนวก จ



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์จากการพิจารณาแผนภูมิควบคุม R ของขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู

ก) กรณีที่ 1 ทำการเปลี่ยนทรายสำหรับการทดสอบทุก ๆ 8 ชั่วโมง

ข) กรณีที่ 2 ไม่ทำการเปลี่ยนทรายสำหรับการทดสอบทุก ๆ 8 ชั่วโมง

การประเมินความสามารถของกระบวนการวัดจาก GR&R จะต้องทำการทวนสอบคุณภาพของข้อมูลด้วยการพิจารณาจากแผนภูมิควบคุม R ก่อนทุกครั้ง เพื่อพิจารณาถึงความสามารถในการแยกความแตกต่างของระบบการวัด (Resolution) ความสอดคล้อง (Consistency) และความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของระบบการวัด [19] ผลลัพธ์จากการพิจารณาแผนภูมิควบคุม R ของทั้ง 2 กรณี ดังแสดงในรูปที่ 4.7

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลลัพธ์จากการพิจารณาจากแผนภูมิควบคุม R พบว่า ขั้นตอนการทดสอบทั้ง 2 กรณี มีค่า R อยู่ในพิกัดควบคุมมากกว่า 4 ค่า แสดงว่าระบบการวัดมีคุณสมบัติในการแยกความแตกต่าง พร้อมทั้งมีคุณสมบัติสอดคล้องและสม่ำเสมอ ดังนั้น สามารถนำข้อมูลวัดที่ได้ไปทำการประเมินความสามารถของกระบวนการวัดจาก GR&R โดยผลลัพธ์จากการประเมินความสามารถของกระบวนการวัดจาก GR&R ของขั้นตอนการทดสอบทั้ง 2 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การประเมินความสามารถของกระบวนการวัดจาก GR&R ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 99.73%

Measurement Source	Variation	
	Case 1	Case 2
Equipment Variation (EV)	0.01527449	0.07012246
Appraiser Variation (AV)	0.00000000	0.00000000
Measurement Variation (RR)	0.01527449	0.07012246
Part Variation (PV)	0.06329379	0.00000000
Total Variation (TV)	0.06511078	0.07012246
Precision to Total Variation (P/TV)	23.4592	-

จากตารางที่ 4.6 แสดงผลการประเมินความสามารถของกระบวนการวัดจาก GR&R ด้วยช่วงความเชื่อมั่น 99.73% พบว่า ค่าโปรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) ด้วยความผันแปรระหว่างพนักงานวัด (AV) ของทั้ง 2 กรณี มีค่า 0 เนื่องจากการวัดผลอัตราการสึกหรอของชิ้นงานทดสอบทำการวัดด้วยคน ๆ เดียว จึงไม่มีค่าความผันแปรของค่าวัดจากระบบการวัดระหว่างเงื่อนไขของการวัดที่มีสาเหตุมาจากพนักงานวัด โดยการประเมินผลระบบการวัดต่อความผันแปรของกระบวนการจะพิจารณาจากค่า

P/TV (Precision-to-Total Variation) สำหรับระบบการวัดที่ใช้วิเคราะห์ความผันแปรของกระบวนการได้จากสมการที่ 4-1 [19, 20]

$$\mathrm{P/TV} = \frac{\mathrm{GR\&R}}{\mathrm{TV}} \times 100\% \tag{4-1}$$

เมื่อ P/TV = ความผันแปรระบบการวัดต่อความผันแปรของกระบวนการ
GR&R = ความผันแปรของระบบการวัด
TV = ความผันแปรของกระบวนการ

การนำค่าความผันแปรของกระบวนการ (Total Variation; TV) ที่ได้จากข้อมูลวัดมาใช้พิจารณาการประเมินผลระบบการวัดต่อความผันแปรของกระบวนการจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข 2 ประการ คือ 1. แผนภูมิควบคุม $\bar{x}$ เพื่อแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าจริงจากข้อมูลวัด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 2. ระบบการวัดมีสามารถแยกความแตกต่าง (Discrimination) ของข้อมูลที่ทำการวัด ซึ่งพิจารณาจากสัดส่วนการแยกความแตกต่าง (Discrimination Ratio; DR) ได้จากสมการที่ 4-2โดยข้อมูลวัดจะต้องมีสามารถจำนวนประเภทข้อมูลไม่ต่ำกว่า 5 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 4.7 [19-21]

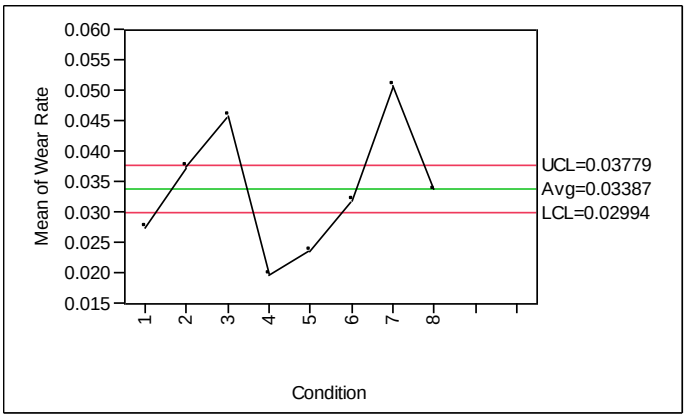
$$\mathrm{DR} = \sqrt{\frac{2\sigma_p^2}{\sigma_g^2} + 1} \tag{4-2}$$

เมื่อ DR = สัดส่วนการแยกความแตกต่าง
σ_p = ความผันแปรของตัวงาน
σ_g = ความผันแปรของระบบการวัด

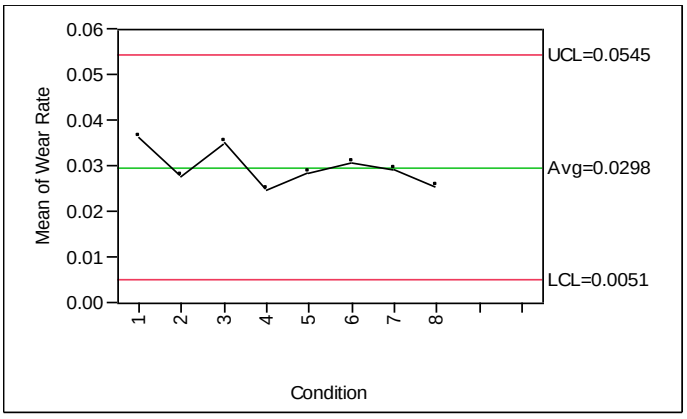
จากรูปที่ 4.8 แสดงผลการพิจารณาจากแผนภูมิควบคุม $\bar{x}$ พบว่า กรณีที่ 1 มีค่า $\bar{x}$ ออกนอกพิกัดควบคุมค่อนข้างมาก แสดงว่าระบบการวัดสามารถประเมินความผันแปรของกระบวนการได้ โดยอัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่วัดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้สามารถจำแนกจำนวนประเภทข้อมูลเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของระบบการวัดในการแยกความแตกต่างของอัตราการสึกหรอของชิ้นงานจากกระบวนการได้ แต่สำหรับกรณีที่ 2 มีค่า $\bar{x}$ อยู่ภายในพิกัดควบคุมทั้งหมด แสดงว่าระบบการวัดไม่สามารถประเมินความผันแปรของกระบวนการได้ โดยอัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่วัดมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ทำให้ไม่สามารถจำแนกจำนวนประเภทข้อมูลเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของระบบการวัดในการแยกความแตกต่างของอัตราการสึกหรอของชิ้นงานจากกระบวนการได้

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะด้านความสามารถในการแยกความแตกต่างของอัตราการสึกหรอ

	ขั้นตอนการทดสอบ	
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
จำนวนประเภทของข้อมูล	5.9	-



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ผลลัพธ์จากการพิจารณาจากแผนภูมิควบคุม $\bar{x}$ ของขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู

ก) กรณีที่ 1 ทำการเปลี่ยนทรายสำหรับการทดสอบทุก ๆ 8 ชั่วโมง

ข) กรณีที่ 2 ไม่ทำการเปลี่ยนทรายสำหรับการทดสอบทุก ๆ 8 ชั่วโมง

จากตารางที่ 4.7 แสดงผลลัพธ์การพิจารณารถสามารถแยกความแตกต่างของข้อมูลที่ทำการวัด จากการจำแนกจำนวนประเภทข้อมูลพบว่า กรณีที่ 1 สามารถจำแนกจำนวนประเภทข้อมูลได้ 5.94 ซึ่ง

มากกว่า 5 หมายความว่า อัตราการสึกหรอของชิ้นงานจากกระบวนการทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มที่แตกต่างกัน 6 กลุ่ม แสดงว่า การทดสอบกรณีที่ 1 มีความสามารถในการแยกความแตกต่างของอัตราการสึกหรอ

จากการพิจารณาแผนภูมิควบคุม $\bar{x}$ และ สามารถแยกความแตกต่างของข้อมูลที่ทำการวัด ส่งผลทำให้กรณีที่ 1 สามารถประเมินผลระบบการวัดต่อความผันแปรของกระบวนการได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 พบว่า ค่า P/TV เท่ากับ 23.45% หมายความว่า ถ้าความผันแปรของกระบวนการมีค่า 100 กรัมต่อชั่วโมงแล้ว จะมีความผันแปรเนื่องจากระบบการวัด 23.45 กรัมต่อชั่วโมง

ดังนั้น กรณีที่ 1 ของขั้นตอนการทดสอบ (การทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูแบบทำการเปลี่ยนทรายทุก ๆ 8 ชั่วโมง) มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูมากกว่ากรณีที่ 2 (การทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูแบบไม่ทำทำการเปลี่ยนทรายทุก ๆ 8 ชั่วโมง) โดยอัตราการสึกหรอที่ได้จากการประเมินค่าความผันแปรของระบบการวัดของกรณีที่ 1 สามารถอธิบายความผันแปรของการทดสอบได้ ข้อมูลจากระบบการวัดดังกล่าวก็สามารถใช้ตรวจจับความผันแปรจากสาเหตุแบบผิดธรรมชาติในการควบคุมกระบวนการ โดยอาศัยสถิติได้

