

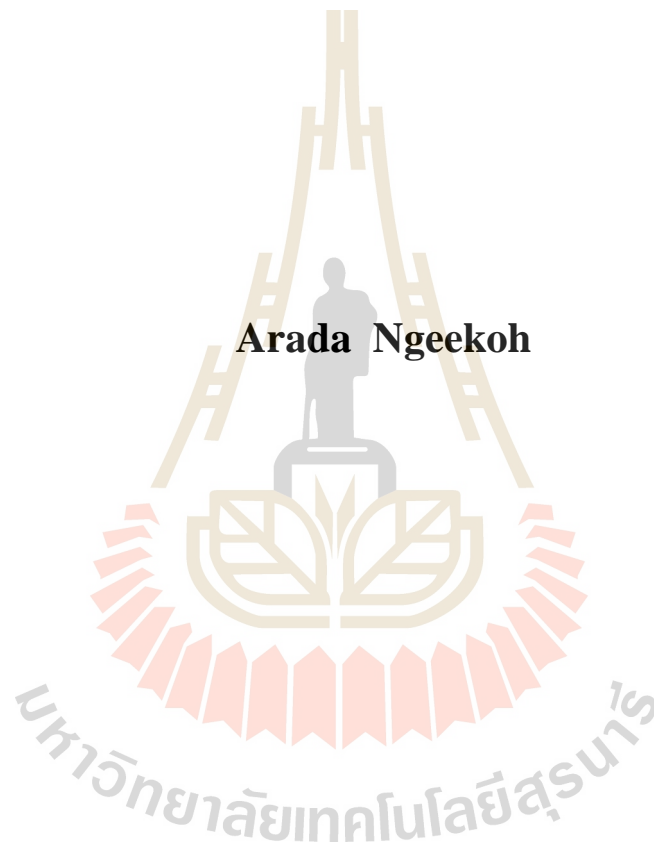
ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย
อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**WEAR RESISTANCE OF POWDER INJECTION
MOULDED SILICON CARBIDE PARTICULATE-
REINFORCED ALUMINIUM COMPOSITE**

Arada Ngeekoh



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

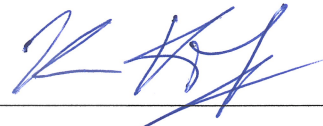
Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาค
ซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง

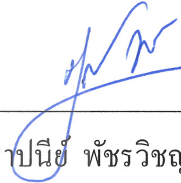
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.อุษณีย์ กิตกัาทร)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.ฐานันท์ พิชรวิชญ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.พรวสา วงศ์ปัญญา)

กรรมการ



(ผศ. ดร.ณัฐิตา ชวนเกริกกุล)

กรรมการ



(อ. ดร.สารัมภ์ บุญมี)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานีประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

อารดา จีเกาะ: ความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง (WEAR RESISTANCE OF POWDER INJECTION MOULDED SILICON CARBIDE PARTICULATE-REINFORCED ALUMINIUM COMPOSITE) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐาปณีย์ พชรวิชัย, 153 หน้า.

การศึกษาค้นคว้าความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และผลของการบ่มแข็งต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบ โดยงานวิจัยนี้เตรียมส่วนผสมฉีดขึ้นรูปที่อัตราส่วนของผงวัสดุ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แล้วนำไปฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความดัน 45 MPa เพื่อให้ได้ชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปขนาด 20x20x5 mm³ ทำการเผาผืนที่อุณหภูมิ 645 650 655 และ 660 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ใช้อัตราไหลของก๊าซไนโตรเจน 1 ลิตรต่อนาที ทำการบ่มแข็งโดยอบละลาย (Solution treatment) ที่ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำแล้วบ่มแข็งเทียม (Artificial aging) ที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ชิ้นงานภายหลังจากการเผาผืนและบ่มแข็งถูกนำมาตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค วิเคราะห์เฟส ทดสอบความหนาแน่นรวม ความแข็งและความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat ตามมาตรฐาน ASTM G133-95 ที่ภาระแรง 5 25 45 และ 65 นิวตัน จากผลการศึกษาพบว่า 1) วัสดุเชิงประกอบมีอัตราการสึกหรอในช่วง 10⁻³ ถึง 10⁻⁵ mm³/Nm และสัมประสิทธิ์ความเสียหายอยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.76 โดยกลไกการสึกหรอประกอบด้วยการสึกหรอแบบยึดติด การสึกหรอแบบขัดสี การสึกหรอแบบความล้า และการสึกหรอแบบออกซิเดชัน โดยการสึกหรอจะเกิดรุนแรงขึ้นเมื่อเพิ่มภาระแรงทดสอบจาก 5 เป็น 25 45 และ 65 นิวตัน 2) การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณเพิ่มมากขึ้นจาก 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะช่วยต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น โดยมีอัตราการสึกหรอต่ำสุดคือ 9.6 x 10⁻⁵ mm³/Nm เมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณต่ำคือ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร วัสดุเชิงประกอบจะเกิดการสึกหรอแบบยึดติดที่รุนแรง และกลไกการสึกหรอจะเปลี่ยนไปเป็นการสึกหรอแบบขัดสี เมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นเป็น 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ 3) วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สภาวะภายหลังการเผาผืนและภายหลังการบ่มแข็งมีอัตราการสึกหรอ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน รวมถึงมีกลไกการเกิดการสึกหรอที่คล้ายคลึง

กัน อย่างไรก็ตามการที่การบ่มแข็งจะช่วยชะลอการเกิดการสึกหรอแบบความล้าได้ในการทดสอบที่
ภาระแรงต่ำ คือ 5 นิวตัน สำหรับชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดย
ปริมาตร



สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ

ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา อรต จันทะ

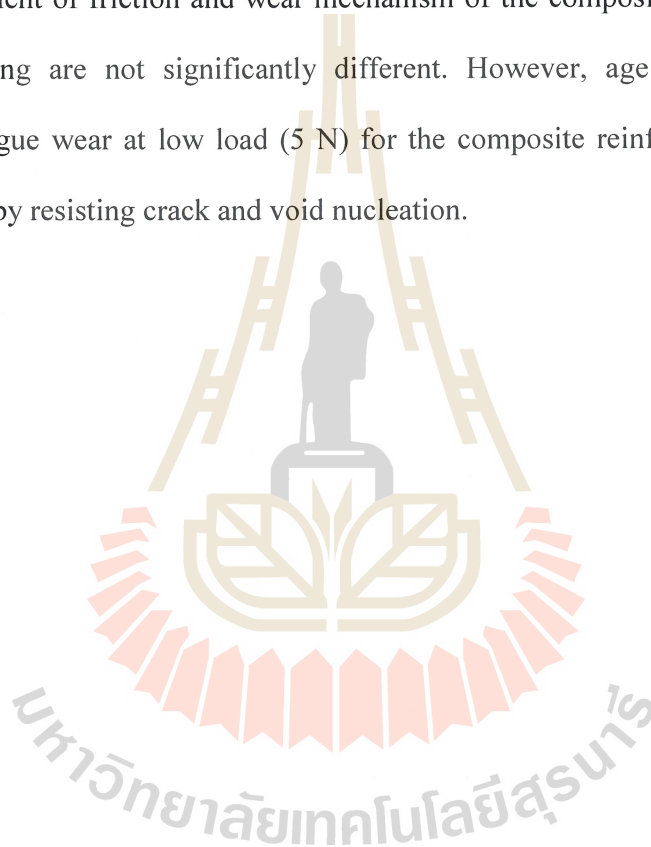
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [ลายมือ]

ARADA NGEKOH : WEAR RESISTANCE OF POWDER INJECTION
MOULDED SILICON CARBIDE PARTICULATE- REINFORCED
ALUMINIUM COMPOSITE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF
TAPANY PATCHARAWIT, Ph.D., 153 PP.

ALUMINIUM COMPOSITE/POWDER INJECTION MOULDING/ WEAR

Wear resistance of Al matrix composite reinforced with SiC_p were fabricated by Powder Injection Moulding (PIM). The purpose of this research is to study the influence of silicon carbide content additions at 5 10 15 and 20 vol.% and effect of age-hardening process on wear properties. The aluminium and silicon carbide were prepared by ball-mill mixing before mixing with a multi-component polymeric binder. The mixed powders of 55 % solid loading were injection moulded at 170 °C and 45 MPa to produce green samples of 20x20x5 mm³ in dimensions. After debinding in hexane, the brown samples were sintered at 645 650 655 and 660 °C for silicon carbide additions at 5 10 15 and 20 vol.%, respectively in a high purity nitrogen atmosphere. Solution treatment was carried out at 500 °C for 2 h. followed by age-hardening at 160 °C for 6 h. Microstructure (OM and SEM), bulk density and wear resistance were examined for the as sintered and age-hardened samples. Ball-on-Flat type of wear test according to ASTM G 133-95 were employed, using load varying at 5 25 45 and 65N. It was found that 1) the wear rate in the range of 10⁻³ to 10⁻⁵ mm³/Nm and 0.04 - 0.76 for the coefficient of friction. Wear mechanism were determined as the combination of abrasive adhesive fatigue and oxidation. The damage of severe wear increases with increasing load level from 5 to 25 45 and 65N.

2) Wear resistance increases with increasing SiC_p content addition from 5 to 20 vol.%. The lowest wear rate of composite is $9.6 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$. At low SiC_p addition (5-10 vol.%), abrasive wear is predominated at a low load of 5 N and then transforms to severe adhesive wear at increasing load. Increasing SiC_p content to 15 and 20 vol.% reduces wear where abrasive wear is now predominated over the load range. 3) Wear rate, coefficient of friction and wear mechanism of the composite after sintering and age hardening are not significantly different. However, age hardening helps to prolong fatigue wear at low load (5 N) for the composite reinforced with 5 and 10 vol.% SiC_p by resisting crack and void nucleation.



School of Metallurgical Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature _____ อรอน ชัยภักดิ์

Advisor's Signature _____ [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลและกลุ่มบุคคลจากหน่วยงานต่างๆ ทั้งทางด้านวิชาการและทางด้านการดำเนินงานวิจัย ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐาปนีย์ พัชรวิษญ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้โอกาสทางการศึกษาและให้ความรู้ทางวิชาการในด้านต่าง ๆ รวมทั้งให้คำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐิตา ชวนเกริกกุล ผู้ให้ความรู้ทางด้านวิชาการ และเอื้ออำนวยเครื่องมือและอุปกรณ์จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อาจารย์ ดร.ณรงค์ อัครพัฒนากุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตน บริสุทธิกุล อาจารย์ ดร.สารัมภ์ บุญมี ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุษณีย์ กิตติภร รongศาสตราจารย์ ดร.พรวสา วงศ์ปัญญา และคณาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมโลหการทุกท่านที่เป็นผู้ให้ความรู้ คำปรึกษาชี้แนะ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยครั้งนี้

คุณเอมอร ก่อเกียรติสกุล เจ้าหน้าที่บริหารงานทั่วไป สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการที่อำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานกับหน่วยงานภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย

เจ้าหน้าที่ประจำสถานปฏิบัติการ F1 F6 และ F10 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆ ตลอดจนการทำวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่เอื้ออำนวยสำหรับเครื่องทดสอบการสึกหรอ

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผู้ให้ทุนวิทยานิพนธ์บัณฑิตศึกษา เพื่อเป็นงบประมาณสนับสนุนในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีเสมอมา และเป็นกำลังใจที่ดีในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

อรดา จีเกาะ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วัสดุเชิงประกอบ.....	6
2.1.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ.....	6
2.2 กรรมวิธีการฉีดขึ้นรูปผง.....	9
2.2.1 ผงวัสดุ.....	10
2.2.2 การเตรียมผงวัสดุสำหรับฉีดขึ้นรูป.....	17
2.2.3 การฉีดขึ้นรูปผง.....	19
2.2.4 การแยกสารยึด.....	20
2.2.5 การเผาผนึก.....	21
2.3 วัสดุเชิงประกอบพีนอะลูมิเนียมขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการฉีดขึ้นรูปผง.....	26
2.3.1 ผงวัสดุ.....	26

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2	กระบวนการฉีดขึ้นรูปและเผาผนึกวัสดุเชิงประกอบพีนอะลูมิเนียม	28
2.3.3	กระบวนการทางความร้อน	30
2.4	ความต้านทานต่อการสึกหรอ	33
2.4.1	กลไกการสึกหรอ	34
2.4.2	การทดสอบการสึกหรอ	36
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	38
3	วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	45
3.1	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	47
3.1.1	วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	47
3.2	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย	49
3.2.1	การวิเคราะห์ผงวัสดุ	49
3.2.2	การเตรียมผงวัสดุสำหรับการฉีดขึ้นรูป	49
3.2.3	การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง	50
3.2.4	การทดสอบสมบัติของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป	50
3.2.5	การแยกสารยึด	51
3.2.6	การเผาผนึก	51
3.2.7	การบ่มแข็ง	52
3.2.8	ตรวจสอบสมบัติของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและบ่มแข็ง	53
4	คุณลักษณะและสมบัติเบื้องต้นของวัสดุเชิงประกอบพีนอะลูมิเนียม	55
4.1	ผลการวิเคราะห์ผงวัสดุ	55
4.1.1	องค์ประกอบทางเคมี	55
4.1.2	ขนาดผงวัสดุ	56
4.2	สมบัติของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป	57
4.2.1	โครงสร้างจุลภาค	57
4.2.2	ความหนาแน่น	58

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	59
4.3	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและเฟสของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและ การบ่มแข็ง.....	62
4.3.1	โครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์เฟสของชิ้นงาน ภายหลังการเผาผนึก	62
4.3.2	โครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์เฟสของชิ้นงาน ภายหลังการบ่มแข็ง.....	68
4.4	สมบัติของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง	74
4.4.1	ความหนาแน่นของของชิ้นงาน ภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง	74
4.4.2	ความแข็งของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง.....	75
5	การสึกกร่อนของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์	79
5.1	ร่องการสึกกร่อน	79
5.2	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของชิ้นงาน ภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง	83
5.3	น้ำหนักที่หายไปหลังการทดสอบการสึกกร่อนและ อัตราการสึกกร่อนจำเพาะของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง	87
5.4	พื้นผิวการสึกกร่อนของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก และภายหลังการบ่มแข็ง	89
5.4.1	ชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก.....	89
5.4.2	ชิ้นงานภายหลังการบ่มแข็ง	95
5.5	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของพื้นผิวการสึกกร่อน ของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและภายหลังการบ่มแข็ง.....	99
5.5.1	ชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก	100
5.5.2	ชิ้นงานภายหลังการบ่มแข็ง	106

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.6	ผลการวิเคราะห์สะกึ่งการสึกหรอ	111
5.6.1	สะกึ่งการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก	111
5.6.2	สะกึ่งการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการบ่มแข็ง.....	113
5.7	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะกึ่งการสึกหรอ	115
5.7.1	สะกึ่งการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก	115
5.7.2	สะกึ่งการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการบ่มแข็ง.....	121
5.8	กลไกการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพีนอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	127
5.8.1	กลไกการสึกหรอ.....	128
5.8.2	ผลกระทบของปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ต่อพฤติกรรมการสึกหรอ	129
5.8.3	ผลกระทบของกระบวนการบ่มแข็งต่อพฤติกรรมการสึกหรอ	129
6	สรุปผลการทดลอง	136
	รายการอ้างอิง	138
	ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา.....	142
	ประวัติผู้เขียน	153

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	อุณหภูมิหลอมตัวและความหนาแน่นของสารยึดชนิดต่างๆ	17
2.2	องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมเกรด Alumix 123 (AlCuMgSi).....	27
2.3	สมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของผงอะลูมิเนียม	27
2.4	แสดงสมบัติทั่วไปของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	28
3.1	ส่วนผสมทางเคมีของผงอะลูมิเนียม	47
4.1	ผลวิเคราะห์ห้องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียม (Alumix 123) ด้วยเทคนิค XRF	55
4.2	ค่า D_{10} , D_{50} และ D_{90} ของ ผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์.....	56
5.1	การจำแนกประเภทของการสึกหรอ.....	130
5.2	พฤติกรรมและกลไกการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ภายหลังจากเผาพูนึก	134
5.3	พฤติกรรมและกลไกการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ภายหลังจากเผาพูนึก	134
5.4	ลักษณะสะเก็ดสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ภายหลังจากเผาพูนึก	135
5.5	ลักษณะสะเก็ดสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ภายหลังจากบ่มแข็ง.....	135

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

1.1	การใช้งานทางวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์.....	2
2.1	แผนภาพแสดงกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง.....	10
2.2	รูปทรงของผงวัสดุ.....	12
2.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความถี่กับขนาดอนุภาคผงโลหะในสเกลล็อก.....	14
2.4	กราฟการแจกแจงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสม.....	15
2.5	ขนาดของผงวัสดุต่อความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของวัสดุ.....	16
2.6	ปริมาณการเติมผงวัสดุและสารยึด.....	18
2.7	การผสมผงวัสดุและสารยึดด้วย Twin screw extruder.....	19
2.8	ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูปผง.....	20
2.9	กลไกการแยกสารยึดออกด้วยความร้อน.....	21
2.10	แบบจำลองการถ่ายเทมวลสารของอนุภาคทรงกลมในกระบวนการเผาผนึก.....	23
2.11	กลไกของการถ่ายเทมวลสารทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขณะกระบวนการเผาผนึก.....	24
2.12	ขั้นตอนของการเผาผนึกเฟสของเหลว.....	25
2.13	เครื่องฉีดขึ้นรูปผงวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	30
2.14	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่อัตราการเย็นตัวอย่างช้า ๆ ผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยการตกตะกอนเฟสที่สอง.....	31
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็งและค่าความแข็ง.....	33
2.16	กลไกการสึกหรอแบบขัดสี.....	35
2.17	กลไกการสึกหรอแบบยึดติด.....	35
2.18	กลไกการสึกหรอแบบความล้า.....	36
2.19	กลไกการสึกหรอแบบกัดกร่อน.....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20	ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat (ASTM 133-95)38
2.22	โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ SiC/Cu-Al ภายหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิต่างกัน40
2.23	ก) ขนาดของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อความต้านทานการสึกหรอที่ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ ข) สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ต่อความต้านทานการสึกหรอ ที่ขนาด 43 ไมครอน43
3.1	ขั้นตอนการศึกษาความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง47
3.2	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการเผาผนึก52
3.3	แผนภูมิแสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการบ่มแข็ง52
4.1	กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงวัสดุ57
4.2	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังฉีดขึ้นรูป58
4.3	ความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังฉีดขึ้นรูปเปรียบเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี59
4.4	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร61
4.5	ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร61
4.6	โครงสร้างจุลภาคภายหลังการเผาผนึกของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เผาผนึกที่อุณหภูมิ 645 650 655 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ63
4.7	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายหลังการเผาผนึกของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เผาผนึกที่อุณหภูมิ 650 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ64
4.8	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XRD ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แผ่นที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส67
4.10	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XRD ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แผ่นที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส67
4.11	โครงสร้างจุลภาคภายหลังการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แผ่นที่อุณหภูมิ 645 650 655 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ69
4.12	โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายหลังการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แผ่นที่อุณหภูมิ 650 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ70
4.13	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ภายหลังการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร71
4.14	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XRD ภายหลังการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร73
4.15	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XRD ภายหลังการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร73
4.16	ความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังจากการเผาขึ้นเทียบกับความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังจากการบ่มแข็ง75
4.17	รอยกดจากการทดสอบความแข็งแบบมหภาคของชิ้นงานที่เดิม อนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาขึ้น76
4.18	ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ระดับมหภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19	รอยกดจากการทดสอบความแข็งแบบจุดภาคของชิ้นงานที่เดิม อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก77
4.20	ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สระดับจุดภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....78
5.1	ร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก80
5.2	ร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก80
5.3	ความกว้างของร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 -20 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก81
5.4	ร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการบ่มแข็ง82
5.5	ร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาค ซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการบ่มแข็ง82
5.6	ความกว้างของร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการบ่มแข็ง83
5.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระทำ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย เทียบกับเวลา ภายหลังการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายได้ภาระแรง ก) 25 และ ข) 65 นิวตัน84
5.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระทำ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหาย เทียบกับเวลา ภายหลังการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรง ด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายได้ภาระแรง ก) 25 และ ข) 65 นิวตัน85

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9	ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเทียบกับภาระแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ก) ภายหลังการเผาผนึกและ ข) ภายหลังการบ่มแข็ง86
5.10	น้ำหนักที่หายไปจากการทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 45 และ 65 นิวตัน ของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร88
5.11	อัตราการสึกหรอจำเพาะของชิ้นงานหลังจากการทดสอบการสึกหรอเทียบกับภาระแรง ของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร89
5.12	พื้นผิวการสึกของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก91
5.13	พฤติกรรมการสึกหรอโดยทั่วไปที่พบในชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์92
5.14	พื้นผิวที่สึกหรอจากการทดสอบชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก94
5.15	พื้นผิวที่สึกหรอจากการทดสอบชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก95
5.16	พื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการบ่มแข็ง97
5.17	พื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการบ่มแข็ง.....98
5.18	พื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วย อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการบ่มแข็ง.....99
5.19	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ของพื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้น อะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก ที่ภาระแรง 25 นิวตัน.....102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

5.38	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากบ่มแข็ง ภายใต้อุณหภูมิ 65 นิวตัน.....	125
5.39	ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาผนึก ภายใต้อุณหภูมิ 25 นิวตัน	126
5.40	กราฟแผนที่แสดงอัตราการสึกหรอเฉพาะในช่วงภาระแรง 5 - 65 นิวตัน ของชิ้นงานเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	131
5.41	กราฟแผนที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในช่วงภาระแรง 5 - 65 นิวตัน ของชิ้นงานเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร.....	132
5.42	กระบวนการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม	133

บทที่ 1

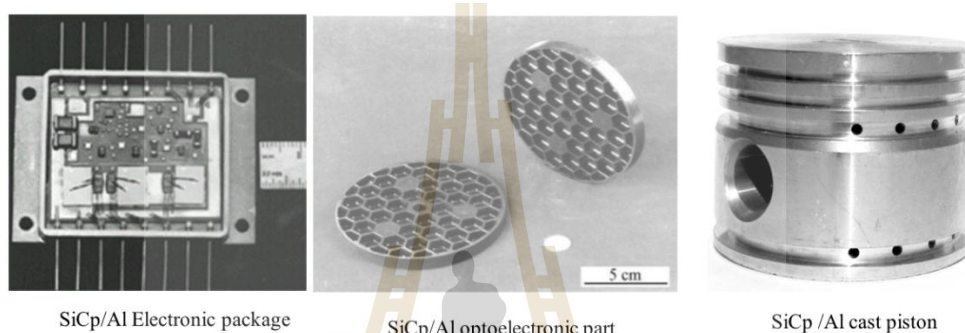
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันนี้อะลูมิเนียมมีบทบาทที่สำคัญเป็นอย่างมากต่อภาคอุตสาหกรรม เพราะอะลูมิเนียมมีข้อได้เปรียบคือ อะลูมิเนียมเป็นตัวนำความร้อนที่ดีกว่าเหล็กถึงสามเท่า ทำให้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีความสำคัญสามารถนำไปใช้งานได้ทั้งงานร้อนและงานเย็น อะลูมิเนียมยังสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะปกติได้ดี มีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา อัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความเหนียวที่ดีขึ้นรูปทางกลง่าย (Total Material Aluminum Properties, www, 2017) และสามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการเติมธาตุผสม เช่น โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง อะลูมิเนียม-ซิลิกอนและอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงความแข็งแรงและความแข็งแรงด้วยกระบวนการทางความร้อน และกระบวนการขึ้นรูปเย็นได้ (พรวิสา วงศ์ปัญญา, 2551) ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ทำให้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่คุ้มค่า เหมาะสมในการใช้งานในภาคส่วนต่างๆ ของอุตสาหกรรมที่กำลังเติบโต เช่น ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ยานยนต์ วิศวกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งเทคโนโลยีทางการแพทย์ (ดร. จินตมัย สุวรรณประทีป โลหะทางการแพทย์, www, 2556) และเทคโนโลยีแห่งอนาคต (Mtaluminium history, www, 2011) นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังสามารถนำกลับมาหลอมใหม่ได้ (Zarges Advantages Aluminium, www, n.d.) สามารถเปลี่ยนรูปทรง หน้าที่ ประโยชน์ใช้สอยได้ นับเป็นการใช้ทรัพยากรที่มีจำกัดอย่างคุ้มค่า (Mtaluminium history, www, 2011)

อย่างไรก็ตามอะลูมิเนียมยังมีข้อจำกัดบางประการ คือ อะลูมิเนียมมีความแข็งแรงในเกณฑ์ปานกลางเมื่อเทียบกับโลหะชนิดอื่นๆ จึงต้องทำการเพิ่มความแข็งแรงให้กับอะลูมิเนียม โดยการเสริมแรงวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์เริ่มได้รับความสนใจและมีการศึกษาวิจัยเพิ่มมากขึ้นเพราะมีสมบัติความแข็งแรงที่ดี สามารถนำไปผลิตเพื่อใช้งานในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุปกรณ์ระบายความร้อน (Heat sinks) ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์, เพลาขับ (Drive shafts) และ จานเบรก (Brake rotors) ในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนยาน

ยนต์ เป็นต้น (Wang, H. et al., 2008) รวมถึงการใช้งานทางวิศวกรรมบางประเภทที่ต้องได้รับการเสียดสี เช่น ชิ้นส่วนเครื่องมือและอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องมีความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี (Wear resistance) เพื่อสามารถเพิ่มอายุการใช้งานของชิ้นส่วนและเป็นการลดของเสียหมุนเวียนที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมปัจจุบัน รูปที่ 1.1 แสดงถึงการใช้งานทางวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เช่น อุปกรณ์หล่อหุ้มอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์สำหรับงานอากาศยาน และชิ้นส่วนยานยนต์ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 การใช้งานทางวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (TMS Metal-Matrix Composites for Space Applications, www, 2018; Yana, C. et al., 2008; Dyzia, M. et al., 2018)

วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จึงได้ถูกนำมาพัฒนาเพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้กับอะลูมิเนียมและขยายขอบเขตการใช้งานทางวิศวกรรม ทั้งในส่วนของงานวิจัยพัฒนาทางด้านกระบวนการขึ้นรูป ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการกวนผสม (Stir mixing) (Ortiz, M.B., 1996 และ Rohatgi, P. et al., 1991) กระบวนการแทรกซึมน้ำโลหะเหลว (Preform infiltration) (Ortiz, M.B., 1996) และโลหวิทยาโลหะผง (Powder metallurgy) (Lee, J.A. et al., 1987 และ Eslamian, M. et al., 2008) เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อทำการขึ้นรูปชิ้นงานให้ได้โครงสร้างจุลภาคที่มีการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรงอย่างสม่ำเสมอ (Uniform distribution of reinforcing materials) โดยศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขึ้นรูปต่างๆ เช่น การศึกษาด้านกระบวนการเผาผนึกในสภาวะบรรยากาศต่างๆ (Martin, J.M. et al., 2003) โดยมีการศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับวัสดุที่นำมาขึ้นรูป เป็นต้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการพัฒนาวัสดุดังกล่าว

อย่างไรก็ดีข้อจำกัดบางประการเช่น ความสามารถในการเปียก (Wettability) ระหว่างอะลูมิเนียมหลอมเหลวและซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ค่อนข้างต่ำ (Wang, H. et al., 2008) รวมถึงการเกิด

สารประกอบ Al_4C_3 ที่มีความเปราะสูง บริเวณพื้นผิวรอยต่อระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และพื้นอะลูมิเนียมในขณะขึ้นรูปในสถานะของเหลว (Wang, H. et al., 2008) เป็นอุปสรรคสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว ดังนั้นการขึ้นรูปด้วยกระบวนการโลหวิทยาโลหะ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถแก้ปัญหาข้อจำกัดที่กล่าวมาได้ เนื่องจากใช้อุณหภูมิในกระบวนการผลิตขึ้นรูปที่ไม่สูงมากนัก นอกจากนี้ยังสามารถขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็กได้จำนวนมาก (Eslamian, M. et al., 2008) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง (Powder injection moulding) ซึ่งสามารถผลิตชิ้นงานขนาดเล็กที่มีความซับซ้อนได้ดี

งานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาและพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมผสมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง โดยเน้นศึกษากระบวนการเตรียมผงวัสดุสำหรับฉีดขึ้นรูป (Feedstock preparation) และสถานะในการเผาพูนที่เหมาะสม (Inpanya, B. et al., 2012) โดยพบว่า ส่วนผสมที่ใช้สำหรับฉีดขึ้นรูปอย่างเหมาะสมนั้นมีผงวัสดุอัตราร้อยละ 55 เปอร์เซ็นต์ และสารยึดร้อยละ 45 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนในวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง ซึ่งสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้กว่าร้อยละ 40 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่า ความแข็งแรงและความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นจากเดิมคือ $96 H_v$ และ $45 MPa$ เป็น $137 H_v$ และ $68 MPa$ ตามลำดับ เมื่อผ่านกระบวนการเพิ่มความแข็งแรงด้วยการตกตะกอนของเฟสที่สอง (Patcharawit T. et al., 2017) เป็นต้น อย่างไรก็ตามก็ยังไม่มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับสมบัติความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษา ความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาเพื่อขยายขอบเขตการใช้งานของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวในงานทางวิศวกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง

1.2.2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียม

1.2.3 ศึกษาผลของการบ่มแข็งต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1.3.1 การเสริมแรงให้กับวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมด้วยการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร น่าจะส่งผลให้ความต้านทานต่อการสึกหรอแตกต่างกัน เนื่องจากการเติมปริมาณของอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาค (Particle packing) ที่แตกต่างกันเมื่อกำหนดให้ขนาดของผงอะลูมิเนียมคงที่ การกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกันในพื้นอะลูมิเนียมนี้จะเกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของการเผาผนึก เมื่อวัสดุเสริมแรงมีขนาดเล็กกว่าวัสดุพื้น (Particle packing ratio D_s/D_L น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1) พบว่าการเติมวัสดุเสริมแรงในปริมาณน้อย (น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) จะช่วยทำให้เกิดการจัดเรียงอนุภาคที่ดี ส่งผลให้การเผาผนึกมีประสิทธิภาพดีขึ้น ดังนั้น การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขนาดเล็กกว่าในช่วงปริมาณ 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร น่าจะแสดงถึงแนวโน้มของสมบัติความต้านทานการสึกหรอและสามารถเลือกปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ให้สมบัติความต้านทานการสึกหรอที่ดีที่สุด (Optimum wear property)

1.3.2 การบ่มแข็งส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและน่าจะส่งผลทำให้การสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ลดลง เนื่องจากการเพิ่มความแข็งแรงของวัสดุกลุ่มผสม ซึ่งน่าจะลดการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) แต่ในขณะที่เพิ่มปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ อาจทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear) มากขึ้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ โดยมีขอบเขตในการวิจัยดังนี้

1.4.1 การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร การทดสอบความต้านทานการสึกหรอ ด้วยวิธี Ball-on-Flat ในช่วงภาระแรง 5 25 45 และ 65 นิวตัน

1.4.2 ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดอนุภาคในช่วง 18-22 ไมครอน และผ่านการอบที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง และใช้ผงอะลูมิเนียมเกรด Alumix 123 ที่มีขนาดผงในช่วง 80-100 ไมครอน โดยใช้เปอร์เซ็นต์ผงวัสดุในการฉีดขึ้นรูป 55 เปอร์เซ็นต์

1.4.3 การบ่มแข็ง (Age hardening) โดยทำการอบละลาย (Solution treatment) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นชุบน้ำ และบ่มแข็งเทียม (Artificial aging) ที่ช่วงอุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง

1.5.2 ทราบถึงอิทธิพลของปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

1.5.3 ทราบถึงผลของกระบวนการบ่มแข็งต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials)

วัสดุเชิงประกอบเป็นวัสดุผสมที่เกิดจากการนำเอาสมบัติเด่นของวัสดุแต่ละชนิด ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกันเพื่อให้ได้วัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติที่ดี เหมาะสมกับความต้องการนำไปใช้งาน ซึ่งองค์ประกอบของวัสดุเชิงประกอบจะประกอบไปด้วย วัสดุเนื้อพื้น (Matrix) ที่เป็นเฟสต่อเนื่อง (Continuous phase) หรือเฟสหลัก (Matrix phase) และวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) จะกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้น เรียกว่า เฟสกระจายตัว (Distributed phase) หรือเฟสเสริมแรง (Reinforcing phase) โดยวัสดุที่เป็นเนื้อพื้นจะทำหน้าที่ห่อหุ้มหรือยึดจับวัสดุเสริมแรงให้กระจายตัวอยู่ได้ ส่วนวัสดุเสริมแรงจะทำหน้าที่เพิ่มสมบัติให้กับวัสดุเนื้อพื้น โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุเสริมแรง จะมีค่าความแข็ง (Hardness), ความแข็งแรง (Strength) และความแข็งเกร็ง (Stiffness) มากกว่าวัสดุที่เป็นเนื้อพื้น เมื่อนำมาเสริมแรงจะได้วัสดุเชิงประกอบที่มีสมบัติเฉพาะ (Specific properties) เหมาะแก่การนำไปใช้งาน เช่น มีความแข็งแรง ความแกร่งและความสามารถในการยืดหยุ่นสูงขึ้น รวมถึงต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้น สมบัติเหล่านี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของวัสดุเสริมแรงแล้วยังขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตขึ้นรูปด้วย เพราะจะส่งผลต่อปริมาณ การกระจายตัวของเฟสเสริมแรงและสมบัติระหว่างพื้นผิว (Interfacial properties) เป็นสำคัญ

2.1.1 ประเภทของวัสดุเชิงประกอบ สามารถแบ่งออกโดยใช้วัสดุเนื้อพื้นเป็นเกณฑ์หรือใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเกณฑ์ ดังนี้

วัสดุเชิงประกอบที่ใช้วัสดุเนื้อพื้นเป็นเกณฑ์ สามารถจำแนกได้ 3 ประเภท คือ

วัสดุเชิงประกอบพื้นพอลิเมอร์ (Polymer Matrix Composites, PMCs) มีเนื้อพื้นเป็นพอลิเมอร์ และเฟสเสริมแรงที่เป็นได้ทั้งพอลิเมอร์ โลหะ และเซรามิก ซึ่งความแข็งแรงของเนื้อพื้นพอลิเมอร์ไม่สูงมากนัก ดังนั้นการเติมเฟสเสริมแรงลงไปจะเป็นตัวปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้กับเนื้อพื้น ทำให้วัสดุเชิงประกอบพื้นพอลิเมอร์มีความแข็งแรงมากขึ้น

วัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะ (Metal Matrix Composites, MMCs) จะใช้วัสดุเสริมแรงเป็นโลหะหรือเซรามิก เพื่อเพิ่มความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) และความต้านทานความคืบ (Creep resistance) ให้กับเนื้อพื้นที่เป็นโลหะ

วัสดุเชิงประกอบพื้นเซรามิก (Ceramic Matrix Composites, CMCs) เนื่องจากเนื้อพื้นเซรามิกมีความเปราะสูง เพราะฉะนั้นวัสดุเสริมแรงที่เลือกมาผสมกับวัสดุเนื้อพื้นต้องเพิ่มความแกร่ง (Fracture toughness) ให้กับเนื้อพื้นที่ได้

วัสดุเชิงประกอบใช้วัสดุเสริมแรงเป็นเกณฑ์ สามารถจำแนกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particulate reinforced composites) การเสริมแรงด้วยอนุภาคจะประกอบด้วยเนื้อพื้นที่เป็นเนื้อเดียวต่อเนื่องกัน (Homogeneous) และมีการเสริมแรงด้วยการเติมอนุภาคเสริมแรง เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ เป็นต้น ซึ่งอนุภาคเสริมแรงจะกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้น อย่างไรก็ตามการเสริมแรงที่มีประสิทธิภาพขนาดของอนุภาคไม่ควรมีขนาดใหญ่จนเกินไป และอนุภาคควรมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้น รูปร่างของอนุภาคอาจมีได้หลายลักษณะ แต่ควรมีลักษณะสมมาตร (Equiaxed) คือมีขนาดเท่ากันในทุก ๆ ทิศทาง นอกจากนี้ปริมาณของอนุภาคที่เพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบดีขึ้นด้วย

โดยสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบนั้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยปริมาตรของทั้งโลหะผสมพื้นอะลูมิเนียมและวัสดุเสริมแรงอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งการทำนายสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบจะสามารถพิจารณาได้จาก “กฎของการผสม (Rule of mixture)” ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

สำหรับทำนายมอดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \quad (2.1)$$

สำหรับทำนายความแข็งแรงดึงสูงสุด

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_p V_p \quad (2.2)$$

เมื่อ V_m คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุเนื้อพื้น และ V_p คือ สัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุเสริมแรง E_c คือ มอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบ E_m คือ มอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเนื้อพื้น E_p คือ มอดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุเสริมแรง ในส่วนของการทำนายความแข็งแรงดึงสูงสุดค่า σ_c , σ_m และ σ_p คือ ความแข็งแรงดึงสูงสุดของวัสดุเชิงประกอบ, วัสดุเนื้อพื้น และวัสดุเสริมแรง ตามลำดับ (Thaitechno นิยามของคอมโพสิต, www, 2017)

กลไกการเสริมแรงจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของอนุภาคเสริมแรง (Volume fraction) รูปร่างของอนุภาคเสริมแรง (Particle shape) ขนาดของอนุภาคเสริมแรง (Particle size)

และการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรงหรือระยะห่างระหว่างอนุภาค (Distribution or interparticle spacing, λ) ซึ่งค่า λ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

$$\lambda = [4(1 - V_p)r]/3 V_p \quad (2.3)$$

เมื่อ r คือ รัศมีของอนุภาคทรงกลม โดยหากเปลี่ยนแปลงตัวแปรหนึ่งก็จะส่งผลต่อตัวแปรอื่น ๆ ด้วยเช่นกัน (Dieter, G. E., 1986)

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยแบบต่อเนื่องและเรียงตัวเป็นระเบียบ (Continuous fiber-reinforced composites) เป็นการผสมเส้นใยให้กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้น เช่น การผสมเส้นใยของซิลิกอนคาร์ไบด์ในเนื้อพื้นของแก้วเพื่อเพิ่มความแกร่ง เป็นต้น

วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้น (Short fiber-reinforced composites) จะแบ่งเป็น 2 กลุ่มตามการจัดเรียงตัวคือ กลุ่มแรก การเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นแบบเรียงตัวเป็นระเบียบ จะมีสมบัติทางกลที่ดีเมื่อต้องรับแรงกระทำในทิศทางเดียวกันกับการจัดเรียงตัวของเส้นใย และกลุ่มที่สองคือการเสริมแรงด้วยเส้นใยสั้นเรียงตัวแบบสุ่ม เนื่องจากเส้นใยที่ใช้เป็นเส้นใยที่จัดเรียงตัวแบบสุ่ม ทำให้วัสดุเชิงประกอบมีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง จึงสามารถรับแรงกระทำได้ทุกทิศทาง

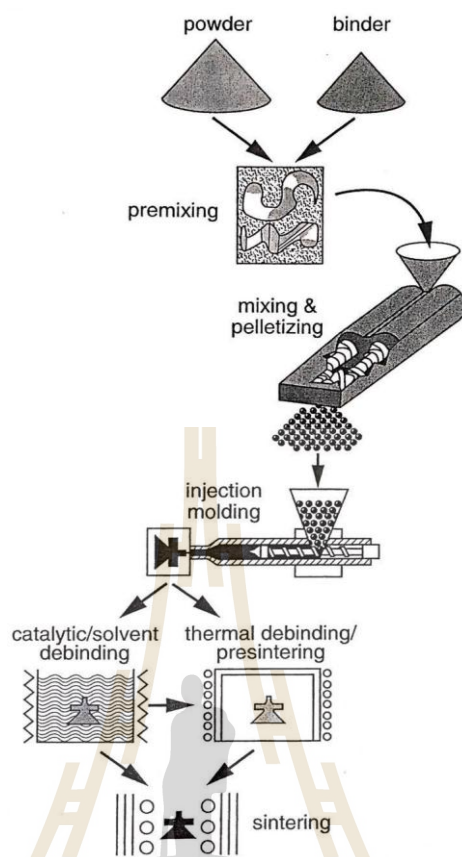
วัสดุเชิงประกอบแบบโครงสร้าง (Structural composites) เช่น วัสดุเชิงประกอบแบบชั้น (Laminar composite) และแบบแซนด์วิช (Sandwich panel) เป็นวัสดุเชิงประกอบที่มีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรง (Strength) และความแข็งแกร่ง (Stiffness) สูง

ส่วนกรรมวิธีการขึ้นรูปของวัสดุเชิงประกอบพื้นโลหะนั้นสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น 1) การกวนผสม (Stir casting) โดยการเติมวัสดุเสริมแรงลงไปผสมในขณะที่โลหะพื้นหลอมเหลวจากนั้นทำการกวนผสม วิธีการนี้อาจจะทำให้วัสดุเสริมแรงเกาะกันเป็นกลุ่มกระจายตัวไม่สม่ำเสมอในเนื้อพื้นหลังจากเย็นตัว 2) การแทรกซึมน้ำโลหะเหลว (Preform infiltration) เป็นการเติมโลหะหลอมเหลวลงไปในวัสดุเสริมแรงที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนวิธีนี้จะมีสัดส่วนของวัสดุเสริมแรงมากกว่าโลหะพื้นซึ่งทำให้มีสมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ได้ 3) กระบวนการ Spray forming เป็นการฉีดพ่นวัสดุเสริมแรงลงไปโลหะหลอมเหลวซึ่งกระบวนการนี้มีการแยกตัวของวัสดุเสริมแรงและเนื้อโลหะเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก และอัตราการเย็นตัวที่ต่างกันทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมแรงและโลหะพื้นต่ำ (Eslamian, M. et al., 2008) ส่วน 4) กระบวนการโลหวิทยาโลหะผง (Powder Metallurgy, PM) นั้นเริ่มจากผสมผงโลหะเข้ากับวัสดุเสริมแรงก่อน สามารถนำไปอัดหรือฉีดขึ้นรูปได้ จากนั้นทำการเผาผนึก ซึ่งวิธีการนี้วัสดุเสริมแรงจะกระจายตัวอย่าง

สม่ำเสมอในเนื้อโลหะพื้นเนื่องจากได้ทำการผสมให้เป็นวัสดุเชิงประกอบก่อนนำไปขึ้นรูป ดังนั้นกระบวนการโลหวิทยาโลหะผงมีข้อได้เปรียบที่โดดเด่นคือ สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีคุณภาพสูงและมีขนาดที่แน่นอนในต้นทุนที่ไม่สูง

2.2 กรรมวิธีการฉีดขึ้นรูปผง (Powder injection moulding)

การฉีดขึ้นรูปผง (Powder Injection Moulding, PIM) เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นจากกรรมวิธี Injection Molding (IM) เป็นเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการฉีดขึ้นรูปพลาสติก ซึ่งมีข้อได้เปรียบคือ สามารถผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็ก รูปร่างซับซ้อน และมีปริมาณการผลิตสูงมาก ดังนั้นจึงได้มีความพยายามในการนำกรรมวิธีการฉีดขึ้นรูปพลาสติกมาประยุกต์เข้ากับกระบวนการทางโลหวิทยาโลหะผง โดยพัฒนาไปเป็น Powder Injection Moulding หรือ PIM ซึ่งเป็นชื่อเรียกโดยรวมสำหรับทั้งกรณีที่เป็นผงโลหะ เซรามิก และวัสดุเชิงประกอบ ชิ้นงานภายหลังจากการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการฉีดขึ้นรูปผงนั้นจะมีรูปร่างใกล้เคียงชิ้นงานสุดท้าย (Near-net shape) ซึ่งจะเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมในการขึ้นรูปโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงและไม่สามารถทำการหลอมได้ หรือวัสดุประเภทที่มีความแข็งสูง และตัดแต่งได้ลำบาก อาทิเช่น เซรามิก หรือ โลหะที่มีความแข็งสูง เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนหลักของกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนได้แก่ การเตรียมส่วนผสมผงวัสดุ (Feedstock preparation) การฉีดขึ้นรูปผง (Powder injection moulding) การแยกสารยึด (Debinding) และการเผาผนึก (Sintering) ดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพแสดงกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง
(German, R.M. and Bose, A., 1997)

2.2.1 ผงวัสดุ (Powder)

การผลิตผงโลหะ (Powder fabrication)

กระบวนการผลิตผงโลหะส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของโลหะผง เช่น รูปร่าง ขนาด โครงสร้างจุลภาค องค์ประกอบทางเคมี ซึ่งเทคนิคที่ใช้ผลิตผงโลหะ ยกตัวอย่างเช่น การผลิตผงอะลูมิเนียมมักกระทำด้วยวิธีการบด (Milling) กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยแก๊ส/น้ำ (Gas/water atomization) กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยแรงหมุนเหวี่ยง (Centrifugal atomization) กระบวนการทางเคมี (Chemical) กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) เป็นต้น (สารัมภ์ บุญมี, 2557) ทั้งนี้จะกล่าวถึงกระบวนการบดและอะตอมไมเซชัน โดยย่อ

การบด (Milling)

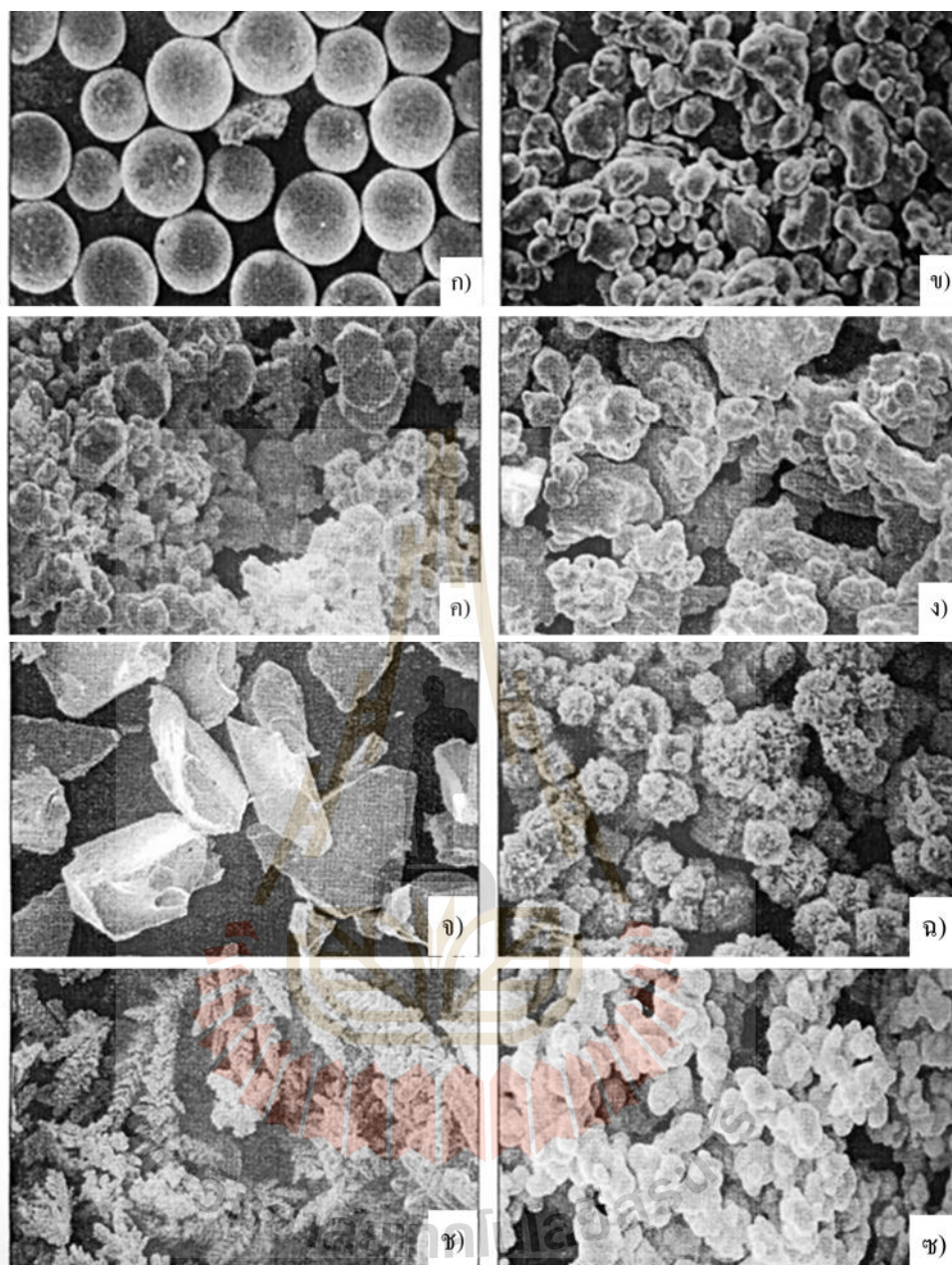
การบดใช้หลักการกระทบกันของลูกบดกับผงโลหะและการกระทบกันเองระหว่างผงโลหะด้วยกัน การบดจะทำโดยนำลูกบดและผงโลหะที่ต้องการบดบรรจุลงในถังบดมีลักษณะเป็นภาชนะทรงกระบอก แล้วหมุนถังบดอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการกระทบกันระหว่างลูกบดและผงโลหะ การกระทบกันนี้เกิดขึ้นซ้ำไปมาเรื่อย ๆ จึงทำให้ผงโลหะถูกย่อยให้มีขนาดตามต้องการ ลูกบดที่ใช้ในกระบวนการบดมักจะมีรูปร่างกลมหรือทรงกระบอก สำหรับวัสดุที่นิยมนำมาใช้ในการบดย่อยขนาดนี้ ได้แก่ เหล็กกล้า (Steel), อะลูมินา (Alumina) และเซอร์โคเนีย (Zirconia) เป็นต้น (สารัมภ์ บุญมี, 2557) รวมถึงใช้ในการลดขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างซิลิกากับคาร์บอนที่ความร้อนสูง

กระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ (Gas atomization)

การผลิตผงโลหะด้วยกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ สามารถแบ่งออกเป็นสามขั้นตอนคือ การหลอม (Melting) ในที่นี้คือการใช้ก๊าซเป็นตัวทำให้โลหะหลอมเหลว การเกิดอนุภาค (Atomization) และการแข็งตัวและเย็นตัว (Solidification and cooling) ขั้นตอนแรกคือทำให้โลหะหลอมเหลวและเกิดการแตกตัวโดยใช้ก๊าซเฉื่อยจำพวก อาร์กอน (Ar) ไนโตรเจน (N_2) หรือ ฮีเลียม (He) เป็นต้น ข้อได้เปรียบของกระบวนการอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซคือ รูปร่างของผงโลหะที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างกลมและเกิดออกไซด์ (Oxide) ค่อนข้างต่ำ ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ผลิตผงโลหะ ยกตัวอย่างเช่น เหล็ก อะลูมิเนียม ทองแดง แมกนีเซียม สังกะสี และดีบุก เป็นต้น (German, R.M. and Bose, A., 1997 และ สารัมภ์ บุญมี, 2557)

รูปร่างของผงวัสดุ (Powder shape)

รูปร่างของผงวัสดุมีผลกระทบต่อความสามารถในการไหลของผงวัสดุ การขึ้นรูป และกระบวนการเผาผนึก นอกจากนี้ยังสามารถทราบข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่ใช้ผลิตผงโลหะคร่าวๆได้ เนื่องจากกระบวนการผลิตผงโลหะแต่ละกระบวนการให้รูปร่างต่างกันออกไป รูป 2.2 เช่น การอะตอมไมเซชันด้วยก๊าซ ผงโลหะมักจะมีรูปร่างกลม (Spherical) ส่วนการผลิตผงโลหะด้วยวิธีการบด มักจะมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม (Angular) หรือรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerated) ซึ่งเครื่องมือที่นิยมใช้ศึกษารูปร่างของผงโลหะคือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 2.2 รูปทรงของผงวัสดุ ก) spherical ข) Ligamental ค) Agglomerated cubes ง) Irregular จ) Angular ฉ) Spiky ช) Dendritic และ ซ) Spongy (German, R.M. and Bose, A., 1997)

ขนาดผงวัสดุ (Powder size)

ขนาดของผงวัสดุเกี่ยวข้องกับมิติของผงวัสดุโดยตรง ซึ่งวิธีการวัดขนาดของผงโลหะมีหลายวิธี ในแต่ละวิธีจะให้ขนาดผงโลหะที่วัดได้ต่างกันขึ้นอยู่กับหลักการที่ใช้วัดซึ่งขนาดผงโลหะเป็นคุณลักษณะที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่ง เนื่องจากเกี่ยวข้องกับปริมาณพื้นที่ผิวต่อ

หน่วยมวล ความสามารถในการไหลตัวของผงโลหะ การจัดเรียงตัวของผงวัสดุ (Particle packing) เวลาที่ใช้ในการเผาผนึก รวมถึงแรงที่ต้องใช้ในการขึ้นรูป การรายงานขนาดผงวัสดุนิยมรายงานด้วยค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่ากับทรงกลม โดยเทียบเท่าตัวแปรต่างๆ เช่น พื้นที่ผิว (D_s) ปริมาตร (D_v) พื้นที่ภาพฉาย (D_A) เป็นต้น สำหรับเทคนิคการวัดขนาดผงวัสดุสามารถทำได้หลายวิธีด้วยเช่นกัน เช่น วัดจากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Microscopy) วัดโดยใช้ตะแกรง (Screening) หรือใช้การวัดโดยการตกตะกอน (Sedimentation) (สารัมภ์ บุญมี, 2557) โดยใช้เทคนิค Laser particle size measurement เป็นต้น (Malvern Laser Diffraction, www, 2017)

พื้นที่ผิว (Surface diameter, D_s) คือเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับพื้นที่ผิวของผงวัสดุ พิจารณาได้จากสมการที่ 2.4 และ 2.5

$$S = 4\pi r^2 = \pi D^2 \quad (2.4)$$

$$D_s = (S/\pi)^{1/2} \quad (2.5)$$

ปริมาตร (Volume Diameter, D_v) คือเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของผงวัสดุ พิจารณาได้จากสมการที่ 2.6 และ 2.7

$$V = (4/3)\pi r^3 = (4/24)\pi D^3 = (\pi/6) D^3 \quad (2.6)$$

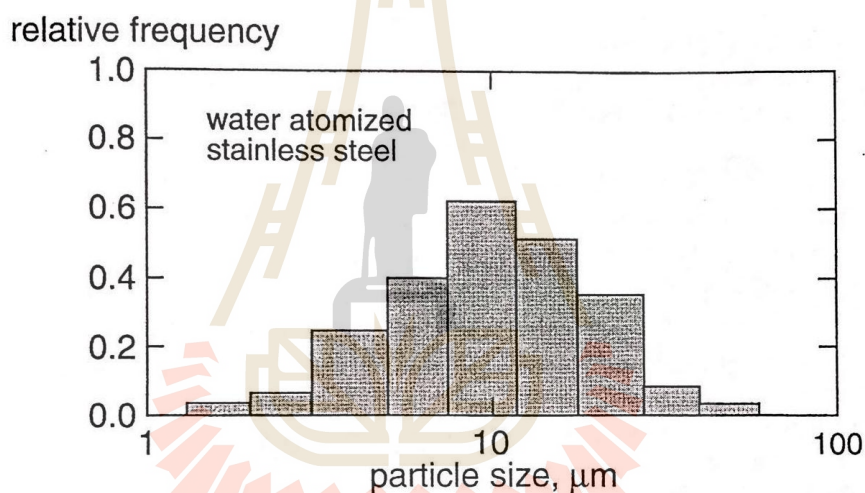
$$D_v = (6V/\pi)^{1/3} \quad (2.7)$$

พื้นที่ภาพฉาย (Project area diameter, D_A) คือเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลมที่มีพื้นที่ภาพฉายเท่ากับพื้นที่ภาพฉาย ของผงวัสดุ พิจารณาได้จากสมการที่ 2.8 และ 2.9

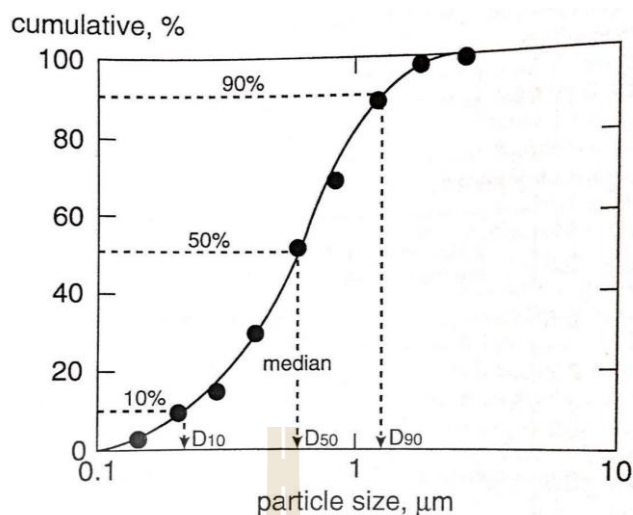
$$A = \pi r^2 = (\pi/4)D^2 \quad (2.8)$$

$$D_A = (4A/\pi)^{1/2} \quad (2.9)$$

การรายงานผลการวิเคราะห์ขนาดผงวัสดุนิยมทำในสองรูปแบบคือ รายงานเป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความถี่ของจำนวนผงวัสดุที่มีขนาดอยู่ในแต่ละช่วง (Frequency plot) และกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การแจกแจงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสมของผงวัสดุที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดผงวัสดุที่ระบุ (Cumulative plot) ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ของความถี่กับขนาดอนุภาคผงวัสดุในสเกลล็อก รูป 2.3 จุดสูงที่สุดของกราฟ (mode) แสดงให้เห็นความถี่สูงสุดหรือการกระจายตัวของขนาดผงวัสดุสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ 10 ไมครอน ส่วนกราฟการแจกแจงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสม รูป 2.4 โดยทั่วไปจะแบ่งเป็นสามจุด ได้แก่ D_{10} D_{50} และ D_{90} คือการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ 10 50 และ 90 เปอร์เซ็นต์ ที่พบอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเทียบเท่ากับขนาดที่วิเคราะห์ได้ (German, R.M. and Bose, A., 1997)



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความถี่กับขนาดอนุภาคผงโลหะในสเกลล็อก
(German, R.M. and Bose, A., 1997)

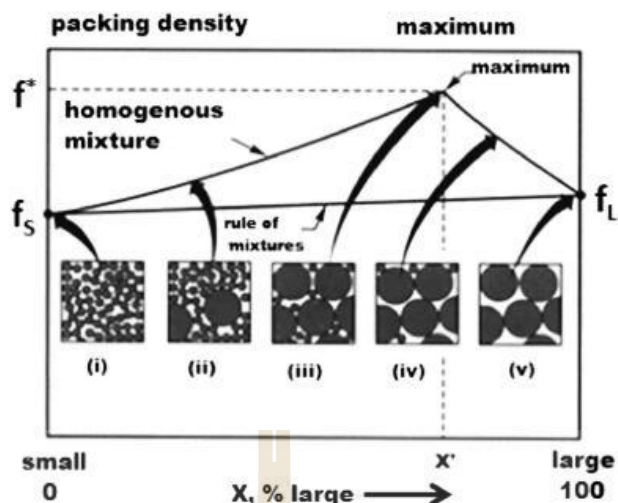


รูปที่ 2.4 กราฟการแจกแจงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสม

(German, R.M. and Bose, A., 1997)

ซึ่งทั้งลักษณะรูปทรงและขนาดของผงวัสดุนั้นจะส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของผงวัสดุ (Particle packing) ดังรูปที่ 2.5 จะสังเกตเห็นได้ว่าผงวัสดุที่มีขนาดเล็ก 100 เปอร์เซ็นต์นั้นมีความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวต่ำที่สุด (f_L) เมื่อเทียบกับผงวัสดุที่มีขนาดใหญ่ 100 เปอร์เซ็นต์ (f_U) โดยที่ความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวสูงที่สุดเกิดจากผงวัสดุที่มีขนาดเล็กผสมกันกับผงวัสดุขนาดใหญ่อย่างพอเหมาะ ซึ่งความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวสูงสุด (Maximum packing density, f^*) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10

$$f^* = f_L + (1 - f_L) f_s \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.5 ขนาดของผงวัสดุต่อความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของวัสดุ

(German, R. M., 1992)

สารยึด (Binder)

สารยึดที่ใช้สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปวัสดุผงเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญในการยึดจับอนุภาคหรือผงวัสดุให้สามารถคงรูปร่างอยู่ได้ อีกทั้งยังทำหน้าที่พาผงวัสดุเข้าไปในแม่พิมพ์ ก่อนทำการเผาผนึก ซึ่งสารยึดที่ใช้ในกรรมวิธีการฉีดขึ้นรูปผงจะเป็นวัสดุพอลิเมอร์ ชนิด Thermoplastic ได้แก่ Polyethylene Polystyrene Polypropylene และ Waxes เป็นต้น ส่วน Stearic acid นิยมเติมลงไปเล็กน้อยเพื่อทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่น สารยึดที่ใช้ควรมีจุดหลอมตัวต่ำและความหนืดต่ำเพื่อช่วยให้ผงวัสดุสามารถไหลได้ขณะฉีดขึ้นรูป ง่ายต่อการกำจัดในขั้นตอนการแยกสารยึด การใช้สารยึดจะนิยมใช้หลายชนิดผสมกัน (Multi-component binder) เนื่องจากในขั้นตอนการแยกสารยึดออกนั้น สารยึดจะถูกกำจัดออกทีละชนิดเพื่อให้สารยึดที่เหลือทำหน้าที่ยึดคงรูปร่างชิ้นงานไว้ได้จนกระทั่งถึงกระบวนการการเผาผนึก ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิหลอมเหลวของสารยึดชนิดต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงอุณหภูมิหลอมตัวและความหนาแน่นของสารยึดชนิดต่าง ๆ

(German, R.M. and Bose, A., 1997)

Material	Approximate melting point, °C	Density, g/cm ³
Paraffin wax	60	0.91
Carnauba wax	84	0.99
Polyethylene wax	>100	0.91
Polypropylene wax	140-200	0.9
Stearic acid	74	0.94

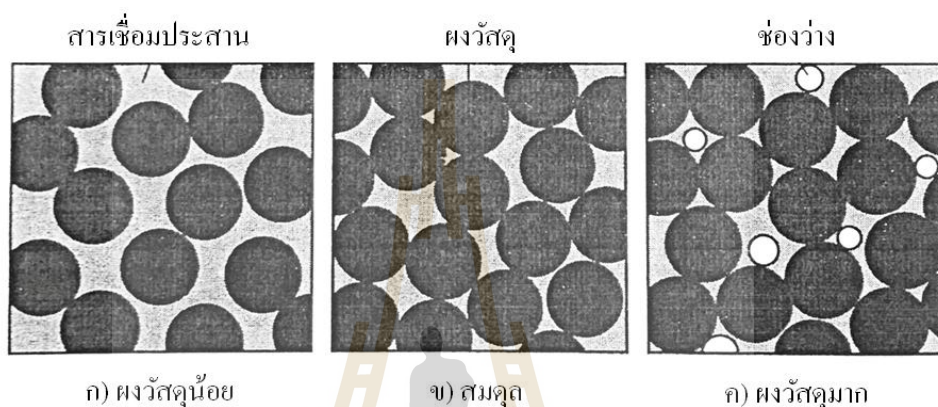
2.2.2 การเตรียมผงวัสดุสำหรับฉีดขึ้นรูป (Feedstock preparation)

วัตถุดิบที่ใช้สำหรับกรรมวิธีการฉีดขึ้นรูป หรือที่เรียกว่า Feedstock จะประกอบไปด้วยผงวัสดุ (Powder) และสารยึด (Binder)

การผสมผงวัสดุ (Powder mixing)

ในขั้นตอนการผสมผงวัสดุสำหรับฉีดขึ้นรูปเป็นขั้นตอนที่สำคัญเป็นอย่างยิ่งของกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง เนื่องจากอัตราส่วนของผงวัสดุและสารยึดจะเป็นหนึ่งในปัจจัยที่กำหนดรูปร่างสุดท้ายของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป กล่าวคือ หากการกำหนดอัตราส่วนระหว่างผงวัสดุและสารยึดไม่สมดุล เช่น อัตราส่วนของสารยึดน้อยเกินไป (ผงวัสดุมากเกินไป) รูป 2.6ค จะส่งผลให้ Feedstock มีความหนืดสูง และเกิดช่องอากาศ ทำให้การฉีดขึ้นรูปเป็นไปด้วยความยากลำบาก และในระหว่างการแยกสารยึด (Debinding) จะเกิดช่องว่างทำให้นำไปสู่การเกิดรอยแตกขึ้น ส่วนในกรณีที่อัตราส่วนของสารยึดมากเกินไป (ผงวัสดุน้อยเกินไป) รูป 2.6ก จะก่อให้เกิดการแยกกันระหว่างผงวัสดุและสารยึดนำไปสู่การเกิด Flashing คือ การเกิดขึ้นฟิล์มบาง ๆ ของสารยึดระหว่างรอยต่อของแม่พิมพ์ และที่สำคัญยังนำไปสู่การเกิดการยุบตัวของชิ้นงานเนื่องจากผงวัสดุไม่สามารถคงรูปร่างไว้ได้ในระหว่างการกำจัดสารยึดออก ดังนั้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูปจึงจำเป็นต้องเลือกอัตราส่วนของผงวัสดุและสารยึดให้เหมาะสม รูป 2.6ข เพื่อที่จะให้ผงวัสดุบรรจุแน่นโดยไม่มีแรงดันภายนอกมาเกี่ยวข้อง ซึ่งในแต่ละอนุภาคของผงวัสดุจะมีจุดสัมผัสกันปราศจากช่องว่าง และระยะห่างระหว่างผงวัสดุจะถูกเติมเต็มด้วยสารยึด (German, R.M. and Bose, A., 1997) และอีกประการสำคัญคือ การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันของผงวัสดุและ

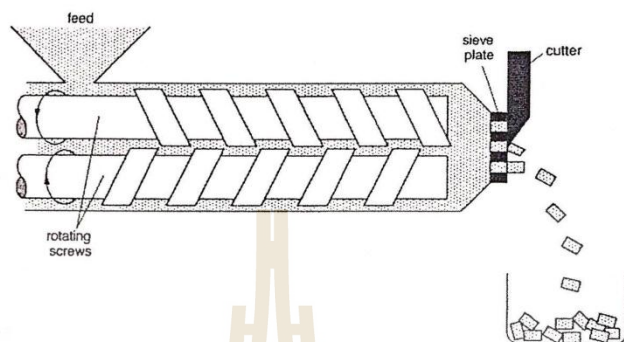
สารยึดซึ่งจะช่วยลดการแยกตัวในขณะฉีดขึ้นรูปและจะหดตัวตัวเท่าทุกทิศทาง ในขั้นตอนการแยกสารยึดและการเผาผนึก (Quinard, C. et al., 2009) โดยส่วนใหญ่แล้วปริมาณอัตราส่วนของผงวัสดุที่ใช้จะอยู่ในช่วง 50-65 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หากใช้สัดส่วนของผงวัสดุต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อาจจะทำให้ความสามารถในการเผาผนึกและความหนาแน่นสุดท้ายลดลง (Merz, L. et al., 2002)



รูปที่ 2.6 ปริมาณการเติมผงวัสดุและสารยึด ก) ปริมาณผงวัสดุน้อยเกินไป ข) ปริมาณผงวัสดุและสารยึดในปริมาณที่เหมาะสม และ ค) ผงวัสดุมากเกินไป (German, R. M. and Bose, A., 1997)

ผงวัสดุและสารยึดจะต้องผสมให้เป็นส่วนผสมสำหรับการฉีดขึ้นรูป (Feedstock) ซึ่งในอุตสาหกรรมการฉีดขึ้นรูปผงมีวิธีการผสมหลายวิธีการ ได้แก่ Twin-screw-extruder Doubleplanetary Single-screw-extruder Sigma blade และ Plunger extruder ในอุตสาหกรรมนิยมใช้วิธีการผสมแบบ Twin screw extruder ดังรูป 2.7 สกรูทั้งสองตัวจะหมุนและทำหน้าที่ผสมผงวัสดุและสารยึดเข้าด้วยกันจากนั้นสกรูจะผลักดันวัตถุดิบไปยังทางออกเพื่อนำได้คัดแยกขนาดแล้วตัดเก็บเป็นวัตถุดิบสำหรับฉีดขึ้นรูป ซึ่งคุณภาพของการผสมด้วยวิธีการดังกล่าวจะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ ความเร็วในการหมุน ส่วนผสมของวัตถุดิบ แต่จะมีข้อจำกัดคือต้นทุนสูง (German, R. M. and Bose, A., 1997) นอกจากนี้ยังมีวิธีการผสมผงโลหะโดยการกวนผสมหรือปรับปรุงสมบัติของผงโลหะก่อนทำการฉีดขึ้นรูป กล่าวคือจะทำการบดผสมผงวัสดุในภาชนะแบบปิด (Ball mill mixing) เพื่อปรับขนาดและรูปร่างของผงวัสดุ หรืออาจมีการเติมผงวัสดุอื่นผสมร่วมด้วย ยกตัวอย่างเช่น วัสดุเสริมแรงที่เป็นเส้นใยหรือเป็นผง เป็นต้น ซึ่งตัวแปรในการผสมผงวัสดุได้แก่ เวลาและ

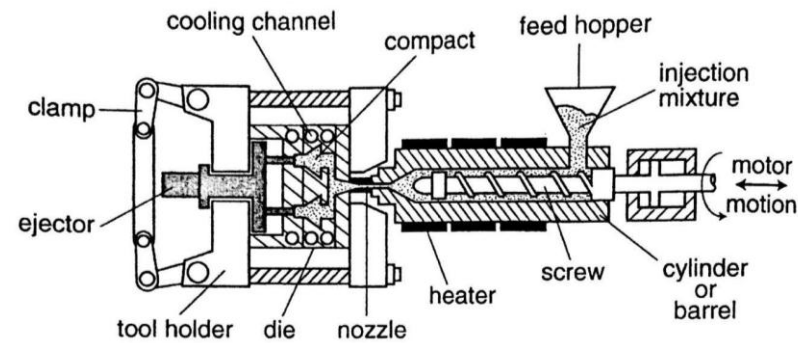
ความเร็วที่ใช้ผสม ขนาดผงวัสดุและบรรยากาศ การผสมที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของวัสดุเสริมแรง



รูปที่ 2.7 การผสมผงวัสดุและสารยึดด้วย Twin Screw Extruder
(สารัมภ์ บุญมี, 2557)

2.2.3 การฉีดขึ้นรูปผง (Powder injection moulding)

การฉีดขึ้นรูปผงเป็นการพัฒนาและประยุกต์โดยการนำความรู้จากเทคโนโลยีการฉีดพลาสติกกับกระบวนการทางโลหวิทยาโลหะผงเข้าด้วยกัน เครื่องฉีดขึ้นรูปผงวัสดุจะแตกต่างไปจากการฉีดพลาสติกก็คือวัสดุที่ใช้ทำกระบอกฉีด (Barrel) และสกรู (Screw) จำเป็นต้องมีความแข็งแรงสูง ทนต่อการเสียดสีจากผงวัสดุที่มีความแข็งแรงสูงได้ดี ในการฉีดผงวัสดุจะใช้อุณหภูมิตั้งแต่ช่วง 100-180 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับชนิดของสารยึด เพียงเพื่อให้สารยึดหลอมเหลวขณะที่ผงวัสดุยังคงเป็นของแข็งและนำพาผงวัสดุเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ง่าย ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้เหมาะสมไม่ต่ำเกินไป ซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะควบคุมรูปร่างสุดท้ายของชิ้นงานภายหลังจากการฉีดรูป กล่าวคือ หากอุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดผงวัสดุต่ำเกินไปอาจจะทำให้วัสดุไม่เต็มแม่พิมพ์ นอกจากนี้ความดันที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปก็มีความสำคัญที่เป็นตัวกำหนดการประสบความสำเร็จในการฉีดขึ้นรูปวัสดุ ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 15 - 30 MPa หากความดันไม่เพียงพอในการฉีดตั้งแต่สกรูเริ่มต้น Feedstock ให้ไหลจนกระทั่งเข้าสู่แม่พิมพ์อาจจะทำให้ฉีดได้ไม่เต็มแม่พิมพ์เช่นกัน แต่ถ้าหากใช้ความดันสูงเกินไปจะทำให้สารยึดแยกตัวไปอยู่ที่ Parting line ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอ การฉีดขึ้นรูปยังขึ้นอยู่กับอีกหลายตัวแปรได้แก่ ลักษณะของผง องค์ประกอบของสารยึด ความหนืดของ Feedstock การออกแบบและหลักการทำงานของเครื่องฉีดขึ้นรูป (German, R. M. and Bose, A., 1997)



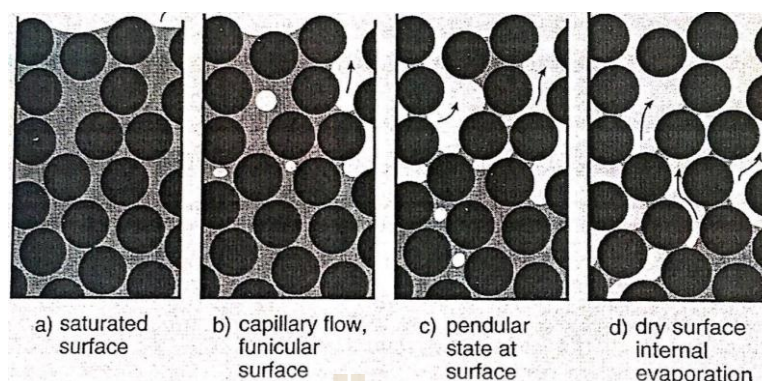
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่องฉีดขึ้นรูปผง

(German, R. M. and Bose, A., 1997)

2.2.4 การแยกสารยึด (Debinding)

การแยกสารยึดเป็นกระบวนการที่สำคัญของชิ้นงานภายหลังจากฉีดขึ้นรูป เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปนั้นจะประกอบไปด้วยผงวัสดุและสารยึดจึงต้องกำจัดสารยึดออก ซึ่งในขั้นตอนการกำจัดสารยึดนี้จะค่อยๆกำจัดสารยึดออกทีละชนิดเพื่อให้สารยึดที่เหลือทำหน้าที่ทรงรูปร่างให้กับชิ้นงาน สุดท้ายแล้วสารยึดจะถูกกำจัดหมดไปได้ด้วยความร้อนในขณะที่จะเข้าสู่กระบวนการเผาขึ้นรูป ซึ่งวิธีการแยกสารยึดมี 2 วิธี คือการแยกสารยึดด้วยตัวทำละลาย (Solvent debinding) และการแยกสารยึดด้วยความร้อนโดยการกลายเป็นไอ (Thermal debinding) การแยกสารยึดสามารถใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันได้ หากมีการใช้วิธีการแยกสารยึดร่วมกันมักจะใช้การแยกสารยึดด้วยตัวทำละลายเป็นวิธีการแรก

การแยกสารยึดด้วยตัวทำละลาย (Solvent debinding) จะทำโดยการจุ่มชิ้นงานลงในตัวทำละลายเพื่อเปิดรูพรุน (Open pore) บริเวณผิวของชิ้นงาน ซึ่งตัวทำละลายนี้จะกำจัดเฉพาะสารยึดเท่านั้นและไม่ปนเปื้อนกับผงวัสดุ จากนั้นจะแยกสารยึดโดยใช้วิธีการแยกสารยึดด้วยความร้อนโดยการทำให้กลายเป็นไอ (Thermal debinding) สำหรับวิธีการนี้จะอาศัยการถ่ายเทมวลสารแบบ Capillary flow โดยในช่วงแรกสารยึดจะเริ่มกลายเป็นไอจากบริเวณผิวด้านบนสุดก่อน รูป 2.9 แสดงกลไกการแยกสารยึดออกด้วยความร้อน (Thermal debinding) เมื่อสารยึดด้านบนระเหยออกไปจะทำให้เกิด Capillary force สารยึดที่อยู่ถัดไปจะถูกดึงขึ้นมาแทนที่ ในช่วงนี้อัตราการกำจัดสารยึดจะค่อนข้างคงที่และมีอัตราการกำจัดสูง หลังจากที่ผิวเริ่มปราศจากสารยึดแล้วจะทำให้เกิดการเกิด Capillary flow ซึ่งต่อไปจากนี้ก็จะเกิดการกลายเป็นไอของสารยึดเพียงอย่างเดียวและทำให้อัตราการกำจัดสารยึดช้าลงจนกระทั่งสารยึดระเหยหมดไปเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการ



รูปที่ 2.9 กลไกการแยกสารยึดออกด้วยความร้อน (Thermal debinding)

(German, R. M. and Bose, A., 1997)

2.2.5 การเผาผนึก (Sintering)

การเผาผนึก คือการให้ความร้อนกับชิ้นงาน โดยทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของผงวัสดุรวมไปถึงช่องว่างที่เกิดจากการสลายตัวออกไปของสารยึดภายหลังการกำจัดสารยึด (Debinding) ให้เกิดการเชื่อมประสานติดกัน ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากการเผาผนึกจะทำให้ชิ้นงานมีความแน่นตัวมากขึ้นจากการหดตัวของชิ้นงานและอาจจะทำให้รูพรุนลดลง สมบัติเชิงกลต่างๆของชิ้นงานจะขึ้นกับความสมบูรณ์ของการเผาผนึก ซึ่งความสมบูรณ์และคุณภาพของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความหนาแน่นเริ่มต้น ชนิดของผงวัสดุ รูปทรงและขนาดของผงวัสดุ บรรยากาศ อุณหภูมิ ระยะเวลาและอัตราการให้ความร้อนในการเผาผนึก สำหรับระยะเวลาที่ใช้ในการเผาผนึกจะต้องไม่เร็วเกินไปที่จะก่อให้เกิดการสะสมของสารมลทิน (Contamination trap) ณ บริเวณที่ผิวของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามหากใช้เวลาในการเผาผนึกนานเกินไป จะก่อให้เกิดการบิดเบี้ยว การยุบเสียรูปของชิ้นงานและอาจจะส่งผลให้เกิดเกรนโต เป็นผลทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

กลไกการถ่ายเทมวลสารในการเผาผนึก

กลไกการถ่ายเทมวลสารในการเผาผนึก คือ การลดพลังงานพื้นที่ผิวลง ด้วยการลดพื้นที่ผิวภายนอกของผงวัสดุและพื้นที่ผิวบริเวณขอบเกรน (Grain boundary) โดยที่ผงวัสดุจะมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรสูง ดังนั้นเมื่อทำการเผาผนึกพื้นที่ผิวของผงวัสดุจะลดลง การถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นเริ่มจากการนำชิ้นงานไปเผาผนึกจะเกิดการโตของคอคอด (Neck) ดังรูป 2.10 เมื่อเวลาการเผาผนึกนานขึ้น ผงวัสดุพยายามที่จะลดพื้นที่ผิวลง คอคอดค่อยๆ โตขึ้นทำให้รูพรุนมีลักษณะโค้งมนเมื่อเวลานานขึ้นเรื่อยๆคอคอดจะหายไป ผงวัสดุจะรวมตัวเป็นอนุภาคเดียวกันที่มี

ขนาดใหญ่กว่าอนุภาคเดิม ซึ่งในระหว่างที่ผงวัสดุพยายามลดพื้นที่ผิวที่จะเกิดการถ่ายเทมวลสาร ซึ่งกลไกการถ่ายเทมวลสารในกระบวนการเผาผนึกนั้นมีหลายรูปแบบ ประกอบไปด้วย การกลายเป็นไอและควบแน่น (Evaporation-Condensation) การแพร่ที่ผิว (Surface diffusion) การแพร่ในโครงร่างผลึก (Lattice Diffusion) การแพร่ที่ขอบเกรน (Grain boundary diffusion)

การกลายเป็นไอและควบแน่น (Evaporation-condensation)

เป็นการถ่ายเทมวลสารด้วยการกลายเป็นไอและการควบแน่น ซึ่งอะตอมของวัสดุจะเคลื่อนที่จากผิวด้วยการกลายเป็นไอแล้วจึงแพร่ผ่านบริเวณที่เป็นช่องว่างระหว่างผงวัสดุแล้วไปควบแน่นที่บริเวณคอคอด

การแพร่ที่ผิว (Surface diffusion)

เป็นการถ่ายเทมวลสารโดยอาศัยข้อบกพร่อง (Defect) ที่พื้นผิวเป็นตัวเคลื่อนที่ไปยังบริเวณคอคอด ซึ่งการแพร่ที่ผิวจะเป็นรูปแบบการถ่ายเทมวลสารที่ควบคุมการเผาผนึกในช่วงที่ชิ้นงานได้เริ่มรับความร้อน

การแพร่ในโครงร่างผลึก (Lattice diffusion หรือ Volume diffusion)

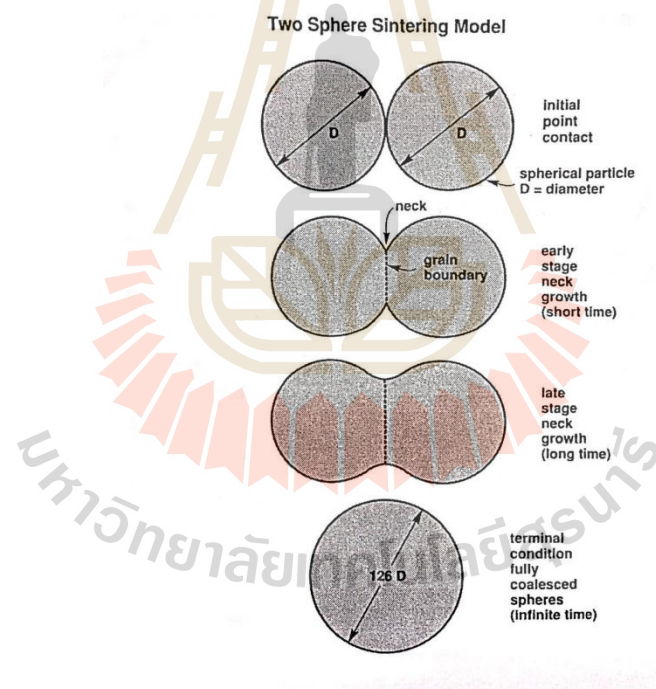
เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทช่องว่าง (Vacancy) โดยเส้นทางการถ่ายเทมวลสารชนิดนี้ จะมีการแพร่ 3 เส้นทางคือ เส้นทางแรกแพร่จากบริเวณผิวส่วนนูนไปยังบริเวณคอคอด เส้นทางที่ 2 แพร่จากบริเวณรอยต่อระหว่างผงวัสดุไปยังคอคอด ในเส้นทางการแพร่ที่ 2 นี้จะทำให้วัสดุเกิดการแน่นตัว (Densification) และเส้นทางสุดท้ายคือ การเคลื่อนที่ของ Dislocation

การแพร่ที่ขอบเกรน (Grain boundary diffusion)

เป็นกลไกการถ่ายเทมวลสารที่สำคัญมากในการทำให้เกิดการแน่นตัว (Densification) ของกระบวนการเผาผนึกผงโลหะ ซึ่งข้อบกพร่อง (Defect) ในขอบเกรน (Grain boundary) จะเป็นตัวทำให้การถ่ายเทมวลสารเกิดขึ้นได้ โดยกลไกการถ่ายเทมวลสารขึ้นกับขนาดของเกรน ซึ่งผงวัสดุมีขอบเกรนจำนวนมากส่งผลให้การแพร่ที่ขอบเกรนเป็นกลไกการถ่ายเทมวลสารที่ควบคุมอัตราการเผาผนึกของผงวัสดุ

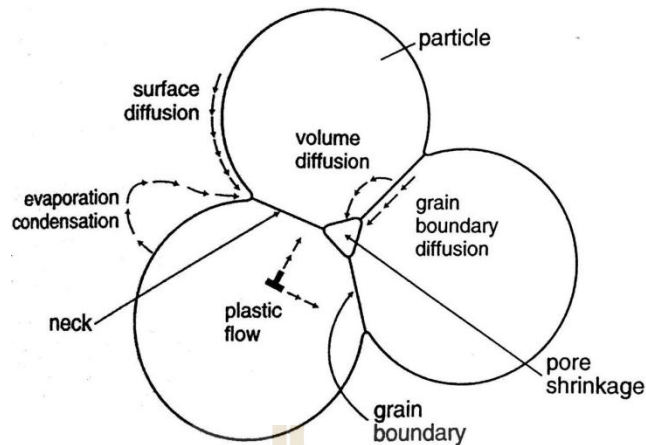
ซึ่งกลไกที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาผนึกจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละขั้นตอนของการเผาผนึก ขั้นตอนของการเผาผนึกแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ ช่วงเริ่มต้น (Initial stage), ช่วงที่สอง (Intermediate stage) และช่วงสุดท้าย (Final stage) ในช่วงแรกเริ่มมีการโตของคอคอด ทำให้พื้นที่ผิวเริ่มที่จะลดลง และมีรูพรุนอยู่จำนวนมากซึ่งเป็นรูพรุนแบบเปิดที่ได้จากการกำจัดสารยึด ซึ่งกลไกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลสารในช่วงนี้คือ กลไกการกลายเป็นไอและควบแน่น (Evaporation-Condensation) และกลไกการแพร่ที่ผิว (Surface diffusion) ดังรูป 2.11 เมื่อเข้าสู่ช่วงที่สองซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการแน่นตัว (Densification) สูงที่สุด เนื่องจากมีการลดลงของพื้นที่ผิว

มากขึ้นคือ ในช่วงนี้คอคอดจะเริ่มโตขึ้นทำให้อนุภาคเกิดการรวมกันบางส่วน ส่งผลให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงเรื่อยๆจนกระทั่งรูพรุนเริ่มไม่ต่อเนื่องกัน เข้าสู่ช่วงสุดท้าย อนุภาคของผงวัสดุจะขยายใหญ่ขึ้น ทำให้อุณหภูมิมีขนาดเล็กลง ซึ่งรูพรุนส่วนใหญ่จะถูกปิดกลายเป็น Closed pore รูพรุนและขอบเกรนจะต่อเนื่องกัน เนื่องจากรูพรุนช่วยลดพลังงานพื้นผิวของขอบเกรน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับขนาดและปริมาณของรูพรุน บางกรณีขอบเกรนสามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนไปได้เรียกว่า Break away ทำให้อุณหภูมิที่ขอบเกรนเคลื่อนผ่านจะเข้าไปเป็นช่องว่างอยู่ในชิ้นงาน (Internal pore) อาจจะทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงเหตุการณ์ดังกล่าว ซึ่งกลไกในการควบคุมการถ่ายเทมวลสารของช่วงที่สองและช่วงสุดท้ายได้แก่ กลไกการแพร่ในโครงร่างผลึก (Lattice diffusion) และการแพร่ที่ขอบเกรน (Grain boundary diffusion) (German, R. M. and Bose, A., 1997 และสารัมภ์ บุญมี, 2557)



รูปที่ 2.10 แบบจำลองการถ่ายเทมวลสารของอนุภาคทรงกลมในกระบวนการเผาผนึก

(German, R. M. and Bose, A., 1996)



รูปที่ 2.11 กลไกของการถ่ายเทมวลสารทั้งหมดที่เกิดขึ้นในขณะกระบวนการเผาผนึก

(German, R. M. and Bose, A., 1997)

การเผาผนึกเฟสของเหลว (Liquid phase sintering)

การเผาผนึกเฟสของเหลวนั้นเป็นเทคนิคการเผาผนึกโดยอาศัยการเกิดเฟสของเหลวในขณะเผาผนึก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการถ่ายเทมวลสารผ่านเฟสของเหลวเกิดได้เร็วกว่าการถ่ายเทมวลสารผ่านเฟสของแข็ง (Solid state diffusion) จึงทำให้มีอัตราการแน่นตัว (Densification rate) สูง ข้อได้เปรียบของการเผาผนึกเฟสของเหลว คือสามารถได้ความหนาแน่นสูงด้วยระยะเวลาอันสั้น แต่ก็มีข้อเสียเปรียบคือ เกิดการเปลี่ยนแปลงมิติรูปร่างของชิ้นงานมากซึ่งยากต่อการควบคุม ความแข็งแรงของชิ้นงานขณะเผาผนึกต่ำอาจจะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวเสียรูปได้ง่าย อีกทั้งยังไม่สามารถนำไปใช้ที่อุณหภูมิสูงได้เพราะชิ้นงานอาจจะเกิดเฟสของเหลวขึ้น ซึ่งหากต้องการให้เกิดเฟสของเหลวและเฟสของแข็งพร้อมกันอยู่จะต้องใช้ผงวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปที่มีจุดหลอมตัวต่างกัน ขั้นตอนของการเผาผนึกเฟสของเหลวมี 3 ขั้นตอน (สารัมภ์ บุญมี, 2557)

ขั้นตอน 1 Particle rearrangement

ขณะเผาผนึกเมื่ออุณหภูมิถึงจุดหลอมตัวทำให้มีเฟสของเหลวเกิดขึ้น ภายหลังจากการเกิดเฟสของเหลวแล้ว เฟสของเหลวจะแพร่ผ่านรูพรุนด้วย Capillary force ทำให้อนุภาคเฟสของแข็งเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ที่หนาแน่นขึ้น ซึ่ง Capillary force มีส่วนช่วยดึงให้อนุภาคเฟสของแข็งเข้าใกล้ชิดกันมากขึ้นหรือผลักให้ห่างออกจากกันมากขึ้น

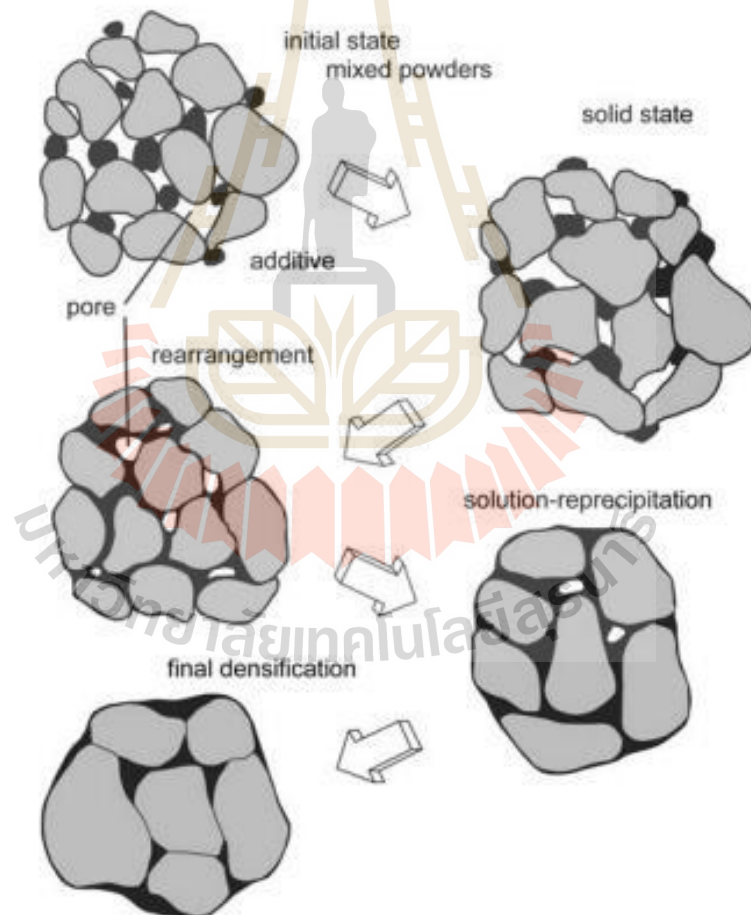
ขั้นตอน 2 Solution-precipitation

หลังจากเกิดเฟสของเหลวขึ้นและอนุภาคเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ จากนั้นเฟสของเหลวและของแข็งซึ่งมีส่วนผสมทางเคมีต่างกัน จะถ่ายเทมวลสารแพร่เข้าหากันและปรับ

ส่วนผสมทางเคมีเข้าสู่สมดุล โดยพยายามลดความแตกต่างของส่วนผสมทางเคมีทำให้เกิดความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization) เมื่อส่วนผสมทางเคมีเริ่มเข้าสู่สมดุล วัสดุเชิงประกอบเริ่มกลายเป็นของแข็งที่อุณหภูมิมิเฟอชนิกและเกิดการตกตะกอนจากเฟสของเหลวรอบๆอนุภาคของแข็งแบบ Heterogeneous nucleation และขั้นตอนนี้จะสิ้นสุดลงเมื่อเฟสของเหลวกลายเป็นของแข็งทั้งหมด

ขั้นตอน 3 Final densification

หลังจากเฟสของเหลวเกิดการตกตะกอนกลับไปเป็นของแข็งแล้วจะมีรูปร่างเป็นโครงข่ายไปตามบริเวณสันและขอบของเกรน โครงข่ายนี้มีผลทำให้อัตราการแน่นตัวต่ำลงเนื่องจากเกิดการหดตัวได้ยากขึ้นเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการเฟอชนิกเฟสของเหลว



รูปที่ 2.12 ขั้นตอนของการเฟอชนิกเฟสของเหลว

(German, R. M. and Bose, A., 1996)

2.3 วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีการฉีดขึ้นรูปผง

2.3.1 ผงวัสดุ

ผงอะลูมิเนียม (Aluminium powder)

ผงอะลูมิเนียมเป็นผงมีความไวไฟสูง ติดไฟได้ง่าย (Pyrosource Aluminium Powder, www, 2017) โดยผลิตขึ้นจากโลหะอะลูมิเนียมที่ถูกทำให้เป็นผงด้วยกรรมวิธีต่างๆ เช่น การบด (Milling), การอะตอมไมเซชัน (Atomization), กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical) เป็นต้น จนมีลักษณะเป็นผงที่มีรูปร่างแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับกรรมวิธีที่ใช้ในการผลิต (สารัมภ์ บุญมี, 2557) ซึ่งการนำผงอะลูมิเนียมมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการโลหวิทยา โลหะผงนั้นยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่ากับผงเหล็กกล้า ทองแดงและอื่นๆ เนื่องจากผงอะลูมิเนียมมีผิวออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีจุดหลอมตัวสูงและค่อนข้างเสถียรจึงทำให้เผาพูนิกเป็นไปได้ยากได้ยาก แต่อย่างไรก็ตามมีความพยายามที่จะขึ้นรูปโลหะผงอะลูมิเนียม เนื่องจากอะลูมิเนียมมีข้อได้เปรียบคือ สามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนในสภาวะปกติได้ดี มีความหนาแน่นต่ำ น้ำหนักเบา อัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง มีความเหนียวที่ดีขึ้นรูปทางกลง่าย (Total materia Aluminum Properties, www, 2017) สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการเติมธาตุผสม อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงความแข็งแรงและความแข็งแรงได้ด้วยกระบวนการทางความร้อน และกระบวนการขึ้นรูปเย็นได้ (พรวิสา วงศ์ปัญญา, 2551)

เกรดของอะลูมิเนียมผง

อะลูมิเนียมผงมีมากมายหลายเกรด เช่น Alumix 123 (AlCuMgSi), Alumix 321 (AlMgCu), Alumix 231 (AlSiCuMg), Alumix 431 (AlZnMgCu) เป็นต้น ผงอะลูมิเนียมเกรดที่ใช้ในการทดลอง คือ Alumix 123 (AlCuMgSi) ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีดังตารางที่ 2.2 จัดเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่สามารถเพิ่มความแข็งแรงและความแข็งแรงด้วยกระบวนการทางความร้อน โดยการตกตะกอนของเฟสที่สองหรือการบ่มแข็ง สมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของผงอะลูมิเนียม เช่น ขนาดอนุภาค (Particle size), ความหนาแน่น (Apparent density) และความสามารถในการไหลตัว (Flowability) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 (ECKA Granules Germany GmbH, Inspection certificate, ECKA Alumix 123, 2015)

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมเกรด Alumix 123 (AlCuMgSi)

Cu	Mg	Si	Fe
4.3-4.7 %	0.4-0.6 %	0.5-0.8 %	0.07 %

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของผงอะลูมิเนียม

สมบัติของผงอะลูมิเนียม	
Sieve analysis ISO 4497 residue	
>200 μm	0.8 %
>160 μm	5.8 %
>100 μm	26.0 %
>63 μm	40.8 %
>45 μm	15.4 %
<45 μm	11.1 %
Apparent density ISO 3923/1	1.08 g/cm^3
Flowability ISO 4490 5.0 mm	25.0 s

ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide)

เป็นวัสดุเซรามิกที่ประกอบด้วยสารประกอบระหว่างซิลิคอน (Si) และคาร์บอน (C) ที่เกิดจากการสังเคราะห์ขึ้น ซึ่งซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) มีสมบัติเด่นคือ สามารถทนต่อความร้อนและสารเคมีได้ดี มีค่าการนำความร้อนสูง จึงได้มีการนำซิลิคอนคาร์ไบด์ไปพัฒนาเพื่อใช้งานในด้านต่างๆ ซิลิคอนคาร์ไบด์สามารถแบ่งประเภทได้ตามโครงสร้างผลึก 2 ประเภทคือ โครงสร้างผลึกเป็นหกเหลี่ยม และโครงสร้างผลึกเป็นสี่เหลี่ยม (สุจินต์ พราวพันธุ์, 2540) เมื่อนำซิลิคอนคาร์ไบด์มาผสมในอะลูมิเนียมจะเป็นวัสดุเสริมแรงซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ทำให้อะลูมิเนียมมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและทำให้มอดูลัสความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น (Wang, H. et al., 2008) ตารางที่ 2.4 แสดงสมบัติทั่วไปของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (Accuratus Silicon Carbide Material Properties, www, 2017)

ตารางที่ 2.4 แสดงแสดงสมบัติทั่วไปของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

Hardness (kg/mm ²)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio, ν	Strength, σ (GPa)	Failure strain, ϵ (%)	Thermal expansion coefficient (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Thermal Conductivity (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	Density g/cm ³
2800	410	0.17	3.9	1.2	4.0	100	3.21

2.3.2 กระบวนการฉีดขึ้นรูปและเผาผนึกวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม

กระบวนการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุ (Powder injection moulding, PIM) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักคือ

ขั้นตอนที่ 1 การผสมผงวัสดุ (Powder mixing) การเตรียมส่วนผสมสำหรับฉีดขึ้นรูป (Feedstock) ได้กำหนดปริมาณอัตราส่วนผงวัสดุที่ใช้เท่ากับ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และสารยึด 45 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยในอัตราส่วนผงวัสดุ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรนั้นคิดเป็นการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุเสริมแรงที่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากผงอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์ 100 เปอร์เซ็นต์ สามารถคำนวณสัดส่วนผงวัสดุได้ดังสมการที่ 2.11 และ 2.12-1 ถึง 2.12-3

$$\text{Total weight (W}_T) = V_{f,Al} \rho_{Al} + V_{f,SiCp} \rho_{SiCp} + V_{f,Binder} \rho_{Binder} \quad (2.11)$$

ดังนั้นจะสามารถคำนวณน้ำหนักของผงวัสดุแต่ละชนิด สำหรับการเตรียมผงวัสดุ 100 กรัม ได้จาก

$$\text{Aluminium weight (W}_{Al}) = [(V_{f,Al} \rho_{Al}) \times 100] / W_T \quad (2.12-1)$$

$$\text{Silicon carbide weight (W}_{SiCp}) = [(V_{f,SiCp} \rho_{SiCp}) \times 100] / W_T \quad (2.12-2)$$

$$\text{Binder weight (W}_{Binder}) = [(V_{f,Binder} \rho_{Binder}) \times 100] / W_T \quad (2.12-3)$$

โดยในการเตรียมวัสดุผงฉีดขึ้นรูป (Feedstock) ปริมาณ 100 กรัม จะได้ว่า

$$100 \text{ g of feedstock, } W_{fs(100g)} = [(V_{f,Al} \rho_{Al} + V_{f,SiCp} \rho_{SiCp} + V_{f,Binder} \rho_{Binder}) \times 100] / W_T \quad (2.13)$$

เมื่อ $V_{f,Al}$ $V_{f,SiCp}$ และ $V_{f,Binder}$ คือ สัดส่วนปริมาตรของผงอะลูมิเนียม อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ และ สารยึด ตามลำดับ ρ_{Al} ρ_{SiCp} และ ρ_{Binder} คือ ความหนาแน่นของผงอะลูมิเนียม อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ และสารยึด ตามลำดับ มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ($g.cm^{-3}$)

ขั้นตอนที่ 2 การฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) หลังจากการเตรียมส่วนผสม สำหรับใช้ในการฉีดขึ้นรูป (Feedstock) จะทำการให้ความร้อนโดยการเพิ่มอุณหภูมิแก่กระบอกลัด (Barrel) เพื่อให้สารยึดที่ผสมลงไปผสมในผงวัสดุเริ่มหลอมตัวและไหลตัวได้ง่าย เพื่อนำพาผงวัสดุให้ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปจะต้องขึ้นกับอุณหภูมิการหลอมตัวของสารยึดเพื่อควบคุมไม่ให้สูงเกินไปจนกระทั่งสารยึดสลายตัวออกจากผงวัสดุ หรือต่ำเกินไป ทำให้เป็นอุปสรรคต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป เมื่ออุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมที่จะทำให้สารยึดหลอมตัวพร้อมสำหรับฉีดขึ้นรูปแล้ว จากนั้นสกรู (Screw) จะเคลื่อนที่โดยใช้แรงดันเพื่อผลักผงวัสดุให้เคลื่อนที่เข้าสู่แม่พิมพ์ได้เป็นชิ้นงานที่มีรูปทรงตามต้องการเรียกว่า Green part

ขั้นตอนที่ 3 การแยกสารยึด (Debinding) ซึ่งวิธีการแยกสารยึดมี 2 วิธี คือ 1) การแยกสารยึดด้วยตัวทำละลาย (Solvent debinding) เป็นการจุ่มแช่ชิ้นงานลงในตัวทำละลายที่ละลายเฉพาะสารยึดเท่านั้น ไม่ปนเปื้อนกับผงวัสดุ 2) การแยกสารยึดด้วยความร้อน (Thermal debinding) เป็นการแยกสารยึดด้วยการทำให้กลายเป็นไอ หากใช้สารยึดมากกว่า 1 ชนิด มักจะใช้วิธีการแยกสารยึดทั้งสองวิธีร่วมกัน โดยแยกด้วยตัวทำละลายก่อนแล้วจึงแยกด้วยความร้อน ซึ่งชิ้นงานที่ถูกแยกสารยึดออกแล้วจะเรียกว่า Brown part

ขั้นตอนที่ 4 การเผาผนึก (Sintering) ชิ้นงานที่ผ่านการแยกสารยึดออกแล้ว จะถูกนำมาผ่านกระบวนการเผาผนึกซึ่งอุณหภูมิที่ใช้จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 645-660 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจะเกิดการเชื่อมต่อเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากการเผาผนึกนั้นทำให้ชิ้นงานมีความแน่นตัวมากขึ้นและเกิดการหดตัวของชิ้นงานอาจจะทำให้ปริมาตรพูนในชิ้นงานจะลดน้อยลงอีกด้วย



รูปที่ 2.13 เครื่องฉีดขึ้นรูปผงวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

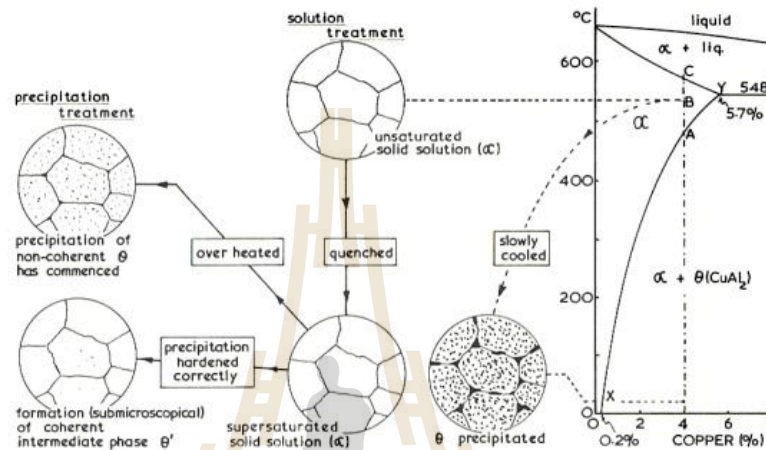
2.3.3 กระบวนการทางความร้อน (Heat treatment)

กระบวนการทางความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มสมบัติเชิงกลทั้งความแข็งและความแข็งแรงให้กับโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง สามารถนำไปบ่มแข็งได้โดยการทำให้เกิดการตกตะกอนเฟสที่สอง คือสารประกอบอะลูมิเนียม-ทองแดง (Al_2Cu) ในสภาพของแข็งโดยเรียกกระบวนการนี้ว่า Precipitation hardening หรือ Age hardening ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนคือ

ขั้นตอนที่ 1 การอบละลาย (Solution treatment) ตามด้วย การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) และ

ขั้นตอนที่ 2 การบ่มแข็ง หรือ Aging ดังรูปที่ 2.14 แสดงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ทำให้เกิดการตกตะกอนเฟสที่สอง (Precipitation hardening) คือ โลหะผสมอะลูมิเนียมจะยอมให้ทองแดงละลายเป็นสารละลายของแข็งได้สูงสุด 5.7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 548 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิลดลงอย่างช้าๆ (Slowly cooled) ปริมาณของทองแดงจะละลายได้น้อยลงมากที่ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิต่ำ โดยที่ปริมาณของทองแดงที่เกินจุดอิ่มตัวจะไปรวมอยู่กับอะลูมิเนียมให้สารประกอบอะลูมิเนียม-ทองแดง (Al_2Cu) หรือเฟส θ (ฐาปนีย์ พัชรวิชญ์, 2550 และ พรพสา วงศ์ปัญญา, 2551) โดยเฟสดังกล่าวมีความเสถียรแต่มีขนาด

ใหญ่และไม่ยึดเหนี่ยวกับโลหะเนื้อพื้นทำให้มีความแข็งแรงโดยรวมน้อย ดังนั้นจึงใช้กระบวนการทางความร้อนประกอบด้วยการอบละลายและการบ่มแข็งเพื่อทำให้เฟส θ ดังกล่าวเกิดการตกตะกอนเป็นเฟสที่เล็กละเอียดและยึดเหนี่ยวกับเนื้อพื้นได้ดี (θ' หรือ θ'') ส่งเสริมความแข็งแรงและความแข็งแรงให้กับเนื้อพื้นโลหะดังรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 2.14 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่อัตราการเย็นตัวอย่างช้าๆ ผ่านกระบวนการทางความร้อนด้วยการตกตะกอนเฟสที่สอง (Higgins, R. A., 1993)

การอบละลาย (Solution treatment) และการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching)

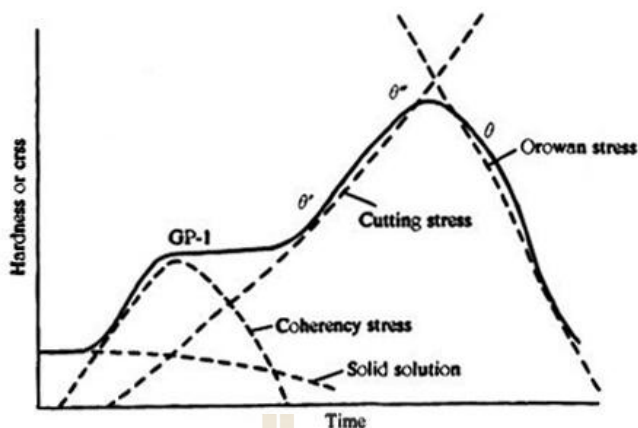
การอบละลาย (Solution treatment) ทำได้โดยอบให้ความร้อนแก่โลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดง จากอุณหภูมิห้องขึ้นไปอุณหภูมิประมาณ 500-550 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้เฟส α ทั้งหมด จากนั้นจึงนำโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงออกจากเตาชุบด้วยน้ำ (Water quenching) ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้เกิดเฟสที่มีสถานะกึ่งเสถียร (Metastable) ที่อุณหภูมิห้องเรียกว่าสารละลายของแข็งอิ่มตัวยิ่งยวด (Super Saturated Solid Solution) ที่มีปริมาณของทองแดงสูงกว่าปริมาณที่จะมีได้ในสภาพสมดุล และพร้อมที่จะเปลี่ยนแปลงไปสู่สถานะเสถียร (Stable) ทันทีเมื่อสภาวะต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิหรือเวลาเปลี่ยนแปลงไป (พรวิสา วงศ์ปัญญา, 2551)

การบ่มแข็ง (Aging)

