

การผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินาจากระบบอะลูมิเนียม-แมงกานีสไดออกไซด์
โดยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ

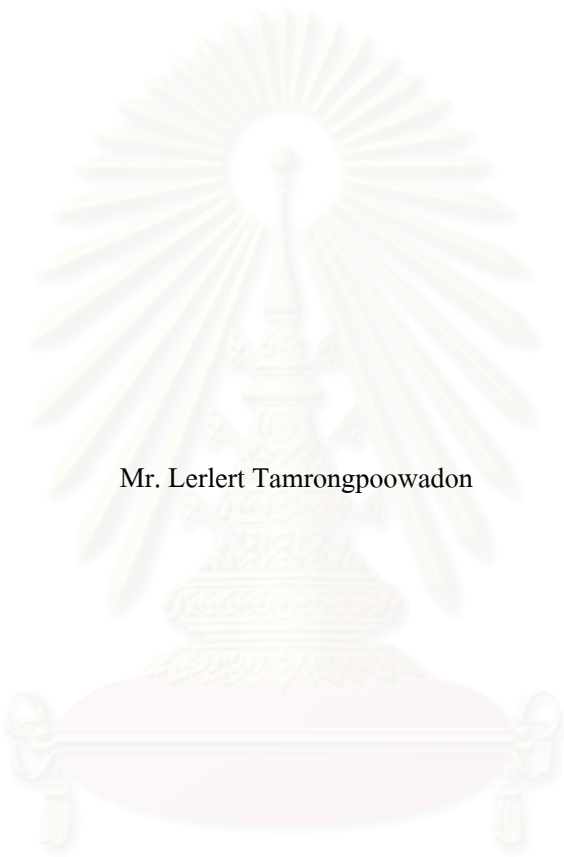


นายเลอเลิศ ชำรงภูวคต

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PRODUCTION OF ALUMINIUM-ALUMINA COMPOSITE FROM ALUMINIUM-
MANGANESE DIOXIDE SYSTEM BY POWDER FORGING PROCESS



Mr. Lerlert Tamrongpoowadon

สถาบันวิทยบริการ
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 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียม – อะลูมินาจากระบบอะลูมิเนียม –
แมงกานีสไดออกไซด์ โดยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ

โดย

นายเลอเลิศ ชำรงภูวคณ

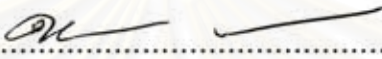
สาขาวิชา

วิศวกรรมโลหการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

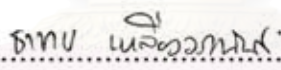
อาจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์


คณะกรรมการศาสตราจารย์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ชिरก ธารวัฒน์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไสว คำนชัยวิจิตร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิตารัตนพร)

เลอเลิศ ชำรงภูวคณ : การผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินา จากระบบอะลูมิเนียม-แมงกานีสไดออกไซด์ โดยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ.(PRODUCTION OF ALUMINIUM-ALUMINA COMPOSITE FROM ALUMINIUM-MANGANESE DIOXIDE SYSTEM BY POWDER FORGING PROCESS) อ. ที่ปรึกษา อ. ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์, 105 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาการผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินา โดยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ และผลของส่วนผสม, อุณหภูมิ, เวลา และแรงที่ใช้ในกระบวนการ การผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินาจากกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะเริ่มจากการผสมผงอะลูมิเนียมเข้ากับผงแมงกานีสไดออกไซด์ที่ส่วนผสม 1%, 5%, 10% และ 15% โดยอะตอม ในการทดลองมีการผสมแบบสุ่มโดยการคนให้เข้ากัน และการผสมโดยเครื่อง rocking mill พบว่าการผสมโดยเครื่อง rocking mill จะให้ผงที่มีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีต่อการทดลองมากกว่าการผสมแบบสุ่มโดยการคน จากการวิเคราะห์ด้วย DTA พบว่าเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนอย่างรุนแรงในช่วงอุณหภูมิ 190°C-250°C และในช่วงอุณหภูมิ 560°C-650°C เมื่อนำผงที่ได้มาทำการอัดขึ้นรูปพบว่ายิ่งปริมาณส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์มากขึ้นจะให้ความสามารถในการอัดขึ้นรูปต่ำลง ชิ้นงานเมื่อตีขึ้นรูปร้อนแล้วพบว่าความต้านทานแรงดึงมีค่าต่ำมากเมื่อนำไปตรวจสอบด้วย XRD พบว่าการแตกตัวของแมงกานีสไดออกไซด์เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์และไม่มีอะลูมินาเสริมแรงเกิดขึ้น นอกจากนั้นการเชื่อมประสานกันของผงยังเกิดขึ้นน้อย จึงมีการเพิ่มขึ้นคอนในการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C และ 650°C โดยใช้เวลา 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมงพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าและเวลาที่มากกว่าจะให้ชิ้นงานที่มีความต้านทานแรงดึงดีกว่า ในการตีขึ้นรูปร้อนพบว่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานมากขึ้นเมื่อแรงที่ใช้ในการตีขึ้นรูปมากขึ้น ความแข็งที่ได้พบว่าที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อน 650°C และที่เวลาในการอบให้ความร้อนนานกว่าจะได้ชิ้นงานที่มีความแข็งมากกว่า

ชิ้นงานวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินาที่ผลิตได้พบว่ามีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดมากที่สุดที่ 125 MPa และมีความแข็งที่ผิวสูงสุด 53.6 HV เมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคพบว่าอะลูมินาที่เกิดขึ้นจะเกิดที่บริเวณสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับแมงกานีสไดออกไซด์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต..... *Isaay Kongsri*.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... *ธาทง เหลืองวรานันท์*.....
 ปีการศึกษา..... 2549.....

4670464721 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD: ALUMINIUM ALUMINA METAL MATRIX COMPOSITE / IN-SITU MnO_2 / HOT FORGING

LERLERT TAMRONGPOOWADON : PRODUCTION OF ALUMINIUM-ALUMINA COMPOSITE FROM ALUMINIUM-MANGANESE DIOXIDE SYSTEM BY POWDER FORGING PROCESS. THESIS ADVISOR : TACHAI LUANGVARANUNT, Ph.D., 105 pp.

The present work aims to study the production of $Al-Al_2O_3$ composite by powder forging process and understand the influence of composition, temperature, time and pressure in the process. $Al-MnO_2$ powder with 1.0, 5.0, 10.0 and 15.0 atom% MnO_2 were mixed by agitation and rocking mill machine. The mixture from rocking mill machine mixing showed better thermal characteristic than agitation mixing. From analyzing by DTA, the mixture from rocking mill machine mixing have violence exothermic reaction at $190^\circ C-250^\circ C$ and $560^\circ C-650^\circ C$. The cold compaction ability varies with amount of MnO_2 . Mechanical property of hot forged specimen from tensile test is very low. From analyzing by XRD, Alumina phase is not form and oxidation of MnO_2 is incomplete. Then additional process is by annealing at $600^\circ C$ and $650^\circ C$ for 10, 20, 30 and 40 hours after hot forged. The resulting from tensile test showed good mechanical property specimen. The specimen from annealing at high temperature and long time shows better mechanical properties than the specimen from annealing at low temperature and short time.

The best mechanical properties of specimen from this work are 125 MPa in ultimate tensile strength and 53.6 HV. From analyzing microstructure by SEM and EDS, Al_2O_3 formation is at the interface between Al and MnO_2 .

Department Metallurgical Engineering... Student's signature *Lerbert Tamrongpoowadon*
 Field of study Metallurgical Engineering... Advisor's signature *Tachai Luangvaranunt*
 Academic year2006.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ธาชาย เหลืองวรานันท์ ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและแนะนำแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย ในฐานะประธานคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ Assoc. Prof. Dr. Katsuyoshi Kondoh จาก Osaka University, Japan. ที่ให้ความช่วยเหลือวัสดุในงานวิจัย ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ปฐมา วิสุทธิพิทักษ์กุล ที่ได้ให้คำแนะนำ และอาจารย์ในภาควิชาโลหการทุกท่าน

ขอบคุณคุณเสนีย์ มณีเพชร ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการเครื่องกลโลหะ ขอขอบคุณสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือวิเคราะห์ และคุณศรีใจล ขุนทด ที่ให้คำแนะนำในขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วย XRD ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือทดสอบในงานวิจัย และขอบคุณ ศูนย์วิจัยโลหะและวัสดุ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา – มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนในด้านต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา และให้กำลังใจแก่ผู้เขียนจนสำเร็จการศึกษา ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คุณครู อาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอนผู้เขียนมาตลอดตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และผู้เขียนขอขอบคุณ บุคลากรในภาควิชาทุกท่าน เพื่อน ๆ ทุกคน โดยเฉพาะกลุ่มวิจัยโลหะผง ที่ให้คำแนะนำและกำลังใจแก่ผู้เขียนจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ปรีทรรสนวัตกรรม	3
2.1 กระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ.....	3
2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมงกานีส.....	4
2.3 วัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะ.....	5
2.4 กระบวนการการผลิตวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะ.....	6
2.4.1 กระบวนการเฟสของเหลว.....	7
2.4.2 กระบวนการเฟสของแข็ง.....	7
2.4.3 กระบวนการสองเฟส.....	9
2.4.4 วิธีการเกาะติดผิววัสดุ.....	9
2.4.5 กระบวนการ In Situ.....	10
2.5 รอยต่อในวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะ.....	11
2.6 คุณสมบัติของวัสดุผสม.....	13
2.6.1 ความหนาแน่นของวัสดุผสม.....	13
2.6.2 มอดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุผสม.....	13

2.6.3 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุผสม.....	14
2.7 ประโยชน์และการใช้งานของวัสดุผสม.....	15
2.8 ผลของวัสดุเสริมแรงที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุผสม.....	17
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
2.10 ปฏิกริยาเคมีที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในงานวิจัยนี้.....	21
3 ระเบียบวิธีการวิจัย	22
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง	22
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง	22
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	23
3.3.1 การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะและ ตรวจวัดคุณลักษณะ.....	23
3.3.1.1 การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ.....	23
3.3.1.1.1 การผสมผง.....	23
3.3.1.1.2 การอัดขึ้นรูป.....	24
3.3.1.1.3 การอบให้ความร้อน.....	25
3.3.1.1.4 การตีขึ้นรูปร้อน.....	26
3.3.1.2 การตรวจวัดคุณลักษณะทางความร้อน.....	27
3.3.1.3 การวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน	28
3.3.1.4 การตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงานและเฟสอะลูมินาเสริมแรง ในชิ้นงานด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ energy dispersive spectrometer (EDS).....	28
3.3.2 การตรวจสอบหาเฟสอะลูมินาเสริมแรงในชิ้นงาน.....	29
3.3.2.1 การละลายอะลูมิเนียมด้วยกรดเกลือ.....	30
3.3.2.2 การกรองแยกตะกอน	30
3.3.2.3 การตรวจสอบหาอะลูมินาเสริมแรงด้วย X-ray diffractometer(XRD).....	30
3.3.3 การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกล.....	31
3.4 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง.....	32
4 ผลการทดลอง.....	34
4.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของผงตั้งต้นด้วย DTA และ SEM.....	34
4.2 ผลการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง.....	37

4.2.2 การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ	37
4.2.2.1 การผสมผง.....	37
4.2.2.2 การอัดขึ้นรูป.....	38
4.2.2.3 การตีขึ้นรูปร้อน.....	40
4.2.3 การทดสอบแรงดึง.....	44
4.2.4 การตรวจสอบเฟสอะลูมินาเสริมแรงด้วย XRD.....	47
4.3 การทดลองกลุ่มที่สอง.....	50
4.3.1 การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ.....	51
4.3.1.1 การผสมผง.....	51
4.3.1.2 การอัดขึ้นรูป.....	52
4.3.1.3 การอบให้ความร้อน.....	54
4.3.1.4 การตีขึ้นรูปร้อน.....	56
4.3.2 การทดสอบแรงดึง.....	57
4.3.3 การตรวจสอบหาอะลูมินาโดยใช้วิธีละลายในกรด.....	67
4.3.4 การวัดความแข็ง.....	69
4.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค.....	72
5 อภิปรายผลการทดลอง	81
6 สรุปผลการทดลอง	90
รายการอ้างอิง	91
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก	96
ภาคผนวก ข	99
ภาคผนวก ค	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	105

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนน้ำหนักของผงทั้งหมดที่ใช้ในการผสมในการทดลอง	23
4.1 ผลความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการอัดขึ้นรูป.....	39
4.2 ผลความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการตีขึ้นรูปร้อน...	41
4.3 ผลการทดสอบแรงดึงโดยแสดงค่าพื้นที่หน้าตัดและค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด.....	45
4.4 ความดันอัดในการอัดขึ้นรูป ความหนาแน่นสัมพัทธ์ และการเกิดระเบิดของชิ้นงาน.....	53
4.5 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานจากการอบให้ความร้อนที่ 650°C เวลา 30 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปทำการตีขึ้นรูปร้อน.....	54
4.6 ความหนาแน่นของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อน ที่มีผลมาจากความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อน ที่แตกต่างกัน.....	56
4.7 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C นาน 30 ชั่วโมง และทำการตีขึ้นรูปร้อนโดยใช้ความดันอัดที่แตกต่างกัน.....	58
4.8 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C นาน 30 ชั่วโมง และทำการตีขึ้นรูปร้อนโดยใช้ความดันอัดที่แตกต่างกัน.....	58
4.9 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C โดยใช้เวลา ต่างๆ กันการตีขึ้นรูปร้อนที่ความดันแรงอัด 660 MPa และยังมีการสลับขั้นตอนระหว่าง การอบให้ความร้อนและการตีขึ้นรูปร้อน โดยทุกชิ้นมีส่วนผสม Al-1atom%MnO ₂	59
4.10 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C โดยใช้เวลา 40 ชั่วโมง และทำการตีขึ้นรูปร้อนที่ความดันอัดต่างๆ กัน.....	60
4.11 ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานอบให้ความร้อน 600°C แรงดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อน 660 MPa ส่วนผสม Al-1atom%MnO ₂	70
4.12 ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานอบให้ความร้อน 600°C และ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ส่วนผสม Al-1atom%MnO ₂ แรงดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนต่างกัน.....	70

สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	แผนภูมิสมมูลของอะลูมิเนียม-แมงกานีส.....4
2.2	ผลของปริมาณแมงกานีสต่อคุณสมบัติเชิงกล เติมใน wrought 99.95%Al quench ในน้ำเย็นจาก 565°C.....5
2.3	กลไกการเกิดการยึดติดโดยการแพร่.....8
2.4	กระบวนการ self-propagating high-temperature synthesis (SHS)10
2.5	ความหนาของชั้นรอยต่อที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-Al-V เสริมแรง ด้วยเส้นใยเคียวซิลิคอนคาร์ไบด์.....12
2.6	วัสดุผสมของอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นส่วนประกอบในยานยนต์.....15
2.7	(ก) แสดงค่าความแข็งแรงแรงดึงที่สัมพันธ์กับสัดส่วนปริมาณของอนุภาควัสดุ เสริมแรง , (ข) แสดงการยึดตัวเป็นผลมาจากสัดส่วนปริมาณของอนุภาคเสริมแรง.....17
3.1	ลำดับการอบให้ความร้อนขึ้นงานในขั้นตอนการอบให้ความร้อน25
3.2	ลำดับการอบให้ความร้อนขึ้นงานก่อนการตีขึ้นรูปร้อน26
3.3	ลำดับการให้ความร้อนกับผงตัวอย่างในการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อน.....27
3.4	ทิศทางการตัดชิ้นงานตีขึ้นรูปผงโลหะเพื่อนำไปตรวจสอบ โครงสร้างจุลภาค.....29
3.5	ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงสำหรับชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อน.....31
3.6	แผนภาพขั้นตอนการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง.....32
3.7	แผนภาพขั้นตอนการทดลองกลุ่มที่สอง.....33
4.1	ผลการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อนของผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่ ใช้ในการทดลองโดยจากผลที่ได้พบว่าผงอะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดลอง แสดงจุดหลอมเหลวที่ 656.5°C.....35
4.2	ผลการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อนของผงแมงกานีสไดออกไซด์ บริสุทธิ์ที่ใช้ในการทดลองโดยจากผลที่ได้พบว่าผงแมงกานีสไดออกไซด์ ที่ใช้ในการทดลองแสดงจุดหลอมเหลวที่ 524.3°C.....35
4.3	ภาพจาก SEM แสดงลักษณะของผงอะลูมิเนียมที่มีขนาดผง 148.8 μm ที่กำลังขยาย 43เท่า.....36

รูปที่	หน้า
4.4 ภาพจาก SEM แสดงลักษณะของผงแมงกานีสไดออกไซด์ที่มีขนาด 8-18 μm ที่กำลังขยาย 300 เท่า.....	36
4.5 ลักษณะของผงอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสไดออกไซด์โดยถ่ายทางซ้ายเป็นการผสมกันแบบสุ่มโดยใช้วิธีคนให้เข้ากัน และถ่ายทางขวาเป็นการผสมโดยใช้เครื่อง rocking mill.....	37
4.6 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อนของผงอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสไดออกไซด์ที่ทำการผสมโดยวิธีการผสมแบบสุ่มโดยการคนให้เข้ากัน โดยผลที่ได้จะแสดงจุดหลอมเหลวของทั้งผงอะลูมิเนียมที่ 656°C และผงแมงกานีสไดออกไซด์ที่ 523.4°C	38
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสม กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ ของ 5atom%, 10atom% และ 15atom% แมงกานีสไดออกไซด์ ที่ผ่านการอัดขึ้นรูป.....	40
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสม กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของ 5atom%, 10atom% และ 15atom% แมงกานีสไดออกไซด์ ที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อน.....	42
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงาน กับความหนาแน่นสัมพัทธ์จากการอัดขึ้นรูปและความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากทำการตีขึ้นรูปร้อน	43
4.10 ลักษณะผิวชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อนที่ผ่านการกลึงเป็นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง ก่อนนำไปขัดแต่งผิวชิ้นงานแล้วจึงนำไปทำการทดสอบแรงดึง.....	44
4.11 แผนภาพความเค้น-ความเครียด จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อน ที่มีส่วนผสม Al- 5atom%MnO ₂	45
4.12 แผนภาพความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อน ที่มีส่วนผสม Al- 10atom%MnO ₂	46
4.13 แผนภาพความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อน ที่มีส่วนผสม Al- 15atom%MnO ₂	46
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด เฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละกลุ่ม.....	47
4.15 ผล XRD ของชิ้นงานที่ 8 หลังจากการทดสอบแรงดึงพบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและ bixbyite (Mn ₂ O ₃).....	47