4.5 การตรวจสอบลักษณะของเม็ดทราย

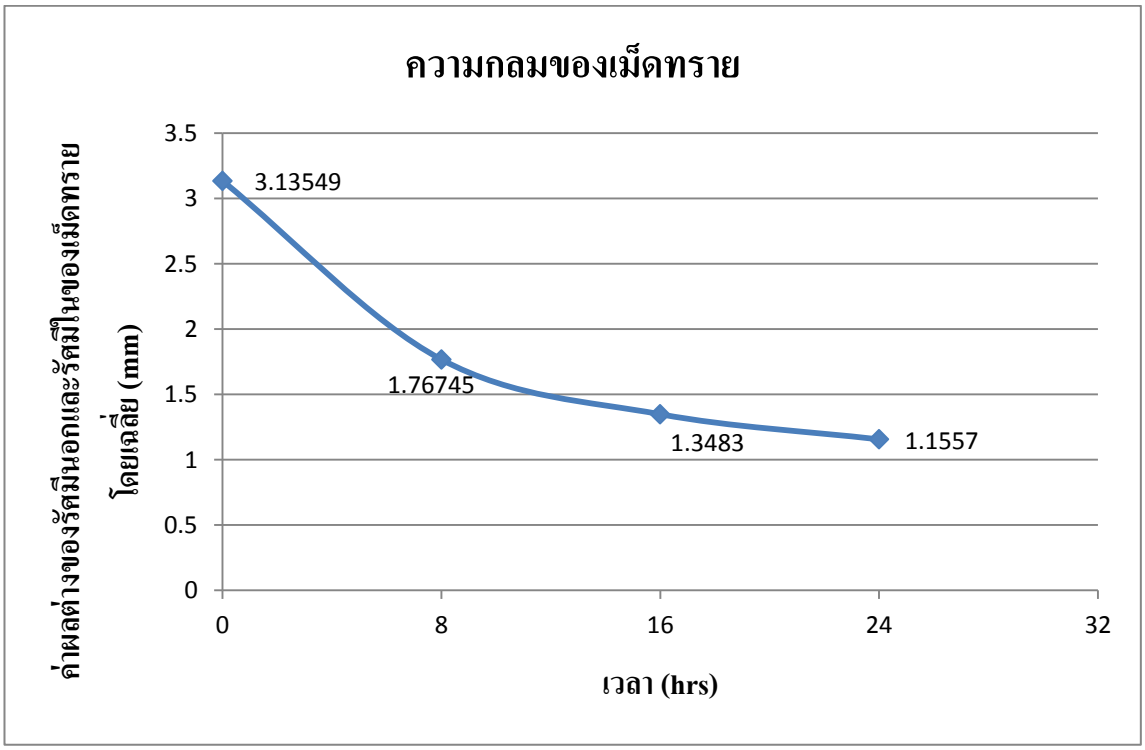
ตรวจสอบลักษณะของเม็ดทราย อาศัยการวัดความกลมมาทำการประยุกต์ใช้ในตรวจสอบลักษณะของเม็ดทราย เพื่อนำข้อมูลความกลมของเม็ดทรายมาทำการวิเคราะห์และนำมาสนับสนุนขั้นตอนการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู โดยการเก็บตัวอย่างของทรายด้วยวิธีการสุ่ม จากนั้นทำการหาค่าผลต่างของรัศมีนอกและรัศมีในของเม็ดทรายแต่ละเม็ดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ “Scentis” จำนวน 30 เม็ด เพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยของผลต่างของรัศมีนอกและรัศมีในของเม็ดทรายแต่ละเวลาการใช้ในการทดสอบ

จากตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 พบว่า ทรายก่อนทำการทดสอบมีความกลมของเม็ดทรายน้อยที่สุด โดยค่าผลต่างของรัศมีนอกและรัศมีในของเม็ดทรายโดยเฉลี่ยของทรายก่อนทำการทดลองมีค่ามากกว่าทรายที่ผ่านการทดสอบ 8, 16 และ 24 ชั่วโมง เนื่องจากทรายที่ผ่านการทดสอบเกิดการขัดถูกับผิวหน้าชิ้นงาน ส่งผลทำให้ค่าผลต่างของรัศมีนอกและรัศมีในของเม็ดทรายโดยเฉลี่ยของทรายที่ผ่านการทดสอบมีค่าลดลง จึงทำให้เม็ดทรายมีลักษณะกลมมากขึ้น โดยค่าความกลมของเม็ดทรายแปรผันตรงกับเวลาของการใช้ทรายสำหรับการทอสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู

สำหรับการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูควรใช้ทรายใหม่ที่ยังไม่ผ่านการทดสอบมาก่อน เนื่องจากยังผ่านไม่การทดสอบการขัดถูกับผิวหน้าชิ้นงานทำให้เม็ดทรายมีค่าความกลมน้อยที่สุด แต่ภายหลังจากการนำไปใช้ทดสอบเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ควรทำการเปลี่ยนทราย เนื่องจากเม็ดทรายที่ผ่านการทดสอบเกิดการขัดถูกับผิวหน้าชิ้นงานทำให้มีค่าความกลมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งความกลมของเม็ดทรายส่งผลโดยตรงต่อสามารถในการทำให้เกิดการสึกหรอที่ผิวหน้าชิ้นงาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงใช้ทรายที่ยังไม่ผ่านการทดสอบและเปลี่ยนทรายทุกๆ 8 ชั่วโมง เพื่อให้ความสามารถในการทำให้เกิดการสึกหรอของทรายคงที่มากที่สุด

ตารางที่ 4.8 ค่าผลต่างของรัศมีนอกและรัศมีในของเม็ดทรายโดยเฉลี่ย

ประเภทของทราย	**ค่าผลต่างของรัศมีนอกและรัศมีในของเม็ดทรายโดยเฉลี่ย (มิลลิเมตร)**	% Relative Accuracy
ทรายก่อนทำการทดลอง	0.10452	2.90
ทรายที่ผ่านการทดสอบ 8 ชั่วโมง	0.05892	1.58
ทรายที่ผ่านการทดสอบ 16 ชั่วโมง	0.04707	1.77
ทรายที่ผ่านการทดสอบ 24 ชั่วโมง	0.04258	1.95



รูปที่ 4.9 ผลการวัดความกลมของเม็ดทรายที่ช่วงเวลาต่าง ๆ

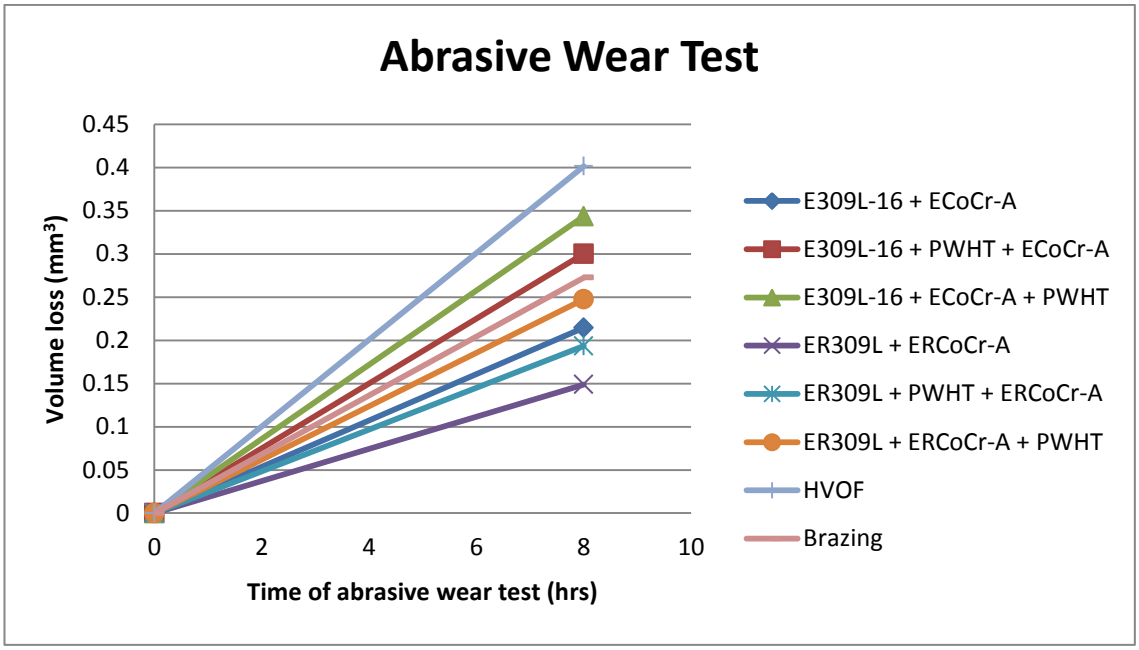
4.6 การทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู

การทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการหาค่าปริมาณการสึกหรอสำหรับการทดสอบการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู โดยคำนวณจากปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานแต่ละชิ้นงานทดสอบ ซึ่งตัวแปรกำหนดในการทดสอบตามที่ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3.13

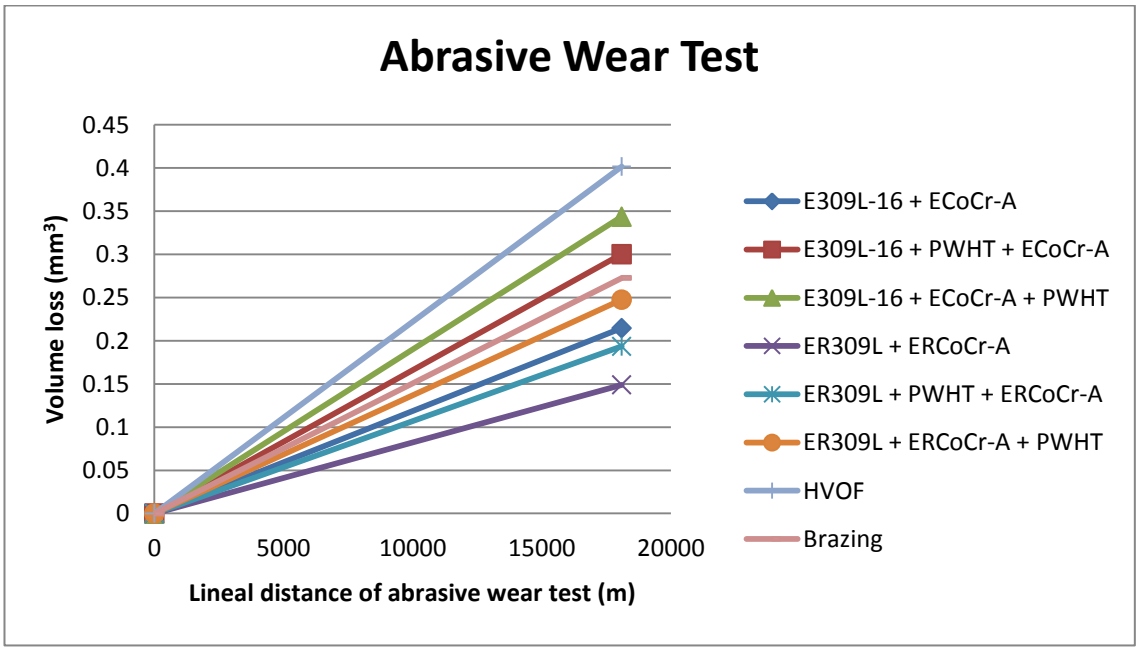
จากตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 พบว่า เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 4 (กระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม) มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูได้ดีที่สุด แต่เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 7 (กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง) มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูได้น้อยที่สุดในงานวิจัยนี้ โดยความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูของผิวหน้าชิ้นงานขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกลและลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่มีความเหมาะสมต่อการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ปริมาตรที่หายไปและอัตราการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู

No.	Volume Loss (mm^3)				Wear Rate (g/hr)			
	1st 8 (hrs)	2nd 8+8 (hrs)	3rd 8+8+8 (hrs)	Average	1st 8 (hrs)	2nd 8+8 (hrs)	3rd 8+8+8 (hrs)	Average
1	0.2054	0.2133	0.2251	0.2146	0.0257	0.0267	0.0281	0.0268
2	0.2962	0.2962	0.3081	0.3002	0.0370	0.0370	0.0385	0.0375
3	0.3555	0.3436	0.3318	0.3436	0.0444	0.043	0.0415	0.0430
4	0.1422	0.1422	0.1619	0.1488	0.0178	0.0178	0.0202	0.0186
5	0.1896	0.2014	0.1896	0.1935	0.0237	0.0252	0.0237	0.0242
6	0.2370	0.2686	0.2370	0.2475	0.0296	0.0336	0.0296	0.0309
7	0.3870	0.4028	0.4147	0.4015	0.0484	0.0504	0.0518	0.0502
8	0.2607	0.2725	0.2844	0.2725	0.0326	0.0341	0.0356	0.0341



(ก)