การบ่มแข็ง (Aging) คือการควบคุมการตกตะกอนของธาตุผสมภายในเนื้ออะลูมิเนียม โดยนำโลหะผสมที่ผ่านการชุบน้ำมาทิ้งไว้ที่อุณหภูมิที่เหมาะสมในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งอุณหภูมิที่ใช้บ่มแข็ง แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ ถ้าทำการบ่มแข็งที่อุณหภูมิห้องธรรมดา เรียกว่า การบ่มแข็งโดยธรรมชาติ (Natural aging) หากทำการบ่มแข็งสูงกว่าอุณหภูมิห้องเรียกว่า การบ่ม

แข็งเทียม (Artificial aging) การเลือกอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ต้องพิจารณาจากส่วนผสมที่มีอยู่ในโลหะผสมดังกล่าว เช่น ถ้าโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่มีปริมาณทองแดง 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จะนิยมใช้อุณหภูมิการอบละลายในช่วง 500-550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการบ่มแข็งเทียม 150-180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เป็นต้น (พรวสา วงศ์ปัญญา, 2551)

ซึ่งความแข็งแรงของโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงที่ผ่านกระบวนการบ่มแข็งจะมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการบ่มแข็ง (Aging time) แต่จะให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด ณ ระยะเวลาการบ่มแข็งช่วงหนึ่งแล้วค่าความแข็งแรงจะลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ในขณะที่ทำการบ่มแข็งนั้นจะเกิดการตกตะกอนของอะตอมทองแดงขึ้น ซึ่งค่าความแข็งแรงจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็ง กล่าวคือหากใช้เวลาในการบ่มแข็งมากเกินไปจะเกิด Over aging ส่งผลให้ความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นค่อยๆลดลงทำให้บ่มแข็งไม่สำเร็จ ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ จะเกิด GP zone ในช่วงแรก โดยพบว่าจะเกิดการรวมตัวกันของอะตอมทองแดงทำให้เกิดสนามความเค้น (Stress field) เล็กๆ ในโครงร่างผลึก (Lattice) ของอะลูมิเนียม ส่งผลให้โครงร่างผลึก (Lattice) เกิดการบิดเบี้ยว ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากนั้นความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออะตอมทองแดงมีการจัดเรียงตัวอยู่บนระนาบ {100} ของเฟสอะลูมิเนียม เรียกว่าเฟส θ'' หรือ Al_2Cu ที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่ดีกับโลหะอะลูมิเนียม กล่าวคือ มี Coherency ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและความแข็งแรงจะมีค่าสูงสุดเมื่อกลายเป็นเฟส θ' จากนั้นในขั้นตอนสุดท้ายจะเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของตัวอะตอมทองแดงกับพื้นอะลูมิเนียมทำให้เกิดสภาวะ Non-coherence ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลง เข้าสู่สมดุลเกิดเป็นเฟส θ ที่ไม่ให้ความแข็งแรง ดังนั้นสำหรับกระบวนการบ่มแข็งนี้ จำเป็นต้องมีการเลือกอุณหภูมิและระยะเวลาสำหรับใช้ในการบ่มแข็งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงที่ดีที่สุด (ฐาปนีย์ พัทธวิชัย, 2550 และ พรวสา วงศ์ปัญญา, 2551)



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มแข็งและค่าความแข็ง
(Total materia Strengthening Mechanisms of Metals, www, 2017)

2.4 ความต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance)

การสึกหรอ (Wear) เป็นการเปลี่ยนแปลงบริเวณผิวของวัสดุในลักษณะที่ไม่พึงประสงค์อันเนื่องมาจากเกิดการสูญเสียและหลุดออกของผิวหน้าวัสดุนั้น ๆ จากการถูกแรงกระทำขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสและเสียดสีกันระหว่างผิวของวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป เช่น การสึกหรอจากการไถลระหว่างผิว (Sliding wear) การขัดถูของอนุภาคกับผิว (Abrasion) การชนของอนุภาคขนาดเล็กหรือของไหลกับผิว (Erosion) เป็นต้น ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาด รูปร่าง และน้ำหนักชิ้นงาน (อาริยา เอี่ยมบุญ, 2554) ซึ่งการป้องกันหรือปรับปรุงความต้านทานต่อการสึกหรอของผิววัสดุสามารถทำได้หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การใช้สารหล่อลื่น การปรับปรุงผิวหน้าชิ้นงาน (Surface treatment) รวมไปถึงการเลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่อการสึกหรอที่ดี เช่น วัสดุเซรามิก หรือโลหะที่มีความแข็งสูง จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับป้องกันการเกิดการสึกหรอที่รุนแรง นอกจากนี้ยังมีการเคลือบผิวแข็งด้วย ทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ ซึ่งสามารถที่จะเพิ่มความแข็งให้กับวัสดุได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งวัสดุที่มีความแข็งผิวต่ำ การปรับปรุงผิวหน้าหรือการอบชุบผิวแข็งให้กับวัสดุสามารถใช้ในการเพิ่มความแข็งหรือเพิ่มความเรียบให้กับวัสดุ ยกตัวอย่างเช่น การทำคาร์บูไรซิง (Carburizing) การทำไนไตรดิง (Nitriding) รวมไปถึงการเตรียมผิวที่ตีมีความเรียบผิวสูง เป็นต้น (สยาม แก้วคำไสย์ รูปแบบการเสียหายของวัสดุ, 2554) ซึ่งกลไกการเกิดการสึกหรอแต่ละกลไกจะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ชนิดของวัสดุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัสดุ ลักษณะของแรงที่กระทำบนผิวชิ้นงาน อุณหภูมิที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงปฏิกิริยาเคมีที่อาจจะเกิดขึ้น

2.4.1 กลไกการสึกหรอ (Wear mechanisms)

การแบ่งกลไกการสึกหรอสามารถใช้เปรียบเทียบการสึกหรอแต่ละประเภทได้ และยังสามารถอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปแบบการสึกหรอที่เกิดขึ้นในวัสดุ รวมไปถึงทำนายอายุการใช้งานของวัสดุได้ ซึ่งวัสดุหนึ่งชนิดสามารถเกิดการสึกหรอหลายกลไกได้พร้อมๆกัน อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปนิยมแบ่งการสึกหรอตามประเภทของกลไกการสึกหรอออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear)

เกิดจากการที่เนื้อวัสดุหลุดหายไป อันเนื่องมาจากถูกขัดสีเป็นร่องลึก (2-body Abrasion) จากการเคลื่อนที่สัมผัสกันระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีความแข็งต่างกัน ทำให้วัสดุที่อ่อนกว่าถูกขัดสี หรือเกิดจากการที่มีสะเก็ดโลหะ สะเก็ดวัสดุที่มีความแข็งสูง หรือสะเก็ดที่เกิดจากการสึกหรอแล้วหลุดออกแทรกอยู่ระหว่างผิวสัมผัส (3-body Abrasion) ทั้งนี้การสึกหรอแบบขัดสีนี้มักเป็นผลเนื่องมาจากการสึกหรอแบบขีดขีดด้วย ซึ่งลักษณะความเสียหายที่เกิดจากการสึกหรอประเภทนี้จะปรากฏเป็นร่อง (Groove) รอยขีดข่วน (Scratch) รอยกด (Indentation) ที่ผิว ซึ่งเกิดจากการสูญเสียเนื้อวัสดุ (นิตินทร นรภัฏพิพาทษา, 2554)

การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear)

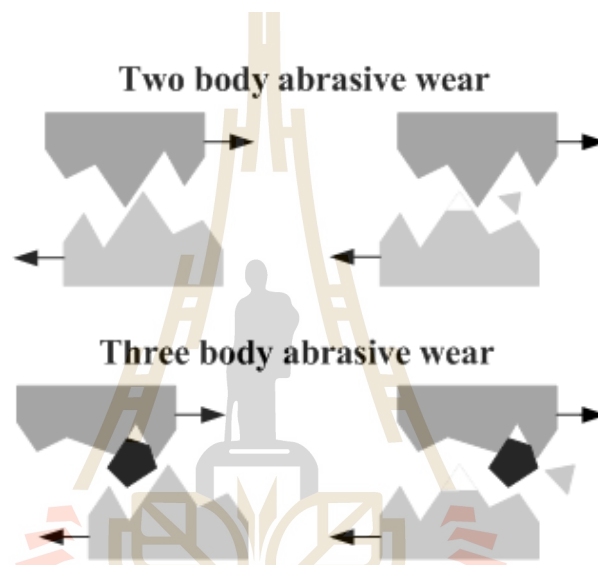
เกิดจากการเคลื่อนที่สัมผัสกันของผิววัสดุสองชนิด ซึ่งผิววัสดุบริเวณที่ถูกเสียดสีจะเสียดรูอย่างถาวรและเชื่อมติดกัน ในที่สุด เมื่อมีการเคลื่อนที่ต่อไปทำให้ผิวที่เชื่อมติดนั้นขาดออกจากกัน โดยที่วัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าจะสูญเสียเนื้อให้กับวัสดุที่มีความแข็งแรงมากกว่า กล่าวคือเนื้อวัสดุจะหลุดติดไปก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น โดยการสึกหรอแบบยึดติดนี้มักเกิดจากการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไถล (Sliding) และการหล่อลื่นไม่เพียงพอ มักเกิดเศษโลหะหรือสะเก็ดการสึกหรอ (Wear debris) ขึ้น (สยาม แก้วคำไสย์ รูปแบบการเสียหายของวัสดุ, 2554)

การสึกหรอแบบความล้า (Fatigue wear)

เกิดจากผิวสัมผัสของวัสดุสองชิ้นเคลื่อนที่สัมผัสกัน โดยที่วัสดุจะได้รับแรงกระทำแบบสลับซ้ำไปซ้ำมาเป็นเวลานาน ส่งผลให้ผิวชิ้นงานบริเวณที่สัมผัสกันเกิดรอยร้าว หรือรอยแยก (Spalling and fissuring หรือ Cracking) อันเป็นผลเนื่องมาจากการเสียดรูทั้งแบบถาวร (Plastic deformation) และแบบไม่ถาวร (Elastic deformation) (สยาม แก้วคำไสย์ รูปแบบการเสียหายของวัสดุ, 2554)

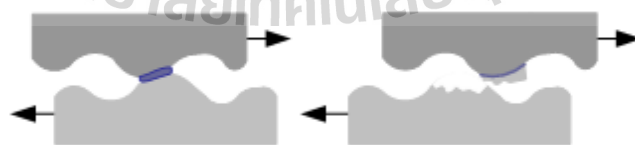
การสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosive wear)

เกิดจากการที่ผิวของวัสดุถูกปกคลุมด้วยชั้นฟิล์มออกไซด์ เมื่อวัสดุเคลื่อนที่สัมผัสกันจนเกิดการขัดสีระหว่างผิวทั้งสอง ชั้นฟิล์มออกไซด์จะแตกและหลุดออกกลายเป็นสะเก็ดการสึกหรอ หลังจากนั้นผิวของวัสดุจะสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ขึ้นมาใหม่เพื่อปกคลุมผิวและเกิดการสึกหรอขึ้นอีก ซึ่งการสึกหรอประเภทนี้จะเกิดขึ้นเป็นวัฏจักรของการสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ปกคลุมที่ผิววัสดุและเกิดการแตกหลุดออกชั้นฟิล์มออกไซด์ โดยที่การสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์นี้จะเป็นตัวกำหนดอัตราการสึกหรอของการสึกหรอแบบกัดกร่อน (นิติกร นรภัยพิพาษา, 2554)



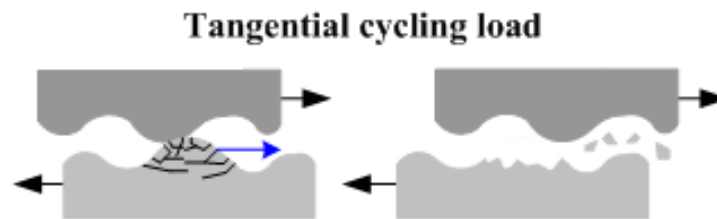
รูปที่ 2.16 กลไกการสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive Wear)

(Substech Mechanisms of wear, www, 2017)



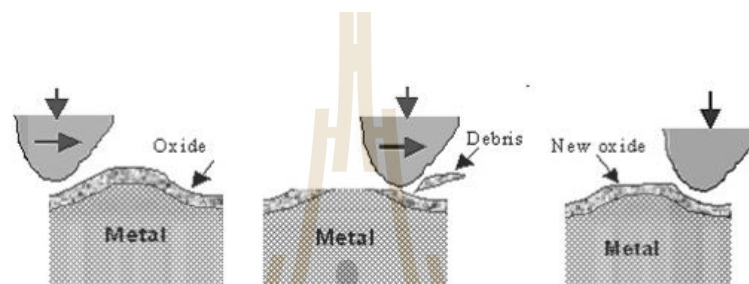
รูปที่ 2.17 กลไกการสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive Wear)

(Substech Mechanisms of wear, www, 2017)



รูปที่ 2.18 กลไกการสึกหรอแบบความล้า (Fatigue Wear)

(Substech Mechanisms of wear, www, 2017)



รูปที่ 2.19 กลไกการสึกหรอแบบกัดกร่อน (Corrosive wear)

(Emrtek Wear and Wear Mechanism, www, 2017)

2.4.2 การทดสอบการสึกหรอ

วิธีการทดสอบการสึกหรอที่นิยมใช้โดยทั่วไป ยกตัวอย่างเช่น การทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-disk, Pin-on drum, Ball-on-Flat, และ Block-on-Ring เป็นต้น ในการศึกษาวิจัยนี้ จะใช้วิธีการทดสอบการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat ตามมาตรฐาน ASTM G133-95: Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear 2002

การทดสอบการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat

การทดสอบการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat นี้เป็นการตรวจสอบการสึกหรอของวัสดุทดสอบ (Flat) ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ไปมาในแนวเส้นตรงของหัวบอล (Ball) ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็นหัวบอลจะใช้วัสดุตามมาตรฐาน โดยที่หัวบอลจะเป็นตัวให้แรงกระทำบนผิววัสดุทดสอบ ในขณะที่มีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเพื่อให้เกิดการสึกหรอ และทิศทางในการเคลื่อนที่ระหว่างพื้นผิวที่เลื่อนเป็นระยะๆ ในแนวเส้นตรง ดังรูปที่ 2.20 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบนี้จะถูกหัวบอลถูครูดไปมาทำให้เกิดลักษณะเป็นร่องบนผิวของวัสดุ ซึ่งปริมาตรที่สูญเสียไปของทั้งวัสดุทดสอบ (Flat) และหัวบอล (Ball) สามารถนำมาคำนวณปริมาณของการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นได้ โดยที่วัสดุที่ถูกนำมาทดสอบการสึกหรอนั้นจะต้องรายงานค่าเบื้องต้นต่างๆ

ยกตัวอย่างเช่น ชนิดของวัสดุทดสอบ (Flat) และ หัวบอล (Ball) ลักษณะพื้นผิวทดสอบ ความหยาบ พื้นผิว องค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างจุลภาค กระบวนการผลิต รวมไปถึงค่าความแข็งของวัสดุ เพื่อใช้เป็นองค์ประกอบสำหรับพิจารณาและวิเคราะห์พฤติกรรมการสึกหรอ ซึ่งการคำนวณและการวัดการสึกหรอของวิธีการทดสอบแบบ Ball-on-Flat จะขึ้นอยู่กับว่า วัสดุทดสอบ (Flat) จะต้านทานการสึกหรอได้มากหรือน้อยกว่าหัวบอล (Ball) หรือเกิดการสึกหรอทั้งวัสดุทดสอบ (Flat) และ หัวบอล (Ball)

กรณีเกิดการสึกหรอของหัวบอล (Ball) สามารถหาปริมาตรการสึกหรอ (Wear volume, V) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.14

$$\text{Ball volume loss, mm}^3 = (\pi h / 6) [3D^2 / 4 + h^2] \quad (2.14)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของเนื้อวัสดุที่สูญเสียไป (Height of material removed, mm) และ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter, mm)

สมมติให้ปริมาตรการสึกหรอเป็นทรงกลม เพราะฉะนั้นค่า h สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.15

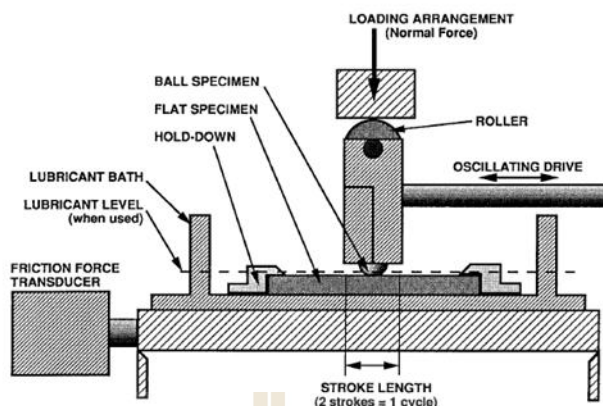
$$h = R - [R^2 - (D^2/4)]^{1/2} \quad (2.15)$$

เมื่อ R คือ รัศมีเริ่มต้นของลูกบอล (Original ball radius, mm)

กรณีเกิดการสึกหรอของวัสดุทดสอบ (Flat) ปริมาตรการสึกหรอ (Wear volume, V) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.16

$$\text{Flat volume loss, mm}^3 = A \times L \quad (2.16)$$

เมื่อ A คือ ค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดของร่องที่เกิดการสึกหรอ (Average cross-sectional area of the track, mm²) และ L คือ ความยาวของการขีดสี (Length of the stroke, mm)



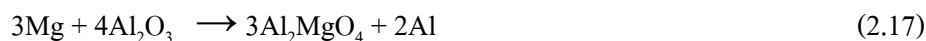
รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบการสึกหรอบแบบ Ball-on-Flat ตามมาตรฐาน ASTM 133-95

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การพัฒนากระบวนการขึ้นรูป การปรับปรุงสมบัติเชิงกล รวมไปถึงการเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม ทั้งนี้เพื่อสามารถขยายขอบเขตการใช้งานทางวิศวกรรมเพิ่มมากขึ้น โดยหากพิจารณากระบวนการขึ้นรูปผง ซึ่งกระบวนการที่สำคัญต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุภายหลังการขึ้นรูปผงนั้นคือการเผาผนึก ซึ่งในขั้นตอนการเผาผนึกนั้นจำเป็นที่จะต้องควบคุมบรรยากาศภายในเตาให้เหมาะสม เนื่องจากในขณะที่เผาผนึกออกซิเจนในอากาศอาจจะทำให้วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมกลายเป็นออกไซด์ได้ง่าย ดังนั้นส่วนใหญ่จึงทำการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เพราะฉะนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่มุ่งศึกษาสภาวะตัวแปรต่างๆ ที่ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและมีสมบัติที่ดีขึ้น เช่นการทำลายชั้นฟิล์มของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) หรือทำให้เกิดการเปื่อยระหว่างโลหะพื้นและวัสดุเสริมแรง เป็นต้น

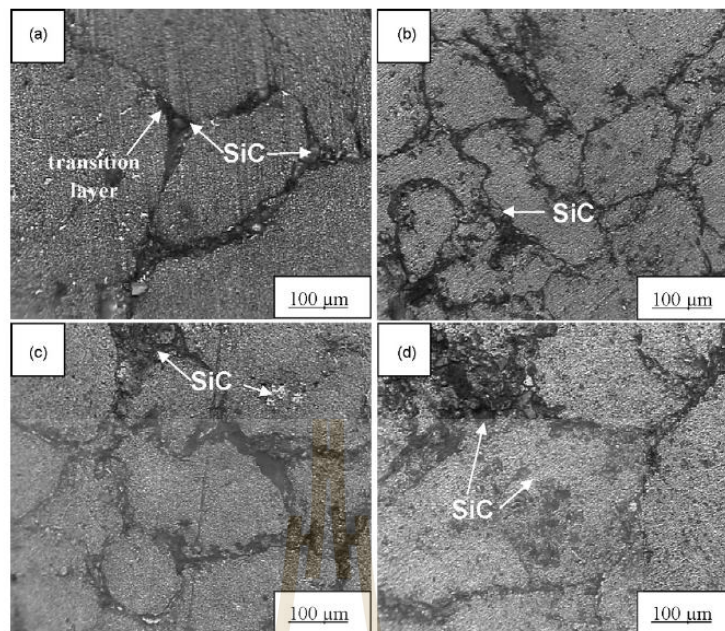
งานวิจัยของ Pieczonka T. et al. ได้ศึกษาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับบรรยากาศต่างๆ ในกระบวนการเผาผนึกที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกล และโครงสร้างจุลภาค ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน และอาร์กอน, แก๊สผสมระหว่างไนโตรเจน/ไฮโดรเจน และไนโตรเจน/อาร์กอน ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของโลหะอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.5%) ขณะเผาผนึกในสภาวะของแข็ง (Solid state sintering) พบว่า การเผาผนึกภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน 100% จะช่วยส่งเสริมการทำให้เกิดการแน่นตัว (Densification) และเกิดการฟอर्मตัวของสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) ถือว่าเป็นหัวใจสำคัญของการเผาผนึกที่มีประสิทธิภาพ โดยคาดว่าปฏิกริยานี้เริ่มต้นจาก การแพร่ของแมกนีเซียม

(ที่เป็นธาตุผสม) เข้าไปในชั้นฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ทำให้เกิดโครงสร้าง Spinel ของ Al_2MgO_4 ดังสมการที่ 2.17 จากนั้นไนโตรเจนจะทำให้เกิดการฟอร์มตัวของสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN)



ส่วนการเผาพริกภายใต้บรรยากาศแก๊สไฮโดรเจนทำให้ผลตรงกันข้าม โดยการเผาพริกภายใต้บรรยากาศแก๊สผสมไฮโดรเจนปริมาณ 1-5 เปอร์เซ็นต์ ลงในแก๊สไนโตรเจนทำให้การหดตัวระหว่างการเผาพริกลดลง ซึ่งชิ้นงานภายหลังจากการเผาพริกภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน พบว่ามีความหนาแน่นและความแข็งแรงดัดสูงสุดคือ 2.47 g/cm^3 และ 243 MPa ตามลำดับ ส่วนภายใต้บรรยากาศแก๊สผสมไฮโดรเจน 5 เปอร์เซ็นต์ ในไนโตรเจน 95 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่น 2.41 g/cm^3 และความแข็งแรงดัด 123 MPa

งานวิจัยของ Wang H. et al. ได้ศึกษาผลของการเคลือบอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยทองแดง ต่อความหนาแน่น ความแข็งของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ชิ้นงานถูกนำมาอัดขึ้นรูปและเผาพริกที่อุณหภูมิ 650 700 750 และ 800 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน ซึ่งจากการวิเคราะห์ โครงสร้างจุลภาคและเฟส พบว่า เริ่มมีการฟอร์มตัวของสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส โดยพบว่าการเผาพริกที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะส่งผลให้มีค่าความแข็งสูงสุดคือ 80 H_v สามารถอธิบายได้ว่า สารประกอบ Cu_2O เป็นตัวช่วยทำให้เกิดการเปียกกระหว่างซิลิคอนคาร์ไบด์และทองแดง เนื่องจากเกิด $\text{Si}_2\text{O}-\text{Cu}_2\text{O}$ eutectic ส่งผลให้โครงสร้างมีความแน่นตัวมากขึ้น เนื่องจากชั้นผิวบริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคดังกล่าว อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นที่ 800 องศาเซลเซียส พบว่ามีการเกิดเฟสของเหลวขึ้นจำนวนมาก ส่งผลให้อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์บางส่วนแยกตัวออกจากอะลูมิเนียมหรือทองแดงหลอมเหลว เนื่องจากความสามารถในการเปียก (Wettability) ลดลง ก่อให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 2.22 โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ SiC/Cu-Al ภายหลังจากเผาที่อุณหภูมิต่างกัน (a) 650 °C; (b) 700 °C; (c) 750 °C; (d) 800 °C (Wang, H. et al., 2008)

จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่เผยแพร่ผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆ เช่นการอัดขึ้นรูป การขึ้นรูปในสถานะของเหลวและกึ่งแข็งกึ่งเหลว ยังมีงานวิจัยเป็นส่วนน้อยที่ศึกษาเกี่ยวกับวัสดุชนิดนี้ที่ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของทีผ่านมาของ Inpanya B. et al. ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรที่ส่งผลต่อการฉีดขึ้นรูปผงวัสดุและการเผาของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร คือ ผลของเปอร์เซ็นต์ผงวัสดุ ผลของอุณหภูมิในการเผา และผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน จากการศึกษาปริมาณผงวัสดุที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป 52 55 และ 58 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่า ที่ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สามารถฉีดขึ้นรูปได้เต็มแบบ และมีผงวัสดุมากพอสำหรับกระบวนการเผาไหม้ ขณะที่ 58 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทำการฉีดขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากผงวัสดุมีความหนืดสูงและเกิดการแข็งตัวก่อนที่จะไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้เต็มแบบ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาไหม้ช่วง 660 – 700 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิในการเผาไหม้สูงขึ้นส่งผลต่อสมบัติของชิ้นงาน คือ ทำให้ชิ้นงานเกิดการแน่นตัว (Densification) ความหนาแน่น (Density) ค่าความแข็ง (Hardness) สูงขึ้นตามอุณหภูมิในการเผาไหม้ และปริมาณรูพรุน (Porosity) ลดลง และเกิดสารประกอบไนไตรต์ (AlN) ส่งผลต่อค่าความแข็งและการแน่นตัวของชิ้นงาน และศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน พบว่า อัตราการไหลของแก๊ส

ในโตรเจนที่ 1 ลิตรต่อนาที่สามารถทำให้ผงวัสดุเชื่อมประสานกันได้ดี ทำให้ชิ้นงานมีความแน่นตัวและความแข็งสูง

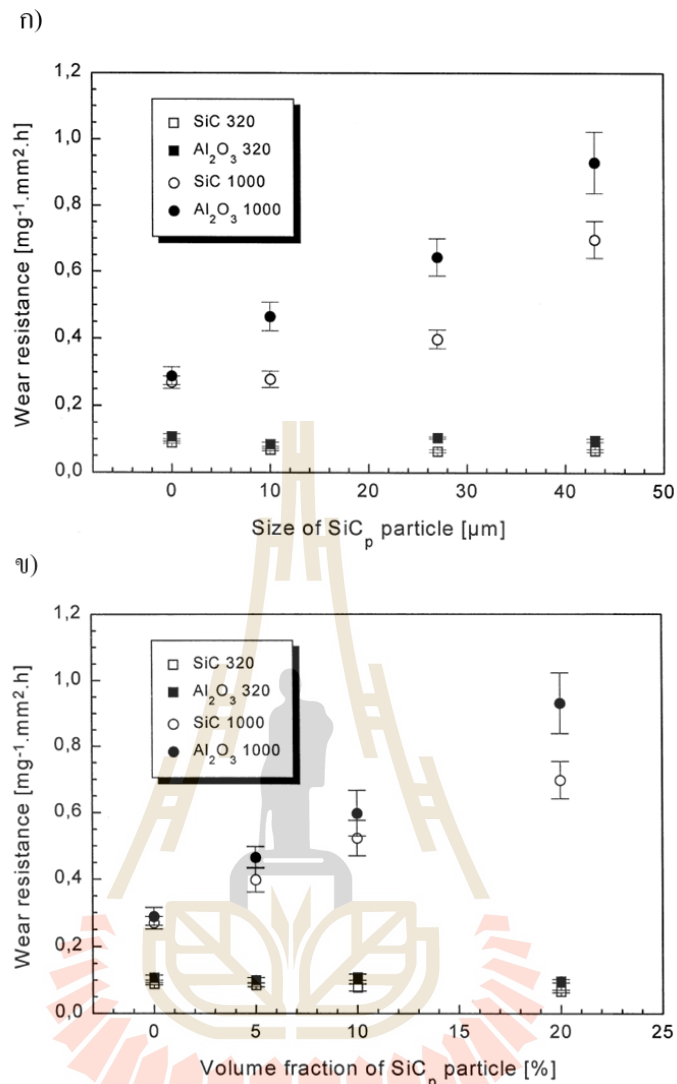
นอกจากนี้ Patcharawit T. et al. ยังได้มีการศึกษาสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง หลังจากวัสดุเชิงประกอบผ่านกระบวนการเผาผนึกเรียบร้อยแล้วจะนำไปปรับปรุงสมบัติเชิงกลด้วยการบ่มแข็ง จากนั้นชิ้นงานได้รับอุณหภูมิ 100 200 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 100 ชั่วโมง (Moderate temperature exposure) เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของสมบัติเชิงกล พบว่า ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิม $96 H_v$ เป็น $137 H_v$ ภายหลังจากการบ่มแข็งและในส่วนของคุณสมบัติความแข็งแรงดึงก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ต่อมาเมื่อชิ้นงานได้รับอุณหภูมิ 100 200 และ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ปรากฏว่าคุณสมบัติความแข็งเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ $183 H_v$ เมื่อผ่านการอบให้ร้อนด้วยอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เนื่องมาจากเกิดการตกตะกอนของเฟสที่สอง ในทางกลับกันเมื่อใช้เวลาในการอบนานยิ่งขึ้นเป็น 100 ชั่วโมง ส่งผลให้ค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงและต่ำที่สุดคือ $71 H_v$ ที่อุณหภูมิการอบให้ร้อน 300 องศาเซลเซียส ซึ่งเกิดจากการที่ใช้เวลาในการอบนานเกินไปจนกระทั่งเกิด Over aging กล่าวคือเกิดการสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมทองแดงกับเนื้อพื้นอะลูมิเนียมทำให้เกิดสภาวะ Non-coherence ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงดึงจะมีค่าสูงสุด 192 MPa ภายใต้อุณหภูมิการอบให้ร้อนที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 100 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวยังมิได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการขยายขอบเขตการใช้งานของวัสดุดังกล่าวโดยผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติการสึกหรอที่ได้นำเสนอไว้โดยผู้วิจัยอื่นดังนี้

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษาสภาวะและตัวแปรต่างๆ เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลด้านอื่นๆ เช่น สมบัติแรงดึง และความล้า เป็นต้น (Ogel, B., and Gurbuz, R. et al., 2001) อย่างไรก็ตามสมบัติด้านความต้านทานต่อการสึกหรอ ถือว่ามีความสำคัญเช่นเดียวกันในการใช้งานที่ต้องเกิดผิวสัมผัสระหว่างวัสดุหลายชนิด โดยตัวแปรที่ส่งผลต่อความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมที่ได้มีการศึกษา เช่น ขนาด ปริมาณ และการกระจายตัวของอนุภาคเสริมแรง เป็นต้น (Vieira, A.C. et al., 2009) ยกตัวอย่างเช่น

งานวิจัยของ De Mello J.D.B. et al. ได้ศึกษาอิทธิพลของขนาดและปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่แตกต่างกันคือ 10 27 และ 43 ไมครอน ในปริมาณ 5 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เพื่อเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับผงโลหะพื้นอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูป ร้อนต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสี (Three body abrasive wear) ในการทดสอบจะใช้วัสดุขัดสี

สองชนิดคือซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) และอะลูมินา (Al_2O_3) พบว่า การทดสอบการสึกหรอโดยใช้ อะลูมินาเป็นวัสดุขัดสีเกิดการสึกหรอน้อยกว่าใช้ซิลิคอนคาร์ไบด์ เนื่องจากความแข็งของอะลูมินา น้อยกว่าความแข็งของซิลิคอนคาร์ไบด์ อย่างไรก็ตามการเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จะช่วย ปรับปรุงความต้านทานการสึกหรอของวัสดุได้ดีขึ้น และจะมีความต้านทานต่อการสึกหรอเพิ่มขึ้น หากอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 10 เป็น 43 ไมครอน นอกจากนี้การเติมอนุภาค ซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณมากขึ้นจาก 5 เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และมีการกระจายตัวอย่าง สม่ำเสมอในพื้นที่เนื้อเมทริกซ์จะทำให้อัตราการสึกหรอลดน้อยลง





รูปที่ 2.23 ก) ขนาดของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อความต้านทานการสึกหรอ ที่ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ ข) สัดส่วนโดยปริมาตรของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อความต้านทานการสึกหรอ ที่ขนาด 43 ไมครอน (De Mello J.D.B. et al., 1999)

งานวิจัยของ Sawla S. et al. ได้ศึกษาผลกระทบของกระบวนการทางความร้อนและการเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอนที่ผลิตด้วยกระบวนการ Stir-casting ซึ่งโลหะผสมที่เติมวัสดุเสริมแรงลงไปเป็นวัสดุเชิงประกอบจะช่วยให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น สามารถต้านทานต่อการสึกหรอได้ดี เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบนี้จะมีอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้นของโลหะผสมอะลูมิเนียม ในส่วนของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการเพิ่มความแข็งแรงโดยการ

ตกตะกอนของเฟสที่สอง พบว่าโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนทำให้รูปร่างของซิลิคอนที่อยู่ผิวรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์เปลี่ยนแปลงไปจากลักษณะแผ่นเป็นค่อนข้างกลม ซึ่งรูปร่างที่ค่อนข้างกลมของซิลิคอนจะส่งผลให้มีแรงยึดเหนี่ยวที่ดีระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียม รวมไปถึงอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ไม่เกิดการแยกตัวออกมาทำให้วัสดุเชิงประกอบมีโครงสร้างจุลภาคสม่ำเสมอ เมื่อนำไปทดสอบความแข็งวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และผ่านกระบวนการทางความร้อนมีค่าความแข็งสูงสุดคือ 173 H_v ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพียงอย่างเดียวมีความแข็ง 159 H_v และพฤติกรรมการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบนั้นจะขึ้นกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งหากเนื้อพื้นอะลูมิเนียมมีแรงยึดเหนี่ยวที่ดีกับอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์จะช่วยให้อัตราการสึกหรอลดลงจากการทดสอบการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และผ่านการบ่มแข็ง พบว่าอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จะช่วยปกป้องเนื้อพื้นและยังช่วยขัดขวางการดำเนินไปของรอยแตกเมื่อเกิดการสึกหรอขึ้น ทำให้อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการบ่มแข็งต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่ได้ผ่านการบ่มแข็ง เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบที่มีการผ่านการบ่มแข็งเป็นมีการตกตะกอนของเฟสที่สองในเนื้อพื้น ส่งผลให้เนื้อพื้นมีความแข็งและความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ส่วนที่วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพียงอย่างเดียว พบว่าจุดกำเนิดและการดำเนินไปของรอยแตกอยู่ที่มุมของซิลิคอนที่มีรูปร่างแผ่น และเมื่อเกิดรอยแตกขึ้นอนุภาคของซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งเป็นวัสดุเสริมแรงที่มีความแข็งสูงมีแนวโน้มจะไปสะกัดเนื้อพื้นให้หลุดออกอีกด้วย

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงประโยชน์ของการเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในการเพิ่มสมบัติความต้านทานการสึกหรอของอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบด้วยเทคนิคและคุณลักษณะของวัสดุเสริมแรงที่แตกต่างกันออกไป แต่งานวิจัยเหล่านี้ ไม่ได้กล่าวถึงสมบัติความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผงซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการขึ้นรูปวัสดุเชิงประกอบ จึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษากรณีดังกล่าว เพื่อขยายขอบเขตการใช้งานทางวิศวกรรมของวัสดุเชิงประกอบ

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และการบ่มแข็ง (Age-hardening) ต่อความต้านทานต่อการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพีนอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การวิเคราะห์ผงวัสดุ (Powder characterisation)

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมส่วนผสมผงวัสดุสำหรับการฉีดขึ้นรูป (Feedstock preparation)

ขั้นตอนที่ 3 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (Powder injection molding)

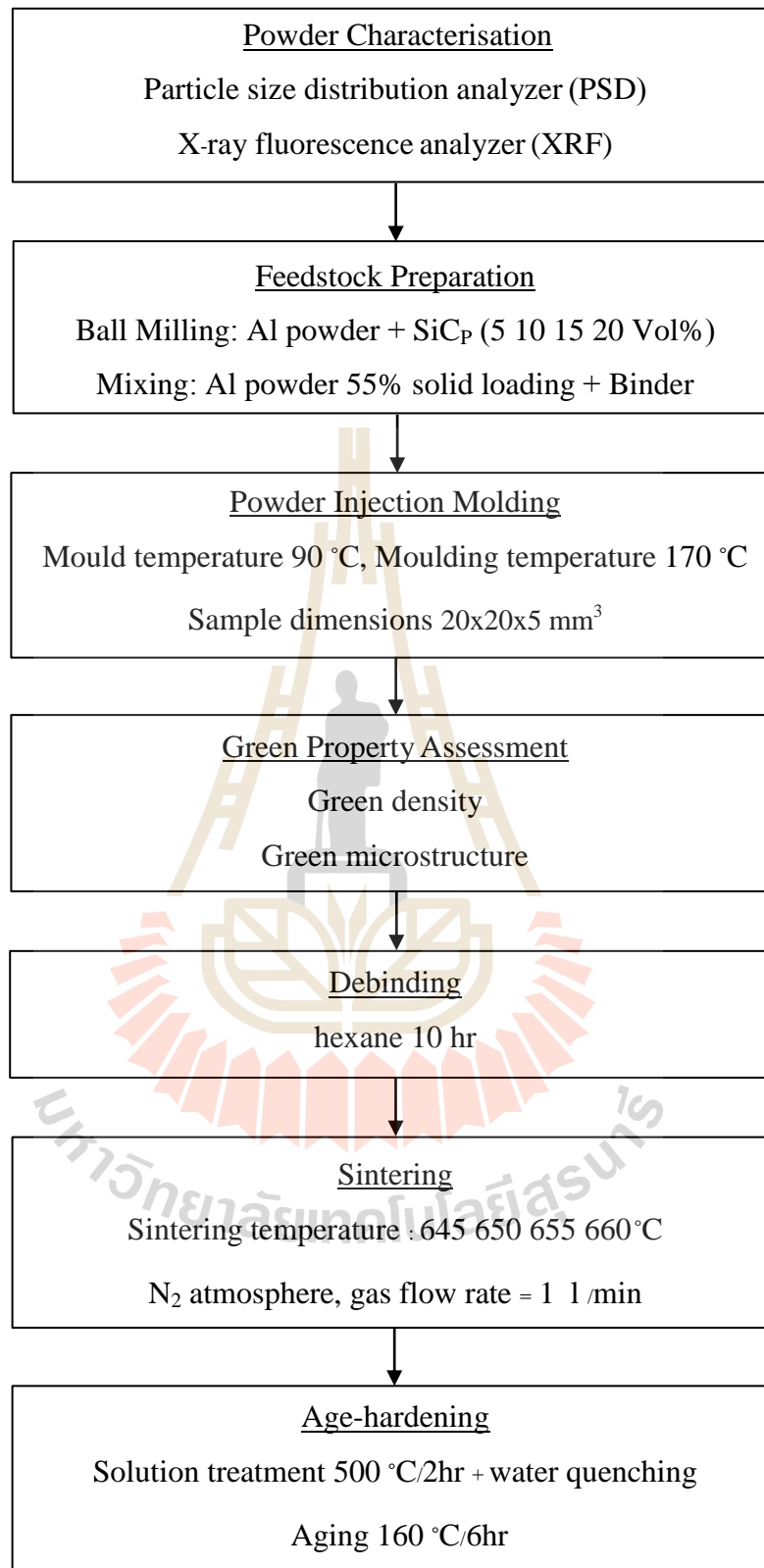
ขั้นตอนที่ 4 การแยกสารยึด (Debinding)

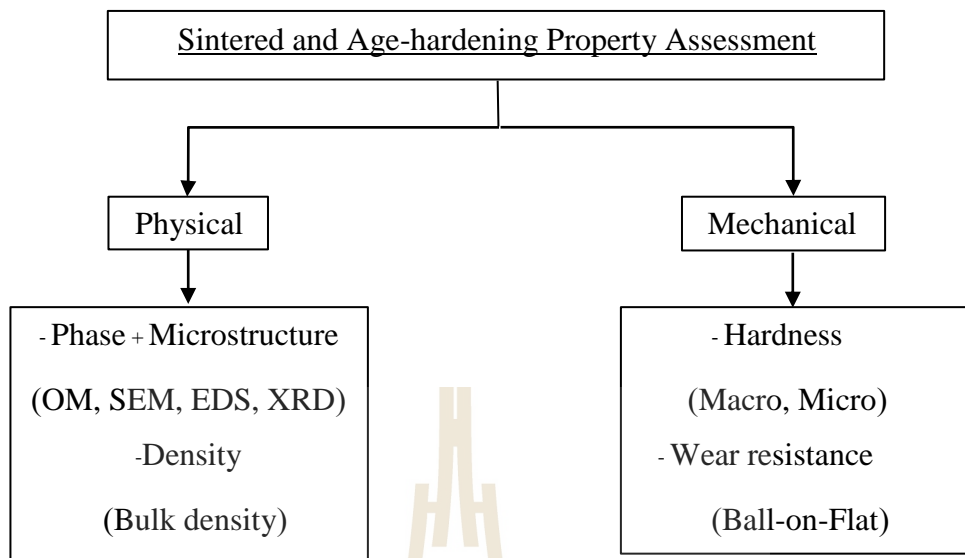
ขั้นตอนที่ 5 การเผาผนึก (Sintering)

ขั้นตอนที่ 6 การบ่มแข็ง (Age-hardening)

ขั้นตอนที่ 7 การตรวจสอบสมบัติของชิ้นงาน (Property assessment)

ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานตามแผนภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยจะกล่าวถึงรายละเอียดวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้





รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ผลิตด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

-ผงอะลูมิเนียม (Aluminium powder) เกรดทางการค้า Alumix 123 ขนาดผงเฉลี่ย

73 ไมครอน มีส่วนผสมทางเคมีดังตารางดังแสดงในตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนผสมทางเคมีของผงอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียม	ส่วนผสมทางเคมี			
	ทองแดง	แมกนีเซียม	ซิลิคอน	เหล็ก
Al 123	4.3-4.7 %	0.4-0.6 %	0.5-0.8 %	0.07 %

-อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide particulate) ขนาดอนุภาค 18-22 ไมครอน

-สารยึด (Binder) ประกอบไปด้วย โพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin wax : PW) และ กรดสเตียริก (Stearic acid : Sa)

-สเปรย์หล่อลื่นแม่พิมพ์ (Mould lubricant)

-สารละลายเฮกเซน (Hexane)

-ผงเพชรชนิดครีมและสารหล่อลื่น (Coolant, diamond lubricant, diamond paste mono crystalline 1.3 และ 9 μm)

3.1.2 ชุดอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

-เครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Laser particle size distribution analyzer) ยี่ห้อ HORIBA รุ่น LA-950

-เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence analyzer : XRF ยี่ห้อ PANalytical รุ่น PW-2404

-ชุดอุปกรณ์สำหรับเตรียมผงอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์

-เครื่องบดผสมผงวัสดุ (Ball milling) ยี่ห้อ P.S.C.M รุ่น PM-4

และชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการบดผสมผงอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์

-ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตส่วนผสม (Feedstock) สำหรับฉีดขึ้นรูป

-เครื่องฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (Powder injection moulding)

และชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับฉีดขึ้นรูป

-ชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแยกสารยึดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane)

-เครื่องมือวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบของวัสดุ (Simultaneous

Thermal Analyzer : STA) ยี่ห้อ NETZSCH รุ่น STA 449 F3 Jupiter

-เตาเผาแบบท่อและชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการเผาผนึก

-เตาเผาและชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการบ่มแข็ง

-เครื่องขัดแบบจานหมุน ยี่ห้อ BUEHLER รุ่น ECOMET 5

และชุดอุปกรณ์สำหรับขัดชิ้นงานด้วยกระบวนการทางโลหะวิทยาเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค และทดสอบการสึกหรอ

-เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์สารประกอบด้วยเทคนิค X-ray Powder Diffraction analyzer : XRD ยี่ห้อ BRUKER รุ่น D8 ADVANCE

-กล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope : OM) ยี่ห้อ OLYMPUS รุ่น BX51RF

-เครื่องทดสอบความแข็งระดับมหภาค (Macro vickers hardness tester) ยี่ห้อ WILSON WOLPERT รุ่น 450SVD

-เครื่องทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Micro vickers hardness tester) ยี่ห้อ FUTURE-TECH รุ่น FM-800

-เครื่องทดสอบความหยาบผิว (Roughness tester) ยี่ห้อ MITUTOYO รุ่น SV-400

-เครื่องทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat ยี่ห้อ BRUKER รุ่น UMT Tribolab ที่ศูนย์พัฒนาและวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) และชุดอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

-กล้องสเตอริโอ (Stereoscope) ยี่ห้อ LEICA รุ่น EZ4D

-กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6010LV พร้อมเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray spectroscopy : EDS

3.2 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การวิเคราะห์ผงวัสดุ (Powder characterisation)

-วิเคราะห์ขนาดของผงวัสดุด้วยเทคนิค Laser particle size distribution เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

-วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence

3.2.2 การเตรียมผงวัสดุสำหรับการฉีดขึ้นรูป (Feedstock preparation)

-ทำการปรับปรุงสมบัติที่ผิวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการทางความร้อน (Surface treatment) โดยเผาในเตาอบที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

-ทำการผสมผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เข้าด้วยกันโดยใช้วิธีการบดผสม (Ball milling) ซึ่งอัตราส่วนของผงวัสดุที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพื่อเป็นวัสดุเสริมแรงให้กับอะลูมิเนียมในปริมาณที่ต่างกันคือ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งวิธีการบดผสมนั้นจะใช้ลูกบดอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร ปริมาณ 265 กรัม ใสลงไปลงในขวดพลาสติกพร้อมกับผงวัสดุที่ต้องการผสมโดยใช้เวลาในการบดผสม 2 ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบ 280 รอบต่อนาที เมื่อบดผสมผงวัสดุเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการแยกผงวัสดุออกจากลูกบดอะลูมินา (Al_2O_3)

-เตรียมส่วนผสมผงวัสดุสำหรับการฉีดขึ้นรูปโดยใช้สารยึด (Binder) ในอัตราส่วน 45 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งจะประกอบไปด้วย อัตราส่วนของโพลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) 30 พาราฟินแว็กซ์ (Paraffin wax : PW) 65 และ กรดสเตียริก (Stearic acid : Sa) 5 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร เริ่มจากใช้เตาอบไฟฟ้าเพื่อทำการหลอมโพลีโพรพิลีนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นนำพาราฟินแว็กซ์และกรดสเตียริกมาหลอมโดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที

เมื่อสารยึดทั้งหมดหลอมเหลวแล้วนำออกจากเตาอบไฟฟ้า จากนั้นทำการกวนผสมกับผงวัสดุบนเครื่องให้ความร้อน (Hot plate) เพื่อให้ได้เป็นส่วนผสม (Feedstock) สำหรับใช้ในการฉีดขึ้นรูป

3.2.3 การฉีดขึ้นรูปวัสดุผง (Powder injection molding)

-นำส่วนผสม (Feedstock) ที่เตรียมไว้แล้ว ไปทำการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำการอุ่นแม่พิมพ์ก่อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และใช้น้ำยาหล่อลื่นฉีดลงที่แม่พิมพ์ จากนั้นติดตั้งแม่พิมพ์เข้าที่เครื่องฉีดขึ้นรูป แล้วทำการฉีดขึ้นรูปด้วยความดัน 45 MPa

3.2.4 การทดสอบสมบัติของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป (Green property assessment)

การวัดความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป

(Green density measurement)

-ภายหลังจากการฉีดขึ้นรูปนำชิ้นงาน (Green samples) ไปทดสอบความหนาแน่นรวม (Bulk density) ของแต่ละชิ้น สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.1 แล้วทำการหาค่าเฉลี่ยจะได้ความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป (Green density) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป (Theoretical green density) คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\rho = m/V_b \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นรวมของชิ้นงาน มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) m คือ มวล มีหน่วยเป็นกรัม (g) และ V_b คือ ปริมาตรรวมของชิ้นงานจากการวัดขนาด กว้าง x ยาว x หนา มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตร (cm^3)

$$\rho_{th} = V_{f,Al} \rho_{Al} + V_{f,SiCp} \rho_{SiCp} + V_{f,Binder} \rho_{Binder} \quad (3.2)$$

โดย $V_{f,Al}$ $V_{f,SiCp}$ และ $V_{f,Binder}$ คือ สัดส่วนปริมาตรของผงอะลูมิเนียม อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ และ สารยึด ตามลำดับ และ $V_{f,Al} + V_{f,SiCp} + V_{f,Binder} = 1$ จากการศึกษาวิจัยนี้เลือกใช้ $V_{f,Binder} = 0.45$ ดังนั้นจะได้ $V_{f,Al} = 0.495$ และ $V_{f,SiCp} = 0.055$ สำหรับการเตรียมส่วนผสมฉีดขึ้นรูปที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

-ใช้เครื่องวิเคราะห์พลังงานและปริมาณองค์ประกอบของชิ้นงาน (Simultaneous thermal analysis : STA) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานทางความร้อนของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป (Green samples) เมื่อชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงสถานะต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

เพื่อหาจุดหลอมตัวของวัสดุและสารยึด รวมถึงวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมวลสารของชิ้นงาน โดยแสดงผลเป็นน้ำหนักที่หายไปต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 900 องศาเซลเซียส มีอัตราการให้ความร้อน 40 องศาเซลวินต่อนาที ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจนที่อัตราการไหล 20 มิลลิลิตรต่อนาที

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป

(Green microstructure analysis)

-ทำการเตรียมชิ้นงานหลังจากการฉีดขึ้นรูป (Green samples) ไปหล่อตัวเรือนด้วยเรซิน เพื่ออำนวยความสะดวกต่อกระบวนการจัดชิ้นงาน จากนั้นนำไปขัดด้วยกระดาษทรายและนำชิ้นงานไปขัดหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 400 และ 600 ตามลำดับ จากนั้นนำไปขัดละเอียดด้วยผ้าขัดและผงเพชรชนิดคริมที่ขนาดตั้งแต่ 9 3 และ 1 ไมครอน ตามลำดับ เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วนำไปล้างชิ้นงานด้วยน้ำสะอาดและเป่าให้แห้ง

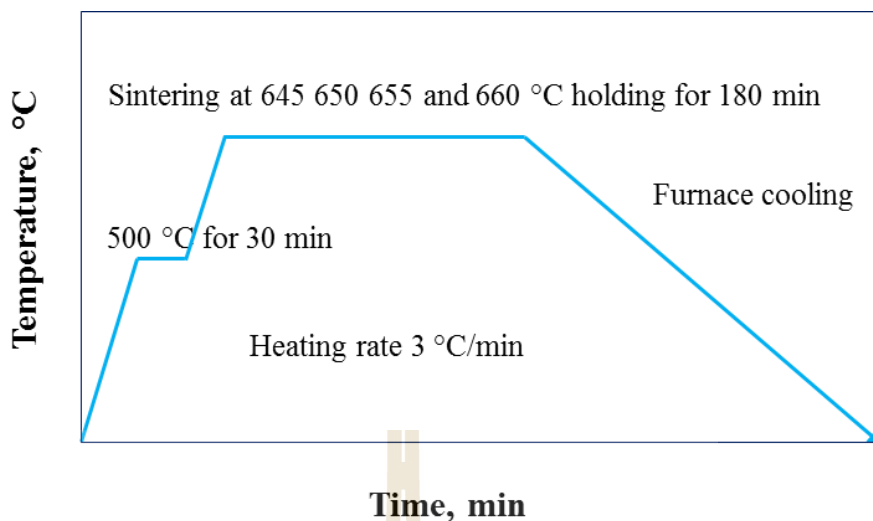
-นำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope) ที่กำลังขยายต่างๆ

3.2.5 การแยกสารยึด (Debinding)

-นำชิ้นงานหลังจากการฉีดขึ้นรูป (Green samples) มาทำการแยกสารยึดด้วยตัวทำละลายเฮกเซน (Hexane) โดยการจุ่มแช่ชิ้นงานลงในภาชนะที่มีฝาปิดซึ่งจะจุ่มแช่ทิ้งไว้เป็นเวลา 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิปกติ

3.2.6 การเผาผนึก (Sintering)

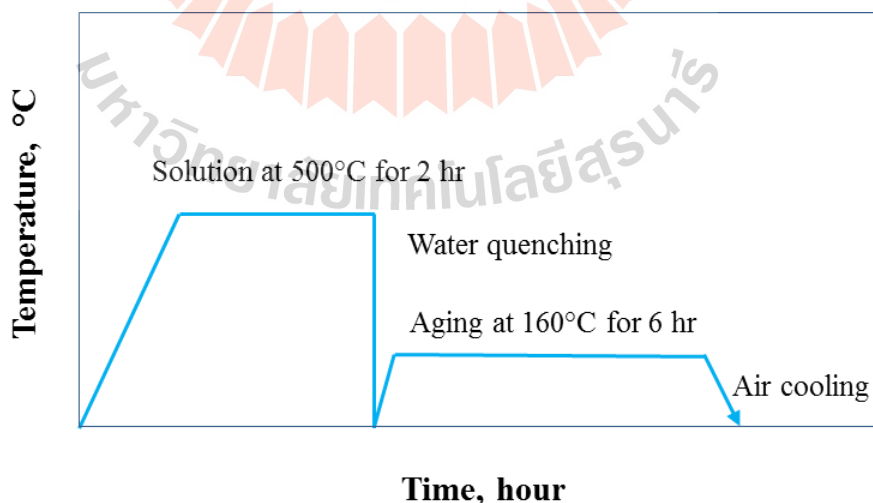
-ชิ้นงานที่ผ่านการแยกสารยึดออกแล้วนำมาทำการเผาผนึกโดยใช้เตาเผาแบบท่อ แนวนอน โดยใช้อัตราการให้ความร้อน (Heating rate) 3 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศ ก๊าซไนโตรเจนที่อัตราการไหล 1 ลิตรต่อนาที ซึ่งในกระบวนการเผาผนึกในขั้นแรกจะใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส แช่ไว้ 30 นาที มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสารยึดที่อาจจะหลงเหลืออยู่ในชิ้นงาน แล้วเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 645 650 655 660 องศาเซลเซียส ที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา



รูปที่ 3.2 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการเผาผนึก

3.2.7 การบ่มแข็ง (Age-hardening)

-ชิ้นงานภายหลังเผาผนึก (Sintered samples) แล้วจะนำมาบ่มแข็ง(Age-hardening) โดยทำการอบละลาย (Solution treatment) ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นเย็นตัวอย่างรวดเร็วในน้ำ แล้วทำการบ่มแข็งเทียม (Artificial aging) ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 แผนภูมิแสดงอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการบ่มแข็ง

3.2.8 ตรวจสอบสมบัติของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและบ่มแข็ง

(Sintered and age-hardened property assessment)

การตรวจสอบสมบัติของชิ้นงานทั้งภายหลังกระบวนการเผาผนึกและภายหลังการบ่มแข็งจะตรวจสอบทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล ซึ่งการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพประกอบไปด้วย การวิเคราะห์เฟสและโครงสร้างจุลภาค และการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงาน ในส่วนของการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานนั้นจะประกอบไปด้วย การทดสอบค่าความแข็ง และการทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ

การทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและบ่มแข็ง

(As-sintered and age-hardened density)

-นำชิ้นงานทั้งภายหลังกระบวนการเผาผนึกและบ่มแข็งมาวัดความหนาแน่นรวม (Sintered density)

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและบ่มแข็ง

(As-sintered and age-hardened microstructure analysis)

-ทำการเตรียมชิ้นงานเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกระบวนการทางโลหวิทยา จากนั้นนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบแสง (Optical microscope: OM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ที่กำลังขยายต่าง ๆ กัน รวมถึงการวิเคราะห์ธาตุด้วย Energy dispersive x-ray spectroscopy : EDS นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์สารประกอบด้วย เทคนิค X-ray powder diffraction analysis : XRD

การทดสอบความแข็ง (Hardness test)

-นำชิ้นงานทั้งภายหลังกระบวนการเผาผนึกและบ่มแข็งมาทดสอบความความแข็งระดับมหภาค (Macro vickers hardness) ภายใต้อารแรง 98 นิวตัน นอกจากนี้ยังทดสอบความแข็งระดับจุลภาค (Micro vickers hardness) ภายใต้อารแรง 0.98 นิวตัน

การทดสอบความต้านทานต่อการสึกหรอ (Wear resistance)

-นำชิ้นงานทั้งภายหลังกระบวนการเผาผนึกและบ่มแข็งมาวัดค่าความหยาบผิว (Roughness test) แล้วจึงนำไปทดสอบความความต้านทานต่อการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat ตามมาตรฐาน ASTM G133-95 โดยใช้เครื่องมือ ทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat โดยใช้วัสดุคู่สัมผัส (Mating material) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีรัศมีขนาด 4.76 มิลลิเมตร (3/16 นิ้ว) ความแข็ง 62 HRC ภายใต้อารแรงทดสอบ 5 25 45 และ 65 นิวตัน ทำการทดสอบภายใต้ อุณหภูมิปกติ ปราศจากสารหล่อลื่น ใช้เวลาในการทดสอบ 16 นาที 40 วินาที มีระยะทาง 100 เมตร ความยาวของรอยทดสอบ 10 มิลลิเมตร และความถี่ 5 เฮิรตซ์

-ขณะทดสอบการสึกหรอสามารถบันทึกผลค่าแรงกระทำตั้งฉาก (F_z) แรงเสียดทาน (F_x) และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (COF) มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน แรงกระทำ และเวลาที่ใช้ทดสอบ รวมถึงยังสามารถนำผลการทดสอบมาคำนวณโดยประมาณเพื่อหาอัตราการสึกหรอจำเพาะ (Specific wear rate, W_s) ได้จากสมการที่ 3.4

$$V_L = (W_L \times 10^{-3}) / \rho_{\text{sintered}} \quad (3.3)$$

$$W_s = V_L / F_z s \quad (3.4)$$

เมื่อ W_s คือ อัตราการสึกหรอจำเพาะ มีหน่วยเป็น ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนิวตันเมตร (mm^3/Nm) V_L คือ ปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานหลังจากการทดสอบการสึกหรอ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 ซึ่งสมมติให้ W_L คือ น้ำหนักที่หายไปของเนื้อวัสดุภายหลังการทดสอบการสึกหรอเพียงอย่างเดียว มีหน่วยเป็นกรัม (g) และ ρ คือ ความหนาแน่นของชิ้นงานหลังจากการเผาผนึก (Sintered density) มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g.cm^{-3}) ส่วน F_z คือ ภาระแรงที่ใช้ในการทดสอบ มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และ s คือ ระยะทางที่ใช้ทดสอบ มีหน่วยเป็นเมตร (m)

-นำชิ้นงานหลังจากการทดสอบการสึกหรอมาศึกษาพื้นผิวการสึกหรอและสะเก็ดการสึกหรอด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereoscope) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) พร้อมวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray spectroscopy: EDS

บทที่ 4

คุณลักษณะและสมบัติเบื้องต้นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม (Characterisation and properties of Al-composite)

ในบทนี้จะกล่าวถึงคุณลักษณะและสมบัติเบื้องต้นของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ประกอบไปด้วย โครงสร้างจุลภาค ความหนาแน่น ความแข็งของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป เสาผนึก และบ่มแข็ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์ผงวัสดุ (Powder characterisation)

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical composition)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมด้วยเครื่องมือวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-ray fluorescence โดยทำการวิเคราะห์ผงอะลูมิเนียมที่ไม่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรง (Unsieved aluminium powder) และผงอะลูมิเนียมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรง (Sieved aluminium powder) ขนาด 140 Mesh หรือ 105 ไมครอน ได้ผลดังตารางที่ 4.1 เมื่อนำผลจากการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกัน ปรากฏว่าผงอะลูมิเนียมที่ทำการร่อนผ่านตะแกรง 140 Mesh มีปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากที่ไม่ผ่านการร่อน 88.47 เป็น 89.01 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนทองแดงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจาก 2.91 เป็น 4.77 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนซิลิคอนและแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นในปริมาณเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้มีปริมาณออกซิเจนลดลงจากที่ไม่ผ่านการร่อน 6.74 เป็น 3.94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ผงอะลูมิเนียมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรง เพื่อลดผลกระทบของผงอะลูมิเนียมที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเป็นอุปสรรคในการฉีดขึ้นรูปวัสดุผง

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียม (Alumix 123) ด้วยเทคนิค XRF

Al powder	Al	Cu	O	Si	Mg	Fe
Unsieved	88.47	2.91	6.74	0.88	0.80	0.13
Sieved	89.01	4.77	3.93	1.01	1.11	0.12

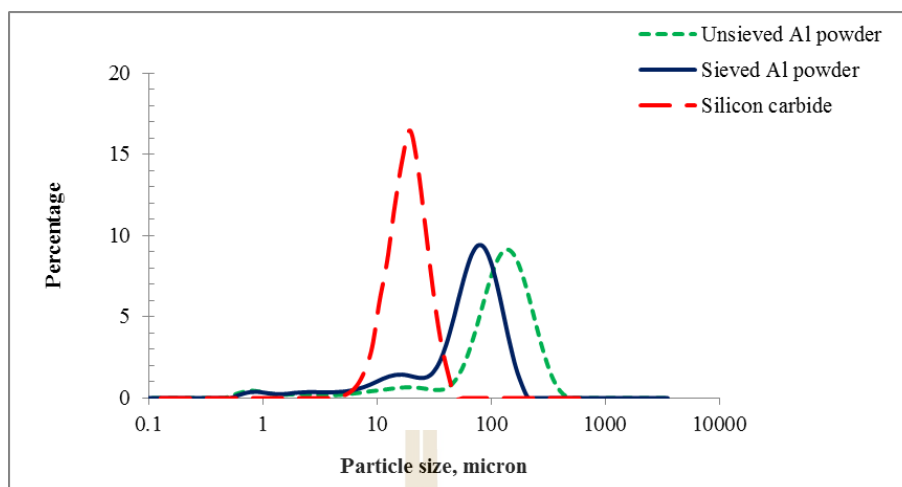
4.1.2 ขนาดผงวัสดุ (Particle size)

ขนาดของผงอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การกระจายตัวของขนาดอนุภาค (Laser particle size distribution) โดยการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสามารถแบ่งได้เป็นสามจุด ได้แก่ D_{10} , D_{50} และ D_{90} ซึ่งคือการกระจายตัวของขนาดอนุภาคสะสมที่ 10, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ผงอะลูมิเนียมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงมีขนาดเฉลี่ย 72.61 ไมครอน มีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ D_{10} , D_{50} และ D_{90} เท่ากับ 11.90, 71.22 และ 131.01 ไมครอน ตามลำดับ ส่วนผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่ามีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 21.02 ไมครอน นำผลการวิเคราะห์ขนาดของผงอะลูมิเนียมและซิลิคอนคาร์ไบด์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของจำนวนผงวัสดุเทียบกับขนาดผงวัสดุในสเกลล็อก ดังรูปที่ 4.1 ขนาดของผงอะลูมิเนียมที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงพบว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลง ส่วนผลการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่า มีขนาดผงเล็กกว่าผงอะลูมิเนียม และผงซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดใกล้เคียงกัน มีช่วงการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแคบกว่าผงอะลูมิเนียม เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาพิจารณาสัดส่วนของอนุภาคขนาดใหญ่ D_L เทียบกับอนุภาคขนาดเล็ก D_s (Particle packing ratio D_s/D_L) มีค่าเท่ากับ 3.45

ตารางที่ 4.2 ค่า D_{10} , D_{50} และ D_{90} ของ ผงอะลูมิเนียมและอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

Materials	D_{10} (μm)	D_{50} (μm)	D_{90} (μm)	Average size (μm)	S_w	D_L/D_s
Unsieved Al powder	22.84	131.34	251.95	139.66	2.46	3.45
Sieved Al powder	11.90	71.22	131.01	72.61	2.46	
SiC particulate	11.81	19.98	31.78	21.02	3.60	

**หมายเหตุ S_w คือ ค่าความชัน (Slop) ของกราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ D_{10} และ D_{90}

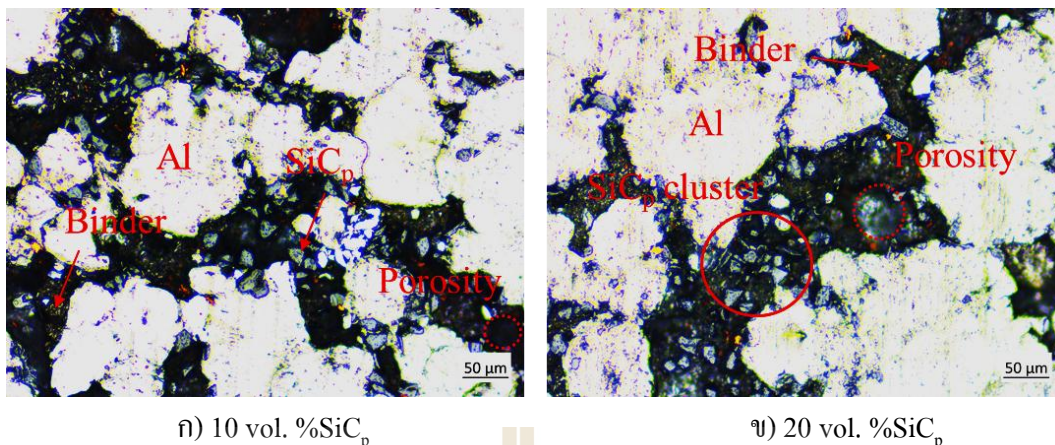


รูปที่ 4.1 กราฟการกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงวัสดุ

4.2 สมบัติของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูป (Green properties)

4.2.1 โครงสร้างจุลภาค (Green microstructure)

โครงสร้างจุลภาคภายหลังการฉีดขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งใช้เปอร์เซ็นต์ผงวัสดุในการฉีดขึ้นรูป (%Solid loading) 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าโครงสร้างจุลภาคประกอบไปด้วย ผงอะลูมิเนียมที่มีอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และสารยึดกระจายตัวอยู่ตามบริเวณรอยต่อของผงอะลูมิเนียม รวมถึงไปพบช่องว่างอยู่ในบริเวณสารยึดอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับกันระหว่างชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าเมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (SiC_p cluster) ที่บริเวณรอยต่อของผงอะลูมิเนียม



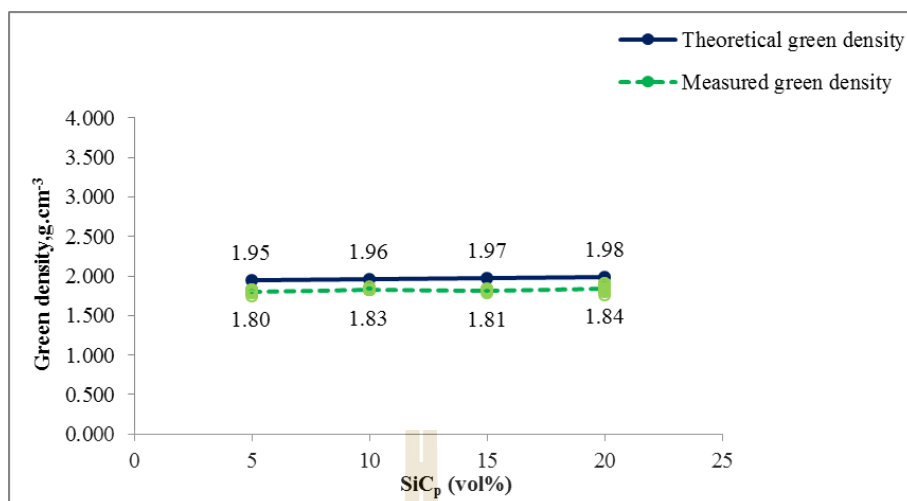
ก) 10 vol. %SiC_p

ข) 20 vol. %SiC_p

รูปที่ 4.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังฉีดขึ้นรูป

4.2.2 ความหนาแน่น (Density)

ผลการวัดความหนาแน่นรวม (Bulk density) ภายหลังจากการฉีดขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่มีปริมาณอัตราส่วนของผงวัสดุ 55 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงดังรูปที่ 4.3 โดยความหนาแน่นที่ของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 1.80 1.83 1.81 และ 1.84 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณที่แตกต่างกันจะมีค่าความหนาแน่นไม่ต่างกันมากนัก และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical density) ดังสมการที่ 3.2 พบว่าความหนาแน่นที่ได้จากการวัดมีค่าน้อยกว่า ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการฉีดขึ้นรูป โดยความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร คิดเป็น 92.61 93.29 92.12 93.04 เปอร์เซ็นต์ ของความหนาแน่นทางทฤษฎี ตามลำดับ



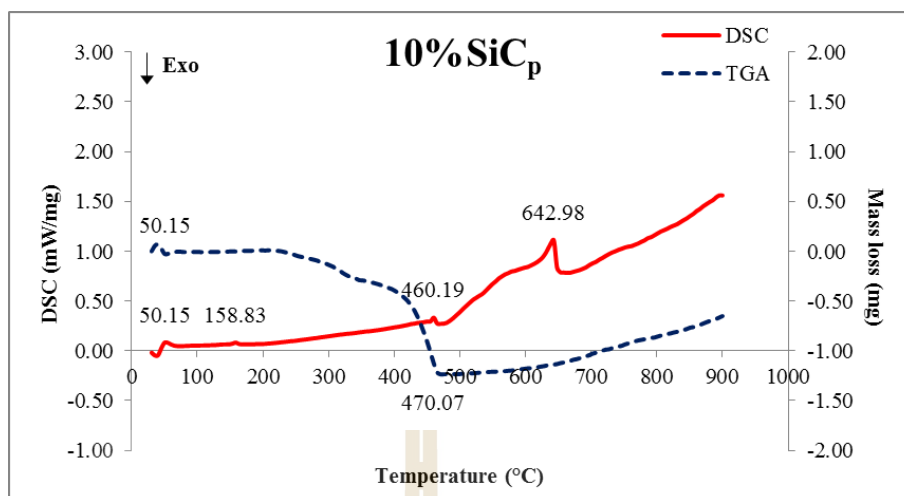
รูปที่ 4.3 ความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังฉีดขึ้นรูปเปรียบเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี

4.2.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน (Thermal analysis)

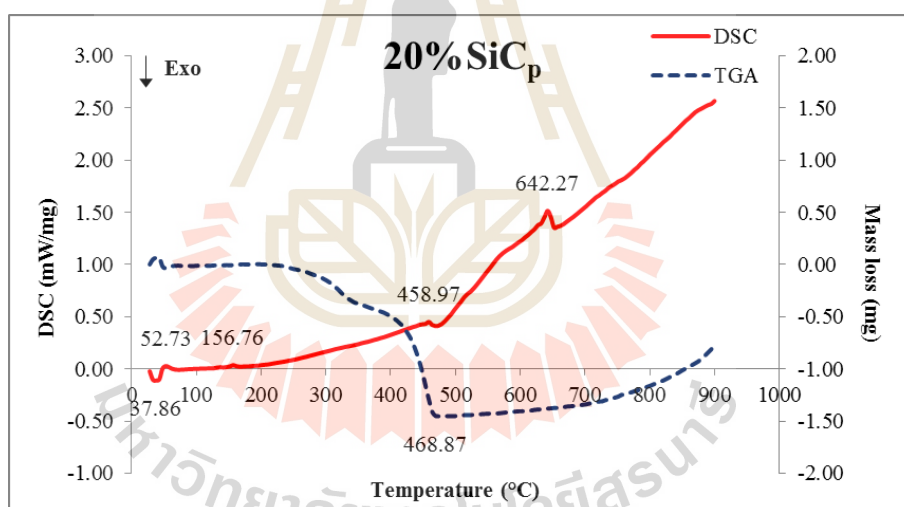
ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ภายหลังจากการฉีดขึ้นรูปของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ซึ่งจะวิเคราะห์โดยวัดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานทางความร้อนของชิ้นงานเมื่อชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงสถานะต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพื่อหาจุดหลอมเหลวของทั้งผงวัสดุและสารยึดทั้งสามชนิดสำหรับกำหนดช่วงอุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป ซึ่งผลของ Differential scanning calorimeter : DSC ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ไม่แตกต่างกันมาก คือแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อน (Endothermic) ในช่วงแรกเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 50 - 53 องศาเซลเซียส ช่วงที่สองอุณหภูมิ 156 - 158 องศาเซลเซียส ช่วงที่ 3 อุณหภูมิ 458 - 460 องศาเซลเซียส ซึ่งเกี่ยวข้องกับการหลอมตัวของ พาราฟินแว็กซ์ กรดสเตียริก และการสลายตัวของโพลีโพรพิลีนตามลำดับ หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงความชันจะเด่นชัดขึ้นไปในทิศทางการเกิดปฏิกิริยาการดูดความร้อน กล่าวคือชิ้นงานจะดูดพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว โดยชิ้นงานจะเริ่มเกิดของเหลวบางส่วนที่อุณหภูมิ 560 องศาเซลเซียส (หากพิจารณาจากแผนภูมิเฟสของอะลูมิเนียม-ทองแดง ที่ 4.77 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก) ดังนั้นจึงกำหนดช่วงการฉีดขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดการไหลตัวของส่วนผสมเข้าสู่แม่พิมพ์ของการฉีดขึ้นรูป

ในส่วนของการวิเคราะห์จาก Thermogravimetric analysis : TGA ซึ่งเป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมวลสารของชิ้นงาน โดยแสดงผลเป็นน้ำหนักที่หายไปต่อการ

เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนจนกระทั่งถึงที่อุณหภูมิ 217 - 234 องศาเซลเซียส น้ำหนักของชิ้นงานเริ่มลดลง เนื่องจากการมีสลายตัวของพาราฟินแว็กซ์และกรดสเตียริก กล่าวคือ พาราฟินแว็กซ์และกรดสเตียริกได้ถูกกำจัดหมดไปจากชิ้นงานแล้ว นอกจากนี้ยังมีโพลีโพรพิลีนซึ่งเป็นสารยึดที่มีจุดหลอมตัวสูงเริ่มเกิดการหลอมตัว แล้วจึงสลายตัวออกจากชิ้นงานที่อุณหภูมิ 468 - 470 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ชิ้นงานมีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุด ดังรูปที่ 4.4 และ 4.5 หลังจากนั้นน้ำหนักของชิ้นงานจะเริ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) จากการใช้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนขณะทดสอบ ดังนั้นผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของชิ้นงานภายหลังการฉีดขึ้นรูปดังกล่าว จึงได้กำหนดขั้นตอนการเผาผนึกให้มีการเผาแซ่ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าได้กำจัดโพลีโพรพิลีนออกไปจากชิ้นงานอย่างสมบูรณ์ ก่อนเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิการเผาผนึกของชิ้นงานที่กำหนดไว้ของแต่ละส่วนผสม



รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

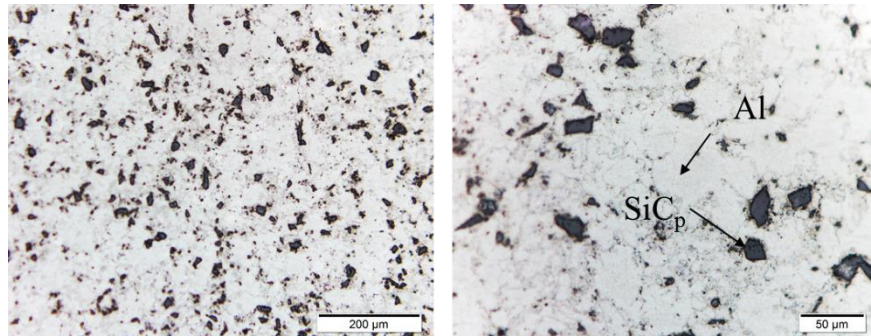
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและเฟสของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง (Microstructure and phase analysis of as-sintered and age-hardened aluminium composite)

4.3.1 โครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์เฟสของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก

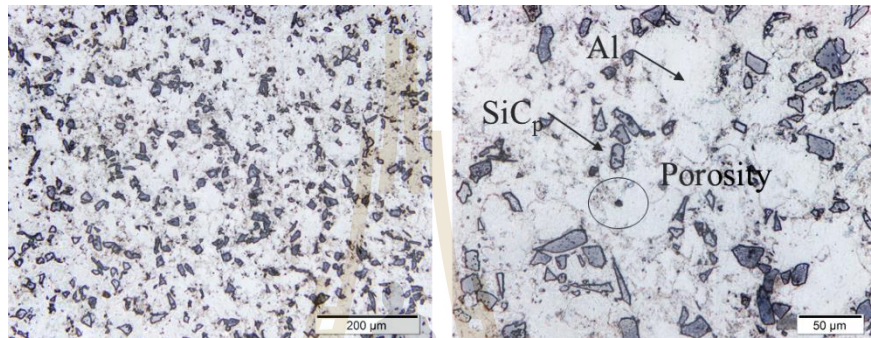
(As-sintered microstructure and phase analysis)

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 645 650 655 และ 660 องศาเซลเซียสตามลำดับ พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมค่อนข้างสม่ำเสมอและมีรูพรุน (Porosity) อยู่บางส่วน รูป 4.6 ก) และ ข) พบว่ามีรูพรุนปริมาณเล็กน้อยอยู่บริเวณเนื้อพื้นของอะลูมิเนียมและกลุ่มของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้นเป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังรูป 4.6 ง) จะเห็นได้ชัดว่ามีปริมาณของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็จะมีปริมาณรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกันและรูพรุนส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณที่เป็นกลุ่มก้อนของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide cluster)

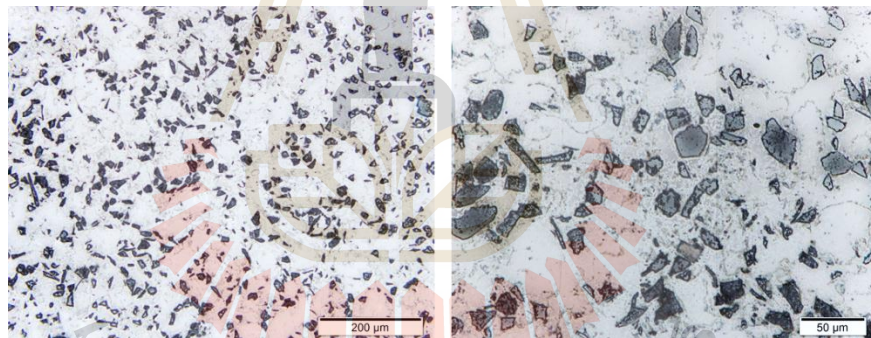
เมื่อนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า โครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบมีอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม และมีเฟสยูเทคติก (Eutectic phase) อยู่ในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมด้วย เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้น สามารถสังเกตเห็นรูพรุนหรือช่องว่าง (Gap porosity) ที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กับเนื้อพื้นอะลูมิเนียมหรือระหว่างกลุ่มอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray spectroscopy : EDS พบว่ามีทองแดงปริมาณ 5.20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ให้ผลใกล้เคียงกับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผงอะลูมิเนียมด้วยเทคนิค XRF คือมีทองแดงผสมอยู่ในผงอะลูมิเนียมปริมาณ 4.77 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ยังมีคาร์บอนกระจายตัวอยู่ในบริเวณเดียวกันกับธาตุซิลิคอนเนื่องจากการศึกษาวิจัยนี้ใช้วัสดุเสริมแรงเป็นอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์



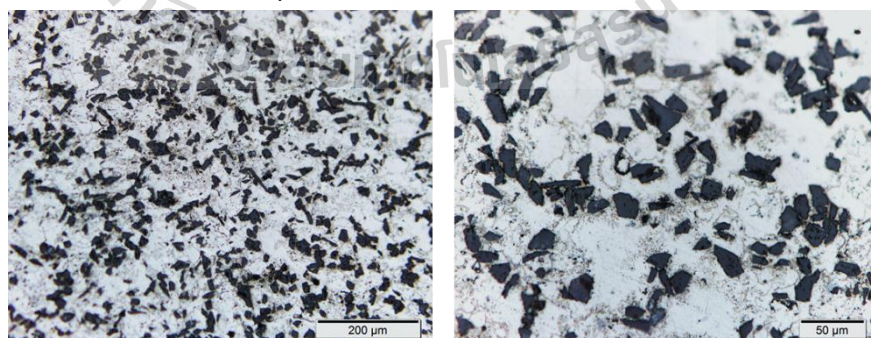
ก) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



ข) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

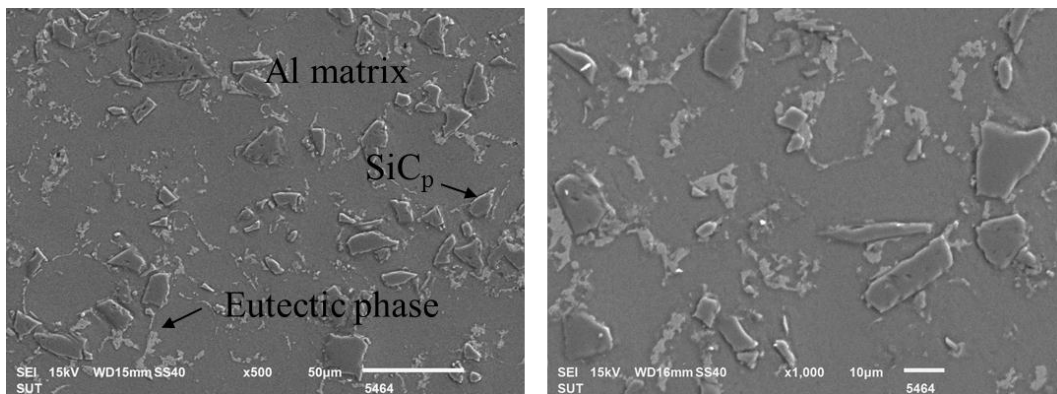


ค) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

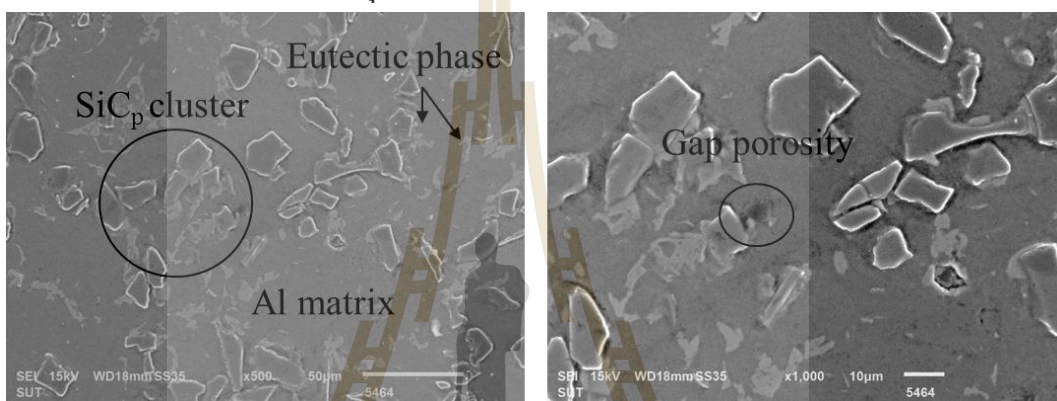


ง) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคภายใต้การเผาผนึกของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เเผาผนึกที่อุณหภูมิ 645 650 655 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

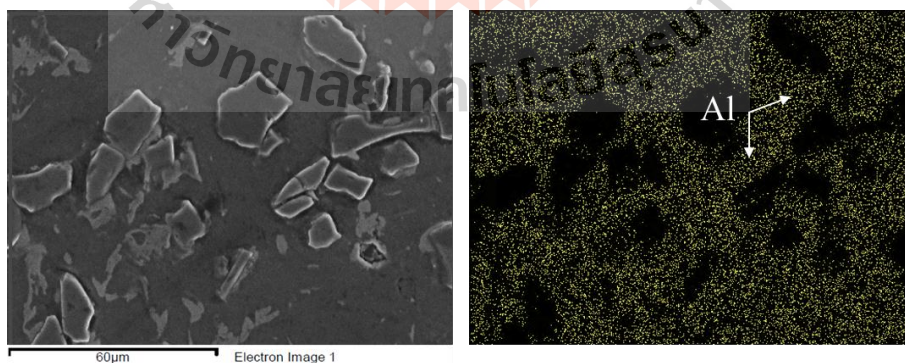


ก) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

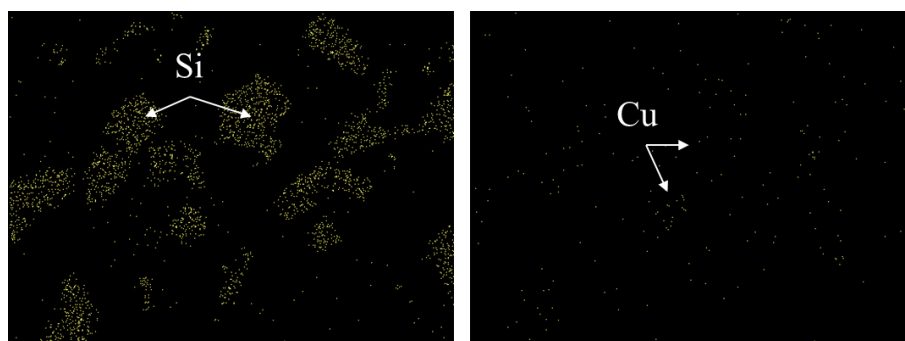


ข) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายหลังจากเผาผนึกของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เผาผนึกที่อุณหภูมิ 650 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

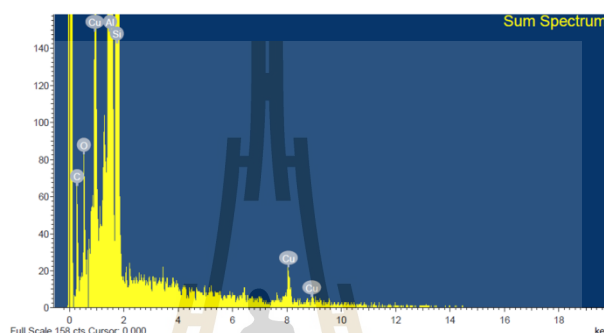


ก) อะลูมิเนียม



ข) ซิลิกอน

ค) ทองแดง



ง)

ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานก่อนทดสอบการลึกรอ

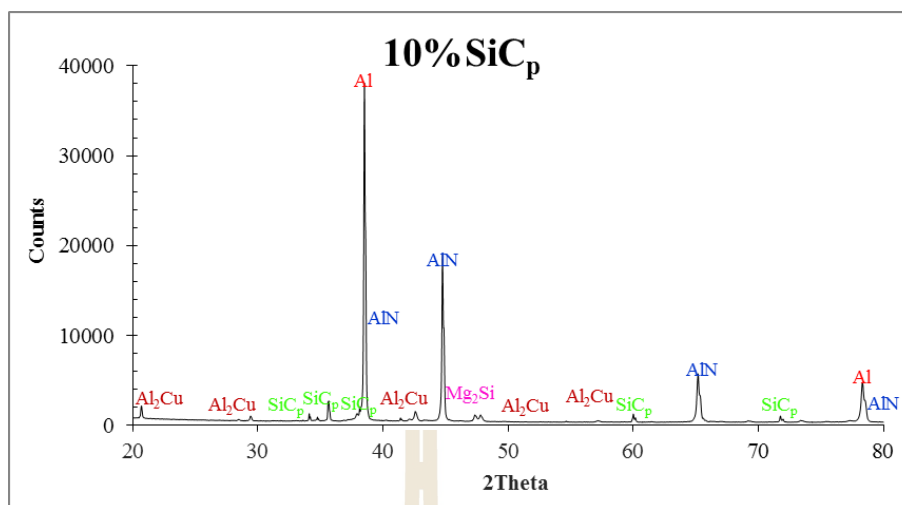
Composition	
Ele	Wt. %
Al	59.48
O	3.69
Cu	5.20
Si	17.34
C	14.29

รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาพูนที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส

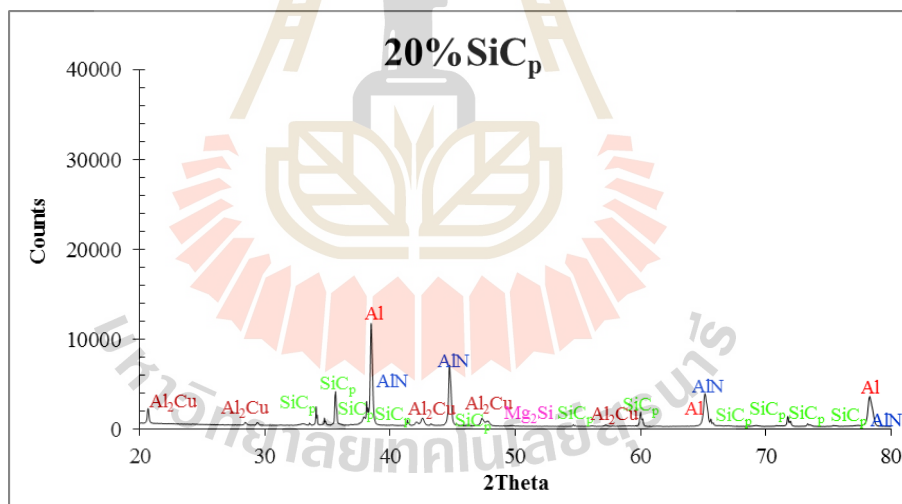
ผลการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาพูนที่อุณหภูมิ 650 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ด้วยเทคนิค X-ray powder diffraction

analyzer : XRD พบว่ามีธาตุอะลูมิเนียม (Al) และสารประกอบซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC_p) เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังพบการฟอร์มตัวของสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) ที่คาดว่าจะเกิดการฟอร์มตัวขึ้นในขณะกระบวนการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจน (Pieczonka, T., et al., 2007) ดังแสดงสมการที่ 4.1 นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอะลูมิเนียมทองแดง (Al_2Cu) และแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) อันเนื่องจากส่วนผสมทางเคมีของผงอะลูมิเนียมมีแมกนีเซียม (Mg) ซิลิคอน (Si) และทองแดง (Cu) ผสมอยู่





รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XRD ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เสาผนึกที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส



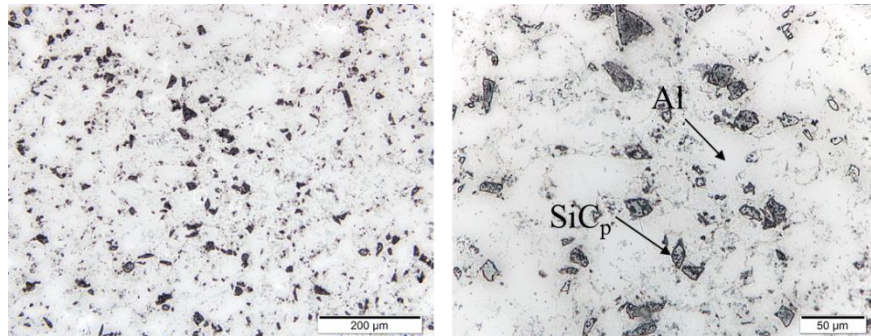
รูปที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XRD ของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เสาผนึกที่อุณหภูมิ 660 องศาเซลเซียส

4.3.2 โครงสร้างจุลภาคและการวิเคราะห์เฟสของชิ้นงานภายหลังการบ่มแข็ง

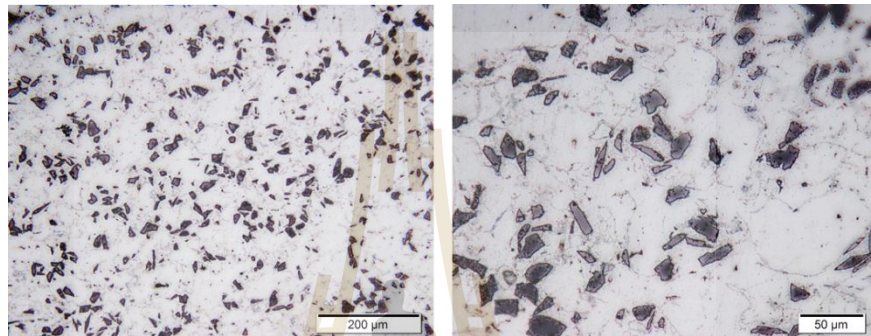
(Age-hardened microstructure and phase analysis)

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 645 650 655 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แล้วนำไปทำการบ่มแข็ง พบว่าโครงสร้างจุลภาคมีการกระจายตัวของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมค่อนข้างสม่ำเสมอและมีรูพรุน (Porosity) อยู่บางส่วน ดังรูป 4.11 ก) และ ข) พบว่ามีรูพรุนปริมาณเล็กน้อยอยู่บริเวณเนื้อพื้นของอะลูมิเนียมและกลุ่มของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้นเป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังรูป 4.11 ง) สามารถสังเกตเห็นได้ชัดว่ามีปริมาณของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มมากขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันก็จะมีปริมาณรูพรุนเพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน และรูพรุนส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณที่อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน เช่นเดียวกับโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก

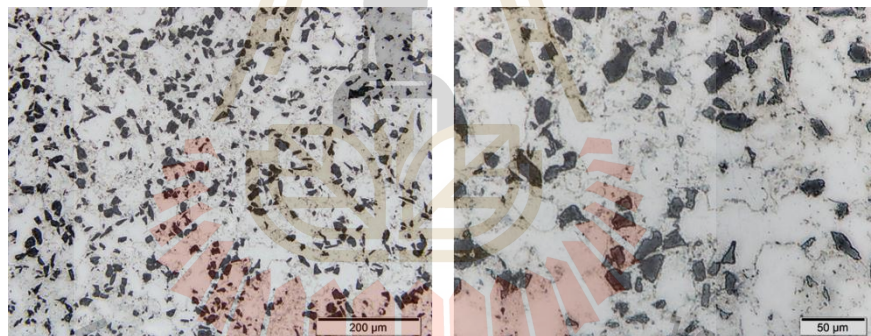
เมื่อนำชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รูปที่ 4.12 พบว่า โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบมีอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม และมีปริมาณมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังรูปที่ 4.12 ข) นอกจากนี้ยังพบเฟสยูเทคติก (Eutectic phase) อยู่ในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมด้วย เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้น สามารถสังเกตเห็นรูพรุนได้อย่างชัดเจนที่บริเวณรอยต่อระหว่างอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กับเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (Gap porosity) จากนั้นนำวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรไปทำการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray spectroscopy : EDS พบว่ามีทองแดงกระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้นอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 4.13



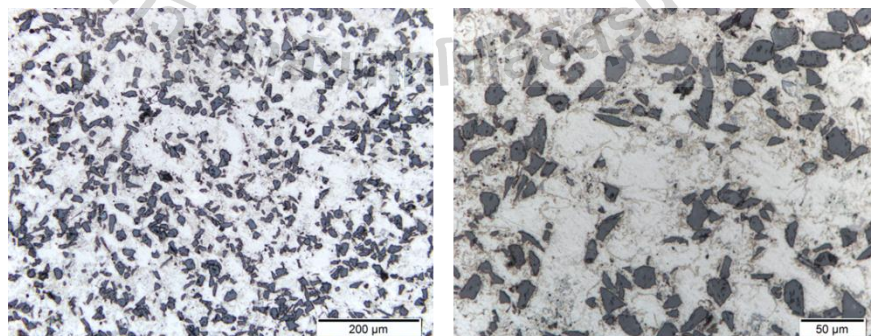
ก) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



ข) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

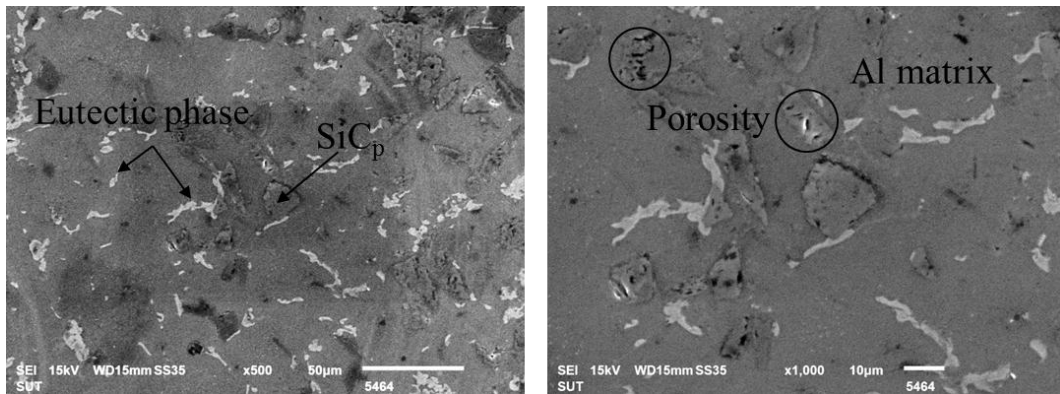


ค) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

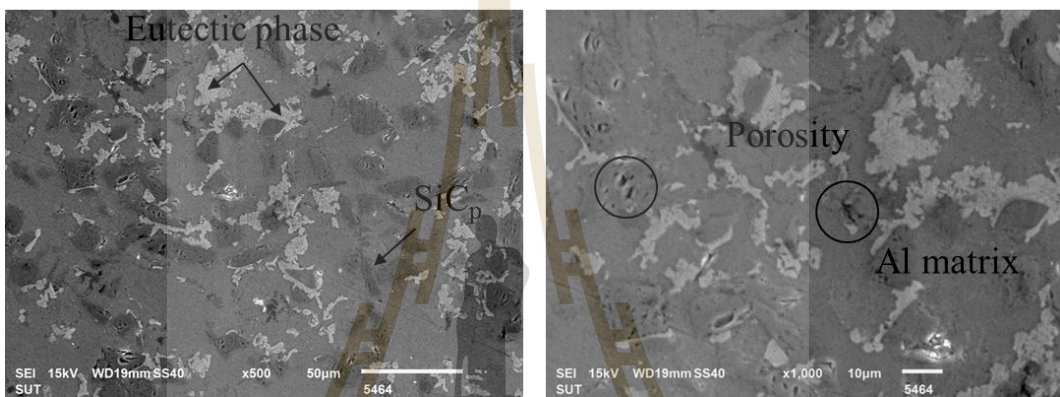


ง) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคภายหลังจากการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เสาผนึกที่อุณหภูมิ 645 650 655 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

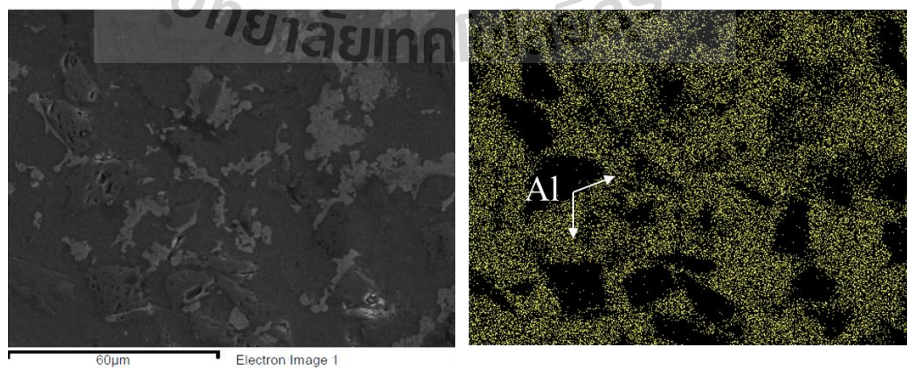


ก) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

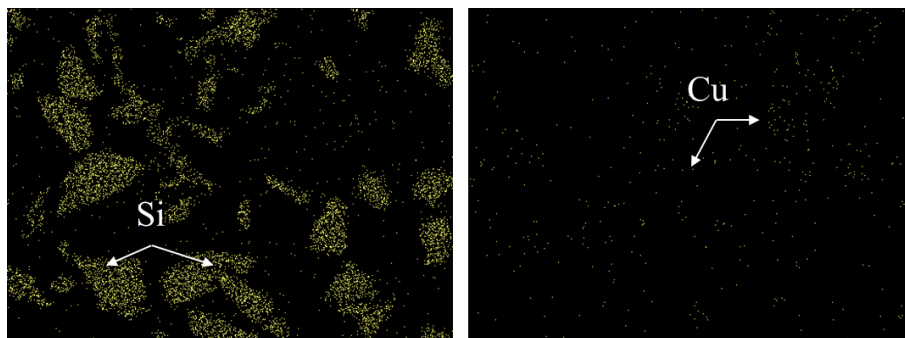


ข) เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายหลังจากบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เฝ้านิกที่อุณหภูมิ 650 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

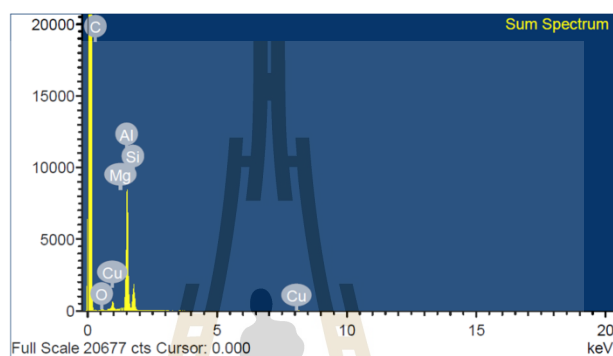


ก) อะลูมิเนียม



ข) ซิลิกอน

ค) ทองแดง



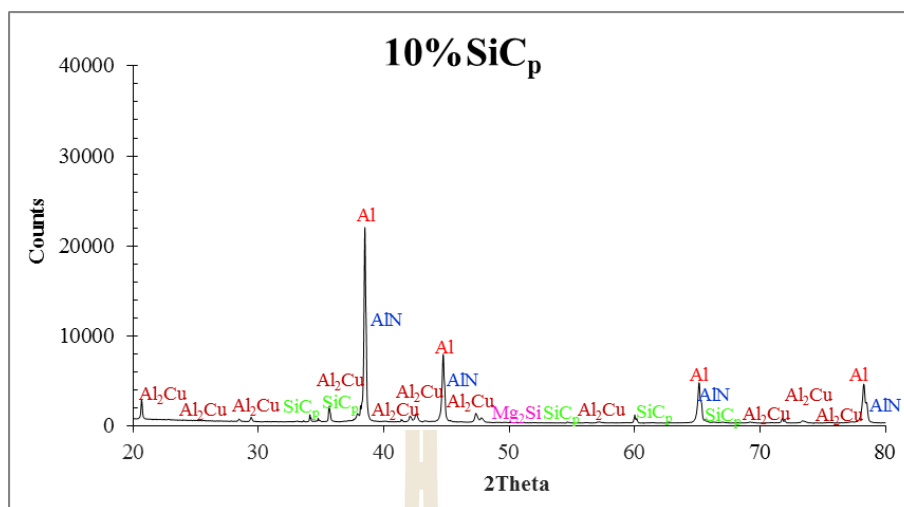
ง)

ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานก่อนทดสอบการสึกหรอ

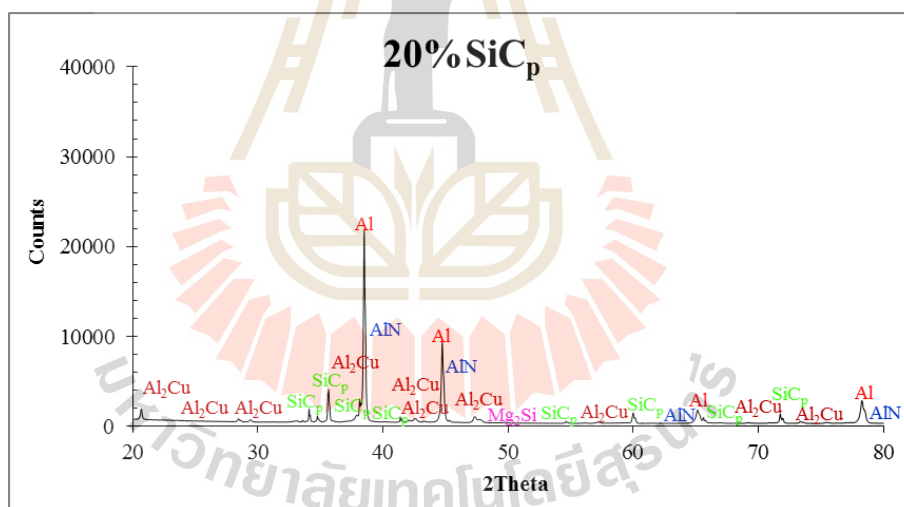
Composition	
Ele	Wt. %
Al	59.44
O	3.32
Cu	9.50
Si	22.84
C	4.20

รูปที่ 4.13 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ภายหลังจากบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ผลการวิเคราะห์ธาตุและสารประกอบของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาผืนที่อุณหภูมิ 650 และ 660 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แล้วนำไปทำการบ่มแข็ง โดยใช้เทคนิค X-ray powder diffraction analyzer : XRD พบว่ามีธาตุอะลูมิเนียม (Al) และสารประกอบซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC_p) เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังพบการฟอร์มตัวของสารประกอบอะลูมิเนียมไนไตรด์ (AlN) ขึ้นเหมือนกันกับวัสดุเชิงประกอบภายหลังจากการเผาผืน นอกจากนี้ยังพบสารประกอบอะลูมิเนียมทองแดง (Al_2Cu) มากขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับชิ้นงานภายหลังจากการเผาผืน เนื่องจากในวัสดุเชิงประกอบที่ผ่านการบ่มแข็งด้วยการทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสที่สอง (Age hardening) เป็นการทำให้ทองแดงเกิดการตกตะกอนและไปรวมกับอะลูมิเนียมเกิดเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมทองแดง (Al_2Cu) รวมไปถึงพบสารประกอบแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) จากผลการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากกระบวนการเผาผืนมาเปรียบเทียบกับภายหลังจากบ่มแข็ง พบว่ารูปที่ 4.14 และ 4.15 มีพีคของสารประกอบอะลูมิเนียมทองแดง (Al_2Cu) มากขึ้น เนื่องจากทำการบ่มแข็ง ซึ่งการนำวัสดุเชิงประกอบไปทำการบ่มแข็งนั้นเพื่อต้องการปรับปรุงสมบัติความแข็ง และความแข็งแรงให้กับเนื้อพื้นอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.14 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XRD ภายหลังจากการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 4.15 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค XRD ภายหลังจากการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

4.4 สมบัติของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง

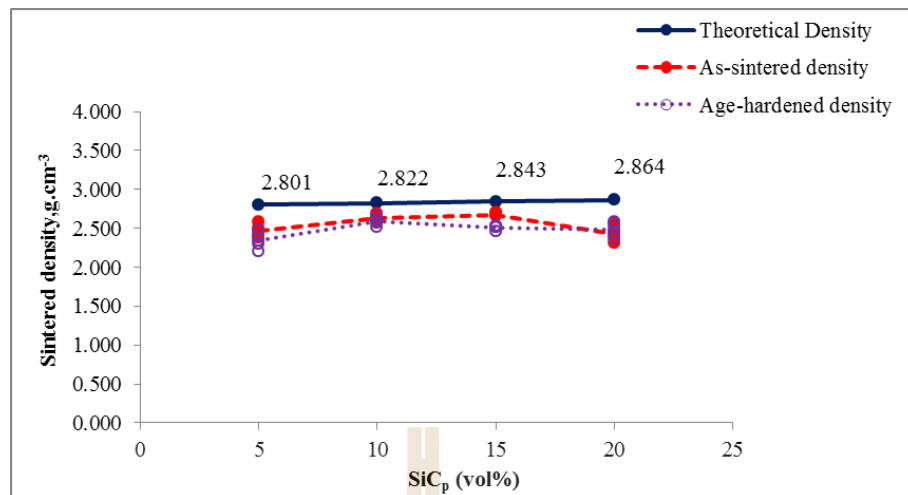
(Properties of sintered and age-hardened samples)

4.4.1 ความหนาแน่นของของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง

(Density of as-sintered and age-hardened samples)

ผลการวัดความหนาแน่นภายหลังจากการเผาผนึกและจากการบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร โดยความหนาแน่นภายหลังจากการเผาผนึกมีค่าเท่ากับ 2.472 2.627 2.678 และ 2.433 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ในส่วนของความหนาแน่นภายหลังจากการบ่มแข็งมีค่าเท่ากับ 2.343 2.587 2.509 และ 2.482 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของวัสดุเชิงประกอบทั้งภายหลังจากการเผาผนึกและภายหลังจากการบ่มแข็ง พบว่าความหนาแน่นมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นจาก 5 ไปจนถึง 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากนั้นค่าความหนาแน่นลดลงที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีรูพรุนค่อนข้างมากสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า รูพรุนดังกล่าวเกิดจากการเติมซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณมากเกินไป ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กเช่นอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ มีพลังงานพื้นผิวสูง (Surface energy) หากเติมในปริมาณมากขึ้นจะเกิดการรวมกลุ่ม (Agglomeration) (Patcharawit, T. et al., 2014) ทำให้ซิลิคอนคาร์ไบด์เริ่มรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Silicon carbide cluster) ส่งผลให้การเผาผนึกเป็นไปได้ยากระหว่างกลุ่มอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ จึงมีช่องว่างหรือรูพรุนเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและกลุ่มอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ทำให้ค่าความหนาแน่นลดลง

ความหนาแน่นของการจัดเรียงตัว (Packing density) จะขึ้นกับทั้งรูปร่างและขนาดของอนุภาค (German, R.M. and Bose, A., 1997) ในการทดลองนี้ขนาดอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของผงอะลูมิเนียม โดยที่ขนาดของผงวัสดุเล็กและใหญ่แตกต่างกันจะช่วยให้ความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวเพิ่มขึ้น กล่าวคืออนุภาคขนาดเล็กสามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในบริเวณช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ถูกเติมเต็มด้วยอนุภาคขนาดเล็ก ส่งผลต่อชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกมีโครงสร้างสม่ำเสมอ มีรูพรุนหรือช่องว่างน้อย เมื่อเทียบกับชิ้นงานวัสดุที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่เพียงชนิดเดียว (Patcharawit, T. et al., 2014) แต่หากมีปริมาณของอนุภาคขนาดเล็กมากเกินไป จะทำให้อนุภาคเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน และเกิดช่องว่างอยู่บริเวณรอยต่อของเนื้อพื้นและกลุ่มอนุภาคขนาดเล็ก ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและทางกลของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกลดลง



รูปที่ 4.16 ความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังจากการเผาผนึกเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของชิ้นงานภายหลังจากการบ่มแข็ง

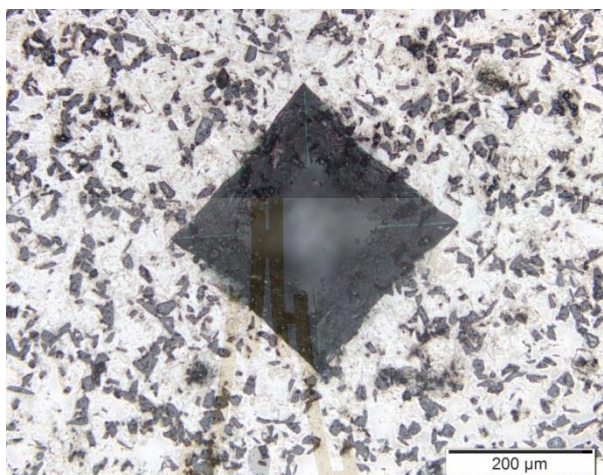
4.4.2 ความแข็งของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง

(Hardness of as-sintered and age-hardened samples)

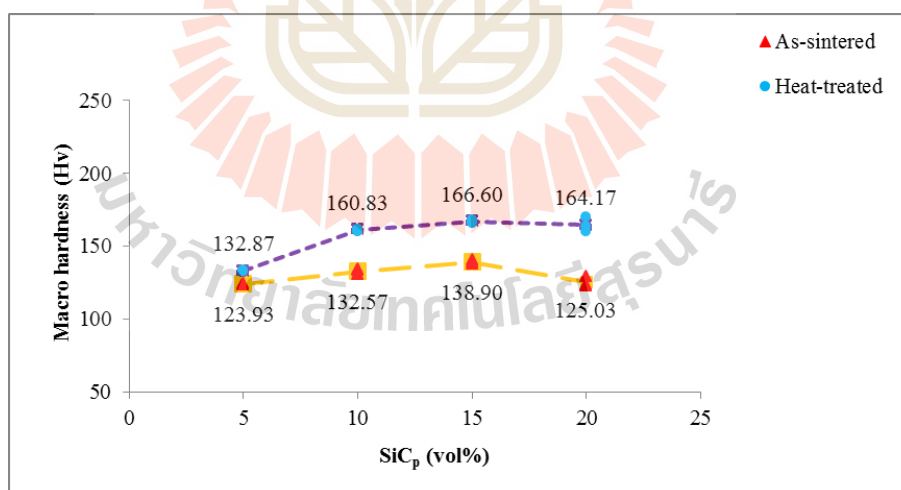
ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ระดับมหภาค (Macro vickers hardness)

ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ระดับมหภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งภายหลังจากการเผาผนึกและภายหลังจากการบ่มแข็ง ทดสอบภายใต้ภาระแรง 98 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งค่าความแข็งระดับมหภาคของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 645 650 655 และ 660 องศาเซลเซียส พบว่าความแข็งมีค่าเท่ากับ 123.93 132.57 138.90 และ 125.03 H_V ตามลำดับ ส่วนค่าความแข็งภายหลังจากการบ่มแข็งของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีค่าเท่ากับ 132.87 160.83 166.60 และ 164.17 H_V ตามลำดับ ซึ่งค่าความแข็งทั้งภายหลังกระบวนการเผาผนึกและภายหลังจากการบ่มแข็ง ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ตั้งแต่ 5 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แต่ที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความแข็งมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับค่าความหนาแน่นในหัวข้อ 4.4.1 เนื่องจากภายในชิ้นงานมีรูพรุนค่อนข้างมากกว่า เมื่อพิจารณาค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งพบว่ามีค่าความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการบ่มแข็ง

ทุกปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เนื่องมาจากการนำชิ้นงานไปผ่านการบ่มแข็งด้วยการทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสที่สองเพื่อต้องการปรับปรุงให้เนื้อพื้นมีความแข็ง ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น



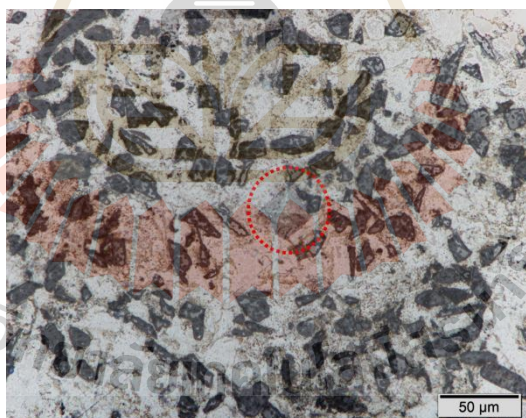
รูปที่ 4.17 รอยกดจากการทดสอบความแข็งแบบมหภาคของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาผนึก



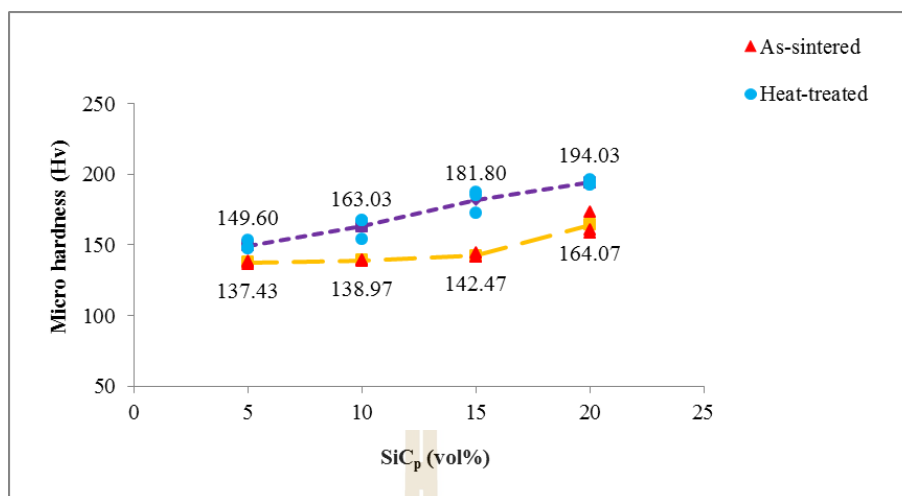
รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์สระดับมหภาค (Macro vickers hardness) ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งภายหลังจากการเผาผนึกและภายหลังจากการบ่มแข็ง

ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ระดับจุลภาค (*Micro vickers hardness*)

ผลการทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ระดับจุลภาคภายใต้ภาระแรง 0.98 นิวตัน ดังแสดงในรูป 4.19 ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาผนึกที่อุณหภูมิ 645 650 655 และ 660 องศาเซลเซียส พบว่าความแข็งมีค่าเท่ากับ 137.43 138.97 142.47 และ 164.07 H_v ตามลำดับ ส่วนความแข็งของชิ้นงานภายหลังจากการบ่มแข็งมีค่าเท่ากับ 149.60 163.03 181.80 และ 194.03 H_v เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ระดับจุลภาคของทั้งภายหลังจากเผาผนึก และภายหลังจากบ่มแข็ง พบว่า ค่าความแข็งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้น จาก 5 เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากในการวัดความแข็งแบบวิกเกอร์ระดับจุลภาคนั้นหัวกดมีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบ ดังนั้นจึงทำให้โอกาสที่หัวกดจะทดสอบในตำแหน่งที่มีรูพรุนจำนวนน้อยกว่าในกรณีทดสอบความแข็งแบบมหภาค ส่วนค่าความแข็งของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบภายหลังจากบ่มแข็งพบว่ามีค่าสูงกว่าชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบภายหลังจากเผาผนึก



รูปที่ 4.19 รอยกดจากการทดสอบความแข็งแบบจุลภาคของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาผนึก



รูปที่ 4.20 ค่าความแข็งแบบวิกเกอร์ระดับจุลภาค (Micro vickers hardness) ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งภายหลังจากเผาผนึกและภายหลังจากบ่มแข็ง

บทที่ 5

การสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ (Wear of silicon carbide particulate reinforced aluminium composite)

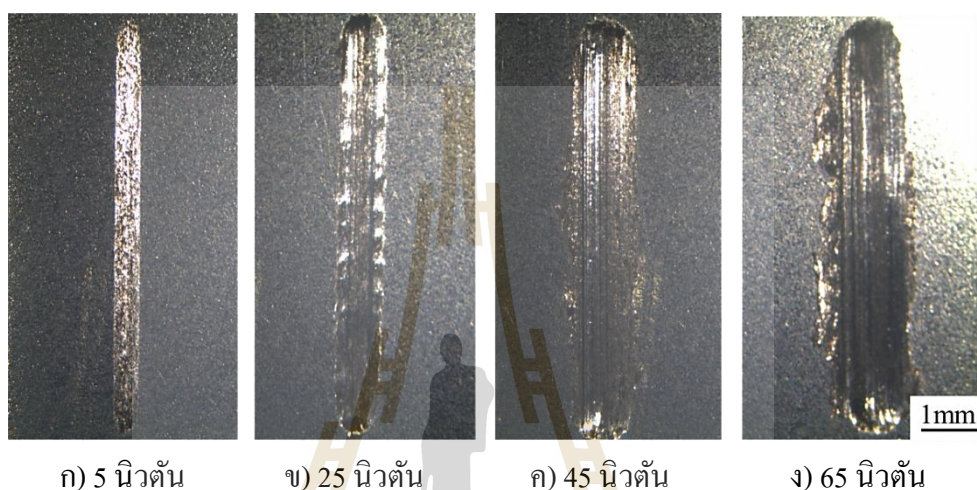
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบความต้านทานการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G133-95 ภายใต้ภาระแรง 5 25 45 และ 65 นิวตัน ด้วยความเร็ว 0.1 เมตรต่อวินาที ที่ระยะทาง 100 เมตร (5000 รอบ) โดยใช้หัวบอลทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ความแข็ง 62 HRC (746 H_v) เพื่อประเมินสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง โดยมีผลการทดลองประกอบไปด้วยลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไปของร่องการสึกหรอ ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน น้ำหนักที่หายไป เนื่องจากการสึกหรอ พื้นผิวของการสึกหรอและสะเก็ดการสึกหรอ รวมถึงการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS เพื่อนำผลการตรวจสอบมาสนับสนุนช่วยในการบ่งชี้กลไกหรือพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้น ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.1 ร่องการสึกหรอ (Wear groove)

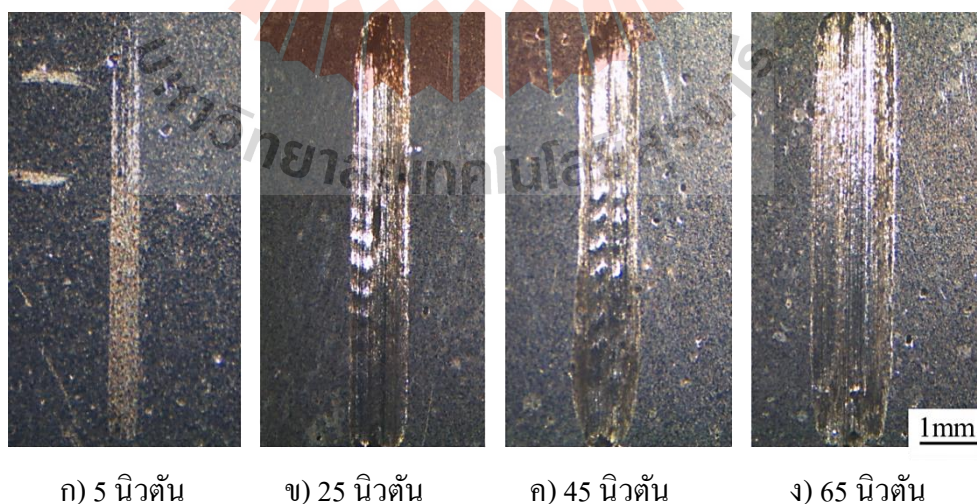
ชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก (As-sintered samples)

เมื่อตรวจสอบร่องการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบในสภาวะภายหลังการเผาผนึก พบว่าขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอ (Wear groove width) เพิ่มขึ้นตามปริมาณภาระแรงที่เพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 65 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 และเมื่อเปรียบเทียบขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆ พบว่าขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อลดปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งเมื่อพิจารณาขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอ ภายใต้ภาระแรง 5 นิวตัน พบว่าขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกันทุกปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ และเมื่อทดสอบภายใต้ภาระแรงเพิ่มขึ้นที่ 25 ถึง 65 นิวตัน ชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

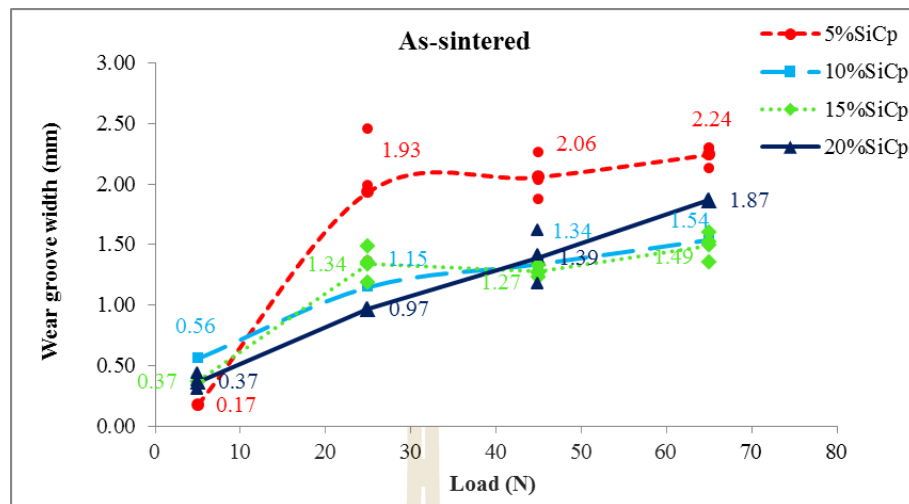
เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เดิมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 5.3 เนื่องจากอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงถึง 27.46 GPa (Accuratus Silicon Carbide Material Properties, www, 2017) เมื่อเติมลงไปบนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมในปริมาณที่สูงมากขึ้น จะทำหน้าที่ช่วยเสริมแรงให้วัสดุเชิงประกอบส่งผลให้มีค่าความแข็งสูงขึ้น (หัวข้อ 4.42) และสามารถต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น



รูปที่ 5.1 ร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาผนึก



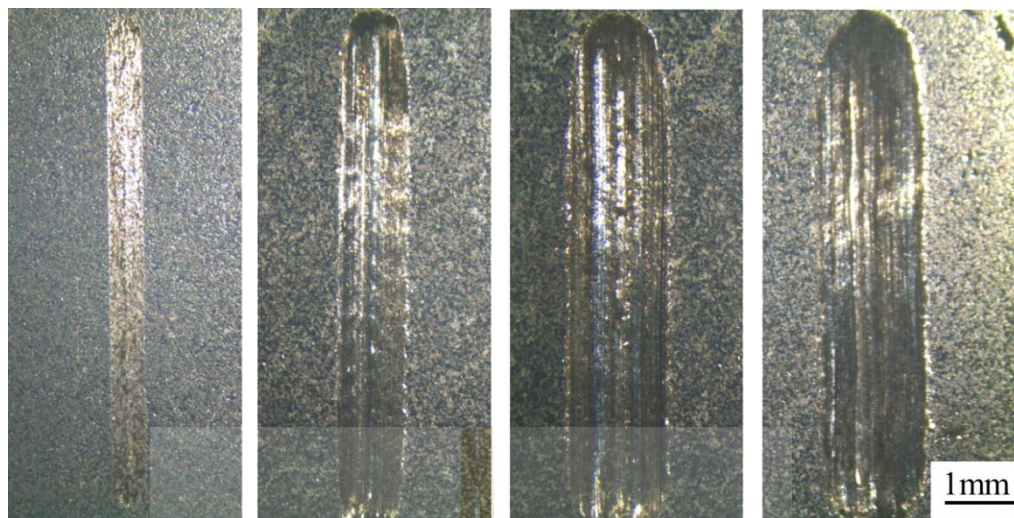
รูปที่ 5.2 ร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาผนึก



รูปที่ 5.3 ความกว้างของร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาผืนิก

ชิ้นงานภายหลังจากบ่มแข็ง (Age-hardened samples)

เมื่อตรวจสอบร่องการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบในสภาวะภายหลังจากบ่มแข็ง พบว่าขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอ (Wear groove width) เพิ่มขึ้นตามปริมาณภาระแรงที่เพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 65 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.4 และเมื่อเปรียบเทียบขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณต่างๆ พบว่าขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อลดปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 5.4 และ 5.5 ซึ่งผลของการเพิ่มภาระแรงทดสอบและเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อขนาดความกว้างของร่องการสึกหรอของชิ้นงานทั้งภายหลังจากเผาผืนิกและบ่มแข็งมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน



ก) 5 นิวตัน

ข) 25 นิวตัน

ค) 45 นิวตัน

ง) 65 นิวตัน

รูปที่ 5.4 ร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการบ่มแข็ง



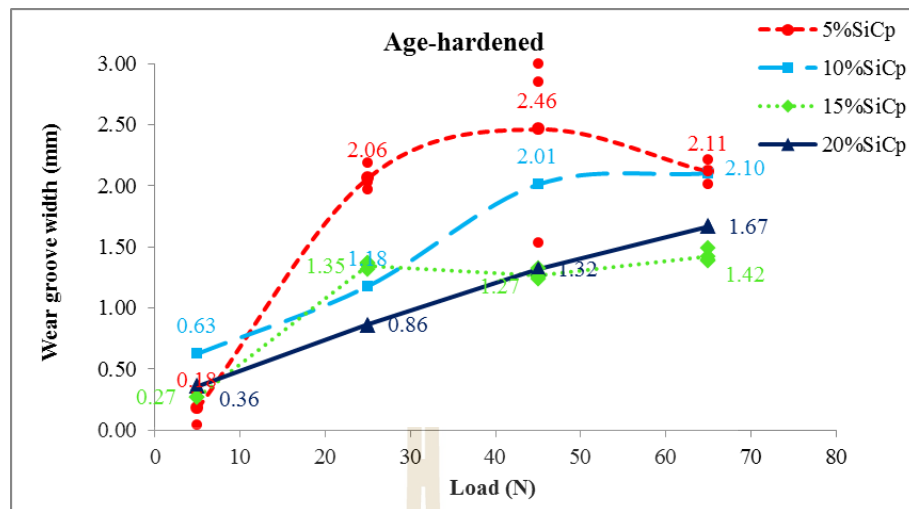
ก) 5 นิวตัน

ข) 25 นิวตัน

ค) 45 นิวตัน

ง) 65 นิวตัน

รูปที่ 5.5 ร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการบ่มแข็ง



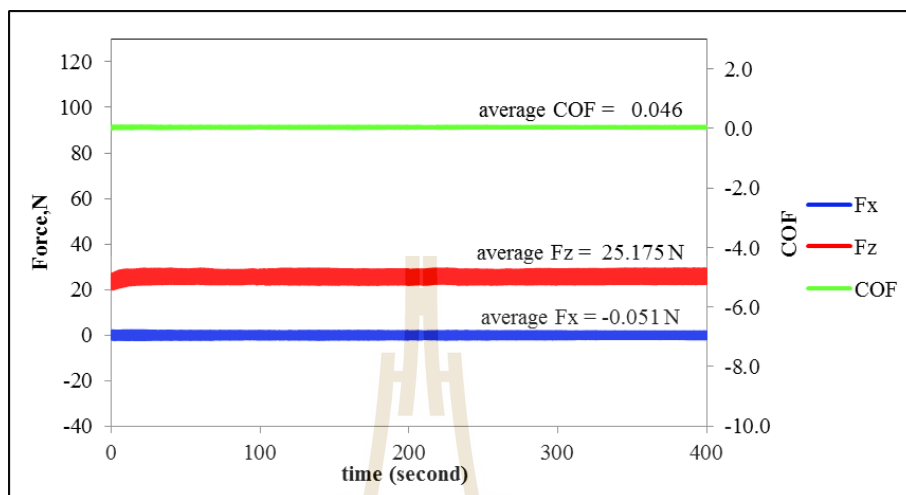
รูปที่ 5.6 ความกว้างของร่องการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากบ่มแข็ง

5.2 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง (Coefficient of friction for as-sintered and age-hardened samples)

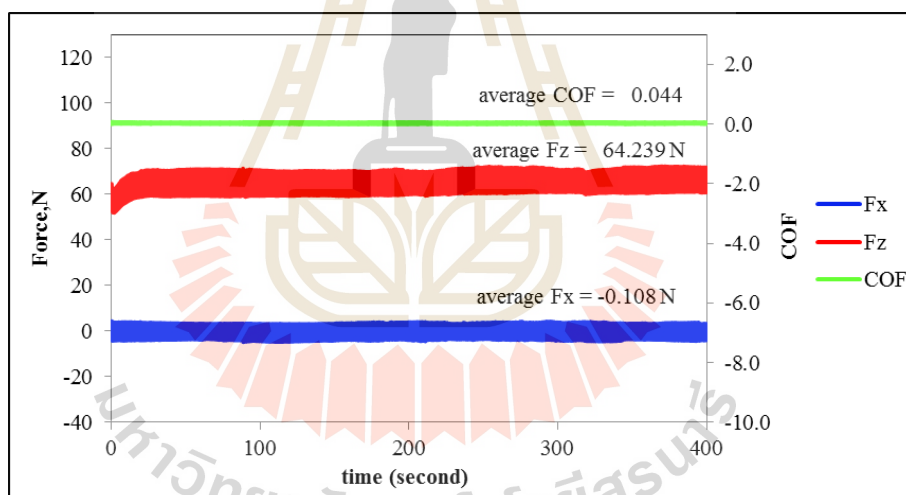
จากการทดสอบการสึกหรอแบบ Ball-on-Flat ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM G133-95 ภายใต้อัตราแรง 5 25 45 และ 65 นิวตัน ด้วยเครื่องมือทดสอบการสึกหรอรุ่น UMT tribolab สามารถบันทึกค่าแรงกระทำตั้งฉาก (F_z) แรงเสียดทาน (F_x) และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (COF) แบบ Real time ดังตัวอย่างในรูปที่ 5.7 และ 5.8 ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ (Forces) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (COF) ในช่วงเวลา (Time period) 400 วินาที โดยในหัวข้อนี้จะแสดงผลความสัมพันธ์ดังกล่าวเปรียบเทียบกับเฉพาะชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้อัตราแรงทดสอบ 25 และ 65 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายใต้อัตราแรง 25 และ 65 นิวตัน มีค่าค่อนข้างคงที่ดังรูป 5.7 ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงกว้างกว่าดังรูป 5.8 และเมื่อพิจารณาในช่วงภาระแรงที่สูงขึ้นคือ 65 นิวตัน ยิ่งส่งผลทำให้แรง

กระทำไม่สม่ำเสมอเมื่อทดสอบในระยะเวลาเพิ่มขึ้นช่วง 200 ถึง 400 วินาที (รูป 5.8ข) ซึ่งอาจจะสะท้อนได้จากลักษณะของร่องการสึกหรอที่ค่อนข้างขรุขระบริเวณขอบด้านข้าง ดังรูปที่ 5.4 (ง)

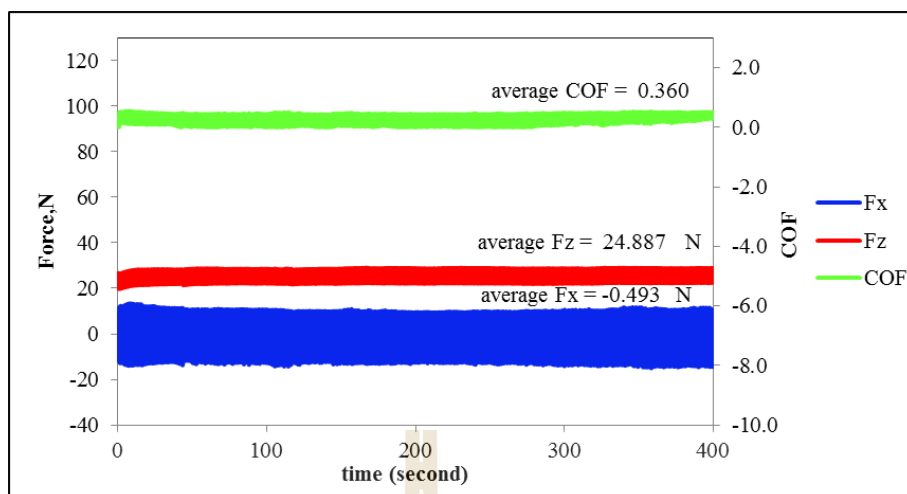


ก) 25 นีวตัน

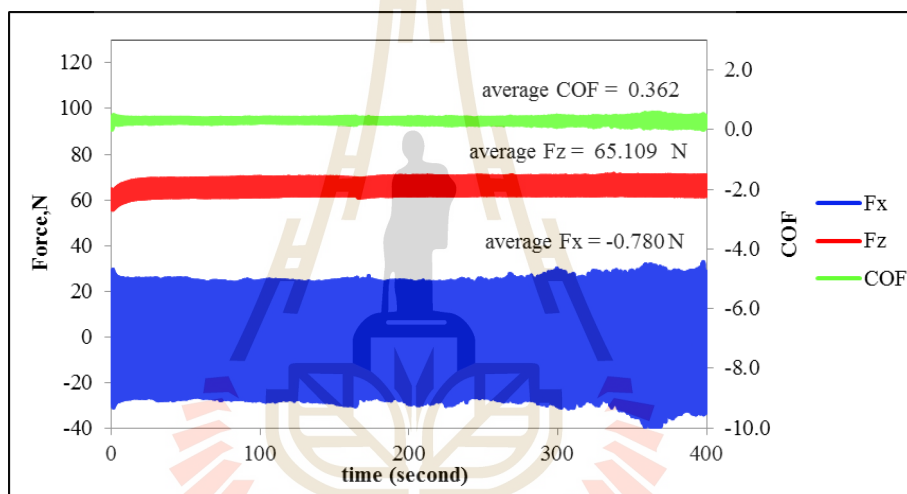


ข) 65 นีวตัน

รูปที่ 5.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระทำ (Force) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (COF) เทียบกับเวลา (Time) ภายหลังจากบ่มแข็งของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้อาการแรง ก) 25 และ ข) 65 นีวตัน

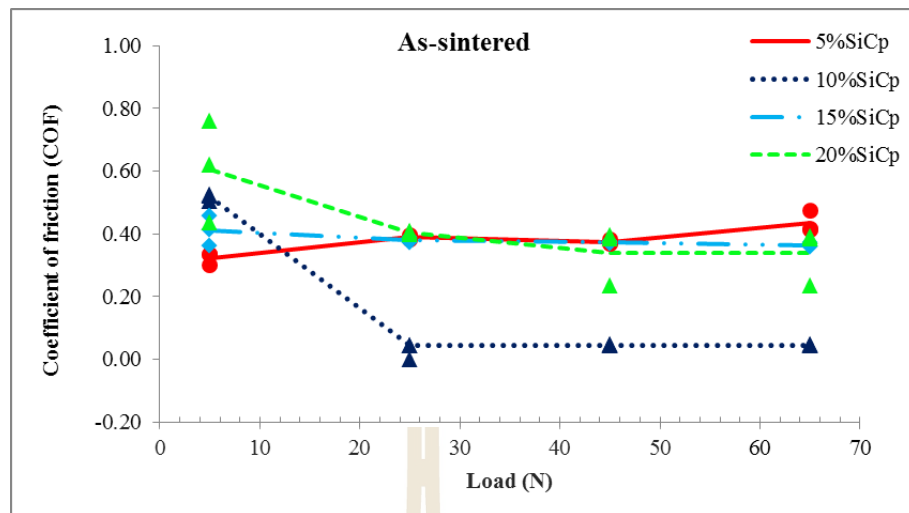


ก) 25 นีวตัน

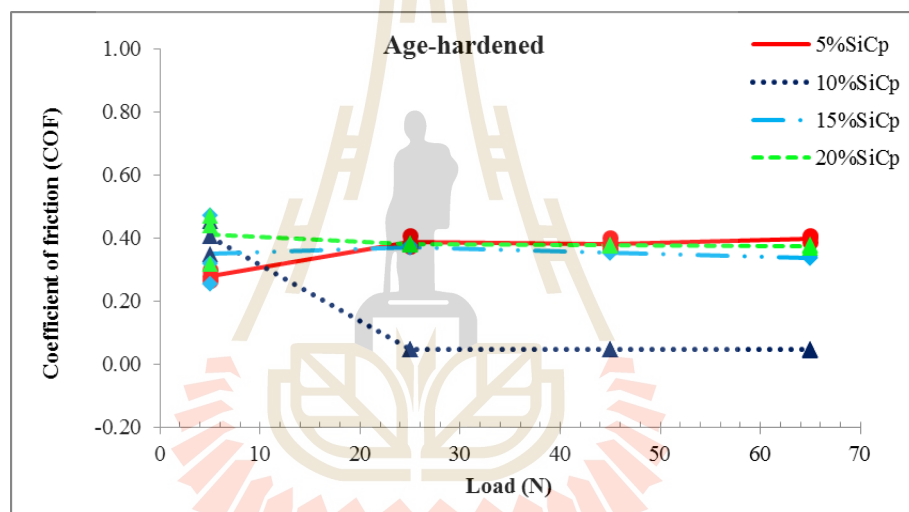


ข) 65 นีวตัน

รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงกระทำ (Force) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (COF) เทียบกับเวลา (Time) ภายหลังจากการป้อนแรงของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกา คาร์ไบด์ ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ภายใต้อาการ แรง ก) 25 และ ข) 65 นีวตัน



ก) ภายหลังจากการเผาผนึก



ข) ภายหลังจากการบ่มแข็ง

รูปที่ 5.9 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเทียบกับภาระแรงของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ก) ภายหลังจากการเผาผนึกและ ข) ภายหลังจากการบ่มแข็ง

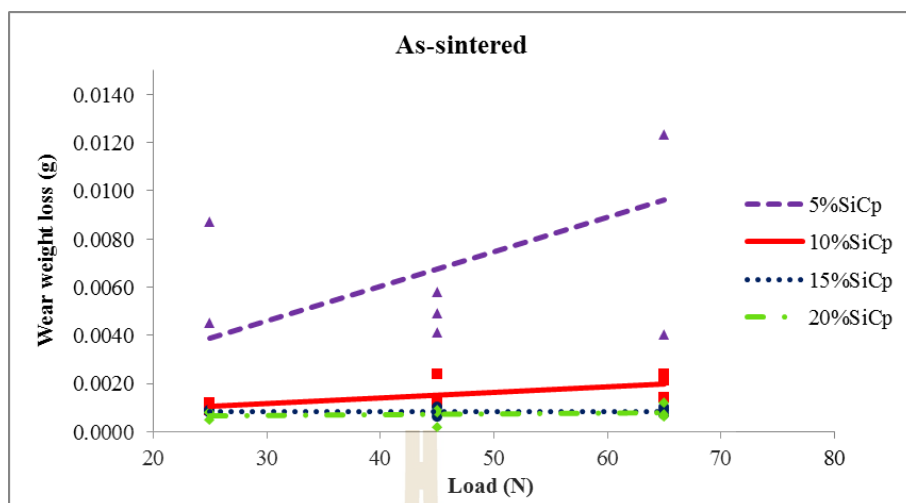
เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเทียบกับปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งภายหลังจากการเผาผนึกและภายหลังจากการบ่มแข็ง พบว่า ภายใต้อภาระแรง 25 45 และ 65 นิวตัน ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีแนวโน้มพฤติกรรมเดียวกัน คือ ชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำสุดคือ 0.044 ถึง 0.045 เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์

โดยปริมาตร ส่วนผลการทดสอบที่ภาระแรง 5 นิวตัน ให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายมีพฤติกรรมที่ต่างออกไป โดยให้ค่าในช่วงค่อนข้างกว้าง ซึ่งการที่ชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำสุดนี้คาดว่าน่าจะสัมพันธ์กับพฤติกรรมการสึกหรอที่เกิดขึ้น

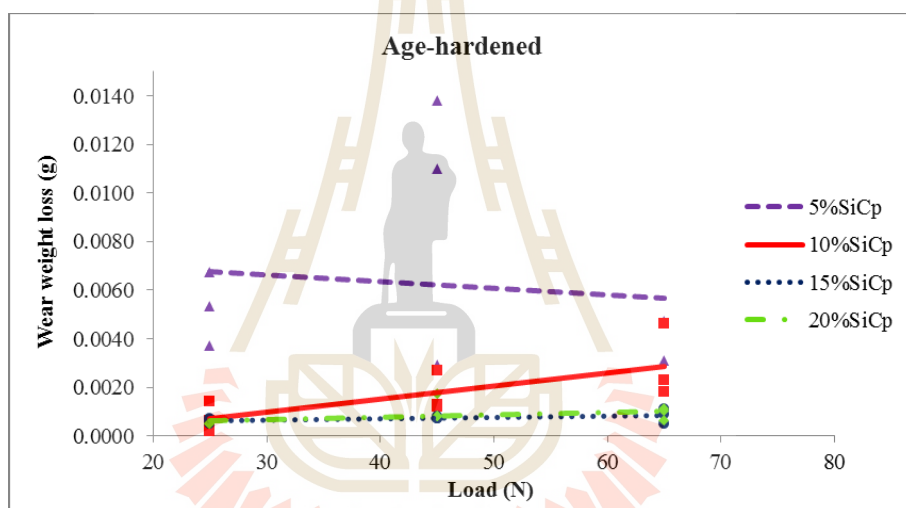
5.3 นำหนักที่หายไปหลังการทดสอบการสึกหรอและอัตราการสึกหรอจำเพาะของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกและการบ่มแข็ง (Wear weight loss and specific wear rate of as-sintered and age-hardened samples)

เมื่อทำการตรวจสอบน้ำหนักที่หายไปหลังจากทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ภายหลังการเผาผนึกและภายหลังการบ่มแข็ง ที่ภาระแรง 5 25 45 และ 65 นิวตัน พบว่า น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงาน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามภาระแรงที่ใช้ทดสอบสูงขึ้น ทั้งภายหลังการเผาผนึกและภายหลังการบ่มแข็ง ซึ่งชิ้นงานที่ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรงต่ำสุดคือ 5 นิวตัน เกิดการสึกหรอที่น้อยที่สุด ซึ่งไม่สามารถวัดน้ำหนักที่สูญเสียไปได้ และเมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักที่หายไปกับชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณต่างๆ พบว่า น้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มลดลง เมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาน้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งภายหลังการเผาผนึกและภายหลังการบ่มแข็ง พบว่าน้ำหนักที่หายไปมีค่าสูงสุดอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณเพิ่มขึ้นที่ 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร น้ำหนักที่หายไปมีค่าลดลงตามลำดับ ซึ่งชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีน้ำที่หายไปค่อนข้างใกล้เคียงกัน

จากการทดสอบการสึกหรอสามารถนำผลการทดสอบที่ได้มาพิจารณาเพื่อคำนวณหาอัตราการสึกหรอจำเพาะ (Specific wear rate) ซึ่งได้จากปริมาตรของชิ้นงานภายหลังการทดสอบการสึกหรอเทียบกับระยะทางและภาระแรงที่ใช้ทดสอบ ดังสมการที่ 3.4 พบว่าอัตราการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ทั้งภายหลังการเผาผนึกและบ่มแข็งมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีอัตราการสึกหรอสูงสุดและอัตราการสึกหรอลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นเป็น 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งเมื่อพิจารณาอัตราการสึกหรอจำเพาะของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่ามีอัตราการสึกหรอค่อนข้างใกล้เคียงกัน

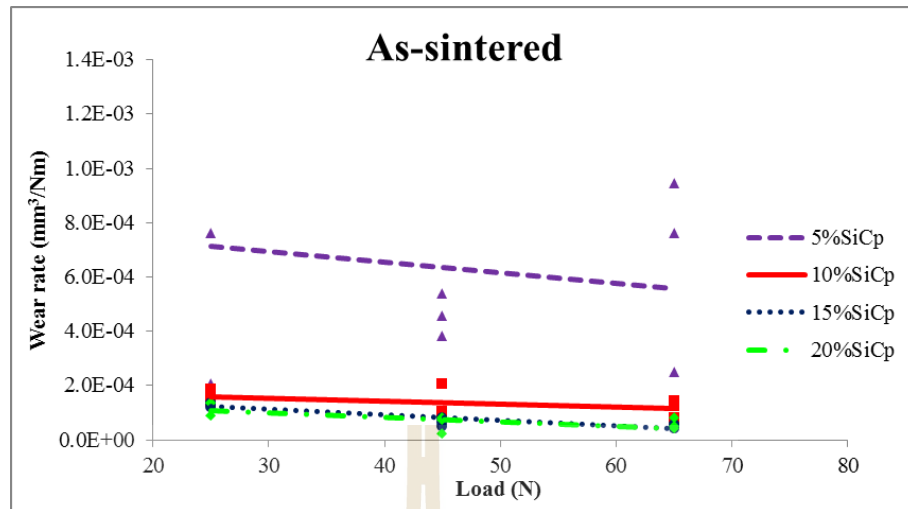


ก) ภายหลังจากการเผาพูนึก

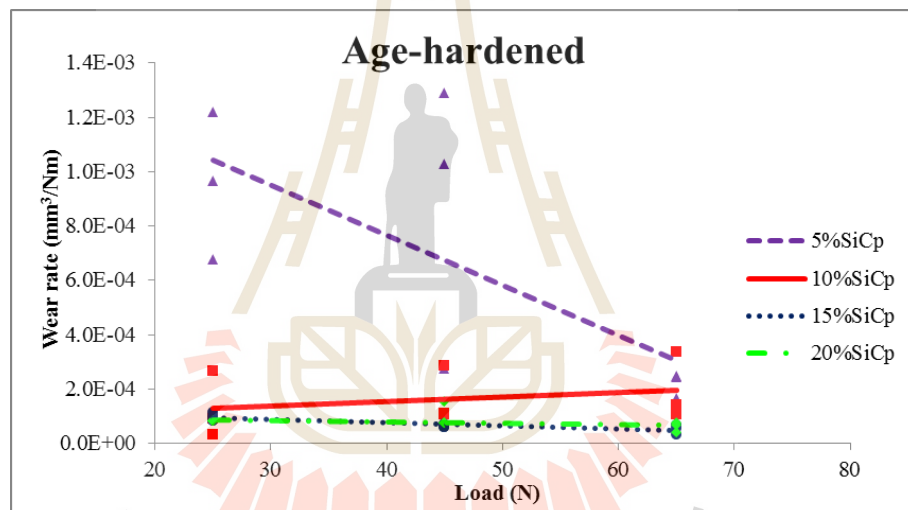


ข) ภายหลังจากการบ่มแข็ง

รูปที่ 5.10 นำหนักที่หายไปจากการทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 45 และ 65 นิวตัน ของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



ก) ภายหลังจากการเผาพูนึก



ข) ภายหลังจากการบ่มแข็ง

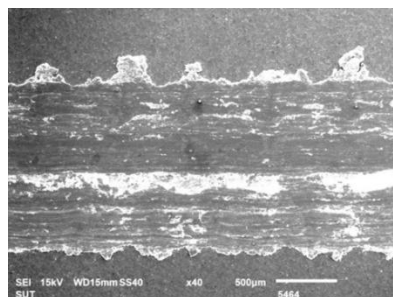
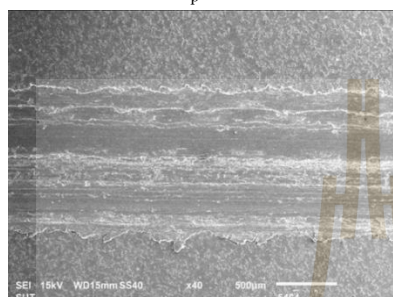
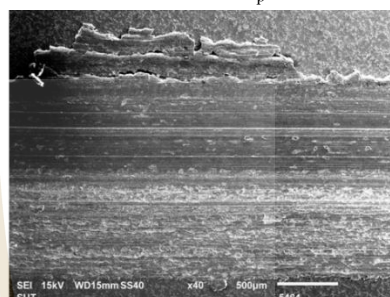
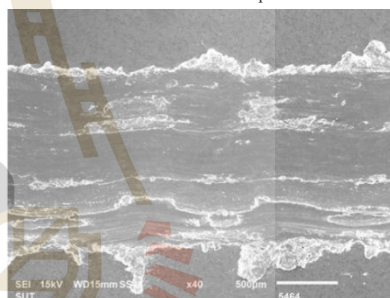
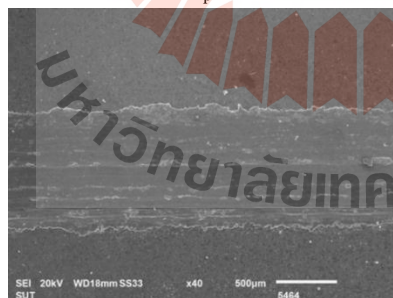
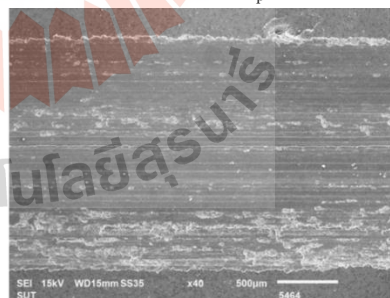
รูปที่ 5.11 อัตราการสึกหรอจำเพาะของชิ้นงานหลังจากการทดสอบการสึกหรอเทียบกับภาระแรงที่ใช้ของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

5.4 พื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังจากการเผาพูนึกและภายหลังจากการบ่มแข็ง (Worn surface of as-sintered and age-hardened samples)

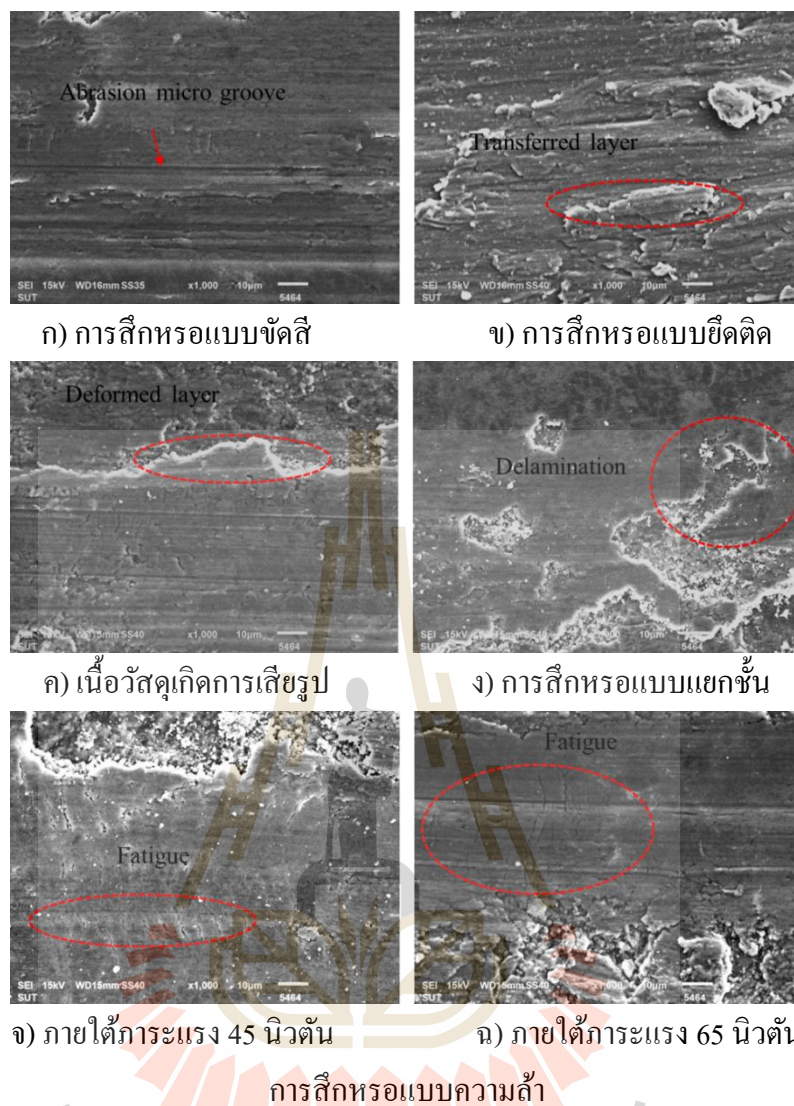
5.4.1 ชิ้นงานภายหลังจากการเผาพูนึก (As-sintered samples)

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ภายใต้อาภาระแรง 5 25 45 และ 65 นิวตัน ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม

เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณต่าง ๆ ภายหลังการเผาผนึก พบว่า มีเนื้อวัสดุที่เกิดจากการเสียดรูปอยู่ตามบริเวณขอบของร่องการสึกหรอ และพื้นผิวของชิ้นงานมีแนวโน้มเกิดการสึกหรอรุนแรงมากขึ้นเมื่อภาระแรงที่ใช้ทดสอบสูงขึ้น เมื่อพิจารณาปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์พบว่า ชิ้นงานมีแนวโน้มเกิดการสึกหรอลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้นดังแสดงดังรูปที่ 5.12 นอกจากนี้ พบว่าชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณแตกต่างกัน แสดงพฤติกรรมหรือกลไกของการสึกหรอที่แตกต่างกันออกไป และขึ้นอยู่กับปริมาณภาระแรงที่ได้รับ โดยลักษณะพื้นผิวการสึกหรอที่พบโดยทั่วไป คือ การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive) การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive) การสึกหรอแบบความล้า (Fatigue) การสึกหรอแบบแยกชั้น (Delamination) และการสึกหรอแบบออกซิเดชัน (Oxidation) ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.13 พฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสี พบร่องการขัดสีเป็นแนวยาว (Abrasive micro groove) ในทิศทางเดียวกันกับการทดสอบการสึกหรอ นอกจากนี้ยังพบว่ามีเนื้อวัสดุที่เกิดการเสียดรูป (Deformed materials) อยู่ตามบริเวณขอบของร่องการสึกหรอ เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้นพบว่า พื้นผิวส่วนใหญ่มีร่องรอยการหลุดออกของเนื้อวัสดุที่เกิดจากการเสียดรูปอย่างถาวรแล้วยึดติดไปกับวัสดุขัดสี เมื่อการทดสอบดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง เนื้อวัสดุของชิ้นงานมีความแข็งน้อยกว่าวัสดุขัดสีซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมทำให้เนื้อวัสดุหลุดออกกลายเป็นสะเก็ดการสึกหรอ (Wear debris) ส่งผลให้พื้นผิวบริเวณดังกล่าวมีลักษณะแยกชั้น (Delamination layers) และยังพบเนื้อวัสดุที่หลุดออกจากบริเวณอื่นมาติดอยู่ที่บริเวณใหม่ (Transferred layers) รวมไปถึงพบรอยแตกขนาดเล็กที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางการทดสอบ ปรากฏเป็นการสึกหรอแบบความล้า (Fatigue wear) เนื่องจากเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณภาระแรงทดสอบความรุนแรงของพฤติกรรมการสึกหรอแบบต่าง ๆ ก็มากขึ้นด้วย เช่น เมื่อภาระแรงทดสอบเพิ่มขึ้นพบว่าการสึกหรอแบบความล้ามีแนวโน้มปรากฏเป็นรอยแตกจำนวนมากขึ้น หรือพบพื้นผิวที่สึกหรอเกิดจากเนื้อวัสดุเสียดรูปในปริมาณมากขึ้น เป็นต้น ในบางกรณีพบการหลุดออกของวัสดุเสริมแรงอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์จากเนื้อพื้น รวมถึงพบการแตกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในช่วงที่ภาระแรงสูงอีกด้วย

ก) 5 vol.%SiC_p 25 นีวตันข) 5 vol. % SiC_p 65 นีวตันค) 10 vol.%SiC_p 25 นีวตันง) 10 vol. % SiC_p 65 นีวตันจ) 15 vol.%SiC_p 25 นีวตันฉ) 15 vol. % SiC_p 65 นีวตันช) 20 vol.%SiC_p 25 นีวตันซ) 20 vol. % SiC_p 65 นีวตัน

รูปที่ 5.12 พื้นผิวการสึกของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาผนึก



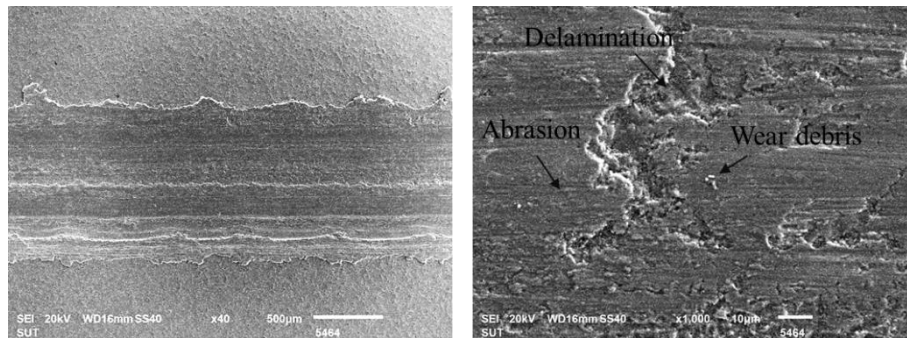
รูปที่ 5.13 พฤติกรรมการสึกหรอโดยทั่วไปที่พบในชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

พฤติกรรมการสึกหรอของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้ภาระแรงทดสอบ 5 - 65 นิวตัน มีพฤติกรรมหรือกลไกการสึกหรอ ดังรายละเอียดต่อไปนี้ คือ ชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ภาระแรง 5 นิวตัน พบว่า มีพฤติกรรมการสึกหรอแบบขีดดีเป็นหลัก ร่วมกับการสึกหรอแบบขีดติดและการสึกหรอแบบความล้า เมื่อภาระแรงเพิ่มขึ้นเป็น 25 45 และ 65 นิวตัน ชิ้นงานได้เปลี่ยนพฤติกรรมเป็นการสึกหรอแบบขีดติดเป็นหลัก ร่วมกับการสึกหรอแบบขีดดีและการสึกหรอแบบความล้า ส่วนชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีพฤติกรรมการสึก

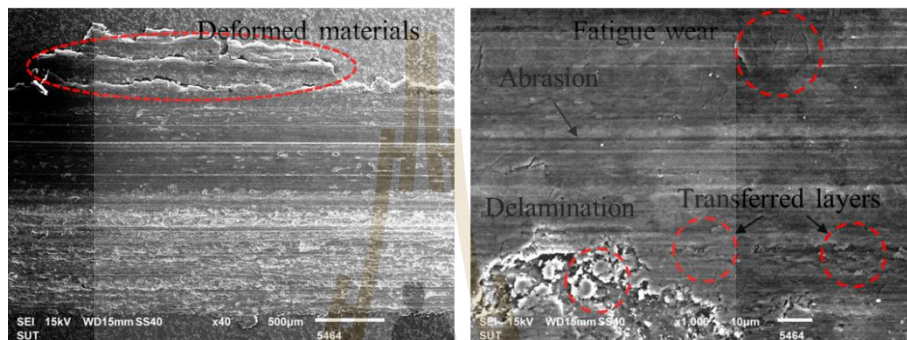
หรือคล้ายคลึงกับชิ้นงานที่เดิมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ส่วนชิ้นงานที่เดิมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร มีแนวโน้มพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสีเป็นหลัก ร่วมกับการสึกหรอแบบยึดติดและการสึกหรอแบบความล้า โดยชิ้นงานที่เดิมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เกิดการสึกหรอแบบขัดสีที่ชัดเจนมากขึ้น โดยในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์พื้นผิวการสึกหรอเฉพาะชิ้นงานที่เดิมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้ภาระแรง 25 และ 65 นิวตัน ดังนี้

เมื่อพิจารณาตัวอย่างพื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานที่เดิมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน พบว่า มีเนื้อวัสดุที่เกิดการเสียดสีอยู่ตามบริเวณขอบของร่องการสึกหรอ เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้นพบว่าพื้นผิวส่วนใหญ่มีลักษณะแยกชั้นเนื่องจากเนื้อวัสดุที่เกิดจากการเสียดสีอย่างถาวรแล้วยึดติดไปกับวัสดุขัดสี เมื่อการทดสอบดำเนินไปอย่างต่อเนื่องเนื้อวัสดุที่หลุดออกกลายเป็นสะเก็ดการสึกหรอ และยังพบเนื้อวัสดุที่หลุดออกจากบริเวณอื่นมาติดอยู่ที่บริเวณใหม่ซึ่งแสดงพฤติกรรมการสึกหรอแบบยึดติด นอกจากนี้ยังพบพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสี โดยพบร่องการขัดสีเป็นแนวยาว (Abrasive micro grooves) ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่ทดสอบการสึกหรอ รวมไปถึงพบรอยแตกขนาดเล็กที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางทดสอบ ปรากฏเป็นการสึกหรอแบบความล้าเนื่องจากเมื่อวัสดุได้รับแรงกระทำเป็นระยะเวลานาน เมื่อพิจารณาที่ภาระแรง 65 นิวตัน พบว่ามีพฤติกรรมการสึกหรอแบบเดียวกับที่ทดสอบด้วยภาระแรง 25 นิวตัน แต่เกิดการสึกหรอที่รุนแรงกว่า ดังรูปที่ 5.14 ข) พบเนื้อวัสดุที่เกิดการเสียดสีอย่างถาวรจำนวนมากที่บริเวณขอบของร่องการสึกหรอ