รูปที่	หน้า
4.16 ผล XRD ของชิ้นงานที่ 8 หลังจากการทดสอบแรงดึง จากนั้นนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและ bixbyite (Mn_2O_3) ประกอบอยู่.....	48
4.17 ผล XRD ของชิ้นงานที่ 8 หลังจากการทดสอบแรงดึง จากนั้นนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและ bixbyite (Mn_2O_3)	49
4.18 ผล XRD ของชิ้นงานที่ 8 หลังจากการทดสอบแรงดึง จากนั้นนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียม, bixbyite (Mn_2O_3) และ hausmannite (Mn_3O_4) ประกอบอยู่	50
4.19 ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของผง Al-MnO ₂ ที่ผ่านการผสมโดยเครื่อง rocking mill ภายใต้อากาศของก๊าซไนโตรเจน.....	51
4.20 ผล XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อน และทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและ manganosite (MnO) ประกอบอยู่.....	52
4.21 ลักษณะของชิ้นงานที่เกิดการระบิดขึ้นในระหว่างการอบให้ความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 190°C-250°C ของชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์มากกว่า 90%.....	53
4.22 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ทำการตีขึ้นรูปร้อน และทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เป็นระยะเวลา 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 650°C เป็นระยะเวลา 40 ชั่วโมง.....	55
4.23 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ของแรงในการตีขึ้นรูปร้อนกับความหนาแน่นสัมพัทธ์.....	57
4.24 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดโดยเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการอบให้ความร้อนระหว่าง 600°C และ 650°C ใช้เวลา 30 ชั่วโมง ที่ความดันอัดต่างๆ กัน.....	61
4.25 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการตีขึ้นรูปร้อน โดยเป็นชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่ 600°C , 30 ชั่วโมง.....	62
4.26 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบแรงที่ใช้ในการตีขึ้นรูปร้อน โดยเป็นชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่ 650°C , 30 ชั่วโมง.....	62
4.27 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบความดันอัดที่ใช้ในการตีขึ้นรูปร้อน โดยเป็นชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่ 650°C , 40 ชั่วโมง.....	63

รูปที่	หน้า
4.28 แผนภูมิความเค้น-ความเครียด เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการอบให้ความร้อน ที่เวลา 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิ 600°C.....	63
4.29 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบเมื่อเราสลับกระบวนการ จากการตีขึ้นรูป และ การอบให้ความร้อน โดยใช้ชิ้นงานที่อบให้ความร้อน 600°C ก.) 10 ชั่วโมง ข.) 20 ชั่วโมง ค.) 30 ชั่วโมง ง.) 40 ชั่วโมง โดยใช้แรงในการตีขึ้นรูป 660 MPa.....	64
4.30 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบเมื่อเราสลับลำดับขั้นตอนการตีขึ้นรูป และ ความดันในการตีขึ้นรูปร้อนที่ใกล้เคียงกัน โดยใช้ชิ้นงานที่อบให้ความร้อน 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง (ก.) 10 ชั่วโมง (ข.) 20 ชั่วโมง (ค.) 30 ชั่วโมง (ง.) 40 ชั่วโมง.....	65
4.31 รูปถ่ายจาก SEM ของรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงที่กำลังขยาย 70 เท่า แสดง การกระจายตัวของเฟสเสริมแรงในชิ้นงาน.....	66
4.32 รูปถ่ายจาก SEM ของเฟสเสริมแรงในรอยแตกของชิ้นงานจากการทดสอบแรงดึง ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงความต่อเนื่องกันของเฟสเสริมแรงกับเนื้อพื้น.....	66
4.33 รูปถ่ายจาก SEM ของเฟสเสริมแรงในรอยแตกของชิ้นงานจากการทดสอบแรงดึง ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงความต่อเนื่องกันของเฟสเสริมแรงกับเนื้อพื้น.....	67
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของตะกอนที่ได้มาจากการละลายด้วยกรดกับเวลา ที่ใช้ในการอบให้ความร้อนของ Al บริสุทธิ์และ Al-1%MnO ₂ ที่อุณหภูมิ 650°C.....	68
4.35 ผลของการตรวจสอบธาตุด้วยเครื่อง XRD ของตะกอนที่ได้จากการละลายด้วย กรดของชิ้นงาน Al-1%MnO ₂ ที่อบที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง.....	68
4.36 ผลของการตรวจสอบธาตุด้วยเครื่อง XRD ของตะกอนที่ได้จากการละลายด้วย กรดของชิ้นงาน Al-บริสุทธิ์ ที่อบที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง.....	69
4.37 ผลของเวลาที่ใช้ในการอบให้ความร้อนที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงาน Al-1atom%MnO ₂ ที่ตีขึ้นรูปร้อนที่ความดันอัด 660 MPa.....	71
4.38 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบให้ความร้อน และความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อน ที่มีผลต่อความแข็งของชิ้นงาน Al-1atom%MnO ₂ ที่ใช้เวลาอบให้ความร้อน 30 ชั่วโมง.....	71
4.39 โครงสร้างที่กำลังขยาย 50 เท่าแสดงโครงสร้างโดยรวมของชิ้นงาน.....	72
4.40 โครงสร้างโดยรวมที่กำลังขยาย 50 เท่าจากกล้องจุลทรรศน์แสง แสดงโครงสร้าง โดยรวมของชิ้นงาน ที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง.....	73

รูปที่	หน้า
4.41 โครงสร้างโดยรวมที่กำลังขยาย 50 เท่าจากกล้องจุลทรรศน์แสง แสดงโครงสร้างโดยรวมของชิ้นงาน ที่ทำการตีขึ้นรูปร้อนและอบให้ความร้อนที่ 650°C	73
4.42 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงโครงสร้างที่กำลังขยาย 500 เท่าแสดงเฟสที่พบในชิ้นงาน (ก) ภาพแบบ secondary electron image (ข) ภาพแบบ backscatter electron image.....	74
4.43 ภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงกลุ่มอะลูมินา และผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ A (ก) เป็นภาพแบบ Backscattered electron image และ (ข) เป็นภาพแบบ Secondary electron image.....	75
4.44 ภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงกลุ่มอะลูมินา และกลุ่มของอะลูมินาที่ปนอยู่กับแมงกานีสออกไซด์ (ก) เป็นภาพแบบ Backscattered electron image และ (ข) เป็นภาพแบบ Secondary electron image (ค) ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ A (ง) ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ B (จ) ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ C.....	76
4.45 ภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 35,00 เท่า ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง แสดงเฟสต่างในชิ้นงานและผลการตรวจสอบด้วย EDS.....	77
4.46 ภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงกลุ่มอะลูมินา, แมงกานีสออกไซด์ และเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (ก) เป็นภาพแบบ Backscattered electron image และ (ข) เป็นภาพแบบ Secondary electron image.....	78
4.47 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยการวิเคราะห์แบบ linescan ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง แสดงการเปรียบเทียบปริมาณของธาตุที่เฟสต่างกันตามแนวของเส้นตรงที่ลากผ่าน.....	79
4.48 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยการวิเคราะห์แบบ linescan ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง แสดงการเปรียบเทียบปริมาณของธาตุที่เฟสต่างกันตามแนวของเส้นตรงที่ลากผ่าน.....	80
ก.1 เครื่อง BMA และขั้นตอนการทำงาน ก) เครื่อง BMA ข) ชุดพินซ์และแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 มิลลิเมตร ค) ขั้นตอนการทำงาน.....	96
ก.2 เครื่อง Hydraulic press และขั้นตอนในการทำงาน ก) เครื่อง Hydraulic press ข) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ค) การทำงานของการตีขึ้นรูปร้อน.....	97

รูปที่	หน้า
ก.3 เครื่อง survo motor screw press และขั้นตอนในการทำงาน	
ก) เครื่อง survo motor screw press ข) แม่พิมพ์ตีขึ้นรูปร้อน	
ข) ค) การทำงานของการตีขึ้นรูปร้อน.....	98
ข.1 ผลจากเครื่อง laser particle size analyzer ของผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์แสดง ขนาดเฉลี่ย 148.8 μm	99
ข.2 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง EDS แสดงเฟสอะลูมินา.....	100
ข.3 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง EDS แสดงเฟสแมงกานีสออกไซด์.....	101
ข.4 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง EDS แสดงเนื้อพื้นอะลูมิเนียม.....	102
ค.1 แผนภาพ Eling Ellingham diagram แสดง standard Gibb's energy of formation ของ Al_2O_3 และ MnO	103
ค.2 แผนภาพ Pourbaix diagram ของอะลูมิเนียม-น้ำ ที่ pH เท่ากับศูนย์ และ ความต่างศักย์เป็นกลางพบว่าอยู่ในพื้นที่ของการกัดกร่อน	104

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

กระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ (powder forging) เป็นหนึ่งในกระบวนการผลิตในกระบวนการโลหะผง (powder metallurgy) โดยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ เป็นกระบวนการที่รวมเอาสองกระบวนการ คือกระบวนการโลหะผง และการตีขึ้นรูปเข้าด้วยกัน โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้ออกมาจะรวมเอาข้อดีของทั้งสองกระบวนการเข้าด้วยกัน โดยคุณสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยกระบวนการโลหะผงสามารถเทียบได้กับการผลิตโดยกระบวนการหล่อและกระบวนการใช้แรงในการขึ้นรูป (wrought) โดยในบางกรณีก็มีสมบัติเชิงกลบางประการดีกว่า

ปัจจุบันความต้องการใช้งานวัสดุที่มีน้ำหนักเบาที่มีแรงผลักดันมาจากการลดการใช้พลังงาน ทำให้การใช้งานของอะลูมิเนียมได้รับความนิยมมากขึ้น โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์และอากาศยาน นอกจากมีน้ำหนักเบาและราคาถูก แล้วยังสามารถผสมธาตุต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติได้อย่างกว้างขวาง ความหลากหลายในกระบวนการผลิตทำให้การใช้งานของอะลูมิเนียมมีปริมาณเพิ่มขึ้น[1-3] การพัฒนาของโลหะผสมอะลูมิเนียมในโลหะผงนั้นวัสดุอะลูมิเนียมได้รับความคาดหวังว่าจะมาแทนที่เหล็กและเหล็กกล้าในส่วนประกอบของยานพาหนะในการขนส่ง แต่เนื่องจากอะลูมิเนียมมีความยากในขั้นตอนการเผาประสานจึงมีการพัฒนาและออกแบบกระบวนการผลิต โดยมีการเพิ่มขั้นตอนการตีขึ้นรูปร้อนต่อจากการอัดขึ้นรูป (compacting) โดยไม่ต้องมีขั้นตอนการเผาประสาน โดยเรียกว่า กระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ[3]

วัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอะลูมินาที่ผลิตโดยการตีขึ้นรูปผงโลหะคาดว่าจะเข้ามาแทนที่วัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอะลูมินาที่ผลิตโดยวิธีการหล่อ ซึ่งมีการใช้งานเป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ของรถยนต์เช่น ลูกสูบ ก้านลูกสูบ สลักลูกสูบและหลายๆ ส่วนในฝาครอบเสื้อสูบและรางของลิ้นเปิดปิด[4] เป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อนและสามารถยืดหยุ่นได้สูง วัสดุเสริมแรงที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการจะมีขนาดที่เล็กละเอียด กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและแสดงรอยต่อที่มีความสะอาดกับวัสดุพื้นทำให้มีการยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงกับวัสดุพื้น ส่งผลให้วัสดุผสมที่ได้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวัสดุผสมที่ผลิตโดยกระบวนการทั่วไปที่ใช้วิธีการเติมวัสดุเสริมแรงจากภายนอก [5]

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษากระบวนการผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินา ด้วยกระบวนการกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ
- 1.2.2 ศึกษาเสถียรภาพทางความร้อน ในระบบ Al-MnO₂
- 1.2.3 ศึกษาถึงคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมอะลูมิเนียม ที่ได้จากการผลิตโดยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ
- 1.2.4 ศึกษาโครงสร้างจุลภาควัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินาที่ได้จากกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 เพื่อทำการผลิตวัสดุผสมของอะลูมิเนียม-อะลูมินา จากระบบ Al-MnO₂ ด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ
- 1.3.2 ตรวจสอบเสถียรภาพทางความร้อน ในระบบ Al-MnO₂ ด้วย Differential Thermal Analysis
- 1.3.3 ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินา ที่ได้จากกระบวนการตีขึ้นรูปร้อน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกวาดและ X-ray diffractometer
- 1.3.4 ตรวจสอบคุณสมบัติทางกล ด้วยการทดสอบแรงดึงและวัดความแข็งของชิ้นงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงกระบวนการผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินา ด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ
- 1.4.2 ทราบถึงเสถียรภาพทางความร้อน ในระบบ Al-MnO₂ ที่ผ่านกระบวนการอัดขึ้นรูป
- 1.4.3 ทราบถึงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินาที่ผลิตด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ
- 1.4.4 ได้ทราบข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้งาน และใช้อ้างอิงในการวิจัยขั้นต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ปริทรรศน์วรรณกรรม

2.1 กระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ (1.) กระบวนการขึ้นรูป (forming) หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่าการอัดขึ้นรูป (compacting) โดยจะแบ่งได้ 2 ลักษณะคือการอัดขึ้นรูปร้อน (hot compacting) และการอัดขึ้นรูปเย็น (cold compacting) โดยทั้งสองวิธีจะมีความแตกต่างกันที่อุณหภูมิในการอัดขึ้นรูป (2.) กระบวนการเผาประสาน โดยเป็นกระบวนการในการใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเชื่อมติดกัน (bonding) อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาประสานจะต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของธาตุผสมหลัก การเผาประสานต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ, เวลา และบรรยากาศในการเผา (ส่วนผสมของบรรยากาศ, การไหล, การหมุนเวียนและทิศทางของก๊าซ) ในการเผาประสานนอกจากการใช้ความร้อนเพื่อให้เกิดการเชื่อมติดกันแล้ว การควบคุมตัวแปรต่างๆ เหล่านี้เป็นตัวที่ป้องกันการเกิดออกไซด์ของโลหะ (metal oxides) จากกระบวนการรีดักชันของบรรยากาศ (3.) กระบวนการตีขึ้นรูป เป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่ใช้แรงในการตี ทบ หรือการกดอัดเพื่อให้เกิดรูปทรงที่ต้องการ การตีขึ้นรูปแบ่งตามอุณหภูมิในการตีขึ้นรูปจะมีสองลักษณะ คือ การตีขึ้นรูปร้อน (hot forging) และการตีขึ้นรูปเย็น (cold forging) และการแบ่งอีกลักษณะคือการแบ่งตามแม่พิมพ์คือ การตีในแม่พิมพ์ปิด (closed die forging) และการตีในแม่พิมพ์เปิด (open die forging) การตีในแม่พิมพ์เปิดจะใช้กับการผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ หรือมีจำนวนน้อย ในบางครั้งก็ใช้สำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานก่อนที่จะนำไปทำการตีในแม่พิมพ์ปิด โดยการตีขึ้นรูปในแม่พิมพ์ปิดจะเป็นการตีโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นสองส่วน เป็นการตีขึ้นรูปเพื่อให้ได้รูปร่างสุดท้าย [6]

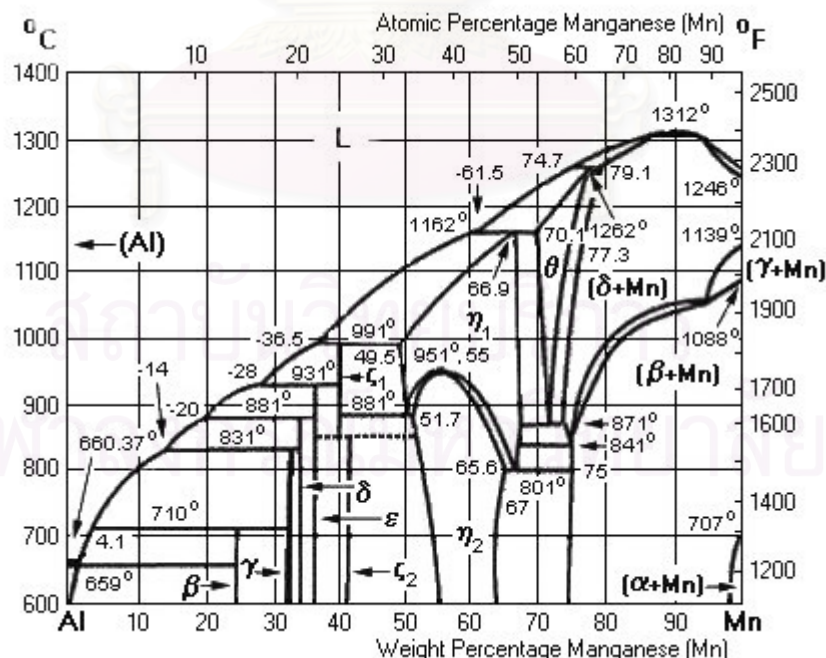
ในการตีขึ้นรูปโลหะอะลูมิเนียมโดยทั่วไปแรงที่ใช้ในการตีจะขึ้นอยู่กับ ส่วนผสมทางเคมี กระบวนการตีขึ้นรูปที่ใช้ อัตราความเครียด ชนิดของการตีขึ้นรูป สารหล่อลื่นและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในการตีขึ้นรูปโลหะผสมอะลูมิเนียมจะอยู่ในช่วง 315-455 °C สำหรับอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับกระบวนการและเครื่องมือที่ใช้ เช่น ในกระบวนการที่ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างช้า จะใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูงกว่ากระบวนการที่ทำให้เกิดการเสียรูปอย่างรวดเร็ว[5]

กระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ เป็นกระบวนการที่เริ่มได้รับความสนใจในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา โดยเป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจในปัจจุบันนอกเหนือไปจากกระบวนการอัดอวกสถิตร้อน (hot isostatic pressing, HIP) กระบวนการฉีดโลหะเข้าแบบ (metal injection molding, MIM) และ

กระบวนการรีดผงโลหะ (direct powder rolling) แต่ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับกระบวนการโลหะผง ได้เริ่มมีการนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมตั้งแต่ในช่วงปี ค.ศ. 1960 โดยชิ้นงานที่ได้นำไปใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรกลในงานทางด้านวิศวกรรมและตั้งแต่ที่บริษัท General Motor (GM) ในประเทศสหรัฐอเมริกาได้เริ่มใช้กระบวนการนี้ในการผลิตชิ้นส่วนในระบบส่งกำลังของรถยนต์ ทำให้ผู้ผลิตรยนต์ส่วนมากในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น Ford และ Toyota ได้เริ่มให้ความสนใจในการศึกษาอย่างจริงจังเพื่อนำไปใช้จริงแทนชิ้นส่วนที่มีราคาแพงในรถยนต์ต่อไป[1]

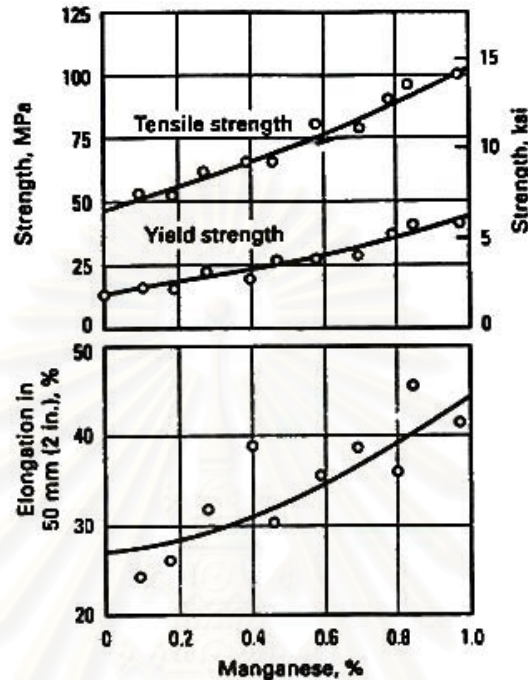
2.2 โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมงกานีส

แมงกานีสโดยทั่วไปเป็นธาตุเจือปนอยู่ในโลหะอะลูมิเนียมในยุคแรกๆ โดยมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 5-50 ppm ซึ่งในปัจจุบันก็ลดลงไปตามลำดับ แผนภูมิสมมูลของอะลูมิเนียม-แมงกานีสแสดงในรูปที่ 2.1 แมงกานีสเมื่อผสมในอะลูมิเนียมจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงจากกลไก solid solution strengthening และการเกิด precipitate ที่เล็กละเอียดของสารประกอบเชิงโลหะ แมงกานีสจะไม่ส่งผลต่อความต้านทานการกัดกร่อนของโลหะผสมอะลูมิเนียม ความสามารถในการละลายของแมงกานีสในอะลูมิเนียมต่ำมากในสภาพของเหลวอยู่ที่ 1.95% โดยน้ำหนัก แต่ปกติสามารถอยู่เป็นสารเจือปนได้ในการหล่อ ดังนั้นจะมีแมงกานีสที่เติมเข้าไปตกค้างอยู่ เช่น ในแท่ง ingots ขนาดใหญ่[5]



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสมมูลของอะลูมิเนียม-แมงกานีส[7]

ผลของแมงกานีสจะเพิ่มอุณหภูมิการตกผลึกใหม่ และช่วยให้เกิดโครงสร้างแบบ fibrous structure ในงานขึ้นรูปร้อน การกระจายตัวของเฟส precipitate จะช่วยให้เกิด recovery ซ้ำลง และป้องกันการเกิด grain growth รูปที่ 2.2 แสดงผลของปริมาณแมงกานีสต่อคุณสมบัติเชิงกล



รูปที่ 2.2 ผลของปริมาณแมงกานีสต่อคุณสมบัติเชิงกล เติมใน wrought 99.95%Al quench ในน้ำเย็น จาก 565°C [5]

แมงกานีสเมื่อเป็นธาตุผสมหลักใน โลหะผสมอะลูมิเนียมจะจัดอยู่ในซีรีส์ 3xxx ซึ่งมีทั้งใส่แมงกานีสอย่างเดียวและใส่ร่วมกับแมกนีเซียม การนำไปใช้งาน ของ อลูมิเนียมผสมแมงกานีส ใช้ทำ ภาชนะเครื่องครัว , ภาชนะในอุตสาหกรรมผลิตเบียร์ , แผ่นอลูมิเนียมที่ใช้ ในงานโลหะแผ่น หรือ ทำพวกผลิตภัณฑ์เฟอร์นิเจอร์ โครงสร้างในการก่อสร้าง เป็นต้น[5]

2.3 วัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะ

วัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะ (metal matrix composite) มีส่วนประกอบอย่างน้อยสองส่วนคือ วัสดุพื้นที่เป็นโลหะและวัสดุเสริมแรง โดยในส่วนใหญ่วัสดุพื้นจะเป็นโลหะผสมแต่ก็มีการใช้โลหะบริสุทธิ์บ้างเล็กน้อย วัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะมีความแข็งแรงต่ำกว่าโลหะผสมที่ไม่ใช่วัสดุผสม (monolithic metals) และมีราคาแพงกว่า เมื่อเทียบกับวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นที่ไม่ใช่โลหะสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะมีข้อได้เปรียบคือ ความแข็งแรงในด้านขวาง (transverse strength) ความต้านทานการ

เปลี่ยนรูป (stiffness) ความแข็งแรงเฉือนและความแข็งแรงอัด (shear and compressive strength) อุณหภูมิการใช้งานสูง คุณสมบัติทางกายภาพที่ดีเช่น ไม่ดูดซับความชื้น การนำไฟฟ้าและนำความร้อนดี และมีความต้านทานต่อการแผ่รังสี[8]

ความสนใจในวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะทำให้มีการพัฒนาคุณสมบัติวัสดุเสริมแรงและการพัฒนากระบวนการเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิต วัสดุเสริมแรงของวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะสามารถแบ่งได้เป็นห้ากลุ่มตามรูปร่างคือ (1) เส้นใยที่มีความต่อเนื่อง (continuous fibers) (2) เส้นใยที่มีความไม่ต่อเนื่อง (discontinuous fibers) (3) เส้นใยสั้นๆ ที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 0.1 ไมโครเมตร (whiskers) (4) เส้นลวด(wires) (5) อนุภาค (particulates, platelets) วัสดุเสริมแรงส่วนมากจะเป็นวัสดุเซรามิกประเภท ออกไซด์ คาร์ไบด์และไนไตรด์ เนื่องจากมีความแข็งแรงจำเพาะ (specific strength) และความต้านทานการเปลี่ยนรูปที่อุณหภูมิสูงวัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้กันในวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะ เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) โบรอนคาร์ไบด์ (BC) ซิลิคอนไนไตรด์ (SiN) และอะลูมินา (Al_2O_3) โดยซิลิคอนคาร์ไบด์และอะลูมินาเป็นวัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้กันมาก[8]

ในช่วงไม่กี่ปีมานี้วัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงในกลุ่มอนุภาคได้รับความสนใจเนื่องจาก (1) วัสดุเสริมแรงในกลุ่มที่เป็นอนุภาคมีราคาไม่แพง (2) กระบวนการผลิตที่สามารถได้โครงสร้างทางจุลภาคและคุณสมบัติตามต้องการ (3) ความสามารถการขึ้นรูปโดยวิธีทางกลได้ ซึ่งวัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยมีปัญหาในการขึ้นรูปทางกลเช่น ความเสียหายของเส้นใย โครงสร้างทางจุลภาคที่มีความไม่แน่นอนเดียวกัน และปฏิกิริยาที่รอยต่อ (interfacial reaction) สำหรับการใช้งานวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงในกลุ่มอนุภาคใช้ในการรับแรงหรืองานที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเช่น ในชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ วัสดุผสมที่เสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงในกลุ่มอนุภาคจะมีคุณสมบัติเท่ากันในทุกทิศทาง (isotropic) และมีความสามารถในการคงรูปดีจึงใช้งานแทนวัสดุที่เป็นเนื้อเดียวได้ ความแข็งแรงของวัสดุผสมที่วัสดุพื้นเป็นโลหะเสริมแรงด้วยอนุภาคขึ้นอยู่กับ (1) ขนาดของอนุภาคเสริมแรง (2) ระยะห่างระหว่างอนุภาค (3) สัดส่วนปริมาตรของวัสดุเสริมแรง (4) รอยต่อของวัสดุเนื้อพื้นกับวัสดุเสริมแรงและคุณสมบัติของวัสดุเนื้อพื้นรวมไปถึงสัมประสิทธิ์การเพิ่มความแข็งแรงด้วยการแปรรูป (work-hardening coefficient) [9]

2.4 กระบวนการผลิตวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะ

เป็นระยะเวลาหลายปีที่มีการพยายามพัฒนาเทคนิควิธีการผลิตวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะเพื่อให้ได้โครงสร้างจุลภาคและคุณสมบัติเชิงกลที่ดีตามต้องการ กระบวนการที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะสามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้สามกลุ่มใหญ่ตามอุณหภูมิของวัสดุเนื้อพื้นในระหว่างกระบวนการ

ผลิต คือ (1) กระบวนการเฟสของเหลว (liquid-phase processes) (2) กระบวนการเฟสของแข็ง (solid-phase processes) (3) กระบวนการสองเฟส (liquid-solid phase processes) นอกจากนี้ยังมีอีกสองกลุ่มที่เป็นเทคนิคใหม่ที่น่าสนใจในการผลิตวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะคือวิธีการเกาะติดผิววัสดุ (deposition techniques) และกระบวนการ in situ

2.4.1 กระบวนการเฟสของเหลว

ในกระบวนการเฟสของเหลวนุภาคเซรามิกถูกผสมลงไปในวัสดุพื้นที่เป็นโลหะหลอมเหลว การผสมในขณะที่การหล่อทำให้รูปทรงที่ได้ออกมาจะเป็นรูปร่างพื้นฐานเช่น แท่ง (billets) การเลือกใช้วัสดุเสริมแรงที่เป็นเซรามิกขึ้นอยู่กับวัสดุพื้น นอกจากความสามารถในการเข้ากันได้กับวัสดุพื้นแล้ว เกณฑ์ในการตัดสินใจในการเลือกเซรามิกเสริมแรงคือ (1) มอดูลัสของความยืดหยุ่น (2) ความต้านทานแรงดึง (3) ความหนาแน่น (4) อุณหภูมิหลอมเหลว (5) เสถียรภาพทางความร้อน (6) ขนาดและรูปร่างของอนุภาคเสริมแรง (7) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (8) ราคา โดยส่วนมากวัสดุที่เป็นเซรามิกจะไม่เปียก (wetted) โดยโลหะหลอมเหลว ข้อเสนอแนะคือควรมีการเพิ่มความสามารถในการเปียกของโลหะหลอมเหลวหรือเคลือบที่ผิววัสดุเสริมแรงก่อนการผสม

การใช้อนุภาคเซรามิกใส่ลงไปในโลหะผสมหลอมเหลวความแข็งแรงของพันธะระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุเสริมแรงเกิดขึ้นจากกระบวนการที่อุณหภูมิสูงและการเพิ่มธาตุลงไปในวัสดุพื้นเพื่อทำให้เกิดโลหะผสมซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยากับวัสดุเสริมแรงซึ่งสามารถจะเกิดเฟสใหม่เพื่อให้เกิดผลต่อความสามารถในการเปียกที่ดีของวัสดุเนื้อพื้นกับเซรามิกเสริมแรง (เช่น การเติมลิเทียมในวัสดุผสมของอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์) การเขย่าหรือการกวนระหว่างกระบวนการมีประโยชน์ในการทำละลายชั้นฟิล์มของสิ่งปนเปื้อนเพื่อให้เกิดความง่ายในการเกิดพันธะบริเวณรอยต่อ กระบวนการเฟสของเหลวมีข้อจำกัดคือ การรวมตัวกันของอนุภาคเซรามิกระหว่างการเขย่าหรือการกวน การตกตะกอนของอนุภาคเซรามิก การแยกตัวของเฟสที่สองในวัสดุพื้นโลหะ การเกิดปฏิกิริยาอย่างรุนแรงที่บริเวณรอยต่อและการเกิดการแตกหักของอนุภาคในระหว่างการกวนทางกล

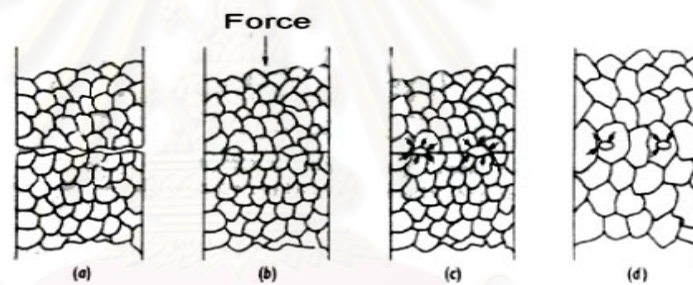
2.4.2 กระบวนการเฟสของแข็ง

กระบวนการที่อยู่ในกลุ่มนี้เช่น กระบวนการโลหะผง (powder metallurgy) กระบวนการอัตราพลังงานสูง (high energy rate processing) และกระบวนการยึดติดด้วยการแพร่ (diffusion bonding)

กระบวนการโลหะผง เป็นวิธีที่ประสบความสำเร็จอย่างมากในการผสมผงโลหะกับอนุภาคเซรามิก โดยเฉพาะการผลิตวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นอะลูมิเนียมและวัสดุเสริมแรงเป็นซิลิคอนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงโดยรวมอยู่ในระดับเดียวกันกับที่ผลิตด้วยกระบวนการเฟสของเหลวแต่ค่าการยึดตัว

(elongation) ต่ำกว่า วิธีการทางโลหะผงเกี่ยวข้องกับ การอัดขึ้นรูปและการเผาประสาน ในการผลิตผงวัสดุพื้นและผงวัสดุเสริมแรงถูกผสมกันเพื่อให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันต่อจากนั้นจะตามด้วยการอัดขึ้นรูปซึ่งได้ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจะนำไปผ่านการเผาประสานในบรรยากาศที่มีการควบคุม ขั้นสุดท้ายจะทำการอัดร้อนด้วยแรงในแนวเดียว (uniaxial) หรือแรงที่เท่ากันในทุกทิศ (isostatic) เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของวัสดุผสม โดยที่อุณหภูมิของการอัดร้อนอาจจะต่ำกว่าหรือสูงกว่าจุดหลอมเหลวของวัสดุเนื้อพื้นก็ได้ ข้อจำกัดของกระบวนการโลหะผงคือ ผงโลหะผสมที่ใช้ในงานเฉพาะไม่ได้มีขายทั่วไป ราคาของผงโลหะมีราคาแพง

กระบวนการอัดราพลังงานสูง (*high-energy, high-rate process*) เป็นวิธีที่ใช้ประโยชน์ของการแข็งตัวอย่างรวดเร็วด้วยการเย็นตัวโดยการใส่พลังงานอัตราสูงในช่วงเวลาที่สั้น มีการใช้ทั้งพลังงานทางกลและพลังงานทางไฟฟ้า ทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ อุณหภูมิที่ได้จากกระบวนการทำให้สามารถควบคุม (1) การเปลี่ยนเฟส (2) ระดับของการขยายตัวของโครงสร้างจุลภาคที่ไม่รวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการทั่วไป วิธีนี้ใช้ในการใช้ผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์และโลหะผสมไทเทเนียม-อะลูมิเนียม-ไนโอเบียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดการยึดติดโดยการแพร่ (a) เริ่มต้นจากการนำพื้นผิวมาสัมผัสกัน (b) ใช้แรงดันทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปที่พื้นผิวเพิ่มพื้นที่การยึดติด (c) เกิดการแพร่ของช่องว่าง (voids) ผ่านขอบเกรน และเกิดการหดตัว (d) การแพร่ขั้นสุดท้ายของช่องว่าง

การยึดเหนี่ยวด้วยการแพร่ (*diffusion bonding*) เป็นวิธีในการเชื่อมติดในสถานะที่เป็นของแข็ง สำหรับการเชื่อมติดเกิดระหว่างการแพร่ของอะตอมของโลหะที่พื้นผิวรอยต่อที่อุณหภูมิที่ใช้ทำให้เกิดการเชื่อมติด ข้อดีของวิธีนี้คือ (1) ความสามารถใช้งานได้และหลากหลาย (2) สามารถควบคุมการเรียงตัวของเส้นใยและสัดส่วนปริมาตรของเส้นใย ข้อเสียที่พบคือ (1) กระบวนการใช้เวลานาน (2) ราคาของกระบวนการแพงเนื่องจากใช้อุณหภูมิและความดันสูง (3) การผลิตที่จำกัดขนาดของผลิตภัณฑ์

2.4.3 กระบวนการสองเฟส

วัสดุพื้นอยู่ในสภาวะทั้งเฟสของเหลวและของแข็งกระบวนการสองเฟสที่ใช้ในการผลิตวัสดุผสมที่มีพื้นเป็นโลหะเช่น กระบวนการรีโอคาสติง (rheocasting) อนุภาคเซรามิกถูกเติมลงไปวัสดุพื้นที่มีอุณหภูมิอยู่ในช่วงสถานะเป็นของเหลวและของแข็งรวมกันโดยมีการกวนเพื่อให้เกิดของผสมที่มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูง โดยใช้ประโยชน์ของพฤติกรรมของวัสดุผสมโลหะที่มีพฤติกรรมในการเกิดเป็นลักษณะของเหลวที่มีความหนืดสูงเมื่อถูกกวนในระหว่างการแข็งตัว (Thixotropy) ซึ่งอาจสัดส่วนของของแข็งสูงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กวนเกิดการแตกหักของเดนไดรต์ของของแข็งเกิดเป็นอนุภาคของแข็งทรงกลมอยู่ในของเหลว ในระหว่างที่วัสดุพื้นเป็นของเหลวที่มีความหนืดสูงทำให้สามารถที่จะใส่วัสดุเสริมแรงในช่วงเริ่มต้นการเย็นตัวของแข็งและช่วยป้องกันการรวมตัวกันของอนุภาคเซรามิกโดยอนุภาคของแข็งของโลหะผสมที่แข็งตัวออกมาในช่วงแรก หลังจากนั้นอนุภาคเซรามิกจะเกิดปฏิกิริยากับวัสดุพื้นที่เป็นของเหลวทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวกัน การเปลี่ยนรูปร่างอย่างต่อเนื่องและการแตกหักของวัสดุพื้นที่เป็นของแข็งระหว่างการกวนป้องกันการเกิดรวมตัวกันและการตกตะกอนของอนุภาคเซรามิก

2.4.4 วิธีการเกาะติดผิววัสดุ (deposition techniques)

วิธีการเกาะติดผิววัสดุอาศัยการเคลื่อนที่ผิวของเส้นใยในการยึดติดกับวัสดุพื้นเพื่อเกิดเป็นวัสดุผสม การยึดติดเกิดจากการแพร่สามารถสร้างวัสดุผสมที่เป็นแผ่นหรือเป็นรูปโครงสร้าง โครงสร้างจุลภาคที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าวัสดุผสมที่ผลิตโดยการหล่อ ข้อเสียที่พบคือใช้เวลานาน ข้อดีคือสามารถควบคุมระดับของการยึดติดที่รอยต่อได้ วิธีนี้เหมาะสำหรับวัสดุผสมที่มีเส้นใยทิศทางเดียว

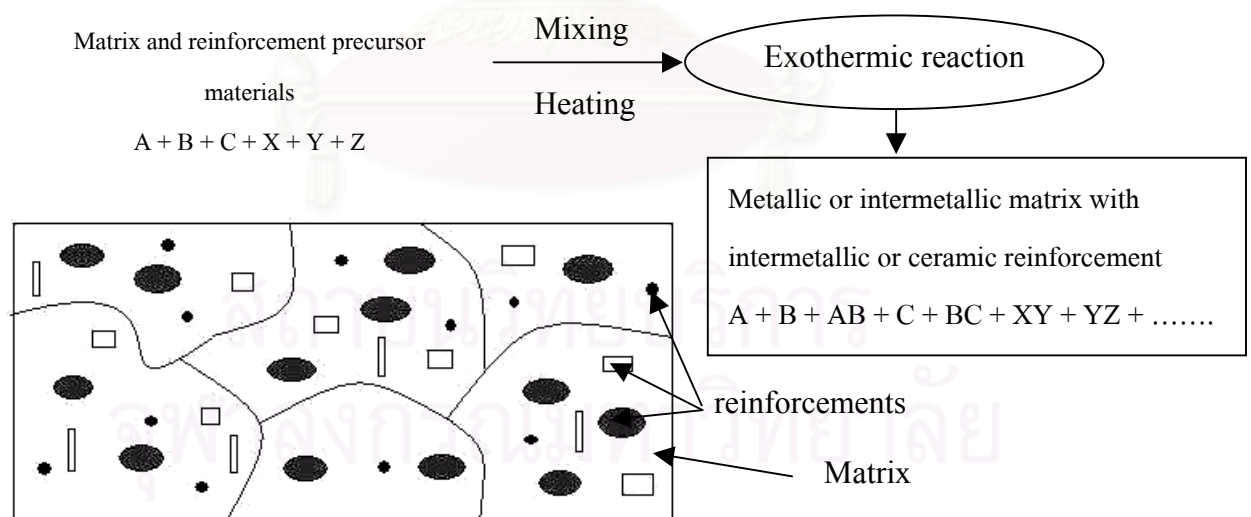
วิธีการเกาะติดมีหลายวิธีเช่น การชุบเคลือบโดยการจุ่ม (immersion plating) การเกาะติดด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (electroplating) การเกาะติดด้วยการพ่นสเปรย์ (spray deposition) การเกาะติดผิวทางเคมี ด้วยไอ (CVD) และการเกาะติดทางกายภาพ ด้วยไอ (PVD) การเกาะติดด้วยวิธีการชุบด้วยไฟฟ้าเป็นวิธีการสร้างชั้นเคลือบจากสารละลายที่มีไอออนของวัสดุที่ต้องการ ข้อดีของวิธีนี้คืออุณหภูมิที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยาอยู่ในระดับปานกลางและไม่เกิดความเสียหายกับเส้นใย แต่ข้อเสียที่พบคือ มีช่องอากาศเกิดขึ้นระหว่างเส้นใยทำให้การยึดติดของตะกอนกับเส้นใยน้อยและพบว่าวัสดุพื้นไม่กี่ชนิดที่สามารถใช้วิธีนี้ได้ การเกาะติดด้วยสเปรย์จะเป็นการพ่นละอองของโลหะหลอมเหลวลงบนผิวที่ต้องการเคลือบเพื่อสร้างชั้นผิว โดยแหล่งของสเปรย์จะมาจากผงหรือเส้นลวดซึ่งจะถูกหลอมเหลวในเปลวไฟ การอาร์คหรือพลาสมา ประโยชน์ของการเกาะติดโดยการสเปรย์คือง่ายต่อการควบคุมการเรียงตัวของเส้นใยและการเย็นตัวเป็นของแข็งอย่างรวดเร็วของวัสดุพื้น ในกระบวนการการเกาะติดผิวด้วยไอส่วนประกอบที่เป็นไอเกิดจากการสลายตัวหรือการทำปฏิกิริยากับไอเคมีอื่นๆ ที่บนผิวของตัวรับเพื่อสร้างชั้นเคลือบบนผิวของตัวรับนั้น วิธีเกาะติด

ผิวทางเคมีด้วยไอสามารถสร้างชั้นเคลือบได้ทั้ง โลหะและเซรามิก อาจเกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึก เป็นผลึกเดี่ยวหรือหลายผลึก พื้นฐานของวิธีการเกาะติดทางกายภาพด้วยไอจะมีความแตกต่างกันในวิธีการทำให้เกิดไอเช่น การเกิดไอโดยลำแสงอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) การเกิดไอโดยการอาร์ค (arc evaporation) การแผ่รังสีความร้อน (radiation heating) ข้อดีของวิธีการเกาะติดทางกายภาพด้วยไอคือความหลากหลายในส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาค เป็นวิธีที่สามารถสร้างชั้นเคลือบที่มีการยึดติดดีมากและผิวของชั้นเคลือบมีความสวยงาม และไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นจากกระบวนการ มีข้อเสียคือวิธีการมีความซับซ้อนและอุปกรณ์ที่ใช้และราคาแพง

2.4.5 กระบวนการ In Situ (In situ processes)

ในกระบวนการนี้วัสดุเสริมแรงถูกสร้างขึ้นภายในวัสดุพื้น วัสดุผสมจะถูกสร้างขึ้นจากโลหะผสมเริ่มต้นซึ่งจะสามารถเลี่ยงการเกิดความไม่อาพันธ์ของรอยต่อได้

กระบวนการ XD เป็นกระบวนการที่ใช้ปฏิกิริยาการคายความร้อนระหว่างสองส่วนในการสร้างส่วนที่สามโดยกระบวนการ self-propagating high-temperature synthesis (SHS) การสร้างอนุภาคเซรามิกเสริมแรงจากวัสดุพื้นจะได้ปริมาณสัดส่วนปริมาตรของวัสดุเสริมแรงสูงเนื่องจากวัสดุเสริมแรงเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของวัสดุพื้น วัสดุเสริมแรงที่ได้จากวิธีนี้ส่วนมากคือ ซิลิคอนคาร์ไบด์ ไทเทเนียมคาร์ไบด์ ไทเทเนียมไดโบไรด์และอลูมินา โดยใช้กับวัสดุพื้นที่เป็นอะลูมิเนียม นิกเกิล ในรูปที่ 2.4 เป็นภาพของกระบวนการนี้[9]



รูปที่ 2.4 กระบวนการ self-propagating high-temperature synthesis (SHS) โดยในขั้นแรกเป็นการผสมวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของวัสดุพื้นและวัสดุเสริมแรงจากนั้นเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน ผลที่ได้จากปฏิกิริยาคือวัสดุพื้นที่เป็นโลหะหรือสารประกอบเชิงโลหะและวัสดุเสริมแรงที่เป็นสารประกอบเชิงโลหะหรือเซรามิกในรูปอนุภาค

2.5 รอยต่อในวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะ

รอยต่อในวัสดุผสมมีความสำคัญในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุผสม รอยต่อตามคำจำกัดความเป็นพื้นที่สองมิติซึ่งเกิดที่ความไม่ต่อเนื่องในหนึ่งวัสดุหรือมากกว่าหนึ่งวัสดุ ความสำคัญของรอยต่อในวัสดุผสมมีมาจากสองเหตุผลหลักคือ (1) บริเวณรอยต่อมีพื้นที่โดยรวมที่ใหญ่มากในวัสดุผสม (2) วัสดุเสริมแรงและวัสดุพื้นไม่มีความสมดุลในทางอุณหพลศาสตร์ต่อกัน

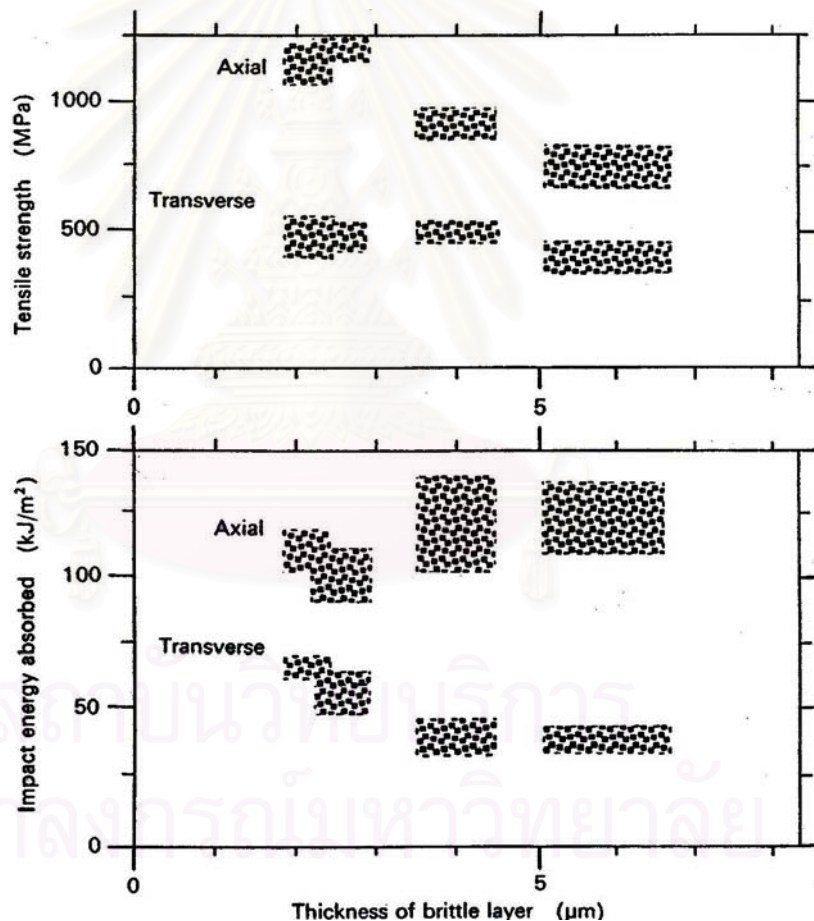
รอยต่อเป็นขอบของพื้นผิวระหว่างสองเฟส ซึ่งมีตัวบ่งชี้ที่แสดงความไม่ต่อเนื่องในวัสดุคือ มอดูลัสของความยืดหยุ่น ตัวบ่งชี้ทางอุณหพลศาสตร์เช่น ศักย์เคมี (chemical potential) และสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ความไม่ต่อเนื่องในศักย์เคมีเป็นสาเหตุให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีซึ่งนำไปสู่การเกิดพื้นที่ที่มีการแพร่ระหว่างกันหรือการเกิดของสารประกอบ ความไม่ต่อเนื่องของสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนทำให้เกิดสนามความเค้นรอบรอยต่อ การยึดเหนี่ยวที่ดีของรอยต่อมีส่วนสำคัญต่อการส่งแรงระหว่างวัสดุพื้นและวัสดุเสริมแรง

การแพร่หรือปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นที่ส่วนต่างๆ ของรอยต่อเนื่องจากปฏิกิริยารอยต่อของเซรามิกกับโลหะจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยการแพร่และปฏิกิริยาเคมีจลนศาสตร์เกิดได้เร็ว โดยทั่วไปวัสดุเสริมแรงที่เป็นเซรามิกมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำกว่าวัสดุพื้นโลหะเมื่อวัสดุผสมมีการเปลี่ยนอุณหภูมิจะมีความเค้นเกิดขึ้นที่รอยต่อ ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตเช่น เวลา อุณหภูมิและข้อผิดพลาดทางความร้อนสามารถนำมาใช้เพื่อควบคุมให้ได้ลักษณะของรอยต่อที่มีความเหมาะสม

ปฏิกิริยาบริเวณรอยต่อ

ในกรณีของวัสดุผสมเนื้อพื้นโลหะ มักเกิดปัญหาตรงรอยต่อโดยเฉพาะถ้าใช้กระบวนการในการผลิตเป็นกระบวนการในสถานะของเหลวเนื่องจากมีอุณหภูมิและความดันสูง ปัญหาที่เกิดขึ้นจะมาจากการเกิดขึ้นรอยต่อใหม่ขึ้นในระหว่างการใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่ชั้นรอยต่อใหม่ที่เกิดขึ้นจะเกิดระหว่างกระบวนการในการผลิตที่อุณหภูมิสูง จากสมการที่เกี่ยวข้องกับระยะทางของการแพร่ ($x = \sqrt{D_d t}$) จะเห็นได้ว่าระยะทางในการแพร่จะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นชั้นรอยต่อใหม่ที่เกิดขึ้นนี้ก็จะขึ้นกับเวลาด้วย ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีความสำคัญคือสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (D_d) ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นแบบยกกำลังกับอุณหภูมิ ดังนั้นในการผลิตที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่าจึงมีโอกาที่จะสร้างชั้นรอยต่อใหม่ได้ง่ายกว่าและหนากว่าการผลิตที่ใช้อุณหภูมิต่ำกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพื้นผิวและขอบเกรนให้การทำนายความหนาของชั้นรอยต่อได้ดีกว่าการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในแลตทิซ (lattice diffusion value) ที่มีค่าต่ำกว่า ไทเทเนียมและอะลูมิเนียมมักถูกนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นเพราะว่ามีน้ำหนักเบาแต่ความไวของปฏิกิริยาเคมีมีค่าสูงจึงทำให้เกิด

ชั้นรอยต่อใหม่ได้ง่ายกว่าวัสดุพื้นชนิดอื่น อย่างไรก็ตามชั้นรอยต่อใหม่ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีของวัสดุด้วยเช่น ในกรณีของวัสดุพื้นอะลูมิเนียมที่มีวัสดุเสริมแรงเป็นอะลูมินาชั้นรอยต่อระหว่างวัสดุทั้งสองก็ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาแต่ถ้าวัสดุพื้นมีธาตุลิเทียมหรือแมกนีเซียมเป็นส่วนประกอบในวัสดุพื้นก็ต้องมีการพิจารณาชั้นรอยต่อใหม่นี้ด้วยว่ามีผลต่อวัสดุผสมหรือไม่ และต้องมีการพิจารณาถึงคุณสมบัติในการเป็ยกอีกด้วยเพราะการใส่ลิเทียมก่อให้เกิดชั้นรอยต่อใหม่ขึ้นแต่ชั้นรอยต่อนี้มีผลทำให้ความสามารถในการเป็ยกดีขึ้น ปฏิกริยาที่บริเวณรอยต่อมีผลในด้านลบต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะ ผลจากความหนาของชั้นรอยต่อใหม่ที่เกิดขึ้นต่อคุณสมบัติทางกลของวัสดุผสม ดังแสดงไว้ในรูป 2.6 เมื่อทดสอบด้วยการกระแทกพบว่าความแข็งแรงและความแกร่งลดลงในชิ้นงานที่มีชั้นรอยต่อที่มีความหนามากขึ้น ดังนั้นกฎทั่วไปที่ต้องคำนึงคือการหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณรอยต่อเพื่อให้ได้วัสดุผสมวัสดุพื้นโลหะที่มีคุณสมบัติทางกลที่ได้ผลดีที่สุด[8]



รูปที่ 2.5 ความหนาของชั้นรอยต่อที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของโลหะผสม Ti-Al-V เสริมแรงด้วยเส้นใยเดี่ยวซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งเคลือบด้วยคาร์บอนและไทเทเนียมโบไรด์โดยรูปบนแสดงความต้านทานแรงดึงเป็นผลจากความหนาของชั้นรอยต่อและรูปล่างเป็นพลังงานที่ดูดซับจากแรงกระแทก[8]

2.6 คุณสมบัติของวัสดุผสม

ผลจากการเติมวัสดุเสริมแรงลงไปวัสดุพื้นจะทำให้คุณสมบัติของวัสดุผสมที่ได้เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งคุณสมบัติเด่นของวัสดุผสมที่สำคัญได้แก่ ความหนาแน่น มอดุลัสของความยืดหยุ่น และพฤติกรรมความเค้นความเครียด คุณสมบัติเหล่านี้สามารถทำนายได้โดยใช้แบบจำลองต่างๆ เพื่อคำนวณหาคุณสมบัติของวัสดุผสม

2.6.1 ความหนาแน่นของวัสดุผสม

การคำนวณค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมสามารถคำนวณได้ด้วยกฎส่วนผสม (rule of mixture)[8] ซึ่งจะต้องอยู่ในสมมติฐานที่ว่าไม่มีเฟสหรือสารประกอบอื่นนอกจากวัสดุพื้นและวัสดุเสริมแรงเกิดขึ้น สมการที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (\text{สมการ 2.1})$$

โดยที่ ρ_c	คือความหนาแน่นของวัสดุผสม
ρ_f	คือความหนาแน่นของวัสดุเสริมแรง
ρ_m	คือความหนาแน่นของวัสดุพื้น
V_f	คือสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุเสริมแรง
V_m	คือสัดส่วนโดยปริมาตรของวัสดุพื้น

2.6.2 มอดุลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุผสม

แบบจำลองที่ใช้กันในการคำนวณหาค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นมีอยู่หลายแบบจำลองซึ่งจะอยู่ภายใต้สมมติฐานที่แตกต่างกันออกไป โดยส่วนใหญ่แล้วแบบจำลองที่นิยมใช้กันก็ คือ

แบบจำลอง Voigt (*longitudinal stiffness*)

แบบจำลองนี้ใช้คำนวณค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นภายใต้สมมติฐานที่ว่า (1) แรงกระทำที่ให้กับวัสดุผสมมีค่าเท่ากับผลรวมของแรงกระทำที่เกิดขึ้นกับวัสดุเสริมแรงและวัสดุพื้น (2) ความเครียดที่วัสดุผสม (ϵ_c) วัสดุเสริมแรง (ϵ_f) และวัสดุพื้น (ϵ_m) มีค่าเท่ากันซึ่งสมมติฐานดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นจริงเมื่อพิจารณาการรับแรงกระทำตามแนวการเรียงตัวของเส้นใยในวัสดุผสมแบบเส้นใย[8,10-11]

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

เมื่อ E_c E_f และ E_m คือ โมดูลัสของวัสดุผสม วัสดุเสริมแรงและวัสดุพื้นตามลำดับ

แบบจำลอง Reuss (transverse stiffness)

การคำนวณโมดูลัสของความยืดหยุ่นในทิศทางตั้งฉากกับการเรียงตัวของวัสดุเสริมแรงหรือพัฒนาจากแบบจำลอง Voigt โดยพิจารณาว่า เมื่อมีแรงกระทำในทิศทางตั้งฉากกับแนวการเรียงตัวของเส้นใย (1) ระยะเวลาเปลี่ยนแปลงความยาวของวัสดุผสมมีค่าเท่ากับผลรวมของระยะเวลาเปลี่ยนแปลงความยาวเส้นใยและวัสดุพื้นและ (2) ความเค้นที่เกิดขึ้นกับวัสดุผสม เส้นใย และวัสดุพื้นมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะเขียนเป็นสมการได้ว่า[8]

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

แบบจำลอง Hashin-Strikman (Hashin-Strikman Model)

การคำนวณโมดูลัสของความยืดหยุ่นด้วยแบบจำลอง Hashin-Strikman จะพิจารณาถึงคุณสมบัติของวัสดุในทุกทิศทาง (isotropic materials) สมการที่ใช้ในการคำนวณคือ [10-11]

$$E_{\pm} = \frac{9K_{\pm}G_{\pm}}{3(K_{\pm} + G_{\pm})} \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

E	=	โมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุผสม
K	=	bulk modulus
G	=	โมดูลัสเฉือน (shear modulus)
$+, -$		หมายถึงขอบเขตบนและ ล่างตามลำดับ

2.6.3 พฤติกรรมการเปลี่ยนรูปของวัสดุผสม

พฤติกรรมความเค้น-ความเครียดของวัสดุผสมแบ่งออกได้เป็น 4 ช่วงด้วยกันคือ

- (1.) ทั้งวัสดุพื้นและวัสดุเสริมแรงเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบอิลาสติกซึ่งค่าโมดูลัสของความยืดหยุ่นของวัสดุผสมสามารถทำนายได้ดังในหัวข้อที่ 2.5.2
- (2.) วัสดุพื้นเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกในขณะที่วัสดุเสริมแรงยังเกิดการเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติก พฤติกรรมในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกของวัสดุพื้น
- (3.) ทั้งวัสดุพื้นและวัสดุเสริมแรงเกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก

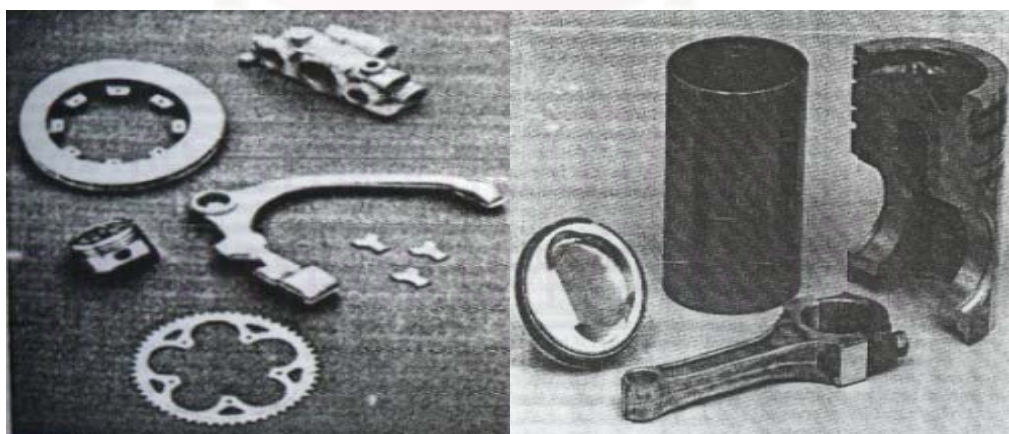
(4.) วัสดุเสริมแรงเกิดการแตกหัก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุผสมเกิดขึ้นต่อไปทราบเท่าที่วัสดุพื้นจะรับแรงกระทำต่อไปได้จนเกิดการแตกหักของวัสดุผสม โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนรูปช่วงนี้จะไม่แสดงให้เห็นเนื่องจากวัสดุผสมส่วนใหญ่มักเกิดการแตกหักเมื่อเข้าสู่การเปลี่ยนรูปในช่วงนี้[6]

2.7 ประโยชน์และการใช้งานของวัสดุผสม

สำหรับวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะอะลูมิเนียมจะแบ่งเป็นสองกลุ่มตามลักษณะของวัสดุเสริมแรงคือ แบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง

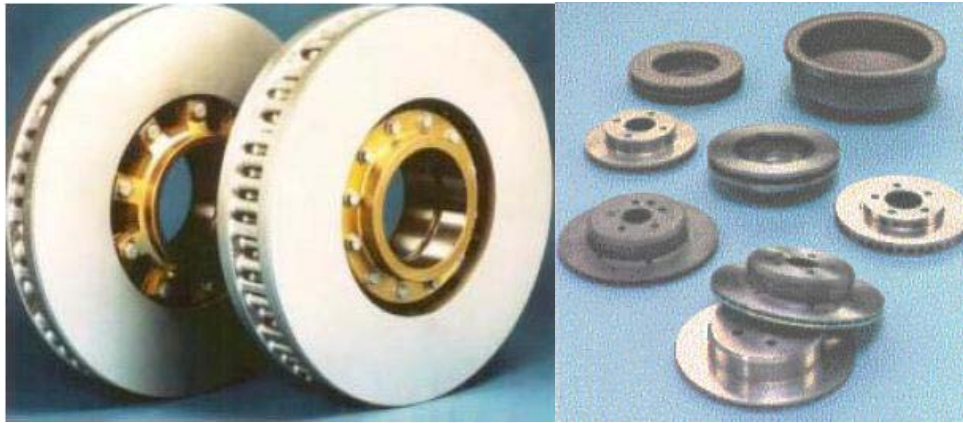
(1.) *โดยในแบบที่ไม่ต่อเนื่อง* ส่วนมากเกี่ยวข้องกับซิลิคอนคาร์ไบด์และอะลูมินาที่เป็นตัวเสริมแรงโดยทั้งสองตัวนี้มีการพัฒนาในอุตสาหกรรมการผลิตเครื่องบิน เนื่องจากวัสดุเหล่านี้แสดงความต้านทานในการเกิดความคืบจุลภาค (resistance to microcreep) ที่ดีโลหะผสมของเหล็กกับนิกเกิลซึ่งปัจจุบันนี้เป็นวัสดุในการหีบห่อ (packaging materials) และอ่างความร้อน (heat sinks) จะถูกแทนที่ด้วยวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำกว่า การนำความร้อนดีกว่าและมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำกว่า

- วัสดุผสมอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์ที่ผลิตโดยการหลอมมีการนำไปใช้ในชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่และการกีฬา ดังรูปที่ 2.7(ก) เป็นระบบห้ามล้อที่สร้างจาก Al-Si-Mg/SiC/20p ซึ่งรวมเอาความหนาแน่นต่ำของอะลูมิเนียมกับความต้านทานการเสียดสี (wear resistance) และความต้านการเปลี่ยนรูป (stiffness) ที่ดีของเซรามิก



(ก)

(ข)



(ก)

(ง)

รูปที่ 2.6 (ก) แสดงวัสดุผสมของอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยซิลิคอนคาร์ไบด์เป็นส่วนประกอบในยานยนต์ (ข) แสดงส่วนประกอบในเครื่องยนต์ที่ผลิตด้วยวัสดุผสมของอะลูมิเนียม[5],(ค) จานเบรกในรถไฟความเร็วสูง,(ง) ระบบเบรกของยานยนต์[13]

- สำหรับวัสดุผสมอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอะลูมินาที่มีลักษณะเป็นเส้นใยสั้นและอนุภาค โดยส่วนมากจะผลิตโดยกระบวนการเฟสของเหลวหรือการหล่อ โดยวัสดุผสมของอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอะลูมินาได้นำมาใช้ในชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ในเครื่องยนต์ของรถยนต์เช่น ลูกสูบ ก้านลูกสูบ สลักลูกสูบ และหลายๆ ส่วนในฝาครอบเสื้อสูบและรางของลิ้นเปิดปิด ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข) , (ค) และ (ง) ในชิ้นส่วนเหล่านี้จะมีซิลิคอนคาร์ไบด์หรืออะลูมินาเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 5-25%โดยปริมาตร

(2.) วัสดุผสมของอะลูมิเนียมแบบที่มีความต่อเนื่อง ส่วนมากวัสดุพื้นเป็นอะลูมิเนียมหรือโลหะผสมของอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยของ โบรอน ซิลิคอนคาร์ไบด์ แกรไฟต์และอะลูมินา

- วัสดุผสมของอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยโบรอน มีการใช้งานของวัสดุในโครงสร้างตอนกลางลำตัวของเครื่องบิน (midfuselage structure) และในไมโครชิปอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นแบบแผ่นหลายชั้น ผลิตด้วยการกดร้อนเชื่อมติดด้วยการแพร่(hot press diffusion bonding) หรือวิธีพลาสมาสเปิร์ย์

- วัสดุผสมของอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยเส้นใยซิลิคอน เส้นใยชนิดนี้ได้เข้ามาแทนที่เส้นใยโบรอน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันแต่มีราคาที่ถูกกว่าเส้นใยโบรอนและมีคุณสมบัติทางเคมีที่ผิวในการเพิ่มการยึดติดกับวัสดุพื้น วัสดุนี้ผลิตโดยการกดร้อนในแม่พิมพ์พร้อมความดันต่ำและการเชื่อมติดโดยการแพร่

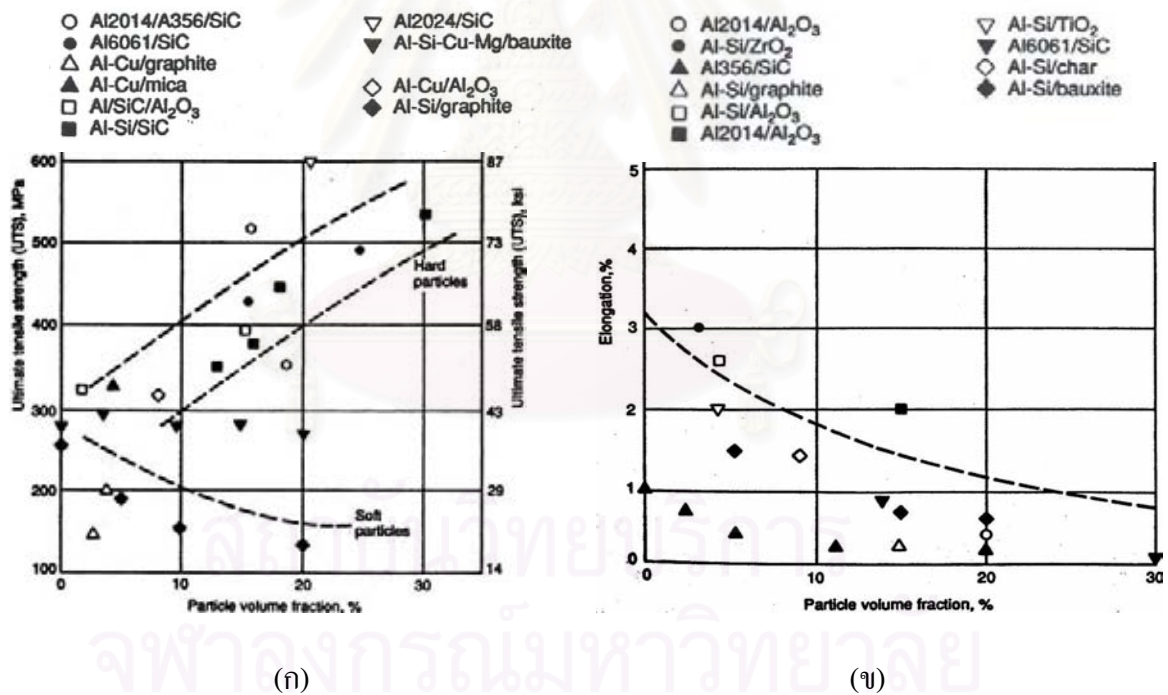
- วัสดุผสมของอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยแกรไฟต์ คาร์บอนและอะลูมิเนียมเป็นวัสดุที่ผสมกันเป็นวัสดุผสมได้ยากเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่รอยต่อที่ส่งผลเสียต่อวัสดุ ความสามารถในการเปียกที่ต่ำของคาร์บอนด้วยอะลูมิเนียมหลอมเหลวและการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอน ในโครงสร้างของยาน

อวกาศมีความต้องการวัสดุที่มีความแข็งแรงและเสถียรภาพทางรูปร่างสูง น้ำหนักเบาและการบิดเบี้ยว เนื่องจากความร้อนต่ำ ซึ่งวัสดุผสมชนิดนี้มีคุณสมบัติดังกล่าว

- วัสดุผสมของอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยเส้นใยอะลูมินา วัสดุผสมมีความต้านทานการเสียดสี ความล้า การเสียดรูปเนื่องจากความร้อนและมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ วัสดุนี้ผลิตโดยการเรียงเส้นใยเป็นรูปร่างก่อนนำไปใส่แม่พิมพ์และใช้วิธีของเหลวแทรกซึมด้วยอะลูมิเนียมหลอมโดยใช้สุญญากาศ การเพิ่มการเชื่อมติดของวัสดุพื้นกับวัสดุเสริมแรงสามารถทำได้โดยเติมลิเทียมลงไปในอะลูมิเนียมหลอมเหลวเล็กน้อย

2.8 ผลของวัสดุเสริมแรงที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุผสม

ในวัสดุผสมที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะคุณสมบัติเชิงกลจะขึ้นอยู่กับ ชนิด ปริมาณ ขนาด รูปร่างและการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 (ก) แสดงค่าความแข็งแรงแรงดึงที่สัมพันธ์กับสัดส่วนปริมาตรของอนุภาควัสดุเสริมแรง , (ข) แสดงการยืดตัวเป็นผลมาจากสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคเสริมแรง[5]

รูปร่างของวัสดุเสริมแรงจะใช้อัตราส่วนยาวต่อกว้าง (aspect ratio) เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ลักษณะของรูปร่าง แรงที่กระทำต่อวัสดุผสมจะถูกส่งสู่วัสดุเสริมแรงผ่านวัสดุพื้นทำให้เกิดความเค้นเฉือนที่รอยต่อและถ้าความเค้นเฉือนมากกว่าความแข็งแรงของรอยต่อจะเกิดการสลายของการยึดเหนี่ยว (debonding) ที่รอย

ต่อซึ่งจะเกิดการแตกและการขยายตัวของรอยแตก แรงที่แบ่งสู่วัสดุเสริมแรงเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนยาวต่อ กว้างวัสดุเสริมแรงที่แข็งจะเป็นสาเหตุให้เกิดความแข็งแรงจากความเครียดในวัสดุผสมซึ่งจะไม่มีผลในวัสดุ เสริมแรงที่อ่อนหรือมีค่ามอดูลัสแรงเฉือนต่ำกว่าวัสดุพื้น

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาของ Y. Tsunekawa และคณะ[14] ได้ทำการพัฒนากระบวนการในการผลิตวัสดุ ผสมที่มีวัสดุพื้นเป็น โลหะ โดยกระบวนการ electromagnetic melt stirring และมีการใช้การสั่นของคลื่น อัลตราโซนิกในกระบวนการ ซึ่งวัสดุเสริมแรงที่เกิดขึ้นในกระบวนการมีความเสถียรภาพสูงทางอุณหภูมิศาสตร์เกิดมาจากวัสดุตั้งต้นที่มีราคาไม่แพงคือ ซิลิกา กับ โลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม แต่มีปัญหา คือระยะเวลาในกระบวนการมีระยะเวลาที่ยาวนานที่อุณหภูมิสูง (ประมาณ 800°C) และปัญหาอีกข้อคือ ความสามารถในการเปียกที่ต่ำของอะลูมิเนียมที่ผิวของอนุภาคซิลิกา โดยมีการแก้ไขด้วยการใช้การสั่นของ คลื่นอัลตราโซนิกในการปรับปรุงความสามารถในการเปียกโดยมีการยืนยันจากการลดลงของมุมสัมผัส (contact angle) เมื่ออนุภาคซิลิกาถูกแช่อยู่ใน โลหะผสมอะลูมิเนียมหลอมเหลวกับการสั่นของคลื่นอัลตรา โซนิกช่วยเพิ่มปริมาณของซิลิกาที่เป็นแหล่งของออกซิเจนให้เกิดการส่งออกซิเจนอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนทำให้อุณหภูมิของโลหะผสมหลอมเหลวสูงขึ้น โดยมีอนามา เปรียบเทียบกับกระบวนการที่ไม่มีการใช้การสั่นของคลื่นอัลตราโซนิกแล้วพบว่าการสลายตัวของซิลิกาไปเป็น ออกไซด์ที่มีเสถียรภาพสูง ($MgAl_2O_4$ และ Al_2O_3) เกิดขึ้นเร็วกว่า นอกจากนี้คลื่นอัลตราโซนิกยังช่วย ในการกำจัดรูที่เกิดจาก atmospheric gas วัสดุเริ่มต้นที่มีวัสดุพื้นเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-แมกนีเซียม จะเปลี่ยนเป็นวัสดุพื้นอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเมื่อจบกระบวนการ

จากการศึกษาของ Bin Yang และคณะ[15] พบว่าการเติมธาตุไทเทเนียมและคาร์บอนที่อัตราส่วน ไทเทเนียมต่อคาร์บอนต่างๆ มีผลต่อการเกิดของ Al_3Ti แบบ in situ ในวัสดุผสมอะลูมิเนียมที่เสริมแรง ด้วยไทเทเนียมคาร์ไบด์ Al_3Ti ที่เกิดขึ้นส่งผลเสียต่อวัสดุผสมเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เปราะ กระบวนการใน การทดลองเริ่มจากการผสมผงของไทเทเนียม คาร์บอน และอะลูมิเนียมโดยเครื่อง dry milling เป็นเวลา 10 ชั่วโมง และนำไปทำการอัดด้วยความดัน 30 MPa โดยชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร และสูง 25 มิลลิเมตร จากนั้นนำอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ทำการหลอมที่อุณหภูมิ 900°C ในเตาไฟ นำชิ้นงานที่ ผ่านการอัดมาใส่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวจนปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเสร็จสมบูรณ์ จึงผ่านการกำจัดก๊าซด้วย C_2Cl_6 ที่ 730°C และกวนด้วยแท่งแกรไฟต์ จากนั้นเทลงในแบบเหล็กกล้าที่อุณหภูมิห้อง จากผลการ ทดลองสรุปได้ว่าที่อัตราส่วนไทเทเนียมต่อคาร์บอน 1:1 มีค่าการยึดตัว 4% ซึ่งน้อยกว่าค่าของอะลูมิเนียมที่ ไม่ได้เสริมแรงมาก (20%) เมื่อมีการเปลี่ยนอัตราส่วนเป็น 1:1.3 ค่าการยึดตัวเพิ่มขึ้นเป็น 10%

จากการศึกษาของ A. Olszowka-Myalska[16] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของผิวรอยต่อของอะลูมิเนียม-นิกเกิลอะลูมิเนียมไนต์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการกดขึ้นรูปร้อน วัสดุผสมที่ศึกษาคืออะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอะลูมินาและอนุภาคอะลูมิเนียมไนต์ วัสดุผสมผลิตโดยการผสมผงอะลูมิเนียมอะลูมินาและผงนิกเกิลโดยใช้เครื่อง Fritsch mill และผ่านการกดร้อนสองขั้นตอนในสุญญากาศ 2.6 Pa โดยขั้นตอนแรกกดด้วยความดัน 1.5 MPa ที่อุณหภูมิ 400°C ใช้เวลา 30 นาทีและขั้นที่สองกดด้วยความดัน 15 MPa ที่อุณหภูมิ 550°C และใช้เวลา 50 นาที โดยจากการศึกษาพบว่าที่บริเวณรอยต่อของอะลูมิเนียมกับอนุภาคเกิดขึ้นรอยต่อเป็น Al_3Ni และมีการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของออกซิเจนที่บริเวณรอยต่อเมื่อเปรียบเทียบกับที่เนื้อพื้น

จากการศึกษาของ C.F. Feng และ L. Froyen [17] ได้ทำการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของระบบ Al-TiO₂-B ในการผลิตวัสดุผสมของอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอะลูมินากับ TiB₂ โดยวิธี in situ การทดลองเริ่มจากการผสมผงโดยใช้เครื่อง ball-milling เป็นเวลา 8 ชั่วโมง จากนั้นนำไปอัดที่อุณหภูมิห้องด้วยแรงกด 20 KN ชิ้นงานที่ผ่านการอัดจะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC/DTA โดยให้ความร้อนจนถึงที่อุณหภูมิ 1100°C ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน โดยมีอัตราการให้ความร้อนและอัตราการเย็นตัว 10 °C / นาที โดยมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

1. $6TiO_2(s) + 2Al(s) = 3Ti_2O_3(s) + \gamma-Al_2O_3(s)$
 $Al(s) + 2B(s) = AlB_2(s)$
 $6TiO_2(s) + 2Al(l) = 3Ti_2O_3(s) + \gamma-Al_2O_3(s)$
 $2Al(l) + 2B(s) = AlB_2(s)$
2. $Ti_2O_3 + AlB_2 = 2TiB_2 + \alpha-Al_2O_3$ in the medium of molten aluminium
3. $3AlB_2 + 3TiO_2 + Al = 3TiB_2 + 2\alpha-Al_2O_3$
 $3TiO_2 + 13 Al = 3Al_3Ti + 2\alpha-Al_2O_3$

จากการศึกษาของ S.C. Tjong และคณะ[18-20] ได้ทำการสร้างวัสดุผสมของอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วย Al_2O_3 , TiB_2 และ Al_3Ti จากกระบวนการ hot pressing in situ โดยศึกษาผลของวัสดุเสริมแรงที่มีต่อ cyclic deformation โดยในตัวอย่างที่ 1 ใช้วัสดุตั้งต้นเป็น Al-TiO₂-B₂O₃ และตัวอย่างที่ 2 เป็น Al-TiO₂-B โดยทั้งสองตัวอย่างจะนำไปผ่านการผสมโดยเครื่อง ball milling ที่ 300 rpm มีตัวกลางเป็นแอลกอฮอล์ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ซึ่งในระหว่างการผสมจะไม่มีปฏิกิริยาเกิดขึ้น จากนั้นนำไปทำการอัดเย็นและนำไปให้ความร้อนที่ 900°C เป็นเวลา 60 นาทีและเย็นตัวลงมาทำการกดร้อนที่ 630°C นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วไปทำการอัดรีดที่ 420 °C ที่อัตราการอัดรีด 20 ต่อ 1 โดยผลจากการกดร้อนจะได้อนุภาค Al_2O_3 และ TiB_2 มีขนาดประมาณ 50 nm พบว่าในตัวอย่างที่ 2 มีปริมาณ Al_3Ti สูงกว่าและมีความต้านทานแรงดึงสูงกว่าแต่ความเหนียวในการดึงต่ำกว่าและพบว่าการเสีรูปจะเริ่มเกิดการแตกที่ Al_3Ti ก่อนแล้วขยายตัวตามวัสดุพื้นโลหะ คุณสมบัติในการต้านทานความล้าที่รอบต่ำและที่รอบสูงของตัวอย่างที่ 1 จะแสดงความต้านทานความล้าดีกว่าตัวอย่างที่ 2

Ouyang Liuzhay และคณะ[21] ได้ทำการศึกษาการผลิตวัสดุผสมของอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วยอะลูมินาจากกระบวนการสลายตัวของ $\text{Al}_3(\text{SO}_4)_3$ ในกระบวนการการหล่อด้วยการกวนในการทดลองจะใช้วัสดุพื้นเป็นโลหะผสม AC8A โดยโลหะผสมจะถูกทำให้หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 950°C ใส่ $\text{Al}_3(\text{SO}_4)_3$ ที่มีขนาด $20\ \mu\text{m}$ เป็นปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก โดยการกวนจะหยุดที่ 800°C จากนั้นนำไปเทลงในแบบเหล็กกล้าที่มีอุณหภูมิ 200°C จากการตรวจสอบด้วย XRD และ SEM พบว่าอนุภาคของอะลูมินาจะมีลักษณะเป็นแท่งอยู่ตามบริเวณขอบเกรนและพบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเกิดได้อย่างสมบูรณ์เพราะว่าไม่มี $\text{Al}_3(\text{SO}_4)_3$ เหลืออยู่ และยังพบอีกว่ามี MgAl_2O_4 เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ

Tongxiang Fan[22] และคณะได้ทำการศึกษาการสร้างวัสดุผสมของอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอะลูมินา จากปฏิกิริยารีดักชันของ CuO ในกระบวนการ in situ remelting ในขั้นแรกทำการผสมผงในส่วนผสม Al-5%CuO และนำไปอัดขึ้นรูปด้วยเครื่อง vacuum high pressure และนำไปอบที่ 650°C จากนั้นจึงนำไปใส่ในอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่ 750°C และปล่อยให้เย็นตัวที่อัตรา $20^\circ\text{C}/\text{นาท}$ จากการวิเคราะห์ด้วย XRD พบว่ามีเฟส Al_2O_3 , CuAl_2 และ Cu_2O เกิดขึ้น จากการทดสอบการดัดโค้งพบมีความต้านทานต่อการแตกด้วยการดัดโค้งดีกว่าวัสดุผสม Al-CuO ที่ได้จากกระบวนการ ex situ จากการศึกษพบว่าความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวที่รอยต่อเพิ่มขึ้นในระหว่างการเกิดขึ้นของอะลูมินาและเนื้อพื้นอะลูมิเนียม

K.L. Tee และคณะ[23] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลโดยการเติมคาร์บอนในวัสดุผสมของอะลูมิเนียมที่เสริมแรงด้วย TiB_2 ซึ่งสังเคราะห์มาจากปฏิกิริยาเคมีของวัสดุตั้งต้น Al B และ Ti โดยกระบวนการเฟสของเหลวโดยเติม B Ti และ C ลงในอะลูมิเนียมหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1040°C เป็นเวลา 12 นาที ก่อนที่จะเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1080°C เป็นเวลา 18 นาที จากนั้นนำไปหล่อเป็นแท่ง โดยปริมาณคาร์บอนที่ใส่ลงไปจะมีสองปริมาณ คือ 2% และ 3% โดยน้ำหนัก จากการวิเคราะห์จะพบว่าได้ TiB_2 ปริมาณ 15% โดยปริมาตร พบว่าเมื่อเติมคาร์บอนลงไปจะลดการเกิด Al_3Ti และเมื่อทำการทดลองในโลหะเชิงประกอบที่วัสดุพื้นเป็นโลหะผสม Al-Cu จะเพิ่มการเกิดของ TiB_2 และลดการเกิดของ TiC พบว่าผลในการลดการเกิดของ Al_3Ti ของคาร์บอนลดลงด้วย

K. Fukaura[4] ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุผสมของอะลูมิเนียมเสริมแรงด้วยอะลูมินา โดยใช้กระบวนการการกร้อนโดยมีวัสดุตั้งต้นเป็น และ Al-TiO₂ เมื่อ Al-3%CuO โดยน้ำหนัก ผ่านกระบวนการการกร้อนแล้วหลังจากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อน สุดท้ายจะพบว่าในวัสดุตั้งที่เป็นระบบ Al-CuO วัสดุพื้นเป็นโลหะผสม Al-Cu เสริมแรงด้วยอะลูมินา และในระบบ พบว่าประกอบไปด้วยอะลูมินากับสารประกอบเชิงโลหะ TiAl_3 ในวัสดุพื้นอะลูมิเนียม ซึ่งมีผลในการลดสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมที่ได้จากระบบ Al-TiO₂

Z.P. Xing และคณะ[24] ได้ทำการศึกษาผลของ HIP ในวัสดุผสม NiAl-TiC ที่ผลิตจากกระบวนการกดร้อนโดยใช้ NiAl-20%TiC โดยปริมาตร ทำการ HIP ที่ 1165°C ที่ความดัน 150 MPa ใช้เวลา 4 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่า ความหนาแน่นที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 98.9 เปอร์เซนต์ เป็น 99.8 เปอร์เซนต์ นอกจากนี้ยังทำให้เกิด TiC ในวัสดุพื้น NiAl ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงในวัสดุผสมและที่ผิวรอยต่อจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากเดิมที่เป็นรอยต่อที่มีความราบเรียบจะกลายเป็นมีการซ้อนทับกันเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงขึ้น

Abdulhaqq A. Hamid และคณะ[25] ได้ทำการศึกษาการผลิต โครงสร้างจุลภาค และคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุผสม Al(Mg,Mn)-Al₂O₃(MnO₂) จากการหล่อ โดยในการตรวจหาอะลูมินาเสริมแรงในชิ้นงานพบว่าใช้วิธีการทางเคมีวิเคราะห์โดยการนำชิ้นงานไปละลายด้วยกรดเกลือ จากนั้นจึงกรองแยกตะกอนด้วยกระดาษกรองชนิดไม่มีซีเมนต์ และนำไปเผาไล่กระดาษกรองผงที่ได้นำไปตรวจสอบด้วย XRD พบว่าตะกอนที่พบคืออะลูมินา และ MgAl₂O₄

2.10 ปฏิกริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในงานวิจัยนี้

การเกิดปฏิกริยาในระหว่างกระบวนการตีขึ้นรูปร้อนและการอบให้ความร้อน ในการสร้างวัสดุผสมในระบบของ Al-MnO₂ ซึ่งจะได้วัสดุเสริมแรงเป็น Al₂O₃ (รูป ก.1) ปฏิกริยาที่คาดว่าจะเกิดในระหว่างการตีขึ้นรูปร้อน มีดังนี้



$$\Delta G = 171164 - 198.83T \text{ J/mol}$$



$$\Delta G = 230432 - 123.42T \text{ J/mol}$$

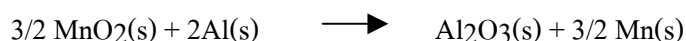


$$\Delta G = 402913 - 85.62T \text{ J/mol}$$



$$\Delta G = -1675432 + 313.20T \text{ J/mol} \quad [27]$$

ดังนั้น



$$\Delta G = -870264.5 + 23.65T \text{ J/mol}, \Delta G = 0 \text{ เมื่อ } T = 36797.65 \text{ K}$$

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

- 3.1.1 ผงโลหะอะลูมิเนียม ความบริสุทธิ์ 99.8% ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 106 – 180 ไมโครเมตร ของบริษัท Kou jun do kagaku ken sho
- 3.1.2 ผงแมงกานีสออกไซด์ ความบริสุทธิ์ 99% ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 8 – 18 ไมโครเมตร ของบริษัท Kou jun do kagaku ken sho

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

- 3.2.1 เครื่องผสมผง rocking mill ของ Seiwa giken รุ่น RM-05
- 3.2.2 เครื่อง hydraulic press
- 3.2.3 เตาอบ Motoyama kp 1000
- 3.2.4 เครื่อง servo motor screw press ขนาด 100 ตัน ของบริษัท Enomoto Machine Co., Ltd
- 3.2.5 เตาอบ high temperature furnace “ULVAC”
- 3.2.6 อุปกรณ์วิเคราะห์ทางความร้อน (differential thermal analysis, DTA) รุ่น NETZSCH STA 409 C
- 3.2.7 กล้องจุลทรรศน์แสง (optical microscope, OM)
- 3.2.8 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ของ JEOL รุ่น JSM 6400 พร้อม energy dispersive spectrometer (EDS)
- 3.2.9 X-ray diffractometer ของ Philips รุ่น PW3710 BASED (XRD)
- 3.2.10 เครื่องทดสอบแรงดึง (universal testing machine)
- 3.2.11 เครื่องวัดความแข็ง (micro hardness tester)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะและ ตรวจสอบวัดคุณลักษณะ

3.3.1.1 การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ

3.3.1.1.1 การผสมผง

ในการผสมผงนั้นเริ่มต้นจากการคำนวณส่วนผสมของผงตามที่แสดงในตารางที่ 3.1 วิธีการผสมในการทดลองนั้นมีสองวิธี คือ การผสมกันแบบสุ่มโดยวิธีการคนให้เข้ากันและการผสมโดยการเขย่าด้วยเครื่อง rocking mill โดยวิธีการผสมกันแบบสุ่มโดยการคนให้เข้ากันนั้นใช้กับการทดลองในกลุ่มที่หนึ่ง และการผสมโดยเครื่อง rocking mill ใช้กับการทดลองในกลุ่มที่สอง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนน้ำหนักของผงทั้งหมดที่ใช้ในการผสมในการทดลอง

Atom% MnO ₂	น้ำหนัก Al(กรัม)	น้ำหนัก MnO ₂ (กรัม)	น้ำหนักรวม(กรัม)
1	40.68	1.32	42
5	24.93	4.23	29.16
10	22.81	8.16	30.97
15	20.82	11.84	32.66

การผสมแบบสุ่มโดยวิธีการคนให้เข้ากัน

- 1.) ชั่งน้ำหนักผงอะลูมิเนียม ผงแมงกานีสออกไซด์ อื่นก็คำนวณตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1 (การทดลองกลุ่มที่หนึ่งใช้ส่วนผสม 5atom%, 10atom% และ 15atom% เท่านั้น)
- 2.) นำผงที่ได้จากการชั่งมาผสมในถ้วยเซรามิก
- 3.) ทำการคนให้เข้ากันโดยใช้ช้อนสแตนเลสโดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที
- 4.) นำผงที่ได้เก็บในถุงซิบบเพื่อนำไปทดลองในขั้นต่อไป

การผสมโดยใช้การเขย่าด้วยเครื่อง rocking mill

- 1.) ชั่งน้ำหนักผงอะลูมิเนียม ผงแมงกานีสออกไซด์ หนักตามอัตราส่วนในตารางที่ 3.1
- 2.) ชั่งน้ำหนักลูกบดอะลูมินาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร อัตราส่วนน้ำหนักของผงต่อลูกบดใช้อัตราส่วน 1:5
- 3.) นำผงที่ได้จากการชั่งและลูกบดไปใส่ในขวดพลาสติกของเครื่อง rocking mill
- 4.) ทำการเขย่าผงโดยใช้ความถี่ในการเขย่า 60 รอบต่อวินาที และใช้เวลาในการเขย่า 3 ชั่วโมง
- 5.) นำผงที่ผสมเรียบร้อยแล้วมาทำการแยกลูกบดออกจากผง
- 6.) นำผงที่ได้เก็บในถุงซิบบเพื่อนำไปทดลองในขั้นต่อไป

3.3.1.1.2 การอัดขึ้นรูป

ในการอัดขึ้นรูปในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งทำการอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง servo motor screw press โดยใช้แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาด 33 มิลลิเมตร และการทดลองกลุ่มที่สองทำการอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง hydraulic press โดยใช้แม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ขั้นตอนในการอัดขึ้นรูปมีดังนี้

การอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง servo motor screw press (รูปที่ ก.1)

- 1.) นำผงที่ผสมเรียบร้อยแล้วเทลงในแม่พิมพ์
- 2.) ทำการอัดขึ้นรูปโดยตั้งแรงที่เครื่องควบคุมก่อนแล้วจึงอัดขึ้นรูปผง
- 3.) นำชิ้นงานออกมาจากแม่พิมพ์โดยการดันชิ้นงานออกด้วยแรงจากเครื่องดันชิ้นงานออก ซึ่งทำหน้าที่เป็น lower punch ในขณะที่อัด
- 4.) นำชิ้นงานที่ได้เก็บในถุงซิบบเพื่อนำไปทดลองในขั้นต่อไป

การอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่อง hydraulic press (รูปที่ ก.2)

- 1.) ทาสารหล่อลื่นที่ผิวที่ด้านในของแม่พิมพ์ และผิวด้านที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ของตัวรอง upper punch กับตัวรอง lower punch
- 2.) นำตัวแม่พิมพ์ประกอบเข้ากับฐานรอง (lower punch) และตัวรอง lower punch
- 3.) จากนั้นนำผงที่ผสมเรียบร้อยแล้วเทลงในแม่พิมพ์
- 4.) ใส่ตัวรอง upper punch และตามด้วย upper punch
- 5.) นำชุดแม่พิมพ์เข้าไปวางที่แท่นรองของเครื่อง hydraulic press
- 6.) ทำการอัดขึ้นรูปโดยปรับแรงด้วยคันโยกปรับแรง ทิ้งไว้ประมาณ 3 นาที

- 7.) ปลดแรงออก และนำชุดแม่พิมพ์ออกมา นำฐานรองสำหรับการดันชิ้นงานออกมาใส่แทน lower punch และนำตัวดันชิ้นงานออกมาใส่แทน upper punch
- 8.) นำชุดแม่พิมพ์สำหรับการดันชิ้นงานออกเข้าไปวางที่แท่นรองของเครื่อง hydraulic press และทำการดันชิ้นงานออก
- 9.) นำชิ้นงานที่ได้เก็บในถุงซิปเพื่อนำไปทดลองในขั้นต่อไป

3.3.1.1.3 การอบให้ความร้อน

ในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งยังไม่มี ขั้นตอนการอบให้ความร้อน แต่ได้เพิ่มเข้ามาในการทดลองกลุ่มที่สองเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองมีคุณสมบัติดีขึ้น ขั้นตอนในการอบให้ความร้อนมีดังนี้

- 1.) นำชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาทำความสะอาดที่ผิวด้วยแอลกอฮอล์
- 2.) นำชิ้นงานมาอบที่อุณหภูมิ 600°C และ 650°C โดยใช้เวลา 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง
- 3.) ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในเตา
- 4.) จัดเก็บชิ้นงานเพื่อนำไปทดลองในขั้นต่อไป

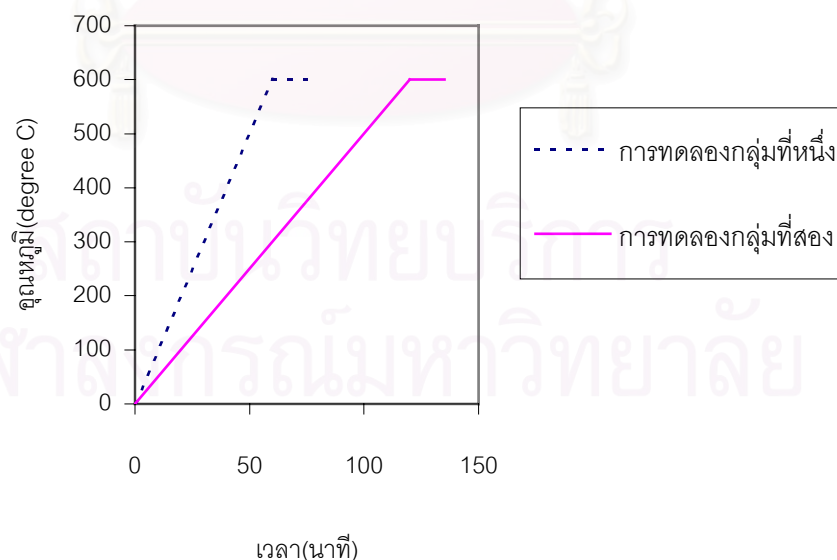


รูปที่ 3.1 ลำดับการอบให้ความร้อนชิ้นงานในขั้นตอนการอบให้ความร้อน

3.3.1.1.4 การตีขึ้นรูปร้อน

ในการตีขึ้นรูปร้อนมีสองขั้นตอนหลักคือการอบให้ความร้อนแก่ชิ้นงานและการตีขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่อง survo motor screw press (รูปที่ ก.3) โดยการอบให้ความร้อนจะมีลำดับการให้ความร้อนดังที่แสดงในรูป 3.2 ขั้นตอนทั้งหมดมีดังนี้

- 1.) นำชิ้นงานอบที่อุณหภูมิ 600°C โดยใช้อัตราการให้ความร้อนที่ 10°C/นาที ในการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง และใช้ที่ 5°C/นาที ในการทดลองในกลุ่มที่สอง
- 2.) คงอุณหภูมิ 600°C เป็นระยะเวลา 15 นาที
- 3.) ในขั้นตอนที่ 1.) และ 2.) คลุมบรรยากาศในเตาด้วยแก๊สอาร์กอน โดยมีอัตราการเป่า 2 ลิตร/นาที
- 4.) นำชิ้นงานเข้าแม่พิมพ์ตีขึ้นรูปร้อน ซึ่งแม่พิมพ์มีการให้ความร้อนคงอุณหภูมิอยู่ที่ 300°C โดยก่อนนำชิ้นงานเข้าแม่พิมพ์จะทาสารหล่อลื่นที่ผิวแม่พิมพ์
- 5.) ทำการตีขึ้นรูปร้อน และดันชิ้นงานออกมา ปล่อยให้เย็นตัว
- 6.) ทำความสะอาดชิ้นงาน ด้วยแอลกอฮอล์ จัดเก็บในถุงซิปล็อค

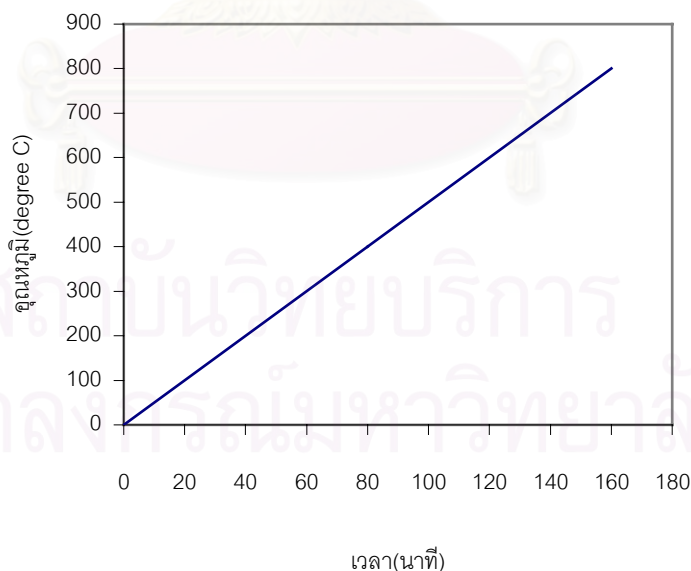


รูปที่ 3.2 ลำดับการอบให้ความร้อนขึ้นงานก่อนการตีขึ้นรูปร้อน

3.3.1.2 การตรวจวัดคุณลักษณะทางความร้อน

ทำการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อนของผงอะลูมิเนียมผสมผงแมงกานีสไดออกไซด์จากการผสมด้วยเครื่อง rocking mill และชิ้นงานที่ได้จากการอัดขึ้นรูปแล้ว

- 1.) ทำการบดชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการอัดขึ้นรูป และคัดขนาดของผงให้ต่ำกว่า 120 mesh (125 μm)
- 2.) ชั่งผงตัวอย่างในข้อ 1.) จำนวน 30 มิลลิกรัม ใส่ถ้วยอะลูมินา เป็นถ้วยตัวอย่าง
- 3.) ชั่งผงอะลูมินา จำนวน 40 มิลลิกรัม ใส่ถ้วยอะลูมินา เป็นถ้วยอ้างอิง
- 4.) วางถ้วยตัวอย่างและถ้วยอ้างอิงบนแท่นทดลองในเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน DTA
- 5.) ควบคุมบรรยากาศภายในด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 6.) เริ่มการตรวจวัดเสถียรภาพทางความร้อนของผงตัวอย่างจากอุณหภูมิห้อง จนถึงอุณหภูมิ 800 $^{\circ}\text{C}$ ด้วยอัตราการให้ความร้อน 5 $^{\circ}\text{C}$ / นาที
- 7.) ปล่อยให้ถ้วยตัวอย่างและถ้วยอ้างอิงเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้อง
- 8.) ทำการตรวจวัดซ้ำ ตามข้อ 6) อีกครั้ง เพื่อทำ base line



รูปที่ 3.3 ลำดับการให้ความร้อนกับผงตัวอย่างในการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อน

3.3.1.3 การวัดความหนาแน่นของชิ้นงาน[28]

นำชิ้นงานที่ผลิตผ่านการอัดขึ้นรูปทั้งหมดมาหาความหนาแน่นรวม (bulk density) ด้วยการคำนวณ ตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.1

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{สมการ 3.1})$$

เมื่อ

ρ	=	ความหนาแน่นของชิ้นงาน
m	=	น้ำหนักของชิ้นงาน
V	=	ปริมาตรของชิ้นงาน

เมื่อคำนวณความหนาแน่นของชิ้นงาน ตามสมการที่ 3.1 จากนั้นนำมาคำนวณหาความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density) โดยความหนาแน่นทางทฤษฎี คำนวณได้จากกฎของผสม (Rule of Mixture) ดังสมการที่ 3.2

$$\rho_{th} = \frac{W_{total}}{\frac{W_{Al}}{\rho_{Al}} + \frac{W_{MnO_2}}{\rho_{MnO_2}}} \quad (\text{สมการ 3.2})$$

เมื่อ

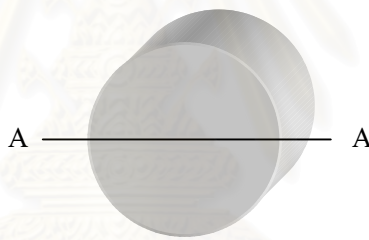
ρ_{th}	=	ความหนาแน่นทางทฤษฎี
ρ_{Al}	=	ความหนาแน่นของอะลูมิเนียม
ρ_{MnO_2}	=	ความหนาแน่นของแมงกานีสไดออกไซด์
W_{total}	=	น้ำหนักรวมของผงอะลูมิเนียมและเหล็ก
W_{Al}	=	น้ำหนักของผงอะลูมิเนียม
W_{MnO_2}	=	น้ำหนักของผงแมงกานีสไดออกไซด์

3.1.3.4 การตรวจสอบโครงสร้างของชิ้นงาน และเฟสอะลูมินาเสริมแรงในชิ้นงานด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และ energy dispersive spectrometer (EDS)

นำชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปโดยการตีขึ้นรูปผงโลหะมาทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสงเพื่อตรวจสอบโครงสร้างในภาพรวม และการกระจายตัวของเฟสเสริมแรงและทำการตรวจสอบ

โครงสร้างจุลภาคอย่างละเอียดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและ ทำการวิเคราะห์ธาตุด้วย energy dispersive spectrometer (EDS) การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง (OM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานเพื่อตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค มีขั้นตอนดังนี้

- 1.) ตัดครึ่งชิ้นงานตามระนาบ A – A ในรูปที่ 3.4
- 2.) นำชิ้นงานที่ตัดไปทำ hot mounting เพื่อความสะดวกในการจับชิ้นงานในขั้นตอนการขัดด้วยกระดาษทราย และการขัดละเอียดด้วยผงเพชรในแผ่นสั๊กกะหลาด
- 3.) ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายซิลิคอนคาร์ไบด์จนถึงเบอร์ 2,000
- 4.) ขัดละเอียดด้วยผงเพชรขนาด 1 ไมครอน
- 5.) ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยแอลกอฮอล์ และเครื่องสั่นอัลตราโซนิค



รูปที่ 3.4 ทิศทางการตัดชิ้นงานตีขึ้นรูปผงโลหะเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

3.3.2 การตรวจสอบหาเฟสอะลูมินาเสริมแรงในชิ้นงานด้วย X-ray diffractometer (XRD)

การตรวจหาเฟสอะลูมินาเสริมแรงด้วย XRD ในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งจะนำชิ้นงานมาทำการตัดตามทิศทางในรูปที่ 3.4 โดยชิ้นงานมีขนาดกว้าง 1 เซนติเมตรยาว 1 เซนติเมตร และทำการขัดผิวจนถึงกระดาษทรายเบอร์ 800 จากนั้นจึงนำไปทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD ตามหัวข้อที่ 3.3.2.3

การตรวจสอบหาเฟสอะลูมินาเสริมแรงในการทดลองกลุ่มที่สองจะใช้วิธีทางเคมีวิเคราะห์ มีสามขั้นตอน คือ การละลายอะลูมิเนียมด้วยกรดเกลือ (Hydrochloric) การกรองแยกตะกอน และการตรวจสอบหาอะลูมินาเสริมแรงด้วย XRD [25]

3.3.2.1 การละลายอะลูมิเนียมด้วยกรดเกลือ

- 1.) โดยจะนำชิ้นงานมาทำการลดขนาดโดยการนำไปทำการเซาะผิวด้วยเครื่องเซาะ (milling machine) เพื่อนำเศษจี้กิ้งที่ได้ไปทำการละลายกรด
- 2.) นำเศษจี้กิ้งที่ได้มาชั่งน้ำหนัก โดยน้ำหนักที่ใช้ คือ 10 กรัม
- 3.) นำเศษจี้กิ้งที่ได้ไปละลายในกรดเกลือเข้มข้น 2 โมล/ลิตร (รูป ค.2 กรดเกลือที่ใช้มีค่า pH 0) โดยใช้กรดเกลือปริมาตร 4-5 ลิตร ในการละลาย
- 4.) ทิ้งให้เกิดการละลายโดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง ขึ้นไป

3.3.2.2 การกรองแยกตะกอน

- 1.) นำสารละลายที่ได้มาทำการกรองแยก โดยใช้กระดาษกรอง whatman เบอร์ 42
- 2.) ใช้อุปกรณ์เครื่องดูด (suction) เพื่อช่วยในการกรองได้เร็วขึ้น
- 3.) นำกระดาษกรองที่ได้มาทำการแยกตะกอนออกจากกระดาษกรองด้วยการเผาไล่กระดาษกรอง โดยการนำกระดาษกรองไปใส่ในฟอสซิลเลน และนำไปเผาในเตาอบที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- 4.) นำผงที่ได้จากการเผาไล่กระดาษกรองไปตรวจสอบด้วย X-ray diffractometer

3.3.2.3 การตรวจสอบหาอะลูมินาเสริมแรงด้วย X-ray diffractometer (XRD)

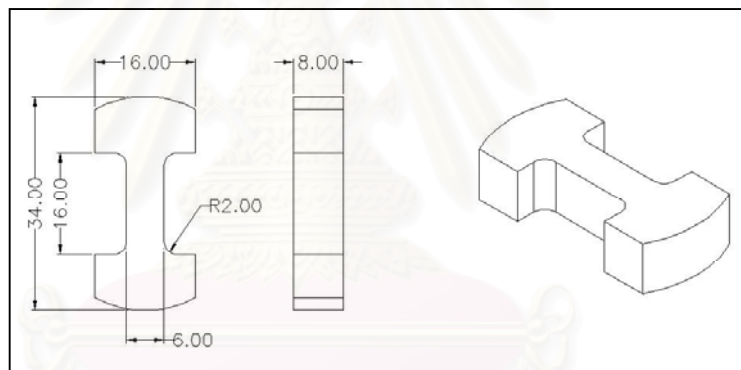
ผงที่ได้จากการกรอง และการเผาไล่กระดาษกรองจะมีลักษณะเป็นแผ่นก่อนที่จะนำมาตรวจสอบหาอะลูมินาด้วย X-ray diffractometer ต้องนำไปทำการบดให้เป็นผงละเอียด สภาวะที่กำหนดในการตรวจสอบด้วย XRD ประกอบด้วย

- Cu tube anode 40 kV 30 mA
- Wave length 1.54060 Å
- Continuous scan
- Divergence slit 1°
- Receiving slit 0.1°
- Start – Stop angle 20° – 80°

- Step size 0.020°
- Time per step 1 second

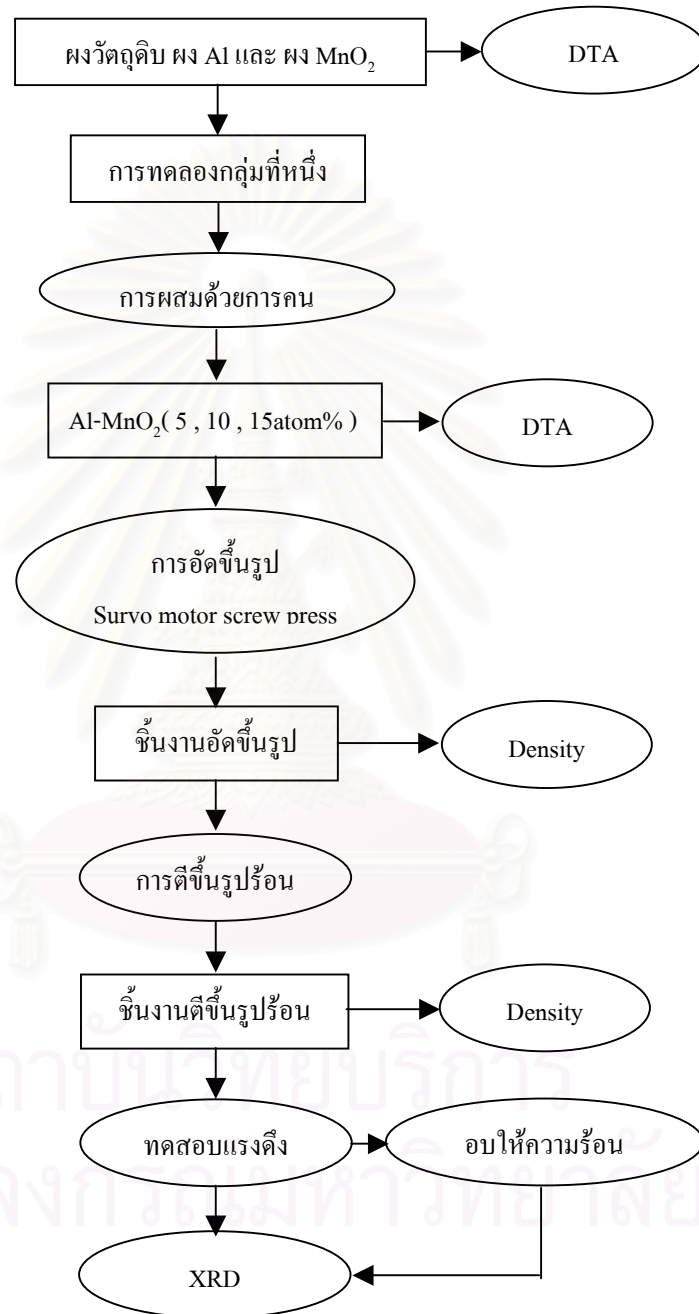
3.3.3 การตรวจสอบคุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อนประกอบไปด้วย การทดสอบแรงดึง และวัดความแข็ง โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E8M – 01 และ E384 – 99 ตามลำดับ เนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาของชิ้นงานมีน้อย ทำให้การกลึงเป็นชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8M – 01 เป็นไปได้ยาก เพื่อความเหมาะสม รูปร่างชิ้นทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อนจึงเป็นชิ้นทดสอบแบบแบน ดังรูปที่ 3.3

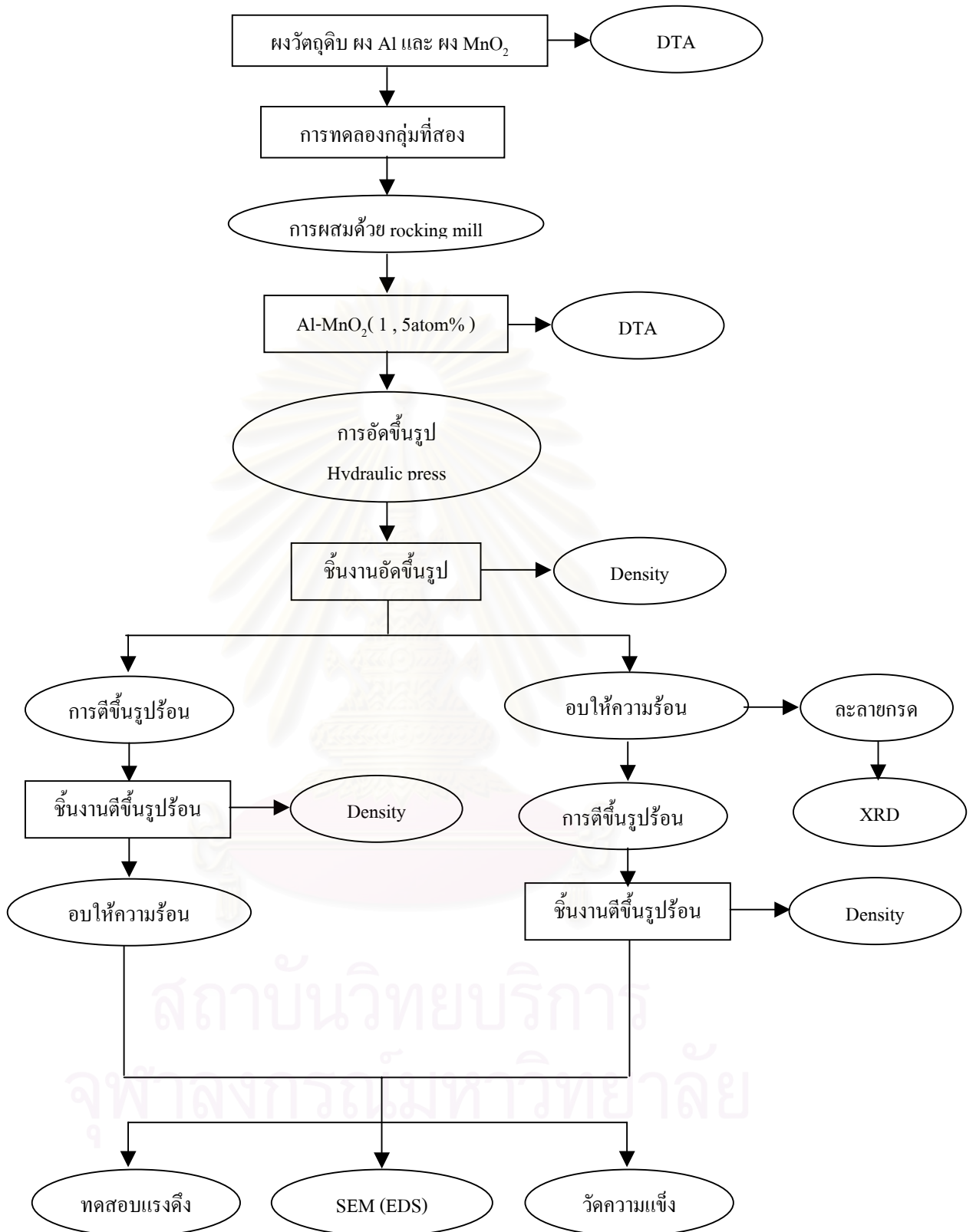


รูปที่ 3.5 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงสำหรับชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อน

3.4 แผนภาพขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 3.6 แผนภาพขั้นตอนการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง



รูปที่ 3.7 แผนภาพขั้นตอนการทดลองกลุ่มที่สอง

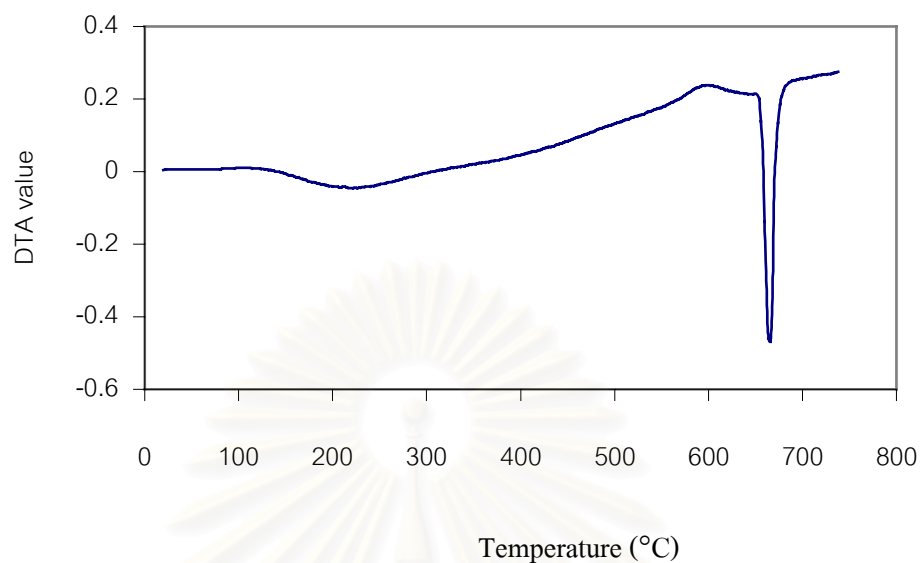
บทที่ 4

ผลการทดลอง

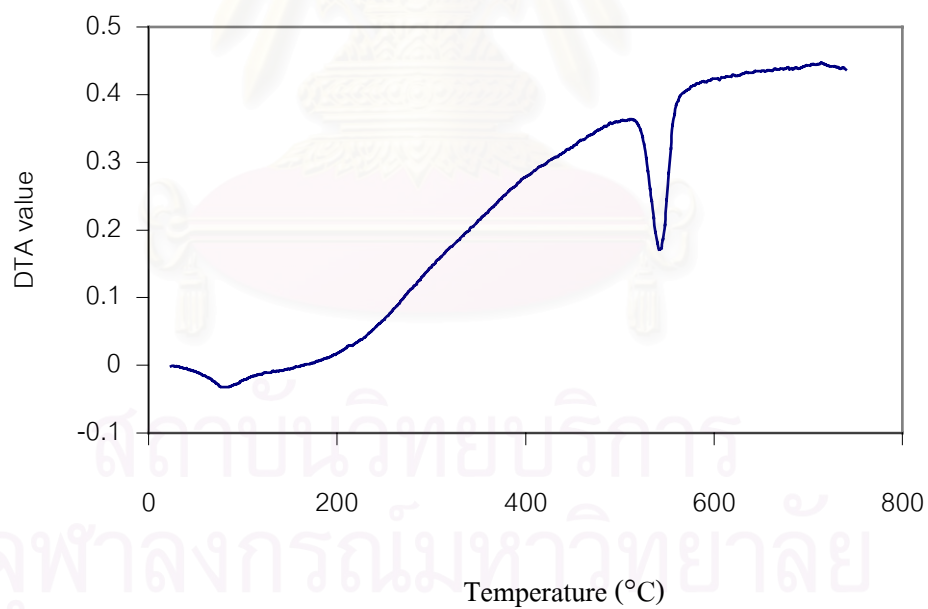
ผลการทดลองจะแบ่งเป็นสองกลุ่ม โดยในกลุ่มที่หนึ่งจะเป็นการทดลองในช่วงแรกของงานวิจัย ซึ่งจะใช้อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่มีอยู่แล้ว โดยเป็นการผลิตชิ้นงานโดยใช้เครื่อง servo motor screw press ขนาด 100 ตัน และเป็นหลักโดยกระบวนการในการทดลองจะไม่มีกรอบให้ความร้อน (annealing) และวิธีที่ใช้ในการตรวจสอบเฟสอะลูมินาเสริมแรงจะตรวจสอบโดยใช้เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) ส่วนผสมที่ใช้ในการทดลองจะใช้สามส่วนผสมคือ 5atom%, 10atom% และ 15atom%MnO₂ โดยผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในกลุ่มที่หนึ่งได้ถูกนำมาปรับปรุงเป็นการทดลองในกลุ่มที่สอง การทดลองในกลุ่มที่สองจะเป็นการทดลองที่มีการใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการทดลองมากขึ้นและมีความคล่องตัวในการใช้มากขึ้นโดยการผลิตชิ้นงานจะไม่ใช้เครื่อง servo motor screw press เพียงอย่างเดียวและเพิ่มขึ้นตอนในการทดลองมากขึ้นจากเดิม รวมไปถึงวิธีในการตรวจสอบเฟสอะลูมินาเสริมแรงจะมีวิธีการทางเคมีวิเคราะห์ก่อนจะนำไป ตรวจสอบโดยใช้เครื่อง XRD และตรวจสอบขั้นสุดท้ายด้วย SEM และ EDS

4.1 การตรวจสอบคุณลักษณะของผงตั้งต้นด้วย DTA และ SEM

การตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อนด้วยเครื่อง DTA ทำการตรวจสอบผงที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาจุดหลอมเหลวของผงวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง และทำการตรวจสอบผงที่ทำการผสมแบบสุ่มโดยการคนเพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่มีการเกิดจุดความร้อน หรือคายความร้อนที่มีปริมาณมากที่สุด การตรวจสอบด้วย SEM เพื่อตรวจสอบลักษณะรูปร่างของผงวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง ในรูปที่ 4.1 แสดงจุดหลอมเหลวของผงอะลูมิเนียมที่ 656.5°C ในรูปที่ 4.2 แสดงจุดหลอมเหลวของผงแมงกานีสไดออกไซด์ที่ 524.3°C รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะรูปร่างของเม็ดผงอะลูมิเนียม และรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของเม็ดผงแมงกานีสไดออกไซด์



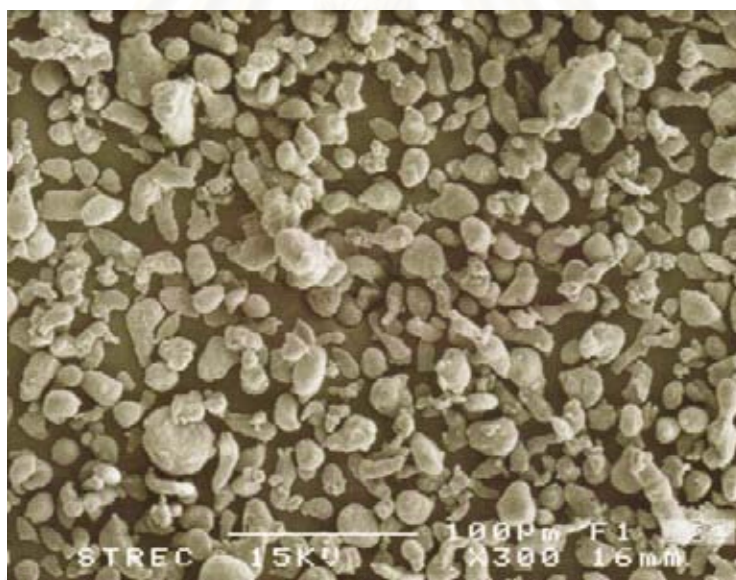
รูปที่ 4.1 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อนของพอลิเอทิลีนไกลคอลที่ใช้ในการทดลอง โดยจากผลที่ได้พบว่าพอลิเอทิลีนไกลคอลที่ใช้ในการทดลองแสดงจุดหลอมเหลวที่ 656.5 °C



รูปที่ 4.2 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อนของพอลิอะคริลอนไทรล์ที่ใช้ในการทดลอง โดยจากผลที่ได้พบว่าพอลิอะคริลอนไทรล์ที่ใช้ในการทดลองแสดงจุดหลอมเหลวที่ 524.3 °C



รูปที่ 4.3 ภาพจาก SEM แสดงลักษณะของพอลิเอทิลีนไดออลที่มีขนาดพอง 148.8 μm ที่กำลังขยาย 43 เท่า (ภาคผนวกรูปที่ ข.1)



รูปที่ 4.4 ภาพจาก SEM แสดงลักษณะของพอลิเอทิลีนไดออลที่มีขนาด 8-18 μm ที่กำลังขยาย 300 เท่า

4.2 ผลการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง

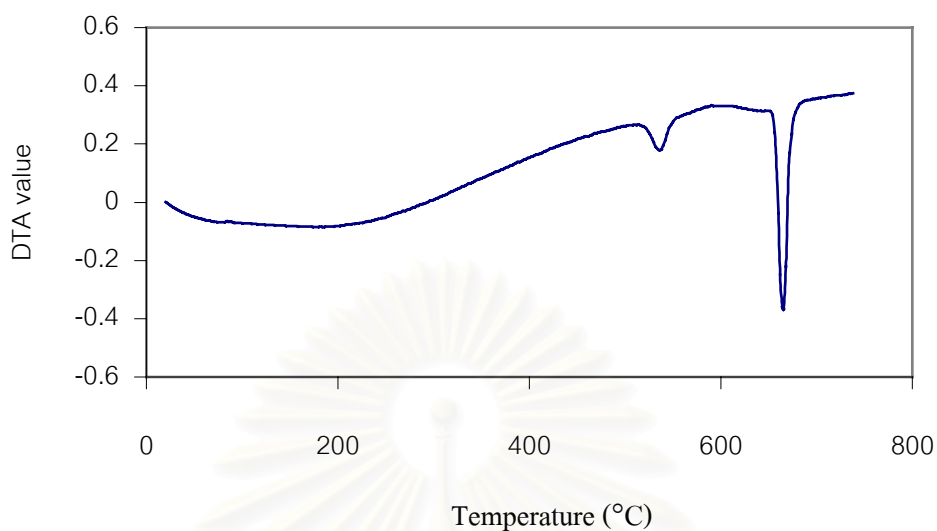
4.2.2 การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ

4.2.2.1 การผสมผง

ในขั้นตอนแรกของการผลิต คือการผสมผงเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ผงที่มีความเป็นเนื้อเดียวกัน เพื่อให้ส่วนผสม และคุณสมบัติที่ได้มีความสม่ำเสมอกัน ผงอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสไดออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยในขั้นตอนการผสมจะใช้การผสมกันแบบสุ่มโดยการคนให้เข้ากัน และการผสมโดยใช้เครื่อง rocking mill ลักษณะของผงที่ผสมได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 สำหรับในการทดลองในกลุ่มที่หนึ่ง จะใช้การผสมแบบสุ่มโดยการคนให้เข้ากันด้วยช้อนสแตนเลส และรูปที่ 4.6 แสดงจุดหลอมเหลวของทั้งผงอะลูมิเนียมที่ 656 °C และผงแมงกานีสไดออกไซด์ที่ 524.4 °C



รูปที่ 4.5 ลักษณะของผงอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสไดออกไซด์โดยด้วยทางซ้ายเป็นการผสมกันแบบสุ่มโดยใช้วิธีคนให้เข้ากัน และด้วยทางขวาเป็นการผสมโดยใช้เครื่อง rocking mill



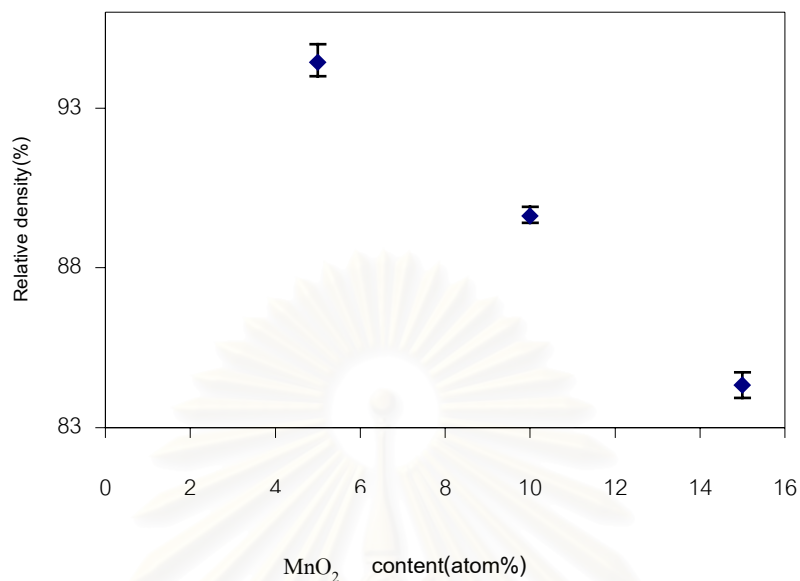
รูปที่ 4.6 ผลการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อนของผงอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสไดออกไซด์ ที่ทำการผสมโดยวิธีการผสมแบบสุ่มโดยการคนให้เข้ากัน โดยผลที่ได้จะแสดงจุดหลอมเหลวของทั้งผงอะลูมิเนียมที่ 656°C และผงแมงกานีสไดออกไซด์ที่ 524.4°C

4.2.2.2 การอัดขึ้นรูป

ในการอัดขึ้นรูปผงอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสไดออกไซด์ในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งใช้เครื่อง servo motor screw press ในการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง โดยผลการตรวจสอบความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ (สมการที่ 3.1 และสมการที่ 3.2) ของชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการอัดขึ้นรูปเรียงตามส่วนผสมแสดงในตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสม และความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้จากการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้องในการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง

ตารางที่ 4.1 ผลความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการอัดขึ้นรูป

ส่วนผสม	ชิ้นที่	ความหนาแน่น ทางทฤษฎี	ความดันการ อัด (MPa)	Bulk density (g/cm ³)	ความหนา แน่นสัมพัทธ์ (%)
Al-5 atom%MnO ₂	1	2.89	608	2.716	94
	2	2.89	714	2.725	94.3
	3	2.89	866	2.745	95
Al-10atom% MnO ₂	4	3.07	585	2.759	89.9
	5	3.07	690	2.75	89.6
	6	3.07	819	2.744	89.4
Al-15mol%MnO ₂	7	3.24	678	2.718	83.9
	8	3.24	819	2.744	84.7
	9	3.24	866	2.734	84.4



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสม กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ ของ 5atom%, 10atom% และ 15atom% แมงกานีสไดออกไซด์ ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง

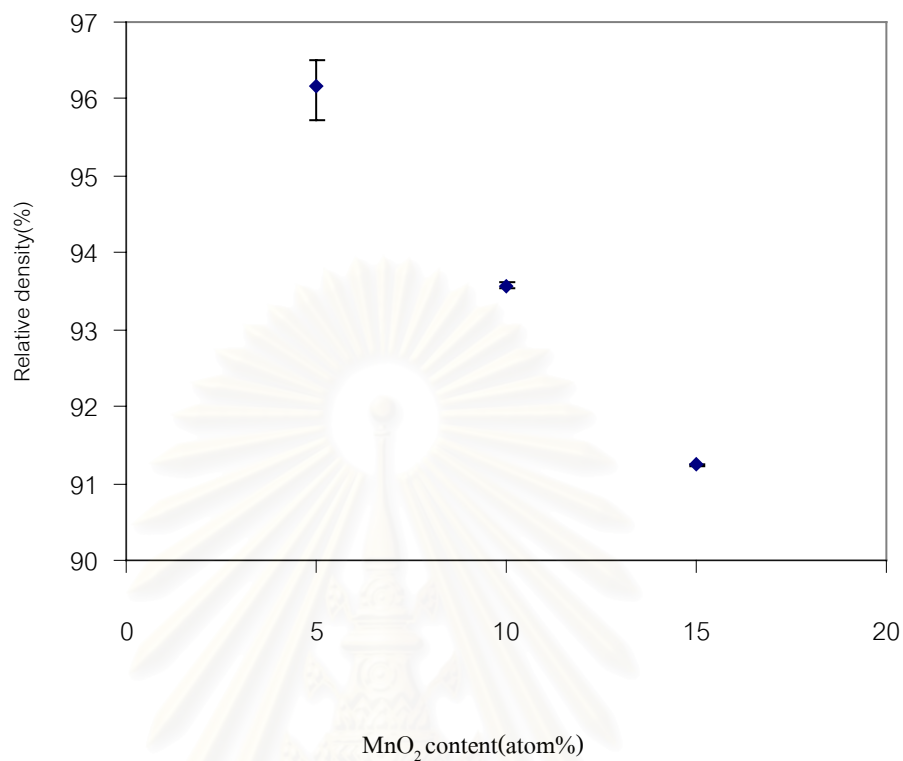
จากจากข้อมูลในรูป 4.7 จะเห็นว่าผลจากส่วนผสมของชิ้นงานมีผลต่อการอัดขึ้นรูปเป็นอย่างมาก พบว่ายิ่งชิ้นงานมีส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์มากขึ้น จะทำให้ความสามารถในการอัดขึ้นรูปลดลง

4.2.2.3 การตีขึ้นรูปร้อน

ชิ้นงานที่นำมาตีขึ้นรูปร้อนเป็นชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปในหัวข้อที่ 4.2.2.2 โดยทำการตีขึ้นรูปร้อนเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงานในขณะเดียวกันก็สร้างวัสดุเสริมแรงไปในเวลาเดียวกัน โดยในชิ้นงานที่ 1, 2 และ 3 ที่มีส่วนผสม 5atom%แมงกานีสไดออกไซด์ จะใช้แรงในการตีขึ้นรูปร้อนต่างๆ กัน เพื่อดูผลของแรงในการตีขึ้นรูปร้อนว่ามีผลต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่เหลือจะใช้แรงในการตีขึ้นรูปร้อนที่เท่ากัน ผลจากการตีขึ้นรูปร้อนแสดงในตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นจากขั้นตอนการอัดขึ้นรูป