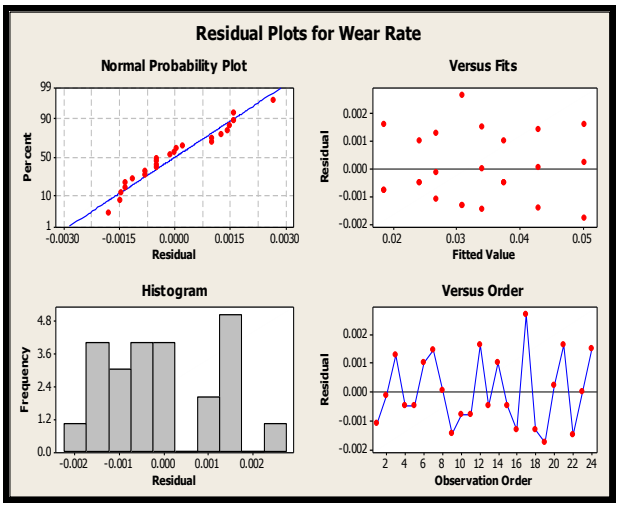
(ข)

รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบความต้านทานการสึกแบบขัดถูที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จ

ก) ปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทดสอบเทียบกับเวลา

ข) ปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทดสอบเทียบกับระยะทาง

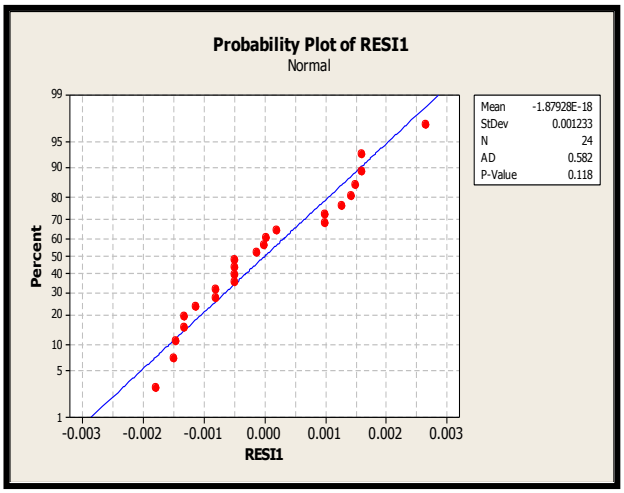
นอกจากนั้น นำเครื่องมือทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์สำหรับการหาเงื่อนไขในการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple Comparison Procedures; MCP) [22, 23] ก่อนทำการวิเคราะห์จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง ซึ่งการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบนั้น รูปแบบของส่วนตกค้าง (Residuals) ที่ได้จากการทดสอบจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระด้วยรวมทั้งค่าความแปรปรวนจะต้องมีค่าคงที่ จึงจะสามารถสรุปได้ว่าผลการทดลองมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า Minitab



รูปที่ 4.11 การทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

จากรูปที่ 4.11 แสดงการทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล พิจารณาโดยวิเคราะห์ผ่านแผนภูมิควบคุม พบว่า ส่วนตกค้างมีลักษณะการกระจายตัวที่ไม่มีรูปแบบแน่นอน ดังนั้นแสดงว่า ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน ไม่มีความลำเอียง

จากรูปที่ 4.12 แสดงการทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลเป็นการพิจารณาว่า ข้อมูลมีลักษณะการกระจายรอบค่าหนึ่งอย่างสมมาตรหรือไม่ โดยวิเคราะห์จากกราฟความเป็นปกติ (Normal Plot of Residuals) พบว่า ข้อมูลมีการเรียงตัวในลักษณะเส้นตรง และค่า P-Value มีค่า 0.118 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 เมื่อเทียบกับค่าวิกฤต ดังนั้นแสดงว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเป็นปกติ



รูปที่ 4.12 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล

ภายหลังจากการตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน จะต้องทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (อัตราการสึกหรอ) กับตัวแปรอิสระ (เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จ) ก่อน โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R Square) เพื่อพิจารณาว่าตัวแปรตามสามารถอธิบายโดยตัวแปรอิสระได้มากน้อยเพียงใด จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว (One-way ANOVA) ที่ได้กำหนดระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ดังแสดงในตารางที่ 4.10 พบว่า สัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าเท่ากับ 98.46% หมายความว่า ผลของตัวแปรตาม (อัตราการสึกหรอ) ที่ได้เป็นผลหรืออิทธิพลจากตัวแปรอิสระ (เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จ) 98.46% ส่วนที่เหลืออีก 1.54% เป็นผลจากตัวแปรหรือปัจจัยอื่นที่ไม่ทราบได้ ดังนั้น ความผันแปรของตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระถึง 98.46% ซึ่งมีค่าสูงพอที่จะนำมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยผลผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียวดังแสดงในตารางที่ 4.10 และภาคผนวก ฉ

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบปัจจัยเดียว

Source	DF	SS	MS	F	P
Process	7	0.0022305	0.0003186	145.83	0.000
Error	16	0.0000350	0.0000022		
Total	23	0.0022655			
S = 0.001478		R-Square = 98.46%		R-Square (adj) = 97.78%	

จากตารางที่ 4.10 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนพบว่า ค่า P-value เท่ากับ 0.000 ซึ่งค่า P-value น้อยกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่า เงื่อนไขของการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่แตกต่างกันมีผลต่ออัตราการสึกหรอที่เกิดขึ้นภายใต้การทดสอบแบบเปลี่ยนทรายทุก ๆ 8 ชั่วโมง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งทำให้ทราบว่า ขั้นตอนและกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่แตกต่างกันส่งผลต่อสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถู ซึ่งจะมีอย่างน้อยหนึ่งคู่ของเงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่มีค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอของชิ้นงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05

ภายหลังการวิเคราะห์ความแปรปรวนทำให้ทราบว่า มีอย่างน้อยหนึ่งคู่ของเงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่มีค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอของชิ้นงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อให้ทราบแน่ชัดจึงต้องทำการทดสอบต่อไปว่าค่าเฉลี่ยคู่ใดบ้างที่แตกต่างกันและแตกต่างกันอย่างไร โดยอาศัยการเปรียบเทียบพหุคูณตามวิธีของการทดสอบของทูกี้ (Tukey's Test) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งของการเปรียบเทียบพหุคูณที่ได้รับความนิยมมาก โดยเปรียบเทียบค่าสมบูรณ์ความแตกต่างค่าเฉลี่ยของทรีเมนต์เป็นรายคู่กับค่า T_{α} ทีละคู่จนครบทุกคู่ เพื่อทำการจัดกลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 4.11 และภาคผนวก ช โดยค่า T_{α} ได้จากสมการที่ 4-3 [23]

$$T_{\alpha} = q_{\alpha}(a,f)\sqrt{\frac{MS_E}{N}} \tag{4-3}$$

เมื่อ T_{α} = ค่าความแตกต่างที่คำนวณโดยวิธีการทดสอบของทูกี้

α = ระดับนัยสำคัญ

q_{α} = Studentized Range Statistic ดังแสดงในภาคผนวก ซ

a = จำนวนทรีเมนต์ในการทดลอง

f = ค่าองศาอิสระ

MS_E = ค่าผิดพลาดเฉลี่ยกำลังสอง

N = จำนวนค่าสังเกตในแต่ละทรีเมนต์

จากตารางที่ 4.11 พบว่า จากค่าเฉลี่ยอัตราการสึกหรอที่แตกต่างกันของแต่ละเงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จทั้งหมด 8 ค่า เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการสึกหรอของแต่ละเงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จทีละคู่จนครบ สามารถจัดกลุ่มได้ทั้งหมด 7 กลุ่ม เรียงจากกลุ่มที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่มากที่สุดไปหาน้อยที่สุด (A-G)

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบพหุคูณตามวิธี Tukey's Test ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95%

No.	Wear Rate (g/hr)	Grouping						
		A	B	C	D	E	F	G
7	0.050200	✓						
3	0.042967		✓					
2	0.037500			✓				
8	0.034100			✓	✓			
6	0.030933				✓	✓		
1	0.026833					✓	✓	
5	0.024200						✓	
4	0.018600							✓
$T_{0.05}$ = 0.004196								

จากผลการแบ่งกลุ่มที่อาศัยการเปรียบเทียบพหุคูณตามวิธีของ Tukey's Test ทำให้สามารถเรียงลำดับความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูของชิ้นงานแต่ละเงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จจากมากที่สุดไปหาน้อยที่สุดประกอบด้วย เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 4, 5, 1, 6, 8, 2, 3 และ 7 ตามลำดับ โดยที่กลุ่ม G เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 4 (กระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม) มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูได้ดีที่สุดหรือมีที่ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอน้อยที่สุด แต่กลุ่ม A เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 7 (กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง) มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูได้น้อยที่สุดหรือมีที่ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอมากที่สุด

เงื่อนไขของการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่อยู่ในกลุ่มเพียงแค่เงื่อนไขเดียว ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการเปรียบเทียบพบว่า มีค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอของชิ้นงานแตกต่างกับทุก ๆ อัตราการสึกหรอของชิ้นงานอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่สำหรับเงื่อนไขของการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่อยู่ร่วมในกลุ่มเดียวกันพบว่า ค่าเฉลี่ยของอัตราการสึกหรอของชิ้นงานที่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ จึงส่งผลทำให้เงื่อนไขของการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันสามารถใช้แทนกันได้ เนื่องจากมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นเงื่อนไขของการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่สามารถอยู่ได้ทั้งสองกลุ่ม ตัวอย่างเช่น เงื่อนไขที่ 8 เมื่อทำการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยวิธีการ Tukey's Test ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของเงื่อนไขที่ 8 กับกลุ่ม C เงื่อนไขที่ 2 และผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของเงื่อนไขที่ 8 กับกลุ่ม D เงื่อนไขที่ 6 พบว่า ผลต่าง

ระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละคู่มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ โดยที่ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละคู่มีค่าน้อยกว่าค่า $T_{0.05}$ ส่งผลให้เงื่อนไขที่ 8 สามารถอยู่ได้ทั้งสองกลุ่ม

4.7 การทดสอบความแข็ง

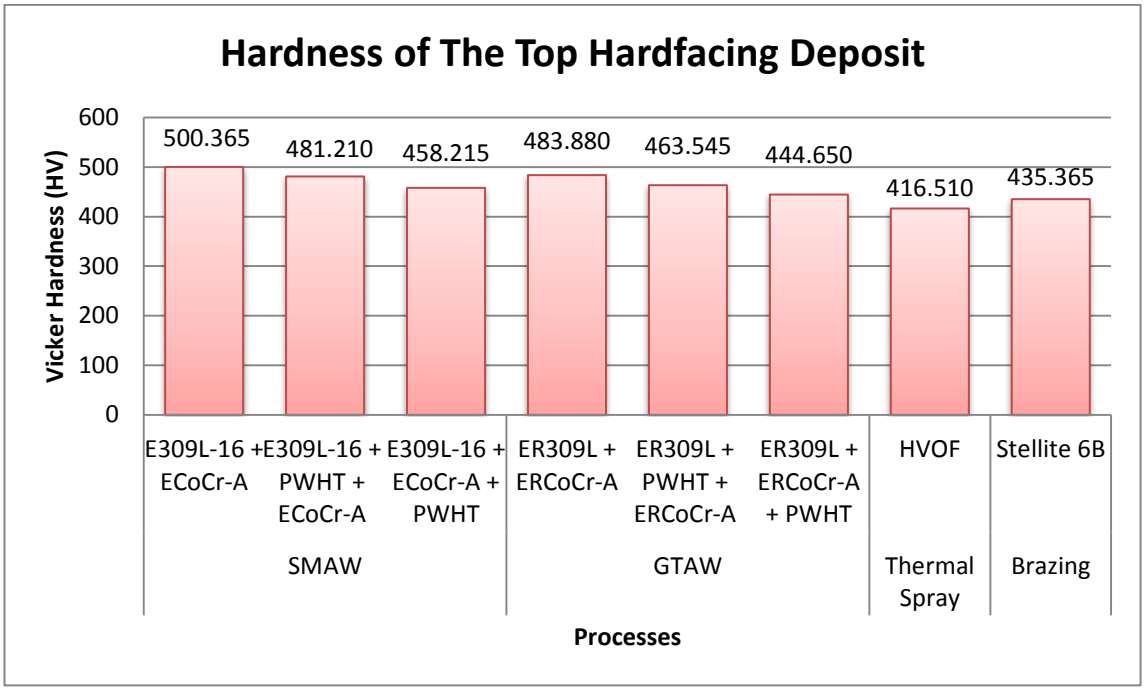
การทดสอบความแข็งของชิ้นงานในงานวิจัยนี้ ทำเพื่อสนับสนุนผลของการทดสอบความต้านทานการสึกหรอกับโครงสร้างทางจุลภาค ซึ่งทำการทดสอบวัดค่าความแข็งบริเวณผิวหน้าด้านบนที่ผ่านกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จ วิธีการทดสอบค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งโดยรวมของชิ้นงานบริเวณผิวหน้าด้านบนที่ผ่านกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จใช้น้ำหนักกด 1 kgf ใช้เวลาในการกด 10 วินาที มีระยะห่างของแต่ละจุดทดสอบห่างกัน 300 ไมครอน ทำการวัด 2 แถว ให้แต่ละแถวห่างกัน 300 ไมครอน เพื่อให้ได้ค่าความแข็งในบริเวณที่สนใจแม่นยำและคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.12 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์และปริมาณของคาร์ไบด์ที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จ

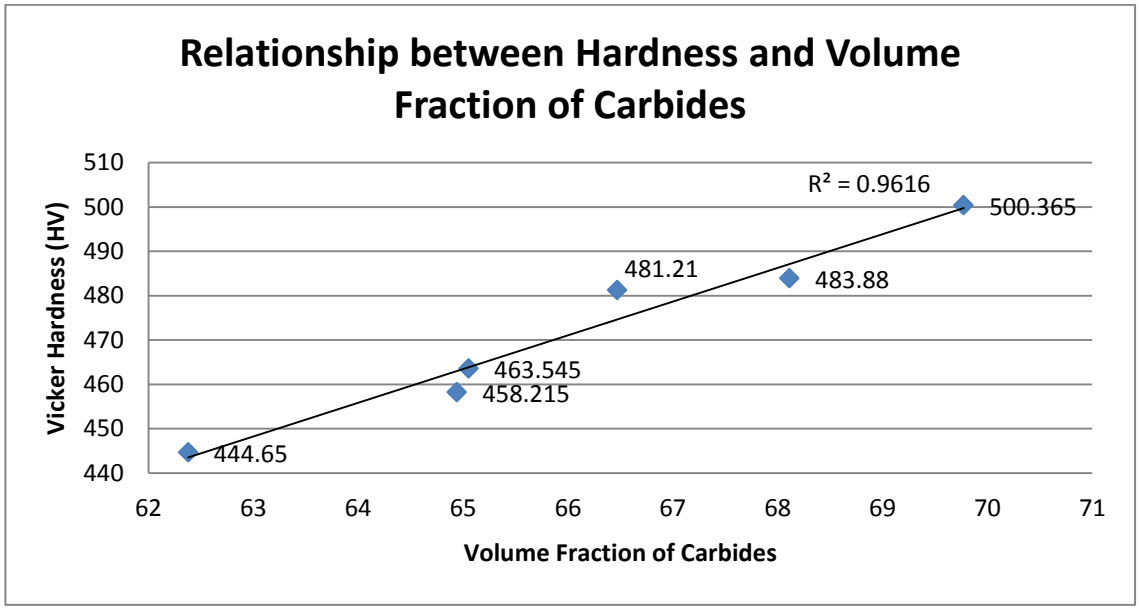
Processes	**Condition**	**Vickers Hardness (HV)**	**Volume Fraction of Carbides (% Area)**	% Relative Accuracy
SMAW	E309L-16 + ECoCr-A	500.365	69.774	1.41
	E309L-16 + PWHT + ECoCr-A	481.210	66.471	1.77
	E309L-16 + ECoCr-A + PWHT	458.215	64.940	1.72
GTAW	ER309L + ERCoCr-A	483.880	68.114	1.38
	ER309L + PWHT + ERCoCr-A	463.545	65.053	1.51
	ER309L + ERCoCr-A + PWHT	444.650	62.378	1.67
Thermal Spray	HVOF	416.510	-	
Brazing	Stellite 6 Plate	435.365	-	

ตารางที่ 4.12 และ จากรูปที่ 4.13 พบว่า การสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าความแข็งโดยรวมที่บริเวณผิวหน้าด้านบนสูงสุด ภายหลังจากการวัดปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์ที่ผิวหน้าของการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า “Scentis” โดยทำการสุ่มบริเวณผิวหน้าของการสร้างผิวแข็งสำเร็จจำนวน 5 บริเวณ ทำให้ทราบว่า ปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์

ส่งผลต่อค่าความแข็งโดยรวมของผิวหน้าชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จ โดยปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์แปรผันโดยตรงกับค่าความแข็งดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบความแข็งโดยรวมบริเวณผิวหน้าด้านบนของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จ



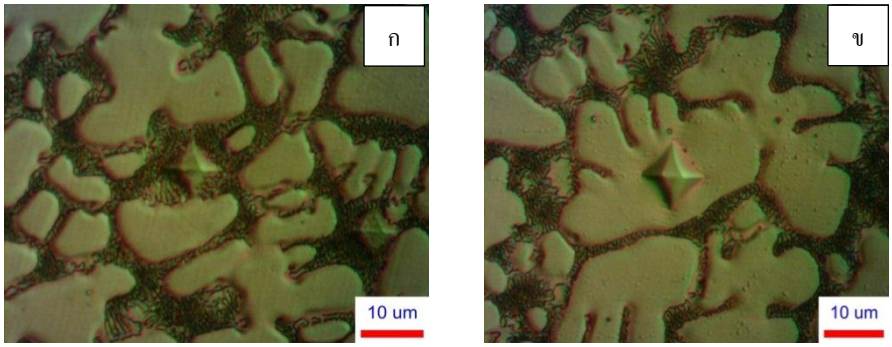
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับปริมาณของคาร์ไบด์

โดยโครงสร้างทางจุลภาคที่มีปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์จำนวนมากจะส่งผลให้ค่าความแข็งโดยรวมของชิ้นงานบริเวณผิวหน้าด้านบนที่วัดได้มีค่าสูง เช่น โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมระหว่างกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์กับกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุมพบว่า โครงสร้างของคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์จะมีปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์มากกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุมดังแสดงในตารางที่ 4.12 และจากรูปที่ 4.13 ส่งผลให้ค่าความแข็งของกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์สูงกว่า ในทางตรงกันข้ามกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ (เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 1) มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูน้อยกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุม (เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 4) ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 เนื่องจากเมื่อทำการทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าภายหลังการสร้างผิวแข็งสำเร็จ โดยใช้น้ำหนักกด 25 gf ใช้เวลาในการกด 10 วินาที ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.15 พบว่า คาร์ไบด์ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมมีค่าความแข็งมากกว่าคาร์ไบด์ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ส่งผลทำให้คาร์ไบด์ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุมมีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอมากที่สุดในงานวิจัยนี้

นอกจากนั้น เมื่อทำการเปรียบเทียบหว่างกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมพบว่า กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์น้อยกว่าที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการให้ให้ความร้อนหลังการเชื่อมส่งผลต่อปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์ โดยทำให้ปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์ลดลง จึงทำให้ค่าความแข็งโดยรวมของกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีค่าลดลง ดังแสดงดังตารางที่ 4.12 และเมื่อทำการทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ในการทดสอบเพื่อหาค่าความแข็งของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าภายหลังการสร้างผิวแข็งสำเร็จ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่า ค่าความแข็งของคาร์ไบด์ลดลงภายหลังจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ทำให้ทราบว่าการให้ความร้อนหลังการเชื่อมส่งผลทำให้ปริมาณและค่าความแข็งของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าภายหลังการสร้างผิวแข็งสำเร็จลดลง

ซึ่งผลจากการทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์เพื่อหาค่าความแข็งของคาร์ไบด์และโครงสร้างเนื้อพื้น ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.16 สอดคล้องกับผลของการทดสอบความสามารถในการต้านทานการสึกหรอดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.5 ทำให้ทราบว่า คาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้า

ภายหลังการสร้างผิวแข็งสำเร็จส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูของชิ้นงาน โดยที่ค่าความแข็งของคาร์ไบด์แปรผกผันกับอัตราการสึกหรอ ดังแสดงในรูปที่ 4.17



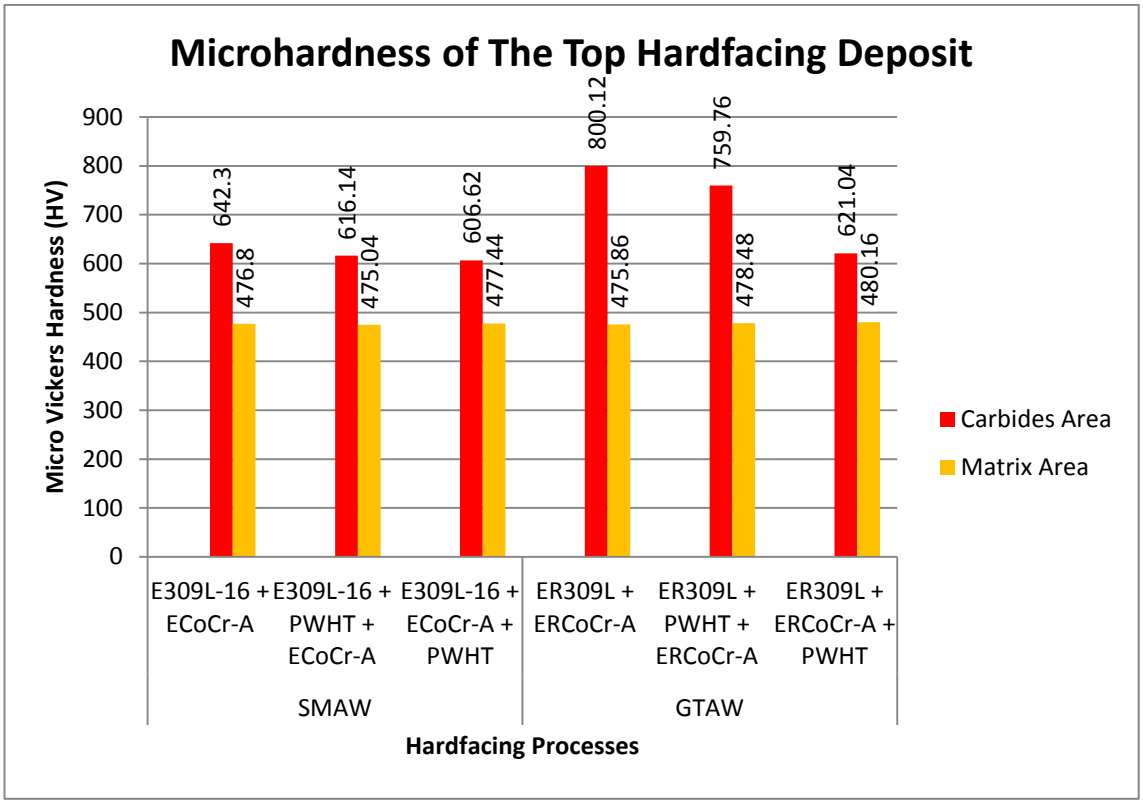
รูปที่ 4.15 ภาพการทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ที่บริเวณผิวหน้าภายหลังการสร้างผิวแข็งสำเร็จ

ก) ทดสอบค่าความแข็งของโครงสร้างคาร์ไบด์ที่

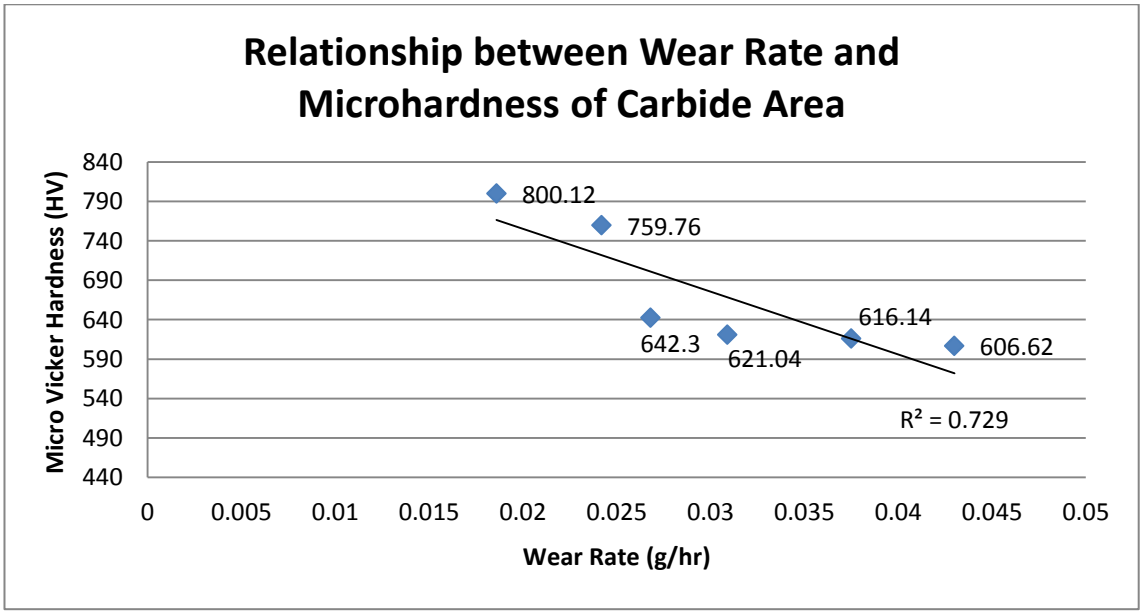
ข) ทดสอบค่าความแข็งของโครงสร้างเนื้อพื้น

ตารางที่ 4.13 ค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ของคาร์ไบด์และโครงสร้างเนื้อพื้นบริเวณผิวหน้าด้านบนของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จ

Processes	**Condition**	**Micro Vickers Hardness**	
		Carbides Area	**Matrix Area**
SMAW	E309L-16 + ECoCr-A	642.30	476.80
	E309L-16 + PWHT + ECoCr-A	616.14	475.04
	E309L-16 + ECoCr-A + PWHT	606.62	477.44
GTAW	ER309L + ERCoCr-A	800.12	475.86
	ER309L + PWHT + ERCoCr-A	759.76	478.48
	ER309L + ERCoCr-A + PWHT	621.04	480.16



รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบค่าความแข็งแบบไมโครวิกเกอร์ของคาร์ไบด์และโครงสร้างเนื้อพื้นบริเวณผิวหน้าด้านบนของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับค่าความแข็งของคาร์ไบด์

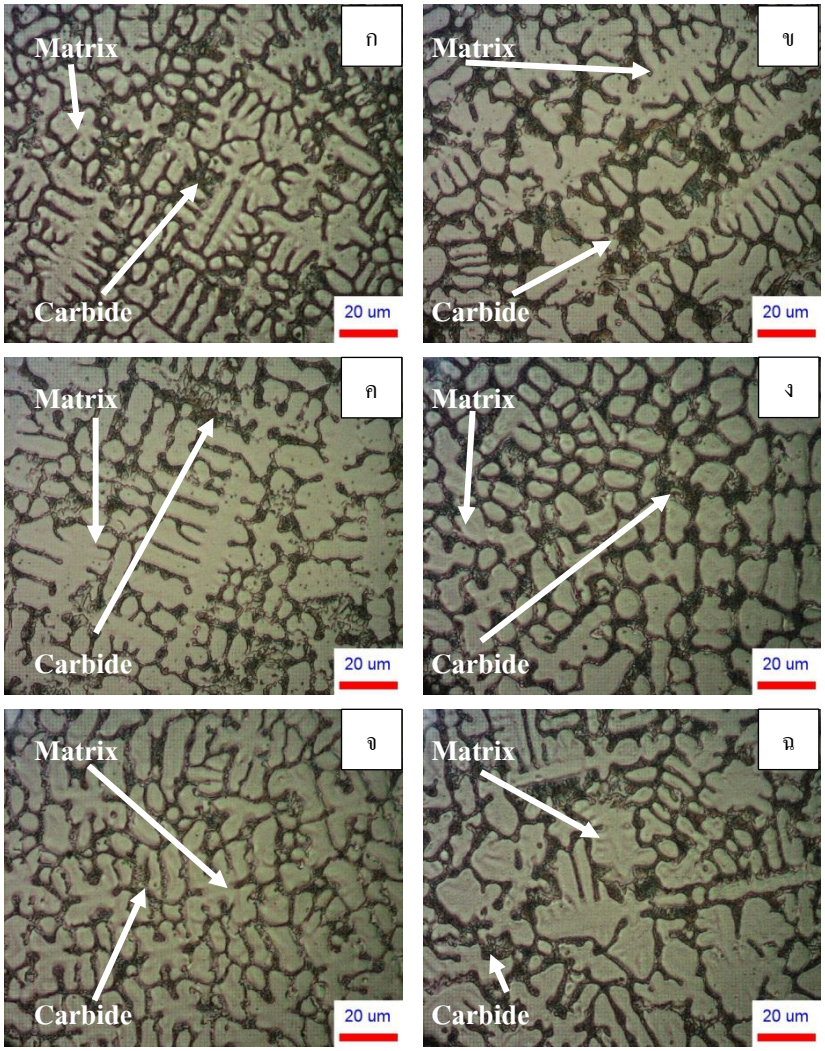
สำหรับกระบวนการการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงมีค่าความแข็งน้อยที่สุด เนื่องจากตัวแปรกำหนดในการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงไม่มีความเหมาะสม ส่งผลทำให้ลักษณะของชั้นผิวเคลือบเกิดการหลอมเพื่อยึดเกาะแบบทางกลไม่สมบรูณ์และมีรูพรุนที่บริเวณของชั้นผิวเคลือบเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทำให้ผิวหน้ามีความสามารถในการรับแรงกดได้น้อยกว่ากระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จอื่น ๆ

4.8 การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค

การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของงานวิจัยนี้ สามารถแบ่งออกได้แบ่ง 3 หัวข้อหลัก ๆ คือ 1) การวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง 2) การการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการแล่นประสาน และ 3) การการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง

4.8.1 โครงสร้างทางจุลภาคของการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

จากรูปที่ 4.18 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งที่แตกต่างกัน รวมทั้งผลกระทบของลำดับขั้นตอนการให้ความร้อนหลังการเชื่อมที่แตกต่างกันพบว่า ภาพโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงในทุกรูปแบบของกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จเพิ่มความต้านทานการสึกหรอที่ผิวจะมีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วยเครือข่ายของคาร์ไบด์ (Network of Carbides) โดยมีโครงสร้างพื้นเป็นสารละลายของแข็งของโคบอลต์ โครเมียม และทังสเตน [7, 23] ซึ่งลักษณะของโครงสร้างคาร์ไบด์และโครงสร้างพื้นจะมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกระบวนการและลำดับขั้นตอนการสร้างผิวแข็งสำเร็จ นอกจากนั้นปริมาณและค่าความแข็งของคาร์ไบด์ที่ปรากฏนั้นก็ไม่เท่ากันแสดงดังตารางที่ 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการที่ใช้ในการสร้างผิวแข็งสำเร็จและลำดับขั้นตอนการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ต่างกันมีผลต่อลักษณะและปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูที่บริเวณผิวหน้าชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.18 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเชื่อมของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

ก) กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ โดยไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

ข) กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ โดยมีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นรองพื้น

ค) กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ โดยมีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้า

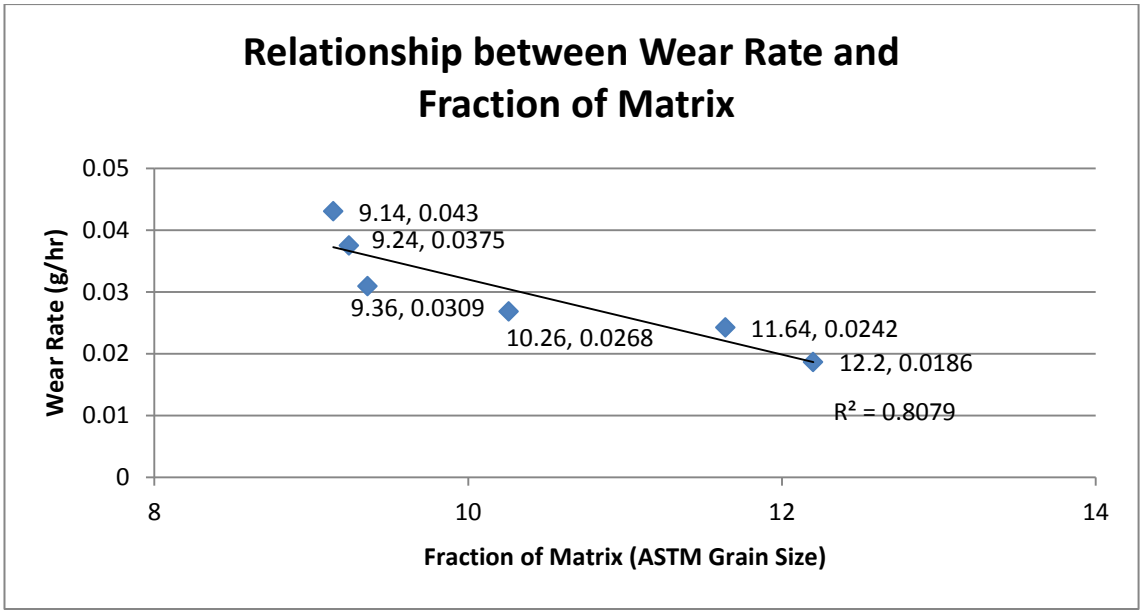
ง) กระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม โดยไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

จ) กระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม โดยมีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นรองพื้น

ฉ) กระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม โดยมีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้า

ตารางที่ 4.14 ความละเอียดของโครงสร้างพื้น

Processes	**Condition**	**Fraction of Matrix (ASTM Grain Size)**	% Relative Accuracy
SMAW	E309L-16 + ECoCr-A	10.26	3.35
	E309L-16 + PWHT + ECoCr-A	9.24	4.34
	E309L-16 + ECoCr-A + PWHT	9.14	5.82
GTAW	ER309L + ERCoCr-A	12.2	5.08
	ER309L + PWHT + ERCoCr-A	11.64	6.36
	ER309L + ERCoCr-A + PWHT	9.36	5.78



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสึกหรอกับความละเอียดของโครงสร้างพื้น

จากตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.19 แสดงถึง ความละเอียดของโครงสร้างพื้นของแต่ละเงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยการวัดความละเอียดของโครงสร้างพื้นอาศัยการประยุกต์ใช้โปรแกรม Scentis สำหรับการวัดขนาดเกรนมาทำการวัดความละเอียดของโครงสร้างพื้น ซึ่งบอกความละเอียดของโครงสร้างพื้นเป็น ASTM Grain Size ซึ่งงานวิจัยนี้ทำการวัดที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของการสร้างผิวแข็งสำเร็จ โดยทำการสุ่มบริเวณผิวหน้าของการสร้างผิวแข็งสำเร็จจำนวน 5 บริเวณ สำหรับกรณีที่ความละเอียดของโครงสร้างพื้นต่ำ (ASTM Grain Size จะมีค่าน้อย) แสดงว่า ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเชื่อมมีการกระจายตัวของโครงสร้างคาร์ไบด์จำนวนน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าความละเอียดของโครงสร้างพื้นสูง (ASTM Grain Size จะมีค่ามาก) แสดง

ว่า ลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเชื่อมมีการกระจายตัวของโครงสร้างคาร์ไบด์จำนวนมาก ดังนั้น ผลจากการวัดความละเอียดของโครงสร้างพื้นของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งพบว่า ความละเอียดของโครงสร้างพื้นของชิ้นงานแต่ละเงื่อนไขมีความสอดคล้องกับภาพโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเชื่อมของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.18 โดยที่กระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีการกระจายตัวของโครงสร้างคาร์ไบด์มากที่สุด

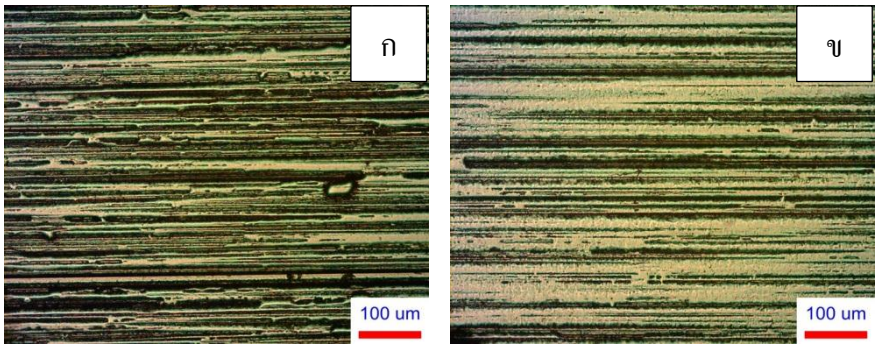
เมื่อเปรียบเทียบผลการขนาดของโครงสร้างพื้นดังแสดงในตารางที่ 4.18 กับปริมาตรที่หายไปและอัตราการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 พบว่า ขนาดของโครงสร้างพื้นขนาดใหญ่มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอน้อยกว่าโครงสร้างพื้นขนาดเล็ก เนื่องจากมีการกระจายตัวของโครงสร้างคาร์ไบด์น้อยกว่าโครงสร้างพื้นขนาดเล็ก โดยโครงสร้างคาร์ไบด์ที่แพร่กระจายช่วยต้านทานและกีดขวางอนุภาคขัดถูที่ทำให้เกิดการสึกหรอ ดังนั้น การกระจายตัวของโครงสร้างคาร์ไบด์ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูที่บริเวณผิวหน้าชิ้นงาน โดยการกระจายตัวของโครงสร้างคาร์ไบด์แปรผันตรงกับความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูที่บริเวณผิวหน้าชิ้นงาน

เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์กับกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมโดยไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.18(ก) และ 4.18(ง) ตามลำดับ พบว่าโครงสร้างของคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์มีปริมาณมากกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุมและค่าความแข็งโดยรวมของกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์มีค่าสูงว่าทุก ๆ เงื่อนไขในงานวิจัยนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เนื่องจากกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์มีการให้ความร้อนเข้าสู่ชิ้นงานที่สูงกว่า ส่งผลทำให้มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่ากระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุม จึงทำให้คาร์ไบด์มีเวลาที่จับตัวกันได้มากขึ้น การกระจายตัวของโครงสร้างคาร์ไบด์จึงลดลง ซึ่งทำให้กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีปริมาณของโครงสร้างคาร์ไบด์มากที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4.12 จึงส่งผลทำให้มีค่าความแข็งโดยรวมของชิ้นงานบริเวณผิวหน้าด้านบนสูง จากผลที่ได้นี้ทำให้ทราบว่า ผลกระทบของอัตราการเย็นตัวส่งผลต่อปริมาณและการกระจายตัวของคาร์ไบด์ ในทางตรงกันข้ามกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์มีความสามรถในการต้านทานการสึกหรอน้อยกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม เนื่องจากโครงสร้างคาร์ไบด์ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุมมีค่าความแข็งมากกว่าคาร์ไบด์ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และมีการกระจายตัวของเครือข่ายของคาร์ไบด์มากกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ เมื่อเกิดการขัดถูทำให้มีโครงสร้างคาร์ไบด์ที่สามารถต้านทานการสึกหรอมากว่า จึงส่งผลให้กระบวนการ

เชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์เกิดการสึกหรอได้มากกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม ซึ่งสอดคล้องกับผลของการวัดความหยาบของผิวที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.20 พบว่า กระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุมมีค่าความหยาบ (Roughness Value; R_a) น้อยว่ากระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์

ตารางที่ 4.15 ความหยาบของพื้นผิวที่บริเวณผิวหน้าของชิ้นงานภายหลังการทดสอบ

Process	Condition	Roughness Value (μm)
SMAW	E309L-16 + ECoCr-A	0.7304
GTAW	ER309L + ERCoCr-A	0.2137



รูปที่ 4.20 ลักษณะการสึกหรอของเนื้อเชื่อมภายหลังการทดสอบที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จ

ก) กระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

ข) กระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

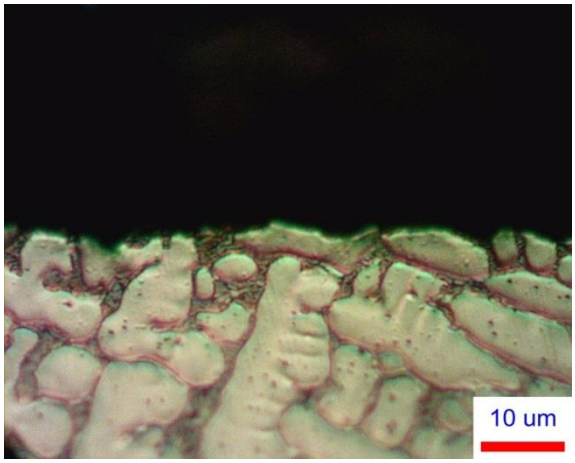
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์คทังสเตนแก๊สคลุมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมกับมีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.18(ง) และ 4.18(ฉ) ตามลำดับ พบว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้าจะส่งผลทำให้ปริมาณและความแข็งของโครงสร้างคาร์ไบด์ลดลง เนื่องจากโครงสร้างพื้นมีการขยายตัวภายหลังการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและในระหว่างการให้ความร้อนหลังการเชื่อมจะส่งผลทำให้เกิดการสลายตัวของคาร์ไบด์เข้าสู่โครงสร้างพื้น [25] ส่งผลทำให้มีค่าความแข็งของคาร์ไบด์น้อยกว่ากระบวนการที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมดังแสดงในรูปที่ 4.11 นอกจากนั้นการให้ความร้อนหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้ายังพบว่า มีการตกผลึกของสารประกอบของแข็งที่มีขนาดเล็กอยู่บริเวณใกล้กับเครือข่ายของคาร์ไบด์ปฐมภูมิ [24, 25] ซึ่งกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.8 โดยผลการทดสอบการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูพบว่า การให้

ความร้อนหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้ามีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูน้อยกว่าการที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 เนื่องจากความแข็งของโครงสร้างคาร์ไบด์ลดลงจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและมีการกระจายตัวของเครือข่ายคาร์ไบด์มีปริมาณลดลงเช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.13 และ 4.14 ตามลำดับ จึงส่งผลทำให้บริเวณในการต้านทานการสึกหรอมีน้อยกว่าเดิมทำให้ความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูลดลง

นอกจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมทั้ง 3 เงื่อนไข ได้แก่ 1. ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม 2. มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นรองพื้น และ 3. มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นรองพื้น ดังแสดงในรูป 4.18(ง), 4.18(จ) และ 4.18(ฉ) ตามลำดับพบว่า ลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเชื่อมทั้งไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมและมีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นรองพื้นมีความแตกต่างจากการให้ความร้อนหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้าอย่างชัดเจน โดยขนาดของโครงสร้างพื้นของเงื่อนไขที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอมีขนาดใหญ่ที่สุด เนื่องจากโครงสร้างพื้นมีการขยายตัวภายหลังการให้ความร้อนหลังการเชื่อม แต่ลักษณะทางโครงสร้างทางจุลภาคของเนื้อเชื่อมทั้งไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมกับมีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นรองพื้นจะมีความแตกต่างกันน้อยมาก เมื่อทำการการวัดปริมาณ Volume Fraction ของโครงสร้างคาร์ไบด์ที่ผิวหน้าของการสร้างผิวแข็งสำเร็จและวัดขนาดของโครงสร้างพื้นดังแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.14 ตามลำดับพบว่า โครงสร้างทางจุลภาคของการให้ความร้อนหลังการเชื่อมชั้นรองพื้นจะมีลักษณะการกระจายตัวและปริมาณของเครือข่ายของคาร์ไบด์น้อยกว่าการที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม แต่จะมีลักษณะการกระจายตัวและปริมาณของเครือข่ายของคาร์ไบด์มากกว่าโครงสร้างคาร์ไบด์ของการเชื่อมที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมอย่างชัดเจน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลำดับของการให้ความร้อนภายหลังการเชื่อมมีผลต่อโครงสร้างทางจุลภาค ทำให้ส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10

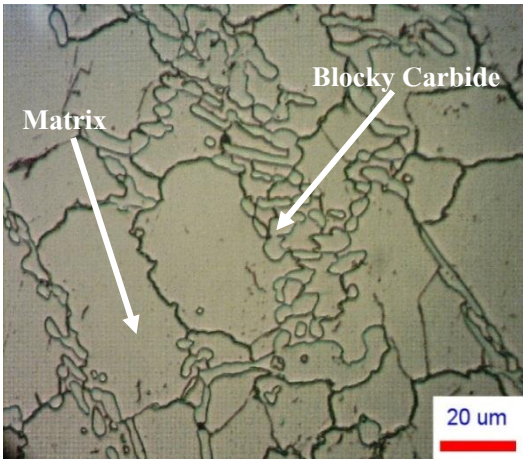
การสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุม โดยไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมจะมีลักษณะลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ประกอบด้วย เครือข่ายของคาร์ไบด์ (Network of Carbides) ดังแสดงรูปที่ 4.18(ง) ทำให้มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดี นอกจากนั้นผลของการทดสอบการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูพบว่า ลักษณะของการกระจายตัวและความแข็งของคาร์ไบด์ของกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 4) มีความสามารถในการต่อการต้านทานการเกิดการสึกหรอแบบขัดถูมากที่สุดในงานวิจัยเล่มนี้ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 โดยลักษณะการสึกหรอของทุก ๆ

การสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งเกิดจากการแตกหักของคาร์ไบด์และการเจาะของเม็ดทรายที่บริเวณโครงสร้างพื้นดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ลักษณะการสึกหรอภายหลังการทดสอบที่บริเวณผิวหน้าด้านข้างของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง

4.8.2 โครงสร้างทางจุลภาคของการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการแล่นประสาน



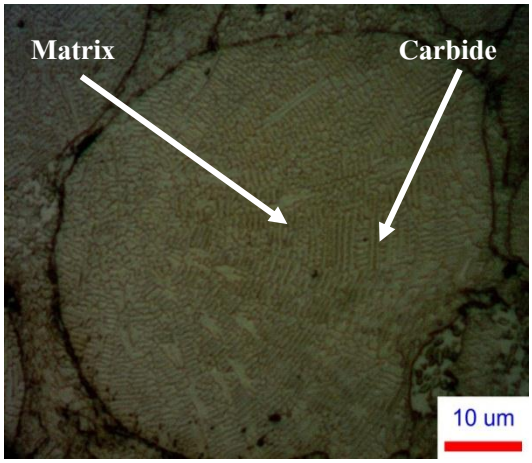
รูปที่ 4.22 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น Stellite 6 ที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการแล่นประสาน

จากรูปที่ 4.22 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคของแผ่น Stellite 6 ที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการแล่นประสานพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงของแผ่น Stellite 6 มีโครงสร้างจุลภาคประกอบด้วย คาร์ไบด์ที่มีลักษณะ Blocky Carbide โดยมีโครงสร้างพื้น

เป็นสารละลายของแข็งของโคบอลต์ โครเมียม และทังสเตน [6] ซึ่งคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะที่แตกต่างจากคาร์ไบด์ที่พบในกระบวนการกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็ง โดยที่คาร์ไบด์ที่เกิดจากกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งจะมีลักษณะเป็นเครือข่ายของคาร์ไบด์ แต่ที่มาของการผลิตแผ่น Stellite 6 ต้องผ่านกระบวนการหล่อ (Casting) แล้วนำมาทำให้เป็นแผ่นบาง ๆ จึงส่งผลต่อรูปร่างและลักษณะของคาร์ไบด์ ทำให้คาร์ไบด์มีลักษณะ Blocky Carbide และมีขนาดเล็กอยู่ตามบริเวณขอบเกรน

เมื่อนำผลการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูของกระบวนการแล่นประสานเปรียบเทียบกับกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 พบว่า กระบวนการแล่นประสาน (เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 8) มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูน้อยกว่ากระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม (เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 1) แต่มีความสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่าที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้า (เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 3) เนื่องจากลักษณะของโครงสร้างคาร์ไบด์มีความแตกต่างกัน โดยคาร์ไบด์ของกระบวนการแล่นประสานมีลักษณะ Blocky Carbide ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งแตกต่างจากคาร์ไบด์ที่พบในกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ซึ่งมีลักษณะเป็นเครือข่ายของคาร์ไบด์ดังแสดงในรูปที่ 4.18 จึงส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการสึกหรอ โดยกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อมมีลักษณะเครือข่ายของคาร์ไบด์ในลักษณะการกระจายและปริมาณที่ส่งผลต่อสามารถต้านทานการสึกหรอมากกว่าคาร์ไบด์ที่มีลักษณะ Blocky Carbide แต่กรณีที่มีการให้ความร้อนหลังภายหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้าส่งผลทำให้ลักษณะเครือข่ายของคาร์ไบด์ในลักษณะการกระจายและปริมาณลดลงทำให้คาร์ไบด์ที่มีลักษณะ Blocky Carbide มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอได้ดีกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณ Volume Fraction ของโครงสร้างคาร์ไบด์ที่ผิวหน้าของการสร้างผิวแข็งสำเร็จ และวัดขนาดของโครงสร้างพื้นดังแสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.14 ตามลำดับ พบว่าการเชื่อมที่มีให้ความร้อนหลังการเชื่อมภายหลังการเชื่อมชั้นต้านทานการสึกหรอที่ผิวหน้ามีการกระจายตัวและปริมาณของคาร์ไบด์น้อยกว่าการเชื่อมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ผลจากการเปรียบเทียบทำให้ทราบว่าลักษณะรูปร่างของคาร์ไบด์มีผลต่อการต้านทานการสึกหรอแต่ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายและปริมาณของคาร์ไบด์ว่าเพียงพอต่อการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูมากน้อยเพียงใด

4.8.3 โครงสร้างทางจุลภาคของการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง

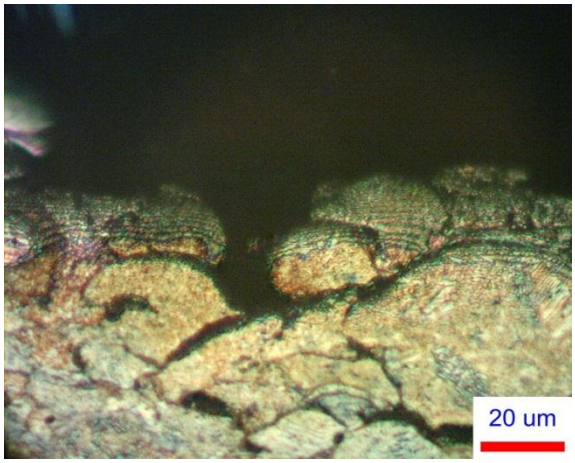


รูปที่ 4.23 ภาพโครงสร้างทางจุลภาคที่ผิวด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง

จากรูปที่ 4.23 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ผิวด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงพบว่า โครงสร้างจุลภาคที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่ผิวด้านบนของชิ้นงานจะลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่ใช้ในการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง ซึ่งในแต่อนุภาคจะมีลักษณะโครงสร้างทางจุลภาคที่ประกอบด้วย เครือข่ายของคาร์ไบด์ (Network of Carbides) โดยมีโครงสร้างพื้นเป็นสารละลายของแข็งของโคบอลต์ โครเมียม และทังสเตน ทั้งนี้อนุภาคที่ถูกใช้ในการสร้างผิวแข็งสำเร็จมีลักษณะเป็นชั้น ๆ โดยยึดเกาะทางกล สำหรับการยึดเกาะทางเคมีและการแพร่ของอะตอมเกิดขึ้นน้อยมาก ทำให้ผิวด้านบนของชิ้นงานพบเห็นในลักษณะที่เป็นการกระจายตัวของอนุภาค

จากรูปที่ 4.24 แสดงลักษณะการสึกหรอภายหลังการทดสอบที่บริเวณผิวหน้าด้านข้างของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงภายหลังการทดสอบพบว่า การสึกหรอของกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงเกิดจากการหลุดออกของอนุภาคที่อาศัยการยึดเกาะทางกลส่งผลทำให้ปริมาณที่หายไปและอัตราการสึกหรอของชิ้นงานสูงกว่าการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการอื่น ๆ เนื่องจากลักษณะของการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคกับหน้าชิ้นงานเกิดจากการยึดเกาะทางกลใช้ตัวแปรกำหนดในการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงไม่มีความเหมาะสม ส่งผลทำให้ลักษณะของชั้นผิวเคลือบเกิดการหลอมเพื่อยึดเกาะแบบทางกลไม่สมบูรณ์และมีรูพรุนที่บริเวณของชั้นผิวเคลือบเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ทำ

ให้ผิวหน้ามีความสามารถในการต้านทานแรงเฉือนที่เกิดจากอนุภาคขัดถูได้น้อย ดังนั้น เมื่อเกิดการเสียดสีกับเม็ดทรายที่มีลักษณะความกลมน้อย ส่งผลให้มีโอกาสเกิดการหลุดออกของอนุภาคยึดเกาะทางกลได้ง่ายขึ้น ทำให้ปริมาณที่หายไปและอัตราการสึกหรอของชิ้นงานสูงกว่าการเกิดจากการแตกหักของคาร์ไบด์และการเจาะของเม็ดทรายที่บริเวณโครงสร้างพื้นที่เกิดกับการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมพอกผิวแข็งที่จะเกิดการหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันในระหว่างการเชื่อมพอกผิวแข็งดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูดังแสดงในตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 กระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง (เงื่อนไขการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่ 7) มีความสามารถในการต้านทานการสึกหรอแบบขัดถูต่ำที่สุดในงานวิจัยนี้



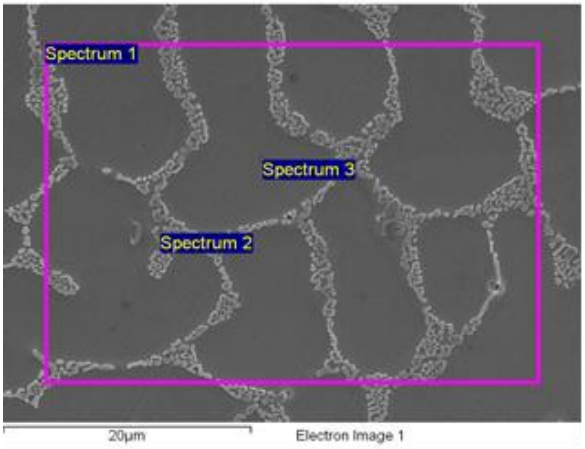
รูปที่ 4.24 ลักษณะการสึกหรอภายหลังการทดสอบที่บริเวณผิวหน้าด้านข้างของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูงภายหลังการทดสอบ

4.9 การวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาค

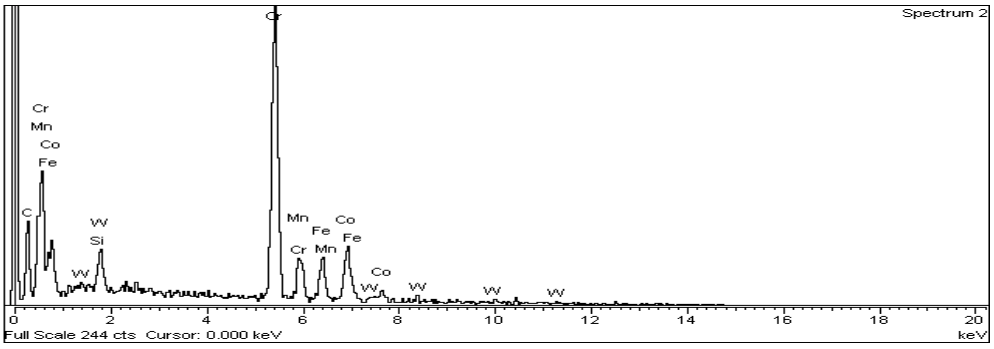
สำหรับการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคจะนำชิ้นงานที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคมาทำการวิเคราะห์ปริมาณของธาตุผสมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด ด้วยเทคนิคแบบจุดดูการกระจายตัวของธาตุผสม เพื่อดูปริมาณของธาตุในเฉพาะบริเวณที่สนใจ สำหรับงานวิจัยนี้ต้องการทราบถึงปริมาณของธาตุที่โครงสร้างคาร์ไบด์ ดังแสดงในภาคผนวก ฌ

ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคบริเวณของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจากการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.25 พบว่า ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคที่ Spectrum 2 คาร์ไบด์ที่มีการ

แพร่กระจายอยู่เป็นคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ (Co) และ โครเมียม (Cr) เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.16



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.25 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

ก) แสดงภาพโครงสร้างจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ข) แสดงการวิเคราะห์ธาตุผสมด้วยเทคนิคแบบจุดดูการกระจายตัวของธาตุผสมของคาร์ไบด์

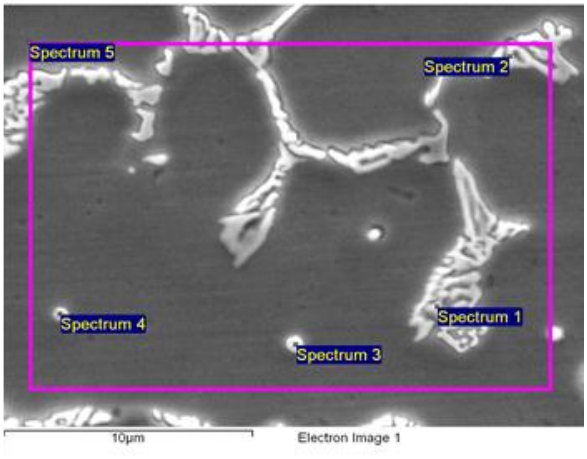
ตารางที่ 4.16 ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคของคาร์ไบด์ที่เกิดจากการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กทังสเตนแก๊สคลุมที่ไม่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

Element	Weight%
C	12.52
Si	0.64
Cr	52.11
Mn	1.07
Fe	11.56
Co	18.14
W	3.96

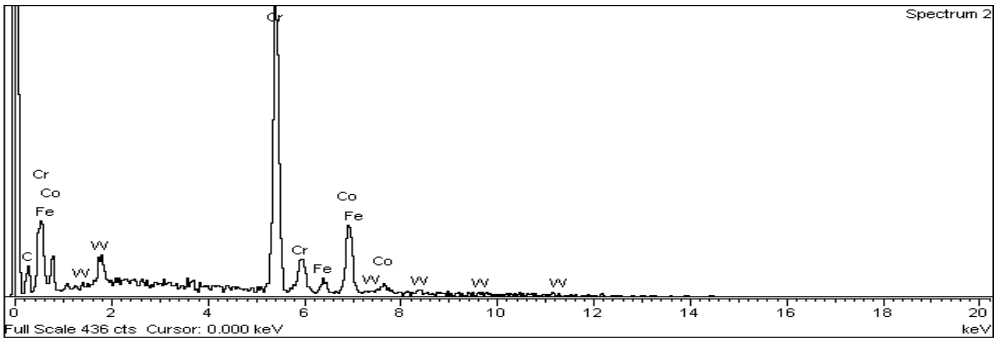
ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคบริเวณของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจากการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่า ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคที่ Spectrum 2 คาร์ไบด์ปฐมภูมิที่มีการแพร่กระจายอยู่เป็นคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ (Co) และ โครเมียม (Cr) เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.16 นอกจากนั้นยังพบว่า การให้ความร้อนหลังการเชื่อมจะส่งผลทำให้เกิดการตกผลึกของโครเมียมคาร์ไบด์ทุติยภูมิชนิด $M_{23}C_6$ ในบริเวณโครงสร้างพื้นซึ่งมีการกระจายตัวเป็นเม็ดเล็ก ๆ ใกล้กับเครือข่ายของคาร์ไบด์ปฐมภูมิ [6, 24, 25] ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคที่ Spectrum 3 คาร์ไบด์ทุติยภูมิที่ตกผลึกอยู่เป็นคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ (Co) และ โครเมียม (Cr) เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคของคาร์ไบด์ที่เกิดจากการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

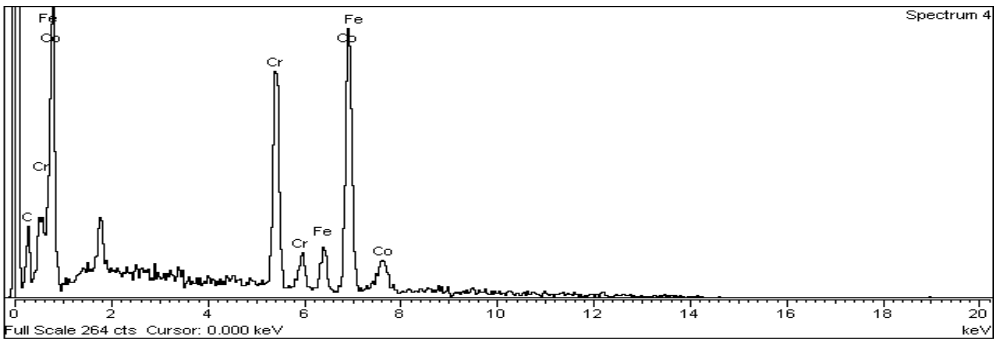
Element	Weight%	
	Spectrum 2	Spectrum 3
C	6.91	8.76
Cr	55.02	23.83
Fe	4.55	7.57
Co	29.58	59.83
W	0.96	-



(ก)



(ข)



(ค)

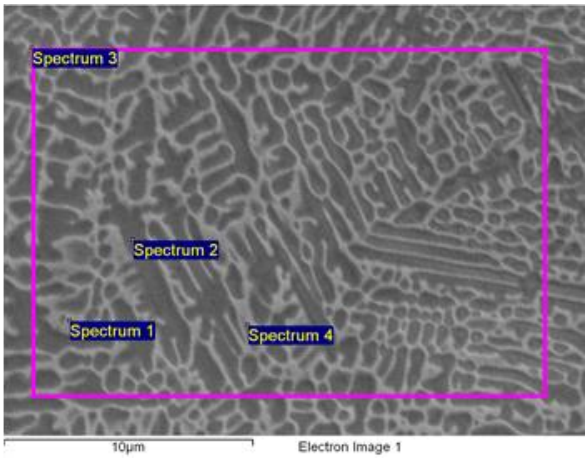
รูปที่ 4.26 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการเชื่อมอาร์กลวดหุ้มฟลักซ์ที่มีการให้ความร้อนหลังการเชื่อม

ก) แสดงภาพโครงสร้างจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

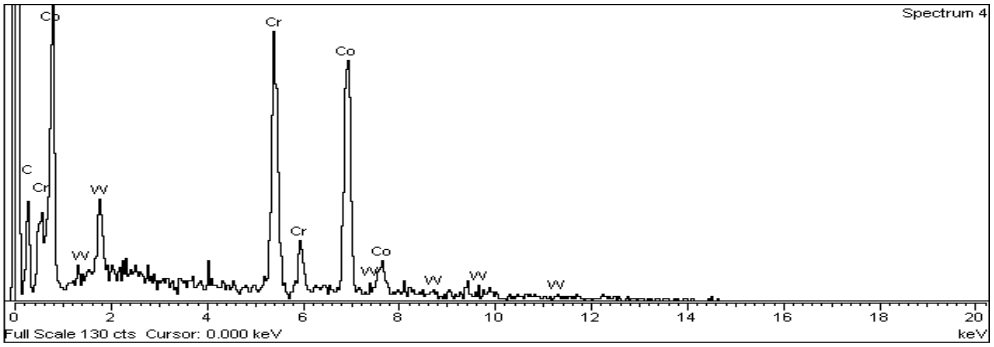
ข) แสดงการวิเคราะห์ธาตุผสมด้วยเทคนิคแบบจุดดูการกระจายตัวของธาตุผสมของคาร์ไบด์

ค) แสดงการวิเคราะห์ธาตุผสมด้วยเทคนิคแบบจุดดูการกระจายตัวของธาตุผสมของโครเมียมคาร์ไบด์

ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคบริเวณของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง ดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่า ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคที่ Spectrum 4 เครือข่ายของคาร์ไบด์ที่มีการแพร่กระจายอยู่ภายในอนุภาค Stellite 6 เป็นคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ (Co) และ โครเมียม (Cr) เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.18



(ก)



(ข)

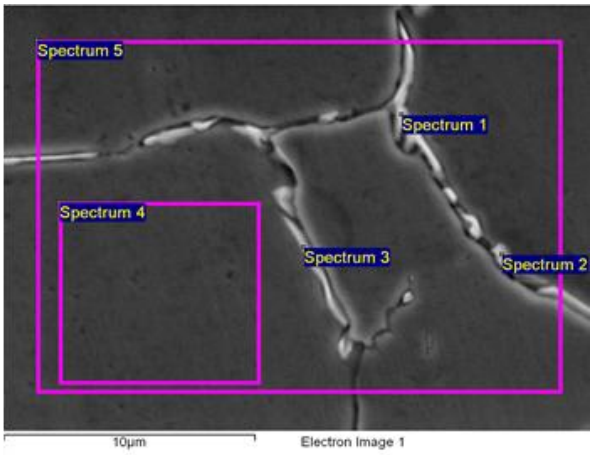
รูปที่ 4.27 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง

ก) แสดงภาพโครงสร้างจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

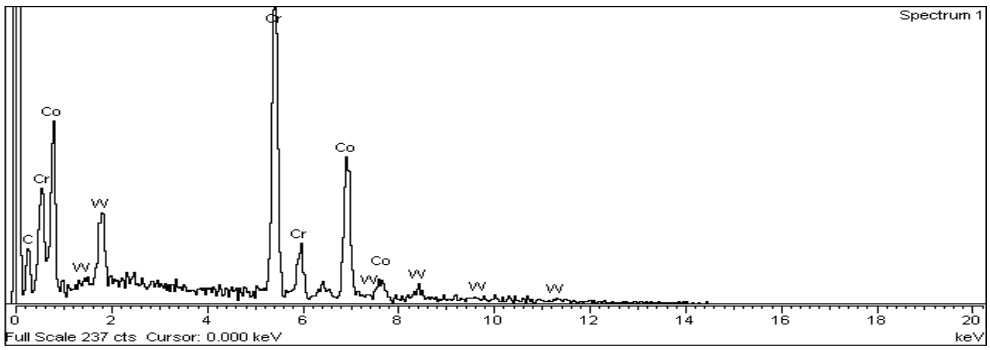
ข) แสดงการวิเคราะห์ธาตุผสมด้วยเทคนิคแบบจุดดูการกระจายตัวของธาตุผสมของคาร์ไบด์

ตารางที่ 4.18 ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคของคาร์ไบด์ที่เกิดจากการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการพ่นเคลือบด้วยเปลวเพลิงความเร็วสูง

Element	Weight%
C	40.75
Cr	19.81
Co	38.45
W	1



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.28 ผลวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการแล่นประสานด้วยแผ่น Stellite 6

ก) แสดงภาพโครงสร้างจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ข) แสดงการวิเคราะห์ธาตุผสมด้วยเทคนิคแบบจุดดูการกระจายตัวของธาตุผสมของคาร์ไบด์

ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคบริเวณของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแล่นประสาน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่า ผลจากการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคที่ Spectrum 1 คาร์ไบด์ที่มีลักษณะ Blocky Carbide ที่การแพร่กระจายอยู่เป็นคาร์ไบด์ที่มีโคบอลต์ (Co) และโครเมียม (Cr) เป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคของคาร์ไบด์ที่เกิดจากการสร้างผิวแข็งสำเร็จด้วยกระบวนการแล่นประสาน

Element	Weight%
C	30.90
Cr	35.37
Co	32.00
W	1.73

4.10 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกจะนำชิ้นงานมาทำการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกจากการใช้เครื่อง X-ray Diffractrometer (XRD) เพื่อการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึก ซึ่งอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบผิวหน้าผลึกของสารตัวอย่างที่มุมต่างๆกัน โดยสามารถวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของชิ้นงานตัวอย่างเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานพบว่า คาร์ไบด์ในทุกกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่มีการแพร่กระจายอยู่ในงานวิจัยเล่มนี้เป็นคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ ออร์โธรอมบิก (Orthorhombic) ดังแสดงในภาคผนวก ญ เมื่อทำการเทียบกับข้อมูลมาตรฐานของโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด Cr_7C_3 ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นออร์โธรอมบิก ซึ่งมีพีคของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ ใกล้เคียงกัน (มุม 2θ ของโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด Cr_7C_3 เท่ากับ 39.189 องศา 44.167 องศา 80.889 องศา และ 82.297 องศา) โดยพีคของคาร์ไบด์ที่ทำการตรวจสอบจะเลื่อนออกจากพีคของโครเมียมคาร์ไบด์ชนิด Cr_7C_3 เล็กน้อย เนื่องจากโคบอลต์ที่ละลายอยู่ในคาร์ไบด์ส่งผลทำให้พีคของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม 2θ เลื่อนออก [18, 26]

จากผลการวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีระดับจุลภาคและการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกของคาร์ไบด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จทำให้ทราบว่า คาร์ไบด์ในทุกกระบวนการสร้างผิวแข็งสำเร็จที่มีการแพร่กระจายอยู่เป็นคาร์ไบด์ชนิด M_7C_3 ที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธรอมบิก โดยมีโคบอลต์ (Co) และ โครเมียม (Cr) เป็นจำนวนมาก