เมื่อพิจารณาตัวอย่างพื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานที่เดิมอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์มากขึ้นเป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน ดังแสดงในรูป 5.15 ก) พบพื้นผิวของชิ้นงานเกิดการสึกหรอแบบขัดสีเป็นหลัก ซึ่งพบเป็นร่องการขัดสีในแนวยาวตามทิศทางทดสอบและพบพฤติกรรมการสึกหรอแบบยึดติดร่วมด้วย เนื่องจากพบพื้นผิวที่มีลักษณะแยกชั้น รวมไปถึงพบรอยแตกอยู่ในลักษณะตั้งฉากกับทิศทางทดสอบ ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมการสึกหรอแบบความล้า ส่วนกรณีทดสอบที่ภาระแรง 65 นิวตัน แสดงพฤติกรรมการสึกหรอเช่นเดียวกันกับชิ้นงานทดสอบที่ภาระแรง 25 นิวตัน แต่เกิดการสึกหรอที่รุนแรงกว่าดังแสดงในรูปที่ 5.15 ข) หากเปรียบเทียบรอยแตกที่เกิดจากการสึกหรอแบบความล้าของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานทดสอบที่ภาระแรง 65 นิวตัน นั้นรอยแตกที่เกิดขึ้นมีขนาดยาวกว่าและมีระยะห่างระหว่างรอยแตกที่สั้นกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับรอยแตกในชิ้นงานทดสอบที่ 25 นิวตัน

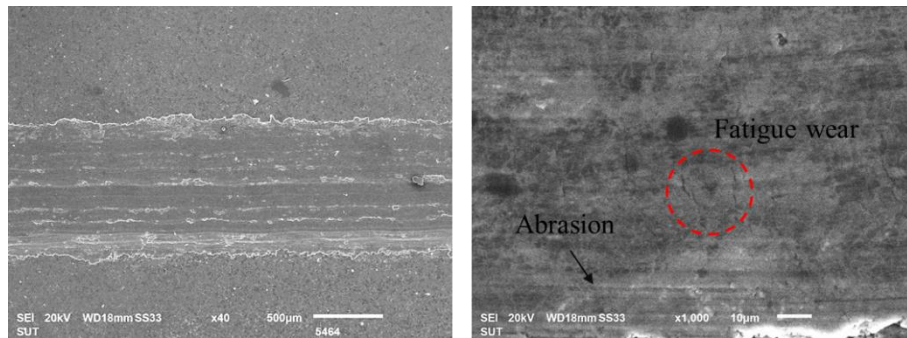


ก) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน

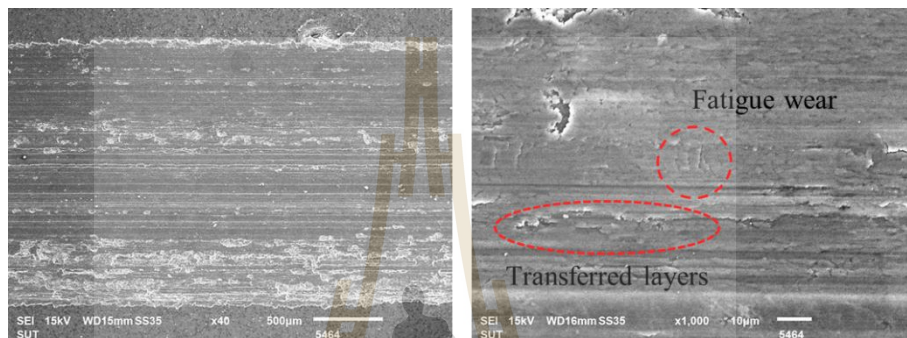


ข) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 65 นิวตัน

รูปที่ 5.14 พื้นผิวที่สึกหรอจากการทดสอบชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาผนึก



ก) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน



ข) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 65 นิวตัน

รูปที่ 5.15 พื้นผิวที่สึกหรอจากการทดสอบชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาพูนึก

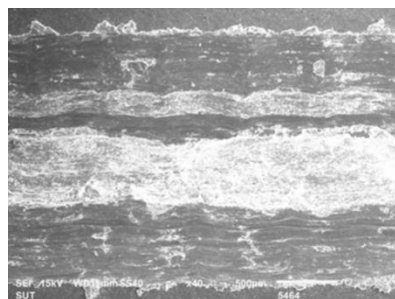
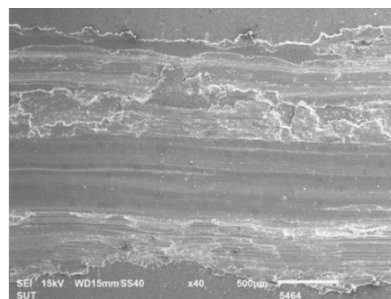
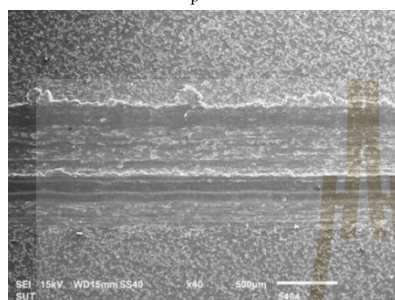
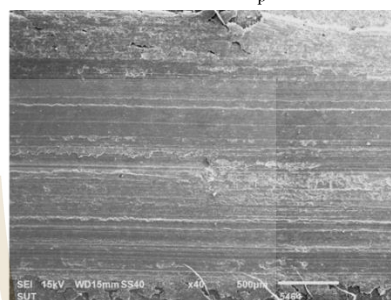
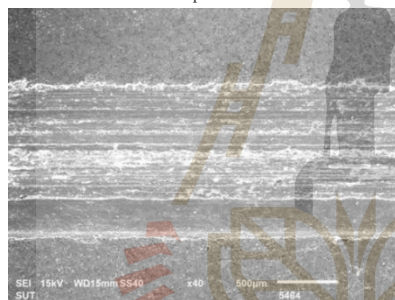
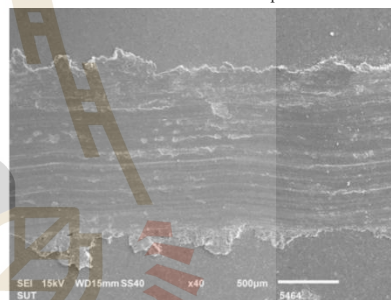
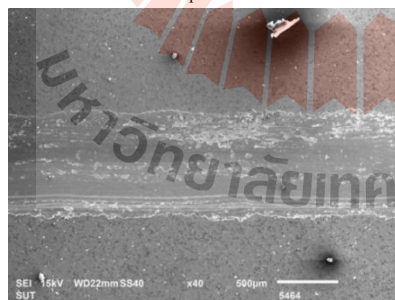
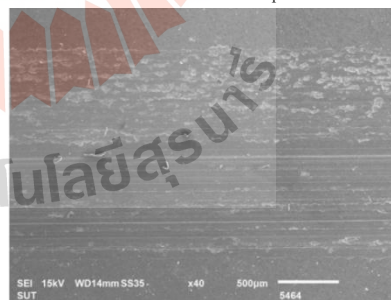
5.4.2 ชิ้นงานภายหลังจากการบ่มแข็ง (Age-hardened samples)

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณต่าง ๆ ภายหลังจากการบ่มแข็ง ภายใต้อาภาระแรงทดสอบที่ 5 - 65 นิวตัน พบว่ามีลักษณะคล้ายกับผลวิเคราะห์ของชิ้นงานภายหลังจากการเผาพูนึก กล่าวคือ มีเนื้อวัสดุที่เกิดจากการเสียดรูปอยู่ตามบริเวณขอบของร่องการสึกหรอ และพื้นผิวของชิ้นงานมีแนวโน้มเกิดการสึกหรอรุนแรงมากขึ้นเมื่อภาระแรงที่ใช้ทดสอบสูงขึ้น ดังรูปที่ 5.16 แต่เมื่อพิจารณาปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ พบว่าชิ้นงานมีแนวโน้มเกิดการสึกหรอลดลงเมื่อปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้น อย่างไรก็ตามก็พบความแตกต่างเล็กน้อยคือ ไม่พบการสึกหรอแบบความล้าในชิ้นงานเมื่อทดสอบภายใต้ภาระแรง 5 นิวตัน เลย ซึ่งแตกต่างจากพื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังจากการเผาพูนึกซึ่งพบการสึกหรอแบบความล้าในชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้อาภาระแรง 5 นิวตัน ซึ่งสันนิษฐานว่าน่าจะเป็นผลจากความแข็งของชิ้นงานที่เพิ่มขึ้นจากการบ่มแข็ง ในหัวข้อนี้จะยกตัวอย่างผลการวิเคราะห์พื้นผิว

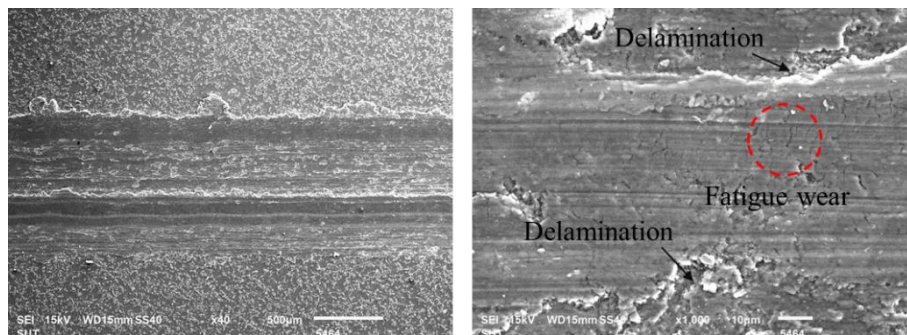
เฉพาะของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากบ่มแข็งดังนี้

เมื่อพิจารณาตัวอย่างพื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้อภาระแรง 25 นิวตัน ดังรูป 5.17 ก) พบว่าลักษณะพื้นผิวการสึกหรอใกล้เคียงกับชิ้นงานภายหลังจากเผาผืนิก ก็มีเนื้อวัสดุเสยรูปอยู่ตามบริเวณขอบของร่องการสึกหรอ เมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้น พบว่า พื้นผิวการสึกหรอบริเวณดังกล่าวมีลักษณะแยกชั้น และพบเนื้อวัสดุที่หลุดออกจากบริเวณอื่นมาติดอยู่ที่บริเวณใหม่ ซึ่งแสดงพฤติกรรมการสึกหรอแบบยึดติด นอกจากนี้ชิ้นงานยังมีพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัตสีโดยมีร่องการขัตสีในแนวยาว รวมไปถึงมีพฤติกรรมการสึกหรอแบบความล้าร่วมด้วย เมื่อพิจารณาชิ้นงานทดสอบที่ภาระแรง 65 นิวตัน ดังรูป 5.17 ข) พบว่าชิ้นงานเกิดการสึกหรอรุนแรงขึ้นเมื่อเพิ่มภาระแรงทดสอบ ซึ่งแสดงพฤติกรรมการสึกหรอแบบเดียวกันกับชิ้นงานทดสอบที่ภาระแรง 25 นิวตัน เพียงแต่ที่ภาระแรง 65 นิวตัน มีเนื้อวัสดุเกิดการเสยรูปในปริมาณมากอยู่ตามบริเวณขอบของร่องการสึกหรอ และเมื่อพิจารณาที่กำลังขยายสูงขึ้น พบว่าพื้นผิวที่เต็มไปด้วยเนื้อวัสดุจากบริเวณอื่นมาติดอยู่รวมไปถึงมีสะเก็ดการสึกหรอปรากฏอยู่ที่พื้นผิวด้วย

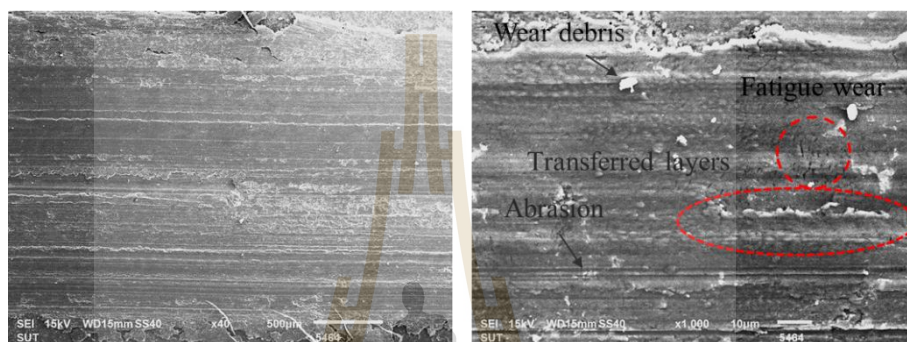
เมื่อพิจารณาตัวอย่างพื้นผิวการสึกหรอในกรณีชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้นเป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากบ่มแข็ง พบว่าพื้นผิวและพฤติกรรมการสึกหรอมีลักษณะคล้ายกับชิ้นงานภายหลังจากเผาผืนิก เปรียบเทียบที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เดียวกัน เมื่อพิจารณาภายใต้อภาระแรง 25 นิวตัน ดังรูปที่ 5.18 ก) พบว่าชิ้นงานมีพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัตสีเป็นหลัก นอกจากนี้ยังพบชั้นรอยแตกขนาดใหญ่ซึ่งอาจจะเกิดจากเนื้อวัสดุหลุดออกกลายเป็นสะเก็ดการสึกหรออยู่บนพื้นผิวของชิ้นงานแล้วถูกอัดอยู่บนเนื้อพื้น เมื่อการทดสอบดำเนินไป บริเวณดังกล่าวได้รับแรงกระทำอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดเป็นชั้นเนื้อวัสดุที่ถูกอัดแน่น (Mechanical mixed layer) (Stachowiak, G.W. 2005) รวมไปถึงพบพื้นผิวที่มีลักษณะแยกออกเป็นชั้นๆ อีกด้วย ส่วนชิ้นงานทดสอบภายใต้อภาระแรง 65 นิวตัน พบว่ามีพฤติกรรมการสึกหรอใกล้เคียงกับที่ภาระแรง 25 นิวตัน โดยแสดงถึงพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัตสีและมีเนื้อวัสดุบางส่วนเกิดการเสยรูป นอกจากนี้ยังพบรอยแตกที่ฉากกับทิศทางการทดสอบการสึกหรอ แสดงถึงพฤติกรรมการสึกหรอแบบความล้าร่วมไปถึงพบสะเก็ดการสึกหรอติดที่อยู่พื้นผิวด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.19 ข

ก) 5 vol.%SiC_p 25 นีวตันข) 5 vol. % SiC_p 65 นีวตันค) 10 vol.%SiC_p 25 นีวตันง) 10 vol. % SiC_p 65 นีวตันจ) 15 vol.%SiC_p 25 นีวตันฉ) 15 vol. % SiC_p 65 นีวตันช) 20 vol.%SiC_p 25 นีวตันซ) 20 vol. % SiC_p 65 นีวตัน

รูปที่ 5.16 พื้นผิวที่สึกกร่อนของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการบ่มแข็ง

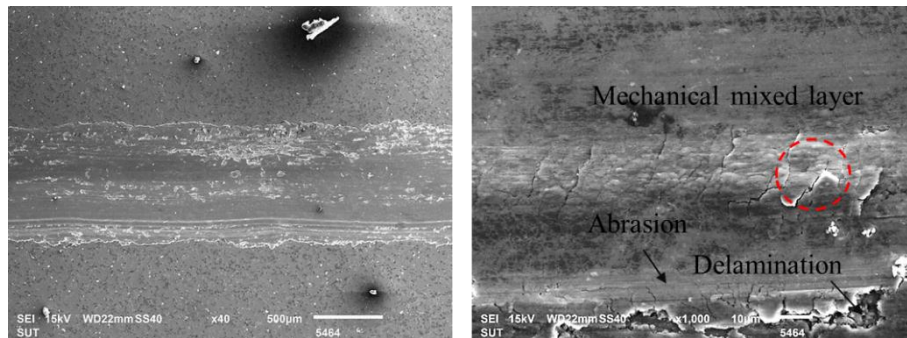


ก) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน

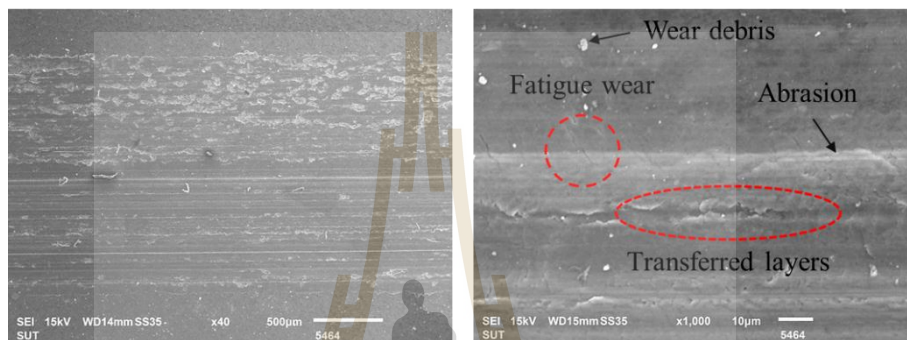


ข) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 65 นิวตัน

รูปที่ 5.17 พื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากบ่มแข็ง



ก) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน



ข) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 65 นิวตัน

รูปที่ 5.18 พื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากบ่มแข็ง

5.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของพื้นผิวการสึกหรอของชิ้นงาน ภายหลังจากเผาผนึกและภายหลังจากบ่มแข็ง (Worn surface analysis of as-sintered and age-hardened samples)

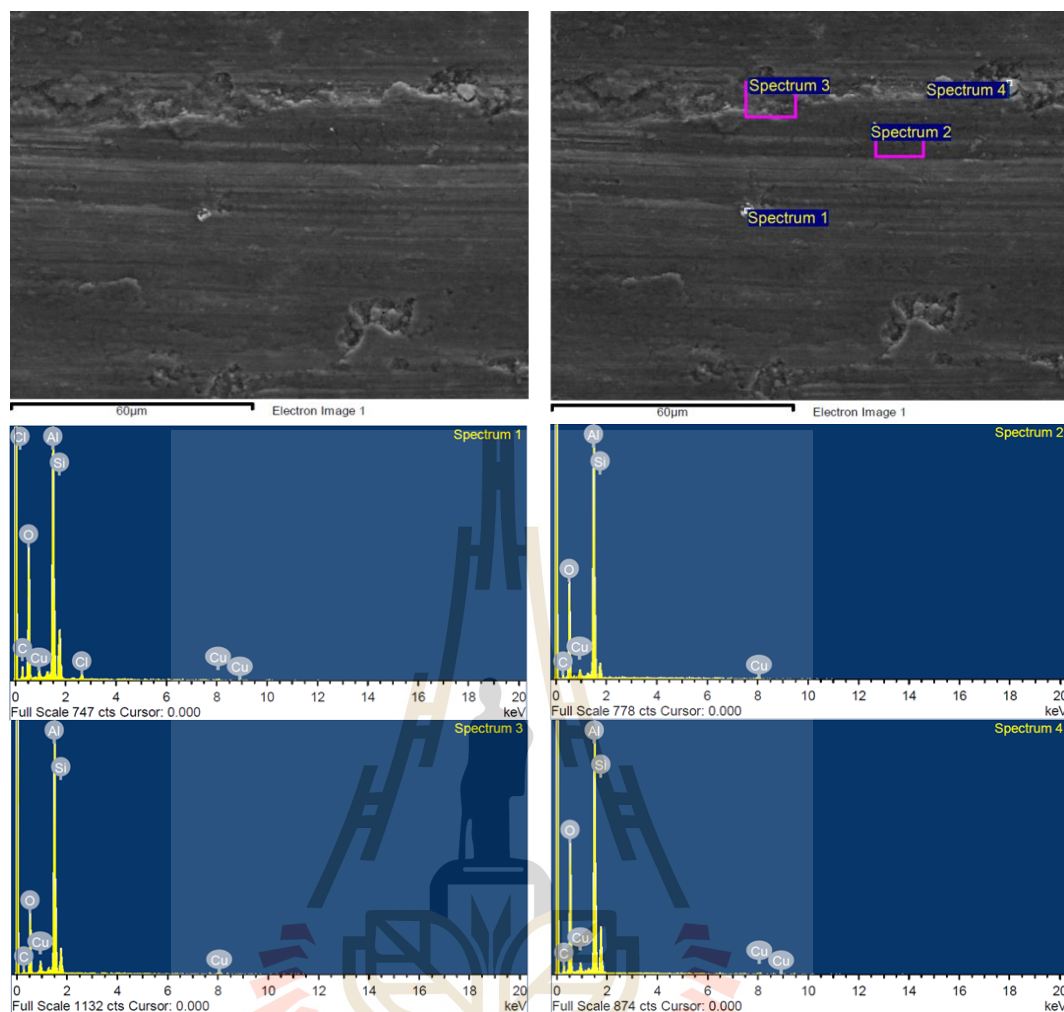
ในการวิเคราะห์พื้นผิวการสึกหรอด้วยเทคนิค EDS จะทำการวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งหรือบริเวณที่แสดงลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน เช่น บริเวณที่เกิดการเสียรูป (Deformed) หรือไหลตัว (Flow) เกิดรอยแตกจากความล้า เกิดการแยกชั้น (Delamination) เพื่อนำผลมาวิเคราะห์ในการบ่งชี้หรือสนับสนุนกลไกการสึกหรอ โดยจะแสดงผลวิเคราะห์เปรียบเทียบในกรณีของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้อาภาระแรงทดสอบ 25 และ 65 นิวตัน รวมถึงเปรียบเทียบในสภาวะภายหลังจากเผาผนึกและบ่มแข็ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.5.1 ชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก (As-sintered samples)

ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างพื้นผิวที่เกิดการสึกหรอด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึกโดยใช้ภาระแรงในการทดสอบ 25 นิวตัน ดังรูปที่ 5.19 เมื่อพิจารณา Spectrum 1 มีลักษณะคล้ายสะเกิดการสึกหรอติดอยู่ที่พื้นผิวการสึกหรอ เมื่อนำไปวิเคราะห์ธาตุ พบว่า มีปริมาณธาตุออกซิเจนและอะลูมิเนียมเป็นหลักในปริมาณ 43.99 และ 31.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนธาตุรองลงมาคือคาร์บอนและซิลิคอน ปริมาณ 12.47 และ 8.73 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงในตารางผลการวิเคราะห์ธาตุในรูปที่ 5.19 นอกจากนี้ พบทองแดงปริมาณเล็กน้อย โดยที่ Spectrum 4 มีผลการวิเคราะห์ธาตุและปริมาณของธาตุใกล้เคียงกับ Spectrum 1 ซึ่งน่าจะเป็นสะเกิดการสึกหรอเช่นเดียวกัน อาจเป็นไปได้ว่าสะเกิดการสึกหรอที่หลุดออกมาเป็นเนื้อวัสดุเชิงประกอบที่ถูกขัดสีแล้วหลุดออกมาจากร่องการสึกหรอโดยระหว่างที่ได้รับแรงกระทำในการทดสอบ ส่วนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมเกิดการออกซิไดซ์ได้ง่ายซึ่งน่าจะเกิดเป็นสารประกอบอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ส่งผลทำให้มีปริมาณออกซิเจนสูง เมื่อพิจารณาบริเวณพื้นผิวการสึกหรอที่เกิดเป็นร่องขนาดเล็ก (Micro groove) ใน Spectrum 2 ซึ่งเป็นบริเวณร่องรอยการเกิดการสึกหรอแบบขัดสีเนื่องจากการเคลื่อนที่ของหัวบอลไปบนเนื้อวัสดุ พบว่าพื้นผิวของวัสดุเกิดการสึกหรอแล้วสูญเสียเนื้อวัสดุออกไป ทำให้พื้นผิวในบริเวณ Spectrum 2 สร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ใหม่ขึ้นมา ซึ่งการสร้างชั้นฟิล์มนี้จะเกิดขึ้นเป็นวัฏจักร กล่าวคือหากขณะทดสอบการสึกหรอเนื้อวัสดุได้หลุดออกจากพื้นผิวทำให้พื้นผิวสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ขึ้นมาและถูกทำลายในรอบการรับแรงครั้งถัดไป ซึ่งธาตุที่พบในบริเวณ Spectrum 2 นั้นสามารถระบุได้ว่าเป็นพื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งประกอบไปด้วยอะลูมิเนียมและออกซิเจน เป็นหลักในปริมาณ 43.45 และ 42.71 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนธาตุรองลงมาคือ คาร์บอน และ ซิลิคอน ปริมาณ 5.57 และ 4.35 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบทองแดง ปริมาณ 3.92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในส่วนของผลการวิเคราะห์ธาตุในบริเวณ Spectrum 3 ซึ่งเป็นบริเวณที่เนื้อวัสดุได้เกิดการเสีรูปร่างอย่างถาวรแล้ว หลุดออกทำให้พื้นผิวเกิดเป็นลักษณะแยกชั้น พบอะลูมิเนียม ออกซิเจน คาร์บอน ซิลิคอน และทองแดง เช่นเดียวกับกับ Spectrum 2 ส่วนผลการวิเคราะห์ธาตุของพื้นผิวที่สึกหรอภายใต้ภาระแรง 65 นิวตัน พบว่า Spectrum 1 ถึง Spectrum 4 ให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกันทุกบริเวณ ประกอบไปด้วยธาตุ อะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง และซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 5.20

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึกที่ภาระแรง 25 นิวตัน พบว่าพื้นผิวมีลักษณะแยกชั้นและหลุดออกบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5.21 Spectrum 1 วิเคราะห์บนเป็นบริเวณพื้นผิวที่อยู่ใต้ชั้นผิวที่แยกออกมา ซึ่งจะ

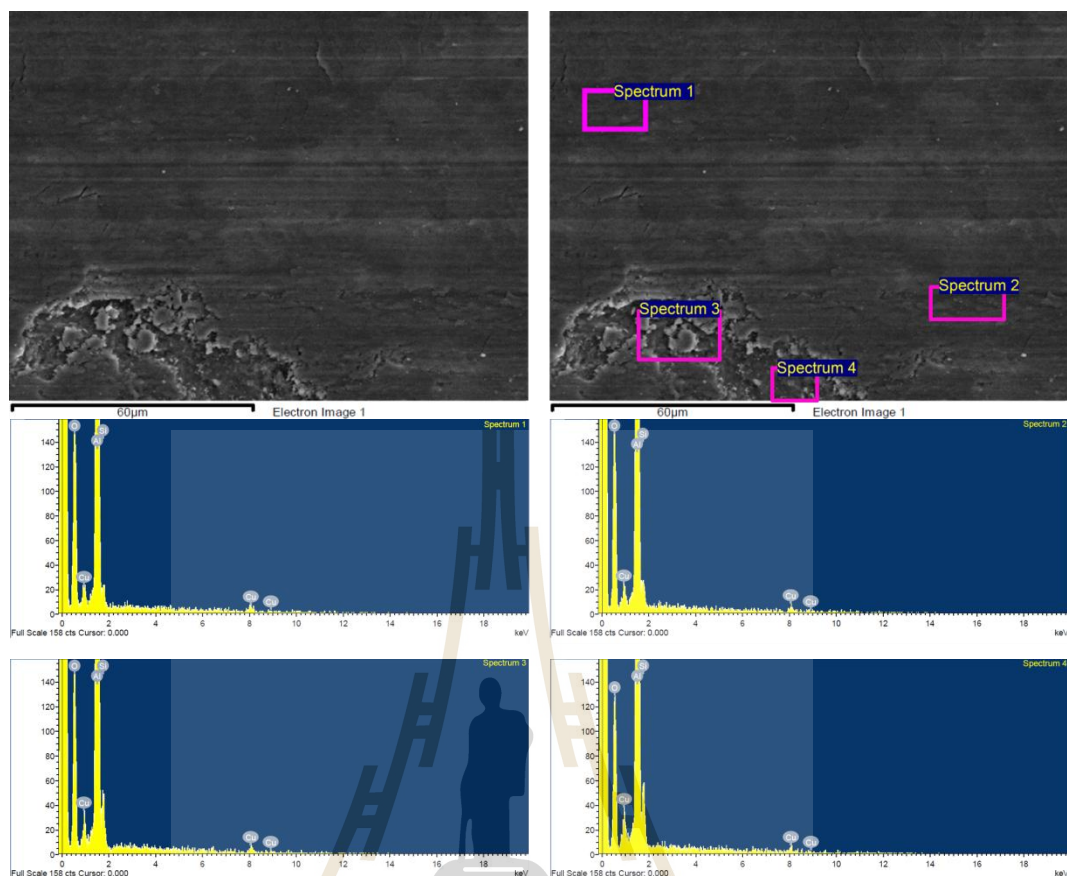
ประกอบไปด้วยธาตุ อะลูมิเนียม 45.17 ออกซิเจน 19.95 ทองแดง 2.51 ซิลิคอน 21.24 และคาร์บอน 11.13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงบริเวณที่เนื้อวัสดุอยู่รวมกันคือเนื้อพื้นโลหะ อะลูมิเนียมที่เกิดการออกซิไดซ์ รวมถึงอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่อาจมีขนาดเล็กลงเนื่องจากถูกบด ให้แตกระหว่างการทดสอบการสึกหรอ ส่วนบริเวณ Spectrum 2 มีอะลูมิเนียมเป็นหลักและมี ปริมาณออกซิเจนสูงถึง 36.28 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงถึงพื้นผิวที่เกิดการสึกหรอแบบ ออกซิเดชัน เมื่อพิจารณาบริเวณ Spectrum 3 พบว่าเป็นบริเวณที่มีชั้นเนื้อวัสดุจากการหลุดออกจาก บริเวณหนึ่งมาติดอยู่บริเวณหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยอะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง ซิลิคอน และ คาร์บอน เช่นเดียวกับกับ Spectrum 1 ส่วนบริเวณ Spectrum 4 คาดว่าน่าจะเป็นสะเก็ดการสึกหรอที่ หลุดออกแล้วติดอยู่บนผิวของชิ้นงาน ซึ่งมีปริมาณอะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง และซิลิคอน ดัง แสดงในตารางผลการวิเคราะห์ธาตุในรูปที่ 5.21 เมื่อเพิ่มภาระแรงทดสอบเป็น 65 นิวตัน ดังรูปที่ 5.22 พบว่า นอกจากธาตุอะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง ซิลิคอน และคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุ องค์ประกอบของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบแล้ว ยังพบธาตุเหล็กและ โครเมียมในปริมาณค่อนข้างสูง ที่บริเวณ Spectrum 1 มีปริมาณธาตุเหล็ก 68.74 และ โครเมียม 7.98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วน บริเวณ Spectrum 3 และ 4 ก็พบธาตุเหล็กและโครเมียมเช่นเดียวกัน ดังแสดงในตารางผลการ วิเคราะห์ธาตุประกอบในรูปที่ 5.22 ซึ่งผลการวิเคราะห์ทั้ง Spectrum 1 3 และ 4 สามารถสันนิษฐาน ได้ว่าบริเวณดังกล่าวเป็นพื้นผิวของชิ้นงานที่เกิดการสึกหรอและมีสะเก็ดการสึกหรอของวัสดุขดสี ที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมหลุดลงมาอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อการทดสอบดำเนินต่อไปทำให้ สะเก็ดนั้นถูกบดอัดลงไปทีผิวหน้าของชิ้นงาน ส่วน Spectrum 2 คาดว่าเป็นสะเก็ดการสึกหรอ ขนาดประมาณ 2 ไมครอน เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า มีธาตุเหล็กสูงถึง 89.63 และโครเมียม 8.05 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยผลการวิเคราะห์นี้สามารถยืนยันได้ว่าวัสดุขดสีที่ทำจากเหล็กกล้าไร้ สนิมเกิดการสึกหรอแล้วหลุดออกเป็นสะเก็ดติดอยู่ที่พื้นผิว



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS บนพื้นผิวที่สึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele	Wt. %
Al	31.11	Al	43.45	Al	45.36	O	45.29
O	43.99	O	42.71	O	32.35	Al	33.01
Cu	2.63	Cu	4.35	Cu	5.64	Cu	3.55
Si	8.73	Si	3.92	Si	6.93	Si	8.71
C	12.47	C	5.57	C	9.72	C	9.44

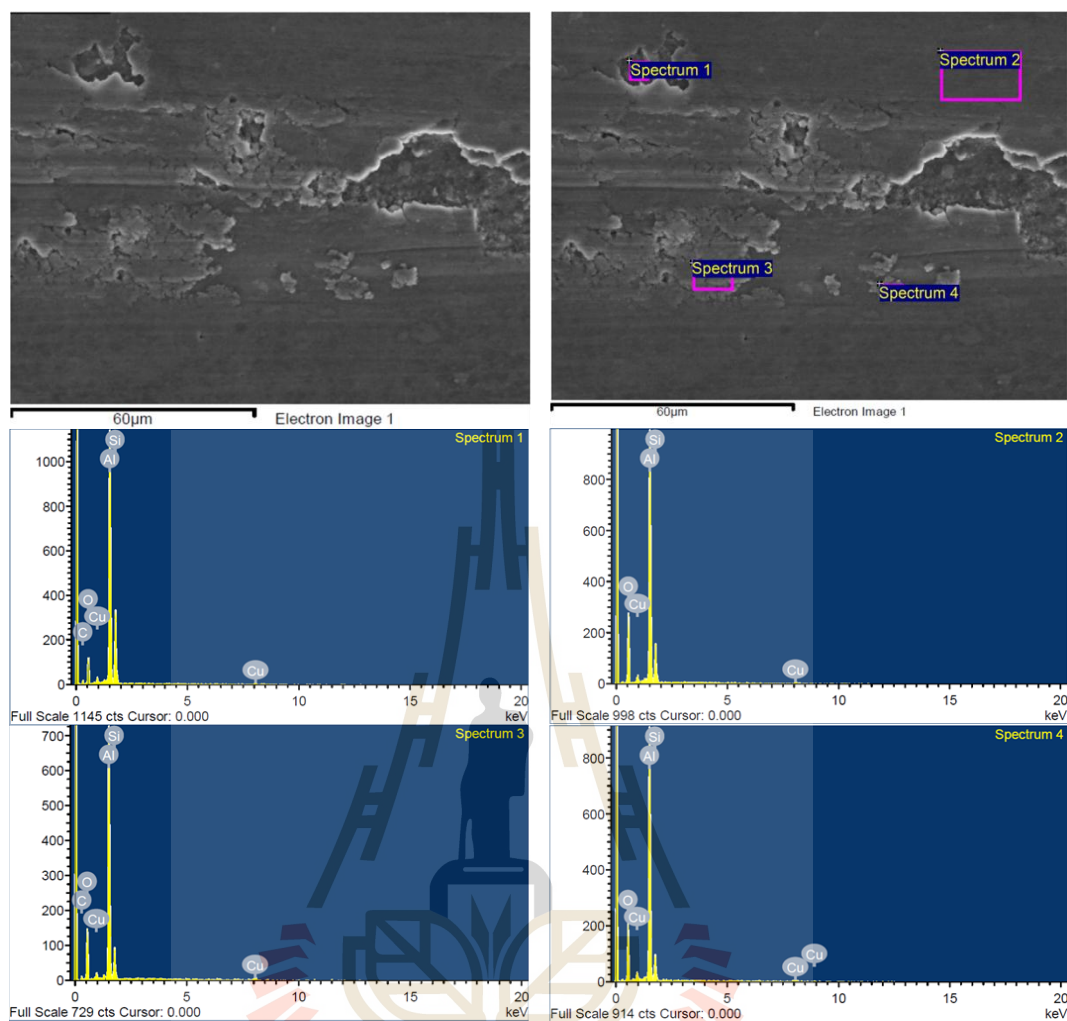
รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ของพื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาผืนที่ภาระแรง 25 นิวตัน



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS บนพื้นผิวที่สึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele	Wt. %
Al	50.59	Al	50.99	Al	50.23	Al	51.68
O	41.93	O	41.17	O	39.17	O	35.04
Cu	4.97	Cu	4.71	Cu	5.46	Cu	6.02
Si	2.52	Si	3.14	Si	5.14	Si	7.26

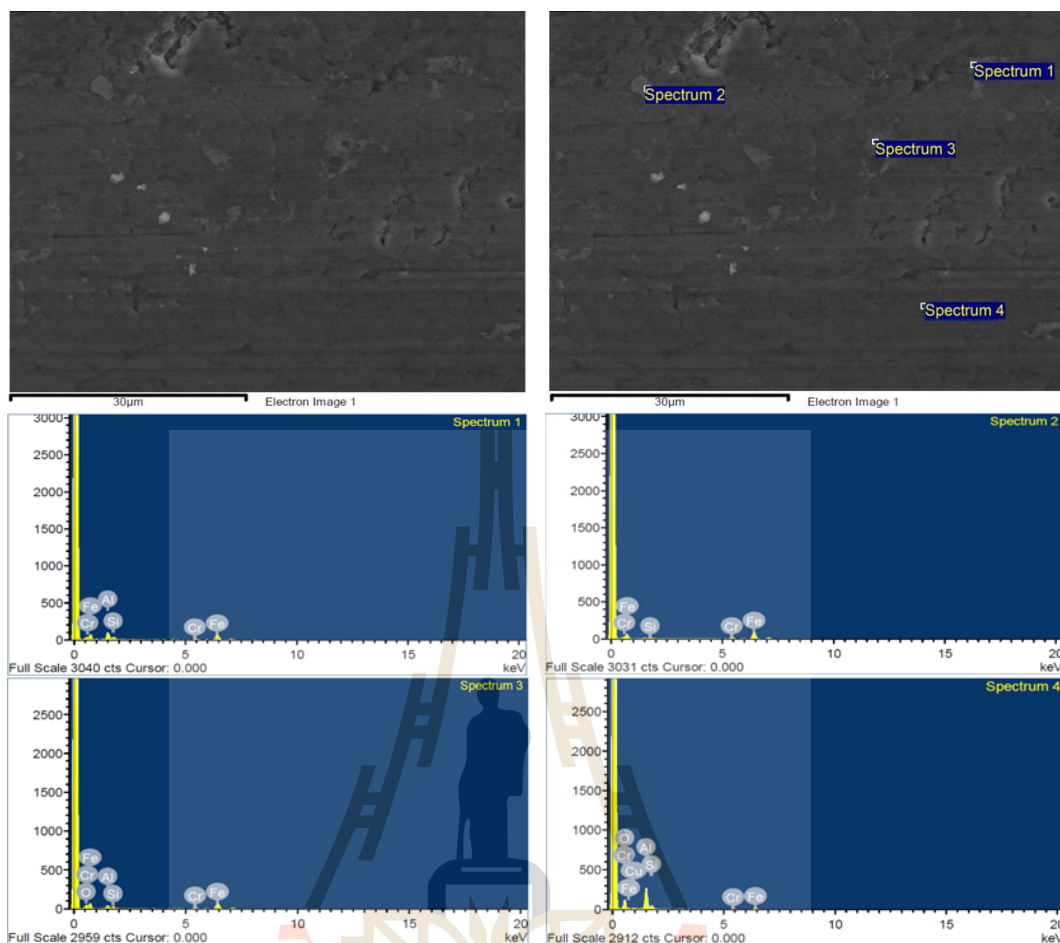
รูปที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ของพื้นผิวที่สึกหรอ ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาผืนที่ภาระแรง 65 นิวตัน



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS บนพื้นผิวที่สึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %
Al	45.17	Al	47.99	Al	47.58	Al	52.77
O	19.95	O	36.28	O	30.86	O	33.99
Cu	2.51	Cu	2.99	Cu	3.08	Cu	4.51
Si	21.24	Si	12.74	Si	9.38	Si	8.73
C	11.13			C	9.11		

รูปที่ 5.21 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ของพื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาผนึก ที่ภาระแรง 25 นิวตัน



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS บนพื้นผิวที่สึกหรอ (Spectrum 1-4)

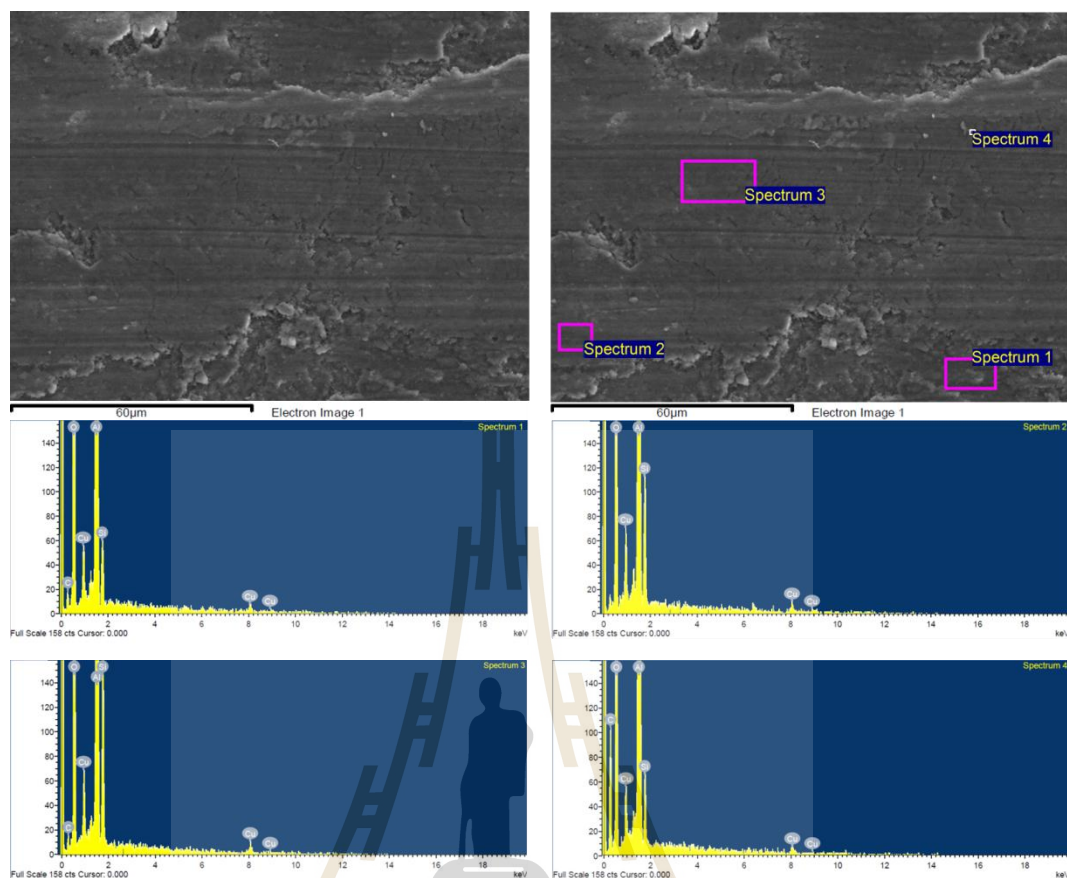
Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele	Wt. %
Al	17.70	Si	2.32	Al	7.85	Al	33.13
Si	5.59	Fe	89.63	O	12.50	O	36.52
Fe	68.74	Cr	8.05	Si	4.48	Cu	4.73
Cr	7.98			Fe	67.21	Si	7.93
				Cr	7.96	Fe	13.89
						Cr	3.81

รูปที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ของพื้นผิวที่สึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก ที่ภาระแรง 65 นิวตัน

5.5.2 ชิ้นงานภายหลังการบ่มแข็ง (Age-hardened samples)

ผลการวิเคราะห์พื้นผิวที่เกิดการสึกหรอด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการบ่มแข็ง ภายใต้อุณหภูมิ 25 นิวตัน พบว่า Spectrum 1 2 3 และ 4 ประกอบไปด้วยธาตุ อะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง ซิลิคอน และ คาร์บอน ดังตารางผลการวิเคราะห์ธาตุในรูปที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์ที่ได้คล้ายคลึงกับชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก ซึ่งธาตุที่พบดังกล่าวเป็นองค์ประกอบทางเคมีของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ส่วนชิ้นงานทดสอบภายใต้อุณหภูมิ 65 นิวตัน พบธาตุอะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง ซิลิคอน คาร์บอน และออกซิเจนเช่นเดียวกันที่บริเวณ Spectrum 1 ถึง 4 ซึ่งเป็นบริเวณพื้นผิวที่สึกหรอ นอกจากนี้ยังพบธาตุเหล็กปริมาณ 7.43 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งอาจจะเป็นสะเก็ดของวัสดุขัดสีที่เกิดการสึกหรอแล้วหลุดลงมาอยู่บริเวณพื้นผิวของชิ้นงาน ทำให้ตรวจพบธาตุเหล็กที่ผิวหน้าของชิ้นงาน ซึ่งต่างจากผลการวิเคราะห์ของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึกที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ทั้งภายใต้อุณหภูมิ 25 และ 65 ไม่พบธาตุเหล็กอยู่บนพื้นผิวการสึกหรอ

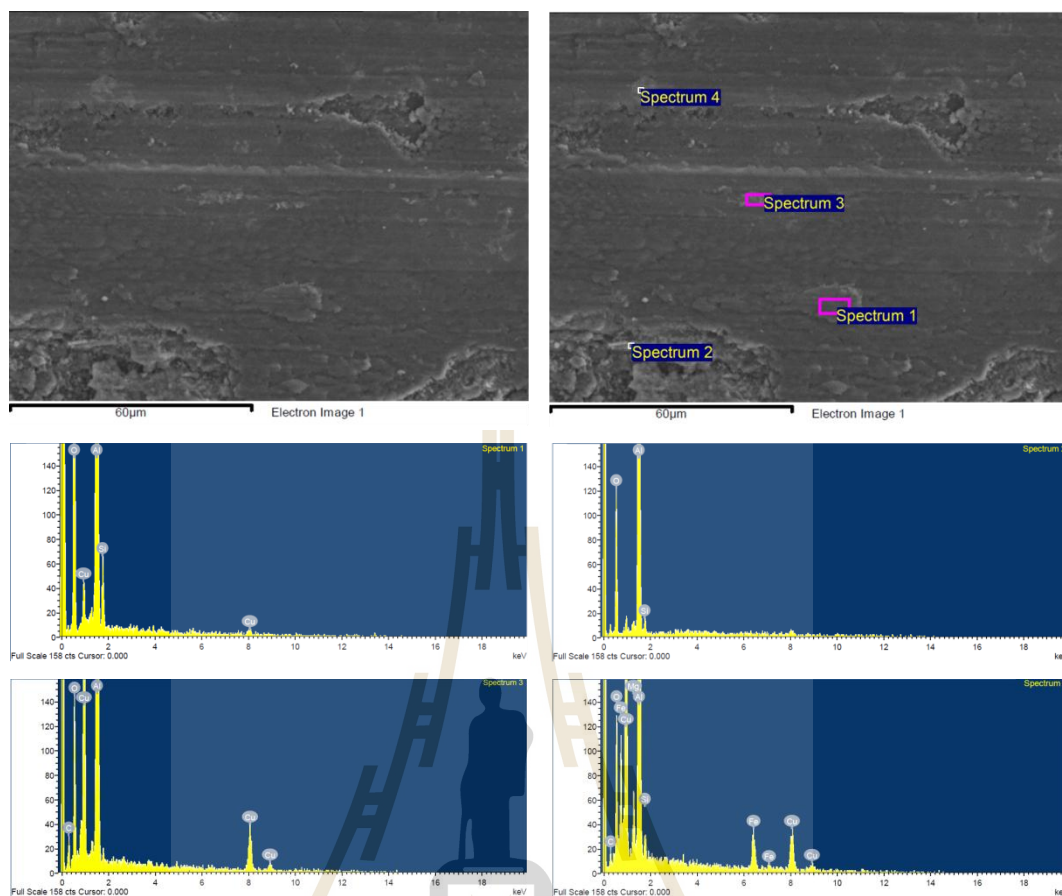
ชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการบ่มแข็ง ภายใต้อุณหภูมิ 25 นิวตัน ดังรูปที่ 5.25 พิจารณา Spectrum 1 และ 2 ซึ่งเป็นพื้นผิวที่สึกหรอ มีลักษณะเป็นร่องยาวจากการถูกขัดสีพบอะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง และซิลิคอน ส่วน Spectrum 3 พบธาตุเหล็กอยู่ 2.72 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 65 นิวตัน ดังรูปที่ 5.26 พบธาตุเหล็กและโครเมียมในปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งจากผลการวิเคราะห์สามารถยืนยันได้ว่าสะเก็ดการสึกหรอนอกจากมีเนื้อของวัสดุเชิงประกอบแล้วยังมีเนื้อของวัสดุขัดสีหลุดติดมาปะปนอยู่ด้วย ในส่วนของผลการวิเคราะห์บริเวณ Spectrum 3 และ 4 เป็นพื้นผิวที่เกิดการสึกหรอแล้วเนื้อพื้นมีการสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์ขึ้นมาทำให้มีปริมาณออกซิเจนสูง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ธาตุของพื้นผิวการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณต่าง ๆ ทั้งภายหลังการเผาผนึกและภายหลังการบ่มแข็ง พบว่ามีปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูงซึ่งแสดงว่ามีการสึกหรอแบบออกซิเดชันเกิดร่วมด้วย



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS บนพื้นผิวที่สึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele	Wt. %
Al	45.09	Al	50.62	Al	44.18	Al	42.14
O	42.64	O	38.01	O	38.57	O	30.82
Cu	4.35	Cu	5.72	Cu	4.75	Cu	2.79
Si	2.87	Si	5.65	Si	7.23	Si	1.77
C	5.05			C	5.27	C	22.49

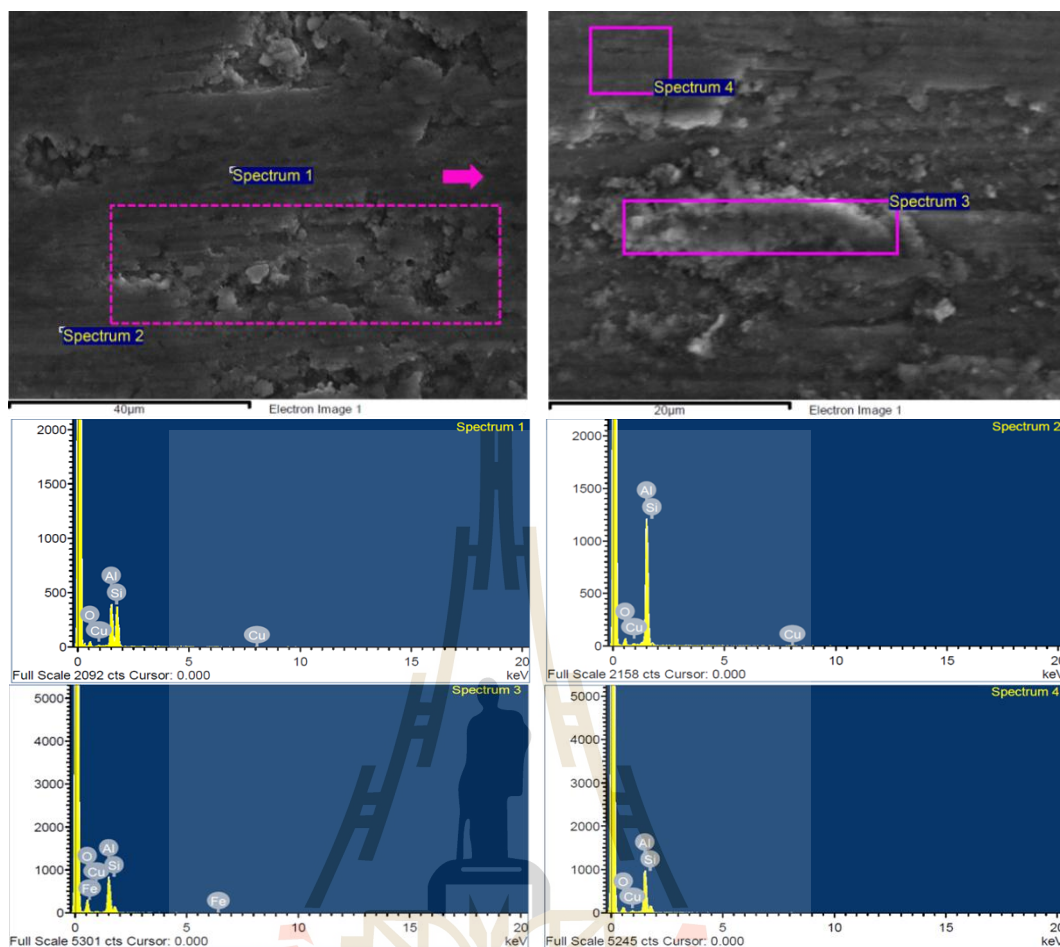
รูปที่ 5.23 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ของพื้นผิวที่สึกหรอ ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากบ่มแข็ง ที่ภาระแรง 25 นิวตัน



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS บนพื้นผิวที่สึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %
Al	51.10	Al	64.45	Al	52.06	Al	45.24
O	41.00	O	33.86	O	13.43	O	9.95
Cu	4.51	Si	1.69	Cu	25.24	Cu	29.55
Si	3.39			C	9.28	Si	1.23
						C	4.84
						Fe	7.43
						Mg	1.76

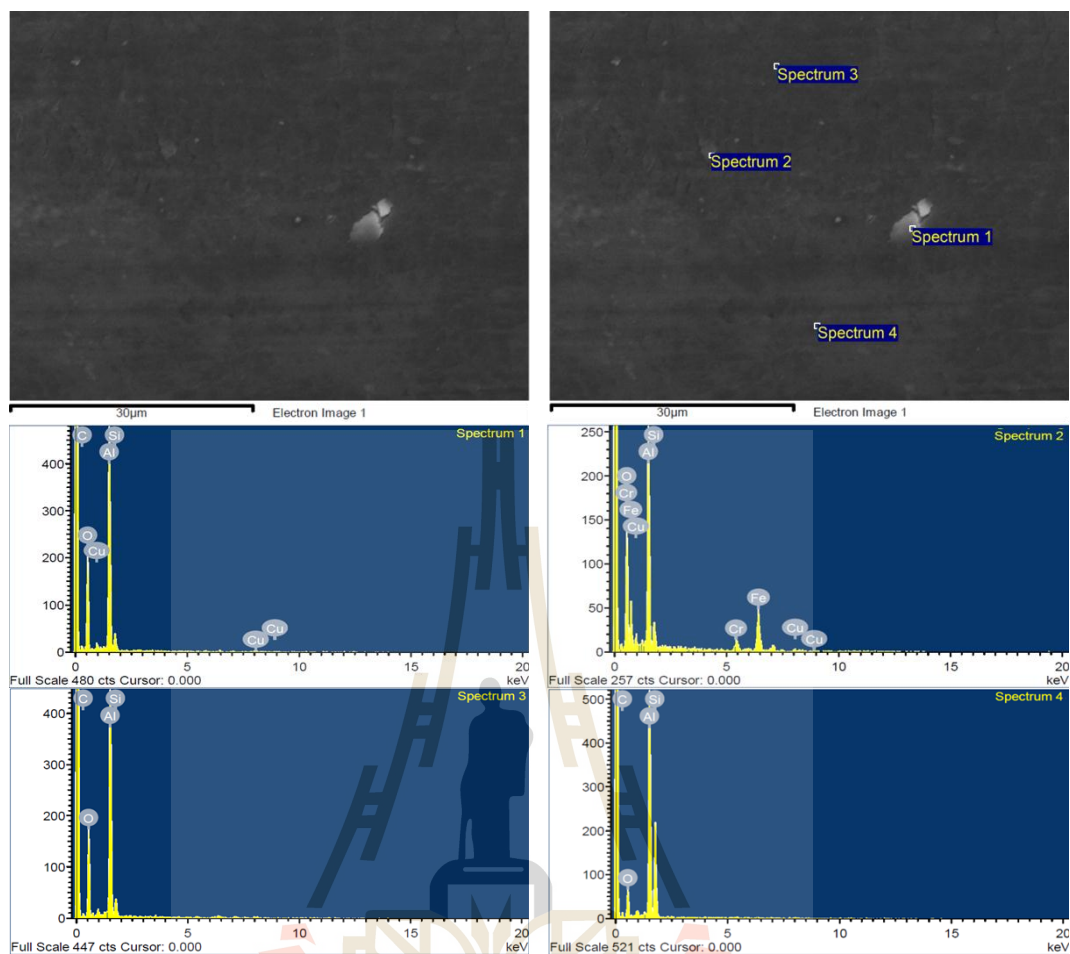
รูปที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ของพื้นผิวที่สึกหรอ ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการบ่มแข็ง ที่ภาระแรง 65 นิวตัน



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS บนพื้นผิวที่สึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %
Al	30.44	Al	70.53	Al	40.23	Al	53.72
O	23.58	O	23.87	O	41.49	O	25.72
Cu	1.72	Cu	1.76	Cu	4.84	Cu	5.75
Si	44.26	Si	3.84	Si	10.72	Si	14.81
				Fe	2.72		

รูปที่ 5.25 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ของพื้นผิวที่สึกหรอ ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากบ่มแข็ง ที่ภาระแรง 25 นิวตัน



ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS บนพื้นผิวที่สึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele	Wt. %
Al	33.69	Al	28.10	Al	34.68	Al	33.12
O	43.51	O	28.15	O	42.55	O	19.87
Si	3.59	Cu	5.96	Si	4.02	Si	20.83
C	16.26	Si	4.20	C	18.75	C	26.18
		Fe	30.16				
		Cr	3.43				

รูปที่ 5.26 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ของพื้นผิวที่สึกหรอ ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการบ่มแข็ง ที่ภาระแรง 65 นิวตัน

5.6 ผลการวิเคราะห์สะเก็ดการสึกหรอ (Wear debris analysis)

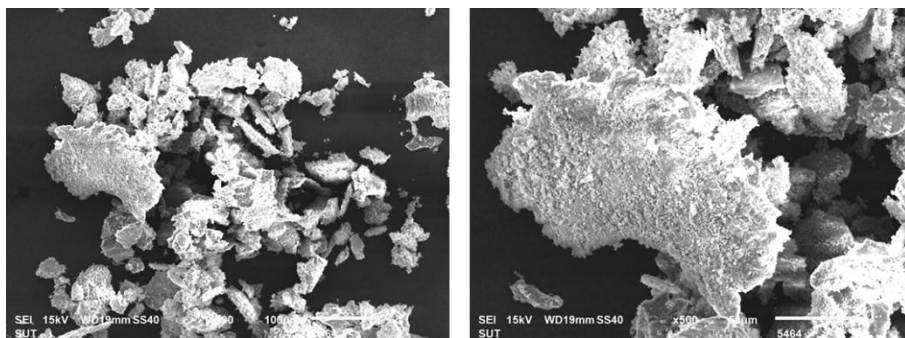
จากการศึกษาวิเคราะห์สะเก็ดการสึกหรอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในสถานะภายหลังการเผาผนึกและบ่มแข็ง โดยทั่วไปแล้วสะเก็ดการสึกหรอที่พบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1) รูปร่างลักษณะเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerate) และ 2) มีรูปร่างลักษณะแผ่น (Flake like-shape) ทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งในหัวข้อการศึกษาสะเก็ดการสึกหรอจะยกตัวอย่างเปรียบเทียบในกรณีการทดสอบการสึกหรอในชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ภาระแรงทดสอบ 25 และ 65 นิวตัน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.6.1 สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก

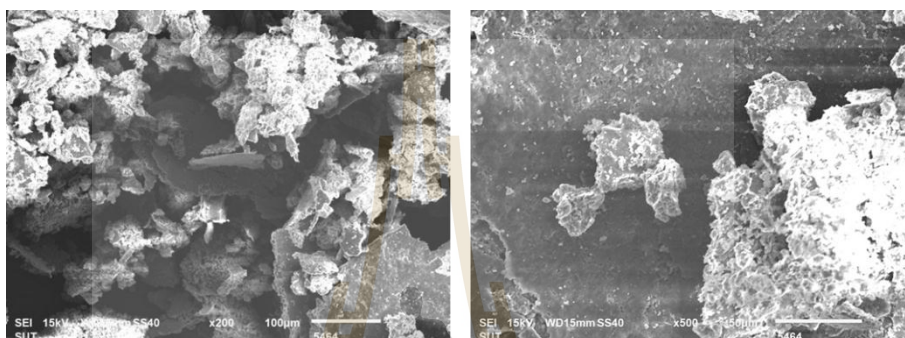
(Wear debris of as-sintered samples)

เมื่อพิจารณาสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก ทดสอบภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.27 ก) พบว่า สะเก็ดการสึกหรอประกอบด้วย ลักษณะเป็นกลุ่มก้อนขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่และมีสะเก็ดการสึกหรอแบบแผ่นปะปนอยู่ด้วย ขนาดประมาณ 150 ถึง 200 ไมครอน และเมื่อเปรียบเทียบกับสะเก็ดการสึกหรอจากการทดสอบที่ 65 นิวตัน พบว่า มีสะเก็ดการสึกหรอลักษณะแผ่นมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 5.27 ข)

สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังการเผาผนึก มีรูปร่างลักษณะเป็นแผ่น ที่มีผิวขรุขระทั้งขนาดใหญ่และเล็ก ทั้งของชิ้นงานทดสอบภายใต้ภาระแรงทดสอบ 25 และ 65 นิวตัน ซึ่งบริเวณพื้นผิวของสะเก็ดการสึกหรอจะมีอนุภาคขนาดเล็กติดอยู่ด้วย โดยที่ภาระแรง 65 นิวตัน สะเก็ดการสึกหรอจะมีขนาดใหญ่กว่าเช่นเดียวกันกับในกรณีแรก แต่ขนาดความยาวของสะเก็ดการสึกหรอแบบแผ่นนั้นอาจจะพบได้ถึง 300 ถึง 400 ไมครอน ดังรูปที่ 5.28 ข) ดังนั้นจากการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของสะเก็ดการสึกหรอในชิ้นงานทดสอบสถานะภายหลังการเผาผนึก พบว่า ที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์น้อย ๆ สะเก็ดการสึกหรอจะมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเป็นส่วนใหญ่และมีสะเก็ดการสึกหรอแบบแผ่นปะปนอยู่ เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และเพิ่มภาระแรงทดสอบจาก 5 เป็น 65 นิวตัน จะเปลี่ยนเป็นแบบแผ่นมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นด้วย

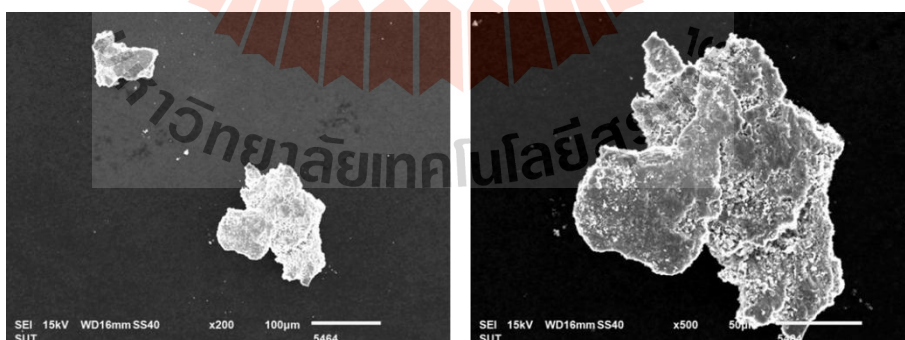


ก) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน

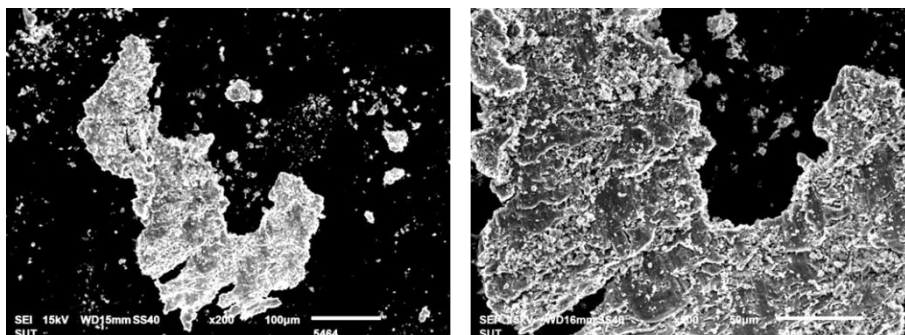


ข) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 65 นิวตัน

รูปที่ 5.27 สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการเผาพูนิก



ก) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน



ข) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 65 นิวตัน

รูปที่ 5.28 สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาผนึก

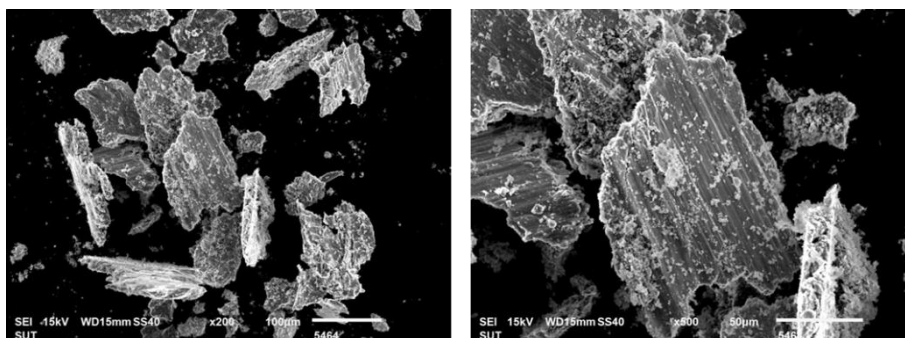
5.6.2 สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการบ่มแข็ง

(Wear debris of age-hardened samples)

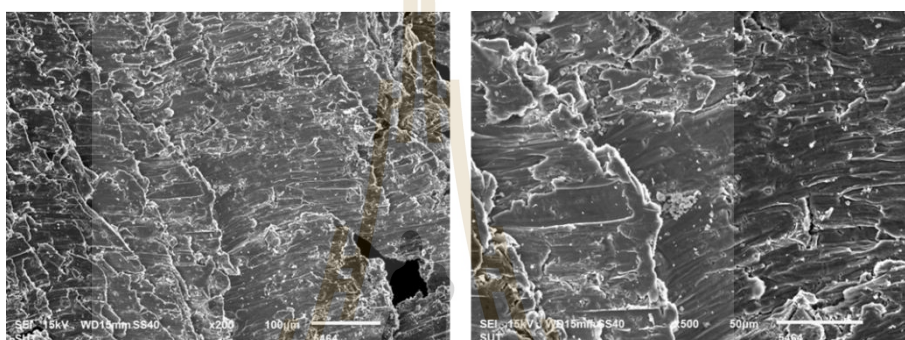
ผลการวิเคราะห์สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ภายหลังการบ่มแข็ง พบว่าเมื่อเติมปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้น จะสังเกตเห็นสะเก็ดการสึกหรอมีขนาดเล็กลงด้วย ดังแสดงเปรียบเทียบในรูปที่ 5.29 ก) และ 5.29 ข) ซึ่งเมื่อทดสอบที่ภาระแรงเพิ่มขึ้นสะเก็ดการสึกหรอจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เช่นเดียวกับสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก โดยมีดังรายละเอียดต่อไปนี้

เมื่อพิจารณาสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้อภาระแรงทดสอบ 25 นิวตัน พบว่าสะเก็ดการสึกหรอประกอบไปด้วยลักษณะแผ่นเป็นส่วนใหญ่และมีกลุ่มก้อนของสะเก็ดการสึกหรอขนาดเล็ก ดังรูปที่ 5.29 ก) เมื่อเพิ่มภาระแรงทดสอบเป็น 65 นิวตัน พบสะเก็ดการสึกหรอแบบแผ่นปริมาณมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.29 ข) ซึ่งพื้นผิวของสะเก็ดการสึกหรอมีลักษณะเป็นชั้น ๆ สามารถมองเห็นร่องรอยการเสียดสีรูปร่างอย่างถาวรได้อย่างชัดเจน โดยอาจพบขนาดใหญ่กว่า 500 ถึง 600 ไมครอน

สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ภาระแรง 25 นิวตัน มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีผิวขรุขระ และเมื่อเพิ่มภาระแรงเป็น 65 นิวตันสะเก็ดการสึกหรอมีลักษณะเป็นแผ่นและกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ประมาณ 200 ไมครอน ดังรูปที่ 5.30 แสดงผลการศึกษาที่คล้ายคลึงกับสะเก็ดการสึกหรอในชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก

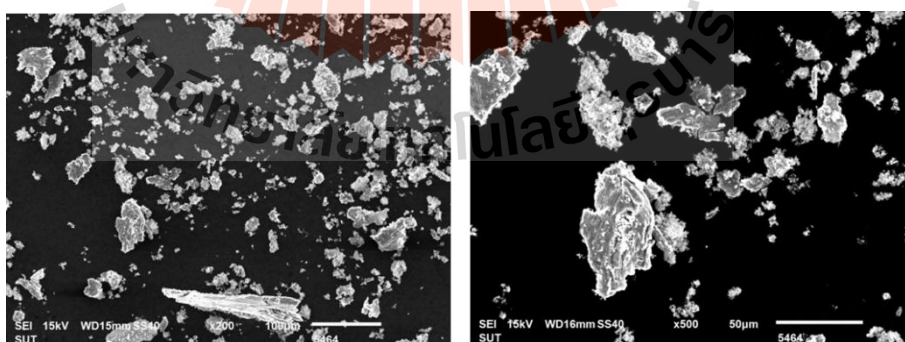


ก) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน

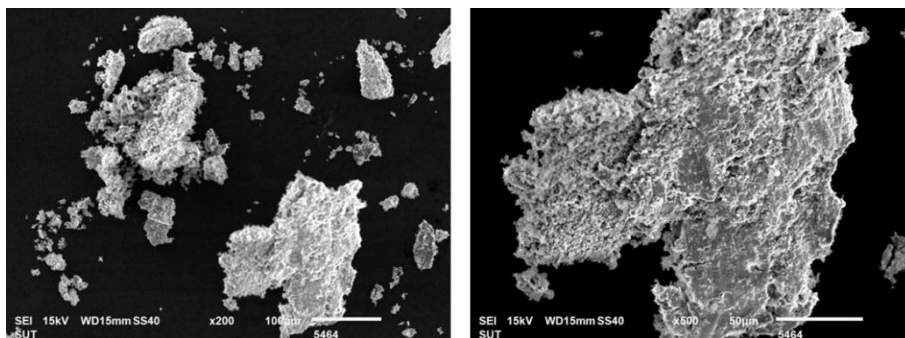


ข) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 65 นิวตัน

รูปที่ 5.29 สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการบ่มแข็ง



ก) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน



ข) ทดสอบการสึกหรอภายใต้ภาระแรง 65 นิวตัน

รูปที่ 5.30 สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการบ่มแข็ง

5.7 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอ

(Wear debris analysis)

จากการศึกษาวิเคราะห์ธาตุของสะเก็ดการสึกหรอด้วยเทคนิค EDS ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ได้ทำการวิเคราะห์บริเวณที่เป็นแผ่นและกลุ่มก้อนซึ่งพบองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันออกไปตามสภาวะภายหลังจากการเผาผนึกและบ่มแข็ง ดังจะอธิบายต่อไปนี้

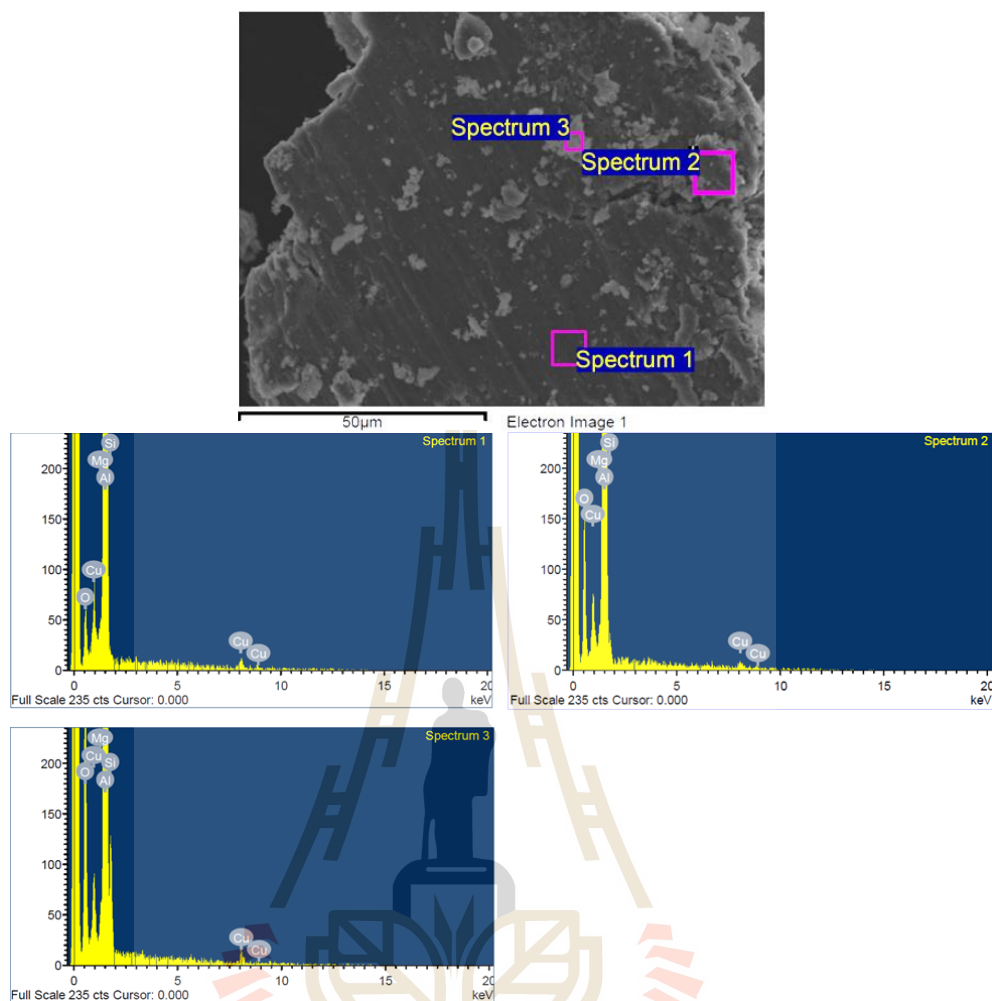
5.7.1 สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังจากการเผาผนึก

(Wear debris of as-sintered samples)

เมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้ภาระแรงทดสอบ 25 นิวตัน โดยทำการวิเคราะห์แบบจุด (Point analysis) ที่บริเวณ Spectrum 1 ดังแสดงในรูป 5.31 พบองค์ประกอบทางเคมีคือ อะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง ซิลิคอน และแมกนีเซียม ซึ่งมีความใกล้เคียงกับเนื้อพื้นอะลูมิเนียม อาจเป็นไปได้ว่าสะเก็ดการสึกหรอดังกล่าวเกิดจากการที่เนื้อพื้นได้รับการเสียดสีอย่างต่อเนื่องระหว่างทดสอบการสึกหรอและสุดท้ายถูกเฉือน (Sheared) ออกเป็นแผ่นสะเก็ดการสึกหรอ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ในบางบริเวณที่ Spectrum 2 จะพบปริมาณออกซิเจนที่สูงขึ้นเป็น 22.11 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากพื้นผิวถูกออกซิไดซ์ซ้ำ (Re-oxidized) ระหว่างวัฏจักรแรงกระทำที่ได้รับ และกรณีที่ถูกออกซิไดซ์รุนแรง (Severe oxidized) เนื่องจากความร้อนสะสมก็จะเกิดสะเก็ดการสึกหรอที่หลุดออกมาเป็นก้อนเล็ก ๆ ปะปนด้วย และเมื่อวิเคราะห์ด้วย EDS ก็จะมีพบออกซิเจนในปริมาณมากขึ้นด้วย ดังแสดงในตารางผลวิเคราะห์ธาตุใน

รูปที่ 5.31 เมื่อเพิ่มภาระแรงทดสอบเป็น 65 นิวตัน พบลักษณะของสะเก็ดการสึกหรอในทำนองเดียวกันคือ มีทั้งลักษณะแผ่นและกลุ่มก้อน ผลการวิเคราะห์บริเวณเนื้อพื้นที่ Spectrum 1 มีปริมาณออกซิเจนที่ค่อนข้างสูง รวมถึงในกรณีผลการวิเคราะห์สะเก็ดการสึกหรอที่เป็นกลุ่มก้อนที่ Spectrum 2 มีปริมาณออกซิเจน 40.96 และ 45.95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักตามลำดับ แสดงถึงชิ้นงานเกิดการสึกหรอแบบออกซิเดชันร่วมด้วยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวการสึกหรอ

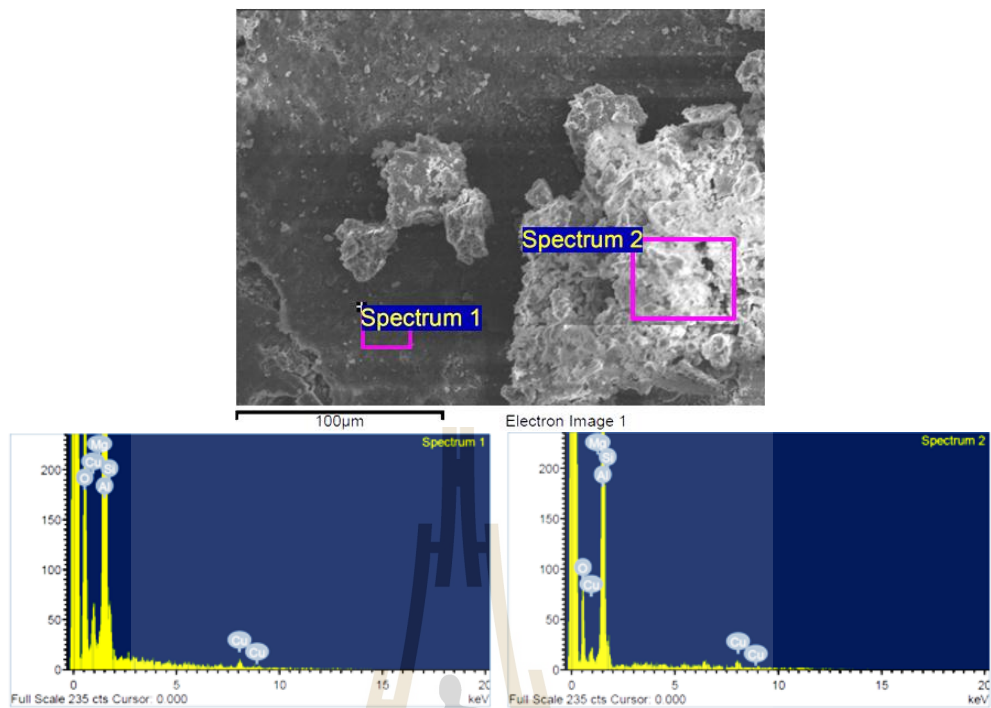
เมื่อพิจารณาผลกระทบของการเพิ่มปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เป็น 20 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร ต่อลักษณะของสะเก็ดการสึกหรอภายใต้ภาระแรงทดสอบ 25 นิวตัน พบอะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง ซิลิคอน และคาร์บอน ทั้งในบริเวณ Spectrum 1 3 และ 4 ซึ่งน่าจะเป็นเนื้อพื้นที่ถูกออกซิไดซ์และถูกเฉือนหรือแยกชั้นออกมาเป็นสะเก็ดการสึกหรอ นอกจากนี้ในบริเวณ Spectrum 1 ยังพบเหล็กในปริมาณสูงถึง 46.71 และโครเมียม 6.34 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากวัสดุขัดสี (Mating material) ที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมเกิดการสึกหรอแล้วหลุดออกมาเป็นสะเก็ดการสึกหรอ ส่วนบริเวณ Spectrum 2 มีปริมาณซิลิคอนและคาร์บอนค่อนข้างสูงคือ 57.43 และ 38.18 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งคาดว่าจะเป็นสะเก็ดการสึกหรอของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่หลุดออกจากเนื้อพื้นที่ทดสอบการสึกหรอ เมื่อเพิ่มภาระแรงเป็น 65 นิวตัน พบว่าที่บริเวณ Spectrum 1 2 และ 3 มีธาตุอะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง ซิลิคอน และคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีธาตุเหล็กและโครเมียมปรากฏอยู่ในปริมาณใกล้เคียงกัน ดังตารางผลวิเคราะห์ธาตุในรูปที่ 5.34 สอดคล้องกับผลวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวการสึกหรอเช่นเดียวกัน



ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition					
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %
Al	84.76	Al	70.43	Al	58.49
O	9.84	O	22.11	O	29.45
Cu	4.67	Cu	5.79	Cu	5.45
Si	0.20	Si	0.95	Si	5.37
Mg	0.53	Mg	0.72	Mg	1.24

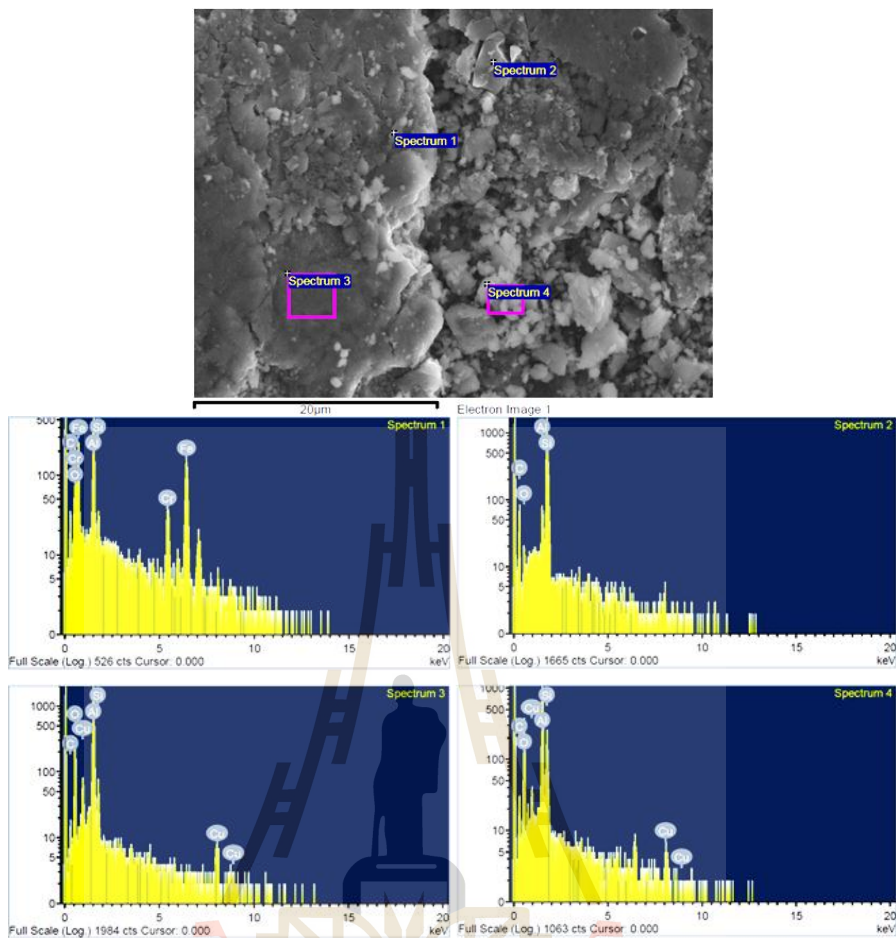
รูปที่ 5.31 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ
 พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
 ภายหลังจากเผาพูนิก ภายใต้อุณหภูมิ 25 นิวตัน



ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอ (Spectrum 1-2)

Composition			
Spectrum 1		Spectrum 2	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %
Al	50.18	Al	47.45
O	40.96	O	45.95
Cu	5.53	Cu	3.09
Si	2.66	Si	2.62
Mg	0.67	Mg	0.89

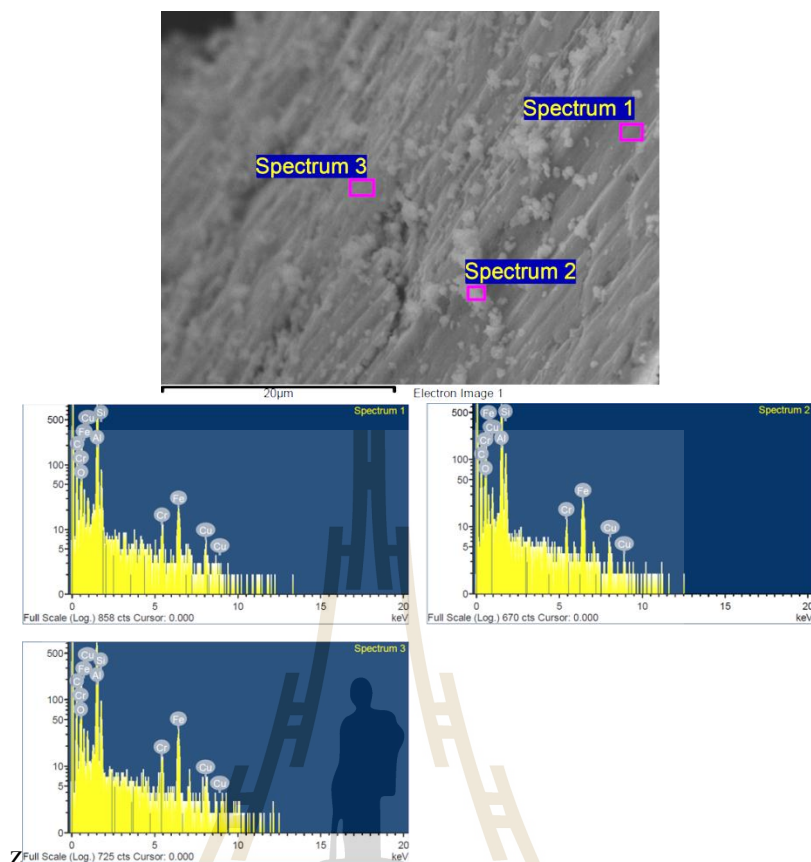
รูปที่ 5.32 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาพูนิก ภายใต้อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส



ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele	Wt. %
Fe	46.71	Si	57.43	Al	56.13	O	38.39
Al	21.57	C	38.18	O	28.14	Al	34.44
O	16.04	O	2.58	Cu	6.10	Si	12.62
C	8.02	Al	1.81	C	6.03	C	11.35
Cr	6.34			Si	3.59	Cu	3.20
Si	1.32						

รูปที่ 5.33 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ
 พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
 ภายหลังจากเผาพูนิก ภายใต้อุณหภูมิ 25 นิวตัน



ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition					
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %
Al	22.54	Al	19.54	Al	22.00
O	35.62	O	32.58	O	32.46
Cu	1.92	Cu	2.44	Cu	2.68
Si	2.78	Si	4.43	Si	3.43
C	31.21	C	33.21	C	28.31
Fe	4.94	Fe	6.39	Fe	9.19
Cr	0.99	Cr	1.40	Cr	1.93

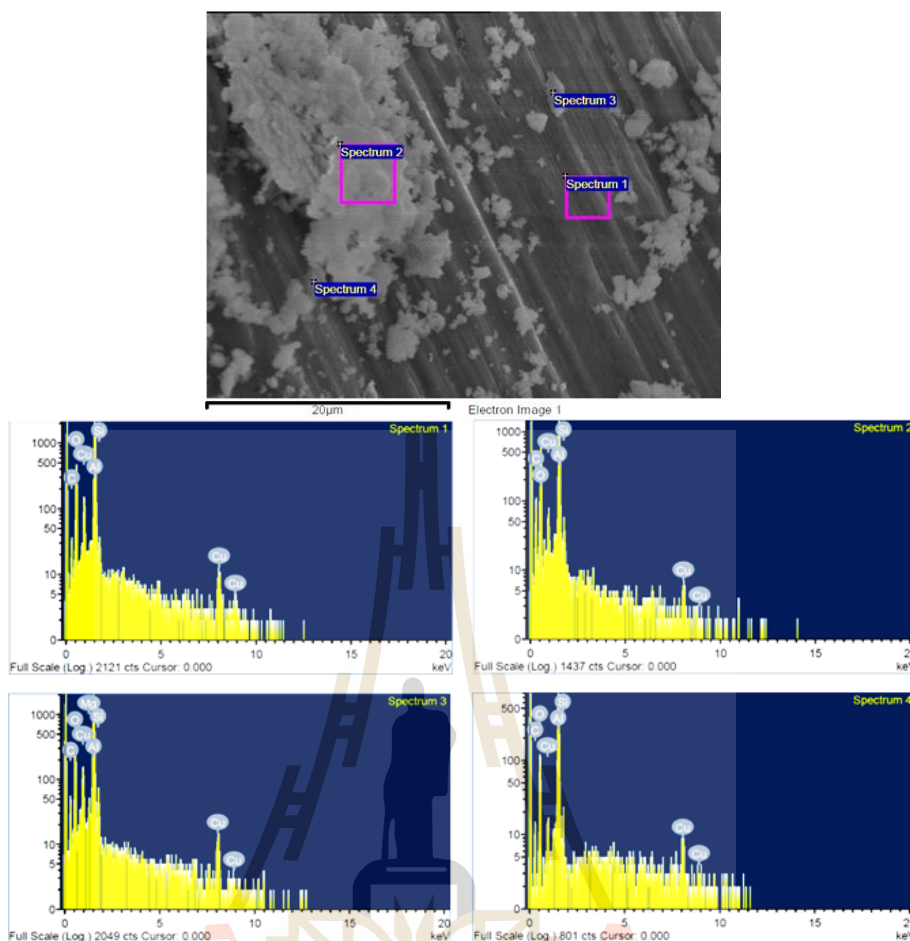
รูปที่ 5.34 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากเผาผนึก ภายใต้อุณหภูมิ 65 นิวตัน

5.7.2 สะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการบ่มแข็ง

(Wear debris of age-hardened samples)

ผลการวิเคราะห์ธาตุของสะเก็ดการสึกหรอแบบจุด (Point analysis) ของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณในปริมาณต่าง ๆ ภายหลังการบ่มแข็ง พบว่าสะเก็ดการสึกหรอมีลักษณะแผ่นและกลุ่มก้อนและมีปริมาณออกซิเจนสูงเช่นเดียวกันกับชิ้นงานภายหลังการเผาพูนิก ซึ่งเมื่อพิจารณาชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้ภาระแรงทดสอบ 25 นิวตัน ดังรูปที่ 5.35 พบว่าที่บริเวณ Spectrum 1 ซึ่งเป็นสะเก็ดการสึกหรอแบบแผ่นประกอบด้วยอะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดง ซิลิคอน และคาร์บอน สอดคล้องกับองค์ประกอบของเนื้อพื้นวัสดุเชิงประกอบเช่นเดียวกันกับ Spectrum 2 3 และ 4 โดยเมื่อพิจารณาบริเวณ Spectrum 2 ซึ่งเป็นสะเก็ดการสึกหรอแบบกลุ่มก้อน พบว่ามีปริมาณออกซิเจนสูงที่สุดคือ 44.88 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และเมื่อเพิ่มภาระแรงทดสอบเป็น 65 นิวตัน พบอะลูมิเนียม ออกซิเจน ทองแดงและซิลิคอนดังตารางผลวิเคราะห์ธาตุในรูปที่ 5.36 ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเนื้อพื้นวัสดุเชิงประกอบเช่นเดียวกันกับกรณีภาระแรงที่ 25 นิวตัน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาบริเวณ Spectrum 2 และ 3 พบว่ามีธาตุอะลูมิเนียมปริมาณ 44.09 และ 50.51 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และมีปริมาณทองแดงค่อนข้างสูงคือ 42.00 และ 24.08 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งบริเวณดังกล่าวน่าจะเป็นองค์ประกอบของสารประกอบอะลูมิเนียม-ทองแดง (Al_2Cu) ที่ตกตะกอนจากการบ่มแข็ง รวมถึงพบธาตุแมกนีเซียมและซิลิคอนปริมาณเล็กน้อยที่บริเวณ Spectrum 3 ซึ่งน่าจะเป็นสารประกอบแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si)

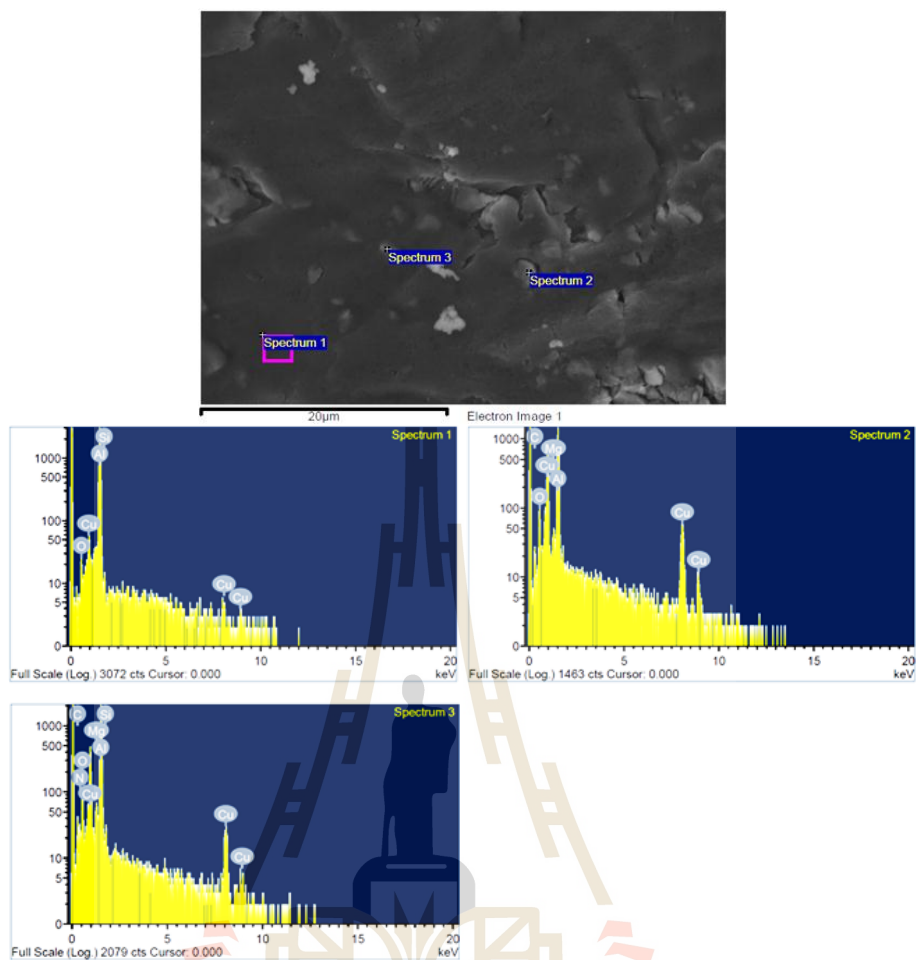
เมื่อพิจารณาการเพิ่มปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เป็น 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน แสดงผลการวิเคราะห์ที่เป็นบริเวณเนื้อพื้นบนสะเก็ดการสึกหรอแบบแผ่น และพบปริมาณออกซิเจนค่อนข้างสูงในบริเวณสะเก็ดการสึกหรอแบบกลุ่มก้อน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในบริเวณ Spectrum 2 พบว่ามีซิลิคอนและคาร์บอนค่อนข้างสูงคือ 57.38 และ 21.79 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในตารางผลวิเคราะห์ธาตุในรูปที่ 5.37 ซึ่งน่าจะเป็นสะเก็ดของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์หลุดออกมาจากเนื้อพื้นอะลูมิเนียมขณะทดสอบ เมื่อเพิ่มภาระแรงเป็น 65 นิวตัน ผลวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS แบบแผนที่ (Map analysis) พบสะเก็ดการสึกหรอที่มีองค์ประกอบของเหล็กและโครเมียม ดังนั้น จะเห็นได้ว่าที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์สูง ๆ จะพบสะเก็ดการสึกหรอที่ประกอบไปด้วยธาตุเหล็กและโครเมียมทั้งในสภาวะภายหลังการเผาพูนิกและบ่มแข็ง



ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอ (Spectrum 1-4)

Composition							
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3		Spectrum 4	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele	Wt. %
Al	49.36	O	44.88	Al	47.62	Al	54.49
O	31.34	Al	32.11	O	26.01	O	27.21
Cu	9.20	C	17.29	C	14.26	C	13.39
C	8.98	Cu	4.21	Cu	8.97	Cu	2.97
Si	1.12	Si	1.51	Si	2.45	Si	1.95

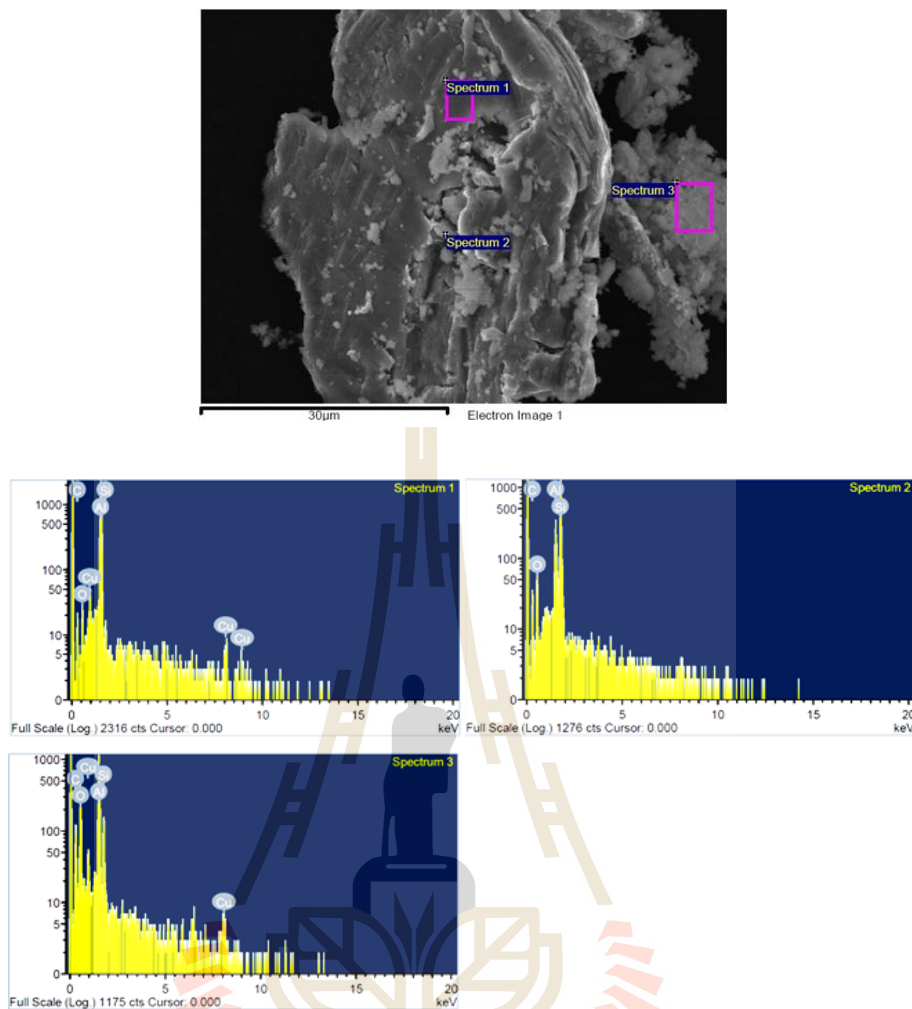
รูปที่ 5.35 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ
 พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
 ภายหลังจากบ่มแข็ง ภายใต้อุณหภูมิ 25 นิวตัน



ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอ (Spectrum 1-3)

Composition					
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %
Al	93.29	Al	44.09	Al	50.51
Cu	3.08	Cu	42.00	Cu	24.08
O	2.82	C	6.84	C	9.84
Si	0.81	O	6.08	O	8.07
				Mg	1.11
				Si	0.87

รูปที่ 5.36 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ
 พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
 ภายหลังจากบ่มแข็ง ภายใต้อาการแรง 65 นิวตัน

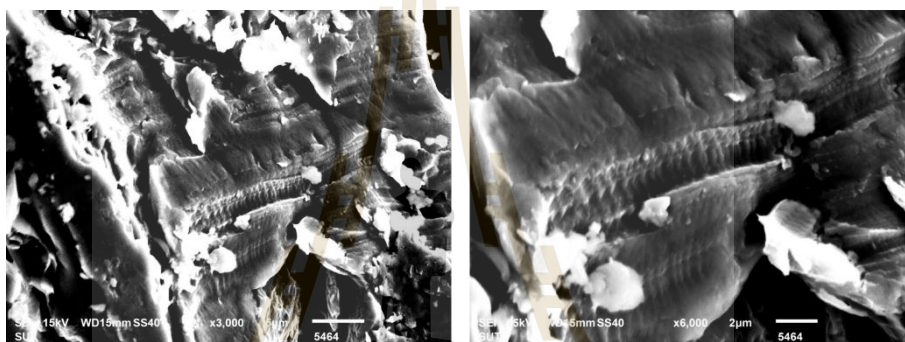


ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอ (Spectrum 1-3)

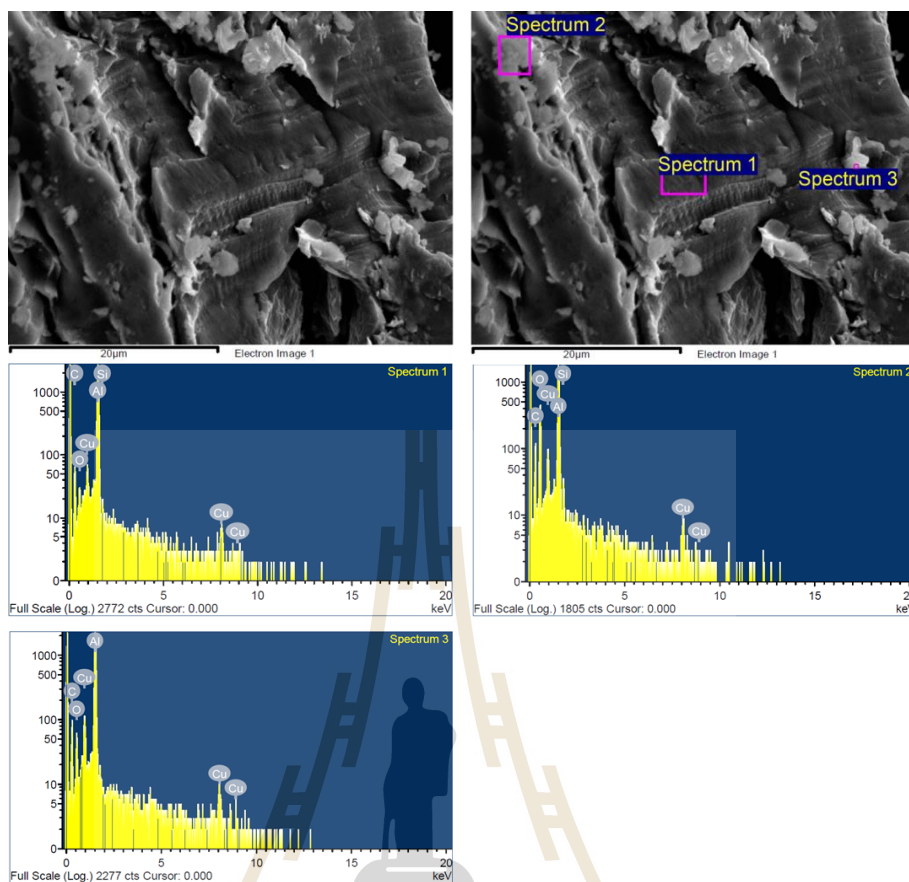
Composition					
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %
Al	79.73	Si	57.38	O	40.40
C	12.45	C	21.79	Al	28.02
O	3.70	Al	11.21	C	22.32
Cu	3.31	O	9.62	Si	5.42
Si	0.81			Cu	3.84

รูปที่ 5.37 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ พื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากบ่มแข็ง ภายใต้อุณหภูมิ 25 นิวตัน

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 5.38 พบว่าพื้นผิวของสะเก็ดการสึกหรอมีลักษณะเป็นชั้น ๆ ซึ่งอาจจะเกิดจากขณะที่ทดสอบการสึกหรอผิวชิ้นงานถูกวัสดุขัดสีไถครูด ทำให้เนื้อวัสดุเกิดการเสีรูปร่างแล้วซ้อนทับกันเป็นชั้น ๆ จนกระทั่งถูกเฉือนออกกลายเป็นสะเก็ดการสึกหรอ ส่งผลให้สะเก็ดการสึกหรอดังกล่าว มีลักษณะเป็นชั้น ๆ เรียกว่า Multiple sheared layer โดยจะปรากฏเฉพาะที่ชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เมื่อนำสะเก็ดการสึกหรอไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ดังแสดงในรูปที่ 5.39 พบธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเนื้อวัสดุเชิงประกอบเช่นเดียวกับชิ้นงานอื่น ๆ



รูปที่ 5.38 โครงสร้างจุลภาคสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจาก เฝ้าพนัก ภายใต้ภาระแรง 25 นิวตัน



ผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอ (Spectrum 1-3)

Composition					
Spectrum 1		Spectrum 2		Spectrum 3	
Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %	Ele.	Wt. %
Al	69.22	Al	39.31	Al	57.93
O	2.56	O	32.11	O	6.36
Cu	3.40	Cu	5.93	Cu	6.82
Si	0.61	Si	0.96	C	28.89
C	24.21	C	21.70		

รูปที่ 5.39 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของสะเก็ดการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิกอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายหลังจากการภายหลังการเผาพูนิก ภายใต้อุณหภูมิ 25 นิวตัน

5.8 กลไกการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

(Wear mechanism of silicon carbide reinforced aluminium composite)

การสึกหรอของวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และตัวแปรที่ได้จากการทดสอบการสึกหรอนั้น ไม่ได้แสดงถึงสมบัติของวัสดุนั้นเพียงอย่างเดียว หากแต่ยังขึ้นอยู่กับสภาวะของการทดสอบการสึกหรอด้วย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษากลไกการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ด้วยการทดสอบแบบ Ball-on-Flat ในช่วงภาระแรง 5 - 65 นิวตัน ดังนั้นจึงขอสรุปโดยสังเขปเพื่อจำแนกประเภทของการสึกหรอที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดดังตารางที่ 5.1 คือ การสึกหรอที่เกิดขึ้นเกิดจาก การเคลื่อนที่ของวัสดุคู่สัมผัสแบบสไลด์ (Sliding friction) ที่อัตราเร็ว (Sliding speed) ในช่วงค่อนข้างต่ำ คือ 0.1 เมตรต่อวินาที โดยใช้หัวบอลทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีความแข็งสูงกว่าสไลด์ผ่านวัสดุแผ่นที่อ่อนกว่าคืออะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ เคลื่อนที่ไปกลับในแนวเส้นตรงยาว 10 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการทดสอบ 16 นาที 40 วินาที (1000 วินาที) รวมระยะทาง 100 เมตร ในสภาวะปราศจากสารหล่อลื่น ที่อุณหภูมิห้อง ส่งผลทำให้เกิดอัตราการสึกหรอและพฤติกรรมการสึกหรอต่าง ๆ ดังนี้

อัตราการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-5} mm^3/Nm ดังรูปที่ 5.40 ซึ่งแสดงกราฟแผนที่อัตราการสึกหรอ โดยหากเปรียบเทียบกับวัสดุทั่วไปค่าอัตราการสึกหรอจะอยู่ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-10} mm^3/Nm (Stachowiak, G.W., 2005) ส่วนโลหะจำพวกกลุ่มเหล็กหรือวัสดุที่มีการปรับปรุงพื้นผิว (Surface engineering) ที่มีความแข็งสูงกว่าจะพบอยู่ช่วง 10^{-7} ถึง 10^{-10} mm^3/Nm (Stachowiak, G.W., 2005) และหากเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ของงานวิจัยอื่นพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-5} mm^3/Nm (Hekner, B. et al., 2017 และ Tan, H. et al., 2018) ซึ่งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกันกับวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในงานวิจัยครั้งนี้ แต่หากเปรียบเทียบกับโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ไม่เติมวัสดุเสริมแรง อัตราการสึกหรอจะอยู่ในช่วง 10^{-3} mm^3/Nm (Tan, H. et al., 2018) ซึ่งมีอัตราการสึกหรอสูงกว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์อยู่ในช่วง 0.04 ถึง 0.76 ซึ่งมีค่าค่อนข้างกว้าง ขึ้นอยู่กับปริมาณเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ดังรูปที่ 5.41 ซึ่งแสดงกราฟแผนที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน โดยค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำสุดที่ได้รับคือจากชิ้นงานที่มีปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 10

เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และสูงสุดที่ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นจะทำให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างผิวมากขึ้น โดยหากเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เติมปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ผลิตด้วยกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน (Hot-pressed) มีค่าอยู่ในช่วง 0.50 ถึง 0.90 (Hekner, B. et al., 2017) ส่วนวัสดุเชิงประกอบที่ผลิตด้วยการหล่อขึ้นรูป (Stir casting) มีค่าอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.45 (Chen, R. et al., 2000)

5.8.1 กลไกการสึกหรอ

พฤติกรรมหรือกลไกการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบในงานวิจัยที่ศึกษานี้ ประกอบไปด้วย การสึกหรอแบบขัดสี (Abrasive wear) การสึกหรอแบบยึดติด (Adhesive wear) ซึ่งประกอบด้วยการเสีรูปร่าง/ไหลตัว (Plastic deformation/flow) การถ่ายโอนเนื้อวัสดุ (Material transfer) รวมถึงการแยกชั้น (Delamination) นอกจากนี้ ยังพบการสึกหรอแบบความล้า (Fatigue wear) และการสึกหรอแบบออกซิเดชัน (Oxidation wear) ร่วมด้วย โดยจะมีกลไกการสึกหรอใดเป็นหลักนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณการเติมอนุภาคเสริมแรงและปริมาณภาระแรงทดสอบที่ใช้ ตาราง 5.2 และ 5.3 สรุปแนวโน้มกลไกการสึกหรอ ซึ่งการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการเผาผนึก พบว่าที่ปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์น้อย ๆ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ภายใต้ภาระแรง 5 นิวตัน จะเกิดการสึกหรอแบบขัดสี และจะเปลี่ยนพฤติกรรมการสึกหรอเป็นการสึกหรอแบบยึดติดเมื่อทดสอบที่ภาระแรง 25 นิวตัน ขึ้นไป นอกจากนี้พบว่าเมื่อปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์สูงขึ้น การสึกหรอมีแนวโน้มลดลงและแสดงพฤติกรรมการสึกหรอแบบขัดสี เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Rao, R.N. et al. ซึ่งพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มากขึ้น จะทำให้เกิดการสึกหรอลดลง เนื่องจากอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีความแข็งสูงเมื่อสัมผัสกับวัสดุขัดสีจะทำหน้าที่เป็นตัวขัดสีทำให้วัสดุคู่สัมผัสเกิดการสึกหรอ อีกประการหนึ่งคือพื้นผิวการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบจะมีชั้น Mechanically mixed layer (MML) (Stachowiak, G.W., 2005) ที่เกิดจากเนื้อพื้นอะลูมิเนียมที่เกิดการเสีรูปร่างและการแตกออกของอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ขณะทดสอบ รวมถึงสะเก็ดจากวัสดุคู่สัมผัสที่เกิดขัดสีหลุดออกมารวมตัวทับถมกันจนเกิดเป็นชั้นดังกล่าวที่มีความแข็งสูงอัดแน่นอยู่บนพื้นผิว จึงช่วยปกป้องและทำให้ช่วยลดการสึกหรอแบบยึดติดลง (Rao, R.N. et al., 2011) ดังแสดงในรูป 5.42 ส่วนพฤติกรรมการสึกหรอแบบความล้าและออกซิเดชันจะเกิดรุนแรงขึ้นเมื่อภาระแรงทดสอบเพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีการสึกหรอของชิ้นงานภายหลังการบ่มแข็ง

สะเก็ดการสึกหรอที่พบสามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ 1) รูปร่างลักษณะเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerated) และ 2) รูปร่างลักษณะแผ่น (Flake like-shape) ที่มีขนาดเล็กและขนาด

ใหญ่ขึ้นกับปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์และปริมาณภาระแรงที่ใช้ทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 5.4 และ 5.5 การทดสอบด้วยภาระแรงสูงขึ้นสะเกิดการสึกหรอมีแนวโน้มขนาดใหญ่ขึ้น (Alshmrri, F. et al., 2014) และการเติมปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์น้อย ๆ จะส่งผลให้สะเกิดการสึกหรอลักษณะแผ่นมีแนวโน้มขนาดใหญ่ด้วยเช่นเดียวกัน เนื่องจากพื้นผิวมีการเสีรูปถาวรแล้วหลุดออกเป็นแผ่นขนาดใหญ่ได้ง่ายกว่าชิ้นงานที่มีปริมาณซิลิคอนคาร์ไบด์สูง (Rao, R.N. et al., 2010)

5.8.2 ผลกระทบของปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อพฤติกรรมการสึกหรอ

โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเชิงประกอบประกอบไปด้วยเฟสเนื้อพื้นอะลูมิเนียมและเฟสเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์กระจายตัวอยู่ในเนื้อพื้น พบว่าวัสดุเชิงประกอบที่มีเฟสพื้นอะลูมิเนียมจำนวนมาก หรือมีปริมาณอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์น้อย จะเกิดการเสีรูปอย่างถาวรได้ง่ายแล้วหลุดออกหรือถ่ายโอนไปยังวัสดุขัดสีได้ง่าย ทำให้พื้นผิวมีลักษณะแยกชั้น ซึ่งแสดงพฤติกรรมการสึกหรอแบบยึดติดที่รุนแรง การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ลงไปจะช่วยลดการสัมผัสกันของวัสดุคู่สัมผัสและวัสดุที่เป็นเนื้อพื้นที่อ่อนกว่าคืออะลูมิเนียม (Rao, R.N. et al., 2011) เนื่องจากขณะทดสอบการสึกหรอวัสดุเชิงประกอบที่มีอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณมากจะเป็นตัวสัมผัสกับวัสดุคู่สัมผัส (เหล็กกล้าไร้สนิม) ทำให้เกิดการสึกหรอลดลงเนื่องจากอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์มีความแข็งสูงและมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ทำให้มีโอกาสที่จะไปขัดสีทำให้วัสดุคู่สัมผัสเกิดการสึกหรอแล้วเนื้อของวัสดุคู่สัมผัสได้หลุดออกและถ่ายโอนมายังพื้นผิวชิ้นงานทำให้เกิดชั้น MML อัดแน่นอยู่บนพื้นผิวของชิ้นงาน เนื่องจากการสะสมของอนุภาควัสดุขัดสี อนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่แตกออกบางส่วนและพื้นผิวของชิ้นงานที่สึกหรอแล้วหลุดออก ซึ่งชั้นดังกล่าวมีความแข็งสูงมากพอที่จะช่วยปกป้องพื้นผิวไม่ให้เกิดการสึกหรอที่รุนแรง (Rao, R.N. et al., 2011) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากนี้ขณะทดสอบการสึกหรอพื้นผิวชิ้นงานจะมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงทำให้เกิดการไหลตัว (Flow) หรืออาจจะเกิดการหลอม (Melt) (Deuis, R.L. et al., 1996) ของเนื้อวัสดุพื้นได้ ซึ่งการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นจะช่วยให้ชิ้นงานมีความเสถียรทางความร้อน (Thermal stability) ได้ดี จึงทำให้เกิดการไหลตัวลดลง (Rao, R.N. et al., 2011) นอกจากนี้การที่มีอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณที่สูงขึ้น (20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ทำให้เกิดการขัดสีวัสดุคู่สัมผัสคือเหล็กกล้าไร้สนิม เกิดเป็นสะเกิดการสึกหรอถูกอัดแน่นในชั้น MML ซึ่งน่าจะทำให้ความแข็งของชั้น MML เพิ่มขึ้น และต้านทานการสึกหรอเพิ่มมากขึ้นอีกทางหนึ่ง

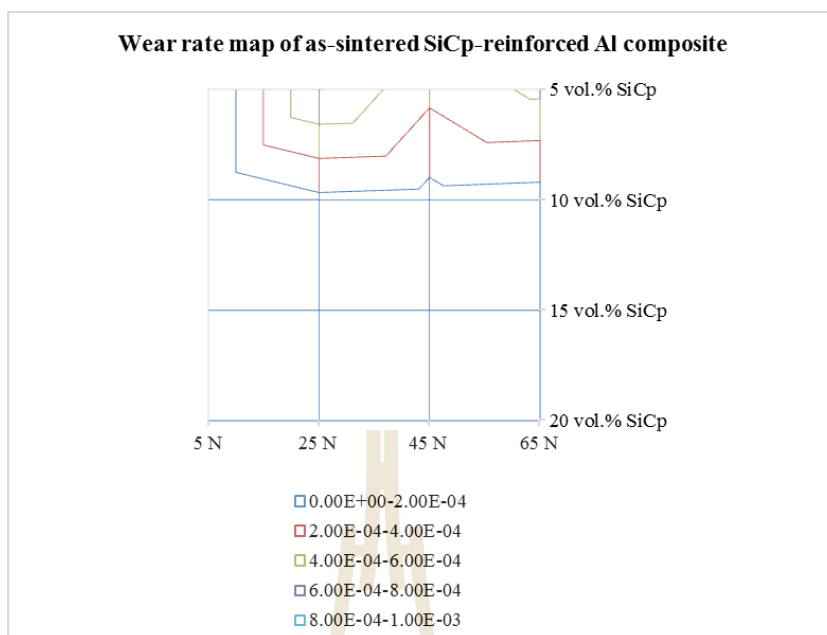
5.8.3 ผลกระทบของกระบวนการบ่มแข็งต่อพฤติกรรมการสึกหรอ

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเผาผนึกและบ่มแข็งมีอัตราการสึกหรอ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานและพฤติกรรมการสึกหรอที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม พบว่ากระบวนการบ่มแข็ง (Aging) สามารถชะลอการสึกหรอแบบความด้า ที่ภาระแรงทดสอบต่ำ ๆ เช่น 5 นิวตัน ของชิ้นงาน

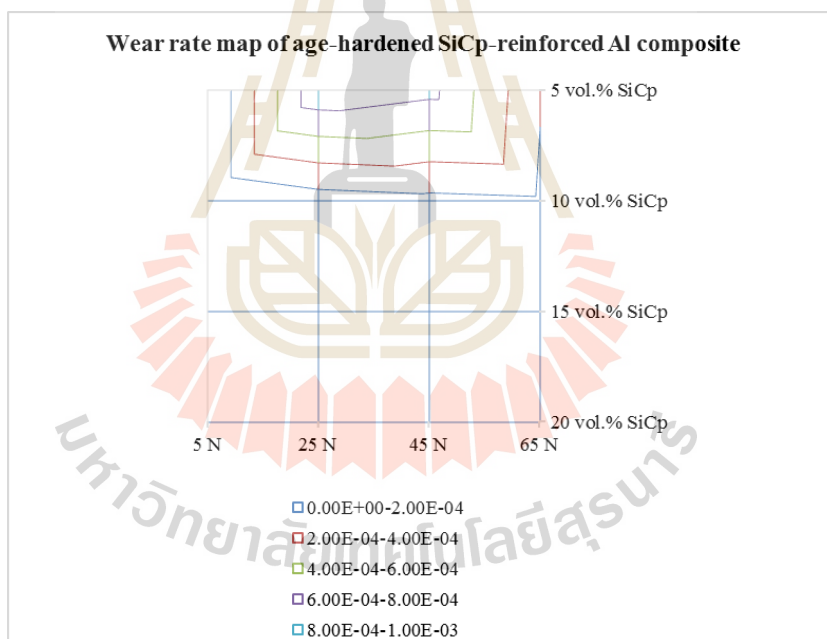
ที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ดังตารางที่ 5.2 และ 5.3 เนื่องจากการบ่มแข็งเป็นการทำให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบอะลูมิเนียม-ทองแดง (Al_2Cu) และแมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) ที่มีขนาดเล็กละเอียดและยึดเหนี่ยวกับเนื้อพื้นได้ดี (Coherent particle) ซึ่งจะช่วยยับยั้งการเกิดรอยแตก (Crack nucleation) หรือเกิดช่องว่าง (Void nucleation) รอบ ๆ ตะกอนอนุภาคของเฟสที่สอง ทำให้สามารถชะลอการเกิดรอยแตกและการเติบโตของรอยแตกได้ดีขึ้น (Yusoff, Z. et al., 2010) สำหรับการสึกหรอแบบความถี่

ตารางที่ 5.1 การจำแนกประเภทของการสึกหรอ

Class	Parameter
Friction type	Sliding
Contact shape	Sphere/flat
Contact pressure level	Plastic
Sliding speed	Low (0.1 m/s)
Mating contact material	Harder (Stainless steel) Softer (Al-SiC _p composite)
Environment	Without lubrication
Contact cycle	Low-medium (5×10^3 cycles)
Contact distance	Low-medium (100 m)
Frequency	5 Hz
Phase of wear	Solid
Structure of wear	Mechanical mixed
Freedom of wear particle	Agglomerated and Flake
Unit size of wear	μm scale
Elemental physics and chemistry in wear	Oxidation Delamination, Adhesive transfer and retransfer, Crack nucleation and propagation
Dominant wear process	Fracture, Plastic flow, Oxidation and Delamination
Wear mode	Abrasive, Adhesive, Flow and Fatigue
Wear type	Mechanical

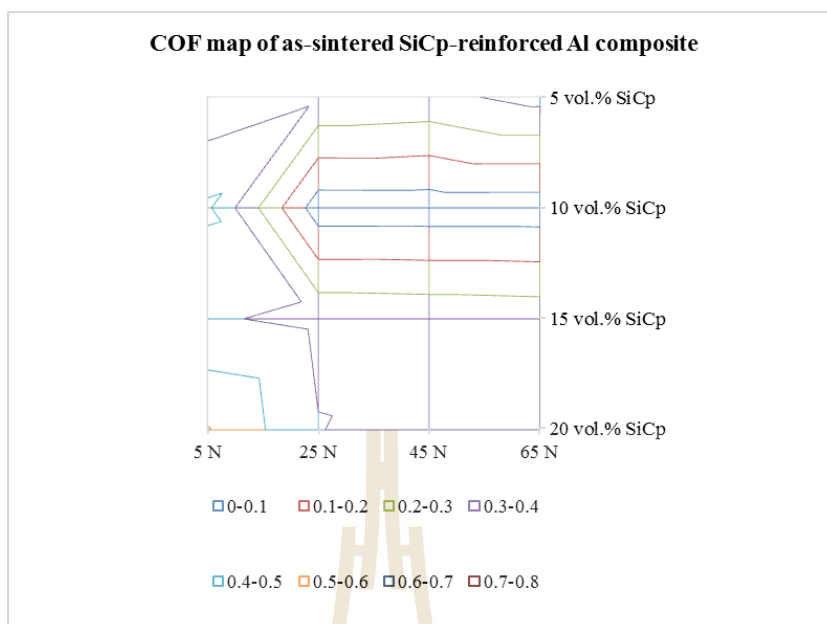


ก) ภายหลังจากการเผาผนึก

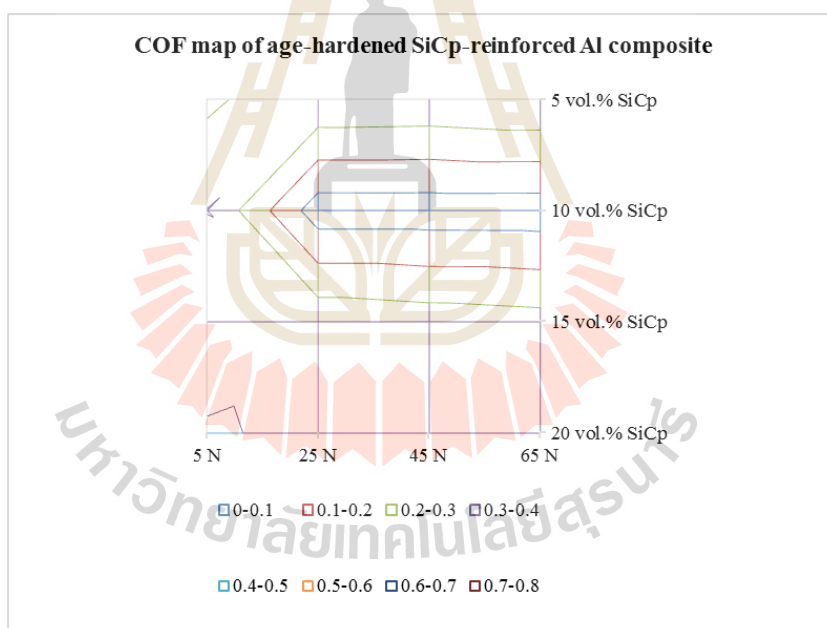


ข) ภายหลังจากการบ่มแข็ง

รูปที่ 5.40 กราฟแผนที่แสดงอัตราการสึกหรอจำเพาะในช่วงภาระแรง 5 - 65 นิวตัน ของชิ้นงานเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

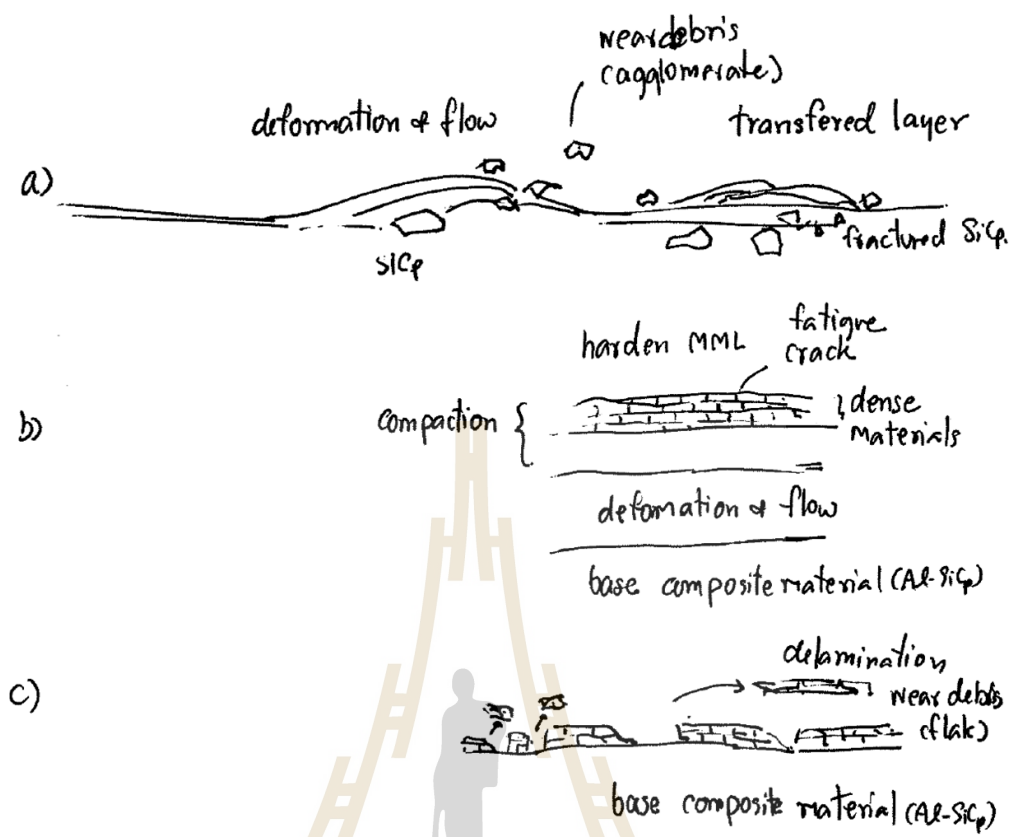


ก) ภายหลังการเผาผนึก



ข) ภายหลังการบ่มแข็ง

รูปที่ 5.41 กราฟแผนที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในช่วงภาระแรง 5 - 65 นิวตัน ของชิ้นงานเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 - 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รูปที่ 5.42 แสดงกระบวนการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียม a) deformation and flow followed by mutual material transfer b) formation of mechanically mixed layer (MML), and c) fatigue crack and delamination

ตารางที่ 5.2 พฤติกรรมและกลไกการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ภายหลังจากเผาพูนึก

SiC _p	5 N	25 N	45 N	65 N
5 vol. %	Abrasive	Adhesive	Adhesive	Adhesive
	Adhesive	Abrasive	Abrasive	Abrasive
	Fatigue	Fatigue	Fatigue	Fatigue
10 vol. %	Abrasive	Adhesive	Adhesive	Adhesive
	Adhesive	Abrasive	Abrasive	Abrasive
	Fatigue	Fatigue	Fatigue	Fatigue
15 vol. %	Abrasive	Adhesive	Abrasive	Abrasive
		Abrasive	Adhesive	Adhesive
		Fatigue	Fatigue	Fatigue
20 vol. %	Abrasive	Abrasive	Abrasive	Abrasive
		Adhesive	Adhesive	Adhesive
		Fatigue	Fatigue	Fatigue

ตารางที่ 5.3 พฤติกรรมและกลไกการสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ภายหลังจากบ่มแข็ง

SiC _p	5 N	25 N	45 N	65 N
5 vol. %	Abrasive	Adhesive	Adhesive	Adhesive
	Adhesive	Abrasive	Abrasive	Abrasive
		Fatigue	Fatigue	Fatigue
10 vol. %	Abrasive	Adhesive	Adhesive	Adhesive
	Adhesive	Abrasive	Abrasive	Abrasive
		Fatigue	Fatigue	Fatigue
15 vol. %	Abrasive	Adhesive	Abrasive	Abrasive
		Abrasive	Adhesive	Adhesive
		Fatigue	Fatigue	Fatigue
20 vol. %	Abrasive	Abrasive	Abrasive	Abrasive
		Adhesive	Adhesive	Adhesive
		Fatigue	Fatigue	Fatigue

Remark: Adhesive wear includes transferred layer and delamination

ตารางที่ 5.4 ลักษณะสะเก็ดสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ภายหลังจากการเผาผนึก

SiC _p	5 N	25 N	45 N	65 N
5 vol. %	Flake	Bigger flake	Bigger flake	Bigger flake
	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate
10 vol. %	Agglomerate	Flake	Flake	Bigger flake
	Flake	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate
15 vol. %	Flake	Flake	Flake	Bigger flake
	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate
20 vol. %	Flake	Flake	Flake	Bigger flake
	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate

ตารางที่ 5.5 ลักษณะสะเก็ดสึกหรอของชิ้นงานวัสดุเชิงประกอบ ภายหลังจากการบ่มแข็ง

SiC _p	5 N	25 N	45 N	65 N
5 vol. %	Flake	Bigger flake	Bigger flake	Bigger flake
	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate
10 vol. %	Flake	Flake	Flake	Bigger flake
	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate
15 vol. %	Flake	Flake	Flake	Bigger flake
	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate
20 vol. %	Flake	Flake	Flake	Bigger flake
	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate	Agglomerate



บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาความต้านทานการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณ 5 10 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง สามารถสรุปได้ดังนี้

6.1 พฤติกรรมและกลไกการสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปผง

6.1.1 วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Ball-on-Flat มีอัตราการสึกหรอในช่วง 10^{-3} ถึง 10^{-5} mm^3/Nm และมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในช่วง 0.04 ถึง 0.76

6.1.2 การสึกหรอของวัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ ประกอบด้วยกลไกการสึกหรอแบบยึดติด การสึกหรอแบบขจัดสี การสึกหรอแบบความล้า และการสึกหรอแบบออกซิเดชัน โดยการสึกหรอจะเกิดรุนแรงขึ้นเมื่อเพิ่มภาระแรงทดสอบจาก 5 เป็น 25 45 และ 65 นิวตัน

6.2 อิทธิพลของปริมาณการเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ต่อพฤติกรรมการสึกหรอ

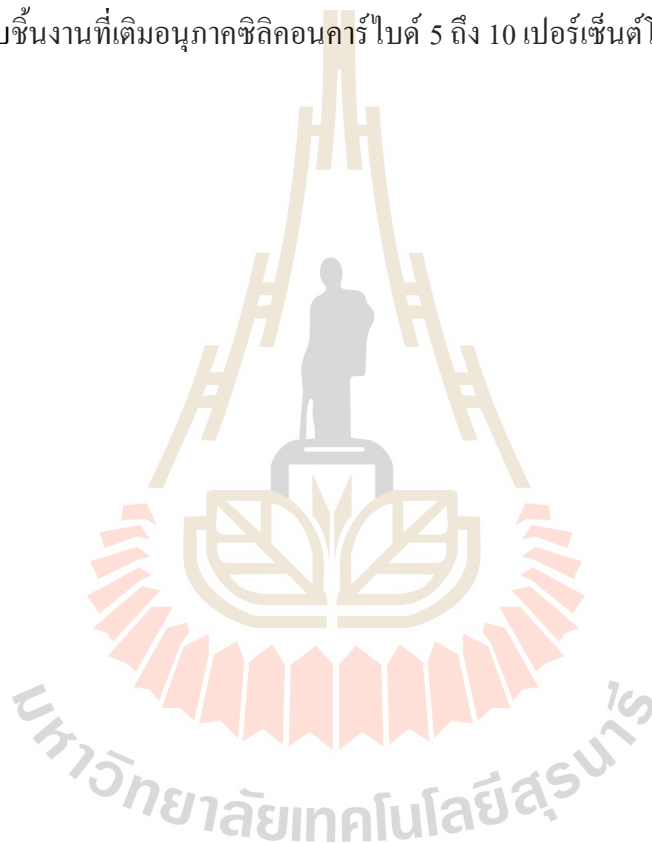
6.2.1 การเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ปริมาณเพิ่มมากขึ้นจาก 5 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรจะช่วยต้านทานต่อการสึกหรอได้ดีขึ้น โดยมีอัตราการสึกหรอต่ำสุดคือ 9.6×10^{-5} mm^3/Nm

6.2.2 วัสดุเชิงประกอบจะเกิดการสึกหรอแบบยึดติดที่รุนแรง เมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ในปริมาณต่ำคือ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และกลไกการสึกหรอจะเปลี่ยนไปเป็นการสึกหรอแบบขจัดสี เมื่อเติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นเป็น 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

6.3 อิทธิพลของการบ่มแข็งต่อพฤติกรรมการสึกหรอ

6.3.1 วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สภาวะภายหลังการเผาผนึกและภายหลังการบ่มแข็ง มีอัตราการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน

6.3.2 วัสดุเชิงประกอบพื้นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ที่สภาวะภายหลังการเผาผนึกและภายหลังการบ่มแข็งมีกลไกการเกิดการสึกหรอคล้ายคลึงกัน อย่างไรก็ตาม การบ่มแข็งจะช่วยชะลอการเกิดการสึกหรอแบบความล้าได้ในการทดสอบที่ภาระแรงต่ำ คือ 5 นิวตัน สำหรับชิ้นงานที่เติมอนุภาคซิลิคอนคาร์ไบด์ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



รายการอ้างอิง

- ฐาปนีย์ พัชรวิชัย. (2550). โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นิติกร นรภัยพิพากษา. (2554). ผลกระทบของอุณหภูมิผิวสัมผัสที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอ ของอีพอกซีเรซินเติมซิลิกาบด. [On-line] (วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท, คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาเครื่องกล มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์).
- พรวิสา วงศ์ปัญญา. (2551). โลหการกายภาพ 2. สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สยาม แก้วคำไสย์. (2554). รูปแบบการเสียหายของวัสดุ: การสึกหรอ (Wear). [On-line] ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุและเทคโนโลยีพื้นผิว ศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ.
- สารัมภ์ บุญมี. (2557). โลหวิทยาโลหะผง. สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อาริยา เอี่ยมมัญ. (2554) การประเมินชั้นเคลือบแคลเซียม-ฟอสฟอรัสบนไทเทเนียมบริสุทธิ์ทางการค้าเพื่อ ใช้เป็นวัสดุชีวภาพ. [On-line] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- Alshmiri, F., Atkinson, H.V., Hainsworth, S.V., Haidon, C., and Lawes, S.D.A. (2014). Dry sliding wear of aluminium-high silicon hypereutectic alloys. *Wear*. 313: 106-116.
- ASTM G133-95 (2002) **Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear.**
- Chen, R., Iwabuchi, A., and Shimizu, T. (2000). The effect of a T6 heat treatment on the fretting wear of a SiC particle-reinforced A356 aluminum alloy matrix composite. *Wear*. 238: 110–119
- Deuis, R.L., Subramanian, C., Yellupb, J.M. (1996) dry sliding wear of aluminium composites-a review. *Composites Science and Technology*. 57: 415-435.
- De Mello, J.D.B., Al-Rubaie, K.S., and Goldenstein, H. (1999). Three-body abrasion of Al-SiC composites. *Wear*. 225–229:163–173.
- Dieter, G. E. (1998). **Mechanical Metallurgy SI Metric Edition.** McGraw Hill Education.

- Dyzia, M. (2018). Aluminum Matrix Composite (AlSi7Mg2Sr0.03/SiCp) Pistons Obtained by Mechanical Mixing Method. **Materials**. 11:1
- Eslamian, M., Rak, J., and Ashgriz, N. (2008). Preparation of aluminum/silicon carbide metal matrix composites using centrifugal atomization. **Powder Technology**. 184: 11–20.
- German, R. M.. (1992). Prediction of sintered density for bimodal powder mixtures. **Metall.Trans.** 23(5): 1455–1465.
- German, R. M.. (1996). **Sintering theory and practice**. New York: John Wiley & Sons.
- German, R. M., and Bose, A. (1997). **Injection Molding of Metals and Ceramics**. New Jersey: Metal Powder Industries Federation.
- Hekner, B., Myalski, J., Valle, N., Botor-Probierz, A., Sopicka-Lizer, M., and Wieczorek, J. (2017). Friction and wear behavior of Al-SiC (n) hybrid composites with carbon addition. **Composites Part B**. 108:291-300.
- Higgins, R. A. (1993). **Engineering Metallurgy Part1: Applied Physical Metallurgy**. 6th Edition. 416.
- Inpanya, B., Patcharawit, T., and Chuankrerkkul, N. (2012). **Powder Injection moulding of silicon carbide particulate-reinforced aluminium alloy**. M.S. thesis, School of Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Lee, J.A., and Mykkanen, D.L. (1987). **Metal and Polymer Matrix Composites**. Park Ridge: Noyes Data Corp.
- Martin, J.M., and Castro, F. (2003). Liquid phase sintering of P/M aluminium alloys: effect of processing conditions. **Journal of Materials Processing Technology**. 143–144: 814–821.
- Merz, L., Rath, S., Piottter, V., Ruprecht, R., Ritzhaupt-Kleissl, J., and Haussel, J. (2002). Feedstock development for micro powder injection molding. **Microsystem Technologies**. 8:129-132.
- Ogel, B., and Gurbuz, R. (2001). Microstructural characterization and tensile properties of hot pressed Al-SiC composites prepared from pure Al and Cu powders. **Materials Science and Engineering:A**. 301: 213–220.
- Ortiz, M.B.. (1996). **Centrifugal atomization for production of aluminum particles**. M.S. thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering State University of New York, Buffalo New York.

- Patcharawit, T., Ngeekoa, A., Tongkerd, W., Takhampom, S., Lapkeaw, S., and Chuankrerkkul, N. (2017). Mechanical Properties of As-Exposed Al-SiC_p Composite Fabricated by Powder Injection Moulding. **Key Engineering Materials**. 751:60-69.
- Patcharawit, T., Thongnoppakoon, V., Changlor, A., Jindangam, T., Phongreedand, N., and Chuankrerkkul, N. (2014). Effects of Aluminium Alloy Powder Sizes on Aluminium Composites Fabricated by Powder Injection Moulding. **The 8th Thailand Metallurgy conference**. Bangkok.
- Pieczonka, T., Schubert, T., Baunack, S., and Kieback, B. (2008). Dimensional behaviour of aluminium sintered in different atmospheres. **Materials Science and Engineering** 478: 251–256.
- Quinard, C., Barriere, T., and Gelin, J.C. (2009). Development and property identification of 316L stainless steel feedstock for PIM and μ PIM. **Powder Technology**. 190: 123-128.
- Rao, R.N., and Das, S. (2011). Effect of SiC content and sliding speed on the wear behaviour of aluminium matrix composites. **Materials and Design**. 32: 1066-1071.
- Rohatgi, P., and Asthana, R. (1991). The solidification of metal matrix particulate composites. **JOM**. 43:35–41.
- Sawla, S., and Das, S. (2004). Combined effect of reinforcement and heat treatment on the two body abrasive wear of aluminum alloy and aluminum particle composites. **Wear**. 257:555–561.
- Stachowiak, G.W. (2005). **Wear: Materials, Mechanisms and Practice**. John Wiley & Sons.
- Tan, H., Wang, S., Yu, Y., Cheng, J., Zhu, S., Qiao, Z., and Yang, J. (2018). Friction and wear properties of Al-20Si-5Fe-2Ni-Graphite solid-lubricating composite at elevated temperatures. **Tribology International**.
- Vieira, A.C., Sequeira, P.D., Gomes, J.R. and Rocha, L.A. (2009). Dry sliding wear of Al alloy/SiC_p functionally graded composites: Influence of processing conditions. **Wear**. 267: 585–592.
- Wang, H., Zhang, R., Hu, X., Wang, C.-A., and Huang, Y. (2008). Characterization of a powder metallurgy SiC/Cu–Al composite. **journal of materials processing technology**. 197: 43–48.
- Yana, C., Lifeng, W., and Jianyue, R. (2008). Multi-functional SiC/Al Composites for Aerospace Applications. **Chinese Journal of Aeronautics**. 21(6):578-584.

Yusoff, Z., Jamaludin, S.B., and Amin Misbahul. (2010). Tribology and Wear Theory of Aluminum Composite: Review and Discussion. **Proceedings of the International Postgraduate Conference on Engineering (IPCE 2010)**. Malaysia.





ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระหว่างศึกษา

T Patcharawit, A Ngeekoh and N Chuankrekkul. **Wear properties of 10 vol.% silicon carbide particulate reinforced aluminum composite fabricated by powder injection molding.** International Conference on Materials and Intelligent Manufacturing (ICMIM2017), August 21-23th, 2017, National University of Singapore, Singapore.



PAPER • OPEN ACCESS

Wear properties of 10 vol.% silicon carbide particulate-reinforced aluminum composite fabricated by powder injection molding

To cite this article: T Patcharawit *et al* 2017 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **244** 012012

View the [article online](#) for updates and enhancements.

Related content

- [Radiative Properties of Semiconductors: Silicon carbide](#)
N M Ravindra, S R Marthi and A Barfobre
- [Effect of low temperature annealing on the wear properties of NITINOL](#)
Sriram Mukunda, Narendra Nath.S, Mervin A. Herbert *et al.*
- [Analysis of wear properties of aluminium based journal bearing alloys with and without lubrication](#)
J Joy Mathavan and Amar Patnaik



Wear properties of 10 vol.% silicon carbide particulate-reinforced aluminum composite fabricated by powder injection molding

T Patcharawit¹, A Ngeekoh² and N Chuankrekkul³

1 Lecturer, School of Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

2 Master student, School of Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

3 Lecturer, The Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

E-mail: tapany@sut.ac.th

Abstract. Wear properties of aluminum matrix composites reinforced with silicon carbide particulate of 10 vol.% addition was investigated in as-sintered and heat-treated conditions under varying loads at -5, -25, -45 and -65N using a ball on flat type of wear test. The composite was fabricated by powder injection molding and sintering at 650 °C for 3 hours. Solution treatment was carried out at 550 °C for 2 hours followed by age-hardening at 160 °C for 6 hours. SEM and XRD results indicated Al and SiC_p are present as matrix and reinforcement, while AlN, Al₂Cu and Mg₂Si were also detected. Further precipitation of Al₂Cu and Mg₂Si in heat-treated samples promoted maximum macro and micro Vickers hardness values, which were achieved at 161 and 157 H_v respectively. Wear weight loss increased with increasing minus load level. The coefficient of friction was found in the range of 0.042-0.048. Wear mechanisms were determined as the combination of abrasive, adhesion and oxidation.

1. Introduction

Aluminum matrix composites have been increasingly used for engineering applications such as automotive, aerospace, biomedical and electrical applications [1]. Light weight, good hardness and strength as well as wear resistance are attractive properties, which are controlled by starting materials used and fabrication techniques. Silicon carbide particulate as the reinforcing material provides isotropic properties, if good distribution of the reinforcement and effective bonding between the reinforcement and the matrix are attained [2]. Strengthening mechanisms were applied to improve mechanical properties of aluminum composite such as solid solution and precipitation hardening. In recent years, it is known that small addition of silicon carbide reinforcement can improve hardness of the aluminum matrix. However, the efficiency of reinforcements are not good enough for hardness and tensile strength due to the different hardness between reinforcement and matrix [2]. Further, effective interfacial bonding between aluminum matrix and silicon carbide strongly determines the final properties, which depends on selected processing routes. Research on stir-mixing, liquid infiltration and powder technology of aluminum composites are under intense investigation to enhance properties and scope engineering applications [3]. However, there are certain limitations of liquid-state forming processes such as wettability of aluminum and silicon carbide, and brittle aluminum carbide (Al₄C₃) occurring along interfaces between aluminum matrix and silicon carbide. Powder metallurgy



Content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

Published under licence by IOP Publishing Ltd

respectively. The main phases are aluminum matrix and silicon carbide. It is noted that AlN was detected in both of sintered and heat-treated conditions due to the effect of nitrogen gas in sintering atmosphere. Furthermore, there are higher peaks of precipitate phases such as Al_2Cu and Mg_2Si found in the heat-treated composites, which contribute to improved hardness.

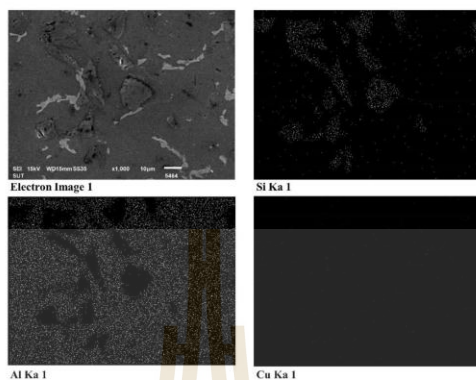


Figure 2. EDS mapping analysis of Al, Si and Cu.

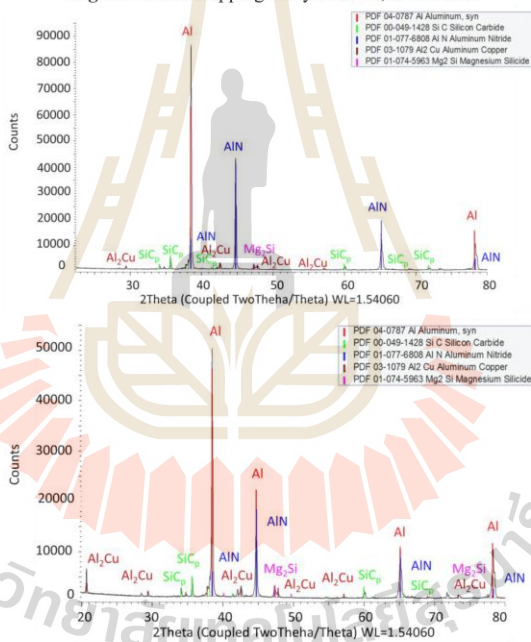


Figure 3. XRD result of silicon carbide particulate reinforced aluminum composite after sintering (top) and precipitation hardening (bottom).

3.2. Density and hardness

Density was measured to be 1.82 g/cm^3 after injection molding and then increased to 2.63 g/cm^3 after sintering. This accounts for 93.2% theoretical density in the sintered condition according to the rule of mixture by taking the densities of aluminum alloy = 2.78 g/cm^3 and silicon carbide = 3.20 g/cm^3 respectively. The sintered density, which is lower than the theoretical density is plausibly due to porosity left after sintering, as previously shown in Figure 1 a).

Macro and micro Vickers hardness values of heat-treated samples significantly increase as compared to those of as-sintered samples, as shown in Table 1. The maximum values were measured at 160.1 and 156.9 Hv respectively. This is due to precipitation hardening of Al_2Cu and Mg_2Si in the matrix.

Table 1. Macro and micro Vickers hardness values for as-sintered and heat-treated conditions.

	Macro Hardness (Hv)	Micro Hardness (Hv)
As sintered	130.1	136.0
Heat treated	160.1	156.9

3.3. Wear properties and worn surfaces

Wear grooves at varying minus loads at a stroke length of 10 mm are depicted in Figure 4. Increasing wear groove width is observed with increasing minus load level. Furthermore, plastic deformation at the edges of the wear grooves along the wear track at higher minus load level is evident.

Wear test parameters such as frictional force (F_x) and normal force (F_z) were measured in real time as shown in Figures 5 a) and b) for loads at -25 and -65N respectively, presented at $t = 0 - 400$ second. The coefficient of friction (COF) was then obtained accordingly.

Wear weight loss as a function of load for as-sintered and heat-treated samples are illustrated in Figures 6 a) and b) respectively. It is noted that wear weight loss at -5N load for both conditions is undetectable. It can be seen that a slight increase trend of wear weight loss was observed with increasing minus load [6]. The COF are reported in Figures 7 a) and b), and was found in a range of 0.042 - 0.048 and 0.044 - 0.047 for as-sintered and heat-treated conditions respectively. These values are comparable to those observed in laser composite surfaced aluminum with silicon carbide by J. Dutta Majumdar et. al, [7]. Many researches [8] also supported that the COF values were found insensitive to load or pressure applied. However, COF at very low minus load of -5N was significantly higher. Further study is required for more explanation.

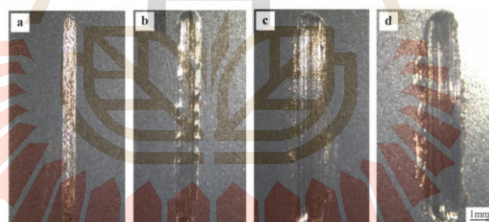


Figure 4. Wear grooves at varying loads at a) -5N, b) -25N, c) -45N and d) -65N.

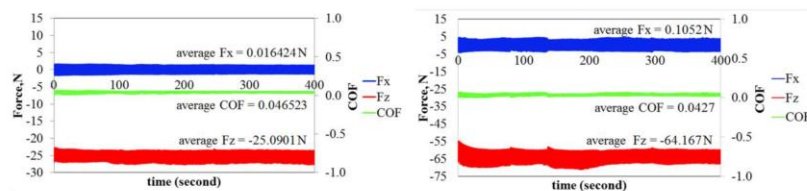


Figure 5. Test parameters at a) -25N and b) -65N, showing Fx, Fz and coefficient of friction (COF).

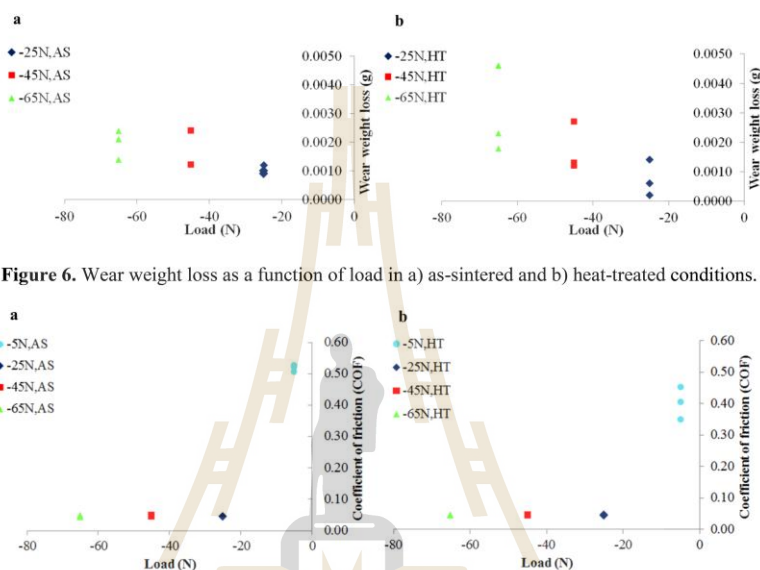


Figure 6. Wear weight loss as a function of load in a) as-sintered and b) heat-treated conditions.

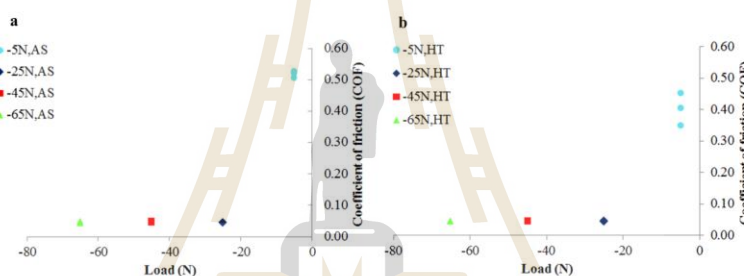


Figure 7. Coefficient of friction as a function of load in a) as-sintered and b) heat-treated conditions.

Worn surface of aluminum composite were investigated by using SEM, as demonstrated in Figures 8 a) and c) at low magnification for -25N and -65N respectively. Abraded surfaces are evident in all samples at every load levels, indicating abrasive wear, but with a lower degree at -5N. As the counterface stainless steel ball is much harder in comparison to the aluminum composite, it is believed that silicon carbide might have been pulled out and abraded on the softer aluminum matrix. The increasing contact load between stainless steel ball and the aluminum composite had made the latter to deform progressively, as shown in Figure 4. Secondary electron micrographs at higher magnification are shown in Figures 8 b) and d). Rough surface area of wear grooves are possibly due to deformation of the soft aluminum matrix. Severely deformed matrix would then be delaminated, transferred and adhered onto other surface. Back-Scattered Electron mode analysis as depicted in Figure 9 a) indicates certain amount of silicon carbide distributed throughout the aluminum matrix. However, BSE micrograph of the worn surface at the same magnification reveals only small traces of silicon carbide left on the surface, as seen in Figure 9 b). It is then confirmed that some silicon carbide particulate previously embedded in the aluminum matrix fell out and might have abraded on to the softer

aluminum matrix during the ball on flat wear test, introducing three body abrasion. Similar results by F. Alshmiri, et. al. [9] and I. Dinaharan, et. al. [10] indicated harder particles (silicon or fly ash) being pulled out and promoted three body abrasion wear, which then created fine spherical wear debris [9, 10]. Though, silicon carbide fracturing was also possible in this research at higher load, the evidence of fractured silicon carbide was however hardly observed. Therefore, it is worth to investigate effects of silicon carbide content on the degree of abrasive wear on this composite in future work.

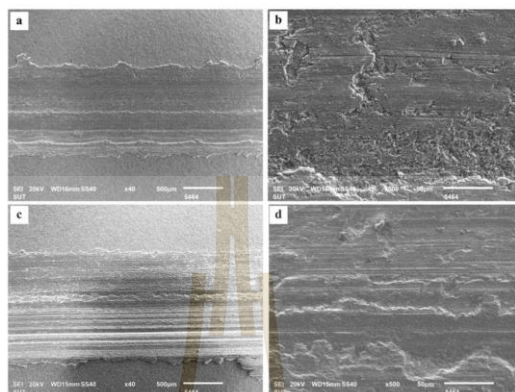


Figure 8. Secondary electron micrographs of worn surfaces at a) -25N and b) higher magnification, c) -65N and d) higher magnification.

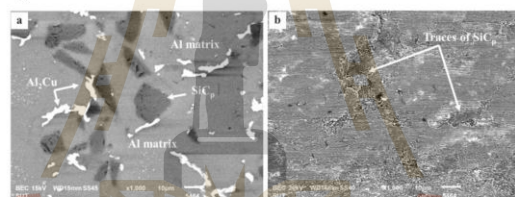


Figure 9. Back-scattered electron micrograph a) before wear test and b) after wear test.

Wear debris obtained from all tests at varying minus loads have shown two different forms of agglomerate and flake like-shape. EDS point analyses of wear debris at load levels of -25N and -65N, are illustrated in Figures 10 a) and b) respectively. Peaks of Al, Mg, Cu and O elements were detected in spectrum 1 of agglomerate wear debris. Flake like-shaped wear debris was EDS analysed (spectrum 2), showing Al, Mg, Cu and O elements having different composition in comparison to that of agglomerate one (spectrum 1). EDS analysis on wear debris obtained from lower minus load test indicates higher content of Al on the flake-like form of wear debris, which signifies that this product might be from the deformed aluminum matrix. Moreover, higher level of oxygen observed in the agglomerate form suggests more of oxidation product. At higher level of minus load (-65N), the level of Al and O content detected in both agglomerate and flake-like forms are comparable, as shown in Figures 10 a) and b). It is therefore believed that oxidation wear might have occurred in a mild level during the wear test and is more significant at higher minus load level [11]. Moreover, there was however no peaks of Fe, Ni or Cr detected. This implies the mutual transfer of material between the

wearing aluminum composite and the stainless steel counterface appears to be insignificant. Only aluminum matrix was deformed, oxidized, detached and transferred to be adhered on other areas. In addition, it is noticed that the size of flake-like form of wear debris also became significantly larger with increasing minus load level. Dry sliding wear test on aluminum-high silicon hypereutectic alloys by F. Alshmiri, et.al [9] indicated comparable result, where the transition from powder-type to flake like-shape as the load increased was reported. This flake-like wear debris found in this research also confirmed the operating wear mechanism is related to adhesive [10]. Together with the appearance of plastic deformation at the wear groove edges along the wear track previously mentioned, analogous to those observed from works by B. Hekner, et. al. [12] and S. Sawla and S. Das [13], these evidences substantiates the influence of plastic deformation on wear mechanisms at higher minus load level in this ball on flat type of wear test.

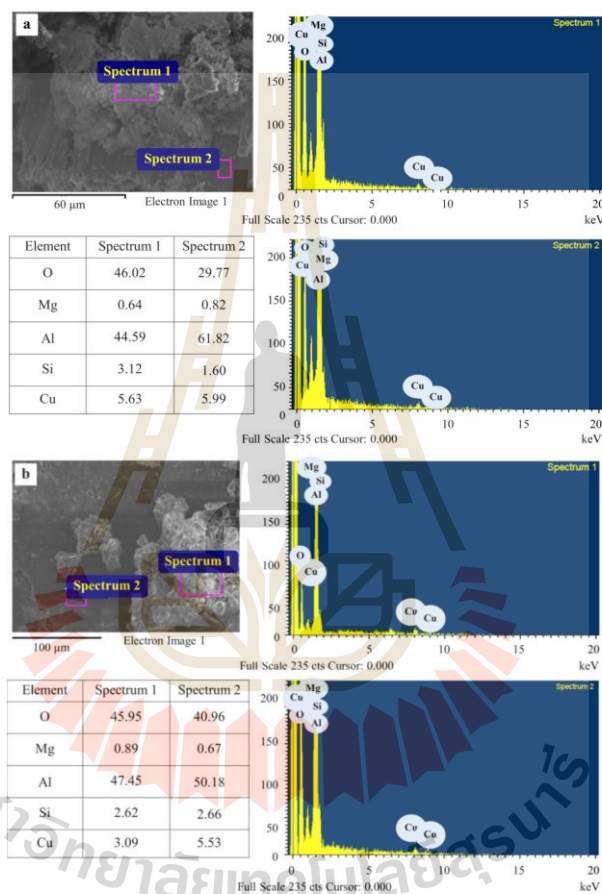


Figure 10. EDS point analysis of wear debris at applied loads of a) -25N and b) -65N.

Therefore, wear mechanisms of aluminum matrix reinforced with 10 vol.% silicon carbide particulate fabricated by powder injection molding tested under ball on flat type of wear test with load varying at -5 to -65N can be determined as follows. Wear damage of the aluminum composites shows several wear mechanisms such as abrasive, adhesive and oxidation wear. Firstly, abrasive wear of aluminum reinforced with silicon carbide is caused by different hardness between the aluminum matrix and silicon carbide. Much harder silicon carbide particulate first fell out from the matrix and abraded onto the softer matrix surface. Secondly, aluminum matrix was deformed and delaminated to give wear debris and some was then transferred from one surface to another. Adhering of these transferred materials at the wear groove edge is also evident. Increasing minus load level introduced much more severity of the wear damage. Finally, it is known that aluminum passively produces oxide film layer on its fresh surface. During ball on flat of wear test in ambient atmosphere, the oxide film layer was removed and the fresh surface will react with oxygen immediately to form new oxide layers in repeated cycles of reciprocating wear test.

4. Conclusions

Wear mechanisms of powder injection molded aluminum composite reinforced with 10 vol.% silicon carbide is due to abrasive, adhesive and oxidation. Abrading of silicon carbide on the softer aluminum matrix is due to hardness difference between the two materials. Mutual transfer between the two mating materials is not apparent. Only softer aluminum matrix was plastically deformed, oxidized, detached and transferred to be adhered on other areas. Severe wear damage at high applied minus load of -65N involved plastic deformation of the soft matrix at the wear groove edges. Degree of damage such as wear weight loss, wear groove width and oxidation increased with increasing minus load level. The coefficient of friction has not significantly changed with the load applied and was found in the range of 0.042-0.048. However, wear damage of the composite after sintering and precipitation hardening are not significantly different.

5. References

- [1] Sahin Y 2010 *Tribol Int* **43** 939-43
- [2] Wang H, Zhang R, Hu X, Wang C and Huang Y 2008 *J. Mater. Process. Technol.* **197** 43-48
- [3] Eslamian M, Rak J and Ashgriz N 2008 *J. Powder Technol.* **184** 11-20
- [4] Martin M J and Castro F 2003 *J. Mater. Process. Technol.* **143-44** 814-21
- [5] Patcharawit T, Ngeekoh A, Tongkerd W, Takhampom S, Lapkeaw S and Chuankrerkkul N 2017 *Key Eng. Mater.* **751** 60-69
- [6] Nassar E A and Nassar E E 2017 *JKSUES* **29** 295-99
- [7] Majumdar D J, Chandra R B and Manna I 2007 *Wear* **262** 641-48
- [8] Deus L R, Subramanian C and Yeilup M J 1997 *Compos. Sci. Technol.* **57** 415-35
- [9] Alshmi F, Atkinson V H, Hainsworth V S, Haidon C and Lawes S D A 2014 *Wear* **313** 106-16
- [10] Dinaharan I, Nelson R, Vijay J S and Akinlabi T E 2016 *Mater. Charact.* **118** 149-58
- [11] Singh J and Chauhan A 2016 *Ceram. Int.* **42** 56-81
- [12] Hekner B, Myalski J, Valle N, Probiez A B, Lizer S M and Wiczorek J 2017 *Composites Part B* **108** 291-00
- [13] Sawla S and Das S 2004 *Wear* **257** 555-61

Acknowledgments

Authors gratefully acknowledge School of Metallurgical Engineering, Suranaree University of Technology, The Metallurgy and Materials Science Research Institute, Chulalongkorn University, and National Metal and Materials Technology Center for facilities and technical supports. Thanks are also due to Thailand Institute of Scientific and Technological Research for wear testing.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวอารดา จีเกาะ เกิดเมื่อวันที่ 31 สิงหาคม พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนอุบลรัตนราชกัญญาราชวิทยาลัย นครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2553 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2556 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี ได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2557 โดยได้รับทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอกจากกองทุนสนับสนุนการวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (OROG) รหัสโครงการ SUT7-713-57-12-49

ได้รับรางวัล Best oral presentation ในการนำเสนอผลงานเรื่อง Wear properties of 10 vol.% silicon carbide particulate reinforced aluminum composite fabricated by powder injection molding ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1st International Conference on Materials and Intelligent Manufacturing (ICMIM 2017) จัดโดย IOP Institute of Physics ณ National University of Singapore ประเทศสิงคโปร์ ระหว่างวันที่ 21-23 สิงหาคม พ.ศ. 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี