

ผลของอะลูมิเนียมต่อพฤติกรรมการศึกษา จากการทดสอบแบบ Pin-on-disc ของเบรียงทองแดง
ผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก



นายวิริยะ ซอบออมทรัพย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF ALUMINIUM ON PIN-ON-DISC WEAR BEHAVIOR OF Cu-10wt%Sn
BEARING



Mr. Viriyah Chobaomsup

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

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลของอะลูมิเนียมต่อพฤติกรรมการสึกหรอ จากการทดสอบแบบ
Pin-on-disc ของแบร็ริงทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก

โดย

นายวิริยะ ขอบออมทรัพย์

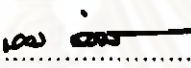
สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

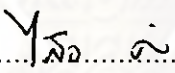
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

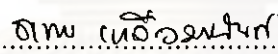
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์

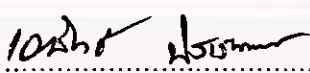
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरุญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว ด้านชัยวิจิตร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ นิสาร์ตนาพร)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. เรืองเดช ธงศรี)

ศูนย์ทรัพยากรพยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิริยะ ชอบออมทรัพย์ : ผลของอะลูมิเนียมต่อพฤติกรรมการสึกหรอจากการทดสอบแบบ Pin-on-disc ของแบร็งทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก (EFFECTS OF ALUMINIUM ON PIN-ON-DISC WEAR BEHAVIOR OF Cu-10wt%Sn BEARING) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์, 107 หน้า.

แบร็งหล่อขึ้นได้เอง เป็นหนึ่งในการใช้งานที่เก่าแก่ที่สุดในด้านอุตสาหกรรม การปรับปรุงให้แบร็งให้มีการสึกหรอน้อยลง โดยการทำให้แบร็งมีความแข็งเพิ่มขึ้น และมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดต่ำลง จากการเติมธาตุผสม งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าผลของเวลาที่ใช้ในการเผาผนึกอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาผนึก และสัดส่วนของการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อสมบัติภายหลังการเผาผนึกของแบร็งทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก พบว่า สัดส่วนการเติมอะลูมิเนียมที่สูงขึ้นในช่วง 0 ถึง 10 wt% ส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นลดต่ำลง ปริมาณรูพรุนสูงขึ้น ความแข็งลดต่ำลง มีส่วนทำให้การสึกหรอของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ปริมาณรูพรุนลดต่ำลง และความแข็งสูงขึ้น เมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 90 นาที และความแข็งจะมีค่าสูงสุดเมื่อเผาผนึกด้วยเวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที สำหรับส่วนผสม 0wt%Al, 5wt%Al และ 10wt%Al ได้ความแข็งเท่ากับ 75.5, 33.9 และ 32.3 HV มีความหนาแน่น 6.87, 5.12 และ 4.25 g/cm³ ซึ่งมีปริมาณรูพรุน 18.7, 32.7 และ 37.3 vol% ตามลำดับ ส่วนชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C มีความหนาแน่นลดต่ำลง ปริมาณรูพรุนสูงขึ้น และความแข็งลดต่ำลง เมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 90 นาที และความแข็งจะมีค่าสูงสุดเมื่อเผาผนึกด้วยเวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที โดยชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมผงอะลูมิเนียม (0wt%Al), 5wt%Al และ 10wt%Al ได้ความแข็งเท่ากับ 54.4, 51.3 และ 31.9 HV มีความหนาแน่น 7.81, 6.63 และ 5.44 g/cm³ ซึ่งมีปริมาณรูพรุน 9.5, 15.3 และ 27.9 vol% ตามลำดับ

การอบชุบความร้อนชิ้นงานที่เผาผนึกแล้ว(900°C, 30 นาที) ที่อุณหภูมิ 750°C แล้วทำการชุบแข็งในน้ำ ทำให้ชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 5 wt% และ 10 wt% มีความแข็งเพิ่มขึ้นจากเดิม 51.3 เป็น 69.2 HV และจาก 31.9 เป็น 39.6 HV ซึ่งคิดเป็น 37% และ 25% ตามลำดับ โดยไม่เกิดการเสียรูป การสึกหรอลดลงจากเดิม 60.95 เป็น 41.80 mg และจาก 97.65 เป็น 89.35 mg ซึ่งคิดเป็น 31% และ 8% ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....วิริยะ ชอบออมทรัพย์.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....ศ.ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์.....
ปีการศึกษา.....2552.....

5070451221 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEYWORDS : SELF-LUBRICATING BEARING / Cu-10wt%Sn / POWDER METALLURGY

VIRIYAH CHOBAOMSUP: EFFECTS OF ALUMINIUM ON PIN-ON-DISC WEAR BEHAVIOR OF Cu-10wt%Sn BEARING. THESIS ADVISOR: ASST.PROF. TACHAI LUANGVARANUNT, Ph.D., 107 pp.

Self-lubricated bearing is one of the oldest industrial applications. Wear reduction by increasing the material hardness and reducing friction coefficient can be achieved by alloying addition. This research studied effects of sintering time and temperature, alloyment of aluminum to sintered properties of Cu-10wt%Sn. It was found that addition of aluminum from 1 to 10wt% reduced the sintered material density, increased porosity; hardness was decreased, and wear rate increased. Materials sintered at 830°C had increased density, with decreased porosity, and increased hardness, when the sintering time increased from 5 to 90 min. The highest hardness was obtained when sintering time was 60 min. For material without aluminum addition (0wt%Al), 5wt%Al, 10wt%Al, the hardness were 75.5, 33.9, 32.3 HV, densities were 6.87, 5.12, 4.25 g/cm³, having porosity of 18.7, 32.7, 37.3 vol%, respectively. Materials sintered at 900°C had decreased density, with increased porosity, and decreased hardness, when the sintering time increased from 5 to 90 min. The highest hardness was obtained when sintering time was 30 min. For material without aluminum addition (0wt%Al), 5wt%Al, 10wt%Al, the hardness were 54.4, 51.3, 31.9 HV, densities were 7.81, 6.63, 5.44 g/cm³, having porosity of 9.5, 15.3, 27.9 vol%, respectively.

Heat treatment of sintered materials (900°C, 30 min) by heating to 750°C and quenching in water improved hardness of 5wt% and 10wt%Al materials, increasing from 51.3 to 69.2 HV, and from 31.9 to 39.6 HV, which were 37% and 25% increase, respectively. Mass loss from wear test of 5wt%Al and 10wt%Al reduced from 60.95 to 41.80 mg, and from 97.65 to 89.35 mg, which were 31% and 8%, respectively.

Department:Metallurgical Engineering...Student's Signature: Viriyah Chobomsup

Field of Study:.....Metallurgical Engineering...Advisor's Signature: Tachai Luangvaranunt

Academic Year: 2009.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความร่วมมือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์ ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการศึกษาและวิจัย รวมทั้งให้คำปรึกษาด้านจิตใจ รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไสว ด้านชัยจิตร, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนาพร และ ดร.เรืองเดช ธงศรี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมให้ความรู้ในงานด้านโลหะวิทยาต่าง ๆ อีกทั้งคำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมโลหการทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกด้านด้วยดีตลอดมา

ขอขอบพระคุณบริษัท K. POWDER METAL CO., LTD. กทม. สำหรับความอนุเคราะห์ฝังทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนักแบบ Premixed ในการศึกษาและวิจัย

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ และศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดสอบตลอดมาจนเสร็จสิ้นงานวิจัยด้วยดี และขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนข้าพเจ้า

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและบุคคลอันเป็นที่เคารพรักที่คอยให้กำลังใจอีกทั้งการสนับสนุนในด้านการศึกษา และให้โอกาสที่ดีในชีวิตแก่ข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น.....	3
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	3
2.1.1 โลหวิทยาของทองแดงและโลหะผสมทองแดง.....	3
2.1.2 บรอนซ์ดีบุก	4
2.1.3 บรอนซ์อะลูมิเนียม.....	6
2.1.4 แบริงที่ผลิตจากกระบวนการโลหะผง.....	8
2.1.5 องค์ประกอบของแบริง.....	10
2.1.6 การผสมผง.....	12
2.1.7 การอัดขึ้นรูป.....	13
2.1.8 การเผาผืนึก.....	13
2.1.9 การเผาผืนึกแบบเฟสของเหลว.....	14
2.1.10 การปรับขนาด.....	15
2.1.11 การอัดน้ำมัน.....	15
2.1.12 การทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-Disc.....	16

2.1.13 กลไกการสึกหรอแบบต่างๆ.....	19
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	36
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	36
3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	36
4 ผลการวิเคราะห์การทดลอง.....	41
4.1 ผลการทดลองเมื่อเผาผนึกที่ 900°C.....	41
4.1.1 โครงสร้างจุลภาค.....	41
4.1.2 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย.....	42
4.1.3 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและสารประกอบ.....	47
4.1.4 ผลการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-in-disc	54
4.2 ผลการทดลองเมื่อเผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C	58
4.2.1 โครงสร้างจุลภาค.....	59
4.2.2 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย.....	59
4.2.3 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและสารประกอบ.....	63
4.2.4 ผลการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-in-disc	73
4.3 ผลเนื่องจากระบวนการอบชุบความร้อน.....	75
4.3.1 ผลเนื่องจากการทำ Heat Treatment ที่ 900°C	76
4.3.1.1 โครงสร้างจุลภาค และความแข็ง.....	76
4.3.1.2 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและสารประกอบ.....	79
4.3.2 ผลเนื่องจากการทำ Heat Treatment ที่ 750°C	83
4.3.2.1 โครงสร้างจุลภาค.....	84
4.3.2.2 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย.....	84
4.3.2.3 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและสารประกอบ.....	85
4.3.2.4 ผลการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc.....	89
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	95

หน้า

5.1 สรุปผลการทดลอง..... 95

5.2 ข้อเสนอแนะ..... 96

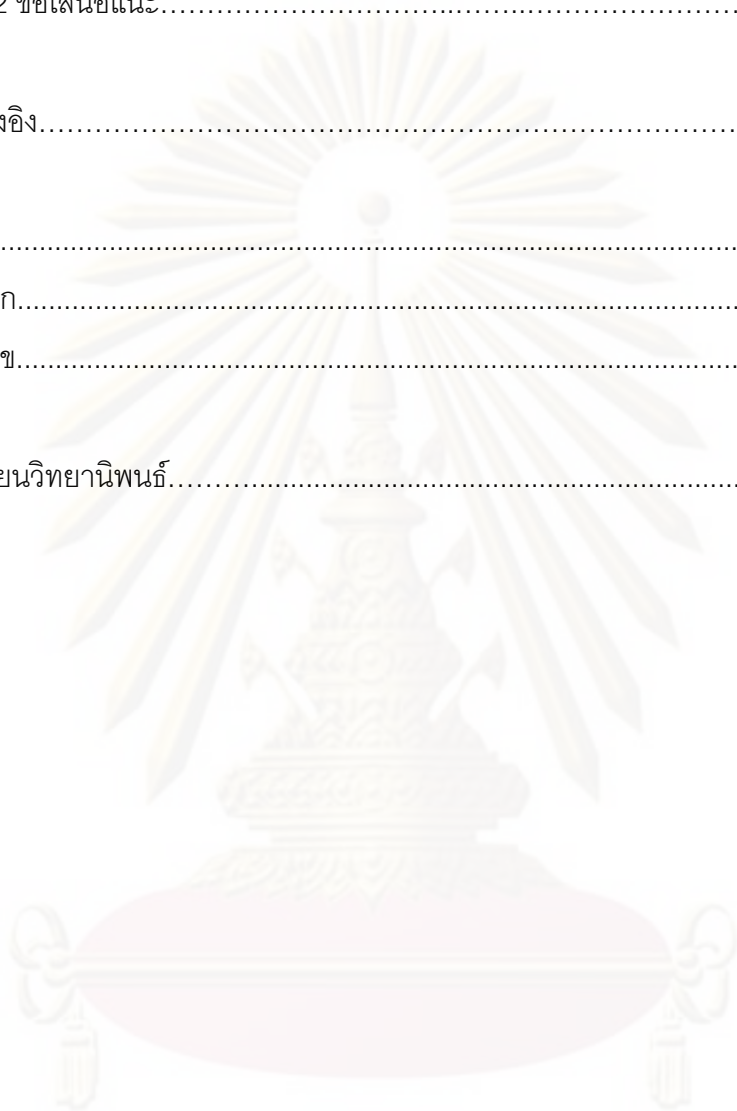
รายการอ้างอิง..... 97

ภาคผนวก..... 99

ภาคผนวก ก..... 100

ภาคผนวก ข..... 105

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 106



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	อุตสาหกรรมต่างๆที่ผลิตแบริงและตัวอย่างการนำไปใช้งาน	9
ตารางที่ 2.2	ประเภทและช่วงความหนาแน่นของแบริงทองแดงผสมดีบุก	10
ตารางที่ 2.3	ปริมาณน้ำมันโดยทั่วไปของแบริงทองแดงผสมดีบุก.....	11
ตารางที่ 2.4	ความหนาแน่นและปริมาณน้ำมันของแต่ละเกรดของแบริงที่มีเหล็กเป็นวัสดุหลัก... 11	
ตารางที่ 2.5	ธาตุองค์ประกอบและร้อยละของแต่ละองค์ประกอบของแบริงผสม เหล็ก-ทองแดง ผสมดีบุก.....	12
ตารางที่ 2.6	คุณลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอในห้องทดลอง.....	17
ตารางที่ 2.7	ตัวอย่างผลที่ได้จากการทดลอง.....	17
ตารางที่ 2.8	ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่ไม่อัดน้ำมัน.....	25
ตารางที่ 2.9	ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่อัดน้ำมัน.....	25
ตารางที่ 2.10	ปฏิกิริยาการเกิดเฟสในระบบการทองแดงและดีบุก และผลเนื่องจากความร้อน และการเปลี่ยนแปลงขนาด.....	35
ตารางที่ 4.1	ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่ไม่ได้เติมผง อะลูมิเนียม (0 wt% Al) เผาเนื้อที่ 900°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ.....	43
ตารางที่ 4.2	ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก เผาเนื้อที่ 900°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ.....	43
ตารางที่ 4.3	ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 10% โดยน้ำหนัก เผาเนื้อที่ 900°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ.....	43
ตารางที่ 4.4	น้ำหนักที่ลดลงภายหลังการเผาเนื้อที่อุณหภูมิ 900°C ที่เวลาในการคง อุณหภูมิต่างๆกัน.....	46
ตารางที่ 4.5	ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) ที่เผาเนื้อที่ 900°C.....	51
ตารางที่ 4.6	ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ที่เผาเนื้อที่ 900°C.....	51
ตารางที่ 4.7	ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% ที่เผาเนื้อที่ 900°C.....	51

ตารางที่ 4.8 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ของธาตุองค์ประกอบจากเศษที่เกิดจากการทดสอบ การสึกหรอของชิ้นงานที่มีสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม 0 wt%, 5 wt% และ 10 wt%.....58

ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่ไม่ได้เติมผง อะลูมิเนียม (0wt% Al) เผาผนึกที่ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ.....60

ตารางที่ 4.10 ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่เติมผง อะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ.....60

ตารางที่ 4.11 ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 10% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ.....60

ตารางที่ 4.12 น้ำหนักที่ลดลงภายหลังการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิ ต่างๆกัน.....63

ตารางที่ 4.13 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) ที่เผา ผนึกที่ 830°C66

ตารางที่ 4.14 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ที่เผาผนึกที่ 830°C.....66

ตารางที่ 4.15 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt%Al ที่เผาผนึก ที่ 830°C.....67

ตารางที่ 4.16 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ของธาตุที่พบในบริเวณต่างๆของชิ้นงานดังภาพที่ 4.24.....70

ตารางที่ 4.17 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ของธาตุที่พบในบริเวณต่างๆของชิ้นงานดังภาพที่ 4.31 และ 4.32.....78

ตารางที่ 4.18 ความแข็งของชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่อุณหภูมิ 900°C79

ตารางที่ 4.19 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) ก่อนและหลังการทำ Heat Treatment ที่ 900°C80

ตารางที่ 4.20 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ก่อน และหลังการทำ Heat Treatment ที่ 900°C81

ตารางที่ 4.21 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ก่อน และหลังการทำ Heat Treatment ที่ 900°C81

ตารางที่ 4.22 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งของชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่อุณหภูมิ 750°C ซึ่งเผาผืนิก ที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่เติมผง อะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่างๆกัน.....	85
ตารางที่ 4.23 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) ก่อนและหลังการทำ Heat Treatment ที่ 750°C	86
ตารางที่ 4.24 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ก่อนและหลังการทำ Heat Treatment ที่ 750°C.....	86
ตารางที่ 4.25 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมผสมอะลูมิเนียม 10wt%Al ก่อนและหลังการทำ Heat Treatment ที่ 750°C.....	86



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของสมบัติทางกล กับปริมาณดีบุก ของ Cast Bronze.....	5
ภาพที่ 2.2 แผนภูมิสมดุล 2 องค์ประกอบของทองแดง-ดีบุก.....	6
ภาพที่ 2.3 ผลกระทบของส่วนผสมต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมทองแดง-อะลูมิเนียม.....	7
ภาพที่ 2.4 แผนภูมิสมดุล 2 องค์ประกอบของทองแดง-อะลูมิเนียม.....	8
ภาพที่ 2.5 รูปร่างโดยทั่วไปของแบริง.....	9
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของ Diluted Bronze.....	12
ภาพที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของสารละลายของแข็งแอลฟาบรอนซ์ (150 X).....	14
ภาพที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของแบริงทองแดงผสมดีบุก.....	15
ภาพที่ 2.9 กลไกของการเกิดการสึกหรอแบบขัดถูแบบต่างๆ.....	22
ภาพที่ 2.10 แบบจำลองการเกิดการสึกหรอแบบเชื่อมติดของจิลเลียม (Jellium Model).....	21
ภาพที่ 2.11 กลไกการเกิดการสึกหรอแบบกัดกร่อนทั้ง 4 แบบ.....	22
ภาพที่ 2.12 ขั้นตอนไฮดรอลิกที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้เครื่องเจาะรู.....	23
ภาพที่ 2.13 การเสียรูปในชั้นผิวสัมผัส.....	24
ภาพที่ 2.14 การเกิดรอยแตกอันเนื่องมาจากการล้าตัว.....	24
ภาพที่ 2.15 บริเวณที่เกิดการสึกหรอแบบล้าตัวและแบบขัดถูของแท่งทองแดงผสมดีบุกขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผงที่ไม่อัดน้ำมัน.....	26
ภาพที่ 2.16 กราฟสัมพันธ์ประสิทธิผลความเสียหายจากการทดสอบสึกหรอของแท่งทองแดงผสมดีบุกขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผงที่อัดน้ำมันกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ความเร็ว 50 cm/s ระยะทาง 30,000 m.....	27
ภาพที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาคของโลหะทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก (a) เฝานึกที่อุณหภูมิ 900°C (b) ทำ solution heat treatment ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที (c) aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 30 นาที (d) aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 120 นาที (e) aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 300 นาที และ (f) aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 1440 นาที.....	28

ภาพที่ 2.18 XRD Patterns ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก	
(a) ทำ Solution heat treatment ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที,	
(b) ทำการ aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 30 นาที และ (c) ทำการ aging	
ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 1440 นาที.....	28
ภาพที่ 2.19 (ก) ความสัมพันธ์ของความแข็งต่อเวลาในการทำ aging (ข) ความสัมพันธ์ของ	
ปริมาณรูลูรอน ของชิ้นงานโลหะทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก.....	29
ภาพที่ 2.20 ภาพจาก BSE mode (ก) และ EDX Spectrum ที่บริเวณจุด A (ข) ของชิ้น	
ทองแดงดีบุกทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 76 วัน.....	30
ภาพที่ 2.21 ภาพจาก BSE mode ของชิ้นทองแดงดีบุกซึ่งทำการ annealing ที่อุณหภูมิ	
423 K เป็นเวลา 5 ชั่วโมง.....	31
ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดไนไตรต์ของชิ้นงาน Al-2%Mg	
ที่อุณหภูมิ 540°C กับเวลาในการทำไนไตรต์ ที่มีและไม่มีดีบุก.....	32
ภาพที่ 2.23 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Al-2%Mg ซึ่งถ่ายจากกล้อง OM แสดงถึง	
การเกิดเป็นอะลูมิเนียมไนไตรต์ได้อย่างสมบูรณ์.....	32
ภาพที่ 2.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานกรีนของทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก.....	33
ภาพที่ 2.25 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสม A1 (11 wt%Sn) (เย็นตัวในเตา).....	34
ภาพที่ 2.26 (ก) DTA Plots และ (ข) TMA Plots ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุกที่อัตราส่วนดีบุก	
ต่างๆกัน.....	34
ภาพที่ 3.1 Surface Roughness Profile ของชิ้นงานที่เป็น Disc ก่อนทำการทดสอบ	
การสึกหรอ.....	40
ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาผืนที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลาในการคง	
อุณหภูมิ 30 นาที ที่สัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม (ก) 0wt%, (ข) 5wt% และ	
(ค) 10wt%.....	42
ภาพที่ 4.2 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อ	
ความหนาแน่นเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เผาผืนที่	
อุณหภูมิ 900°C.....	44

ภาพที่ 4.3	ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อปริมาณ รูปทรงเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C.....	44
ภาพที่ 4.4	ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อ ความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่ อุณหภูมิ 900°C.....	45
ภาพที่ 4.5	XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที.....	48
ภาพที่ 4.6	XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที.....	48
ภาพที่ 4.7	XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 90 นาที.....	49
ภาพที่ 4.8	แผนภูมิสมดุลง 3 องค์ประกอบของทองแดง กับอะลูมิเนียม ที่ดีบุก 9% โดยน้ำหนัก.....	50
ภาพที่ 4.9	ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงาน 0wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C.....	52
ภาพที่ 4.10	ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงาน 5wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C	52
ภาพที่ 4.11	ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงาน 10wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C.....	53
ภาพที่ 4.12	โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากการกัดด้วยกรดของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที (ก) 0wt%Al (ข) 5wt%Al (ค) 10wt%Al...54	
ภาพที่ 4.13	น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc ของชิ้นงาน 0wt%Al, 5wt%Al และ 10wt%Al ที่เผาผนึกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที.....	55
ภาพที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึก หรอ ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที	55
ภาพที่ 4.15	ภาพถ่ายมหภาคของชิ้นงานที่เป็น Disc ภายหลังจากการทดสอบการสึกหรอ กับชิ้นงานที่เป็น Pin ที่มีสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม (ก) 0wt%, (ข) 5wt% และ (ค) 10wt% ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที.....	57

ภาพที่ 4.16 Surface Roughness Profile ของชิ้นงานที่เป็น Disc ภายหลังจากทดสอบ การสึกหรอกับชิ้นงานที่เป็น Pin ที่มีสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม (ก) 0wt%, (ข) 5wt% และ (ค) 10wt% ตามลำดับ ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที..... 57

ภาพที่ 4.17 XRD Pattern ของเศษที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เผาผนึก ที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที..... 58

ภาพที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C ระยะเวลาในการคง อุณหภูมิ 30 นาที ที่สัดส่วนในการเติมอะลูมิเนียม (ก) 0wt%, (ข) 5wt% และ (ค) 10wt% ตามลำดับ..... 59

ภาพที่ 4.19 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อ ความหนาแน่นเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่ อุณหภูมิ 830°C 61

ภาพที่ 4.20 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อ ปริมาณรูพรุนเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่ อุณหภูมิ 830°C 61

ภาพที่ 4.21 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อ ความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่ อุณหภูมิ 830°C 62

ภาพที่ 4.22 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที..... 64

ภาพที่ 4.23 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 45 นาที..... 64

ภาพที่ 4.24 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที..... 65

ภาพที่ 4.25 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 90 นาที..... 65

ภาพที่ 4.26 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงาน 0wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C..... 67

ภาพที่ 4.27 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงาน 5wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C..... 68

ภาพที่ 4.28 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นใน ชิ้นงาน 10wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C..... 68

ภาพที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากการกัดด้วยกรดของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C (ก) 0wt%Al (ข) 5wt%Al (ค) 10wt%Al	69
ภาพที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในโหมด BSE ของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที.....	70
ภาพที่ 4.31 กราฟ DSC ของผงโลหะทองแดงผสมดีบุก 10wt% ที่ไม่ได้ผสมผงอะลูมิเนียม.....	71
ภาพที่ 4.32 กราฟ DSC ของผงโลหะทองแดงผสมดีบุก ผสมผงอะลูมิเนียม 10wt%.....	71
ภาพที่ 4.33 กราฟ DSC ของผงโลหะทองแดงผสมดีบุก ผสมผงอะลูมิเนียม 50wt%.....	72
ภาพที่ 4.34 น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc ของชิ้นงาน 0wt%Al, 5wt%Al และ 10wt%Al ที่เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที.....	73
ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที.....	74
ภาพที่ 4.36 Profile ของเตาในการทำ Heat Treatment	76
ภาพที่ 4.37 ลักษณะชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียมที่เกิดการเสียรูป (ข) ลักษณะเนื้อพื้นบริเวณที่เกิดการหลอมเหลว (วงกลมเส้นประในภาพที่ 4.37 (ก)) (ค) โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในโหมด SE ของชิ้นงานในตำแหน่งที่ลูกศรชี้ในภาพ 4.37 (ก).....	77
ภาพที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในโหมด BSE ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt%Al เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที ที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานในภาพที่ 4.37 (ก).....	77
ภาพที่ 4.39 XRD Pattern ของชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่ 900°C จากชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที.....	80
ภาพที่ 4.40 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 900°C ของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0 wt% Al).....	81
ภาพที่ 4.41 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 900°C ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5 wt%.....	82

ภาพที่ 4.42 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 900°C ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10 wt%.....	82
ภาพที่ 4.43 รอยกดจากการวัดความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0 wt%Al) (ก) เผาฉีกที่อุณหภูมิ 830°C (ข) เผาฉีกที่อุณหภูมิ 900°C.....	83
ภาพที่ 4.44 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งทำ Heat Treatment ที่ 750°C และเผาฉีกที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่สัดส่วนในการเติมอะลูมิเนียม 0%, 5% และ 10% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ.....	84
ภาพที่ 4.45 XRD Pattern ของชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่ 750°C จากชิ้นงานที่เผาฉีกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที.....	85
ภาพที่ 4.46 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 750°C ของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0 wt% Al).....	87
ภาพที่ 4.47 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 750°C ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5 wt%.....	87
ภาพที่ 4.48 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 750°C ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10 wt%.....	88
ภาพที่ 4.49 น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc ของชิ้นงาน 0%Al, 5%Al และ 10%Al ซึ่งผ่านการเผาฉีกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่ผ่านการทำการชุบแข็งตกตะกอนที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที.....	89
ภาพที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงาน 0%Al, 5%Al และ 10%Al ซึ่งผ่านการเผาฉีกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่ทำการชุบแข็งตกตะกอนที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที.....	90
ภาพที่ 4.51 XRD Patterns ของเศษที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เผาฉีกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ซึ่งผ่านการชุบแข็ง.....	88
ภาพที่ 4.52 น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc ของชิ้นงาน 0%Al, 5%Al และ 10%Al ที่เผาฉีกที่ 830°C, 900°C และชิ้นงานที่ทำการ Heat Treatment ที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที.....	91

ภาพที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการลื่น
หรถ ของชิ้นงาน 0%Al ที่เผาผนึกที่ 830°C, 900°C และชิ้นงานที่ทำการ
Heat Treatment ที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที..... 92

ภาพที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการลื่น
หรถ ของชิ้นงาน 5%Al ที่เผาผนึกที่ 830°C, 900°C และชิ้นงานที่ทำการ
Heat Treatment ที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที..... 92

ภาพที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการลื่น
หรถ ของชิ้นงาน 10%Al ที่เผาผนึกที่ 830°C, 900°C และชิ้นงานที่ทำการ
Heat Treatment ที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที..... 91

ภาพที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C ที่ไม่ได้ผสม
ผงอะลูมิเนียม (0wt%Al) ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 45 นาที,
(ค) 60 นาที และ (ง) 90 นาที..... 100

ภาพที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C ที่ผสมผงอะลูมิเนียม
5wt% ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 45 นาที, (ค) 60 นาที และ
(ง) 90 นาที..... 101

ภาพที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C ที่ผสมผงอะลูมิเนียม
10wt% ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 45 นาที, (ค) 60 นาที และ
(ง) 90 นาที..... 102

ภาพที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C ที่ไม่ได้ผสม
ผงอะลูมิเนียม (0wt%Al) ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 30 นาที,
(ค) 45 นาที และ (ง) 90 นาที..... 103

ภาพที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C ที่ผสมผงอะลูมิเนียม
5wt% ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 45 นาที และ
(ง) 90 นาที..... 104

ภาพที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C ที่ผสมผงอะลูมิเนียม
10wt% ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 45 นาที และ
(ง) 90 นาที..... 105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

ชิ้นงานที่มีรูพรุน (Porous Parts) สามารถแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้เป็น 2 ประเภท คือ ตัวกรอง (Filters) และ แบริ่งหล่อลื่นตัวเอง (Self-Lubricating Bearing) โดยวัสดุตั้งต้นในการผลิต อาจจะใช้ได้ทั้ง แก้ว (Glass) เซรามิก (Ceramics) และ วัสดุที่เป็นโลหะ (Metallic Materials) เช่น ผงโลหะ

อย่างไรก็ดี ผงโลหะที่ผ่านการเผาผนึก (Sintered Metal Powder) เป็นวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้น ในการผลิตที่มีประสิทธิภาพที่สุด ในแง่ของการที่สามารถออกแบบได้หลากหลาย และยังมี ความแข็งแรงสูง มีความต้านทานต่อความร้อนและการกัดกร่อน มีความคงทน และสามารถควบคุม ปริมาณรูพรุน และการซึมผ่านได้ดี

แบริ่งหล่อลื่นตัวเอง เป็นหนึ่งในการใช้งานที่เก่าแก่ที่สุดในด้านอุตสาหกรรม ของชิ้นงานที่มีรูพรุนซึ่งผลิตจากกระบวนการโลหะผง นับตั้งแต่กลางปี ค.ศ.1920 จนถึงในปัจจุบัน ก็ยังมีขีดความสามารถผลิตสูงอยู่ ซึ่งข้อได้เปรียบหลักของแบริ่งที่มีรูพรุน ก็คือ รูพรุนที่มีอยู่ในแบริ่งจะทำหน้าที่เป็น เสมือนแหล่งเก็บกักน้ำมัน (Oil reservoir) โดยที่รูพรุนที่มีปริมาณประมาณ 25 vol% จะถูกเติม ด้วย น้ำมันสำหรับหล่อลื่น ซึ่งในระหว่างการใช้งาน แบริ่งจะเกิดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำมันหล่อลื่นเคลื่อนที่ออกจากรูพรุน และเกิดการหล่อลื่นขึ้น

โลหะที่นิยมใช้ทำแบริ่งหล่อลื่นตัวเอง ได้แก่ โลหะผสมทองแดง (Copper Alloy) เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) นิกเคิล (Nickel) และโลหะผสมนิกเคิล (Nickel Alloy) และโลหะอื่นๆ เช่น ไทเทเนียม อลูมิเนียม ทองแดง แพลตินัม เหล็ก ฯลฯ

จากที่กล่าวมาข้างต้น ในขณะที่ใช้งานแบริ่งหล่อลื่นตัวเอง แบริ่งจะได้รับแรงเสียดทานอยู่ตลอดเวลา แม้จะมีการหล่อลื่นจากน้ำมันหล่อลื่นอยู่ตลอดก็ตาม ดังนั้น การปรับปรุงให้แบริ่งมีการ สึกหรอน้อยลง โดยการทำให้แบริ่งมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง จากการเติมธาตุผสมลงในแบริ่ง ทองแดงผสมดีบุก จะทำให้แบริ่งมีอายุการใช้งานที่ยืนยาวขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

1.21 ศึกษาผลของอัตราส่วนการเติม ผงอะลูมิเนียม (Al) ที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก

1.22 ศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาในการคงอุณหภูมิ ที่ใช้ในการเผาผนึกชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก เมื่อเติมผงอะลูมิเนียม

1.23 ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก เมื่อเติมผงอะลูมิเนียม

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ผลิตชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก จากกระบวนการโลหะผง โดยเติมผงอะลูมิเนียมเป็นสัดส่วน 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C และ 900°C ที่ช่วงเวลาในการคงอุณหภูมิ 5, 30, 45, 60 และ 90 นาที

1.3.2 ศึกษาโครงสร้างจุลภาค และชนิดของสารประกอบหลังจากการเผาผนึกสำหรับอัตราส่วนผสมของ ผงอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิในการเผาผนึก และเวลาที่คงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

1.3.3 ศึกษาการอบชุบความร้อนด้วยการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 750°C และ 900°C ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก

1.3.4 ศึกษาความต้านทานการสึกหรอของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก โดยวิธี Pin-on-Disc ที่ความเร็วเชิงเส้น 0.63 เซนติเมตร/วินาที แรงกด 10 นิวตัน ระยะทางในการเคลื่อนที่ 5000 เมตร โดยใช้ความความถี่ในการหมุน 200 รอบ/นาที เมื่อเติมผงอะลูมิเนียมที่สัดส่วนต่าง ๆ กัน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงผลของสัดส่วนในการเติม ผงอะลูมิเนียม ที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก

1.4.2 ทราบถึงผลของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการคงอุณหภูมิ ต่อชนิดของสารประกอบที่เกิดขึ้นหลังการเผาผนึก

1.4.3 ทราบถึงผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการชุบแข็งที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก

1.4.4 สามารถนำข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพิจารณาสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม และทราบสภาวะในการเผาผนึก ที่เหมาะสม ในการผลิตชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก

บทที่ 2

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 โลหะวิทยาของทองแดงและโลหะผสมทองแดง (Copper-base alloy) [1]

ทองแดงจัดว่าเป็นโลหะที่มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์ต่ำ แม้จะมีความเหนียวสูงก็ตาม การใช้งานของทองแดงจึงมีขอบเขตจำกัดอยู่เฉพาะกรณีเท่านั้น การปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของทองแดง กระทำได้หลายวิธี เช่น การขึ้นรูปเย็น (Cold-working) การเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีการจัดเรียงตัวของอะตอม (Ordering Hardening) การเพิ่มความแข็งแรงด้วยกรรมวิธีชุบแข็งตกตะกอน (Precipitation Hardening) และการทำสารละลายของแข็ง (Solid-solution Formation) ซึ่งแต่ละวิธีจะสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับทองแดงได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีเฉพาะ และการผสมธาตุต่างๆ แต่วิธีทำสารละลายของแข็งโดยการผสมธาตุต่างๆลงไปในทองแดงเป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่นๆ การจัดกลุ่มของโลหะผสมทองแดงมีการแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม และบางกลุ่มก็ยังคงแยกย่อยออกไปอีก ดังนี้

กลุ่มที่ 1 ได้แก่ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับสังกะสี ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ทองเหลือง (Brasses) แบ่งย่อยออกไปตามโครงสร้างจุลภาค ดังนี้

2.1.1.1 ทองเหลืองแอลฟา (α -Brass) ผสมสังกะสีสูงถึง 36 % แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย 2 กลุ่ม คือ ทองเหลือง Yellow Alpha ผสมสังกะสี 20 – 35 % และทองเหลือง Red brass ผสมสังกะสี 5 – 20 %

2.1.1.2 ทองเหลืองแอลฟา-เบต้า ($\alpha - \beta$) ผสมสังกะสี 38 – 46 %

กลุ่มที่ 2 ได้แก่ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับธาตุอื่นๆ เช่น ดีบุก ซิลิคอน อะลูมิเนียม และเบริลเลียม แบ่งออกไปหลายประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุผสม เช่น

2.1.2.1 บรอนซ์ดีบุก

2.1.2.2 บรอนซ์อะลูมิเนียม

2.1.2.3 บรอนซ์ซิลิคอน

2.1.2.4 บรอนซ์เบริลเลียม

กลุ่มที่ 3 ได้แก่ โลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล เรียกชื่อโลหะผสมกลุ่มนี้ว่า

Cupro-Nickels

กลุ่มที่ 4 ได้แก่ โลหะผสมระหว่างทองแดง นิกเกิล สังกะสี เรียกชื่อโลหะผสมกลุ่มนี้ว่า Nickel silver หรือ German silver

2.1.2 บรอนซ์ดีบุก (Tin Bronzes)

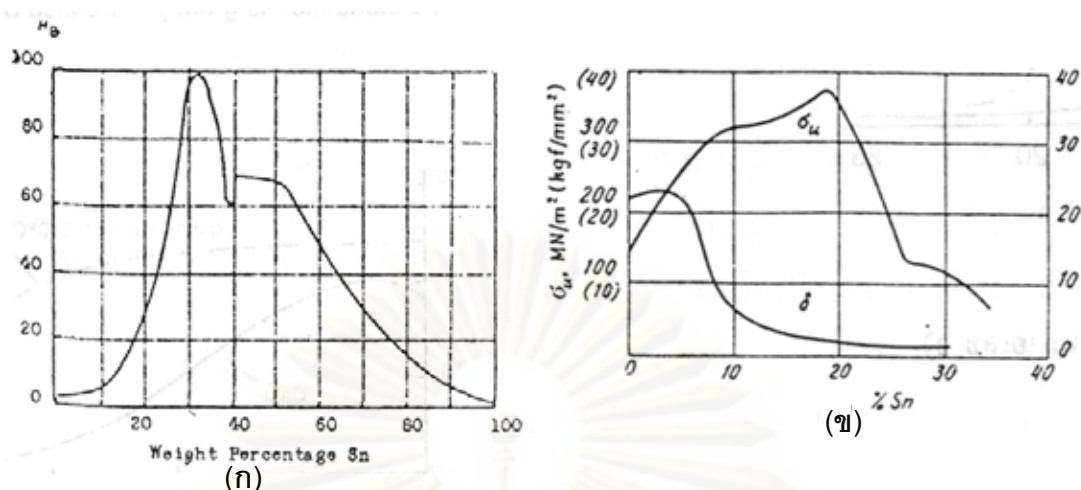
คำว่า บรอนซ์ (Bronze) โดยทั่วไปจะหมายถึง โลหะผสมระหว่างทองแดงกับโลหะอื่นๆ นอกจากสังกะสี แต่มักจะเข้าใจกันว่าหมายถึง โลหะผสมระหว่างทองแดงกับดีบุก ซึ่งเป็นโลหะทองแดงผสมประเภทแรกที่มนุษย์เริ่มรู้จักวิธีการหล่อหลอมและนำมาใช้ประโยชน์ จนกล่าวได้ว่าเป็นยุคบรอนซ์ จากหลักฐานทางประวัติศาสตร์พบโลหะบรอนซ์ถูกนำมาใช้งานได้ประมาณ 4000 ปีมาแล้ว โดยพบบรอนซ์มีดีบุกผสมอยู่ประมาณ 10 % โดยน้ำหนัก

บรอนซ์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ บรอนซ์ดีบุกเป็นหลัก และบรอนซ์ที่ปราศจากดีบุก (Tin-less Bronze) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะลักษณะของบรอนซ์ดีบุกก่อน การใช้งานของบรอนซ์ดีบุกมีทั้งในสภาพหล่อ (Casting) และในสภาพรีดเป็นแท่งและแผ่น (Wrought form)

2.1.2.1 สมบัติเชิงกลของบรอนซ์ดีบุก

ดีบุกเมื่อละลายในทองแดงในสภาพสารละลายของแข็ง (α) มีผลทำให้ความแข็งแรงของทองแดงที่มีดีบุกละลายเพิ่มขึ้นมาก แต่เมื่อเลยขอบเขตที่ดีบุกจะละลายได้ในสภาพสารละลายของแข็งจะเกิดเฟสที่เป็นสารประกอบระหว่างทองแดงกับดีบุกขึ้น ซึ่งเป็นเฟสที่มีความแข็งและเปราะ แตกหักได้ง่าย ความแข็งแรงของโลหะผสมทองแดงกับดีบุกจะลดลงอย่างรวดเร็วตามปริมาณของดีบุกที่เพิ่มขึ้น ความแข็งหรือความเค้นแรงดึงจะมีค่าสูงสุดในสภาพภายหลังกการหล่อ เมื่อผสมดีบุกประมาณ 18 %

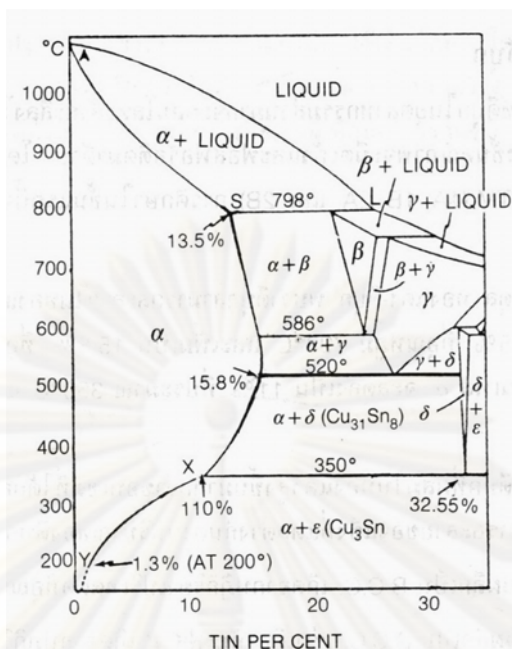
สำหรับสมบัติด้านความเหนียว ซึ่งวัดในลักษณะเป็นอัตราการยืดตัว (% Elongation) ปรากฏว่าจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อผสมดีบุกระหว่าง 4 – 5 % จากนั้นเมื่อปริมาณของดีบุกเพิ่มขึ้นความเหนียวของโลหะผสมทองแดงกับดีบุกจะลดลงอย่างรวดเร็ว ในส่วนของความแข็งพบว่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของดีบุกที่ผสม และจะเพิ่มขึ้นสูงสุดเมื่อผสมดีบุกประมาณ 30 % จากนั้นความแข็งกลับลดลงตามปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้น ดังสามารถได้ในภาพที่ 2.1 (ก) และ (ข)



ภาพที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของสมบัติทางกล กับปริมาณดีบุก ของ Cast Bronze (ก) ความแข็ง (ข) ความแข็งแรง [1]

2.1.2.2 โลหิตยาของบรอนซ์ดีบุก

จากแผนภูมิสมดุลทองแดง-ดีบุก ดังภาพที่ 2.2 พบว่าดีบุกสามารถละลายในทองแดงให้สารละลายของแข็งแอลฟา ได้ปริมาณสูงสุด 13.5 % ที่อุณหภูมิ 798°C และเพิ่มเป็น 15.8 % ที่อุณหภูมิ 586°C จากนั้นอัตราการละลายของดีบุกในเฟสแอลฟา จะลดลงเป็น 11 % ที่ประมาณ 350°C และลดลงอีกเหลือ 1.2 % ที่อุณหภูมิ 200°C ถ้าปริมาณดีบุกที่ผสมในทองแดงเพิ่มขึ้นมากกว่าขอบเขตที่ได้กล่าวมาแล้ว ปรากฏว่าดีบุกจะละลายในทองแดงให้เฟสสารละลายของแข็งที่แตกต่างกันตามปริมาณของดีบุกและอุณหภูมิ ซึ่งเฟสต่างๆที่ปรากฏนอกเหนือจากเฟสแอลฟา จะมีความแข็งสูงและความเหนียวจะลดลง สังเกตได้ว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 350°C บรอนซ์ดีบุกจะให้เฟสผสมระหว่างแอลฟา และ อีพิซิลอน ซึ่งเป็นคุณลักษณะส่วนหนึ่งที่บรอนซ์ดีบุกใช้ประโยชน์ได้ดีในการทำโลหะแบริง เพราะเนื้อโลหะบรอนซ์จะประกอบด้วยเฟสแอลฟา ที่มีความเหนียว มีความแข็งแรงอยู่ในเกณฑ์สูงรับแรงกดได้ดี ส่วนเฟสอีพิซิลอน มีความแข็งสูงและมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำเป็นส่วนช่วยรับแรงเสียดทานได้เป็นอย่างดี



ภาพที่ 2.2 แผนภูมิสมดุล 2 องค์ประกอบของทองแดง-ดีบุก [1]

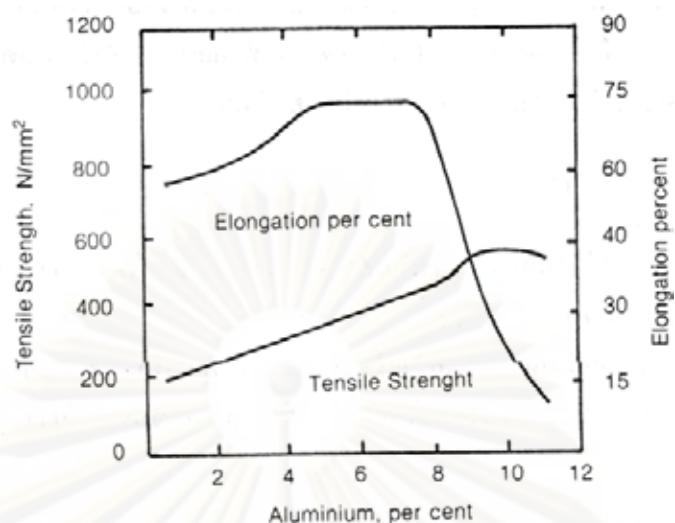
2.1.3 บรอนซ์อะลูมิเนียม (Aluminium Bronze)

2.1.3.1 สมบัติเชิงกลของบรอนซ์อะลูมิเนียม

บรอนซ์อะลูมิเนียมเป็นโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอะลูมิเนียม ที่มีคุณสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์สูงของกลุ่มบรอนซ์ กล่าวคือ มีความแข็งแรง ความแข็ง และความเหนียวสูง นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติต้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีทั้งที่อุณหภูมิปกติ และอุณหภูมิสูงถึง 400°C สามารถทำการชุบแข็ง และอบคืนตัวได้ในลักษณะเดียวกับเหล็กกล้าคาร์บอนด้วยคุณสมบัติเด่นเช่นนี้จึงทำให้บรอนซ์อะลูมิเนียมเป็นที่นิยมแพร่หลายในงานวิศวกรรมหลายๆด้าน เช่น ใช้ทำ Bearing Gear Worm wheel impeller ฯลฯ

อะลูมิเนียมมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสม โดยมีบทบาทเพิ่มความเค้นแรงดึงให้สูงขึ้น และอัตราการยืดตัวให้สูงขึ้น และถึงสูงที่สุดประมาณ 8 % จากนั้นจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียม ดังแสดงในภาพที่ 2.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

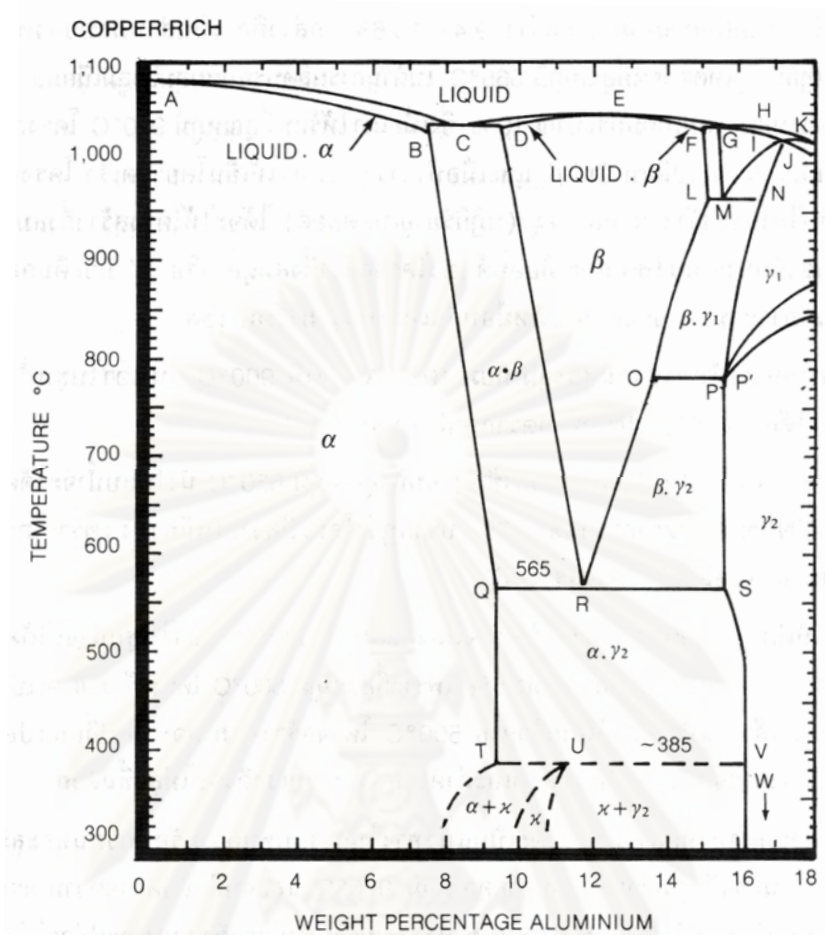


ภาพที่ 2.3 ผลกระทบของส่วนผสมต่อคุณสมบัติเชิงกลของโลหะผสมทองแดง-อะลูมิเนียม [1]

2.1.3.2 โลหวิทยาของอะลูมิเนียมบรอนซ์

จากแผนภูมิสมดุลที่แสดงดังในภาพที่ 2.4 ซึ่งตัดเฉพาะทางด้านของทองแดง และมีอะลูมิเนียมผสมแค่ 18 % จะเห็นลักษณะของเส้น Liquidus และ Solidus ที่แคบมาก จนเกือบจะติดเป็นเส้นเดียวกัน โดยเฉพาะเมื่ออะลูมิเนียมผสมอยู่มากกว่า 8 % หรือส่วนผสมที่ละลายจุดยูเทคติก (8.5 %Al) ไปแล้ว อะลูมิเนียมสามารถละลายในทองแดง และให้สารละลายของแข็งที่เรียกว่า แอลฟา (α) ซึ่งมีระบบผลึกเป็น FCC เป็นลักษณะโครงสร้างที่มีความเหนียวสูง เฟสแอลฟาจะมีอะลูมิเนียมละลายได้สูง 7.5 % ที่อุณหภูมิ 1037°C และจะเพิ่มเป็น 9.4 % ที่อุณหภูมิ 565°C

โครงสร้างเบต้า (β) เป็นสารละลายของแข็งอีกชนิดหนึ่ง ระหว่างทองแดงและอะลูมิเนียมมีระบบผลึกเป็น BCC เป็นลักษณะโครงสร้างที่มีความแข็งกว่าแอลฟา โครงสร้างเบต้าจะเกิดที่อุณหภูมิ 1037°C โดยเกิดจากปฏิกิริยายูเทคติกของโลหะทองแดง-อะลูมิเนียม หลอมเหลว ที่มีส่วนผสมอะลูมิเนียม 8.5 % แยกตัวให้เฟสแอลฟา (7.5 %Al) และเบต้า (9.5 %Al)



ภาพที่ 2.4 แผนภูมิสมดุล 2 องค์ประกอบของทองแดง-อะลูมิเนียม [1]

2.1.4 แบร็งที่ผลิตจากกระบวนการโลหะผง (P/M Bearing) [2]

เมื่อนับย้อนกลับไปถึงในช่วงกลางของปี 1920 แบร็งหล่อลื่นตัวเอง (Self-Lubricating Bearing) เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่เก่าแก่ที่สุดอย่างหนึ่ง และยังคงมีปริมาณการผลิตสูงที่สุดในอุตสาหกรรมโลหะผง (P/M Industries) ในปัจจุบัน ซึ่งข้อดีอย่างหนึ่งของแบร็งที่มีรูพรุน (Porous Bearing) ก็คือการที่มีรูพรุนจะทำหน้าที่เป็นเสมือนแหล่งเก็บกักน้ำมัน โดยรูพรุนนี้จะถูกเติมด้วยน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งมีปริมาณประมาณ 25 vol% ของวัสดุ

เมื่อแกนเพลลา (Journal) ที่อยู่ในแบร็งแบบหล่อลื่นตัวเองที่ถูกอัดน้ำมันแล้ว (Oil Impregnated) เริ่มการทำงานขึ้น แรงเสียดทานก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น น้ำมันจะไหลออกมาเนื่องจากความแตกต่างระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) ของน้ำมันกับโลหะ และเนื่องมาจากความแตกต่างของความดัน

Hydrodynamic ในชั้นฟิล์มน้ำมัน ที่อยู่ระหว่างเพลลาและแบริง เมื่อเพลลาหยุดหมุน และแบริงเย็นลง น้ำมันจะถูกดูดกลับไปโดยปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็ก (Capillary Action)

สำหรับแบริงหล่อลื่นได้เองส่วนใหญ่ สารหล่อลื่นจะยังคงอยู่ในรูปพุนไปตลอดอายุการใช้งานของแบริง สำหรับการใช้งานหนักบางอย่าง อาจจะมีแหล่งเก็บกักน้ำมันหล่อลื่น (Oil Reservoir) อยู่บริเวณผิวนอกของแบริง ภาพแสดงตัวอย่างโดยทั่วไปของแบริงที่มีรูปพุน และรูปร่างโดยทั่วไปของแบริงถูกแสดงในภาพที่ 2.5

นับตั้งแต่เริ่มมีการใช้งานแบริงทองแดงผสมดีบุกที่มีรูปพุน จนการใช้งานเริ่มมากขึ้นๆ ทำให้ชิ้นส่วนที่หล่อลื่นได้เองที่ผลิตจากโลหะผสมสามารถพบได้ในชิ้นส่วนทุกๆชิ้นที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน ตัวอย่างการใช้งานอย่างกว้างขวางของแบริงที่ทำจากโลหะผสม แสดงได้ดังตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.5 รูปร่างโดยทั่วไปของแบริง [2]

ตารางที่ 2.1 อุตสาหกรรมต่างๆที่ผลิตแบริงและตัวอย่างการนำไปใช้งาน

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการนำไปใช้งาน
1. ชิ้นส่วนยานยนต์	Heater Motors, Window lift motor, Air Conditioners, Winshield wipper motors, Power Antenna motors, Trunk Closing motors, Seat Adjusting motors, Tape desk motors
2. เครื่องมือช่าง	Drills, Recipocating Saw, Jig saw, Sander
3. เครื่องใช้ภายในบ้าน	Wahers, Dryers, Refrigerators, Blenders, Mixers, Food processors, Fans, Clocks
4. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	Phonograph, High-fidelity equipment, Stereo equipment, Tape players, Video recorders

อุตสาหกรรม	ตัวอย่างการนำไปใช้งาน
5. อุปกรณ์สำนักงาน	Typewriters, Computers, Copiers
6. เครื่องจักรกลทางการเกษตร	Tractors, Combines, Cotton pickers, Lawn mowers, String cutter, Chain saws
7. อุปกรณ์การเดินเรือ	Outboard motors

2.1.5 องค์ประกอบของแบริง (Bearing Compositions)

แบริงหล่อขึ้นได้เองที่มีรูพรุน (Porous Self-Lubricating Bearing) ถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ แบริงทองแดงผสมดีบุก (Sintered Bronze Bearing) แบริงที่มีเหล็กเป็นวัสดุหลัก (Iron-base Sintered Bearing) และ แบริงผสม เหล็ก-ทองแดงผสมดีบุก (Iron-bronze Sintered Bearing) ซึ่งกลุ่มที่ใช้กันอย่างกว้างขวางก็คือ ทองแดงผสมดีบุกที่มีส่วนผสม 90%Cu-10%Sn โดยอาจจะเติมแกรไฟต์ (Graphite) หรือไม่เติมก็ได้

ทองแดงผสมดีบุกที่มีส่วนผสม 90%Cu-10%Sn มีสมบัติที่ดีเยี่ยมเมื่อเปรียบเทียบกับอีก 2 กลุ่มที่เหลือ คือทั้งมีราคาต้นทุนต่ำ และสามารถใช้งานในสภาวะที่รุนแรงได้

2.1.5.1 แบริงทองแดงผสมดีบุก (Sintered Bronze Bearing)

เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM B438 มีองค์ประกอบหลัก คือ ทองแดง ดีบุก ตะกั่ว และแกรไฟต์ แบริงกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 2 เกรดย่อยๆ คือ Plain Bronze และ Leaded Bronze สามารถแสดงดังตารางที่ 2.2 และในแต่ละเกรดมี 2 คลาส คือ ไม่มีแกรไฟต์ (คลาส A) และ มีแกรไฟต์ (คลาส B) และแต่ละเกรดและคลาส มี 4 ประเภท ซึ่งแบ่งตามช่วงของความหนาแน่น

ตารางที่ 2.2 ประเภทและช่วงความหนาแน่นของแบริงทองแดงผสมดีบุก

ประเภท	ความหนาแน่น (g/cm ³)
1	5.8 - 6.2
2	6.4 - 6.8
3	6.8 - 7.2
4	7.2 - 7.6

โดยที่ความหนาแน่นที่มากที่สุดของประเภทที่ 1 คือ 6.2 g/cm^3 มีปริมาณน้ำมันหล่อลื่น 27% แบริ่งที่เหมาะสมต่อการใช้งานจะผลิตอยู่ระหว่างประเภทที่ 1 และ 2 โดยปริมาณน้ำมันโดยทั่วไปของแบริ่งทองแดงผสมดีบุก แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปริมาณน้ำมันโดยทั่วไปของแบริ่งทองแดงผสมดีบุก

ประเภท	ปริมาณน้ำมัน Vol%
1	27
2	19
3	12
4	8

2.1.5.2 แบริ่งที่มีเหล็กเป็นวัสดุหลัก (Iron-based Sintered Bronze Bearing)

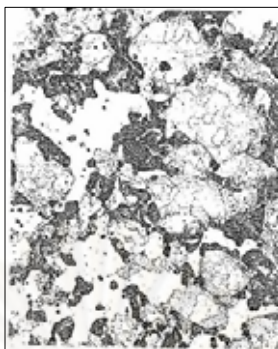
เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM B439 ประกอบด้วย แบริ่งที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเหล็ก 4 เกรด โดยที่เกรด 1 และ 2 เป็นโลหะผสมเหล็ก-คาร์บอน ส่วนเกรด 3 และ 4 เป็น โลหะผสมเหล็ก-ทองแดง ความหนาแน่นและปริมาณน้ำมันของแต่ละเกรดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความหนาแน่นและปริมาณน้ำมันของแต่ละเกรดของแบริ่งที่มีเหล็กเป็นวัสดุหลัก

เกรด	ความหนาแน่น g/cm^3		ปริมาณน้ำมัน Vol%
	Max	Min	
1 และ 2	5.7	6.1	20
3 และ 4	5.8	6.2	19

2.1.5.3 แบริ่งผสม เหล็ก-ทองแดงผสมดีบุก (Iron-Bronze Sintered Bearing)

เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM B612 มีองค์ประกอบของ ทองแดง ดีบุก และแกรไฟต์ โดยมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Diluted Bronze โครงสร้างจุลภาคของ Diluted Bronze แสดงดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างจุลภาคของ Diluted Bronze [2]

Diluted Bronze มีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $6.0 - 6.4 \text{ g/cm}^3$ ในขณะที่ปริมาณน้ำมันจะต้องไม่น้อยกว่า 18% และองค์ประกอบทางเคมีแสดงได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ธาตุองค์ประกอบและร้อยละของแต่ละองค์ประกอบของแบริงผสม เหล็ก-ทองแดงผสมดีบุก

ธาตุองค์ประกอบ	ร้อยละขององค์ประกอบ
คอปเปอร์ + ดีบุก	38 - 44
คาร์บอนโดยรวม	0.5 - 1.3
คาร์บอนที่เกิดการรวมตัวกับธาตุอื่น	0.5 max
เหล็ก	53.5 - 59.5
ธาตุอื่นๆ	1.25 max

2.1.6 การผสมผง (Blending and mixing)

ตามปกติการผสมผงที่มีลักษณะเล็กละเอียดจะทำในเครื่องผสมแบบ Double-Cone โดยที่ในกระบวนการผสมผงทองแดงผสมดีบุก จะใช้ผงจากกระบวนการ Electrolytic reduction หรือ Atomization และผงแกรไฟต์จากธรรมชาติ การกระจายตัว (Particle Size Distribution) ของขนาดของผงทองแดงอยู่ที่ 100% - 100 mesh และ 40 - 70 % - 325 mesh สำหรับผงดีบุกอยู่ที่ 95 % - 325 mesh นอกจากผงโลหะแล้วจะเติมผงของสารหล่อลื่น เช่น Stearic Acid Zinc Stearate หรือ Acrawax ซึ่งสารหล่อลื่นเหล่านี้จะถูกเผาไหม้ไปในระหว่างการเผาขึ้น

การผสมผงที่เป็นธาตุบริสุทธิ์ (Elemental Powder) หรือผงโลหะผสม (Pre-alloyed Powder) จะผสมในระยะเวลาที่มากพอที่จะทำให้การผสมเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Homogenous)

ในทุกๆ ส่วนผสม และทำให้ความหนาแน่นมีค่าคงที่แน่นอน ซึ่งมีความจำเป็นในขณะที่เติมผงผสมลงในแม่แบบ (Die) จะทำให้ได้ความหนาแน่น ความแข็งแรง ที่สม่ำเสมอ และสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงาน ในระหว่างการเผาผนึกได้ดี เนื่องมาจากการหลอมตัว และการแพร่ที่สม่ำเสมอของธาตุองค์ประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ อย่างเช่น ดีบุก ในทองแดงผสมดีบุก หรือ ทองแดงในโลหะผสมที่มีเหล็กเป็นวัสดุหลัก

2.1.7 การอัดขึ้นรูป (Compacting)

ส่วนผสมที่ผสมจนเข้ากันแล้วจะถูกนำไปอัดขึ้นรูป (Compacting) โดยวิธีการทางกล (Mechanical) หรือด้วยความดันไฮดรอลิก โดยทำการบรรจุผงโดยแรงโน้มถ่วง อาจมีการใช้การสั่นผง (Vibration) ร่วมด้วย ลงในโพรงของแม่แบบ และหลังจากนั้นผงจะถูกอัดจนมีรูปร่าง และความหนาแน่นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไป ความดันที่ใช้ในการอัดผงสำหรับส่วนผสมโดยทั่วไปคือ 138 – 413 MPa ความหนาแน่นของชิ้นงานกรีน (Green Compact) โดยแม่แบบจะถูกทำให้มีขนาดใหญ่กว่าขนาดจริงตั้งแต่ 1 – 5 เท่า สำหรับการหดตัวภายหลังการเผา

เครื่องมือที่ใช้การอัดผงเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูง (High Precision Tooling) แม่แบบ และแกนกลาง (Core Pin) จะทำด้วย ทังสเทนคาร์ไบด์ (Tungsten Carbide) ในขณะที่หัวกดด้านบนและด้านล่าง (Upper and Lower Punch) จะทำด้วย เหล็กกล้าเครื่องมือเกรดสูง (High Grade Tool Steel)

2.1.8 การเผาผนึก (Sintering)

เป็นการทำให้ชิ้นงานกรีน เกิดพันธะทางโลหะวิทยา (Metallurgical Bonding) ขึ้น โดยชิ้นงานที่เกิดจากการผสมของธาตุหลัก คือ ทองแดง ดีบุก จะเกิดการแปลงเฟสไปเป็น แอลฟาบรอนซ์ (α -Bronze) ที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของทองแดง แต่สูงกว่าจุดหลอมเหลวของดีบุก ซึ่งการเผาผนึกแบบเฟสของเหลว (Liquid Phase Sintering) นี้จะเกิดขึ้นโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงที่สามารถสังเกตได้

อุณหภูมิที่ใช้การเผาผนึกของทองแดงผสมดีบุก จะใช้ช่วงตั้งแต่ 830 – 900 °C ขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการเผาผนึก ซึ่งโดยปกติจะใช้เวลา 3 – 8 นาที และขนาดของชิ้นงานที่ต้องการ โดยทองแดงผสมดีบุกที่เหมาะสม จะต้องมีการสร้างที่จำเป็น คือ แอลฟาบรอนซ์ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ส่วน Diluted Bronze ใช้อุณหภูมิในการเผาผนึก 870 – 980 °C ในทางตรงกันข้าม แบริง

เหล็ก-ทองแดง จะใช้อุณหภูมิในการเผาผนึกสูงกว่าจุดหลอมเหลวของทองแดง โดยปกติจะใช้ตั้งแต่ 1105 – 1125 °C



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างจุลภาคของสารละลายของแข็งแอลฟาบรอนซ์ (150 X) [2]

2.1.9 การเผาผนึกแบบเฟสของเหลว (Liquid Phase Sintering)

ในระบบที่มีส่วนผสมของผงหลายชนิด อาจเกิดเฟสของเหลว (Liquid Phase) ได้ เนื่องจาก ความแตกต่างระหว่างช่วงของการหลอมเหลวของแต่ละองค์ประกอบ ระบบที่มีการใช้การเผาผนึกแบบเฟสของเหลวได้แก่ ทองแดง-โคบอลต์ ทังสเตน-ทองแดง ทองแดง-ดีบุก ทองแดง-ฟอสฟอรัส ฯลฯ

การเผาผนึกแบบเฟสของเหลวนี้ เริ่มต้นจากการให้ความร้อนแก่ผงโลหะแต่ละธาตุแล้ว เมื่อเฟสของเหลวเกิดขึ้น จะเกิดการไหลและเปียกกลบนอนุภาคของแข็ง และเริ่มเกิดปฏิกิริยากับอนุภาคของแข็ง โลหะหลอมเหลวที่แทรกซึมเข้าไประหว่างอนุภาคของแข็งสามารถทำให้เกิดการบวมตัว (Swelling) ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าความหนาแน่นของชิ้นงานกรีนสูง (High Green Density Compact) และอนุภาคมีขนาดใหญ่ (Coarse Particle)

อย่างไรก็ดี ระหว่างที่โลหะหลอมเหลวแทรกซึมอยู่นั้นอาจจะมีการจัดเรียงตัวของอนุภาคใหม่ (Rearrangement) ทั้งการเปียก การไหลของโลหะหลอมเหลว และการเรียงตัวใหม่ของอนุภาคทำให้บางครั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรได้อย่างมาก ถ้าให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ ในขณะที่ยังมีเฟสของเหลวอยู่ ของแข็งก็เริ่มเกิดการละลาย ขึ้นอยู่กับ ขีดจำกัดการละลาย (Solubility Limit) ปริมาณของเฟสของเหลว แผนภูมิสมดุล และองค์ประกอบของโลหะผสม

ตัวอย่างหนึ่งที่ใช้การเผาผนึกแบบเฟสของเหลว ก็คือ การผลิตเบรียงทองแดงผสมดีบุกหล่อลื่นตัวเอง (Self-Lubricating Bronze Bearing) โดยการเผาผนึกแบบเฟสของเหลวจากผงทองแดง และผงดีบุก ในการผลิตเบรียงหล่อลื่นตัวเองนี้จะต้องทำการควบคุมปริมาณรูพรุน ซึ่ง

สามารถทำได้โดยการเลือกขนาดผงโลหะเริ่มต้น (Initial Particle Size) การกระจายตัวของขนาดผงโลหะ (Particle Size Distribution) แรงที่ใช้ในการกดอัดชิ้นงาน (Compacting Pressure) อุณหภูมิในการเผาผนึก (Sintering Temperature) และอัตราการให้ความร้อน (Rate of Heating) ให้เหมาะสม โครงสร้างจุลภาคของแบร็งทองแดงผสมดีบุกที่ผลิตจากการเผาผนึกแบบเฟสของเหลว ซึ่งประกอบด้วยเกรนขนาดใหญ่ ของสารละลายของแข็งแอลฟา ที่สม่ำเสมอ และมีรูพรุนกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างจุลภาคของแบร็งทองแดงผสมดีบุก [2]

2.1.10 การปรับขนาด (Sizing)

แบร็งที่ต้องการความแม่นยำ จะต้องนำมาทำการ ปรับขนาด (Sizing) หลังจากการเผาผนึก โดยเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการปรับขนาด จะเป็นเครื่องมือที่มีผิวเรียบ และมีขนาดที่แม่นยำสูง ในกระบวนการปรับขนาด จะใช้ความดัน ตั้งแต่ 206 – 551 MPa ขึ้นอยู่กับขนาดที่ต้องการปรับ และองค์ประกอบของชิ้นงานที่ผ่านการเผาผนึก อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์หลักของกระบวนการปรับขนาด ก็คือ ปรับปรุงขนาดเท่านั้น ไม่ได้เพิ่มความหนาแน่น

2.1.11 การอัดน้ำมัน (Oil Impregnation)

แบร็งที่ผลิตจากกรรมวิธีโลหะผง จะมีรูพรุนอยู่ประมาณ 20 – 25 % ซึ่งรูพรุนเหล่านี้ประกอบด้วยรูเล็กเชื่อมต่อกัน (Interconnected pores) อยู่ตลอดทั่วทั้งโครงสร้างของแบร็ง และทำตัวเป็นแหล่งเก็บกักสารหล่อลื่น (Oil Reservoir) ซึ่งมีปริมาณเพียงพอต่อการใช้งานตลอดอายุการใช้งานของแบร็ง

รูพรุนเหล่านี้จะถูกอัดน้ำมันเข้าไปภายใต้สภาวะสุญญากาศ (Vacuum) โดยที่แบร็งจะถูกนำวางในถัง (Tank) ซึ่งต่อกับปั๊มดูดอากาศ อากาศจะถูกดูดออกจากภายในถัง จนเหลือความดัน

ที่ 709 ทอร์ (28 มม ปรอท) หลังจากนั้นจะปล่อยให้ น้ำมันไหลเข้าไปในถังโดยที่ปั๊มดูดอากาศยังทำงานอยู่ รอจนความลดลงมาที่ 790 ทอร์ อีกครั้ง และปิดปั๊มดูดอากาศ น้ำมันจะถูกอัดเข้าสู่โพรงในชิ้นงานประมาณ 90% ของโพรงทั้งหมด หรือ 20 % ของปริมาตรทั้งหมด และน้ำมันคิดเป็น 2 – 3 % โดยน้ำหนัก

การเลือกใช้สารหล่อลื่นจะพิจารณาจาก คุณสมบัติในการใช้งาน แรงกระทำหรือความดันระหว่างชิ้นส่วนที่กำลังเคลื่อนที่ ความเร็วของชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน ช่องว่างระหว่างชิ้นส่วน และบรรยากาศในการใช้งาน อย่างเช่น คุณสมบัติของอากาศ ฝุ่น และความชื้น

2.1.12 การทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-Disc

2.1.12.1 วิธีในการทดสอบโดยสรุป

2.1.12.1.1 ในการทดสอบการสึกหรอแบบ Pin-on-Disc จะใช้ชิ้นงาน 2 ชิ้น ชิ้นหนึ่งเป็น Pin ถูกวางตั้งฉากกับอีกชิ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น Disc วงกลม โดยเครื่องที่ใช้ในการทำการทดสอบจะทำให้ชิ้นงานที่เป็น Disc หรือ Pin หมุนไปรอบจุดศูนย์กลางของ Disc ซึ่งในแต่ละกรณีเส้นทางในการไถล (Sliding path) จะเป็นวงกลมบนผิวของ Disc โดยระนาบของ Disc อาจะอยู่ในแนวราบ (Horizontal) หรือ ในแนวตั้ง (Vertical) ซึ่งทิศทางของระนาบที่แตกต่างอาจทำให้ผลของการทดสอบต่างกันได้

2.1.12.1.2 ชิ้นงานที่เป็น Pin จะถูกกดกับ Disc ด้วยแรงกด (Load) ค่าหนึ่ง โดยใช้แขน (Arm) หรือคาน (Lever) ซึ่งติดตุ่มน้ำหนักไว้ แต่อาจสามารถใช้วิธีการให้แรงแบบอื่นๆได้ เช่น Hydraulic หรือ Pneumatic ซึ่งวิธีการให้แรงที่ต่างกันอาจทำให้ผลทดสอบที่ได้แตกต่างกัน

2.1.12.1.3 ผลการทดสอบการสึกหรอ (Wear Result) จะรายงานเป็นปริมาตรที่ลดลง (Volume loss) ในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3) สำหรับ Pin และ Disc แยกกัน และในการทดสอบวัสดุที่ต่างกันควรจะสลั้ววัสดุทั้งสองชนิดเป็นทั้ง Pin และ Disc

2.1.12.1.4 ปริมาณที่เกิดการสึกหรอ ถูกคำนวณได้จากการวัดขนาดในหนึ่งมิติ (One dimension) ของชิ้นงานทั้งสองชิ้น ทั้งก่อนและหลังจากการทดสอบ หรือ คำนวณได้จากการชั่งน้ำหนักชิ้นงานทั้งสอง ก่อนและหลังจากการทดสอบ หลังจากนั้นจะถูกคำนวณกลับไปเป็นปริมาตรที่หายไป

2.1.12.1.4 ในการทดสอบจะกำหนดการทดสอบที่ระยะทาง (Sliding Distance) และความเร็ว (speed) กับแรงกดคงที่ ซึ่งตัวอย่างเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6 และ 2.7 ซึ่งสามารถใช้เงื่อนไขอื่นได้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบ

ตารางที่ 2.6 คุณลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอในห้องทดลอง [3]

	Composition (weight%)	Microstructure	Hardness (HV 10)	Roughness ^a	
				R_z (mean) (μm)	R_a (mean) (μm)
Steel ball (100 Cr6) (AISI 52 100) ^b Diameter 10 mm	1.35 to 1.65 Cr ← 0.95 to 1.10 C 0.15 to 0.35 Si 0.25 to 0.45 Mn	martensitic with minor carbides and austenite	838 ± 21	0.100	0.010
Steel disc (100 Cr6) (AISI 52 100) ^c Diameter 40 mm	← <0.030 P ← <0.030 S	martensitic with minor carbides and austenite	852 ± 14	0.952	0.113
Alumina ball, diameter = 10 mm ^d	← 95 % Al ₂ O ₃ (with additives of TiO ₂ , MgO, and ZnO)	equi-granular alpha alumina with very minor secondary phases	1610 ± 101 (HV 0.2)	1.369	0.123
Alumina disc, diameter = 40.6 mm ^d	←		1599 ± 144 (HV 0.2)	0.968	0.041

^a Measured by stylus profilometry. R_z is maximum peak-to-valley roughness. R_a is arithmetic average roughness.

^b Standard ball-bearing balls (SKF).

^c Standard spacers for thrust bearings (INA).

^d Manufactured by Compagnie Industrielle des Ceramiques Electroniques, France.

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างผลที่ได้จากการทดลอง [3]

NOTE 1— See Note 4 in 10.3.1.

NOTE 2—Numbers in parentheses refer to all data received in the tests. In accordance with Practice E 178, outlier data values were identified in some cases and discarded, resulting in the numbers without parentheses. The differences are seen to be small.

NOTE 3—Values preceded by ± are one standard deviation.

NOTE 4—Data were provided by 28 laboratories.

NOTE 5—Calculated quantities (for example, wear volume) are given as mean values only.

NOTE 6—Values labeled "NM" were found to be smaller than the reproducible limit of measurement.

NOTE 7—A similar compilation of test data is given in DIN-50324.

Results (ball) (disk)	Specimen Pairs			
	Steel-steel	Alumina-steel	Steel-alumina	Alumina-alumina
Ball wear scar diameter (mm)	2.11 ± 0.27 (2.11 ± 0.27)	NM	2.08 ± 0.35 (2.03 ± 0.41)	0.3 ± 0.06 (0.3 ± 0.06)
Ball wear volume (10 ⁻³ mm ³)	188 (198)	---	186 (169)	0.08 (0.08)
Number of values	102 (102)	---	60 (64)	56 (59)
Disk wear scar width (mm)	NM	0.04 ± 0.12 (0.64 ± 0.12)	NM	NM
Disk wear volume (10 ⁻³ mm ³)	---	480 (460)	---	---
Number of values	---	60 (60)	---	---
Friction coefficient	0.60 ± 0.11	0.76 ± 0.14	0.60 ± 0.12	0.41 ± 0.08
Number of values	109	75	64	75

^a Test conditions: $F = 10 \text{ N}$; $v = 0.1 \text{ ms}^{-1}$; $T = 23^\circ\text{C}$; relative humidity range 12 to 78 %; laboratory air; sliding distance 1000 m; wear track (nominal) diameter = 32 mm; materials: steel = AISI 52 100; and alumina = $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

2.1.12.1.5 ผลทดสอบการสึกหรออาจจะถูกนำเสนอในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณที่หายไปกับระยะทางที่เคลื่อนที่ไป โดยแต่ละชิ้นงานอาจจะใช้ระยะทางที่ต่างกันก็ได้ ซึ่งกราฟแต่ละเส้นจะมีความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเส้นตรงระหว่างปริมาณที่หายไป กับระยะทางที่เคลื่อนที่ไป ที่ระยะทางค่าหนึ่ง และมีช่วงที่มีความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรง อีกส่วนหนึ่ง ซึ่งการที่มีความสัมพันธ์ที่ แตกต่างกันนั้นเนื่องมาจาก กระบวนการทำให้สึกเข้าที่ (Break-in process) และการเปลี่ยนกลไกเด่นในการการสึกหรอ (Dominant wear mechanism) จากกลไกหนึ่งไปเป็นอีกกลไกหนึ่ง และเหตุผลอื่นๆ เช่น รายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ วัสดุ และเงื่อนไขในการทดสอบ

2.1.12.1.6 ไม่ควรรใช้ข้อมูลที่ได้มาจากการใช้เซนเซอร์วัดตำแหน่ง (Position-Sensing gages) ที่วัดระยะทางในการสึกหรอ (Wear depth) อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากผลของความซับซ้อนของ ผลกระทบของเศษที่เกิดจากการสึกหรอ (Wear Debris) และชั้นของโลหะที่เกิดการ

ลอกติด (Transfer Film) ที่เกิดระหว่างช่องว่างระหว่างชิ้นงานทดสอบ และผลกระทบเนื่องมาจากการขยายตัว หรือหดตัว เนื่องจากความร้อน (Thermal expansion or contraction)

2.1.12.2 ชิ้นงานทดสอบและการเตรียมชิ้นงาน (Test specimen and Sample Preparation)

2.1.12.2.1 วัสดุ (Materials) ในการทดสอบนี้สามารถใช้วัสดุได้หลากหลาย แต่มีข้อกำหนดอยู่เพียงอย่างเดียวคือชิ้นงานต้องมีขนาดที่แน่นอนและสามารถทนความเค้น (Stress) ที่เกิดขึ้น โดยไม่เกิดการโก่งงอ (Excessive Flexure)

2.1.12.2.2 ชิ้นงานทดสอบ (Test Specimen) โดยทั่วไปชิ้นงานที่เป็น Pin จะมีรูปทรงเป็นทรงกระบอก (Cylindrical) หรือ ทรงกลม (Spherical) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2- 10 มม. ส่วนชิ้นงานที่เป็น Disc โดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 30 – 100 มม. และมีความหนาตั้งแต่ 2 – 10 มม. ซึ่งมีติของชิ้นงานที่ใช้กันโดยทั่วไปในการทดสอบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

2.1.12.2.3 ผิวสำเร็จ (Surface Finish) โดยผิวของชิ้นงานทดสอบต้องมีความหยาบผิว (Surface Roughness) วัดด้วยวิธี Arithmetic Average (Ra) ไม่เกิน $0.8 \mu\text{m}$

2.1.12.3 ค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบ (Test Parameters)

2.1.12.3.1 แรงกด หมายถึง ค่าของแรงในหน่วยนิวตัน ณ ผิวสัมผัส

2.1.12.3.2 ความเร็ว หมายถึง เป็นความเร็วสัมพัทธ์ของผิวสัมผัสในหน่วยเมตรต่อวินาที

2.1.12.3.3 ระยะทาง หมายถึง ระยะทางสะสม (Accumulated) ในการเคลื่อนที่

2.1.12.3.4 อุณหภูมิ หมายถึง อุณหภูมิของชิ้นงานใดชิ้นงานหนึ่ง หรือทั้งสองชิ้น ณ จุดที่เกิดการสึกหรอ

2.1.12.3.5 บรรยากาศ หมายถึง บรรยากาศโดยรอบผิวที่เกิดการสึกหรอ เช่น บรรยากาศในห้องทดลอง (Laboratory air) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น อาร์กอน (Ar) สารหล่อลื่น ฯลฯ

2.1.12.4 การคำนวณและการรายงานผล (Calculation and Reporting)

2.1.12.4.1 การวัดการสึกหรอควรจะต้องรายงานเป็นปริมาตรที่หายไปของชิ้นงานทั้งสองชิ้นในหน่วยลูกบาศก์มิลลิเมตร (mm^3)

2.1.12.4.2 การคำนวณปริมาตรที่เกิดการสึกหรอสำหรับ Pin ที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตอื่นๆ ให้ใช้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตที่เหมาะสม และอาจจะมีใช้การประมาณร่วมด้วย

2.1.12.4.3 การวัดรอยที่เกิดจากการสึกหรอควรจะวัดอย่างน้อย 2 ครั้งที่ต่างตำแหน่งกัน บนผิวชิ้นงาน Pin และ Disc แล้วจึงนำผลที่ได้มาเฉลี่ยกัน

2.1.12.4.4 ในกรณีที่เกิดการสึกหรอทั้ง Pin และ Disc อย่างมีนัยสำคัญ ก็จำเป็นต้องวัดความลึกเนื่องจากการสึกหรอบนชิ้นงานทั้งสองชิ้น ซึ่งวิธีที่เหมาะสมคือใช้ Stylus Profile ซึ่งทำให้ทราบสามารถรูปร่างสุดท้ายหลังจากการสึกหรอได้ และจากนั้น ก็จะสามารถคำนวณปริมาตรที่หายไปเนื่องจากการสึกหรอได้

2.1.12.4.5 สมการที่ใช้ในการคำนวณปริมาตรที่หายไป (Volume Loss) จากน้ำหนักที่หายไป (Weight Loss) และความหนาแน่น (Density) แสดงได้ดังสมการที่ 1

$$\text{Volume loss, } mm^3 = \frac{\text{Mass loss, } g}{\text{Density, } \frac{g}{cm^3}} \times 100 \quad \dots (1)$$

2.1.12.4.6 ถ้าวัสดุที่นำมาทดสอบเกิดการลอกติด โดยไม่หายออกไปจากระบบ ปริมาตรที่หายไปจะไม่สามารถแสดงได้ถึงความรุนแรงของการสึกหรอ ถ้าเกิดกรณีในลักษณะนี้ ผลรายงานการทดสอบจะไม่สามารถใช้ได้

2.1.12.4.7 การบ่งชี้ถึงวัสดุที่นำมาทดสอบมีความสำคัญ โดยอย่างน้อยที่สุด ในการรายงาน ควรจะระบุถึง ชนิดของวัสดุ รูปร่างลักษณะ กระบวนการการปรับปรุงคุณสมบัติที่ทำ ผิวสำเร็จ และกระบวนการเตรียมผิว และถ้าจำเป็นก็ให้รายงานความแข็งโดยวิธีให้แรงกด (Indentation Hardness Test) ด้วย

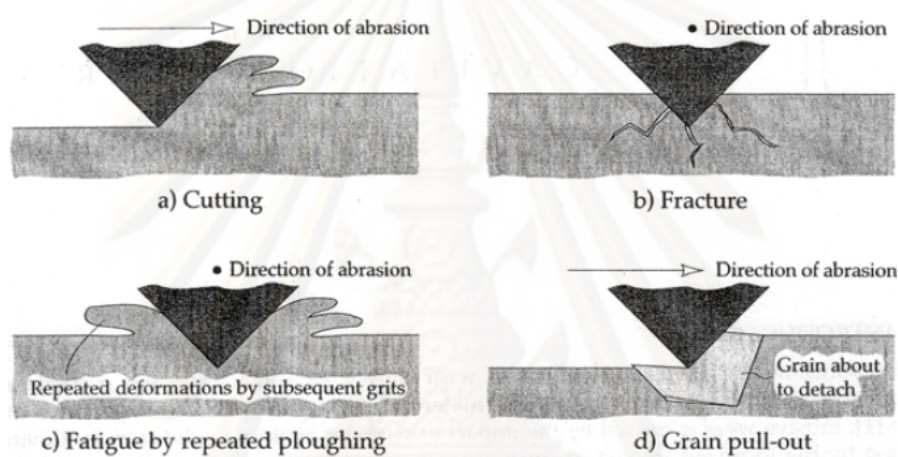
2.1.13 กลไกการสึกหรอแบบต่างๆ (Wear Mechanism)

2.1.13.1 การสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear)

การสึกหรอแบบขัดถู เกิดขึ้นเมื่อวัตถุของแข็ง (Solid Object) ถูกขัดด้วยอนุภาคของวัสดุที่มีความแข็ง (Hardness) เท่ากันหรือมากกว่า ตัวอย่างหนึ่งของการสึกหรอแบบขัดถู ก็คือ บริเวณพื้นของรถดัก (Shovel) ในขณะใช้งาน โดยวัสดุใดๆที่เป็นก้อนปริมาตร (Bulk Material) แม้แต่เป็นวัสดุที่นิ่ม แต่ถ้ามีอนุภาคแข็ง (Hard Particle) ก็สามารถทำให้เกิดการสึกหรอแบบขัดถูได้ เช่น

วัสดุอินทรีย์ อย่างเช่นต้นอ้อย (Sugarcane) จะทำให้เกิดการสึกหรอแบบขีดถู กับใบตัดและเครื่องตัดอ้อย เพราะว่า ซิลิกา (Silica) ที่มีเพียงเล็กน้อยในเส้นใยอ้อย

ความยากลำบากในการป้องกันและควบคุมการสึกหรอแบบขีดถู ก็คือ คำว่า การสึกหรอแบบขีดถู (Abrasive wear) ไม่ได้อธิบายถึงกลไก (Mechanisms) ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดการสึกหรอ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วกลไกการเกิดการสึกหรอแบบขีดถู มีหลายกลไกแตกต่างกันไปตามลักษณะของการเกิดการสึกหรอ จากการตรวจสอบโครงสร้างทางจุลภาค ทำให้ทราบว่าการเกิดการสึกหรอแบบขีดถูมี 4 กลไก คือ Micro-Cutting, Micro-fracture, Grain Pull-out และ Fatigue ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 กลไกของการเกิดการสึกหรอแบบขีดถูแบบต่างๆ [3]

2.1.13.2 การสึกหรอแบบเชื่อมติด (Adhesion Wear)

การสึกหรอแบบเชื่อมติด (Adhesive Wear) เป็นรูปแบบหนึ่งของความสึกหรอที่รุนแรงมาก มีอัตราการสึกหรอ (Wear rate) สูง และมีสัมประสิทธิ์ความเสียหายไม่สม่ำเสมอ โดยการเลื่อนไถล (Sliding) ของแบบริง และแบบริงอาจจะหยุดได้โดยแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก

กลไกการเกิดการสึกหรอแบบเชื่อมติด แบบหนึ่งคือ Metal to Metal Adhesion เกิดขึ้นเมื่อวัตถุ 2 ก้อนสัมผัสกัน (Object Contact) แต่ในบรรยากาศปกติ (Normal Atmosphere) แบบริงจะเกิดชั้นของออกไซด์ กันไม่ให้วัตถุ 2 ก้อนสัมผัสกัน ซึ่งฟิล์มออกไซด์นี้บางมากและไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้น เมื่อปริมาณสารปนเปื้อน (Contamination) ลดลง อย่างเช่น ในสภาวะสุญญากาศ การสึกหรอแบบเกาะติดจะเกิดได้มาก

การเชื่อมติดแบบกลไก Metal to Metal adhesion สามารถอธิบายได้โดย แบบจำลองของ จิลเลียม (Jellium Model) ซึ่งกล่าวไว้ว่า การเกาะติดที่รุนแรงนั้นเกิดมาจาก การที่อิเล็กตรอนเมื่อ

วัตถุทั้งสองเข้าใกล้กันมากกว่า 1 นาโนเมตร และเกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากวัตถุที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (Electron Density) มากกว่า ไปสู่วัตถุที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนต่ำกว่า ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.10



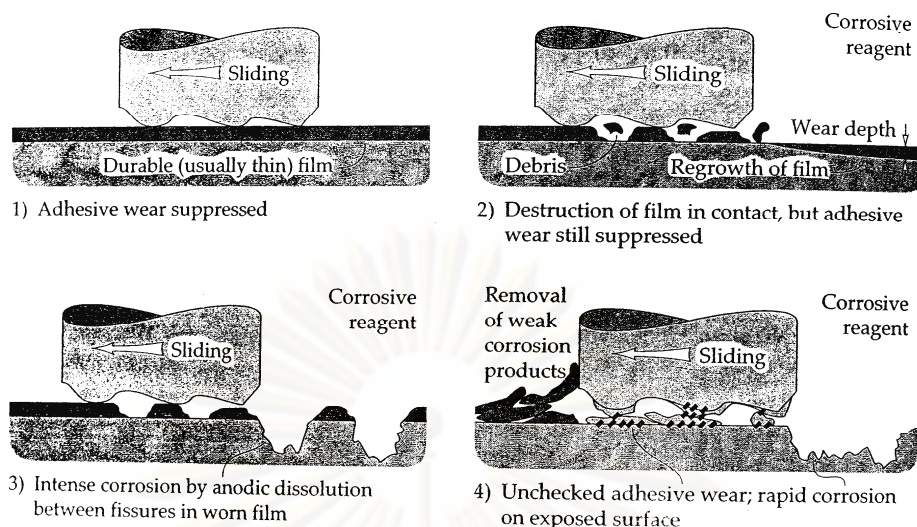
ภาพที่ 2.10 แบบจำลองการเกิดการสีกหรือแบบเชื่อมติดของจิลเลียม (Jellium Model) [3]

2.1.13.3 การสีกหรือแบบกัดกร่อนและแบบเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (Corrosive and Oxidative wear)

การสีกหรือแบบกัดกร่อนและแบบเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งกรณีที่มีการหล่อลื่น (Lubricated) และไม่มีการหล่อลื่น (Unlubricated) สาเหตุหลักของการเกิดการสีกหรือในลักษณะนี้ก็คือการเกิดปฏิกิริยาเคมี ระหว่างเนื้อวัสดุกับสารตัวกลางซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ ซึ่งอาจจะเป็นสารเคมี สารหล่อลื่นที่ไวต่อปฏิกิริยา และแม้แต่อากาศ โดยคำว่า การสีกหรือแบบกัดกร่อน ทั่วไปหมายถึง การสีกหรือใดๆที่เกิดจาก สารเคมี หรือ ขบวนการที่เกิดการกัดกร่อน ในทางตรงกันข้าม การสีกหรือแบบเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน จะหมายถึง การสีกหรือที่เกิดจากออกซิเจนในบรรยากาศ (Atmospheric Oxygen) ซึ่งการสีกหรือทั้งสองแบบนี้มีลักษณะที่น่าแปลกคืออัตราการสีกหรือที่สูงแต่จะเกิดพร้อมๆกันกับการที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง ความแตกต่างกันนี้มีประโยชน์มากในการเป็นตัวบ่งบอกถึงการเกิดการสีกหรือเหล่านี้

2.1.13.3.1 การสีกหรือแบบกัดกร่อน (Corrosive wear)

ถ้าวัสดุที่เป็นโลหะเกิดการกัดกร่อน และเกิดเป็นฟิล์มออกไซด์ แต่ในขณะเดียวกันก็เกิดการไถลด้วย จะเกิดกลไกการสีกหรือแบบกัดกร่อน ได้ 4 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 กลไกการเกิดการสึกหรอแบบกัดกร่อนทั้ง 4 แบบ [3]

ในกลไกแรกจะเกิดฟิล์มที่มีความทนทานและบาง ถ้าเกิดการสร้างฟิล์มเหล่านี้ขึ้นการสึกหรอแบบ Corrosive ก็จะไม่เกิดขึ้น แต่ในความจริงแล้ว มีฟิล์มที่เกิดจากการกัดกร่อนมีน้อยมากที่มีความทนทาน ดังนั้นการเกิดฟิล์มในลักษณะนี้จะไม่พบในความเป็นจริง

ส่วนกลไกแบบที่สองเป็นการเกิดฟิล์มที่แตกหักได้ง่าย ทนต่อการไถลได้น้อย แต่จะเกิดฟิล์มใหม่ขึ้นมา และโตขึ้นมาแทนฟิล์มเดิม ซึ่งการเกิดฟิล์มแบบนี้เป็นแบบที่พบมากที่สุดเนื่องจากฟิล์มที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะประกอบด้วยออกไซด์ที่มีความเปราะ หรือประกอบด้วยสารประกอบไฮดรอกไซด์ ตัวอย่างเช่น ออกไซด์ของเหล็ก จะมีความเปราะมาก

กลไกที่สามเป็นการสึกหรอที่เกิดในสารที่มีการกัดกร่อนสูง ในขณะที่ กลไกที่สี่เกิดเฉพาะในสารที่มีการกัดกร่อนสูงมาก และฟิล์มที่เกิดขึ้นมีความเปราะมากและอาจจะเกิดการละลายได้ในสารกัดกร่อน

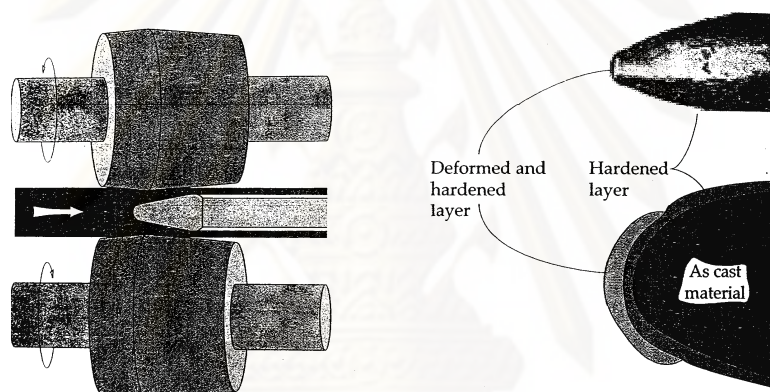
2.1.13.3.2 การสึกหรอแบบเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidative wear)

การสึกหรอแบบทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เป็นการสึกหรอในสภาวะแห้ง และไม่มีการหล่อลื่นของโลหะ และสัมผัสอยู่กับอากาศหรือออกซิเจน โดยออกซิเจนในบรรยากาศทำให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน และอัตราการสึกหรอ ในการไถลแบบแห้ง เกิดการเปลี่ยนแปลง และกลไกในการเกิดการสึกหรอแบบนี้มีหลายกลไก การสึกหรอแบบเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดจากการตั้งสมมุติฐานจากการพบว่าการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเศษที่เกิดจากการสึกหรอในสภาวะแห้งของเหล็กกล้า ภายใต้เงื่อนไขแรงกระทำ และความเร็วในการไถลที่แตกต่างกัน ซึ่ง

พบว่าเมื่อแรงกระทำ และความเร็วในการไถล สูงมากพอที่จะทำให้อุณหภูมิที่จุดสัมผัสสัมผัสที่เกิดแรงเสียดทานเพิ่มสูงขึ้นถึงหลายร้อยองศาเซลเซียส ทำให้โลหะกลายเป็นออกไซด์ของโลหะ

การสึกหรอแบบเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนทำให้มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ค่อนข้างคงที่ในระดับปานกลาง ที่ค่าประมาณ 0.3 – 0.6 เมื่อเปรียบเทียบกับกระผ่นแปรของสัมประสิทธิ์ความเสียดทานในการสึกหรอแบบรุนแรงๆ อื่นๆ คุณลักษณะสำคัญของการสึกหรอแบบนี้ คือเป็นการสึกหรอที่ผิวสึกหรอจะเรียบ และมีเศษออกไซด์จากการสึกหรอ

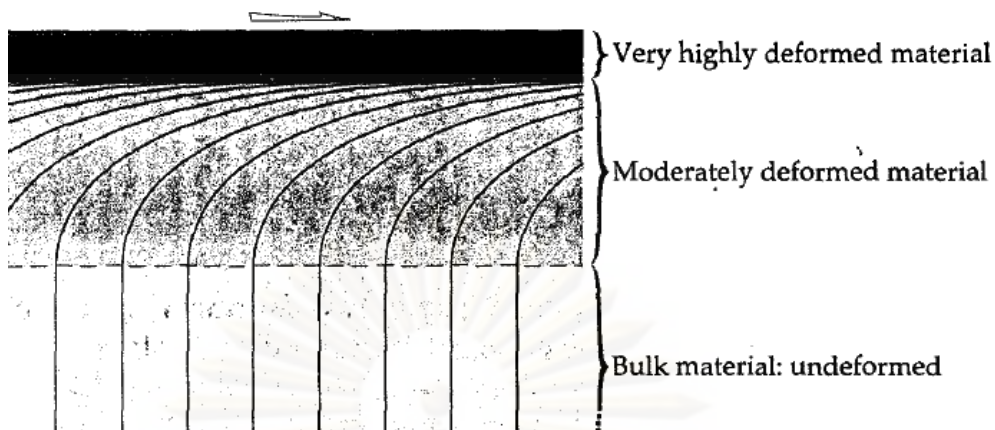
ในกรณีของการสึกหรอแบบนี้สามารถพบได้ในกรณีที่กระบวนการที่เกิดการสึกหรอเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง ก่อให้เกิดการออกซิเดชันอย่างรวดเร็ว และเกิดเป็นชั้นของออกไซด์ฟิล์มที่ค่อนข้างหนา ตัวอย่างเช่น สามารถพบได้ในการรีดร้อน (Hot Rolling) และการดึง (Drawing) ของเหล็กกล้า ดังแสดงได้ในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้เครื่องเจาะรู

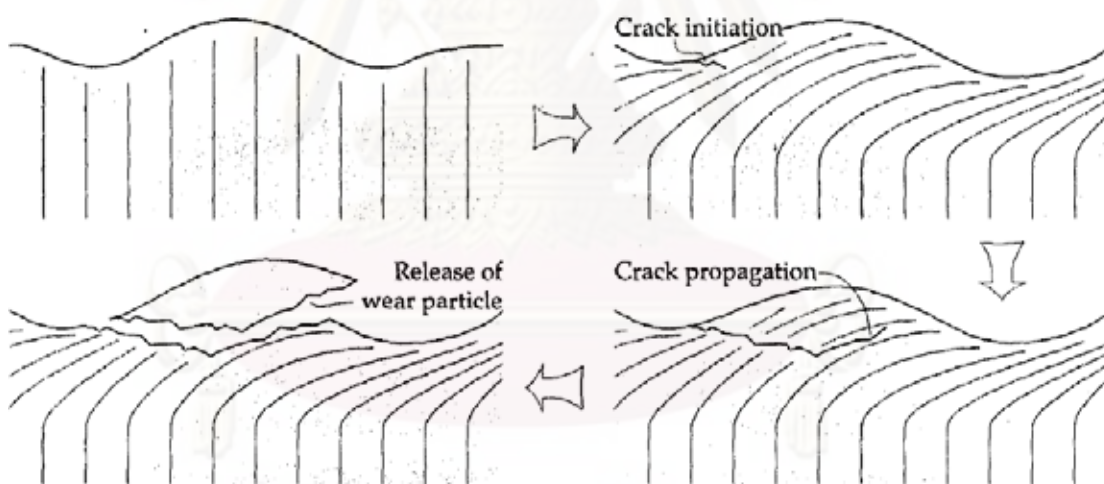
2.1.13.4 การสึกหรอเนื่องมาจากความล้า (Fatigue wear)

การเคลื่อนที่สัมผัสของผิวสัมผัสโลหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูง บริเวณผิวสัมผัสจะเกิดการเสีรูปของโครงสร้างผลึกไปในทิศทาง การเลื่อนไถล โดยผิวนอกสุดจะเกิดการเสีรูปอย่างรุนแรง ผิวชั้นโครงสร้างเกรนจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทาง การเลื่อนไถล ดังภาพที่ 2.13 แต่สำหรับในกรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานต่ำการเสีรูปดังกล่าว อาจเกิดขึ้นน้อยมากหรือถ้ามีสารหล่อลื่นแทรกกระหว่างผิวสัมผัสอาจไม่เกิดการเสีรูปดังกล่าวเลยก็ได้



ภาพที่ 2.13 การเสียรูปในชั้นผิวสัมผัส [3]

ความเครียดที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการเสียรูปอย่างถาวรนี้ทำให้เกิด Dislocations สะสมจนกระทั่งมากพอที่จะทำให้เกิด Void เป็นจุดกำเนิดรอยแตก ดังรูปที่ 2.16



ภาพที่ 2.14 การเกิดรอยแตกอันเนื่องมาจากการล้าตัว [3]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธนกฤต โชติภาวริศ ได้ศึกษาพฤติกรรมการสึกหรอของทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ที่อัดน้ำมันเปรียบเทียบกับชิ้นงานดังกล่าวที่ไม่อัดน้ำมัน ซึ่งผ่านการขึ้นรูปตามกรรมวิธีโลหะผง โดยนำมาทดสอบการสึกหรอกับเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 (304 Stainless Steel) โดยมี

ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอได้แก่ น้ำมันที่แทรกตัวอยู่ในรูพรุนของของชิ้นงาน ทองแดงผสมดีบุก ขนาดของแรงกด (Load) ที่กระทำต่อชิ้นงานขณะทำการทดสอบ และระยะทางที่ใช้ในการทดสอบ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบอยู่ที่ 25 °C ภายใต้บรรยากาศปกติ โดยกำหนดค่าของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดลองสำหรับชิ้นงานที่ไม่อัดน้ำมัน และชิ้นงานที่อัดน้ำมัน สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.8 และ 2.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.8 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่ไม่อัดน้ำมัน

ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ (ไม่อัดน้ำมัน)																
ความเร็ว (cm/s)	50															
ระยะทาง (m)	500			1000				3000				5000				
ขนาดของแรงกด (N)	1	3	5	7	1	3	5	7	1	3	5	7	1	3	5	7

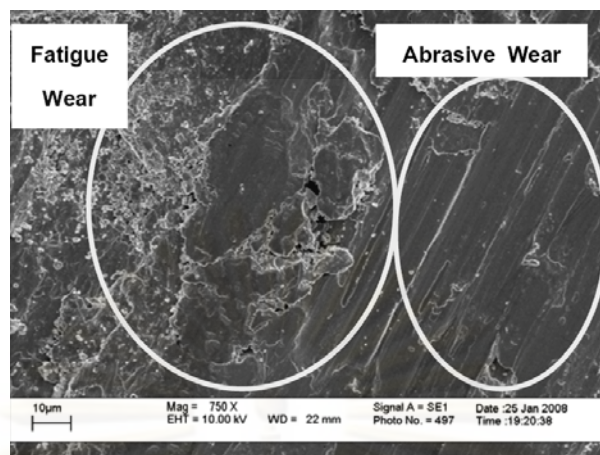
ตารางที่ 2.9 ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่อัดน้ำมัน

ค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอ (อัดน้ำมัน)																		
ความเร็ว (cm/s)	50																	
ระยะทาง (m)	10000					20000					30000							
ขนาดของแรงกด (N)	11	12	13	15	17	20	11	12	13	15	17	20	11	12	13	15	17	20

จากผลการทดลองพบว่า ชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนักที่ไม่ได้อัดน้ำมัน เกิดการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) และการสึกหรอแบบล้าตัว (Fatigue wear) และเมื่อแรงกดมีค่าสูงยังพบการสึกหรอแบบเกาะติด (Adhesive wear) ร่วมด้วยดังจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.25 ค่าเฉลี่ยอัตราการสึกหรอจำเพาะ (Average of Specific Wear Rate, k) เท่ากับ $75.35 \times 10^{-12} \text{ (m}^3\text{/(N.m))}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร

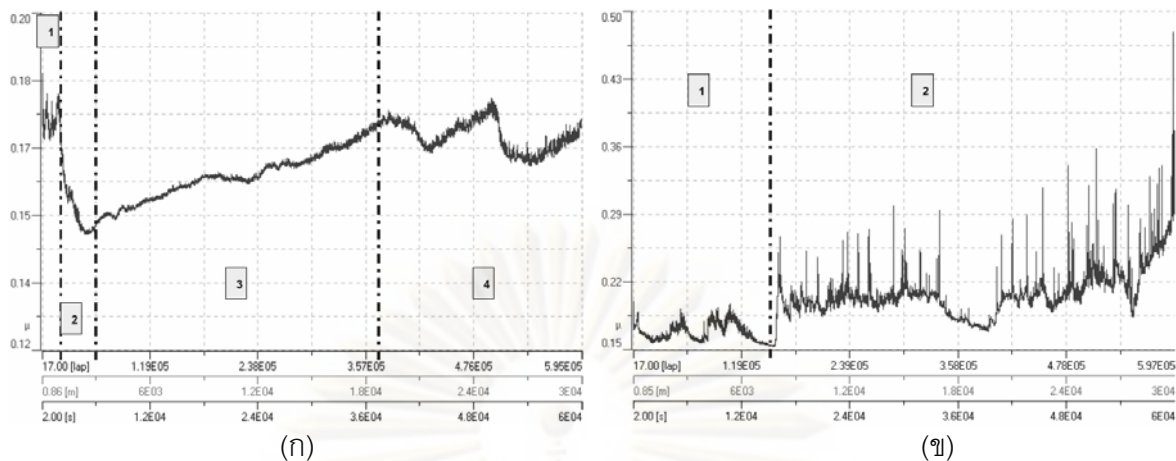
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 2.15 บริเวณที่เกิดการสึกหรอแบบล้าตัวและแบบขัดถูของแท่งทองแดงผสมดีบุกขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผงที่ไม่อัดน้ำมัน [6]

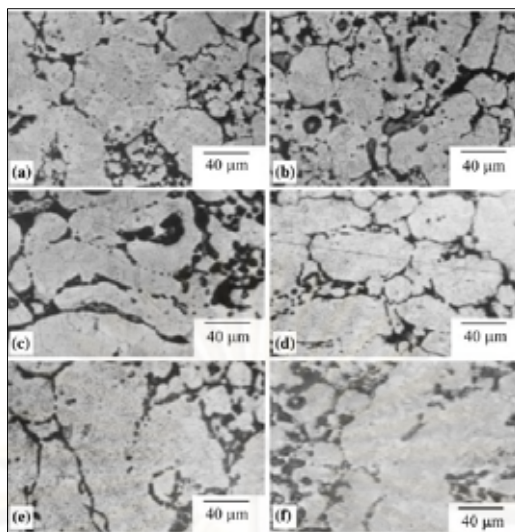
ส่วนชิ้นงานดังกล่าวที่อัดน้ำมันก็เกิดการสึกหรอแบบขัดถูและล้าตัวด้วยเช่นเดียวกัน แต่เกิดน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานเดียวกันที่ไม่ได้อัดน้ำมัน น้ำมันในรูปหล่อขึ้นงานทองแดงผสมดีบุกขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผงที่อัดน้ำมัน สามารถป้องกันการสัมผัสกันของหน้าสัมผัสโดยไม่เกิดการเสียดสีแบบ Stick-Slip อย่างชัดเจน ที่ระยะทางไกลสุด 30,000 เมตร ค่าเฉลี่ยอัตราการสึกหรอจำเพาะเท่ากับ 0.1526×10^{-12} ลูกบาศก์เมตรต่ออนิวตันเมตร ($\text{m}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$) และไม่ปรากฏการเกาะติดของทองแดงผสมดีบุกบนหน้าสัมผัสเหล็กกล้าไร้สนิม 304 การสึกหรอที่เกิดขึ้นมีทั้งแบบล้าตัวและแบบขัดถู

จากกราฟค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน พบว่าการหล่อลื่นของน้ำมันจากรูพูนขึ้นงานทองแดงผสมดีบุกขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผงที่อัดน้ำมัน โดยไม่เกิด Stick-Slip อย่างชัดเจนและรุนแรงนั้น การหล่อลื่นแบ่งเป็นช่วงๆ ได้แก่ 1.ช่วง Boundary Lubrication 2.ช่วงการเปลี่ยนจาก Boundary Lubrication เป็น Hydrodynamic Lubrication (Mixed-Lubrication) 3. ช่วง Hydrodynamic Lubrication 4. ช่วง Boundary Lubrication ซึ่งการหล่อลื่นแบบ Boundary Lubrication นี้จะเกิดแนวโน้มของการเสียดสีแบบ Stick-Slip ร่วมด้วยโดยกราฟค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีลักษณะเป็น "Saw Tooth Pattern" ดังสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.28

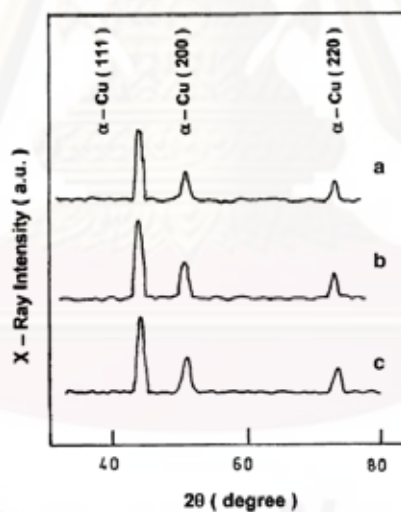


ภาพที่ 2.16 กราฟสัมประสิทธิ์ความเสียหายการทดสอบสี่หราชอาณาจักรของแท่งทองแดงผสมดีบุกขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีโลหะผงที่อัดน้ำมันกับแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม ที่ความเร็ว 50 cm/s ระยะทาง 30,000 m (ก) แรงกระทำ 12 นิวตัน (ข) แรงกระทำ 13 นิวตัน [6]

Farooq Bashir, Muhammad Zakria และ Farhat Sallemi ได้ทำการศึกษา โครงสร้างจุลภาคและความแข็ง ของโลหะผสมทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ภายใต้เงื่อนไขในการ aging ที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างของโลหะผสมทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนักซึ่งถูกเตรียมขึ้นมาจากกระบวนการโลหะผงและทำการเผาที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 120 นาที ภายใต้บรรยากาศของแก๊ส H₂ แล้วจึงทำการ aging ขึ้นงานที่อุณหภูมิคงที่ที่ 250°C เป็นเวลา 30, 60, 120, 300 และ 1440 นาที ภายหลังจากการทำ Solution Treatment ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที พบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากการเผาประกอบด้วยเฟสสารละลายของแข็ง α ดังแสดงในภาพที่ 2.17 ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการตรวจสอบด้วย XRD ใน XRD Patterns ในภาพที่ 2.18



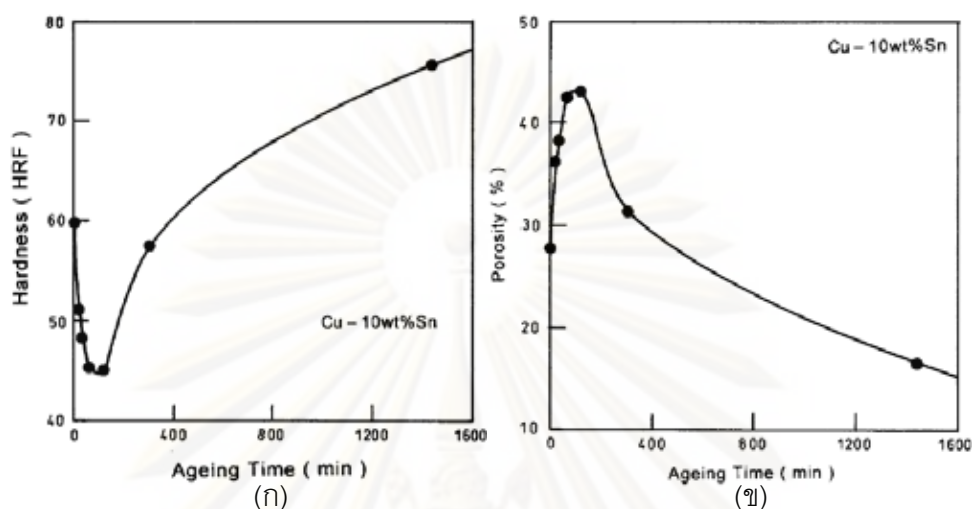
ภาพที่ 2.17 โครงสร้างจุลภาคของโลหะทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก (a) เผาผนังที่อุณหภูมิ 900°C (b) ทำ solution heat treatment ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที (c) aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 30 นาที (d) aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 120 นาที (e) aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 300 นาที และ (f) aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 1440 นาที [6]



ภาพที่ 2.18 XRD Patterns ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก (a) ทำ Solution heat treatment ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที, (b) ทำการ aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 30 นาที และ (c) ทำการ aging ที่อุณหภูมิ 250°C เป็นเวลา 1440 นาที [6]

นอกจากนั้น การทำ Solution heat treatment ตามด้วยการ quenching ในน้ำ ทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับหลังจากเผาผนังจาก 35.8 เป็น 59.8 HRF เนื่องมาจากความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ที่เหลืออยู่ในชิ้นงานเพราะการเย็นตัวที่รวดเร็ว ซึ่งความสัมพันธ์

ระหว่างความแข็งและปริมาณรูพรุน กับเวลาในการทำ aging ของชิ้นงานโลหะผสมทองแดงผสมดีบุก 10% ได้นำหนัก สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.19 (ก) และ (ข) ตามลำดับ และยังพบว่า

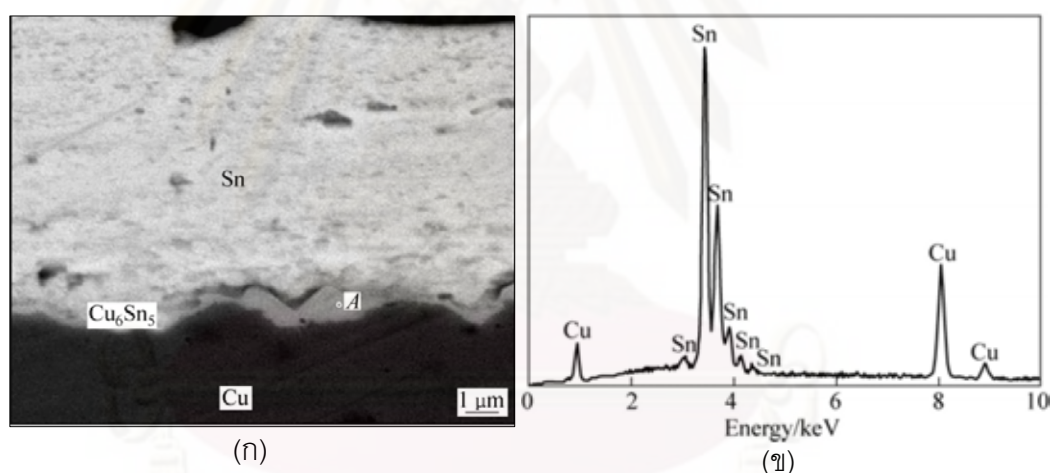


ภาพที่ 2.19 (ก) ความสัมพันธ์ของความแข็งต่อเวลาในการทำ aging (ข) ความสัมพันธ์ของปริมาณรูพรุน ของชิ้นงานโลหะทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก [6]

ความแข็งลดลงในตอนเริ่มต้นของการทำ aging จาก 59.8 เป็น 45.1 HRF เมื่อเวลาในการทำ aging เพิ่มขึ้นจนถึง 120 นาที และหลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นถึง 75.7 HRF เมื่อเวลาในการทำ aging เป็น 1440 นาที การลดลงของความแข็งในช่วง 0 – 120 นาที เป็นผลมาจากการลดลงของความเค้นตกค้างที่เกิดจากการ quenching, การเพิ่มขึ้นของขนาดเกรน และความผันแปรของปริมาณรูพรุน ส่วนการเพิ่มขึ้นของปริมาณรูพรุนจาก 27.8% เป็น 43.2% ในช่วง 0 – 120 นาที ของเวลาในการทำ aging เนื่องมาจากความปั่นป่วนของอะตอมจากความร้อน อย่างไรก็ตาม เวลาในการทำ aging ที่เพิ่มขึ้นที่มากกว่า 120 นาที พบว่าทำให้ปริมาณรูพรุนลดลงจาก 43.2% เป็น 16.5% เนื่องมาจากขนาดของเกรนที่เพิ่มขึ้น

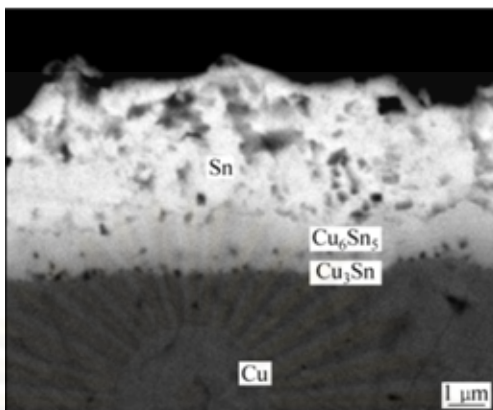
โดยสรุปแล้วเฟสสารละลายของแข็ง α ซึ่งมีโครงสร้างแบบ FCC ทำการ aging ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 60 นาที มีความเสถียรมากและจะไม่เกิดการแปลงเฟสไปเป็น ϵ -Cu₃Sn ซึ่งมีโครงสร้างเป็น hexagonal ได้โดยง่าย ความแข็งของโลหะผสมที่มีเฟสเดียวเตรียมจากกระบวนการโลหะผงมีความสัมพันธ์เป็นอย่างดีกับความสัมพันธ์ของปริมาณรูพรุน ดังความสัมพันธ์ตามสมการ $H = 93.31 - 1.14P$ โดยที่ H คือ ความแข็งในหน่วย HRF และ P คือ ปริมาณรูพรุน

ในปี ค.ศ. 2009 TANG Wen-ming, HE An-qiang, LIU Qi และ D.G. IVEY ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาเชิงพื้นผิวในสถานะของแข็งของชั้นทองแดงและดีบุกที่ผลิตจากวิธี Electrodeposition ซึ่งชั้นของทองแดงและดีบุกถูกเตรียมลงบน Si Wafer โดยทำการ Deposit ชั้นของทองแดงลงไปก่อนแล้วจึงทำการ Deposit ชั้นดีบุกเป็นชั้นถัดมา โดยชั้นทั้งสองนี้มีความหนาแน่นเพียงพอที่จะให้ปริมาณของทองแดงและดีบุกที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาระหว่างการ annealing เพื่อที่จะศึกษาถึงโครงสร้างจุลภาค, เฟสที่เกิดขึ้น และจลนพลศาสตร์ของการเกิด Intermediate เฟส เมื่อทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 373 ถึง 498 K ที่เวลาต่าง ๆ กัน พบว่า เฟสที่เกิดขึ้นหลังจากการทำ Electrodeposits ที่อุณหภูมิห้อง คือ Cu_6Sn_5 ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามเวลาในการบ่มแข็ง และชั้นของ Cu_6Sn_5 มีความต่อเนื่องกันแต่จะมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.20 (ก) โดยเมื่อทำการตรวจสอบด้วย EDX ที่จุด A ในภาพที่ 2.20 (ก) พบว่ามีปริมาณธาตุต่างแสดงดังภาพที่ 2.20 (ข) พร้อมกันนั้นพบว่ามีส่วนของการเกิดปฏิกิริยาเป็น Cu_6Sn_5 ที่ยื่นเข้าไปในชั้นของดีบุก ซึ่งสาเหตุคาดว่าเป็นการแพร่ตามขอบเกรน (Grain boundary diffusion) ร่วมกับการแพร่แบบแทรกที่ (Interstitial diffusion) ของอะตอมทองแดงเข้าไปในชั้นของดีบุก



ภาพที่ 2.20 ภาพจาก BSE mode (ก) และ EDX Spectrum ที่บริเวณจุด A (ข) ของชั้นทองแดงดีบุกทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 76 วัน [7]

เมื่อทำการ Anneal ชั้นของทองแดงดีบุกที่อุณหภูมิ 373 K และ 398 K ก็ยังคงพบว่ามีเฟส Cu_6Sn_5 เพียงเฟสเดียวเช่นกันและชั้น Cu_6Sn_5 ที่พบมีความต่อเนื่องและมีความหนาไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อทำการ Anneal ในช่วงอุณหภูมิ 423 – 498 K พบว่าเกิดปรากฏการณ์ชั้นของ Intermetallic เฟสของทั้ง Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn ซึ่งมีความต่อเนื่องและมีความหนาสม่ำเสมอ โดยเฟส Cu_3Sn ที่เกิดขึ้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาของเฟส Cu_6Sn_5 และทองแดงที่เหลืออยู่ และพบรูพรุนที่เกิดจากปรากฏการณ์ Kirkendall effect (Kirkendall void) ดังแสดงในภาพที่ 2.21



ภาพที่ 4.21 ภาพจาก BSE mode ของชั้นทองแดงดีบุกซึ่งทำการ annealing ที่อุณหภูมิ 423 K เป็นเวลา 5 ชั่วโมง [7]

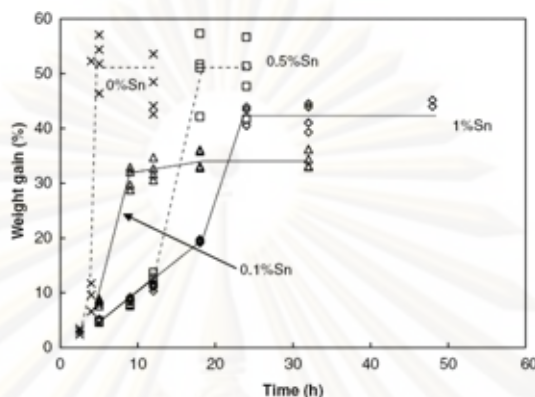
ซึ่ง Kirkendall void ที่เกิดบริเวณรอยต่อระหว่างชั้น Cu_3Sn กับ ทองแดง และภายในชั้นของ Cu_3Sn นี้เนื่องมาจากการที่ทองแดงมีอัตราการแพร่ที่เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดีบุก

อัตราการเร็วในการเกิดของชั้น Cu_6Sn_5 และ Cu_3Sn นั้น เป็นไปแบบพาราโบลา (Parabolic Growth rate) ในช่วงอุณหภูมิ 423 – 498 K และพบว่าค่า interstitial Diffusivity ของทองแดงในดีบุกเป็น $1.23 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

ในปี 2006 T.B. Scercombe และ G.B. Schaffer ได้ทำการศึกษา บทบาทของดีบุกต่อการเกิดไนไตรต์ (Nitridation) ของผงอะลูมิเนียม โดยเทคโนโลยีใหม่ในการผลิตส่วนผสมที่ทำจากอะลูมิเนียม นั้น มีปัจจัยที่สำคัญ คือ การเกิดทำให้เกิดอะลูมิเนียมไนไตรต์ เพราะอะลูมิเนียมไนไตรต์จะทำหน้าที่ให้ความแกร่งกับโครงสร้างในระหว่างการทำ Infiltration และทำให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ ซึ่งการควบคุมความหนาของการเกิดชั้นไนไตรต์มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ถ้ามีปริมาณอะลูมิเนียมไนไตรต์ที่ไม่เพียงพอแล้วจะทำให้โครงสร้างของชิ้นงานขาดความมีเสถียรภาพ แต่ถ้าเกิดไนไตรต์มากเกินไปอาจจะทำให้เกิดการแตกหักระหว่างการทำ Infiltration และสูญเสียสมบัติทางกลได้ โดยในงานวิจัยนี้ ได้ทำการผสมผงอะลูมิเนียม, ผงแมกนีเซียม 2wt%, ผงดีบุก 1wt% และ ไนลอน 3wt% เข้าด้วยกัน หลังจากนั้นจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 220°C เป็นเวลา 25 นาที ซึ่งที่อุณหภูมินี้ ไนลอนที่ทำหน้าที่เป็น binder จะเกิดการหลอมเหลว จะระเหยออกไปและจะได้เป็นชิ้นงานกรีน (Green Part) แล้วจึงนำชิ้นงานกรีนใส่ในเบ้าหลอมซึ่งทำจากเหล็กกล้า และทำการให้ความร้อนด้วยอัตราการให้ความร้อน $1.5^\circ\text{C}/\text{นาที}$ ในเตาภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน (N_2) ที่มีความบริสุทธิ์สูง ที่อุณหภูมิ

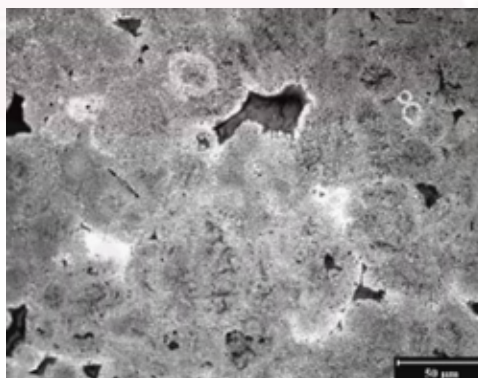
540°C และคงอุณหภูมิไว้ถึง 48 ชั่วโมง โดยปริมาณการเกิดไนไตรต์จะถูกวัดด้วยน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานที่ความแม่นยำในระดับ 0.001 กรัม ซึ่งจะใช้ชิ้นงานในแต่ละเงื่อนไขอย่างน้อย 4 ชิ้น

ในภาพที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับเวลาของชิ้นงานโลหะ Al-2%Mg ที่มีและไม่มีดีบุกผสม



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดไนไตรต์ของชิ้นงาน Al-2%Mg ที่อุณหภูมิ 540°C กับเวลาในการทำไนไตรต์ ที่มีและไม่มีดีบุก [8]

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำไนไตรต์ที่ 540°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงแสดงในภาพที่ 4.23 พบว่าอะลูมิเนียมเปลี่ยนไปเป็นอะลูมิเนียมไนไตรด์ได้อย่างสมบูรณ์ และเนื่องจากว่ารูพรุนที่เหลืออยู่มีปริมาณน้อยมาก ดังนั้น ไนไตรต์จะต้องเกิดเข้าด้านในและออกจากผนังอะลูมิเนียม ซึ่งถ้าไนไตรต์เกิดเฉพาะออกจากผนังอะลูมิเนียมจะต้องพบชั้นของรูพรุน หรือถ้าไนไตรต์เกิดเข้าไปด้านในของผนังอะลูมิเนียมเพียงอย่างเดียวจะต้องพบปริมาณรูพรุนสูงกวานี้มากเหมือนที่พบในชิ้นงานกรีน

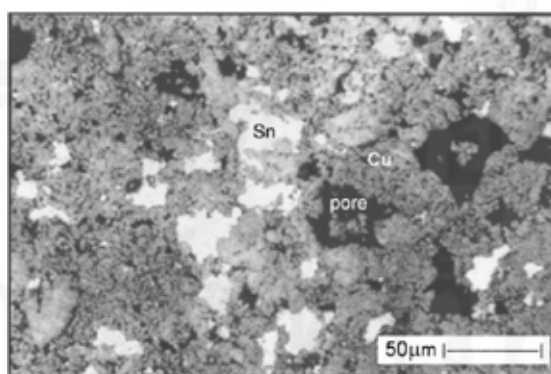


ภาพที่ 4.23 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน Al-2%Mg ซึ่งถ่ายจากกล้อง OM แสดงถึงการเกิดเป็นอะลูมิเนียมไนไตรด์ได้อย่างสมบูรณ์ [8]

โดยสรุปแล้ว พบว่าดีบุกส่งผลกระทบต่อทั้งอัตราและกลไกในการเกิดอะลูมิเนียมไนไตรด์ แต่ไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณของอะลูมิเนียมไนไตรด์ที่เกิดขึ้น เมื่อไม่มีส่วนผสมของดีบุก อะลูมิเนียมจะเกิด

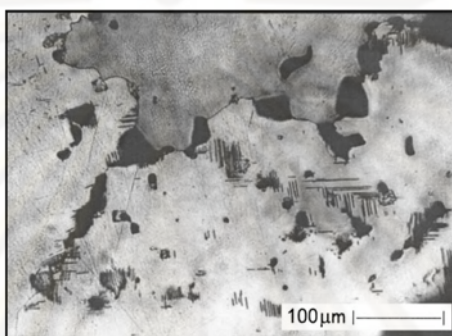
เป็นอะลูมิเนียมไนไตรด์ได้อย่างรวดเร็ว โดยไนไตรด์ที่เกิดขึ้นจะเกิดทั้งเข้าไปด้านใน และเกิดจาก มาจากด้านในผิวของผงอะลูมิเนียมเดิม ทั้งนี้ในทางตรงข้าม การเกิดอะลูมิเนียมไนไตรด์จะเกิดได้ ซ้ำเมื่อมีดีบุกเป็นส่วนผสม ซึ่งดีบุกจะถูกใช้ร่วมในการเกิดไนไตรด์และเมื่อดีบุกถูกใช้ไปจน หมดแล้วผงอะลูมิเนียมที่เหลือก็จะเกิดเป็นอะลูมิเนียมไนไตรด์ได้รวดเร็วเหมือนกับในชิ้นงานที่ไม่มี ดีบุกเป็นส่วนผสม ระยะเวลาที่อัตราการเกิดอะลูมิเนียมไนไตรด์จะเพิ่มสูงขึ้นนี้ขึ้นอยู่กับ ปริมาณดีบุก

ในปี ค.ศ. 2001 Acharya ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเย็นตัวของโลหะผสม ทองแดงผสม ดีบุก เนื่องจากเมื่อผงโลหะทองแดงผสมกับผงโลหะดีบุกเกิดเป็น bronze ในสถานะของเหลวและ ของแข็ง หรือโดยการแพร่ในสถานะของแข็ง จะต้องเกิดปฏิกิริยาและการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงใน แผนภาพสมดุล 2 องค์ประกอบของทองแดงและดีบุก ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการศึกษาถึง ความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเหล่านี้กับการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน ด้วย กระบวนการ Thermo-mechanical analysis (TMA) ด้วยอัตราการเย็นตัวที่ช้า ของชิ้นงาน ทองแดงผสมดีบุกที่หลายอัตราส่วนผสม โดยในงานวิจัยนี้ ผงโลหะทองแดงและดีบุกหลากหลาย ขนาดซึ่งถูกกดอัดจนได้เป็นชิ้นงานกรีนแล้วสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.24 โดยทุกๆอนุภาคของ ดีบุกสามารถทำตัวเป็นตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาได้ แต่อย่างไรก็ดี เราไม่สามารถผสมผงให้กระจาย ได้อย่างสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งชิ้นงาน ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาในแต่ละตำแหน่งของผงดีบุกจะเสร็จ ไม่พร้อมกัน เมื่อมองโดยภาพรวมแล้วจึงอาจบอกได้เกิดปฏิกิริยาหลากหลายปฏิกิริยาไปพร้อมๆ กัน ซึ่งแต่ละปฏิกิริยาก็จะมีคุณลักษณะทางความร้อนที่แตกต่างกันไป วัตถุประสงค์หลักของ งานวิจัยนี้ก็คือ ทราบถึงผลกระทบของแต่ละปฏิกิริยาในระบบของทองแดงและดีบุก ต่อการ เปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงาน

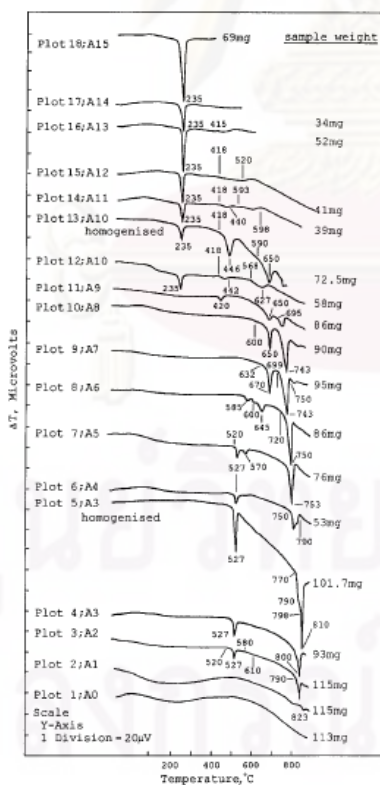


ภาพที่ 4.24 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานกรีนของทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก [9]

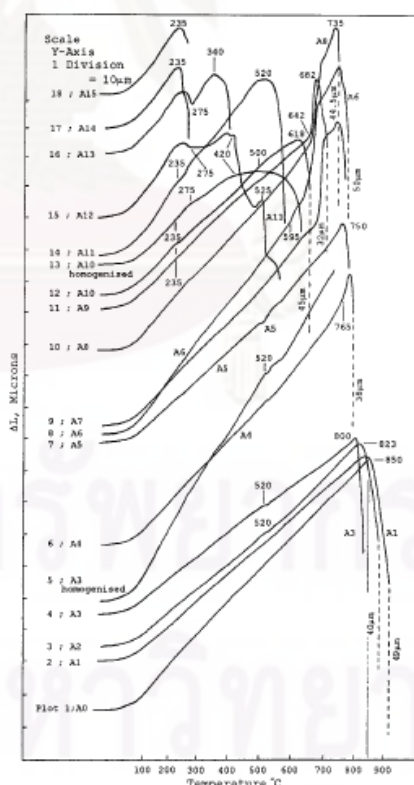
โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสม A1 (11 wt%Sn) ดังภาพที่ 4.25 พบว่ามีเพียงเฟส สารละลายของแข็ง α เพียงเฟสเดียว ระบุว่ามีลักษณะกลม และยังมีพบ microtwin บริเวณใกล้รูพรุน ซึ่งสอดคล้องกับผล DTA ในภาพที่ 4.26 (ก) ซึ่งไม่พบการเปลี่ยนแปลงใดๆ บ่งชี้ว่าโลหะผสม A1 ประกอบด้วยเฟส α ก่อนที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 823°C และจาก TMA ในภาพที่ 4.26 (ข) ก็พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนกระทั่งโลหะผสมเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นจน ตัดกับเส้น Solidus ที่ประมาณ 823°C ซึ่งที่อุณหภูมิสูงกว่านี้ เฟส α จะเปลี่ยนสถานะเป็น ของเหลวมากขึ้นส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูป



ภาพที่ 4.25 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานโลหะผสม A1 (11 wt%Sn) (ย่นตัวในเตา) [9]



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.26 (ก) DTA Plots และ (ข) TMA Plots ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุกที่อัตราส่วนดีบุกต่าง ๆ กัน [9]

ตารางที่ 2.10 ปฏิกริยาการเกิดเฟสในระบบการทองแดงและดีบุก และผลเนื่องจากความร้อนและการเปลี่ยนแปลงขนาด [9]

Temperature range	Reactions during heating	Nature of the DTA peak during heating	Nature of dilation during heating	Temperature range	Reactions during heating	Nature of the DTA peak during heating	Nature of dilation during heating
232°C	$\text{Sn(S)} \rightarrow \text{Sn(L)}$	endothermic	shrinkage	For the formation of any liquid phase a small expansion followed by shrinkage is seen, such as:			
408–432°C	$\eta \rightarrow (\epsilon + \text{L})$	endothermic	very small expansion	495–598°C	$(\epsilon + \text{L}) \rightarrow \text{L}$	endothermic	small expansion followed by shrinkage
515°C	$(\alpha + \delta) \rightarrow (\gamma + \delta)$	endothermic	shrinkage	627°C	$(\epsilon + \text{L}) \rightarrow \text{L}$	endothermic	small expansion followed by shrinkage
520°C	$\alpha + \delta \rightarrow \gamma$	endothermic	shrinkage	644°C	$\gamma_{50.4\% \text{Sn}} \rightarrow (\gamma + \text{L})$	endothermic	shrinkage
549°C	$\alpha + \delta \rightarrow (\alpha + \gamma)$	endothermic	shrinkage	700°C	$\gamma_{43\% \text{Sn}} \rightarrow (\gamma + \text{L})$	endothermic	shrinkage
581–618°C	formation of β by $(\alpha + \gamma) \rightarrow \beta$	not detected (probably small)	not detected (probably small)	736°C	$\gamma_{38.5\% \text{Sn}} \rightarrow (\gamma + \text{L})$	endothermic	shrinkage
603°C	$\delta \rightarrow (\gamma + \zeta)$	endothermic	expansion	745°C	$\gamma_{28\% \text{Sn}} \rightarrow (\gamma + \text{L})$	endothermic	small expansion followed by shrinkage
638°C	$(\gamma + \zeta) \rightarrow \gamma$	endothermic	expansion	748°C	$\gamma_{34.1\% \text{Sn}} \rightarrow (\gamma + \text{L})$	endothermic	small expansion followed by shrinkage
	$\zeta \rightarrow (\zeta + \gamma) \rightarrow (\gamma + \epsilon)$	endothermic	increase in the rate of expansion	750–760°C	$\gamma_{32.5\% \text{Sn}} \rightarrow (\gamma + \text{L})$	endothermic	small expansion followed by shrinkage
642–660°C	$\epsilon \rightarrow (\epsilon + \gamma)$	endothermic	expansion	795°C	$\beta_{25\% \text{Sn}} \rightarrow (\beta + \text{L})$	endothermic	small expansion followed by shrinkage
	$(\epsilon + \gamma) \rightarrow \gamma$	endothermic	expansion	800°C	$\beta \rightarrow \alpha + \text{L}$	endothermic	shrinkage
				830–845°C	$\alpha_{17.7\% \text{Sn}} \rightarrow (\alpha + \text{L})$	endothermic	shrinkage
					$\alpha_{11.2\% \text{Sn}} \rightarrow (\alpha + \text{L})$	endothermic	shrinkage

จากผลสรุปของงานวิจัยนี้ทำให้ได้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกริยาการเกิดเฟสของระบบ 2 องค์ประกอบของทองแดงและดีบุกที่หลายสัดส่วนในการผสม ผลจากความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด ดังแสดงได้ในตารางที่ 2.10

การเกิดเฟส β โดยปฏิกริยา $(\alpha + \gamma) \rightarrow \beta$ ไม่สามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงขนาดเนื่องมาจากความร้อนได้โดย DTA และ TMA และการเกิดเฟสของเหลวใดๆจากการหลอมเหลวพบว่าจะประกอบด้วยการขยายตัวของชิ้นงานในช่วงแรก และหลังจากจะเกิดการหดตัว

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการทดลอง

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1.1 ผงทองแดงผสมดีบุกแบบ Premixed ที่มี คอปเปอร์ 89.80 wt% และ ดีบุก 10.20 wt%

3.1.1.2 ผงอะลูมิเนียม ขนาดผง 3 ไมครอน ความบริสุทธิ์ 99.9%

3.1.1.3 กระดาษทราย เบอร์ 120 240 400 600 800 1000 1200 1500 2000

3.1.1.4 ผ้าสักกะหลาด

3.1.1.5 ผงขัดอะลูมินาขนาด 1 ไมครอน

3.1.1.6 แก๊สอาร์กอน ความบริสุทธิ์ 99.9%

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.2.1 เครื่องอัดผงแบบไฮดรอลิก แรงอัดสูงสุด 3000 kg

3.1.2.2 เตาท่ออะลูมินา (Horizontal alumina Tube Furnace)

3.1.2.3 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM)

3.1.2.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (Scanning electron Microscope, SEM)

3.1.2.5 เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

3.1.2.6 เครื่องวัดความแข็งจุลภาค (Micro Hardness tester)

3.1.2.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก 2 และ 4 ตำแหน่ง

3.1.2.8 เครื่องทดสอบการลึกรอบแบบ Pin-on-Disc ยี่ห้อ PLINT รุ่น TE79

3.2 ระเบียบวิธีการวิจัย

3.2.1 การเตรียมผง และผสมผง

นำผงทองแดงผสมดีบุกแบบ Premixed และผงอะลูมิเนียมมาชั่งน้ำหนักให้มีสัดส่วน ผงทองแดงผสมดีบุกต่อ ผงอะลูมิเนียม 5 และ 10 wt% แล้วจึงนำผงที่ได้ใส่ในถุงซิปล แล้วเขย่าให้ ผงผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 – 2 นาที

3.2.2 การอัดขึ้นรูปชิ้นงาน

นำผงทองแดงผสมดีบุก และผงที่ผสมได้จากการผสมจากข้อ 3.2.1 เทลงในรูเปิดของ แม่แบบสำหรับเครื่องอัดผงแบบไฮดรอลิก แล้วทำการเคาะที่บริเวณรอบๆแม่แบบ ค่อยๆเพิ่มความดันจนมีค่าเท่ากับ 180 MPa ทั้งนี้เพื่อให้ผงเกิดการจัดเรียงตัวและได้รับแรงกดเท่าๆกันอย่าง สม่ำเสมอ แล้วจึงนำชิ้นงานออกจากแม่แบบ ชั่งน้ำหนัก วัดขนาดก่อนทำการเผาผืนึก

3.2.3 การเผาผืนึก

นำชิ้นงานที่ได้จากข้อ 3.2.2 ใส่ลงในภาชนะทนความร้อน และนำไปทำการเผาผืนึกในเตา ฟออะลูมิน่า ภายใต้บรรยากาศแก๊สอาร์กอน (Industrial Ar) ที่อุณหภูมิในการเผาผืนึกที่ 900°C และ 830°C และช่วงเวลาการเผาผืนึก ต่างๆ กัน (5, 30, 45, 60 และ 90 นาที) หลังจากนั้นนำ ชิ้นงานออกจากเตา ชั่งน้ำหนัก วัดขนาด และคำนวณความหนาแน่นและปริมาตรรูพรุน ด้วยวิธี ของอาคิมิติส

3.2.4 การวิเคราะห์ชิ้นงาน

นำชิ้นงานมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 120 240 400 600 800 1000 1500 2000 ตามลำดับ แล้วจึงขัดละเอียดด้วยผงขัดอะลูมิน่า ความละเอียด 1 ไมครอน ตามลำดับ นำชิ้นงาน ไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง EDX และวิเคราะห์เฟสด้วย X-Ray Diffractometer แล้วจึงนำชิ้นงานไปถ่ายภาพโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง และด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด หลังจากนั้น นำชิ้นงานไปทดสอบความแข็งด้วย เครื่องทดสอบความ แข็งจุลภาค หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปเตรียมทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่องทดสอบแบบ Pin-on-Disc

3.2.5 กระบวนการอบชุบความร้อนโดยการชุบแข็ง

พิจารณาผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่เผาผืนที่อุณหภูมิ 900°C และ 830°C โดยพิจารณาจากผลของความแข็งเป็นหลัก และเลือกชิ้นงานที่ให้ผลที่ดีที่สุดของการเผาผืนในแต่ละอุณหภูมิ นำมาผ่านกระบวนการอบชุบความร้อนโดยการให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิ 900°C และ 750° ด้วยเตา Rapid Heating Furnace ด้วยอัตราการให้ความร้อน $30^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$ แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 60 นาที หลังจากนั้นจึงทำการชุบแข็งโดยการนำชิ้นออกจากเตาแล้วจุ่มลงในน้ำที่อุณหภูมิห้องทันที

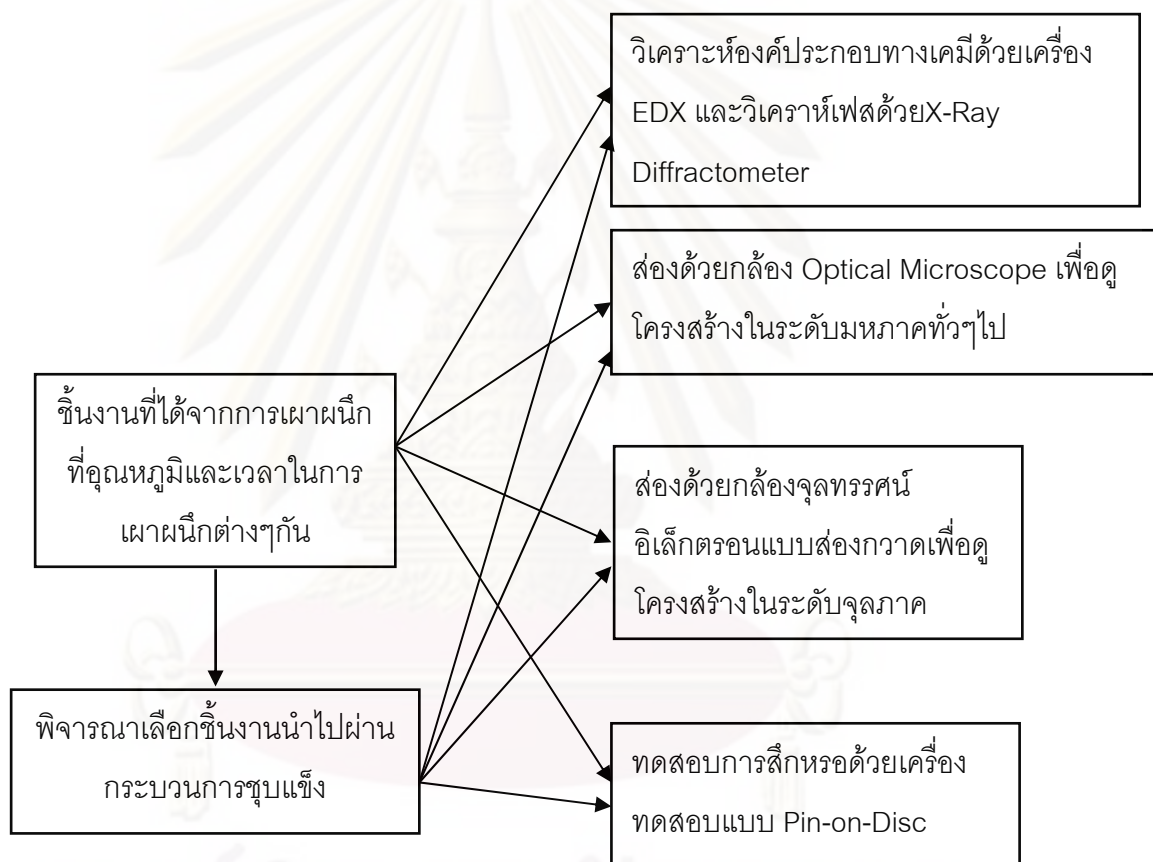
3.2.6 แผนภูมิการทดลองและการวิเคราะห์

แผนภูมิการทดลอง



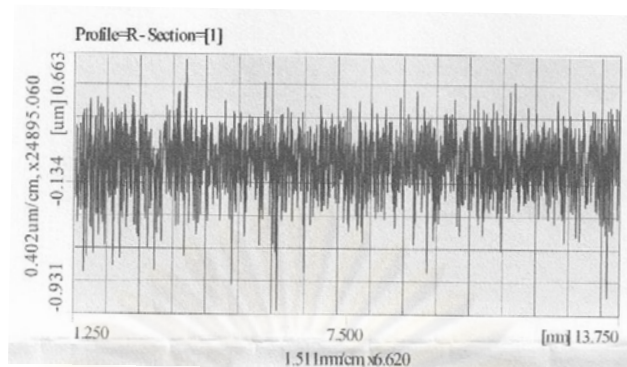
นำชิ้นงานออกจากเตาเผา ซึ่งน้ำหนัก วัดขนาด
 คำนวณความหนาแน่น ภายหลังการเผา และ
 ปริมาณรุกรานด้วยวิธีของอาคิมิติดิส หลังจากนั้น
 นำชิ้นงานเข้าสู่ขั้นตอนในการวิเคราะห์ต่อไป

แผนภูมิการวิเคราะห์ผลการทดลอง



3.2.7 ขั้นตอนการทดสอบแบบ Pin-on-disc

3.2.7.1 เตรียมชิ้นงาน Pin ที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง
 ประมาณ 11 มม. ซึ่งผลิตจากผงทองแดงผสมดีบุก 10%โดยน้ำหนัก ผสมกับผงอะลูมิเนียม ที่
 สัดส่วนที่แตกต่างกัน ซึ่งผ่านการเผาผืนึก ที่อุณหภูมิ ต่างๆกัน สำหรับชิ้นงานที่เป็น disc จะทำ
 จากเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม หนา 0.5 ซม มีความหยาบผิวที่ค่า
 $Ra = 0.127 \mu m$ และ Surface Roughness Profile สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 Surface Roughness Profile ของชิ้นงานที่เป็น Disc ก่อนทำการทดสอบการสึกหรอ

3.2.7.2 นำชิ้นงานที่เป็น Pin ทุกชิ้นที่เตรียมจากข้อ 3.4.1 มาทำการเตรียมผิวให้มีความหยาบผิวใกล้เคียงกันขณะนำไปทำการทดสอบการสึกหรอโดยนำมาขัดกับกระดาษทรายเบอร์ตั้งแต่เบอร์ 120 ไปจนถึงเบอร์ 1000 และหลังจากนั้นนำไปขัดกับเบอร์ 1200 (มีขนาดของ grit ตาม ANSI เป็น $6.5 \mu\text{m}$) เป็นเวลาประมาณ 1 นาที

3.2.7.3 ชั่งน้ำหนักก่อนทำการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เป็น Pin และ disc แล้วจึงติดตั้งชิ้นงานทั้งสอง เข้ากับเครื่องทดสอบการสึกหรอ โดยทำการติดตั้งให้ระนาบของหน้าสัมผัสของชิ้นงานที่เป็น Pin และ Disc ขนานกัน และตั้งค่าเงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ โดย แรงกดในการทดสอบเท่ากับ 10 นิวตัน ความเร็วเชิงเส้นในการหมุนที่ 0.63 เมตร/วินาที ความถี่ในการหมุน 200 รอบ/นาที และรัศมีการหมุนเป็น 30 มม. และใช้ระยะเวลาในการทดสอบการสึกหรอ 5000 เมตร หลังจากการนั้นจึงชั่งน้ำหนักภายหลังจากทดสอบของชิ้นงานทั้งสอง

3.2.7.4 ตรวจสอบผิวของชิ้นงานที่เป็น Pin และ disc ด้วย SEM ที่ผ่านการทดสอบการสึกหรอแล้วและตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีและเฟสของเศษที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอด้วย EDX และ XRD

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

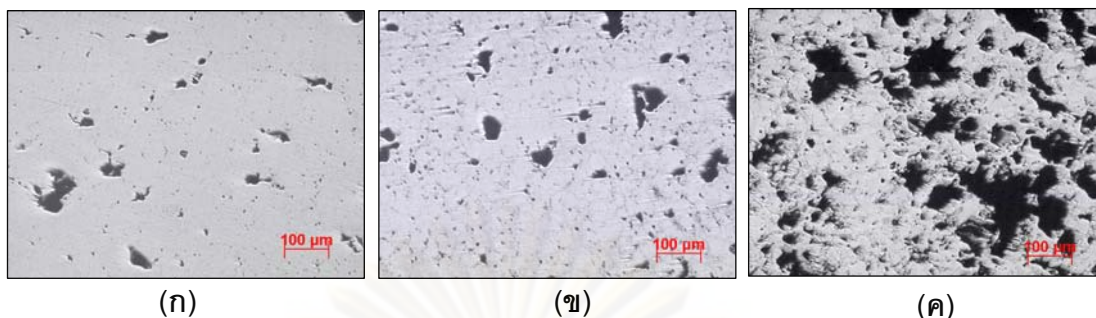
ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม คุณณหภูมิในการเผาผนึก และระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ ที่มีต่อพฤติกรรมการสึกหรอจากการทดสอบแบบ Pin-on-disc ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการโลหะผง ซึ่งผลการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ อุณหภูมิเผาผนึก 900°C, 830°C และผลจากการอบชุบด้วยความร้อน (Heat Treatment) ด้วยการชุบแข็ง (Hardening)

4.1 ผลการทดลองเมื่อเผาผนึกที่ 900°C

ในการเผาผนึกชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ที่ 900°C นี้ ใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 5, 30, 45, 60 และ 90 นาที โดยในแต่ละเวลาในการคงอุณหภูมิ ชิ้นงานจะมีสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียมต่างๆกัน คือ 0%, 5% และ 10% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และผลของสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม

4.1.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน

ในเบื้องต้น ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (OM) เพื่อศึกษาลักษณะของเนื้อพื้นของชิ้นงาน และ ปริมาณของรูพรุน ซึ่งพบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันในแต่ละเวลาในการคงอุณหภูมิ ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 4.1 พบว่าเมื่อสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.1 (ก) – (ค) ซึ่งแสดงโครงสร้างจุลภาคชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 0%, 5% และ 10% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ โดยในภาพที่ 4.1 นี้ เป็นโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เผาผนึกด้วยเวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ซึ่งภาพโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C ที่ใช้เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก ส่วนการวิเคราะห์สาเหตุของการที่เติมผงอะลูมิเนียมจะแสดงในหัวข้อการผลความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งแรง และหัวข้อการวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบทางเคมี



ภาพที่ 4.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่สัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม (ก) 0wt%, (ข) 5wt% และ (ค) 10wt% ตามลำดับ

4.1.2 ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย

ความหนาแน่น และปริมาตรรูพรุน ทำการวัดและคำนวณโดยใช้หลักของอาคิมิดีส (Archimedes' Principle) แสดงดังภาคผนวก ข ซึ่งผลที่ได้จากการวัดและคำนวณ ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 0%, 5% และ 10% โดยน้ำหนักเมื่อเผาผนึกที่ 900°C และใช้เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย มาเปรียบเทียบกันดังแสดงในภาพที่ 4.2 และ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ

ความหนาแน่นของชิ้นงาน 0 wt%Al, 5 wt%Al และ 10 wt%Al มีค่าสูงสุดเมื่อเผาผนึกโดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ซึ่งมีค่า 7.81, 6.63 และ 5.44 g/cm³ ทำให้ที่เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาทีนี้ มีปริมาตรรูพรุนต่ำที่สุดด้วย โดยมีค่า 9.53%, 15.53% และ 27.96% โดยปริมาตร และยังพบว่าความแข็งมีค่าสูงที่สุดที่ 54.4 HV, 51.30 HV และ 37.90 HV ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่ไม่ได้เติมผงอะลูมิเนียม (0 wt% Al) เผาผนึกที่ 900°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ

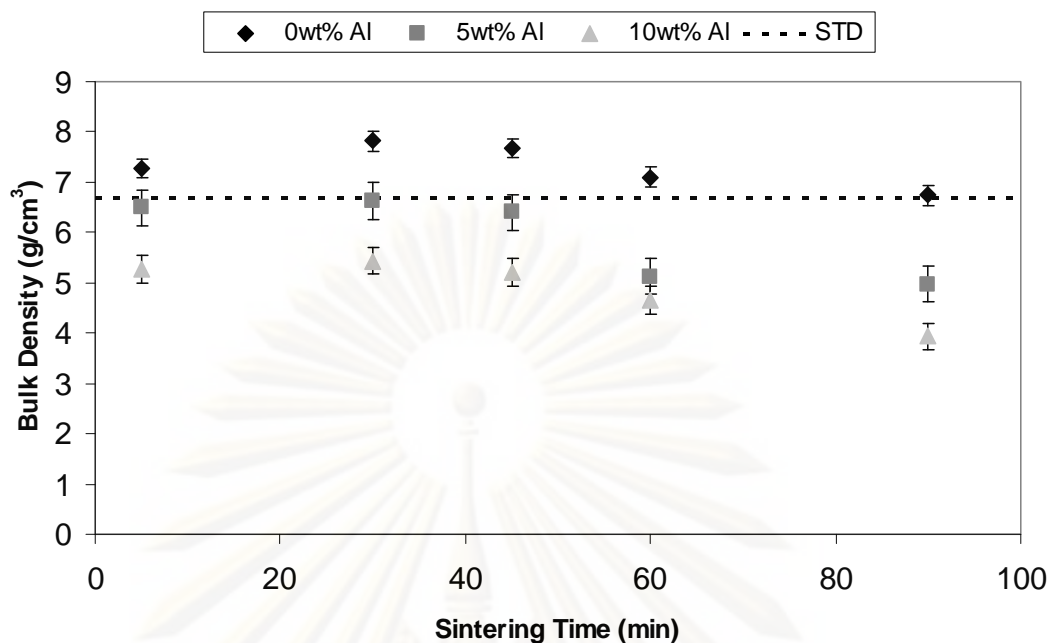
Sintering Time (min)	Bulk Density (g/cm ³)	% Porosity	Hardness (HV _{1kg})
5	7.27	13.16	52.40
30	7.81	9.53	54.40
45	7.68	13.70	51.30
60	7.10	17.89	41.80
90	6.74	17.65	39.60

ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่ 900°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ

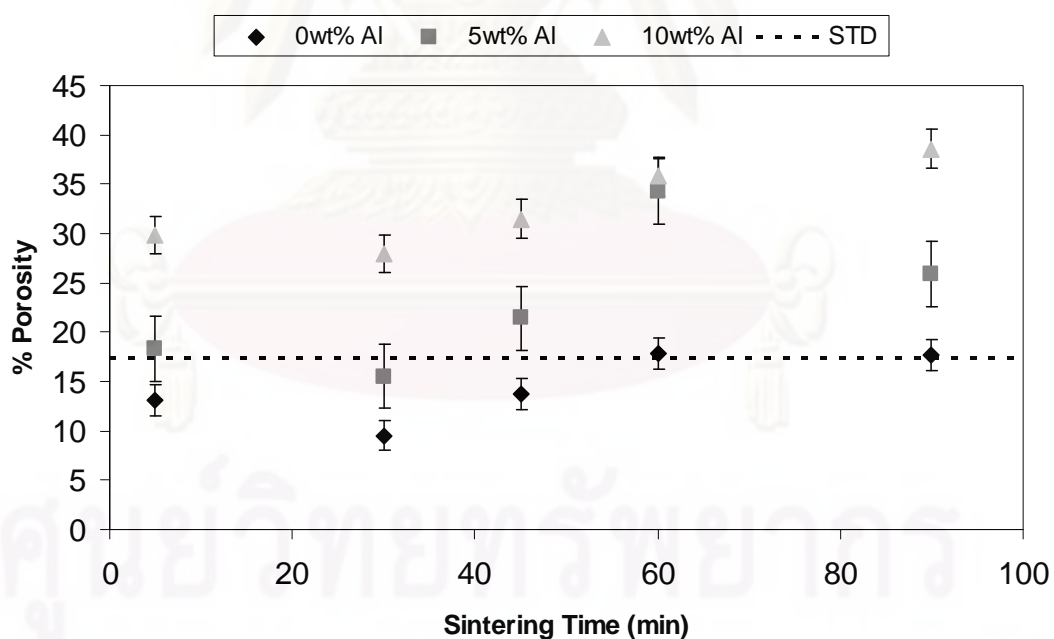
Sintering Time (min)	Bulk Density (g/cm ³)	% Porosity	Hardness (HV _{1kg})
5	6.49	18.30	50.30
30	6.63	15.53	51.30
45	6.40	21.40	27.10
60	5.13	34.28	38.40
90	4.97	25.91	21.90

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 10% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่ 900°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ

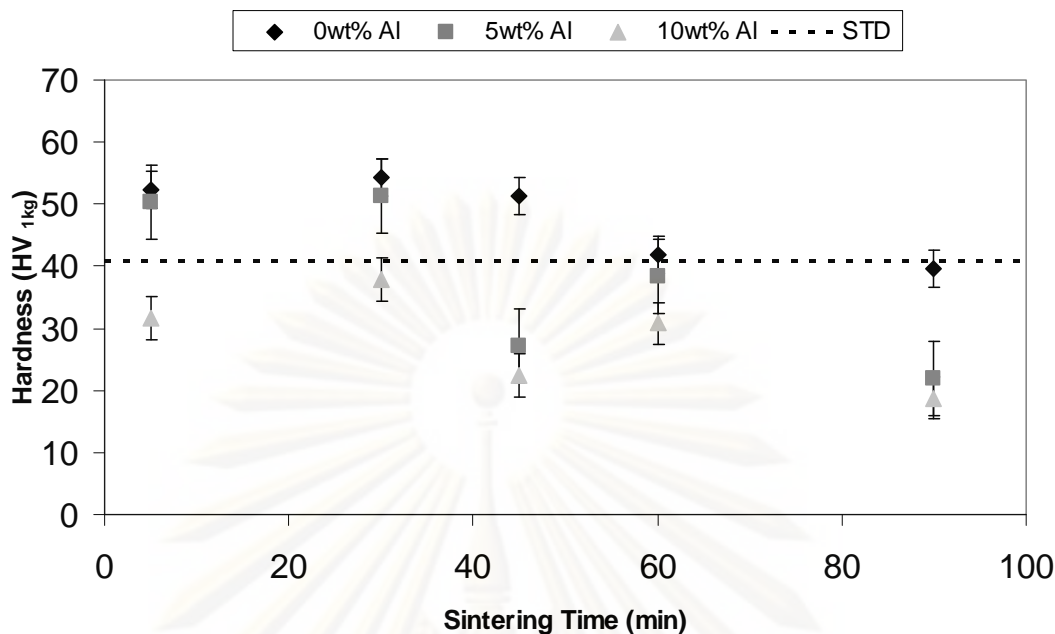
Sintering Time (min)	Bulk Density (g/cm ³)	% Porosity	Hardness (HV _{1kg})
5	5.26	29.83	31.60
30	5.44	27.96	37.90
45	5.22	31.49	22.40
60	4.65	35.78	30.80
90	3.93	38.59	18.80



ภาพที่ 4.2 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อความหนาแน่นเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เเผผนี้ที่อุณหภูมิ 900°C



ภาพที่ 4.3 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อปริมาณรูพรุนเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เเผผนี้ที่อุณหภูมิ 900°C



ภาพที่ 4.4 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C

เส้นประในภาพที่ 4.2 – 4.4 แสดงค่าความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนักที่ไม่ได้เติมผงอะลูมิเนียม (0 wt% Al) ซึ่งเผาผนึกมาจากโรงงาน K-Powder (กทม.) ที่อุณหภูมิ Debinding ที่ 380°C เป็นเวลา 25 นาที และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 770°C ใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 25 นาที โดยใช้เตาเผาแบบต่อเนื่อง (Continuous Furnace) ใช้ความเร็วของสายพาน 25 ซม./นาที ภายใต้บรรยากาศ N₂ 90% และ H₂ 10% มีความหนาแน่น 6.68 g/cm³ ปริมาณรูพรุน 17.33% และความแข็ง 40.8 HV

ที่อุณหภูมิ 900°C สัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานลดต่ำลง ในทุกเวลาในการคงอุณหภูมิ ซึ่งเมื่อพิจารณาแนวโน้มของปริมาณรูพรุนจะเห็นว่ามีความสอดคล้องกัน คือ ปริมาณรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น

ส่วนเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆกัน เห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และปริมาณรูพรุนก็จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น [6] โดยแนวโน้มเป็นไปในแนวทางเดียวกันนี้ในชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียมในสัดส่วนที่แตกต่างกัน

การที่ชิ้นงานมีความหนาแน่นลดต่ำลง และปริมาณรูพรุนสูงขึ้น ทำให้เมื่อชิ้นงานรับแรงกดจะเกิดความเค้นสูง (Stress Concentration) ที่บริเวณขอบของรูพรุนในชิ้นงาน มีส่วนทำให้ชิ้นงานรับแรงกดได้น้อยลง ทำให้ความแข็งแรงลดต่ำลง [6] ซึ่งคาดว่าน่าจะส่งผลต่อพฤติกรรมการสึกหรอโดยทำให้เกิดการสึกหรอมากขึ้น และมีอายุการใช้งานที่ลดต่ำลง เมื่อพิจารณาสาเหตุของการที่ปริมาณรูพรุนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น มี 2 สาเหตุ คือ การระเหยของอะลูมิเนียม และ Kirkendall Void ซึ่งการระเหยของอะลูมิเนียมเกิดจากการที่อะลูมิเนียมมีความดันไอสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยความดันไอของอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่มีทั้งทองแดง ดีบุกและอะลูมิเนียม นั้น อาจจะสามารถวัดความดันไอของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ซึ่งเป็นไปสมการที่ 4.1 [5]

$$\log(P) = 10.917 - \frac{16211}{T} \quad \text{สมการที่ 4.1}$$

โดยที่ P คือ ความดันไอ มีหน่วยเป็น พาสคัล (Pa), T คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น เคลวิน (K) เมื่อคำนวณความดันไอของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 900°C (1173 K) พบว่ามีค่า 1.25×10^{-3} Pa ซึ่งถึงแม้ว่ามีค่าสูง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันบรรยากาศปกติที่มีค่า 1.015×10^5 Pa พบว่ายังมีค่าน้อยกว่ามาก และเมื่อพิจารณาน้ำหนักที่ลดลงเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิ 900°C โดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักที่ลดลงภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 900°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆกัน

Sintering Time (min)	0 wt%Al (g)	5 wt%Al (g)	10 wt%Al (g)
5	0.040	0.030	0.030
30	0.015	0.055	0.035
45	0.040	0.035	0.045
60	0.025	0.065	0.035
90	0.025	0.050	0.035

พบว่า น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานทั้งหมดดังตารางที่ 4.4 มีค่าน้อยกว่าปริมาณสารหล่อลื่น (Lubricant) ที่มีอยู่ในแต่ละชิ้นงาน โดยสารหล่อลื่นมีปริมาณ 0.045 g ในทุกๆชิ้นงาน ซึ่งสารหล่อลื่นจะถูกเผาให้ระเหยออกไปจากชิ้นงานที่อุณหภูมิต่ำ แต่สำหรับชิ้นงานที่ผสมผงอะลูมิเนียมบาง

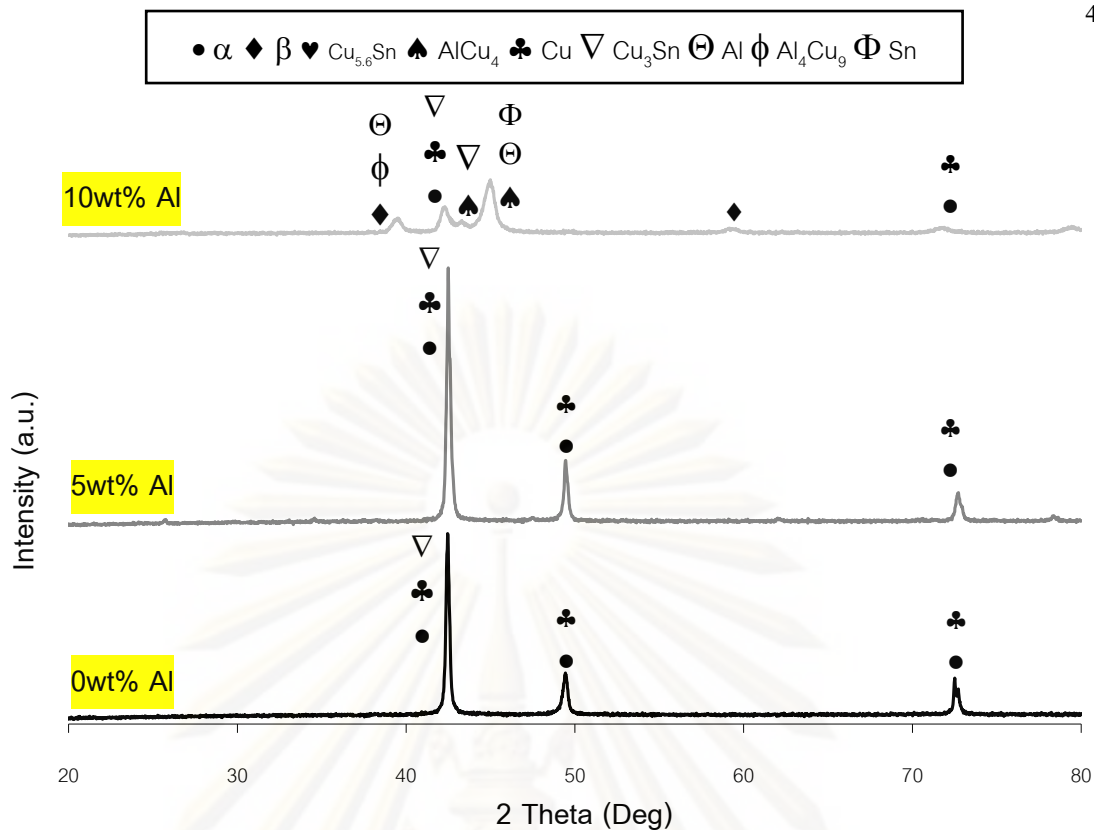
ขึ้น พบว่ามีค่าสูงกว่า 0.045 g ซึ่งแสดงว่าอาจจะมีอะลูมิเนียมบางส่วนที่ระเหยไป เนื่องมาจาก สมการที่ 4.1 เป็นเพียงการประมาณเท่านั้น เพราะ ในความเป็นจริงอะลูมิเนียมไม่ใช่อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ดังนั้นสาเหตุหลักที่ชิ้นงานมีความหนาแน่นลดต่ำลงเมื่อสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม เพิ่มขึ้น เป็นเพราะเกิดปรากฏการณ์ Kirkendall effect ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดการแพร่ที่ไม่ สมดุลกันของอะตอมของวัสดุ 2 ชนิด ทำให้เกิดเป็นโพรงหรือรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงาน (Kirkendall Void) ซึ่งในที่นี่เกิดจากการที่ทองแดง สามารถแพร่เข้าไปในดีบุกและอะลูมิเนียมได้ดีกว่าที่ดีบุก และอะลูมิเนียมจะแพร่เข้าไปในทองแดง [6] และเนื่องจากเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ทั้ง ทองแดง ดีบุก และอะลูมิเนียมมีเวลาในการแพร่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดรูพรุนซึ่งเกิดจากบริเวณที่เคยมี ทองแดงอยู่ เพิ่มขึ้นตามเวลาในการคงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น [6,7]

4.1.3 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและสารประกอบ

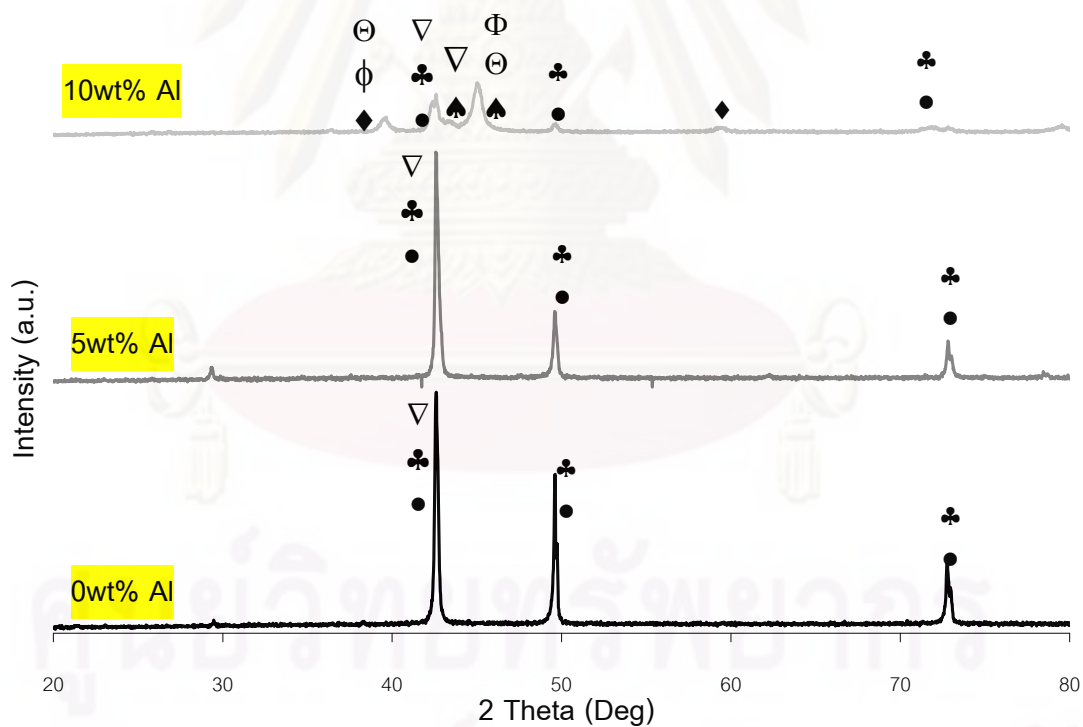
เพื่อทำการศึกษาธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นภายหลังการเผาผนึก จึงนำชิ้นงานที่เผาผนึกแล้วไปทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งผลที่ได้จากเครื่อง XRD จะบอกให้ทราบถึงธาตุและสารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นงาน โดยในการตรวจสอบนี้ใช้ค่า Scan speed 3 องศา/นาที Sampling width 0.020 องศา ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิ 30, 60 และ 90 นาที สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

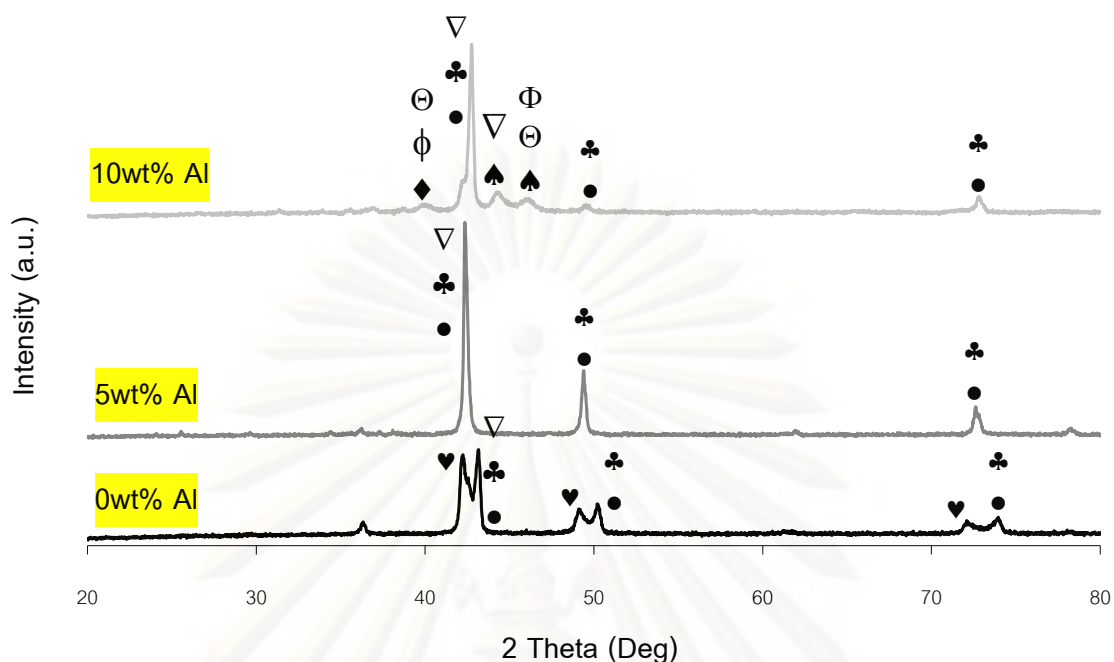
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.5 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาขึ้นที่ 900° เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที



ภาพที่ 4.6 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาขึ้นที่ 900° เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที



ภาพที่ 4.7 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผืนที่ 900° เวลาในการคงอุณหภูมิ 90 นาที

จากการตรวจสอบด้วย XRD พบเฟสหลักที่ปรากฏอยู่ในชิ้นงานคือ สารละลายของแข็งของดีบุกในทองแดง α (JCPDS #44-1477) ซึ่งเป็นเฟสสารละลายของแข็งที่เกิดจากดีบุกละลายเข้าไปในทองแดงเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่มีสัดส่วนโดยน้ำหนักของทองแดงต่อดีบุกสูงสุดประมาณ 90:10 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ JCPDS #44-1477 แล้วยังพบว่า เกิดการ Shift ของ Peak α โดย Peak เกิดที่มุม θ ต่ำกว่าที่ระบุไว้ใน JCPDS #44-1477 ประมาณ 1° ทำให้ตามสมการของ Bragg ($2d\sin\theta = \lambda$) ค่า Lattice Parameter (d) มีค่าเพิ่มขึ้น โดยพบทั้งในชิ้นงาน 0wt%Al, 5wt%Al และ 10wt%Al และยังพบว่าการละลายของอะลูมิเนียมในชิ้นงานส่งผลให้มุม θ เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นประมาณ 0.2° จากชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0 wt%) โดยชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) และชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt% พบแต่เฟส α เพียงเฟสเดียว อย่างไรก็ตามชิ้นงาน 0wt%Al ที่เผาผืนที่อุณหภูมิ 900°C โดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 90 นาที พบว่า Peak แตกออกเป็น 2 ยอด ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล JCPDS พบว่าตรงกับเฟสสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic) Cu_5Sn (JCPDS #31-0487) [10] ส่วนชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% พบเฟสสารละลายของแข็ง β (JCPDS #06-0621) ซึ่งเป็นสารละลายของแข็งอีกเฟสหนึ่งของดีบุกในทองแดง แต่เป็นสารละลายของแข็งที่มีปริมาณดีบุกสูง โดยมีสัดส่วนโดยน้ำหนักของทองแดงต่อดีบุกสูงสุดประมาณ 75:25 และยังพบสารประกอบเชิงโลหะ AlCu_4

ตารางที่ 4.5 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) ที่เผาผืนที่ 900°C

Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.20^\circ$)	AlCu ₄ ($2\theta=45.00^\circ$)
30	100	0	0	0
60	100	0	0	0
90	100	0	93	0

ตารางที่ 4.6 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ที่เผาผืนที่ 900°C

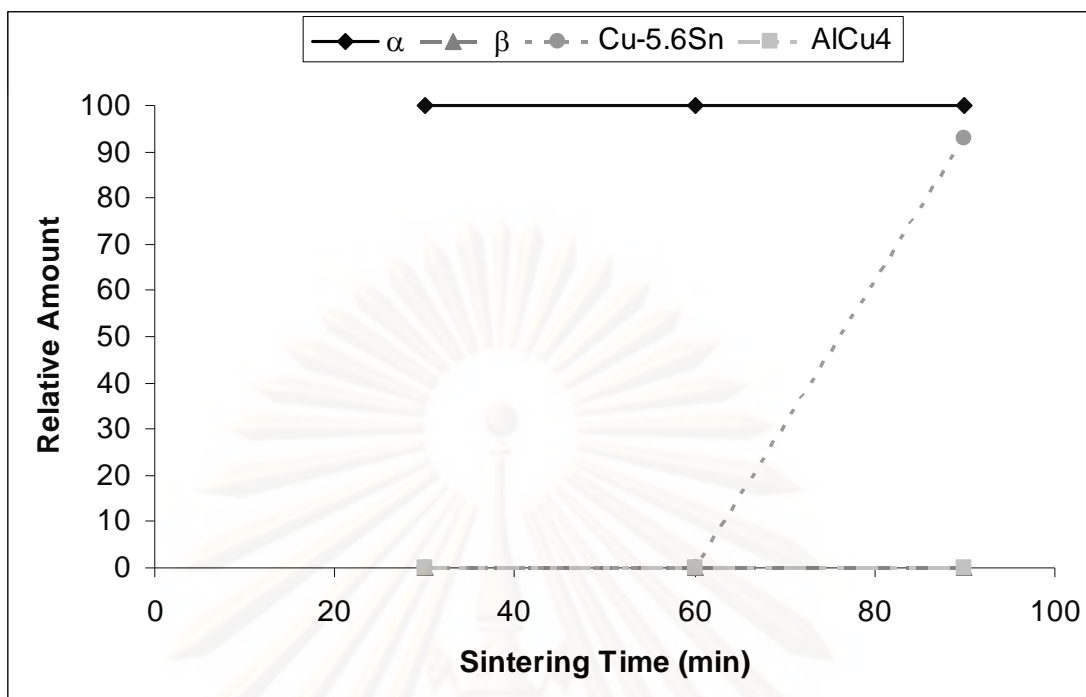
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.20^\circ$)	AlCu ₄ ($2\theta=45.00^\circ$)
30	100	0	0	0
60	100	0	0	0
90	100	0	0	0

ตารางที่ 4.7 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% ที่เผาผืนที่ 900°C

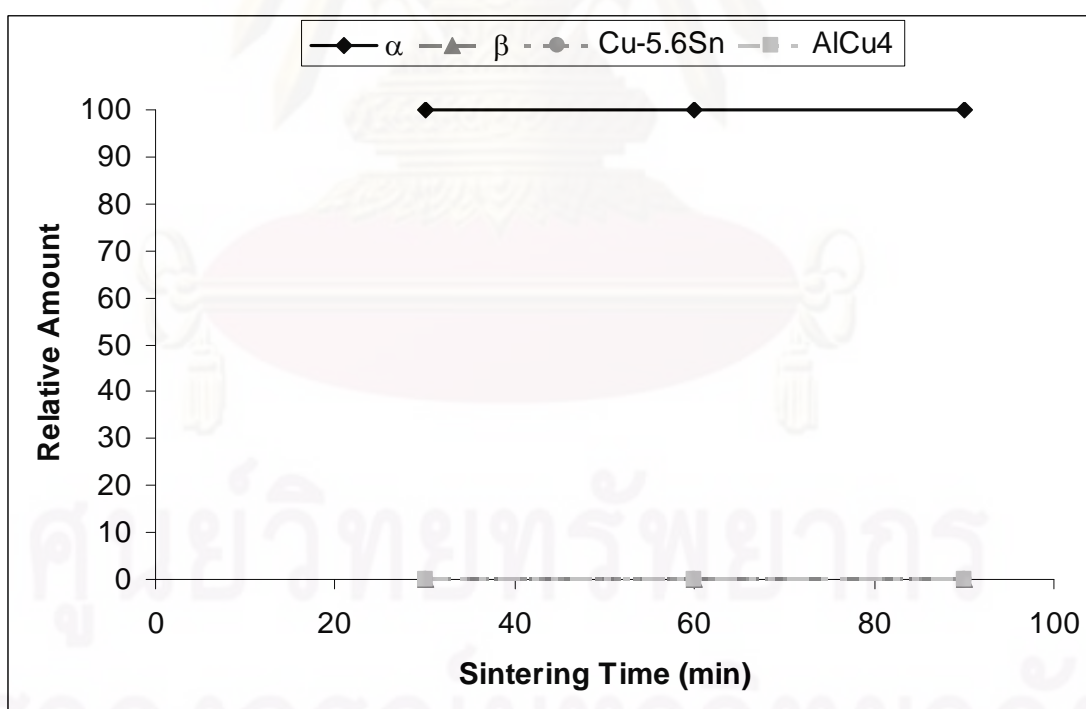
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.20^\circ$)	AlCu ₄ ($2\theta=45.00^\circ$)
30	57	21	0	100
60	85	24	0	100
90	100	11	0	14

ศูนย์วิทยทรัพยากร

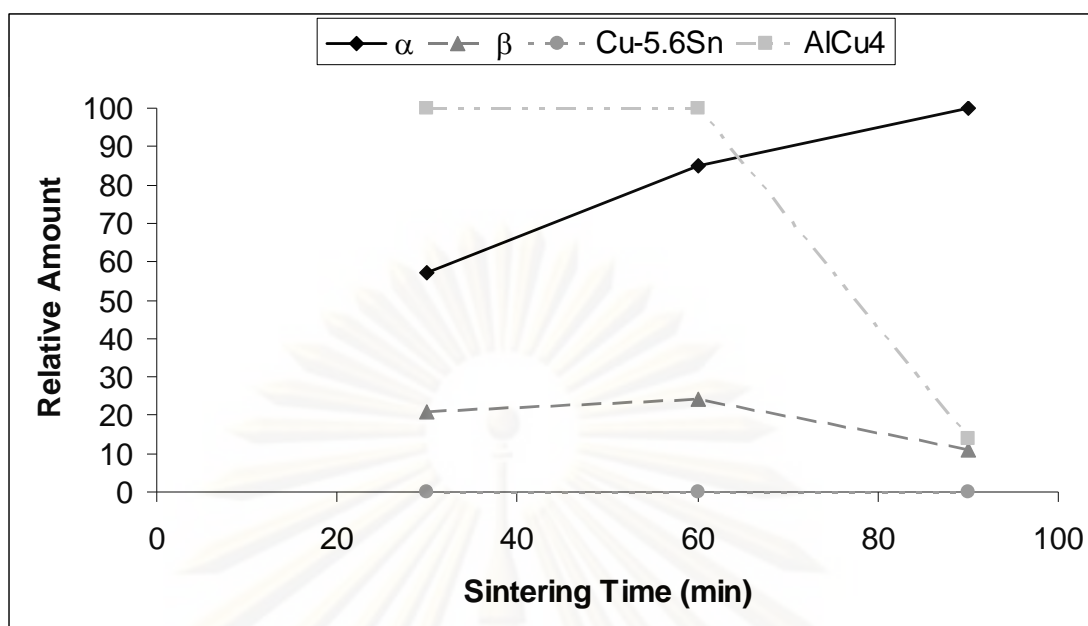
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 4.9 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน 0wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C



ภาพที่ 4.10 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน 5wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C



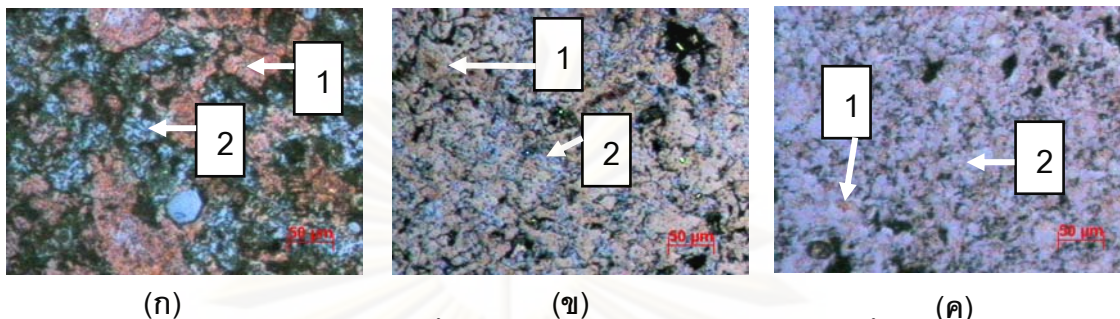
ภาพที่ 4.11 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน 10wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C

พบว่าในชิ้นงาน 10wt%Al ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C นั้น เฟสสารละลายของแข็ง α เพิ่มขึ้น และเฟสสารละลายของแข็ง β มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยตามเวลาการคงอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ส่วนเฟสสารประกอบเชิงโลหะ AlCu₄ มีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

การเกิดเฟส α นี้เกิดจากการแพร่ของอะตอมดีบุกกับทองแดง โดยการที่ทองแดงแพร่เข้าไปในดีบุกได้ดีกว่าการที่ทองแดงแพร่เข้าไปในดีบุกทำให้เกิดช่องว่าง (Kirkendall Void) ขึ้น เมื่อช่องว่างนี้เพิ่มมากขึ้นก็จะกลายเป็นรูพรุน หรือโพรง [7] ทำให้การที่มีปริมาณสารละลายของแข็ง α เพิ่มขึ้นตามเวลาในการคงอุณหภูมิ มีส่วนให้แนวโน้มของความหนาแน่น และปริมาณรูพรุนเป็นไปดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ความหนาแน่นลดลง และปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่วนเฟสสารประกอบเชิงโลหะ AlCu₄ นั้น เป็นสารประกอบเชิงโลหะ ซึ่งเกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยนอนุภาคมูลฐานภายในอะตอม คือ อิเล็กตรอน ซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดเป็นเฟส AlCu₄ ขึ้น ทำให้เกิดเป็นโพรงหรือรูพรุนน้อยกว่า และมีความแข็งสูงกว่าเฟสที่เป็นสารละลายของแข็ง (α และ β) โดยเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็ง และปริมาณดีบุกดังภาพที่ 2.3 (ก) พบว่าเมื่อปริมาณ ดีบุกสูงเกินกว่า 25 wt% จะทำให้ความแข็งเริ่มลดลง หรืออาจจะกล่าวได้อีกอย่างว่า เฟส β มีความแข็งต่ำกว่าเฟส α ดังนั้น การที่มีเฟส β ปรากฏอยู่ในชิ้นงาน แทนที่จะมีแต่เฟส α เพียงอย่างเดียวทำให้ความแข็งลดต่ำลงได้เช่นเดียวกัน

เมื่อนำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วยการขัดชิ้นงานและนำไปกัดด้วยกรด HCl ผสม FeCl₂ แล้วนำไปส่องด้วยกล้อง OM โดยใช้เทคนิคการทำให้เกิด Polarization ของแสง เพื่อทำให้เฟสที่ต่างกัน

เกิดสีที่แตกต่างกัน พบว่ามีโครงสร้างดังภาพที่ 4.12 คือมีลักษณะแบ่งออกเป็น 2 เฟสชัดเจน และโครงสร้างลักษณะนี้ยังพบในทั้งชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al), 5wt%Al และ 10wt%Al (ภาพที่ 4.12 (ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ)



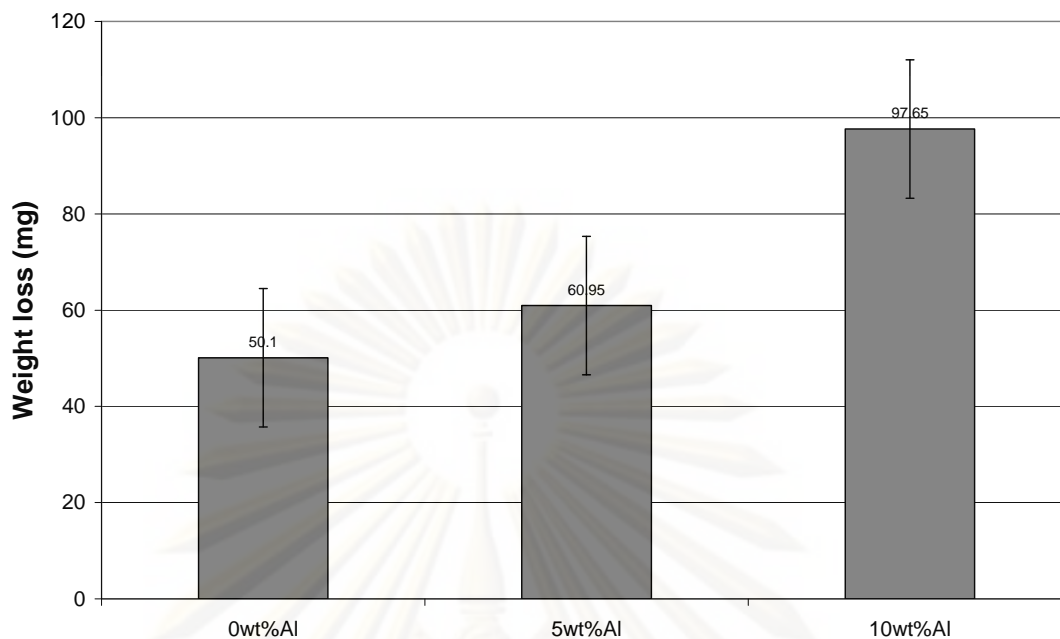
ภาพที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากการกัดด้วยกรดของชิ้นงานที่เผาเหนืกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที (ก) 0wt%Al (ข) 5wt%Al (ค) 10wt%Al

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบภาพโครงสร้างจุลภาคที่เผาเหนืกที่ 900°C กับเผาเหนืกที่ 830°C พบว่ามีความคล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงจะได้ทำการตรวจสอบปริมาณธาตุของเฟสต่างๆ โดยการใช EDS ในหัวข้อ 4.2.3 ต่อไป

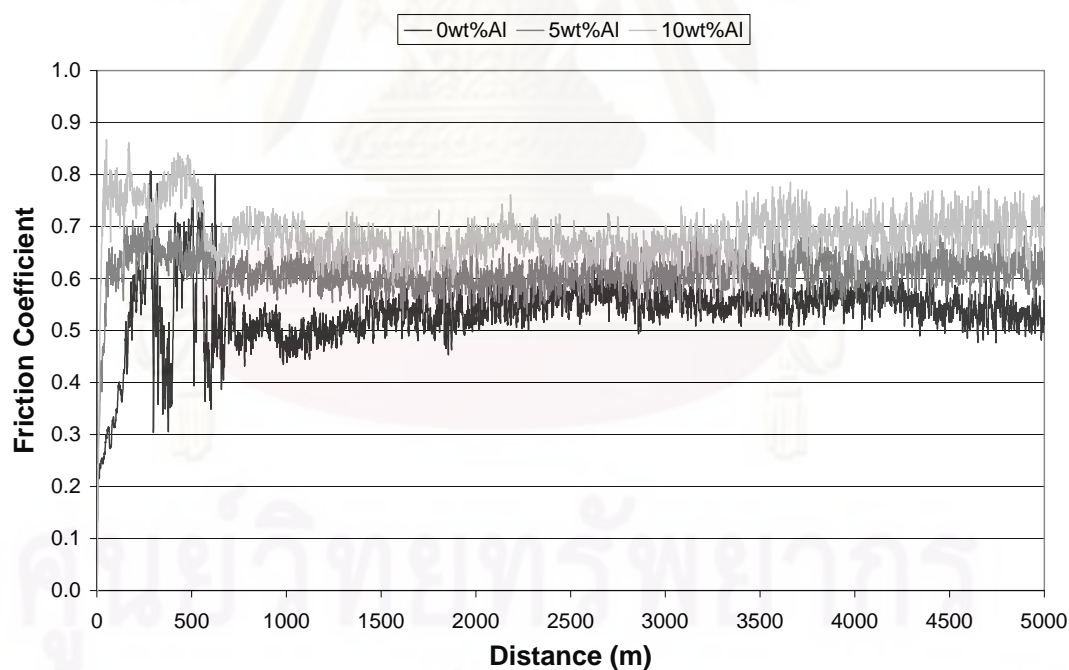
4.1.4 ผลการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-in-disc

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ทำการเผาเหนืกที่ 900°C พบว่าชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูงที่สุดคือชิ้นงานที่เผาเหนืกโดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ดังนั้น สำหรับการทดสอบการสึกหรอชิ้นงานที่เผาเหนืกที่ 900°C นี้จึงเลือกชิ้นงานที่เผาเหนืกโดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาทีไปทำการทดสอบการสึกหรอ

ในการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc นี้จะใช้แรงกดในการทดสอบเท่ากับ 10 นิวตัน ความเร็วเชิงเส้นในการหมุนที่ 0.63 เมตร/วินาที ความถี่ในการหมุน 200 รอบ/นาที และรัศมีการหมุนเป็น 30 มม และใช้ระยะในการทดสอบการสึกหรอ 5000 เมตร ในการทดสอบชิ้นงานทุกชิ้น โดยจะชั่งมวลก่อนและหลังทำการทดสอบของชิ้นงานทดสอบที่เป็น Pin และชิ้นงานที่เป็น disc เพื่อคำนวณมวลที่หายไปหลังจากการทดสอบการสึกหรอ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอจะทำการบันทึกค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างการทดสอบไว้ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบแสดงไว้ในภาพที่ 4.13 และ 4.14



ภาพที่ 4.13 น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc ของชิ้นงาน 0wt%Al, 5wt%Al และ 10wt%Al ที่เผาขึ้นที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที



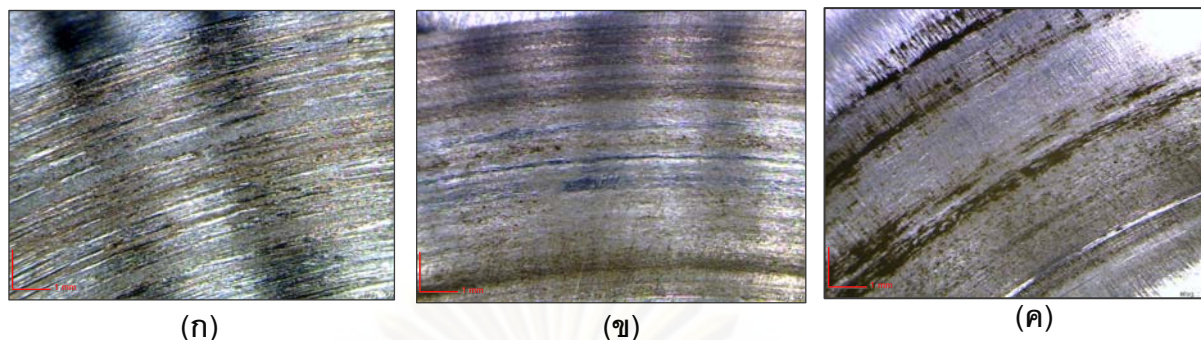
ภาพที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงานที่เผาขึ้นที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที

มวลที่หายไปจากการทดสอบ (การสึกหรอของ) และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยของชิ้นงาน เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

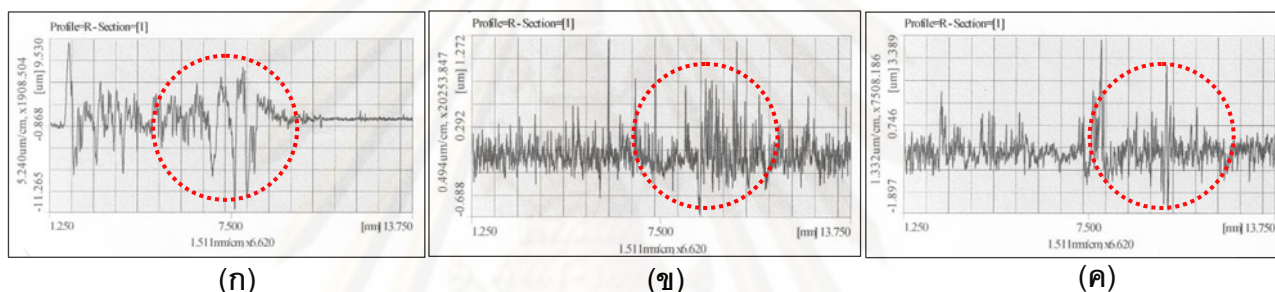
เฉลี่ยสำหรับชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 0 wt%Al, 5 wt%Al และ 10 wt%Al มีค่า 0.5363, 0.6120 และ 0.6852 ตามลำดับ ส่วนมวลของชิ้นงานที่เป็น disc มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในภาพที่ 4.14 พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าต่ำในตอนเริ่มต้น แต่จะค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้นและจะลดลงจนมีค่าคงที่ ทั้งนี้ เป็นเพราะว่า ในช่วงแรกของการทดสอบการสึกหรอ หน้าสัมผัสของชิ้นงานที่เป็น Pin จะสัมผัสโดยตรงกับชิ้นงานที่เป็น Disc ทำให้ชิ้นงานที่เป็น Pin เกิดการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) เศษที่แตกออกมาจากหน้าสัมผัสชิ้นงานที่เป็น Pin จะถูกแรงกระทำจากการเสียดสีขัดตัวติดกับแผ่น Disc ด้วยกลไกการเกาะติด (Adhesion) ของเศษหรืออนุภาคจากการสึกหรอกับหน้าสัมผัส Disc กลายเป็นชั้นที่เกิดจากการเกาะติด (Transfer Layer) เคลือบบนผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม [2] ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 4.15 ทำให้หน้าสัมผัสของการทดสอบการสึกหรอเปลี่ยนเป็นหน้าสัมผัสระหว่าง ชิ้นงานที่เป็น Pin กับ ชั้นที่เกิดการเกาะติดบน Disc ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าคงที่

เมื่อนำชิ้นงานที่เป็น Disc ไปวัด Surface Roughness พบว่าความหยาบผิวเฉลี่ยของ disc ที่ทำการทดสอบการสึกหรอกับชิ้นงานที่เป็น Pin ที่มีสัดส่วนในการเติมอะลูมิเนียม 0 wt%Al, 5 wt%Al และ 10 wt%Al มีค่า 1.284, 0.120 และ 0.296 μm และ Surface Roughness Profile แสดงดังภาพที่ 4.16 ((ก) – (ค)) เนื่องจากเศษที่เกิดจากการสึกหรอจะมีความแข็งสูงกว่าชิ้นงานที่เป็น Disc เนื่องจากได้รับผลของ Work hardening ระหว่างการทดสอบการสึกหรอ ทำให้เกิดบริเวณที่เป็นร่องลึก (Ploughing) บนที่ชิ้นงานที่เป็น Disc (วงกลมเส้นประในรูป 4.16) และเมื่อนำเศษที่เกิดจากการสึกหรอมาทำการตรวจสอบโดยใช้ EDS เพื่อตรวจสอบปริมาณธาตุที่มีอยู่ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.8 พบว่ามีปริมาณของธาตุออกซิเจน (O) สูง แสดงว่าการทดสอบการสึกหรอในสภาวะที่ไม่ได้อัดน้ำมัน (Dry Condition) ทำให้เกิดอนุมูลอิสระระหว่างหน้าสัมผัสสูง ส่งผลให้เกิดการสึกหรอแบบเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidative Wear) ร่วมกับการสึกหรอแบบขัดถู เมื่อทำการตรวจสอบเฟสที่เกิดด้วย XRD ผลแสดงในภาพที่ 4.17 พบว่าเศษจากการสึกหรอจากการทดสอบชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0 wt%Al) ประกอบด้วยเฟส α ส่วนเศษที่เกิดจากการทดสอบชิ้นงาน 5wt% และ 10 wt%Al ประกอบด้วย ออกไซด์ของทองแดงที่อยู่ในรูป Cu_2O และจากผล EDS ยังพบปริมาณของ เหล็ก (Fe) และโครเมียม (Cr) ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเหล็กกล้าไร้สนิม แสดงว่าชิ้นงานที่เป็น Disc นั้นเกิดการสึกหรอด้วย เนื่องจากเศษที่เกิดจากการสึกหรอจะมีความแข็งสูงกว่าดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น



ภาพที่ 4.15 ภาพถ่ายมหภาคของชิ้นงานที่เป็น Disc ภายหลังจากทดสอบการสึกหรอกับชิ้นงานที่เป็น Pin ที่มีสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม (ก) 0wt%, (ข) 5wt% และ (ค) 10wt% ตามลำดับ ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที



ภาพที่ 4.16 Surface Roughness Profile ของชิ้นงานที่เป็น Disc ภายหลังจากทดสอบการสึกหรอกับชิ้นงานที่เป็น Pin ที่มีสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม (ก) 0wt%, (ข) 5wt% และ (ค) 10wt% ตามลำดับ ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที

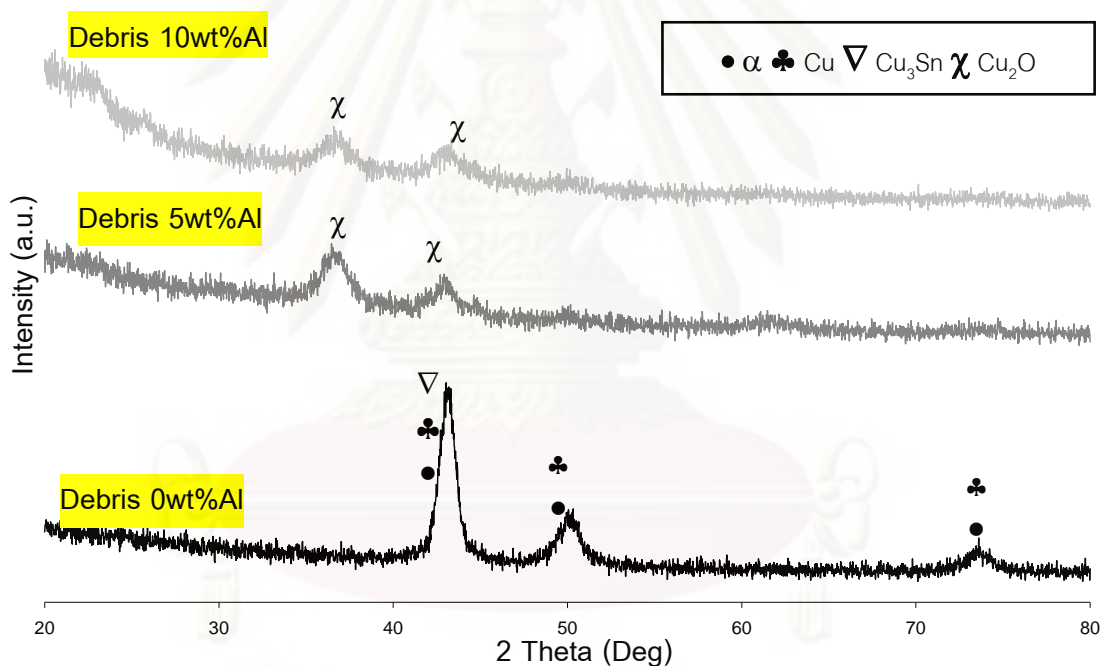
ผลของสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อปริมาณรูพรุน และความแข็งของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ในภาพที่ 4.3 และ 4.4 พบว่าปริมาณรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น และความแข็งลดต่ำลง เมื่อปริมาณการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มวลที่หายไปหลังจากการทดสอบการสึกหรอเพิ่มขึ้น

การที่มวลที่หายไปเนื่องจากการสึกหรอ เพิ่มขึ้นแสดงว่าเมื่อผลิตชิ้นงานโดยใช้สัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานเกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อายุการใช้งานสั้นลง ดังนั้นจึงควรต้องนำชิ้นงานไปทำการปรับปรุงสมบัติให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นโดยการนำไปผ่านกระบวนการอบชุบความร้อน โดยการทำการชุบแข็ง (Hardening) ก่อนที่จะนำไปใช้งานเพื่อทำให้การสึกหรอลดต่ำลง ซึ่งผลจากการทำชุบแข็ง จะได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.3 และเมื่อผลิตชิ้นงานที่นำไปใช้งานจริงจะต้องมีการนำชิ้นงานไปทำการอัดด้วยน้ำมันเพื่อให้ไขมันเข้าไปแทรกตัวอยู่ในรูพรุน โดยระหว่างการทำไปใช้งาน น้ำมันในรูพรุนก็จะไหลออกมาจากรูพรุนและเกิดการ

หล่อขึ้นชิ้น จึงทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงและมีค่าไม่ต่างกันมาก และการสึกหรอก็จะลดลงด้วย

ตารางที่ 4.8 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) เฉลี่ยของธาตุองค์ประกอบจากเศษที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่มีสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม 0 wt%, 5 wt% และ 10 wt% เเผาะนิกที่อุณหภูมิ 900°C

ชิ้นงาน	O	Al	Cr	Fe	Cu	Sn
0 wt%Al	13.48	0.00	0.49	1.22	74.51	10.47
5 wt%Al	31.69	2.21	0.78	2.92	55.41	7.72
10 wt%Al	53.71	7.34	0.97	3.38	28.48	6.08



ภาพที่ 4.17 XRD Pattern ของเศษที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เเผาะนิกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที

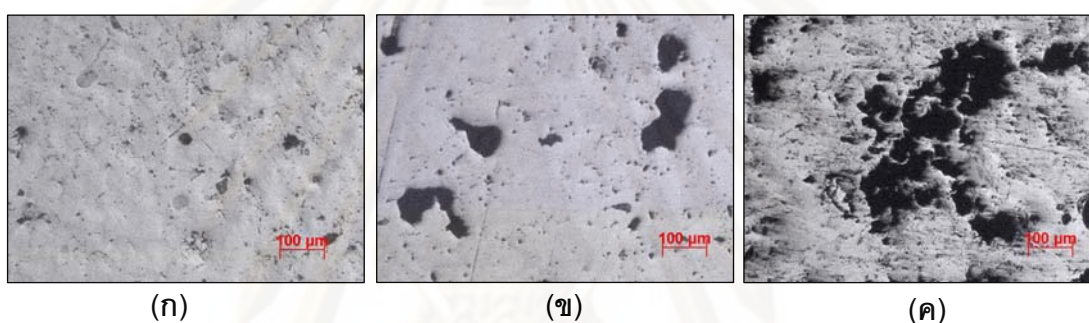
4.2 ผลการทดลองเมื่อเเผาะนิกที่อุณหภูมิ 830°C

ในการเเผาะนิกที่ 830°C นี้ ใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 5, 30, 45, 60 และ 90 นาที โดยในแต่ละเวลาในการคงอุณหภูมิได้ทำการเเผาะนิกชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ที่มี

สัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียมต่างๆกัน คือ 0%, 5% และ 10% โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และผลของสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม

4.2.1 โครงสร้างจุลภาค

ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เช่นเดียวกับการเผาที่ 900°C เพื่อศึกษาลักษณะของเนื้อพื้นของชิ้นงาน ลักษณะของรูพรุน พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันในแต่ละระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ คือ ยังพบเช่นเดียวกับที่ชิ้นงานที่เผาที่อุณหภูมิ 900°C ว่าเมื่อสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นทำให้พบรูพรุนมากขึ้นและมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างได้ดังภาพที่ 4.18 (ก) – (ค)



ภาพที่ 4.18 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 830°C ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่สัดส่วนในการเติมอะลูมิเนียม (ก) 0wt%, (ข) 5wt% และ (ค) 10wt% ตามลำดับ

4.2.2 ความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย

ค่าความหนาแน่น และปริมาตรรูพรุน ทำการวัดและคำนวณด้วยวิธีของอาคิมิดีส ซึ่งผลที่ได้จากการวัดและคำนวณ ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 0%, 5% และ 10% สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.9, 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และความแข็ง มาเปรียบเทียบกันดังแสดงในภาพที่ 4.19 และ 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ

พบว่า ความหนาแน่นของชิ้นงาน 0wt%Al, 5wt%Al และ 10wt%Al มีค่าสูงสุดเมื่อเผาที่ 900°C โดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 90 นาที ซึ่งมีค่า 7.88, 6.37 และ 4.76 g/cm^3 ตามลำดับ ทำให้ที่เวลาในการคงอุณหภูมิ 90 นาทีนี้ มีค่าปริมาตรรูพรุนต่ำที่สุด โดยมีค่า 10.16%, 19.92% และ 35.16% ตามลำดับ แต่พบว่าความแข็งไม่ได้มีค่าสูงที่สุดที่เวลาในการคงอุณหภูมิ 90 นาที

แต่สูงสุดเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเป็น 60 นาที โดยมีค่า 77.67 HV, 41.00 HV และ 38.9 HV สำหรับชิ้นงาน 0wt%, 5wt และ 10wt% ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่ไม่ได้เติมผงอะลูมิเนียม (0wt% Al) เผาเนื้อที่ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ

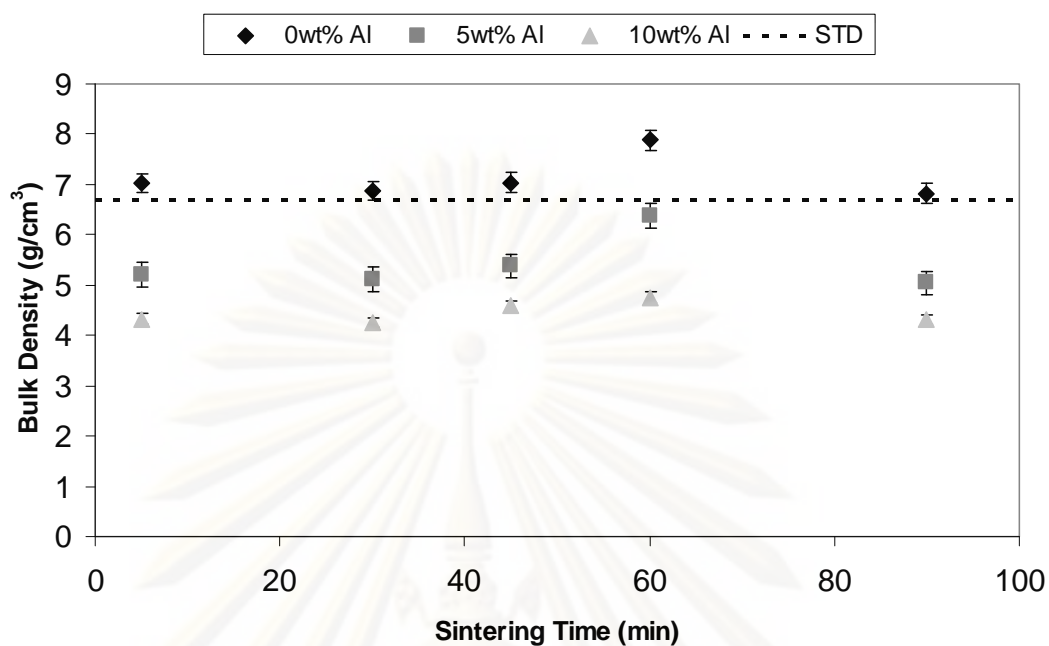
Sintering Time (min)	Bulk Density (g/cm ³)	% Porosity	Hardness (HV _{1kg})
5	7.03	15.63	35.40
30	6.87	18.73	75.51
45	7.04	17.77	43.40
60	6.82	20.88	77.67
90	7.88	10.16	68.67

ตารางที่ 4.10 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก เผาเนื้อที่ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ

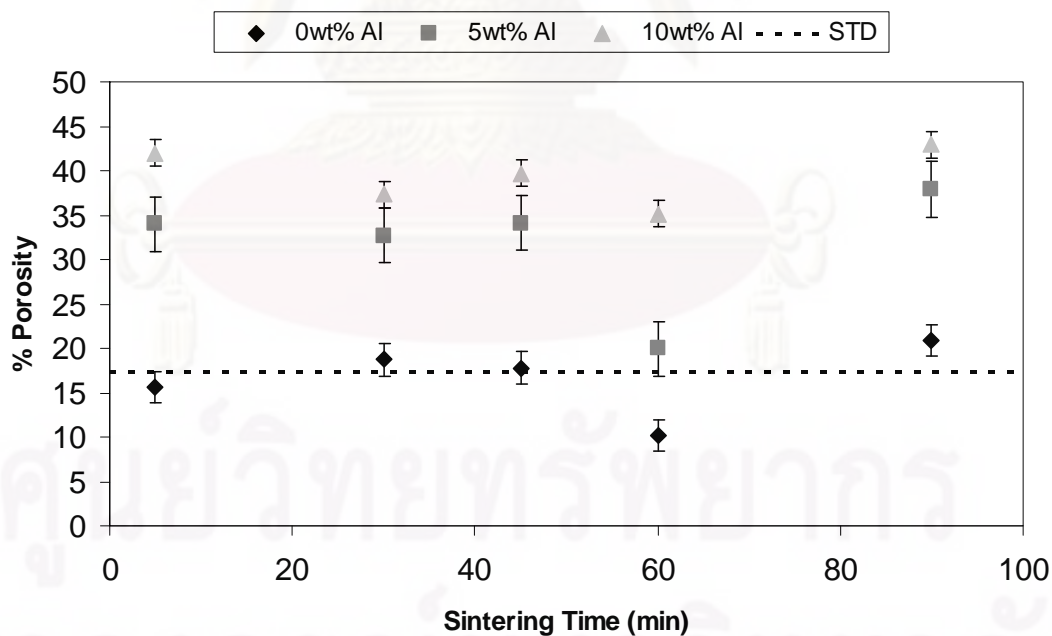
Sintering Time (min)	Bulk Density (g/cm ³)	% Porosity	Hardness (HV _{1kg})
5	5.22	33.98	24.70
30	5.12	32.71	33.92
45	5.38	34.12	25.50
60	5.04	37.89	41.00
90	6.37	19.92	37.60

ตารางที่ 4.11 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งเฉลี่ย ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 10% โดยน้ำหนัก เผาเนื้อที่ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ

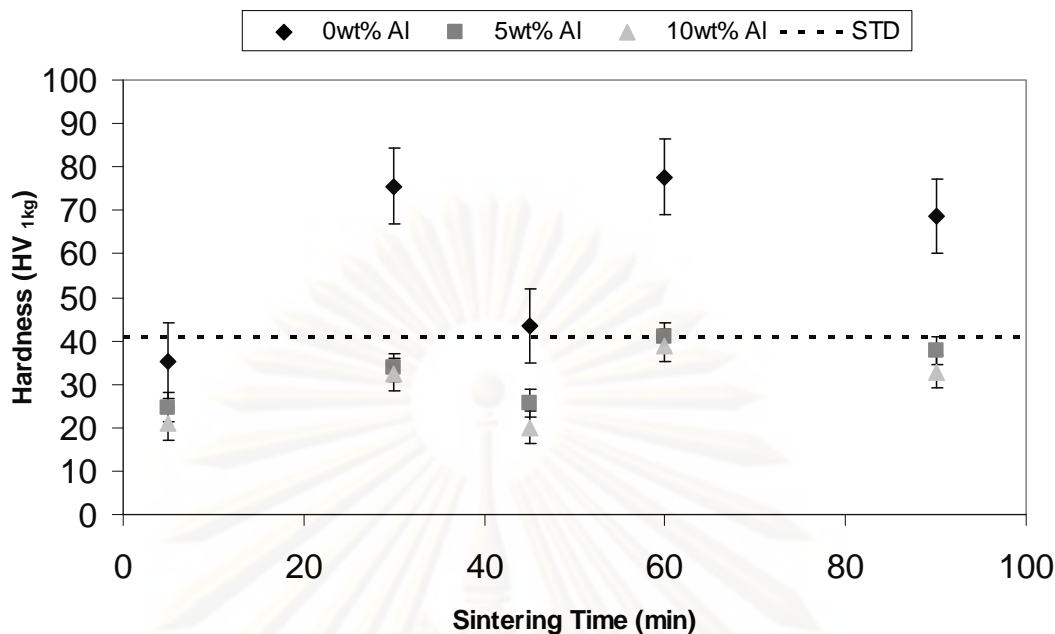
Sintering Time (min)	Bulk Density (g/cm ³)	% Porosity	Hardness (HV _{1kg})
5	4.33	41.99	20.90
30	4.25	37.30	32.31
45	4.58	39.72	20.10
60	4.31	42.91	38.90
90	4.76	35.16	32.90



รูปที่ 4.19 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อความหนาแน่นเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เเผาผนังที่อุณหภูมิ 830°C



รูปที่ 4.20 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อปริมาณรูพรุนเฉลี่ย ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เเผาผนังที่อุณหภูมิ 830°C



รูปที่ 4.21 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ และสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก เเผฉนิกที่อุณหภูมิ 830°C

เส้นประ (STD) แสดงค่าความหนาแน่น ปริมาตรรูพรุน และความแข็งของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% ที่ไม่ได้เติมผงอะลูมิเนียม (0%Al) ซึ่งเผฉนิกมาจากโรงงาน K-Powder (กทม.) ที่อุณหภูมิ Debinding ที่ 380°C เป็นเวลา 25 นาที และเผฉนิกที่อุณหภูมิ 770°C ใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 25 นาที โดยใช้เตาเผาแบบต่อเนื่อง (Continuous Furnace) ใช้ความเร็วของสายพาน 25 ซม./นาที ภายใต้บรรยากาศ N₂ 90% และ H₂ 10% มีความหนาแน่น 6.68 g/cm³ ปริมาตรรูพรุน 17.33% และความแข็ง 40.8 HV เช่นเดียวกัน

ที่อุณหภูมิ 830°C ผลการเติมผงอะลูมิเนียมในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลเช่นเดียวกับที่อุณหภูมิ 900°C คือความหนาแน่นลดต่ำลง ในทุกเวลาในการคงอุณหภูมิ และมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานจากโรงงาน ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าปริมาตรรูพรุนเปรียบเทียบกันก็จะเห็นว่าแนวโน้มที่สอดคล้องกัน คือ ค่าปริมาตรรูพรุนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเติมผงอะลูมิเนียมในสัดส่วนที่มากขึ้น และการที่ชิ้นงานมีความหนาแน่นต่ำลง และปริมาตรรูพรุนสูงขึ้น มีส่วนทำให้ความแข็งชิ้นงานลดต่ำลง ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว

ส่วนเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆกัน เห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และค่าปริมาตรรูพรุนก็จะมีแนวโน้มที่ต่ำลงเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าเป็นเพราะอุณหภูมิในการเผฉนิกที่ต่ำลงจึงทำให้ต้องการเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และความแข็งมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและสูงที่สุดที่ช่วงเวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที แล้วหลังจากนั้นจะลดลง แต่พบว่าที่เวลาในการคงอุณหภูมิ

45 นาที มีค่าความแข็งลดลงผิดไปจากแนวโน้ม ซึ่งจะได้ทำการตรวจสอบและวิเคราะห์สาเหตุจากการ โดยการตรวจสอบธาตุและองค์ประกอบทางเคมีต่อไป

เมื่อคำนวณความดันไอของอะลูมิเนียมเมื่อทำการเผาที่ 830°C โดยใช้สมการที่ 4.1 พบว่ามีค่า $0.17 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ซึ่งเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศแล้วก็ยังมีค่าน้อยกว่าอยู่มาก และเมื่อพิจารณาน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการเผาขึ้นงานที่อุณหภูมิ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่าง ๆ กันดังแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าขึ้นงานทั้งหมดมีน้ำหนักที่หายไปน้อยกว่าน้ำหนักของสารหลอมละลายที่มีอยู่ในชิ้นงาน ซึ่งมีค่าเท่ากับทุกชิ้นงานเท่ากับ 0.045 g

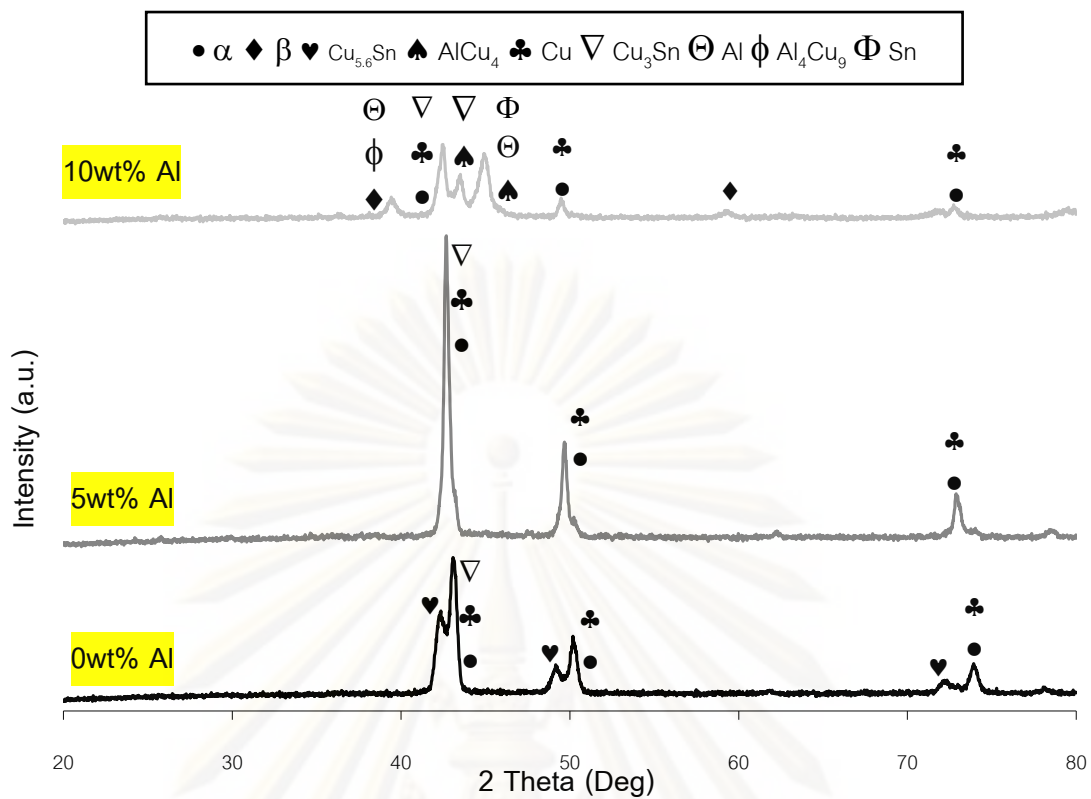
ดังนั้น อาจจะสามารถสรุปได้เช่นเดียวกับกรณีเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900°C คือ สาเหตุหลักที่ทำให้ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนการเติมอะลูมิเนียมเพิ่ม คือ ปรากฏการณ์ Kirkendall Effect ซึ่งเมื่อปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นทำให้ความหนาแน่นลดลง และมีส่วนทำให้ความแข็งลดลงด้วย [6, 7]

ตารางที่ 4.12 น้ำหนักที่ลดลงภายหลังการเผาที่อุณหภูมิ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่าง ๆ กัน

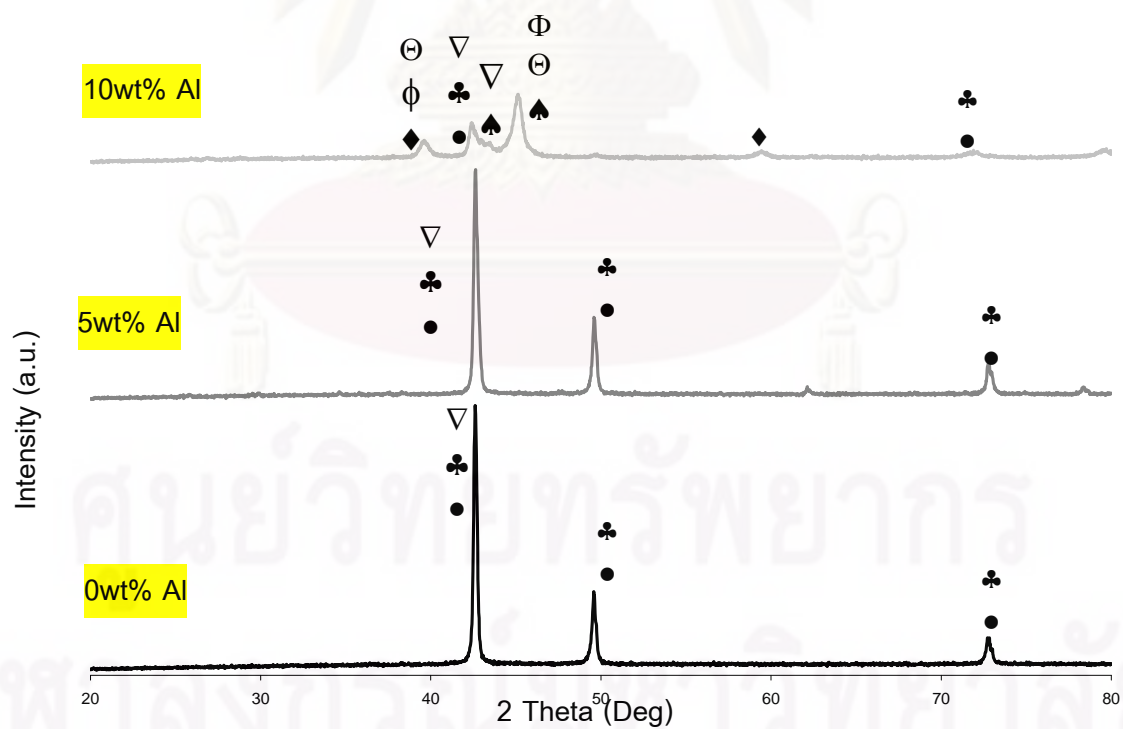
Sintering Time (min)	0 wt%Al (g)	5 wt%Al (g)	10 wt%Al (g)
5	0.040	0.035	0.040
30	0.035	0.040	0.025
45	0.050	0.035	0.035
60	0.040	0.035	0.030
90	0.030	0.040	0.030

4.2.3 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและสารประกอบ

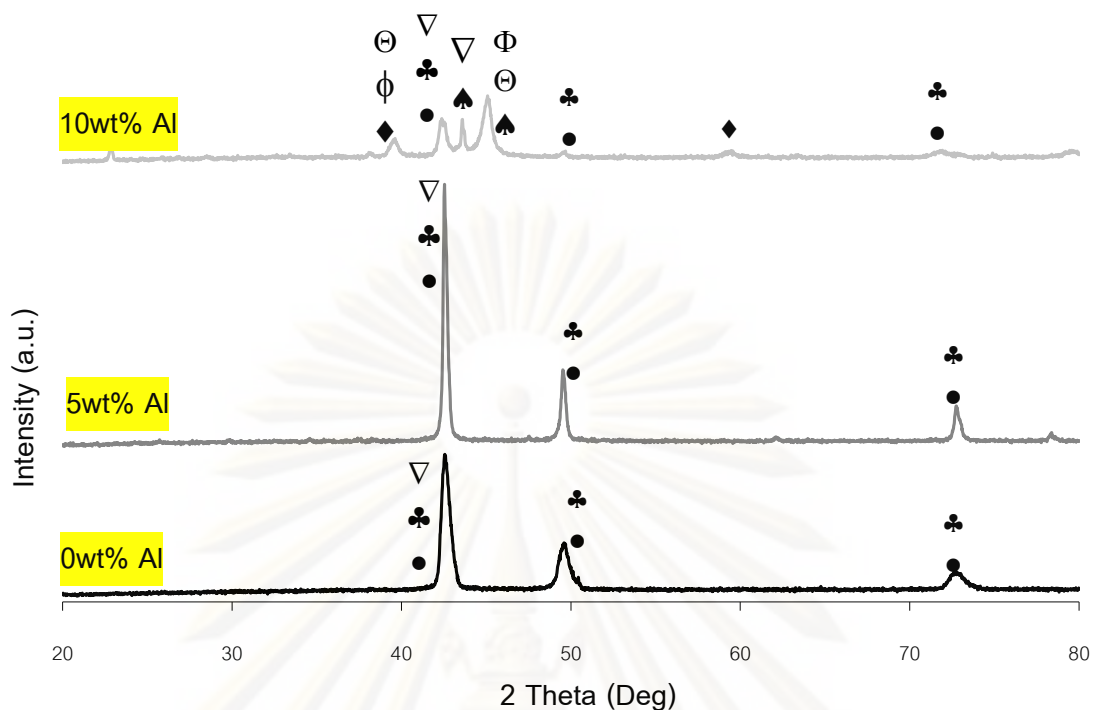
เพื่อทำการศึกษาธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นภายหลังการเผา จึงนำชิ้นงานที่เผาแล้วไปทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งผลที่ได้จากเครื่อง XRD จะบอกให้ทราบถึงธาตุและสารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นงาน โดยในการตรวจสอบนี้ใช้ค่า Scan speed 3 องศา/นาที Sampling width 0.020 องศา ซึ่งผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่เผาที่ 830°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิ 30, 45, 60 และ 90 นาที สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.22, 4.23, 4.24 และ 4.25 ตามลำดับ



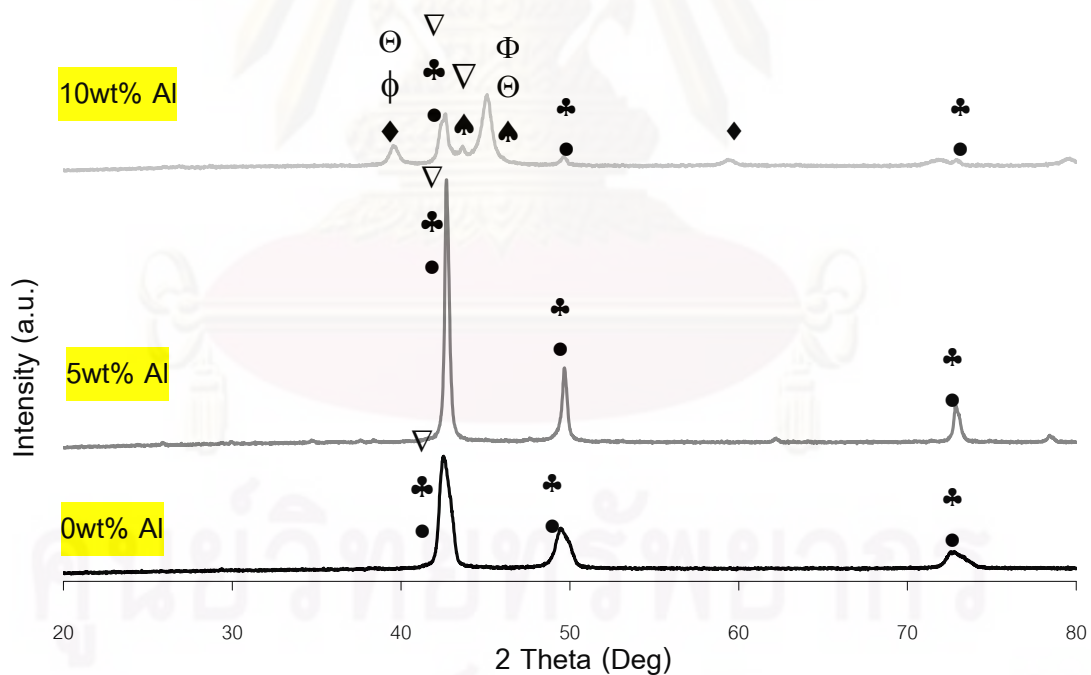
ภาพที่ 4.22 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผืนที่ 830° เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที



ภาพที่ 4.23 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผืนที่ 830° เวลาในการคงอุณหภูมิ 45 นาที



ภาพที่ 4.24 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผืนึกที่ 830° เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที



ภาพที่ 4.25 XRD Pattern ของชิ้นงานที่เผาผืนึกที่ 830° เวลาในการคงอุณหภูมิ 90 นาที

จากการตรวจสอบด้วย XRD พบเฟสหลักที่ปรากฏอยู่ในชิ้นงานเช่นเดียวกับที่พบเมื่อเผาผืนึกที่อุณหภูมิ 900°C คือ สารละลายของแข็ง α โดยพบทั้งในชิ้นงาน 0wt%Al, 5wt%Al และ

10wt% โดยชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) และชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt% พบแต่เฟส α เพียงเฟสเดียว และพบว่า Peak เกิดการ Shift ไปประมาณ 1° ทำให้ค่า Lattice Parameter (d) เพิ่มขึ้น พร้อมกันนั้นพบว่าการละลายของอะลูมิเนียมทำให้มุม θ Shift ไปประมาณ 0.2° เช่นเดียวกับการเผาที่ 900°C อย่างไรก็ตามชิ้นงาน 0wt%Al ที่เผาที่อุณหภูมิ 830°C โดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที พบว่า Peak แยกออกเป็น 2 ยอดเหมือนกับที่พบเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 900°C ที่เวลาในการคงอุณหภูมิ 90 นาที ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ JCPDS พบว่าตรงกับเฟสสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic) $\text{Cu}_{5.6}\text{Sn}$ เช่นเดียวกัน ส่วนชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% พบเฟสสารละลายของแข็ง β และสารประกอบเชิงโลหะ AlCu_4 เช่นเดียวกัน

เมื่อคำนวณปริมาณโดยสัมพัทธ์ (Relative Amount) โดยผลที่ได้จากการคำนวณ ของชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 0%, 5% และ 10% เมื่อเผาที่ 830°C และใช้เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 ตามลำดับ จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับดังแสดงในภาพที่ 4.26 และ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.13 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) ที่เผาที่ 830°C

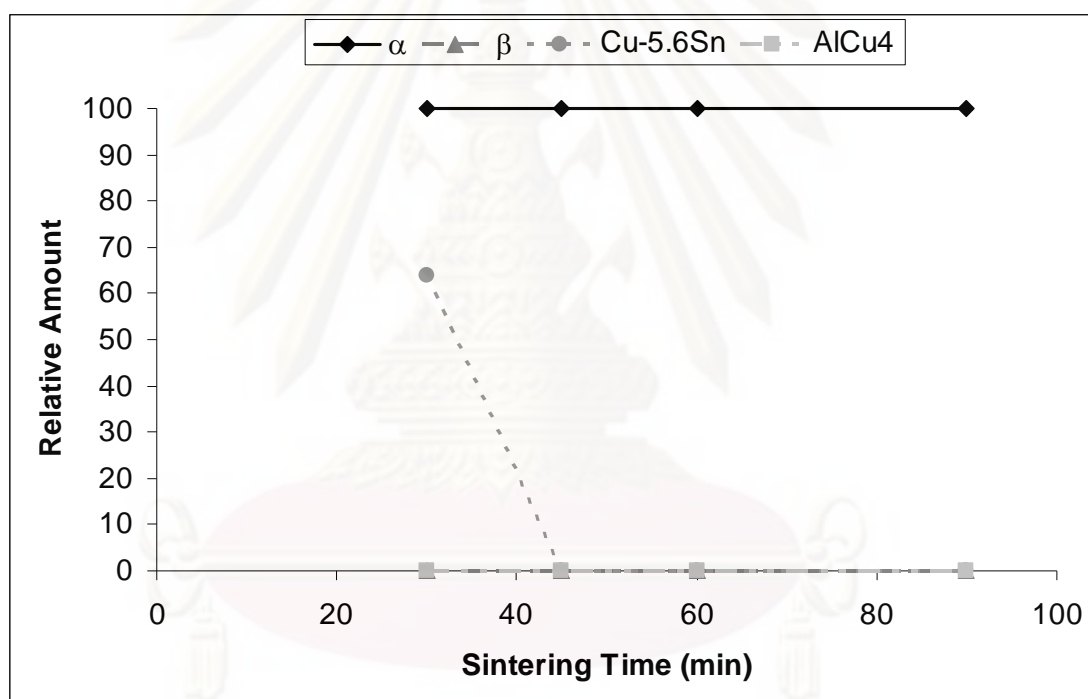
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.26^\circ$)	AlCu_4 ($2\theta=45.00^\circ$)
30	100	0	64	0
45	100	0	0	0
60	100	0	0	0
90	100	0	0	0

ตารางที่ 4.14 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ที่เผาที่ 830°C

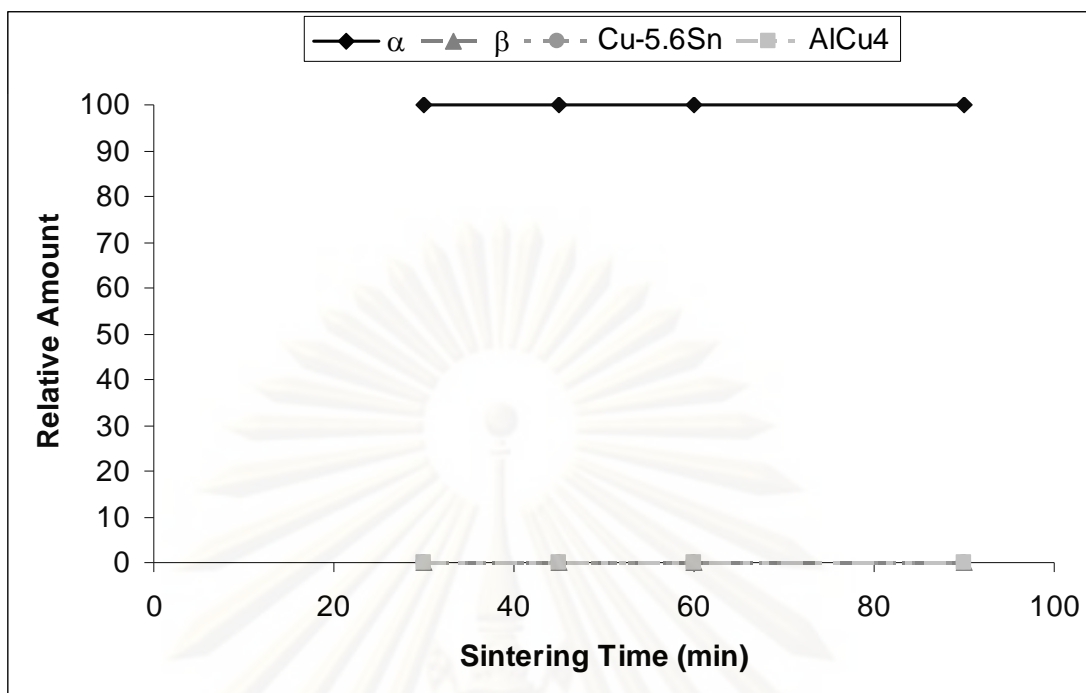
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.26^\circ$)	AlCu_4 ($2\theta=45.00^\circ$)
30	100	0	0	0
45	100	0	0	0
60	100	0	0	0
90	100	0	0	0

ตารางที่ 4.15 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt%Al ที่เผาขึ้นที่ 830°C

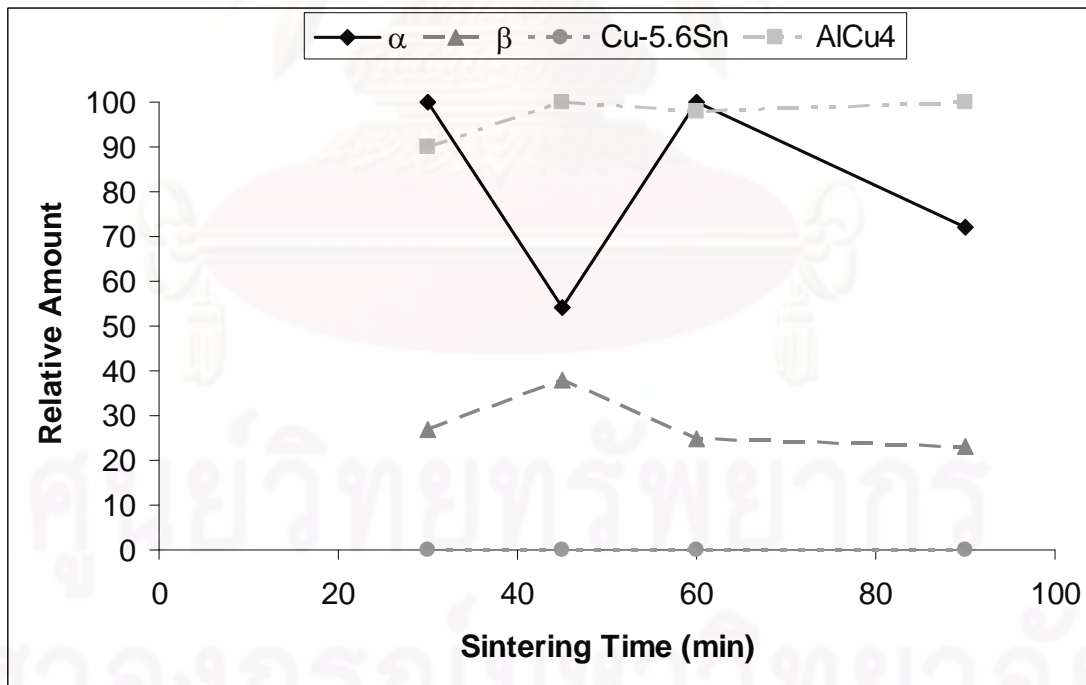
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.26^\circ$)	$AlCu_4$ ($2\theta=45.00^\circ$)
30	100	27	0	90
45	54	38	0	100
60	100	25	0	98
90	72	23	0	100



ภาพที่ 4.26 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน 0wt%Al ที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 830°C



ภาพที่ 4.27 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน 5wt%Al ที่เผาผืนที่อุณหภูมิ 830°C

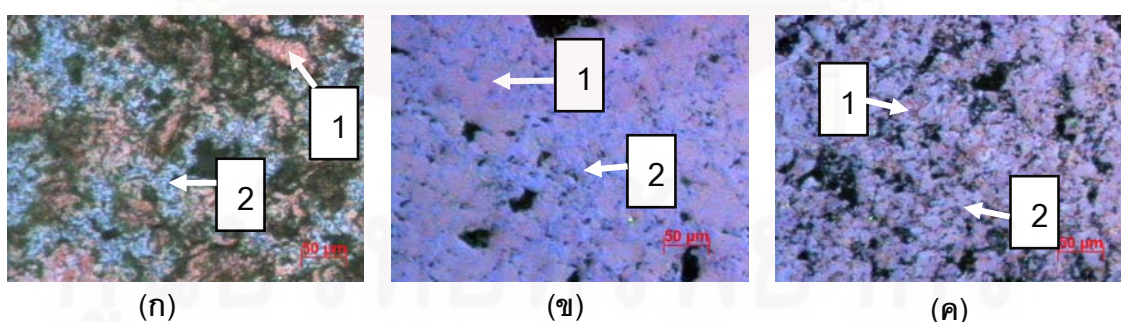


ภาพที่ 4.28 ผลของเวลาในการคงอุณหภูมิ ต่อปริมาณโดยสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน 10wt%Al ที่เผาผืนที่อุณหภูมิ 830°C

พบว่าในชิ้นงาน 10wt%Al ที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 830°C นั้น มีแนวโน้มการเกิดเฟสสารละลายของแข็ง α ที่ลดลง แต่พบว่าปริมาณลดลงผิดปกติเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเป็น 45 นาที และเฟสสารละลายของแข็ง β เพิ่มขึ้นแล้วลดลงเล็กน้อยตามเวลาการคงอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น ส่วนเฟสสารประกอบเชิงโลหะ AlCu_4 มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

การที่มีปริมาณสารละลายของแข็ง α ลดลงตามเวลาในการคงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดช่องว่าง (Kirkendall Void) ขึ้นได้น้อยลง ทำให้แนวโน้มของความหนาแน่น และปริมาณรูพรุนเป็นไปดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และปริมาณรูพรุนมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้การที่เฟสที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะ (AlCu_4) ซึ่งมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นตามเวลาในการคงอุณหภูมิที่สูงขึ้น เป็นอีกสาเหตุที่ทำให้แนวโน้มของแข็งงานที่เผาขึ้นที่ 830°C นี้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาในการคงอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น และเช่นกันกับการเผาขึ้นที่ 900°C การพบเฟส β ที่มีความแข็งต่ำกว่า α มีส่วนทำให้ความแข็งลดต่ำลงด้วย ส่วนการที่ชิ้นงานซึ่งเผาขึ้นโดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 45 นาทีมีค่าต่ำลงผิดไปจากแนวโน้ม น่าจะเป็นเพราะ สัดส่วนของเฟส α ลดลงทำให้ความแข็งลดลง ซึ่งสาเหตุและกลไกที่แท้จริงจะได้ทำการตรวจสอบต่อไปในอนาคต

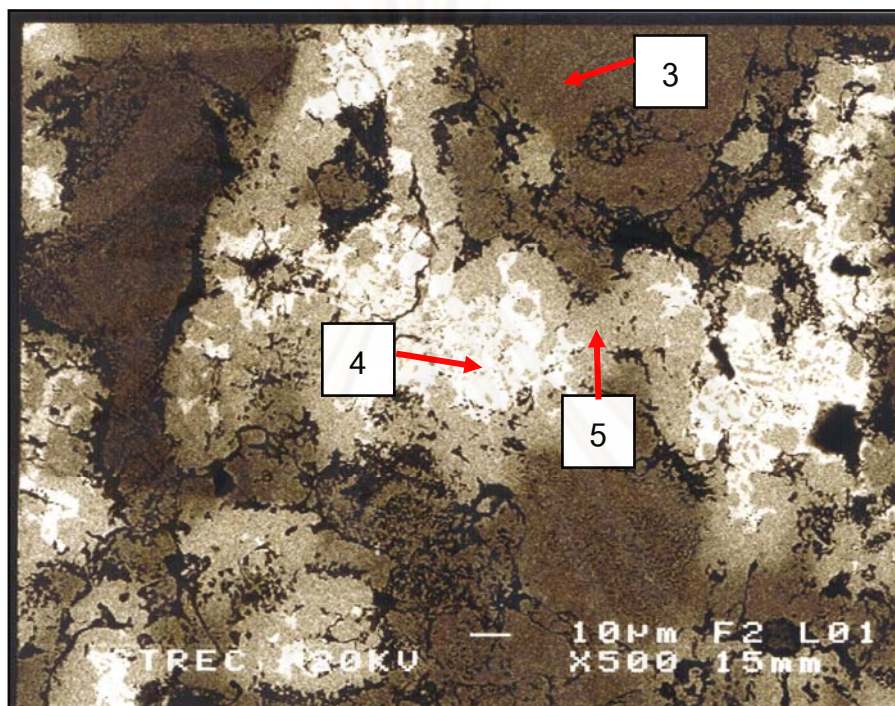
เมื่อนำชิ้นงานมาตรวจสอบด้วยการขัดชิ้นงานและนำไปกัดด้วยกรด HCL ผสม FeCl_2 แล้วนำไปส่องด้วยกล้อง OM โดยใช้เทคนิคการทำให้เกิด Polarization ของแสง เพื่อทำให้เฟสที่ต่างกันเกิดสีที่แตกต่างกัน พบว่ามีโครงสร้างคล้ายคลึงกับที่พบในชิ้นงานที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 900°C ดังแสดงในภาพที่ 4.29 (ก) – (ค)



ภาพที่ 4.29 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานภายหลังจากการกัดด้วยกรดของชิ้นงานที่เผาขึ้นที่ 830°C (ก) 0wt%Al (ข) 5wt%Al (ค) 10wt%Al

เมื่อชิ้นงานไปตรวจสอบโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาด (SEM) ด้วยโหมด Backscattered electron (BSE) ของชิ้นที่ไม่ได้ผสม (0wt%Al) สามารถแสดงได้ดัง

ภาพที่ 4.29 และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่มีในชิ้นงาน คือ Energy Dispersive X-Ray Spectrometry (EDS) ที่ต่ออยู่กับเครื่อง SEM ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ธาตุที่ตำแหน่งหมายเลข 3 – 5 (ภาพที่ 4.30) แสดงดังตารางที่ 4.16



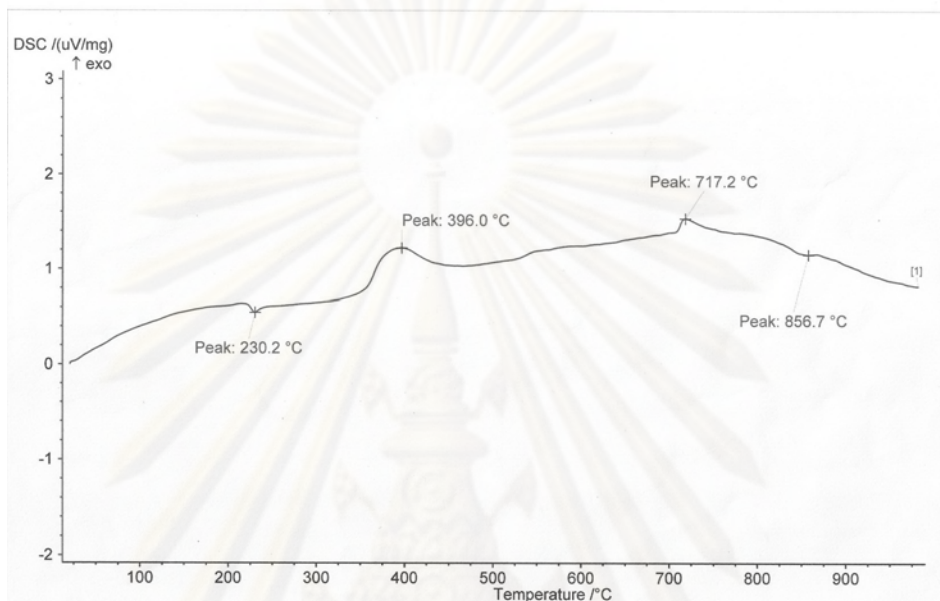
ภาพที่ 4.30 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในโหมด BSE ของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) เผาผืนที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที

ตารางที่ 4.16 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ของธาตุที่พบในบริเวณต่างๆของชิ้นงานดังภาพที่ 4.24

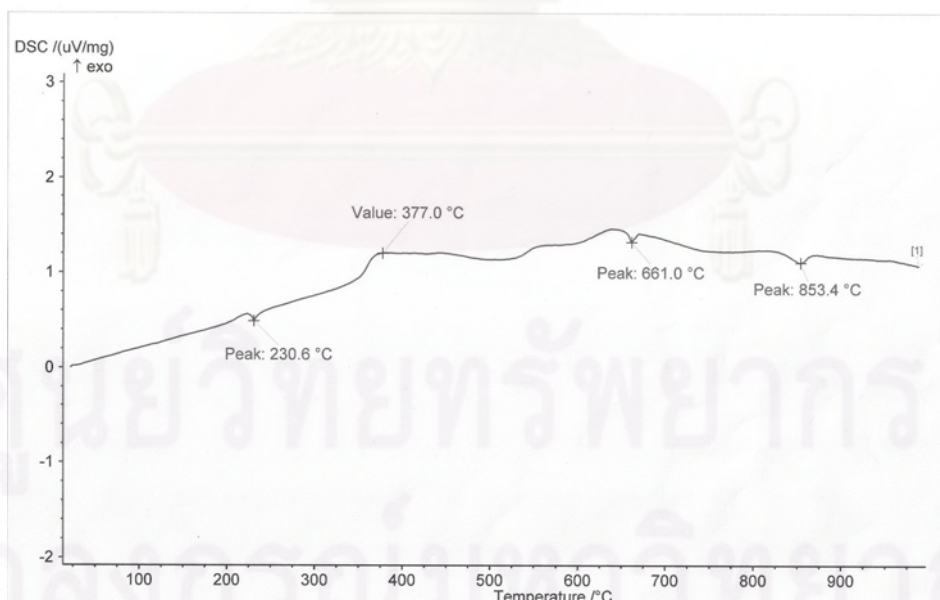
หมายเลข	Al	P	Sn	Cu
3	0	0	0.25	99.75
4	0	0	15.65	84.35
5	0	0	32.31	67.79

จากตาราง พบว่าบริเวณหมายเลข 3 ประกอบด้วยธาตุทองแดงเกือบทั้งหมด บริเวณหมายเลข 4 และ 5 มีปริมาณดีบุกเพิ่มขึ้น จาก 15.65 wt% เป็น 32.31 wt% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจากกล้อง OM (ภาพที่ 4.29) แล้ว จะได้ว่าคือ หมายเลข 1 ก็คือหมายเลข 4 และหมายเลข 2 ก็คือหมายเลข 5 และบริเวณหมายเลข 4 และ 5 นี้ก็คือ บริเวณที่เกิดสารละลายของแข็ง α และ β ตามลำดับ ส่วนบริเวณที่มีสีดำสนิทในภาพคือ บริเวณที่เป็นรูพรุน

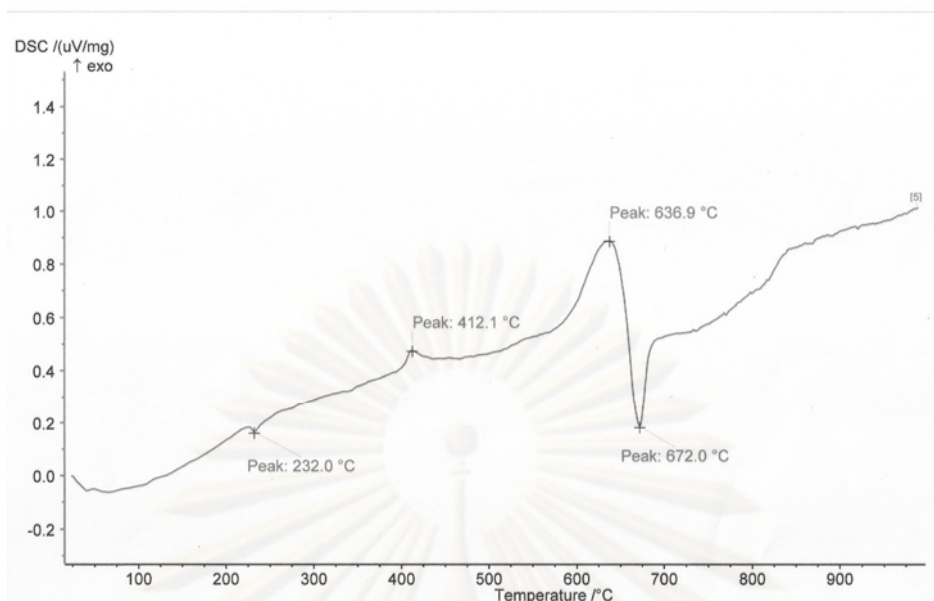
การตรวจสอบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดเฟสต่างๆด้วยการวิเคราะห์เชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC) ของผงทองแดงผสมดีบุกที่ไม่ได้ผสมผงอะลูมิเนียม (0wt%Al) และที่ผสมผงอะลูมิเนียม 10wt% ที่อุณหภูมิ 1000 °C ภายใต้สภาวะสุญญากาศ สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.31 และ 4.32



ภาพที่ 4.31 กราฟ DSC ของผงโลหะทองแดงผสมดีบุก 10wt% ที่ไม่ได้ผสมผงอะลูมิเนียม



ภาพที่ 4.32 กราฟ DSC ของผงโลหะทองแดงผสมดีบุก ผสมผงอะลูมิเนียม 10wt%



ภาพที่ 4.33 กราฟ DSC ของผงโลหะทองแดงผสมดีบุก ผสมผงอะลูมิเนียม 50wt%

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาคูดและคายความร้อนดังภาพที่ 4.31 – 4.33 กับงานวิจัยของ Acharya (2001) [9] พบว่าปฏิกิริยาแรกที่เกิดที่ 230.2°C , 230.6°C และ 232°C ตามลำดับ คือ ปฏิกิริยาคูดความร้อนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะของดีบุกจากของแข็งเป็นของเหลว ซึ่งพบทั้งในชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมและผสมผงอะลูมิเนียม โดยดีบุกหลอมเหลวนี้อาจทำให้เกิดการเผาผนึกแบบ เฟสของเหลวขึ้น

ในภาพที่ 4.31 ปฏิกิริยาที่ 2 ที่เกิดขึ้นที่ 396°C ไม่พบข้อมูลใน [9] ที่ใกล้เคียงกัน แต่คาดว่าจะเป็นการเกิดสารประกอบ $\text{Cu}_{5.6}\text{Sn}$ และ ปฏิกิริยาที่ 3 ที่ 717.2°C เมื่อเปรียบเทียบแล้วคาดว่าจะปฏิกิริยา $\gamma_{43\%}\text{Sn} \rightarrow (\gamma + \text{L})$ หรือ $\gamma_{38.5\%}\text{Sn} \rightarrow (\gamma + \text{L})$ โดยเฟส γ ที่เป็นเฟสตั้งต้นในปฏิกิริยามีปริมาณดีบุกอยู่ระหว่าง 38.5 – 43 %

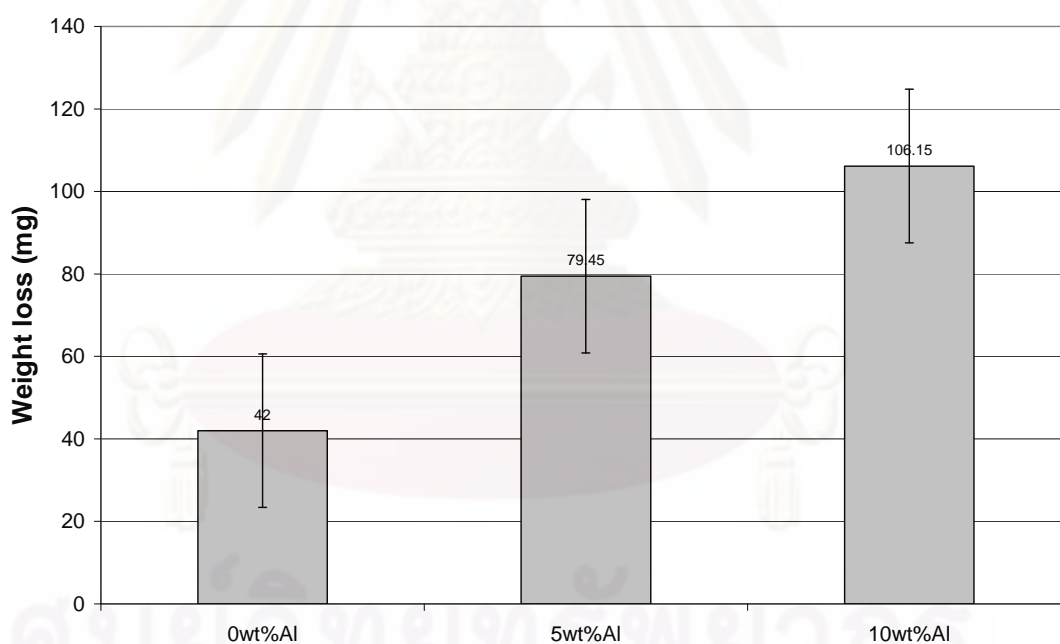
ปฏิกิริยาคายความร้อนที่ 377°C ในภาพที่ 4.32 และที่อุณหภูมิ 412.1°C ในภาพที่ 4.33 ไม่พบว่ามีข้อมูลใน [9] เช่นกัน ซึ่งคาดว่าเป็นปฏิกิริยาคูดเกิดเฟส AlCu_4 และปฏิกิริยาคูดความร้อนที่อุณหภูมิ 661°C และ 672°C ในภาพที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ คาดว่าจะเป็นปฏิกิริยาที่ผงอะลูมิเนียมเปลี่ยนสถานะจากของแข็งไปเป็นของเหลว

ส่วนปฏิกิริยาคูดความร้อนที่ 856.7°C และ 853.4°C ในภาพที่ 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ คาดว่า คือปฏิกิริยา $\alpha_{17.7\%}\text{Sn} \rightarrow (\alpha + \text{L})$ หรือ $\alpha_{11.2\%}\text{Sn} \rightarrow (\alpha + \text{L})$ [9] โดยที่เฟส α ซึ่งเป็นเฟสเริ่มต้นมีปริมาณดีบุกต่ำกว่า 11.2%

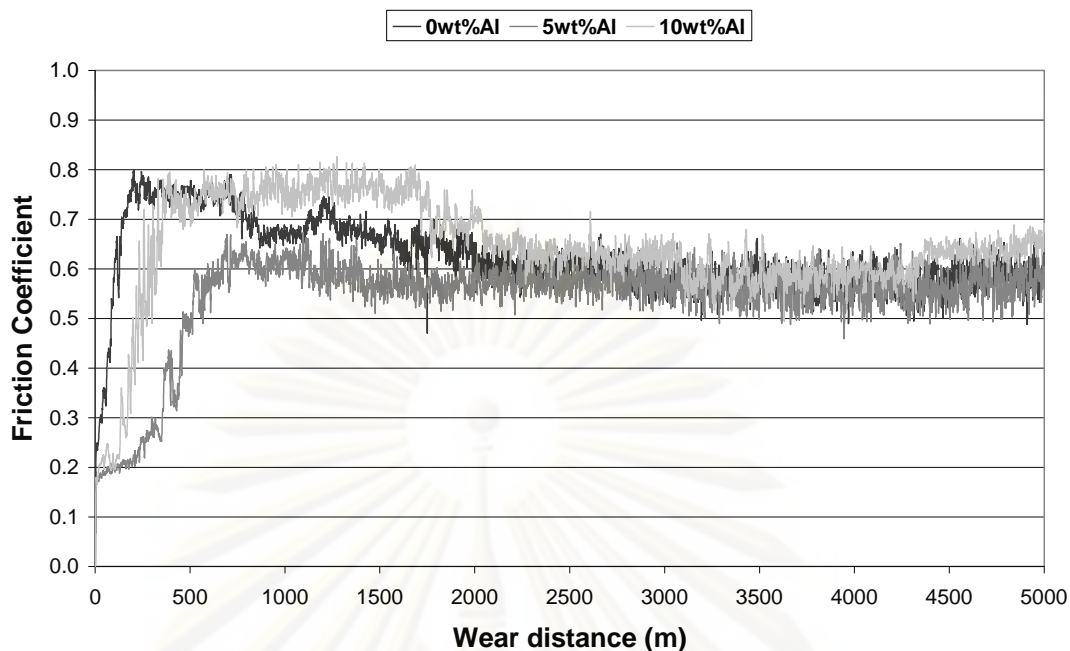
4.2.4 ผลการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-in-disc

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่ทำการเผาที่ 830°C พบว่าชิ้นงานที่มีความแข็งแรงสูงสุดคือชิ้นงานที่เผาที่ 830°C โดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที ดังนั้น สำหรับการทดสอบการสึกหรอชิ้นงานที่เผาที่ 830°C นี้จึงเลือกชิ้นงานที่เผาที่ 830°C โดยใช้เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาทีไปทำการทดสอบการสึกหรอ

ในการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc นี้จะใช้เงื่อนไขในการทดสอบชิ้นงานทุกชิ้นเหมือนกันกับที่ใช้ในการทดสอบชิ้นงานเผาที่ 900°C โดยจะวัดมวลก่อนและหลังทำการทดสอบของชิ้นงานทดสอบที่เป็น Pin และชิ้นงานที่เป็น disc เพื่อคำนวณหามวลที่หายไปเนื่องจากการสึกหรอเนื่องจากการทดสอบ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอจะทำการบันทึกค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างการทดสอบไว้ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.31 และ 4.32



ภาพที่ 4.34 น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc ของชิ้นงาน 0wt%Al, 5wt%Al และ 10wt%Al ที่เผาที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที



ภาพที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที

พบว่ามวลที่หายไปหลังจากการทดสอบการสึกหรอ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ย ของชิ้นงานมีค่าเพิ่มเมื่อปริมาณในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยสำหรับชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 0%Al, 5%Al และ 10%Al มีค่า 0.6200, 0.5436 และ 0.6426 ตามลำดับ ส่วนมวลของชิ้นงานที่เป็น disc มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเช่นเดียวกับ Disc ที่ทดสอบกับชิ้นงาน Pin ที่เผาผนึกที่ 900° และพบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะเริ่มคงที่เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอต่อจนถึงระยะทางประมาณ 2000 เมตร เป็นเพราะว่า ในช่วงแรกของการทดสอบการสึกหรอ หน้าสัมผัสของชิ้นงานที่เป็น Pin จะสัมผัสโดยตรงกับชิ้นงานที่เป็น Disc ทำให้ชิ้นงานที่เป็น Pin เกิดการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive Wear) เศษที่แตกออกมาจากหน้าสัมผัสชิ้นงานที่เป็น Pin จะถูกแรงกระทำจากการเสียดสีอัดตัวติดกับแผ่น Disc ด้วยกลไกการเกาะติด (Adhesion) ของเศษหรืออนุภาคจากการสึกหรอกับหน้าสัมผัส Disc กลายเป็นชั้นที่เกิดจากการเกาะติด (Transfer Layer) เคลือบบนผิวสัมผัสของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม [2] ทำให้หน้าสัมผัสของการทดสอบการสึกหรอเปลี่ยนเป็นหน้าสัมผัสระหว่าง ชิ้นงานที่เป็น Pin กับ ชั้นที่เกิดการเกาะติดบน Disc ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีค่าคงที่

จากผลของการเติมผงอะลูมิเนียม ต่อปริมาณรูพรุน และความแข็งของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ในภาพที่ 4.18 และ 4.19 พบว่าปริมาณรูพรุนเพิ่มสูงขึ้น และความแข็งลดต่ำลง เมื่อปริมาณการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น จึงเป็นสาเหตุส่วนหนึ่งที่ทำให้

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มวลที่หายไปหลังจากการทดสอบการสึกหรอเพิ่มขึ้น

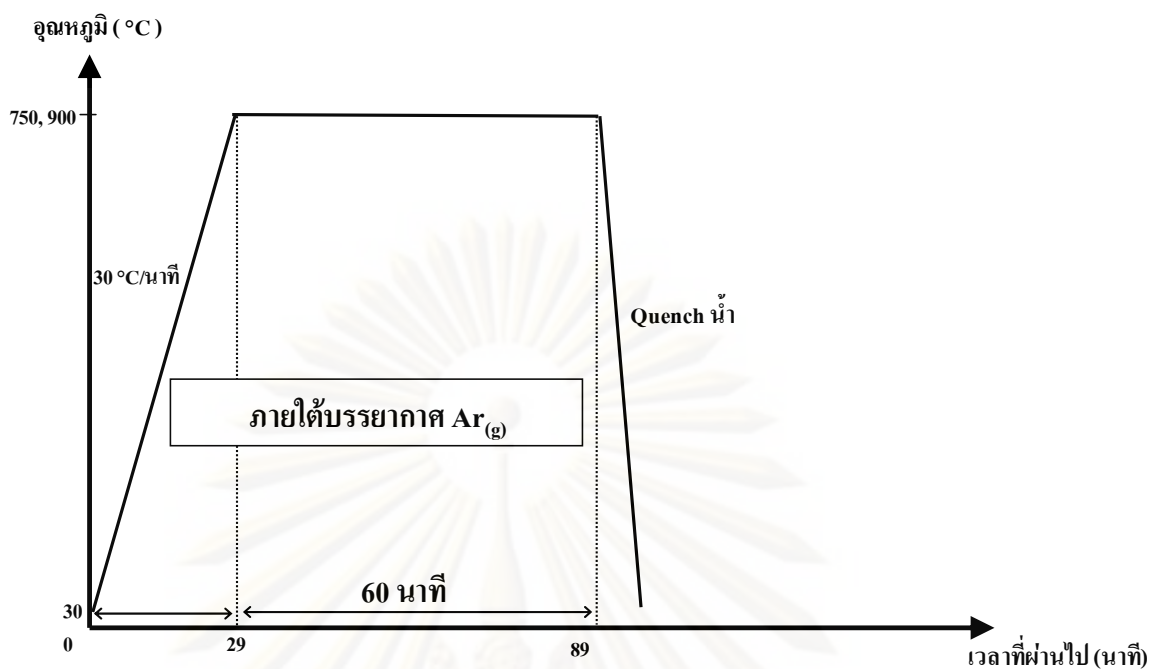
การที่มวลที่หายไปเนื่องจากการสึกหรอ เพิ่มขึ้นแสดงว่าเมื่อผลิตชิ้นงานโดยใช้สัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นทำให้ชิ้นงานเกิดการสึกหรอเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นจึงควรต้องนำชิ้นงานไปทำการปรับปรุงสมบัติให้มีความแข็งเพิ่มขึ้นโดยนำไปผ่านกระบวนการอบชุบความร้อน ก่อนที่จะนำไปใช้งานเพื่อทำให้การสึกหรอลดต่ำลง ซึ่งผลจากอบชุบความร้อน จะได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.3 และเมื่อผลิตชิ้นงานที่นำไปใช้งานจริงจะต้องมีการนำชิ้นงานไปทำการอัดด้วยน้ำมันเพื่อให้ไขมันเข้าไปแทรกตัวอยู่ในรูพรุน โดยระหว่างการนำไปใช้งาน ไขมันในรูพรุนก็จะไหลออกมาจากรูพรุนและเกิดการหล่อลื่นขึ้น จึงทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงและมีค่าไม่ต่างกันมาก และการสึกหรอก็จะลดลงด้วย [2, 4]

4.3 ผลเนื่องจากกระบวนการอบชุบความร้อน (Heat Treatment)

เป็นที่ทราบกันดีว่า บรอนซ์อะลูมิเนียมหรือโลหะผสมระหว่างทองแดงกับอะลูมิเนียม มีสมบัติเชิงกลอยู่ในเกณฑ์สูง กล่าวคือ มีความแข็งแรง ความแข็ง และความเหนียวสูง และยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลด้วยการ ทำนำไปผ่านกระบวนการอบชุบความร้อน โดยการชุบแข็ง (Hardening) ซึ่งกระบวนการอบชุบความร้อนสามารถเลือกได้โดยอ้างอิงกับแผนภาพสมดุล 3 เฟส ของทองแดง กับดีบุก ที่มีอะลูมิเนียม 9% โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.8

โดยชิ้นงานที่ถูกเลือกไปทำ Heat Treatment นั้น พิจารณาเลือกจากผลของความแข็งที่สูงที่สุดที่ได้จากการเผาผืนที่ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆกันในแต่ละอุณหภูมิในการเผาผืน ซึ่งในการทำ Heat Treatment ที่อุณหภูมิ 900°C [1] ได้เลือกชิ้นงานที่เผาผืนที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที และการทำ Heat Treatment ที่อุณหภูมิ 750°C ได้เลือกชิ้นงานที่เผาผืนที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที

ผลการทดลองจะถูกแบ่งย่อยออกเป็น 2 ส่วน ตามอุณหภูมิที่ทำ Heat Treatment คือ 900°C และ 750°C ซึ่งการทำ Heat Treatment ในแต่ละอุณหภูมิจะทำโดยมี Profile ของเตาดังแสดงในภาพที่ 4.33



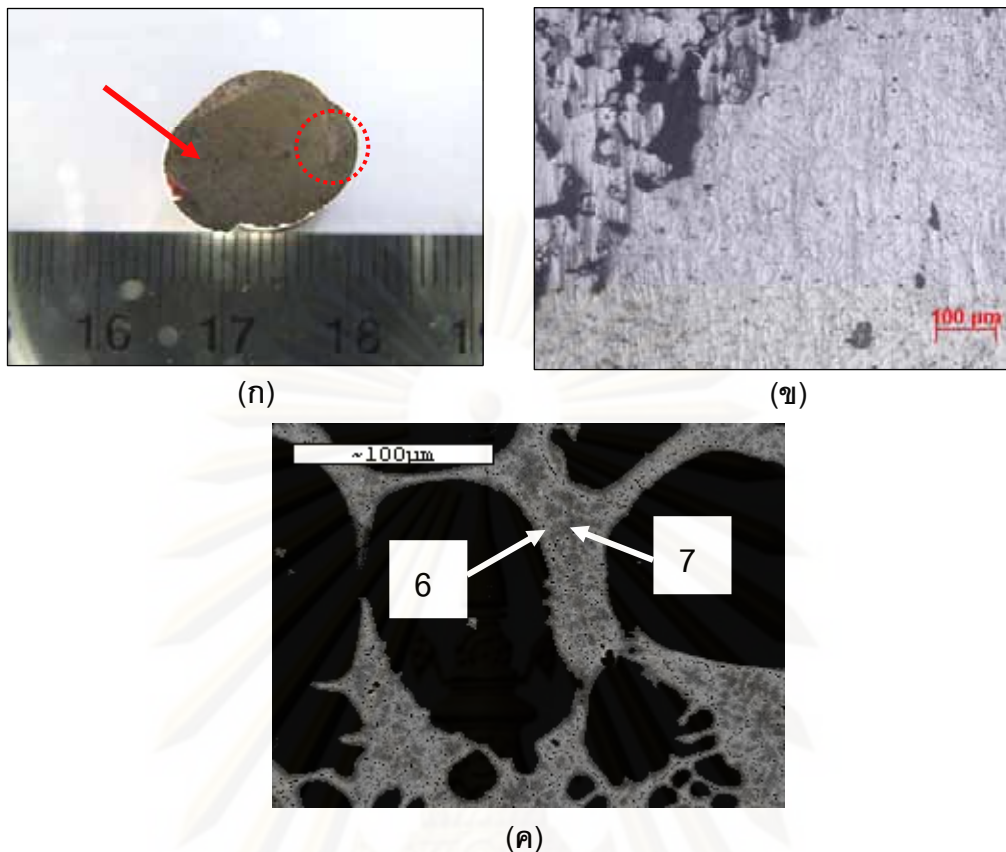
ภาพที่ 4.36 Profile ของเตาในการทำ Heat Treatment

4.3.1 ผลเนื่องจากการทำ Heat Treatment ที่ 900°C

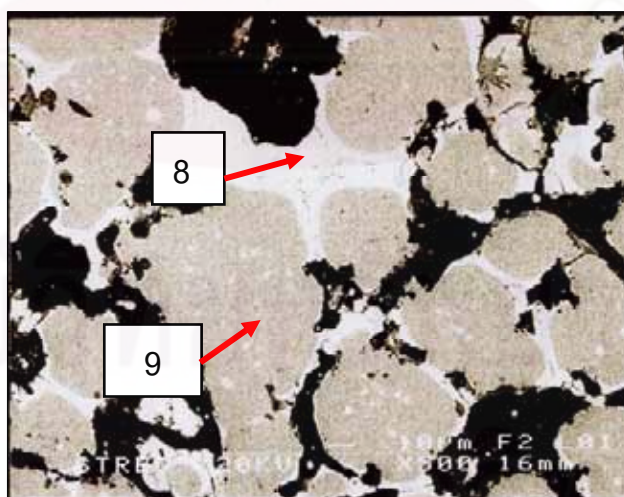
ในเบื้องต้นเมื่อพิจารณาข้อมูลการทำ Heat Treatment ของงานหล่อโดยทั่วไปของ อะลูมิเนียมบรอนซ์พบว่าทำการ Heat Treatment ที่ 900°C โดยทำการให้ความร้อนขึ้นไป 900°C แล้วคงอุณหภูมิไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง แล้วจึงขึ้นงานออกจากเตาและทำการ Quenching จึงได้ทำการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ผลิตจากกระบวนการโลหะผงที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที ด้วยอัตราการให้ความร้อน 30°C/นาที ขึ้นไปที่ 900°C แล้ว คงอุณหภูมิไว้เป็นเวลา 60 นาที แล้วจึงนำชิ้นงาน quench ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง

4.3.1.1 โครงสร้างจุลภาค และความแข็ง

พบว่าชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม (5wt% และ 10wt %) มีการบิดเบี้ยวเสียรูปไปมากดังแสดง ตัวอย่างในภาพที่ 4.33 (ก) และเมื่อนำไปขัดผิวและตรวจสอบด้วยกล้อง OM พบว่าชิ้นงานเกิดการ หลอมเหลวบางส่วนและเนื้อพื้นที่มีความหนาแน่นสูงมีรูพุนน้อย ดังแสดงในภาพที่ 4.37 (ข)



ภาพที่ 4.37 (ก) ลักษณะชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียมที่เกิดการเสียรูป (ข) ลักษณะเนื้อพื้นบริเวณที่เกิดการหลอมเหลว (วงกลมเส้นประในภาพที่ 4.37 (ก)) (ค) โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในโหมด SE ของชิ้นงานในตำแหน่งที่ลูกศรชี้ในภาพ 4.37 (ก)



ภาพที่ 4.38 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ในโหมด BSE ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt%Al เฝ้านี้ที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที ที่บริเวณกึ่งกลางชิ้นงานในภาพที่ 4.37 (ก)

เมื่อนำชิ้นงานไปตรวจสอบโดยการส่องด้วยกล้อง (SEM) และทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุที่มีในชิ้นงาน คือ Energy Dispersive X-Ray Spectrometry (EDS) ที่ต่ออยู่กับเครื่อง SEM ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ธาตุที่ตำแหน่งหมายเลข 6 และ 7 (ภาพที่ 4.34 (ค)) และบริเวณกึ่งกลางชิ้นงาน (กึ่งกลางภาพที่ 4.34 (ก)) คือ หมายเลข 8 และ 9 (ภาพที่ 4.34) แสดงดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) ของธาตุที่พบในบริเวณต่างๆของชิ้นงานดังภาพที่ 4.34 และ 4.35

หมายเลข	Al	P	Sn	Cu
6	1.85	0.34	23.41	74.40
7	4.66	0.00	2.82	92.52
8	2.25	0.14	20.94	76.60
9	4.71	0.01	3.06	92.22

เมื่อวิเคราะห์ผลจากตารางที่ 4.17 พบว่าบริเวณที่ถูกครีในภาพที่ 4.33 (ค) และภาพที่ 4.34 มีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ มีเฟสแยกเป็น 2 บริเวณชัดเจน ซึ่งบริเวณหมายเลข 6 และ 8 น่าจะเป็นบริเวณที่ประกอบด้วยเฟส β และ $AlCu_4$ ส่วนบริเวณหมายเลข 7 และ 9 น่าจะเป็นเฟส α และ $AlCu_4$ เป็นบริเวณที่มี ปริมาณดีบุกต่ำ ซึ่งคาดว่าจะเป็นเฟส α ส่วนบริเวณสีขาว เป็นบริเวณที่มีดีบุกสูง ซึ่งคาดว่าจะเป็นเฟส β โดยทั้งสองบริเวณ (สีเทา และขาว) มีปริมาณอะลูมิเนียมอยู่เพียงประมาณ 4 wt% ทั้งๆที่ชิ้นงานเป็นชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10 wt% ทั้งนี้เป็นเพราะดีบุกและอะลูมิเนียม เกิดการแพร่ที่ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน โดยบริเวณที่ปริมาณดีบุกและอะลูมิเนียมสูงมีแนวโน้มที่จะมีความแข็งแรงสูงด้วย แต่เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของธาตุทั้งสอง ทำให้ความแข็งแรงที่วัดได้ไม่สม่ำเสมอเช่นกัน โดยบางจุดมีความแข็งแรงสูง บางบริเวณมีความแข็งแรงต่ำ

เมื่อนำชิ้นงานทั้งหมดไปวัดความแข็งแรง โดยชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม (5wt%Al และ 10wt%Al) ทำการวัดแยกกันระหว่างบริเวณที่เกิดการหลอมเหลว และไม่เกิดการหลอมเหลว ซึ่งความแข็งแรงที่วัดได้แสดงได้ดังตารางที่ 4.18

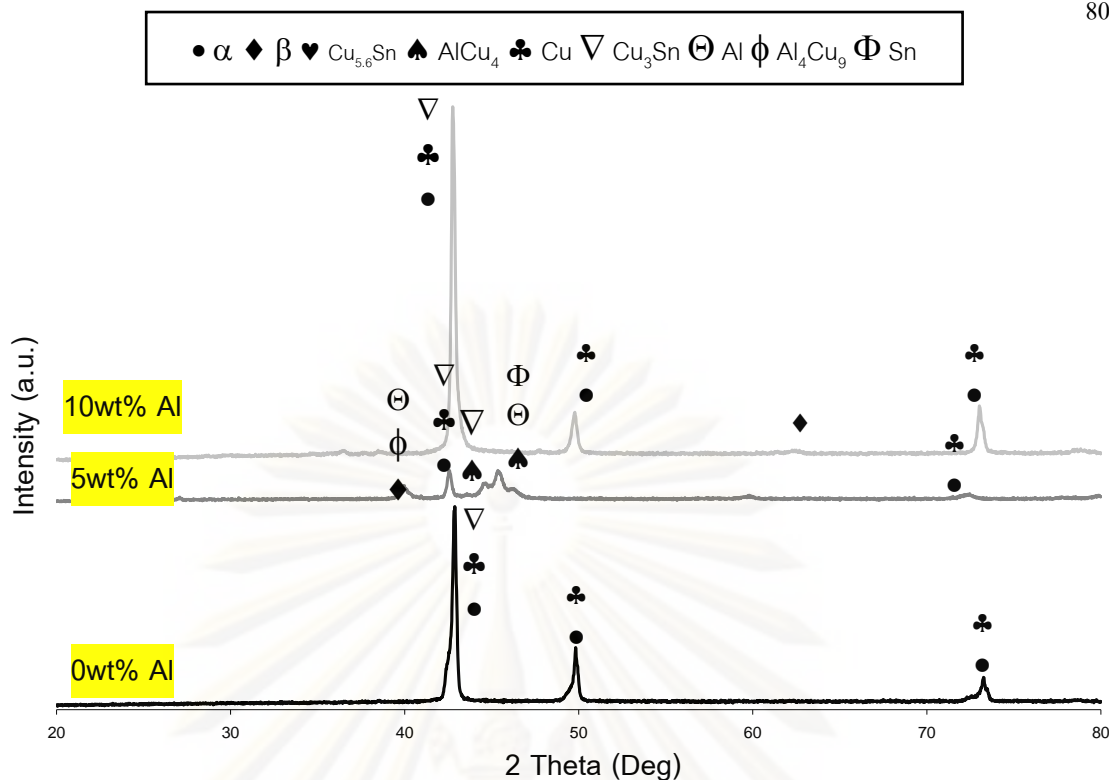
ตารางที่ 4.18 ความแข็งของชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่อุณหภูมิ 900°C

ชิ้นงาน	ความแข็งบริเวณที่หลอมเหลว (HV)	ความแข็งบริเวณที่ไม่หลอมเหลว (HV)
0wt%Al	-	125.2
5wt%Al	722.1	65.2
10wt%Al	487.6	84.0

จะพบว่าความแข็งของชิ้นงานทุกชิ้นเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งก่อนที่จะทำ Heat Treatment ดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 โดยเฉพาะชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม ทั้งที่ผสม 5wt% และ 10wt% จะเพิ่มขึ้นสูงในบริเวณที่มีรูพรุน และเพิ่มขึ้นสูงมากในบริเวณที่เกิดการหลอมเหลว แต่เนื่องจากการทำ Heat Treatment ที่ 900°C นี้ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูป ซึ่งบริเวณที่เกิดการหลอมเหลวและเสียรูปนี้ ไม่ควรเกิดขึ้นสำหรับการผลิตชิ้นงานที่ผลิตโดยกรรมวิธีโลหะผง เนื่องจากการทำให้สูญเสียสมบัติที่สำคัญของกรรมวิธีนี้ คือ ชิ้นงานที่ได้มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดจริง (Near Net Shape)

4.3.1.2 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและสารประกอบ

เพื่อทำการศึกษาธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นภายหลังการการทำ Heat Treatment จึงนำชิ้นงานที่ผ่านการทำ Heat Treatment แล้วไปทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งผลที่ได้จากเครื่อง XRD จะบอกให้ทราบถึงธาตุและสารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นงาน โดยในการตรวจสอบนี้ใช้ค่า Scan speed 3 องศา/นาที Sampling width 0.020 องศา ซึ่งผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่ 750°C สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.36



ภาพที่ 4.39 XRD Patterns ของชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่ 900°C จากชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที

จากการตรวจสอบด้วย XRD พบเฟสหลักที่ปรากฏอยู่ในชิ้นงานหลังจากทำ Heat Treatment ที่ 900°C เช่นเดียวกับที่พบก่อนทำ Heat Treatment คือ สารละลายของแข็ง α โดยพบทั้งในชิ้นงาน 0wt%Al, 5wt%Al และ 10wt%Al โดยชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) พบแต่เฟส α เพียงเฟสเดียว แต่ชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt% พบทั้งเฟส α และยังพบเฟส β เล็กน้อยด้วย ส่วนชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% พบแต่เฟส α และพบว่า Peak เกิดการ Shift ไปประมาณ 1° และการละลายของอะลูมิเนียมทำให้มุม θ Shift ไปประมาณ 0.2° เช่นเดียวกับ XRD Pattern ของชิ้นงานก่อนทำ Heat Treatment เช่นเดียวกัน และเมื่อนำปริมาณโดยสัมพัทธ์ มาเปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตาราง 4.19, 4.20 และ 4.21 และนำมาเปรียบเทียบกันในภาพที่ 4.37, 4.38 และ 4.39

ตารางที่ 4.19 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) ก่อนและหลังการทำ Heat Treatment ที่ 900°C

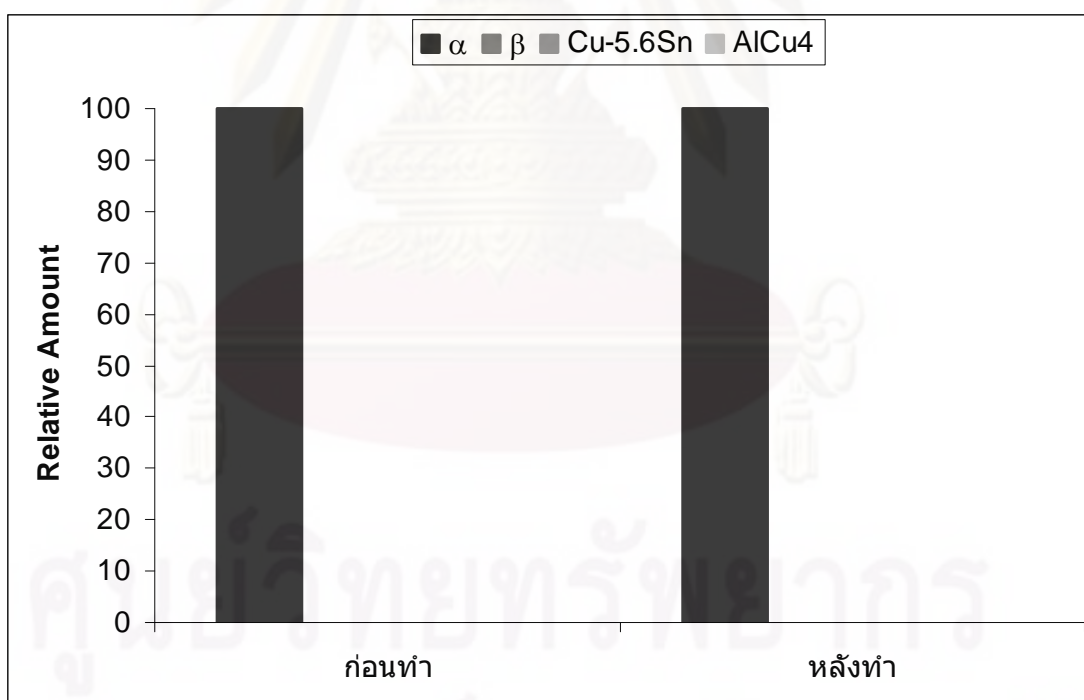
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^{\circ}$)	β ($2\theta=39.78^{\circ}$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.26^{\circ}$)	AlCu_4 ($2\theta=45.00^{\circ}$)
ก่อนทำ	100	0	0	0
หลังทำ	100	0	0	0

ตารางที่ 4.20 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ก่อนและหลัง
การทำ Heat Treatment ที่ 900°C

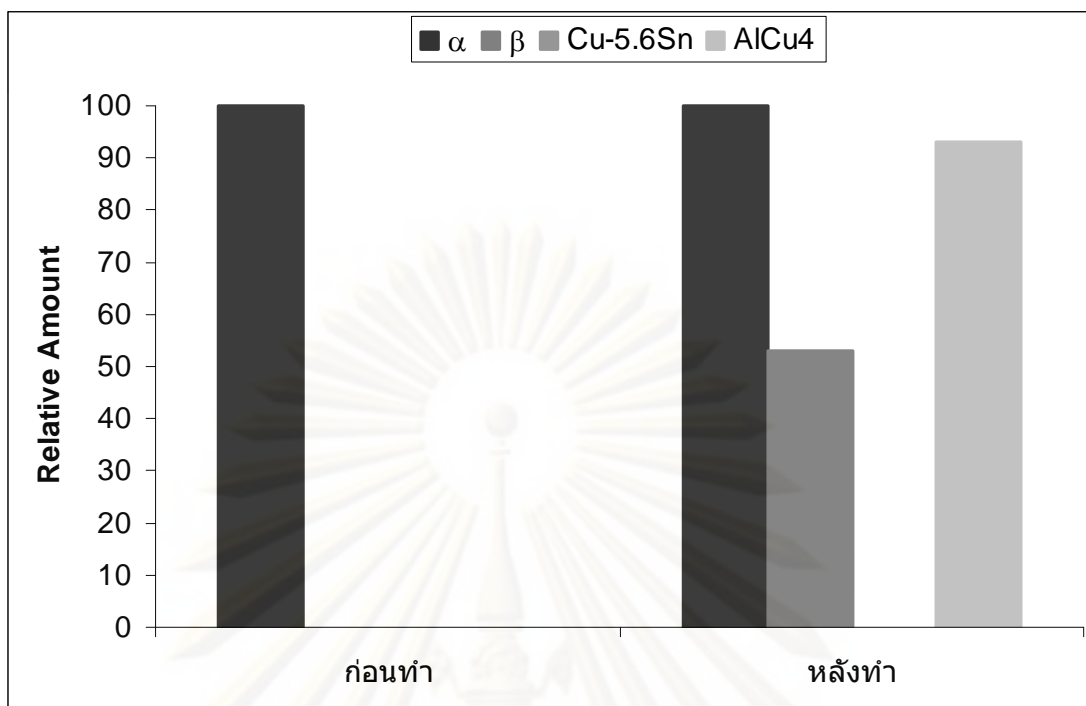
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.26^\circ$)	AlCu ₄ ($2\theta=45.00^\circ$)
ก่อนทำ	100	0	0	0
หลังทำ	100	53	0	93

ตารางที่ 4.21 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ก่อนและหลัง
การทำ Heat Treatment ที่ 900°C

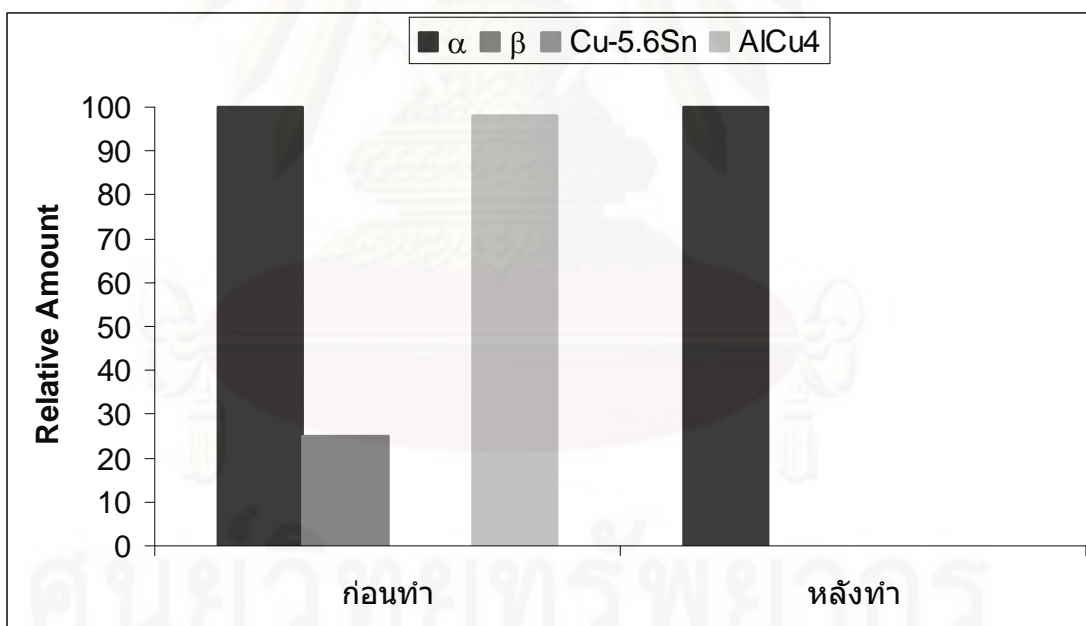
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.26^\circ$)	AlCu ₄ ($2\theta=45.00^\circ$)
ก่อนทำ	100	25	0	98
หลังทำ	100	0	0	0



ภาพที่ 4.40 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่
900°C ของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0 wt% Al)



ภาพที่ 4.41 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 900°C ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5 wt%



ภาพที่ 4.42 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 900°C ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10 wt%

พบว่าในชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt% Al) ไม่มีเกิดเฟสใหม่ขึ้น หลังจากการทำ Heat Treatment คือ ยังคงพบเพียงเฟสสารละลายของแข็ง α เพียงเฟสเดียว ส่วนชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt% มีเฟสใหม่เกิดขึ้น คือ พบเฟสสารละลายของแข็ง β และเฟสสารประกอบเชิง

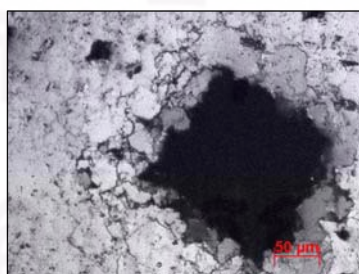
โลหะ AlCu_4 ส่วนชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% ไม่พบว่ามีเฟส β และ AlCu_4 เหมือนกับก่อนการทำ Heat Treatment

โดยเมื่อพิจารณาเฟสที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 900°C ในสภาวะสมดุล จะเกิด เฟสสารละลายของแข็งของทองแดงและของเหลวขึ้น และสัดส่วนโดยประมาณของเฟสที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากการลากเส้น Tie Line และคำนวณโดยใช้กฎ Lever Rule พบว่าเมื่อสัดส่วนการเติมอะลูมิเนียมเป็น 5wt% จะมีเฟสสารละลายของแข็งประมาณ 61% และเฟสของเหลว 49% และเมื่อสัดส่วนการเติมอะลูมิเนียมเป็น 10wt% จะมีเฟสสารละลายของแข็งประมาณ 20.3% และเฟสของเหลว 79.7% แต่อย่างไรก็ดี ในความเป็นจริงแล้วไม่สามารถคำนวณสัดส่วนได้จากการลากเส้น Tie Line โดยตรง ต้องอาศัยข้อมูลจากการทดลองเท่านั้น ดังนั้นจึงเป็นเพียงการประมาณเท่านั้น

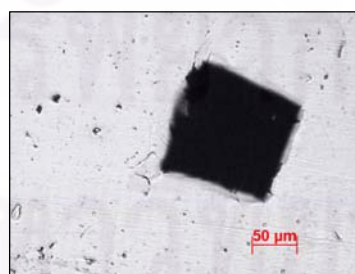
แต่อย่างไรก็ดี แสดงให้เห็นว่าสาเหตุของการที่ชิ้นงานเกิดการเสียรูปไป เนื่องมาจากการที่มีของเหลวอยู่เป็นปริมาณมากทำให้ชิ้นงานไม่สามารถรักษารูปร่างของชิ้นงานไว้ได้

4.3.2 ผลเนื่องจากการทำ Heat Treatment ที่ 750°C

การทำ Heat Treatment ที่ 900°C ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปไปอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นสูงมากก็ตาม จึงได้ลดอุณหภูมิในการทำ Heat Treatment ลงเป็น 750°C เพื่อให้สัดส่วนการเกิดเฟสของเหลวน้อยลง โดยทำการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานตาม Profile ตามภาพที่ 4.33 ที่อุณหภูมิ 750°C โดยเลือกชิ้นงานที่เผาผืนที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที แทนชิ้นงานที่เผาผืนที่ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที เนื่องจากเมื่อพิจารณาแล้วพบว่าบริเวณรอยกดจากการทดสอบ Hardness ของชิ้นงานที่เผาผืนที่ 900°C มีลักษณะที่เรียบคมบ่งบอกว่าการเผาผืนที่เกิดขึ้นได้สมบูรณ์กว่าการเผาผืนที่ 830°C ดังแสดงในภาพที่ 4.40



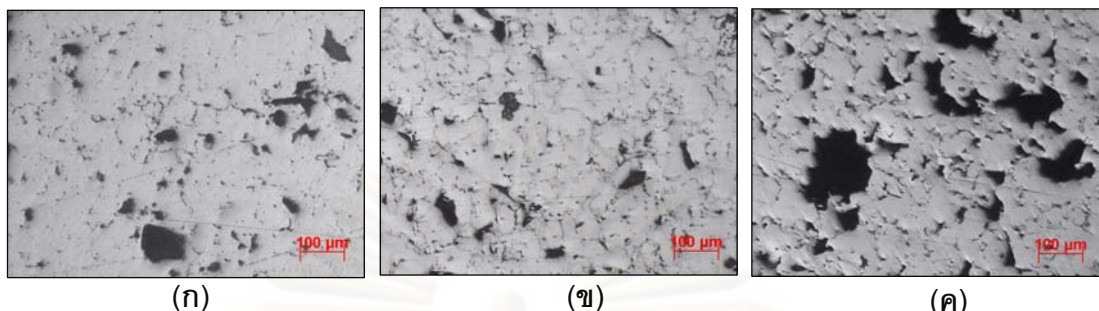
(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.43 รอยกดจากการวัดความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0 wt%Al) (ก) เผาผืนที่อุณหภูมิ 830°C (ข) เผาผืนที่อุณหภูมิ 900°C

4.3.2.1 โครงสร้างจุลภาค



ภาพที่ 4.41 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งทำ Heat Treatment ที่ 750°C และเผาผนึกที่ อุณหภูมิ 900°C ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่สัดส่วนในการเติมอะลูมิเนียม 0%, 5% และ 10% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

พบว่าชิ้นงานไม่เกิดการเสียรูปไปดังแสดงในรูป 4.34(ก) เหมือนกับการทำชุบแข็งที่ อุณหภูมิ 900°C และจากภาพโครงสร้างจุลภาค ของชิ้นงานที่ทำชุบแข็งที่อุณหภูมิ 750°C (ภาพ ที่ 4.40) พบว่าปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียมที่ สัดส่วนต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อสัดส่วนการเติมเพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มที่รูพรุนจะมีปริมาณรูพรุนสูงขึ้น เหมือนก่อนการทำการชุบแข็ง

4.3.2.2 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งฉลุ

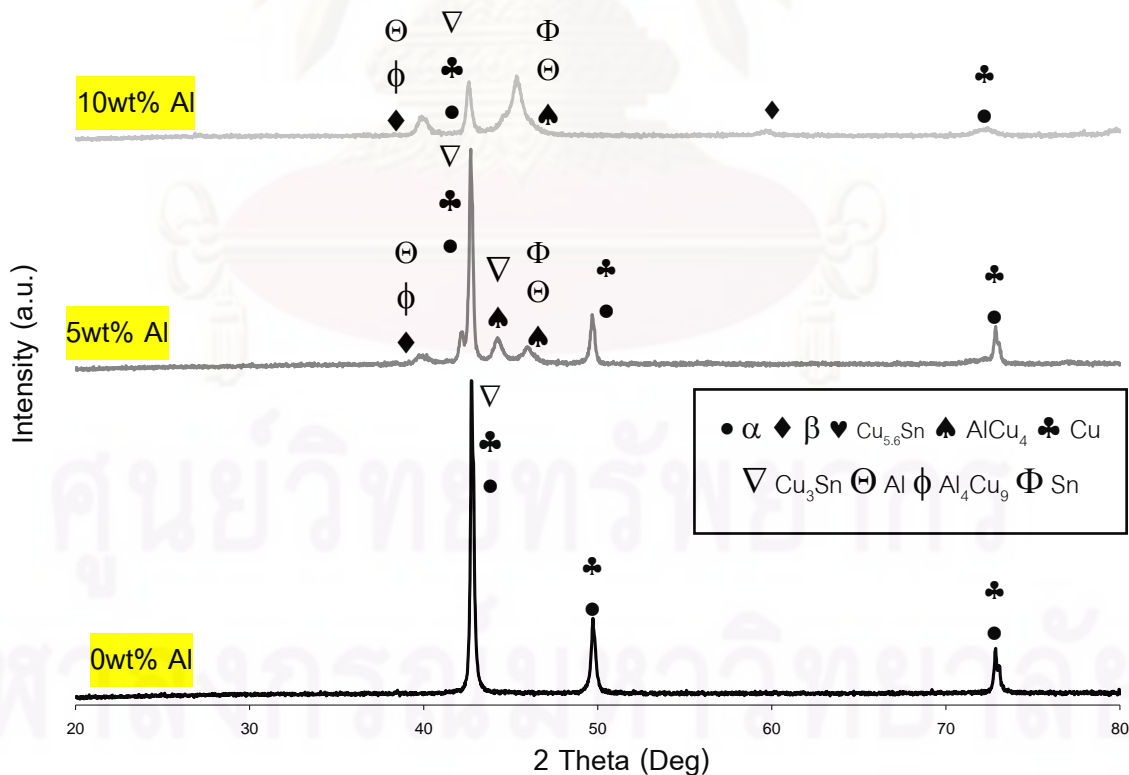
เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่น และปริมาณรูพรุน ของชิ้นงานก่อน (ตารางที่ 4.1 – 4.3) และหลังการทำ Heat Treatment (ตารางที่ 4.22) พบว่า สำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมผง อะลูมิเนียม ความหนาแน่นมีค่าต่ำลง และปริมาณรูพรุนสูงขึ้นเล็กน้อย ส่วนความแข็ง มีค่าต่ำลง เล็กน้อย และพบว่าความแข็งของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt% มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 37% และ ชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 25%

ตารางที่ 4.22 ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน และความแข็งของชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่อุณหภูมิ 750°C ซึ่งเผาผนึก ที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่เติมผงอะลูมิเนียมในปริมาณที่สัดส่วนต่างๆกัน

Al amount (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	% Porosity	Hardness (HV _{1kg})
0	7.38	15.70	51.00
5	6.43	19.66	69.20
10	5.26	29.97	39.60

4.3.2.3 การวิเคราะห์ชนิดของธาตุและสารประกอบ

เพื่อทำการศึกษาธาตุและสารประกอบที่เกิดขึ้นภายหลังการการทำ Heat Treatment จึงนำชิ้นงานที่ผ่านการทำ Heat Treatment แล้วไปทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ซึ่งผลที่ได้จากเครื่อง XRD จะบอกให้ทราบถึงธาตุและสารประกอบที่มีอยู่ในชิ้นงาน โดยในการตรวจสอบนี้ใช้ค่า Scan speed 3 องศา/นาที Sampling width 0.020 องศา ซึ่งผลการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่ 750°C สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.42



ภาพที่ 4.45 XRD Pattern ของชิ้นงานที่ทำ Heat Treatment ที่ 750°C จากชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที

จากการตรวจสอบด้วย XRD พบเฟสหลักที่ปรากฏอยู่ในชิ้นงานเมื่อทำ Heat Treatment ที่ 750°C เช่นเดียวกับที่พบก่อนทำ Heat Treatment คือ สารละลายของแข็ง α โดยพบทั้งในชิ้นงาน 0wt%Al, 5wt%Al และ 10wt%Al โดยชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) พบแต่เฟส α เพียงเฟสเดียว แต่ชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt% พบทั้งเฟส α และยังพบเฟส β เล็กน้อยด้วย ส่วนชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% พบเฟส α , β และ AlCu_4 และเมื่อนำปริมาณโดยสัมพัทธ์มาเปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตาราง 4.23, 4.24 และ 4.25 และนำมาเปรียบเทียบกันในภาพที่ 4.43, 4.44 และ 4.45

ตารางที่ 4.23 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt%Al) ก่อนและหลังการทำ Heat Treatment ที่ 750°C

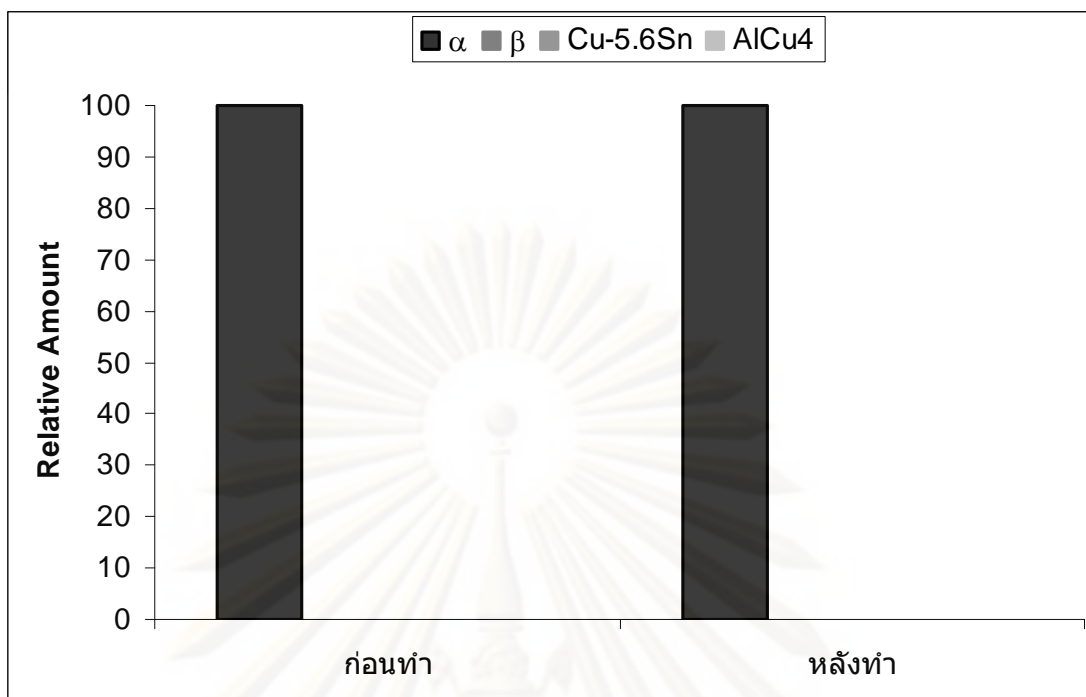
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.26^\circ$)	AlCu_4 ($2\theta=45.00^\circ$)
ก่อนทำ	100	0	0	0
หลังทำ	100	0	0	0

ตารางที่ 4.24 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%Al ก่อนและหลังการทำ Heat Treatment ที่ 750°C

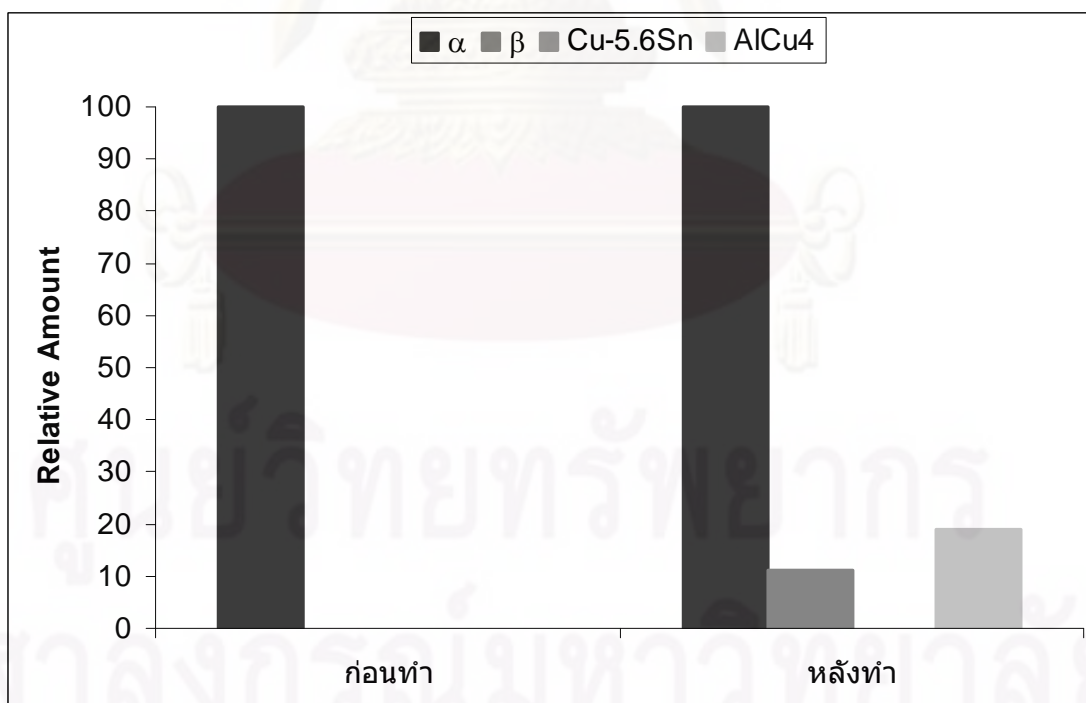
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.26^\circ$)	AlCu_4 ($2\theta=45.00^\circ$)
ก่อนทำ	100	0	0	0
หลังทำ	100	11	0	19

ตารางที่ 4.25 ปริมาณสัมพัทธ์ของแต่ละเฟสของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt%Al ก่อนและหลังการทำ Heat Treatment ที่ 750°C

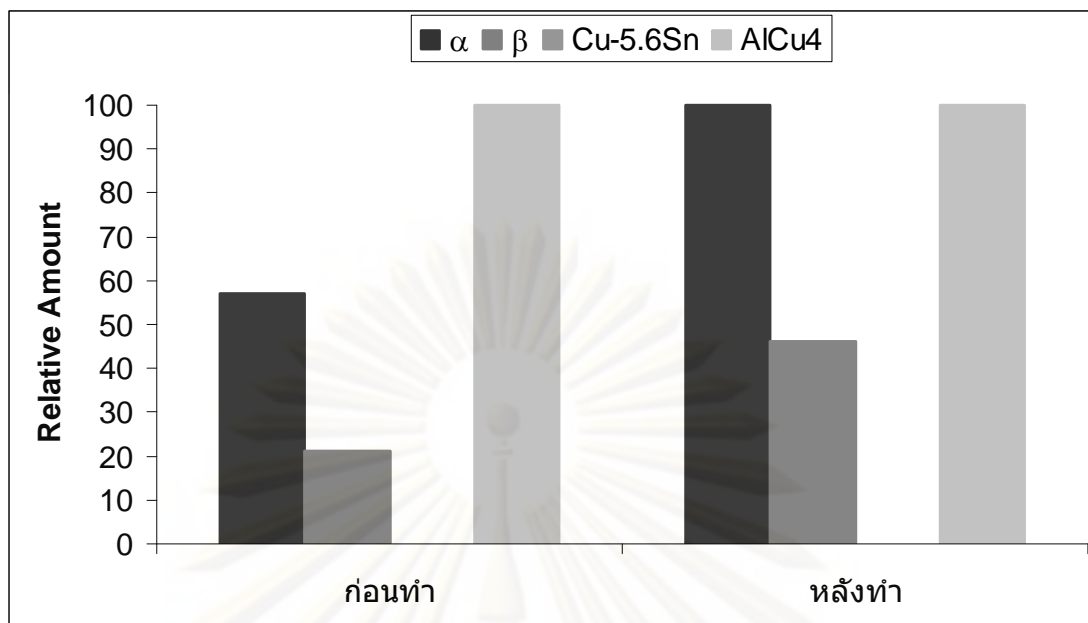
Sintering Time (min)	α ($2\theta=42.50^\circ$)	β ($2\theta=39.78^\circ$)	Cu-5.6Sn ($2\theta=42.26^\circ$)	AlCu_4 ($2\theta=45.00^\circ$)
ก่อนทำ	57	21	0	100
หลังทำ	100	46	0	100



ภาพที่ 4.46 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 750°C ของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0 wt% Al)



ภาพที่ 4.47 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 750°C ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5 wt%



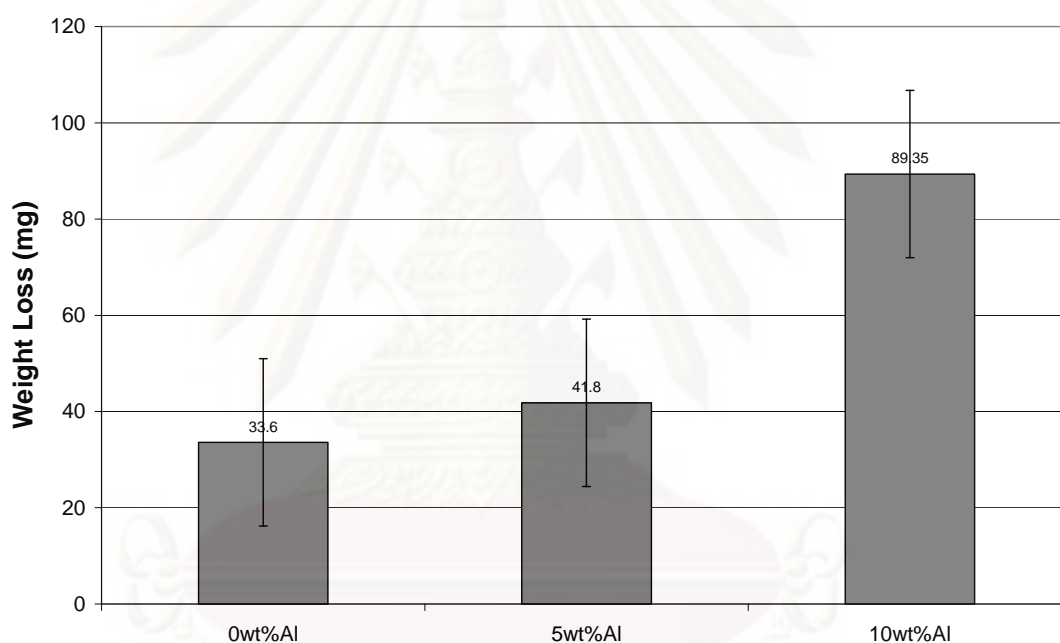
ภาพที่ 4.48 ปริมาณโดยสัมพัทธ์เปรียบเทียบกันระหว่างก่อนและหลังทำ Heat Treatment ที่ 750°C ของชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10 wt%

พบว่าในชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt% Al) ไม่มีเกิดเฟสใหม่ขึ้น หลังจากการทำ Heat Treatment คือ ยังคงพบเพียงเฟสสารละลายของแข็ง α เพียงเฟสเดียว ส่วนชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt% มีเฟสใหม่เกิดขึ้น คือ พบเฟสสารละลายของแข็ง β และเฟสสารประกอบเชิงโลหะ AlCu_4 ส่วนชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% ไม่มีเฟสใหม่เกิดขึ้น พบเพียงแต่การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเฟสเดิมที่มีอยู่ คือ เฟสสารละลายของแข็ง α และ β มีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ส่วนเฟส AlCu_4 มีสัดส่วนคงเดิม

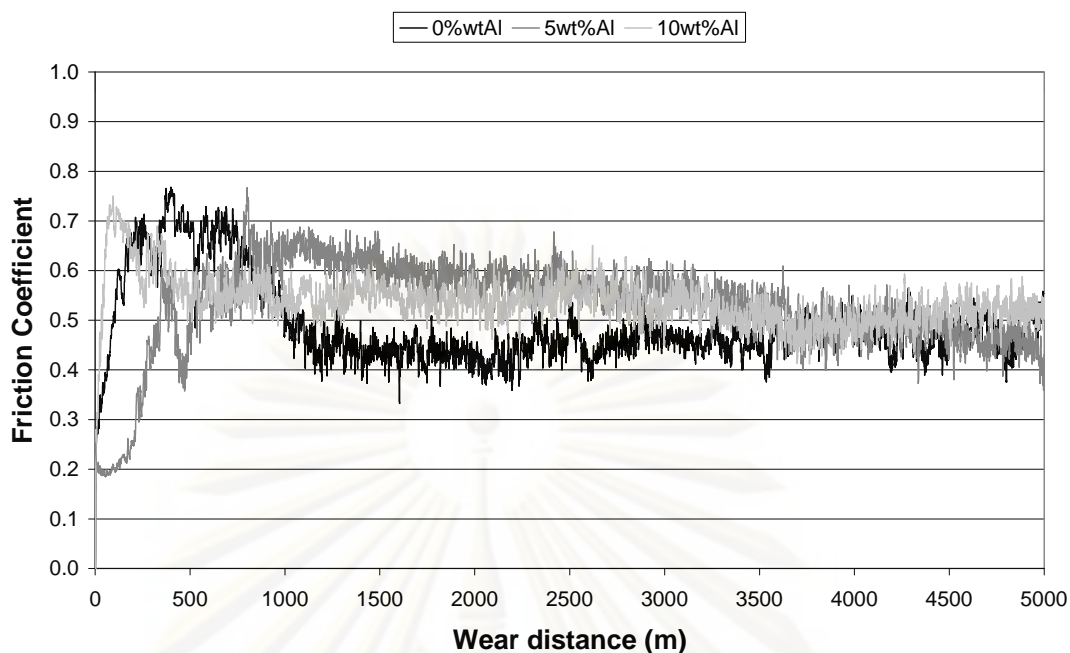
ดังนั้น สาเหตุที่ทำให้ความแข็งแรงของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมอะลูมิเนียม (0wt% Al) ลดลงเล็กน้อยก็เนื่องมาจากการทำ Heat Treatment ทำให้รูพรุนบางส่วนเกิดการมารวมตัวกันทำให้ปริมาณรูพรุนสูงขึ้น ทำให้น่าจะเป็นสาเหตุของความแข็งแรงที่ลดลง ส่วนชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt% มีเฟสใหม่ที่มีความแข็งแรงสูง (AlCu_4) เกิดขึ้น แต่ปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทำให้ได้มาซึ่งความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้น (เพิ่มประมาณ 37%) สูงกว่าชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10wt% ที่มีการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของเฟสที่มีอยู่แล้ว แต่ชิ้นงานมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณรูพรุนขึ้นอีก ทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (ประมาณ 25%) น้อยกว่าชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5wt%

4.3.2.4 ผลการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc

ในการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc ของชิ้นงานที่ทำการ Heat Treatment ที่ 750°C นี้จะใช้เงื่อนไขในการทดสอบทุกชิ้นงาน เช่นเดียวกับการทดสอบชิ้นงานที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 900°C และ 830°C โดยจะวัดมวลก่อนและหลังทำการทดสอบของชิ้นงานทดสอบที่เป็น Pin และชิ้นงานที่เป็น disc เพื่อคำนวณหามวลที่หายไปเนื่องมาจากการสึกหรอเนื่องจากการทดสอบ โดยเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการสึกหรอจะทำการบันทึกค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างการทดสอบไว้ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบได้แสดงไว้ในภาพที่ 4.46 และ 4.47



ภาพที่ 4.49 น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc ของชิ้นงาน 0%Al, 5%Al และ 10%Al ซึ่งผ่านการเผาขึ้นที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่ผ่านการทำการชุบแข็งที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที



ภาพที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงาน 0%Al, 5%Al และ 10%Al ซึ่งผ่านการเผาขึ้นที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ที่ทำการชุบแข็งที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที

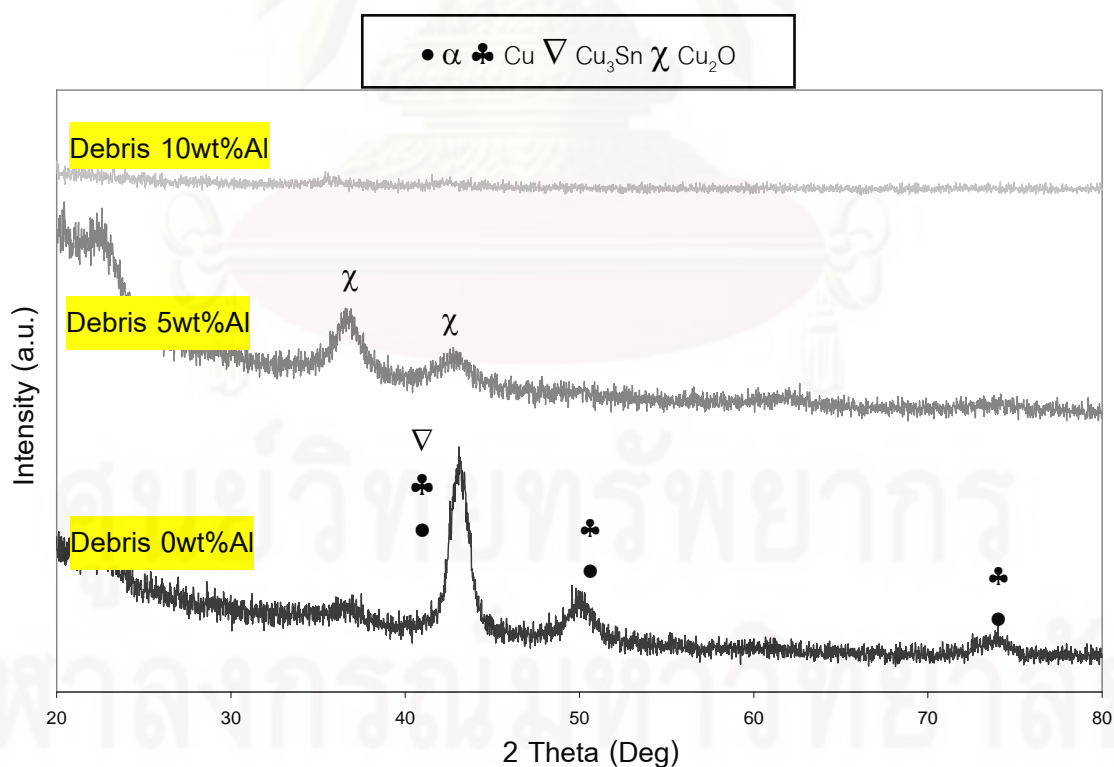
พบว่ามวลที่ลดลงหลังจากการทดสอบการสึกหรอ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยของชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น โดยสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยสำหรับชิ้นงานที่เติมอะลูมิเนียม 0%Al, 5%Al และ 10%Al มีค่า 0.4895, 0.5280 และ 0.5372 ตามลำดับ ส่วนมวลของชิ้นงานที่เป็น disc มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และเมื่อสังเกตจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในภาพที่ 4.46 พบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะมีค่าไม่คงที่ในตอนเริ่มต้น จนชิ้นงานเกิดการสึกหรอจนเต็มพื้นที่หน้าสัมผัสระหว่างชิ้นงานที่เป็น Pin และที่เป็น disc เมื่อระยะทางในการทดสอบมีค่าประมาณ 500 เมตร และหลังจากนั้นจะมีค่าที่ค่อนข้างนิ่งไม่แกว่งไปมามากนัก เช่นเดียวกัน และเมื่อนำมวลที่ลดลงเนื่องจากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงาน 0wt%, 5wt% และ 10wt% ที่เผาขึ้นที่อุณหภูมิ 900° , 830°C และ ชิ้นงานที่ทำการ Heat Treatment และความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน มาเปรียบเทียบกัน จะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4.49, 4.50, 4.51 และ 4.52

เมื่อนำเศษที่เกิดจากการสึกหรอมาทำการตรวจสอบโดยใช้ EDS เพื่อตรวจสอบปริมาณธาตุที่มีอยู่ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 4.26 พบว่ามีปริมาณของธาตุออกซิเจน (O) สูง คล้ายคลึงกับเศษที่เกิดจากการสึกหรอของชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการชุบแข็ง แสดงว่าเกิดการสึกหรอแบบเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน (Oxidative Wear) ร่วมกับการสึกหรอแบบขัดถู เช่นเดียวกัน เมื่อ

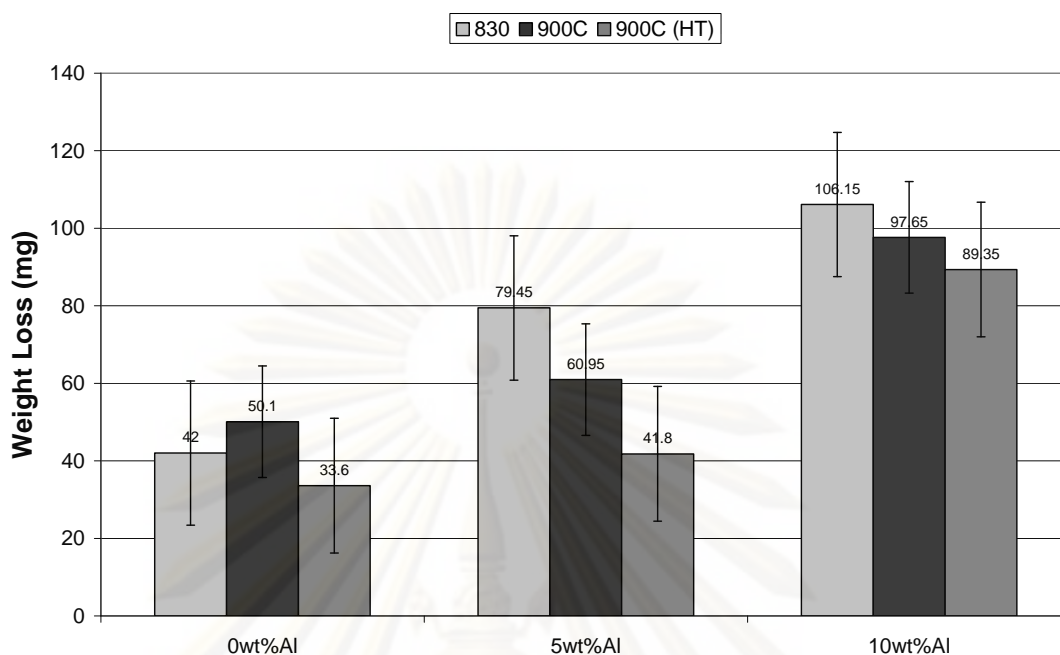
ทำการตรวจสอบเฟสที่เกิดด้วย XRD ผลแสดงในภาพที่ 4.48 พบว่าเศษจากการสึกหรอจากการทดสอบชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมผงอะลูมิเนียม (0 wt%Al) ประกอบด้วยเฟส α ส่วนเศษที่เกิดจากการทดสอบชิ้นงาน 5wt% ประกอบด้วย ออกไซด์ของทองแดงที่อยู่ในรูป Cu_2O ส่วนผล XRD จากเศษจากการทดสอบชิ้นงานที่ผสมผงอะลูมิเนียม 10wt% ไม่ปรากฏว่ามี Peak ของเฟสใดๆขึ้น คาดว่าเกิดจากการที่เศษเนื่องจากการสึกหรอมีปริมาณน้อยเกินไป

ตารางที่ 4.26 ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%) เฉลี่ยของธาตุองค์ประกอบจากเศษที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่มีสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียม 0 wt%, 5 wt% และ 10 wt% ซึ่งผ่านการชุบแข็ง

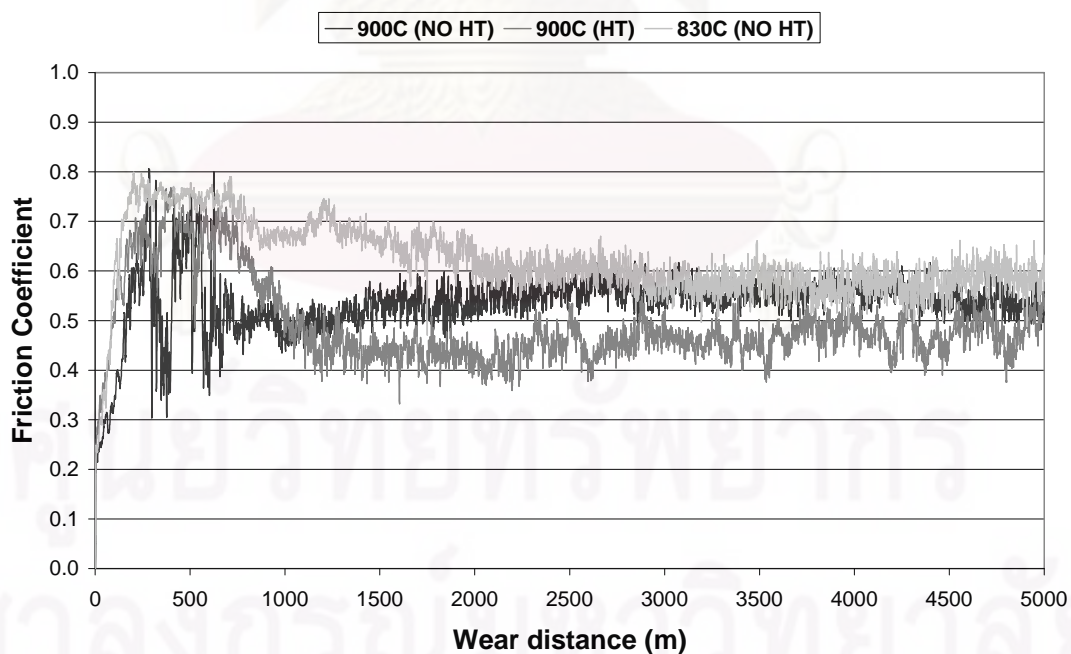
ชิ้นงาน	O	Al	Cr	Fe	Cu	Sn
0 wt%Al	41.63	0.00	0.00	0.00	53.15	5.23
5 wt%Al	66.43	5.04	0.20	0.58	25.48	2.26
10 wt%Al	72.07	8.00	0.44	1.52	16.39	1.58



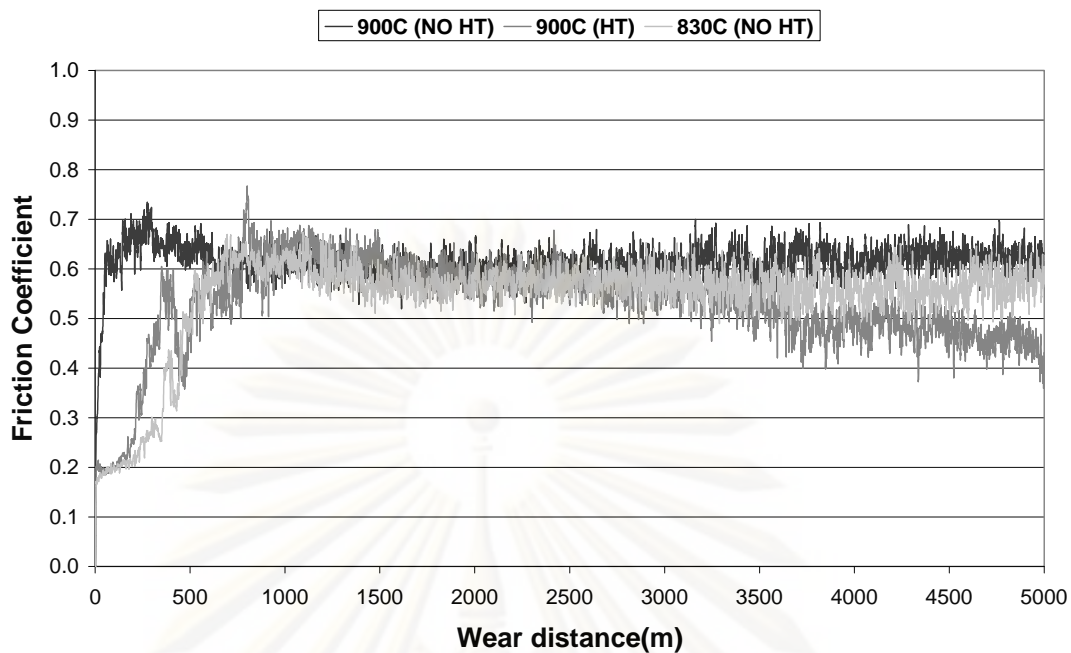
ภาพที่ 4.51 XRD Patterns ของเศษที่เกิดจากการทดสอบการสึกหรอของชิ้นงานที่เผาผืนที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ซึ่งผ่านการชุบแข็ง



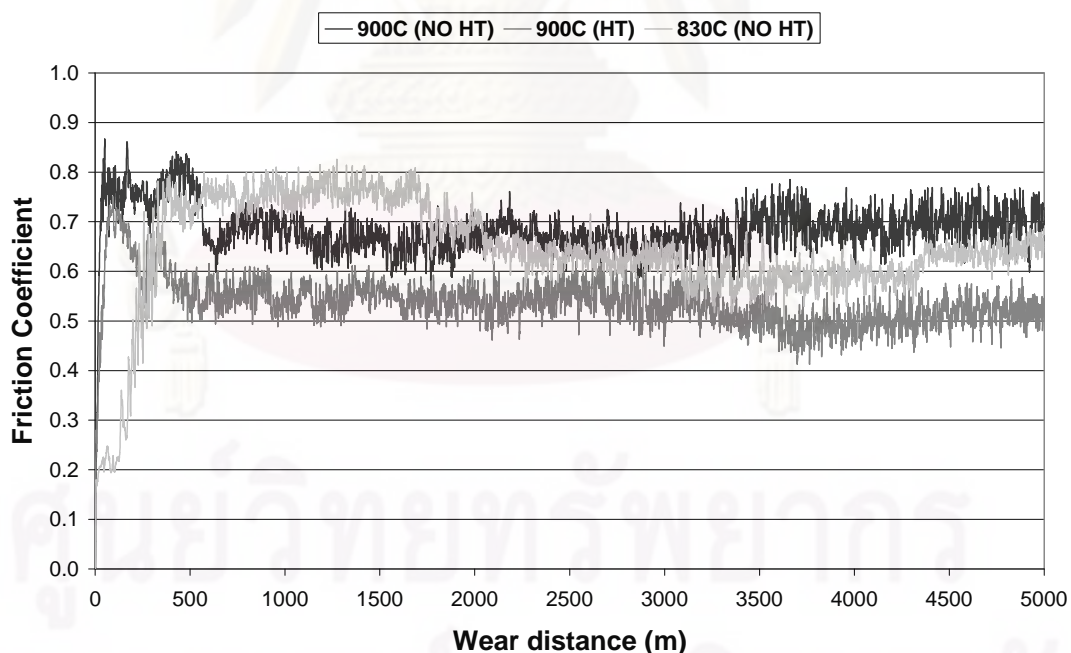
ภาพที่ 4.52 น้ำหนักที่หายไปเนื่องจากการทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc ของชิ้นงาน 0%Al, 5%Al และ 10%Al ที่เผาขึ้นที่ 830°C, 900°C และชิ้นงานที่ทำการ Heat Treatment ที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที



ภาพที่ 4.53 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงาน 0%Al ที่เผาขึ้นที่ 830°C, 900°C และชิ้นงานที่ทำการ Heat Treatment ที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที



ภาพที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงาน 5%Al ที่เผาผืนที่ 830°C, 900°C และชิ้นงานที่ทำการ Heat Treatment ที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที



ภาพที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับระยะทางในการทดสอบการสึกหรอ ของชิ้นงาน 10%Al ที่เผาผืนที่ 830°C, 900°C และชิ้นงานที่ทำการ Heat Treatment ที่ 750°C เป็นเวลา 60 นาที

จากภาพ ที่ 4.49 พบว่า เมื่อสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น การสึกหรอของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น (มวลที่ลดลงหลังจากการทดสอบการสึกหรอเพิ่มขึ้น) ทั้งในชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C , 830°C และ ชิ้นงานที่ผ่านการทำ Heat Treatment ทั้งนี้ส่วนหนึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ชิ้นงานที่มีสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นมีความหนาแน่นลดต่ำลง มีปริมาณรูพรุนสูงขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงลดต่ำลง ซึ่งความแข็งแรงนี้เป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อการสึกหรอแบบขัดถู (Abrasive wear) โดยการสึกหรอแบบขัดถูนี้เป็นกลไกหลักของการสึกหรอของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก

ส่วนเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C และ 830°C พบว่าชิ้นงานที่ผสมผงอะลูมิเนียม 5wt% และ 10wt% ซึ่งเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เกิดการสึกหรอน้อยกว่าชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 830°C ชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมผงอะลูมิเนียม (0wt% Al) พบว่าชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C กลับมีการสึกหรอที่ต่ำกว่า ชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะว่าความแข็งแรงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ไม่ได้ผสมผงอะลูมิเนียมที่เผาผนึกที่ 830°C มีค่าสูงกว่าชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C

นอกจากนี้ยังพบว่าผลของการทำ Heat Treatment ชิ้นงานที่เผาผนึกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที ซึ่งทำให้ชิ้นงาน 5%Al และ 10%Al ที่ผ่านกระบวนการ Heat Treatment มีความแข็งแรงสูงขึ้นกว่าก่อนทำ 37% และ 25% มีการสึกหรอที่ลดลงประมาณ 31% และ 8% ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของสัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียม อลูมิเนียมในการเผาผนึก และระยะเวลาในการคงอุณหภูมิ ที่มีต่อพฤติกรรมการลึกรหรือจากการทดสอบแบบ Pin-on-disc ของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการโลหะผง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. สัดส่วนการเติมผงอะลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C และ 900°C ในทุกๆช่วงเวลาในการคงอุณหภูมิ คือ 5, 30, 45, 60 และ 90 นาที ลดต่ำลง และเมื่อพิจารณาแนวโน้มของปริมาณรูพรุนก็จะมีความสัมพันธ์กัน คือ ปริมาณรูพรุนจะสูงขึ้นเมื่อสัดส่วนในการเติมผงอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ทั้งนี้คาดว่าสาเหตุหลักที่ความหนาแน่นลดต่ำลง และรูพรุนสูงขึ้นนั้น เนื่องจาก Kirkendall Void ซึ่งมีส่วนให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดต่ำลง ทำให้เมื่อผลิตชิ้นงานโดยเติมผงอะลูมิเนียมในสัดส่วนที่สูงขึ้น การลึกรหรือจะเพิ่มสูงขึ้น

2. ความหนาแน่นของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และปริมาณรูพรุนก็จะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยความหนาแน่นจะมีค่าสูงสุด ปริมาณรูพรุนต่ำที่สุด และความแข็งแรงที่สุด เมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเป็น 30 นาที ซึ่งการที่ชิ้นงานมีความหนาแน่นลดต่ำมีส่วนทำให้ความแข็งแรงลดต่ำลง โดยสาเหตุเนื่องจากเวลาในการคงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้อะตอมมีเวลาในการแพร่เพิ่มขึ้น รูพรุนที่เกิดจาก Kirkendall Void จึงมีปริมาณสูงขึ้น และพบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยสำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมผงอะลูมิเนียม (0wt%Al), เติมผงอะลูมิเนียม 5wt% และ 10wt% เผาผนึกที่ 900°C เวลาในการคงอุณหภูมิ มีค่า 0.5363, 0.6120 และ 0.6852 ตามลำดับ

3. ความหนาแน่นของชิ้นงานทองแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนักที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และค่าปริมาณรูพรุนก็จะมีแนวโน้มที่ต่ำลงเมื่อเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นเพราะอุณหภูมิในการเผาผนึกที่ต่ำลงจึงทำให้ต้องการเวลาในการคงอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และความแข็งแรงมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นและสูงที่สุดที่ช่วงเวลาในการคงอุณหภูมิ 60 นาที หลังจากนั้นจะลดลงเล็กน้อย และพบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียด

ทานเฉลี่ยสำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมอะลูมิเนียม (0wt%Al), เติมผงอะลูมิเนียม 5wt% และ 10wt% มีค่า 0.6200, 0.5436 และ 0.6426 ตามลำดับ

4. เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงาน ที่ระยะเวลาในการคงอุณหภูมิที่เท่ากัน พบว่าชิ้นงานส่วนใหญ่ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C มีความหนาแน่นสูงกว่า ปริมาณรูพรุนต่ำกว่า และมีความแข็งแรงสูงกว่า จึงมีการสึกหรอที่ต่ำกว่า ชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C

5. โครงสร้างจุลภาคที่พบในชิ้นงานที่ไม่ได้เติมผงอะลูมิเนียม (0 wt% Al) และชิ้นงานที่เติมผงอะลูมิเนียม 5wt% ที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C และ 900°C คือ เฟส α เป็นหลัก และยังพบว่ามี เฟส Cu 5.6Sn เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เผาผนึกที่อุณหภูมิ 830°C เวลาในการคงอุณหภูมิ 30 นาที และเผาผนึกที่อุณหภูมิ 900°C เวลา 90 นาที ส่วนเฟสที่พบในชิ้นงานที่ผสมผงอะลูมิเนียม 10 wt% พบทั้งเฟส α , β และ $AlCu_4$ และพบว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเฉลี่ยสำหรับชิ้นงานที่ไม่ได้เติมอะลูมิเนียม (0wt%Al), เติมผงอะลูมิเนียม 5wt% และ 10wt% มีค่า 0.4895, 0.5280 และ 0.5372 ตามลำดับ

6. เนื่องจากการเติมผงอะลูมิเนียมในสัดส่วนที่สูงขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นลดต่ำลง ปริมาณรูพรุนสูงขึ้น ความแข็งแรงลดต่ำลง เมื่อผลิตชิ้นงานของแดงผสมดีบุก 10% โดยน้ำหนัก จึงทำให้เกิดการสึกหรอเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้น การปรับปรุงให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงสูงขึ้นโดยนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการอบชุบความร้อน โดยการชุบแข็งตกตะกอนจึงมีความจำเป็น ซึ่งการชุบแข็งตกตะกอนที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 60 นาที ถึงแม้จะทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้นมาก แต่ทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมเหลวและไม่สามารถรักษารูปร่างชิ้นงานเดิมไว้ได้ โดยพบว่าการชุบแข็งตกตะกอนที่อุณหภูมิ 750°C เป็นเวลา 60 นาที ทำให้ชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 5% โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 37% และชิ้นงานที่ผสมอะลูมิเนียม 10% โดยน้ำหนัก มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น 25% โดยไม่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปจนสังเกตเห็นได้ ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบการสึกหรอด้วยวิธี Pin-on-disc มีการสึกหรอลดลง 31% และ 8% ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศอื่นๆ เพิ่มเติม เช่น แก๊สไฮโดรเจน หรือ แก๊สไฮโดรเจนผสมไนโตรเจน เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วการผลิตชิ้นงานแบริงหล่อขึ้นได้เองที่ทำจากทองแดงผสมดีบุกจากกระบวนการโลหะผงนั้นจะทำการเผาผนึกภายใต้บรรยากาศของแก๊สไฮโดรเจน เพราะ ทองแดงเป็นธาตุองค์ประกอบที่เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดี ทำให้
2. ควรมีการเพิ่มจำนวนชิ้นงานในการทดสอบ ความหนาแน่น ปริมาณรูพรุน ความแข็งแรง และการสึกหรอ ให้มีจำนวนมากขึ้น เพื่อให้ค่าของสมบัติที่ได้มีความคงที่แน่นอน

รายการอ้างอิง

- [1] มนต์ สติรจินดา. 2538. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. 1000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] ธนกฤต ไซติ ภาวริศ. 2550. The Study of P/M Tin Bronze Wear behavior by Pin-on-disc Method.
- [3] ASM Powder Metallurgy Committee. 1993. ASM Handbook Volume 7 Powder Metallurgy. Fifth Printing. United State of America
- [4] Gwidon W.Stachowiak, Andrew W.Batchelor. 2005. Engineering Tribology. Elsevier Butterworth-Heinemann. United State of America
- [5] Vapor pressure equation and coefficients from this source in an online version of: David R. Lide (ed), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 84th Edition. CRC Press. Boca Raton, Florida, 2003; Section 4, Properties of the Elements and Inorganic Compounds; Vapor Pressure of the Metallic Elements
- [6] Farooq Bashir, Muhammad Zakria Butt, and Farhat Saleemi. February 2007. Microstructural and Hardness Studies of Cu-10wt.%Sn Alloy Under Different Aging Conditions. Journal of Materials Engineering and Performance Volume 17(1) February 2008: 123–126.
- [7] Tang Wen-ming, He An-qiang, Liu Qi, D. G. Ivey. August 2009. Solid state interfacial reactions in electrodeposited Cu/Sn couples. Transaction of Nonferrous Metals Society of China Volume 20 (2010): 90 – 96
- [8] T.B. Sercombe and G.B. Schaffer. On the role of tin in the nitridation of aluminium powder. Scripta Materialia Volume 55 (2006): 323–326
- [9] N.N. Acharya. Thermal analysis of Slow Cooled Copper-Tin Alloys. Journal of Materials Science Volume 36 (2001): 4779 – 4795
- [10] C. Scheuerlein, M. Di Michiel, A. Haibel. On the Formation of Voids in Internal Tin Nb₃Sn Superconductors



ต้นฉบับไม่มีหน้า 98

NO PAGE 98 IN ORIGINAL

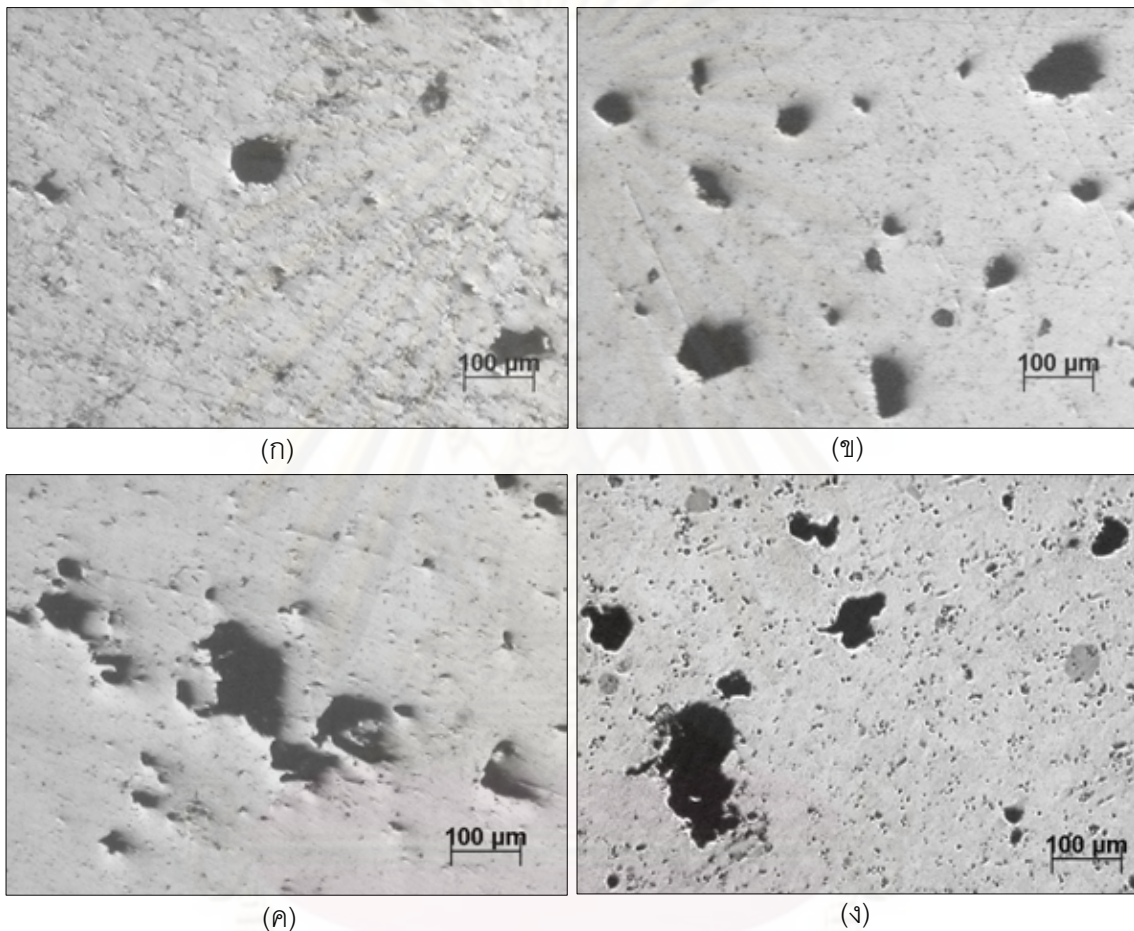
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

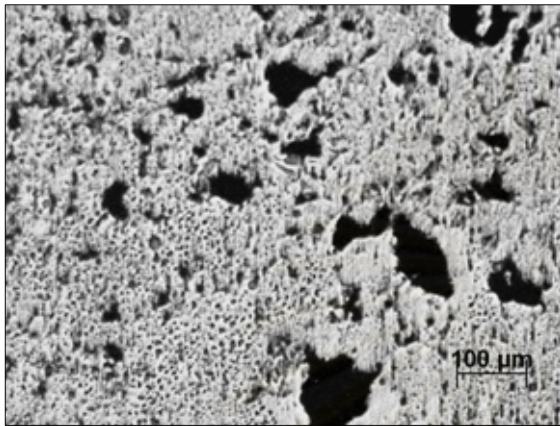
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

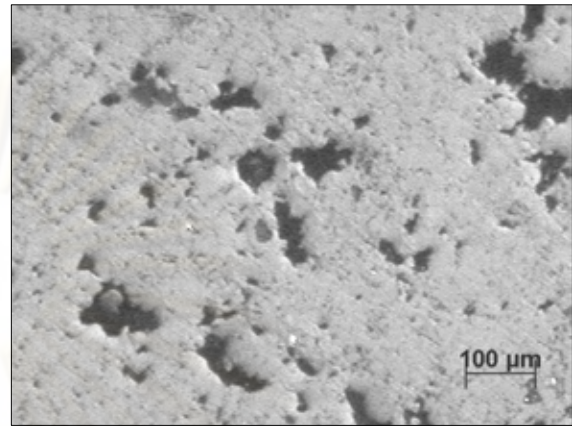


ภาพที่ ก.1 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 900°C ที่ไม่ได้ผสมผงอะลูมิเนียม (0wt%Al) ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 45 นาที, (ค) 60 นาที และ (ง) 90 นาที ตามลำดับ

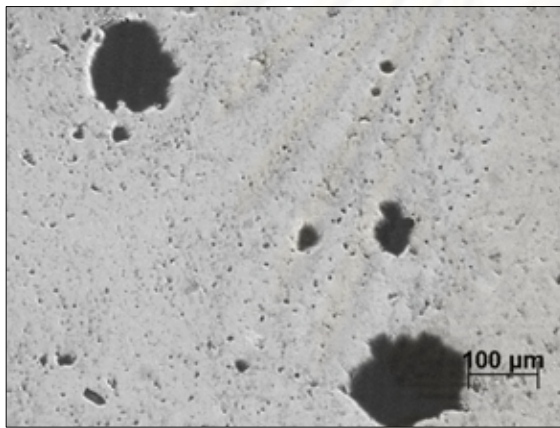
ศูนย์วิทยาศาสตร์สุขภาพ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



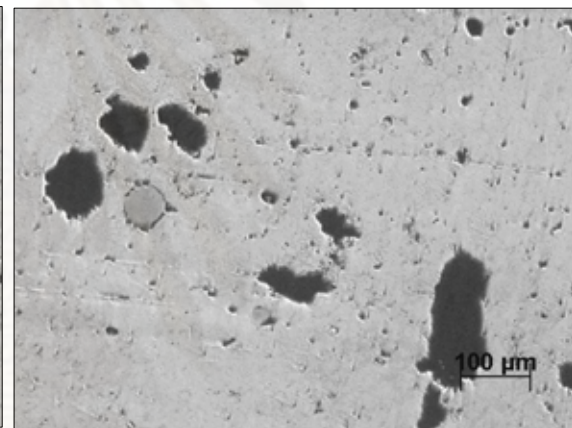
(ก)



(ข)



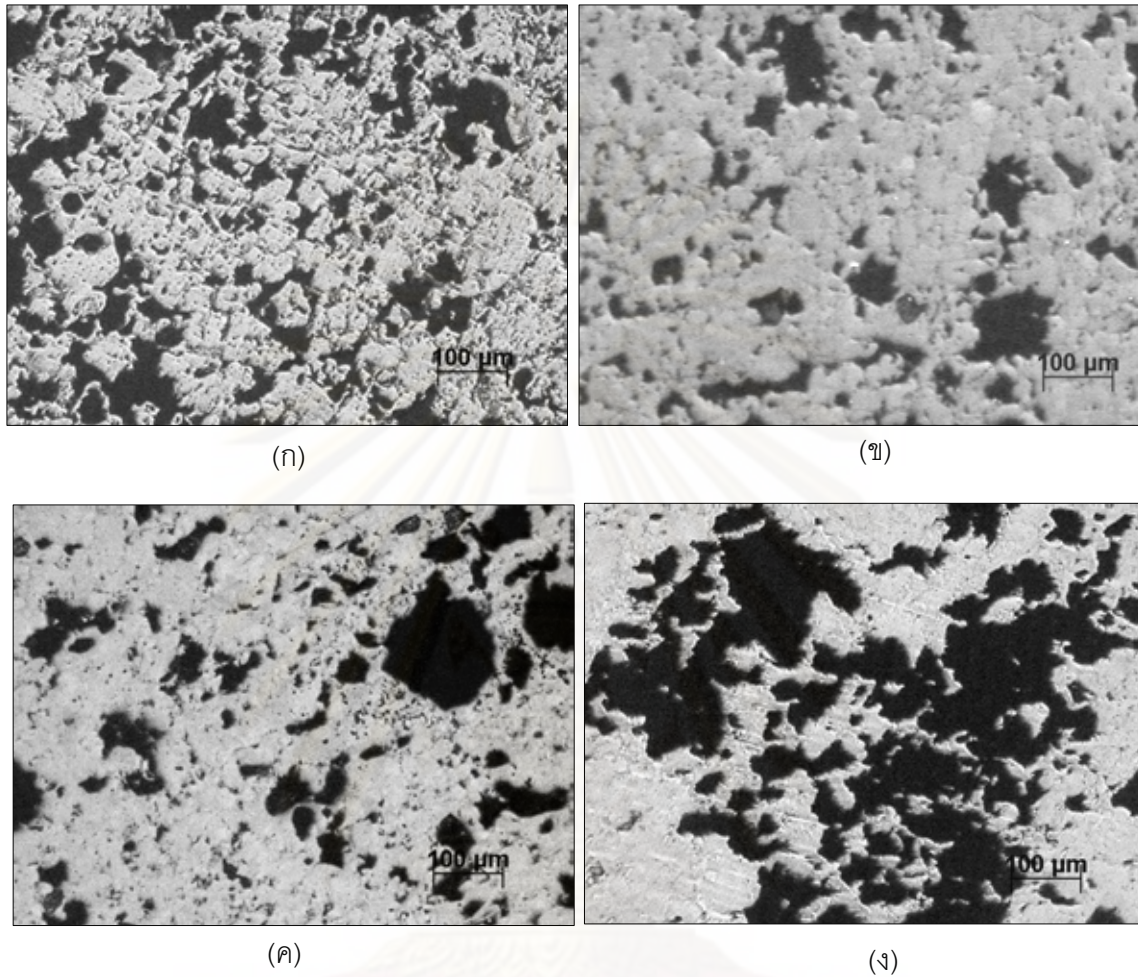
(ค)



(ง)

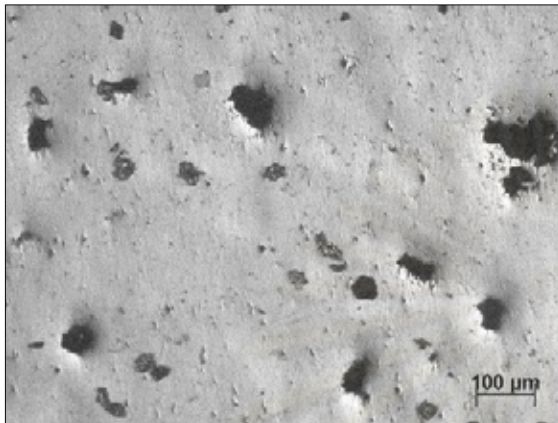
ภาพที่ ก.2 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 900°C ที่ผสมผงอะลูมิเนียม 5wt% ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 45 นาที, (ค) 60 นาที และ (ง) 90 นาที ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

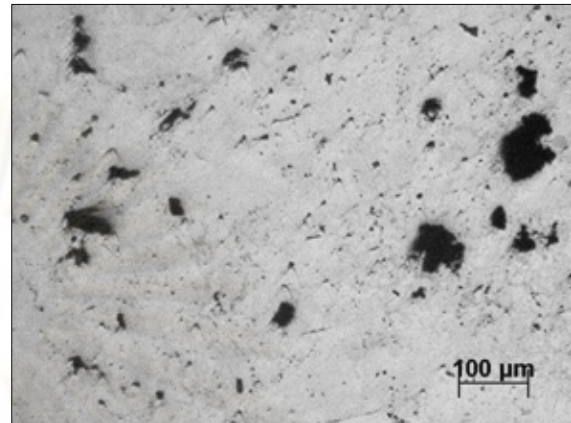


ภาพที่ ก.3 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 900°C ที่ผสมผงอะลูมิเนียม 10wt% ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 45 นาที, (ค) 60 นาที และ (ง) 90 นาที ตามลำดับ

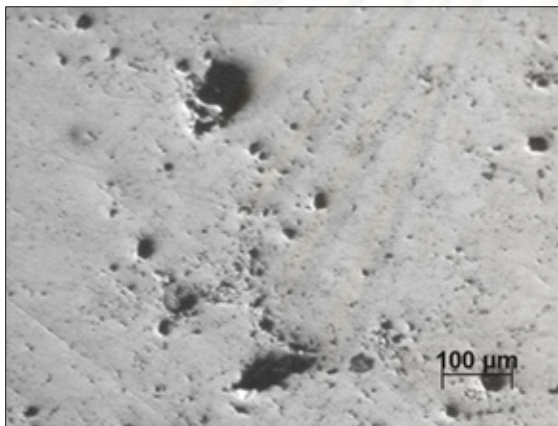
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



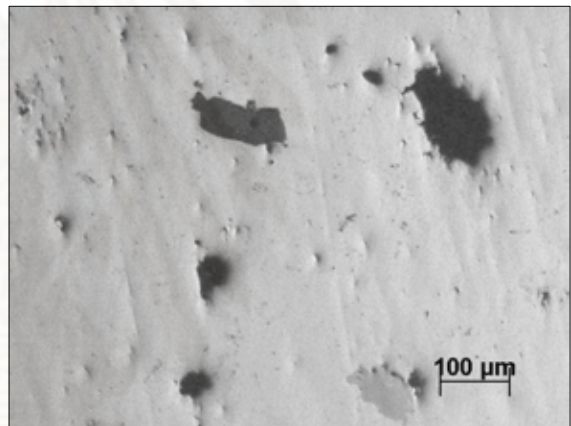
(ก)



(ข)



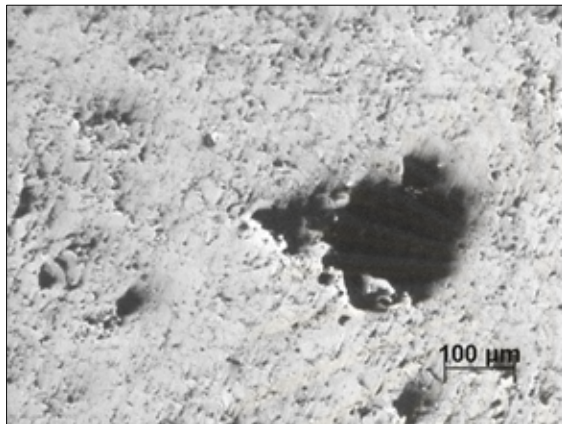
(ค)



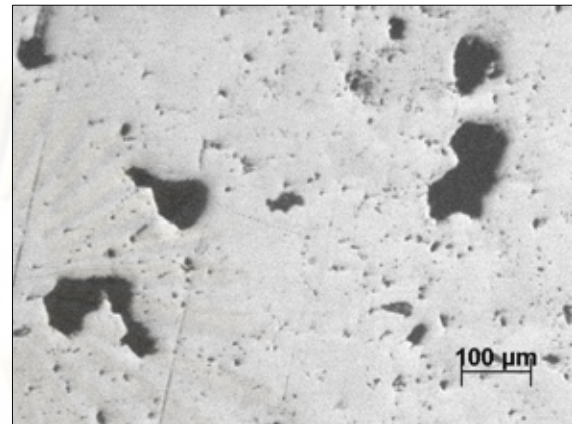
(ง)

ภาพที่ ก.4 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 830°C ที่ไม่ได้ผสมผงอะลูมิเนียม (0wt%Al) ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 45 นาที และ (ง) 90 นาที ตามลำดับ

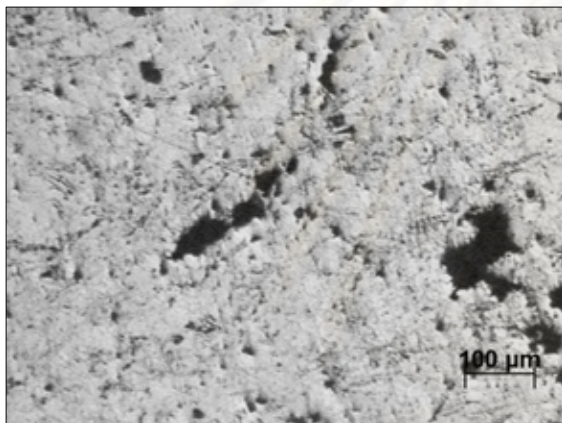
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



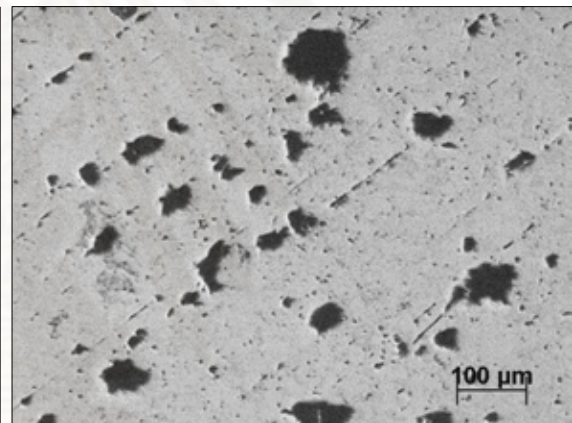
(ก)



(ข)



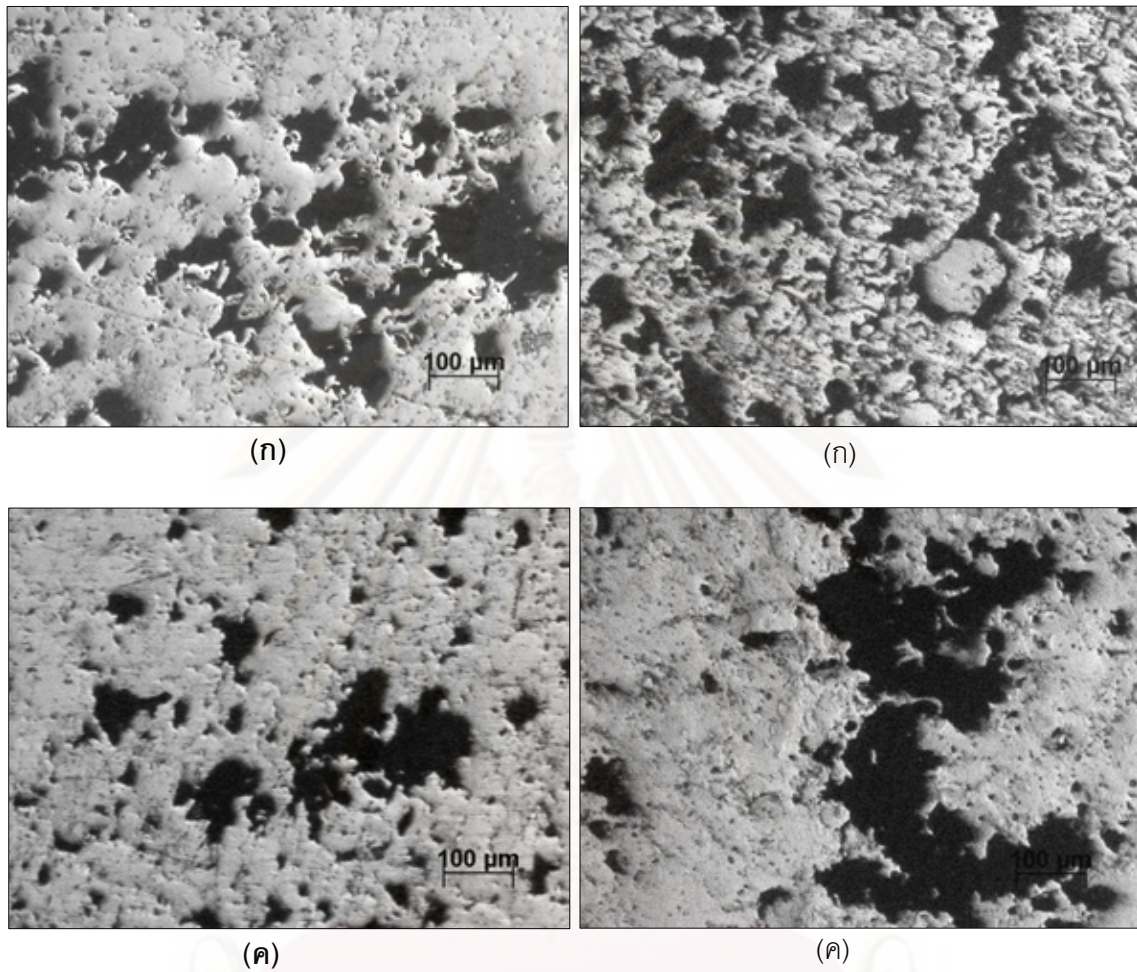
(ค)



(ง)

ภาพที่ ก.5 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาที่อุณหภูมิ 830°C ที่ผสมผงอะลูมิเนียม 5wt% ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 45 นาที และ (ง) 90 นาที ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ ก.6 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานซึ่งเผาขึ้นที่อุณหภูมิ 830°C ที่ผสมผงอะลูมิเนียม 10wt% ที่เวลาในการคงอุณหภูมิต่างๆ (ก) 5 นาที, (ข) 30 นาที, (ค) 45 นาที และ (ง) 90 นาที ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การวัดค่าความหนาแน่น และปริมาณรูพรุนด้วยวิธีการของ Archimedes

หลักของอาร์คิมิดีส (Archimedes' Principle) กล่าวว่า แรงลอยตัว (buoyant force) หรือแรงพยุงที่ของเหลวกระทำต่อวัตถุ มีขนาดเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับ ปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมอยู่ในของเหลว ดังนั้น

$$\begin{aligned} \text{Buoyant force} &= (\text{Weight in air} - \text{Weight in water}) \\ \text{และ Buoyant force} &= \text{น้ำหนักของของเหลวปริมาตรเท่าวัตถุส่วนจม} \\ &= m_{\text{ของเหลว}} g = \rho_{\text{ของเหลว}} V_{\text{ส่วนจม}} g \\ \text{ดังนั้น } (\text{Weight in air} - \text{Weight in water}) g &= \rho_{\text{ของเหลว}} V_{\text{ส่วนจม}} g \\ (\text{Weight in air} - \text{Weight in water}) &= \rho_{\text{ของเหลว}} V_{\text{ส่วนจม}} \end{aligned}$$

อัตราส่วนน้ำหนักแห้ง (Dry weight)

$$\frac{\text{Dry weight}}{\text{Weight in air} - \text{Weight in water}} = \frac{\text{Dry weight}}{\rho V}$$

จาก $\rho_{\text{ของเหลว}} = 1 \text{ g/cm}^3$ จะได้ $\frac{\text{Dry weight}}{\text{Weight in air} - \text{Weight in water}} = \frac{\text{Dry weight}}{V}$

$$\therefore \text{ความหนาแน่นรวมทั้งชิ้นงาน Bulk density} = \frac{\text{Dry weight}}{\text{Weight in air} - \text{Weight in water}}$$

โดยที่ ปริมาตร $V = \text{Weight in air} - \text{Weight in water}$ เป็นปริมาตร 100%

และเมื่อนำชิ้นงานไปให้ความร้อนในน้ำเพื่อให้น้ำแทนที่รูพรุนเปิด จะได้ว่า

ปริมาตรของน้ำที่แทนที่ในรูพรุน หรือ ปริมาตรรูพรุน = $\text{Weight in air} - \text{Dry Weight}$

$$\therefore \% \text{Porosity} (\% \text{รูพรุน}) = \frac{\text{Weight in air} - \text{Dry weight}}{\text{Weight in air} - \text{Weight in water}} \times 100$$

ปริมาตรของชิ้นงาน(ไม่รวม porosity) = ปริมาตรของ bulk density - ปริมาตรรูพรุน

$$= (\text{Weight in air} - \text{Weight in water}) - (\text{Weight in air} - \text{Dry Weight})$$

$$= \text{Dry Weight} - \text{Weight in water}$$

$$\therefore \text{ความหนาแน่นปรากฏ Apparent density} = \frac{\text{Dry weight}}{\text{Dry Weight} - \text{Weight in water}}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ – นามสกุล	นายวิริยะ ชอบออมทรัพย์
วัน – เดือน – ปีเกิด	23 ตุลาคม 2525
ที่อยู่	609/12 หมู่บ้านเกตุนุกติการ์เด็นท์ ซอยนวมินทร์ 137 แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม กทม. 10230
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2548
โทรศัพท์ติดต่อ	089-128-1572

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย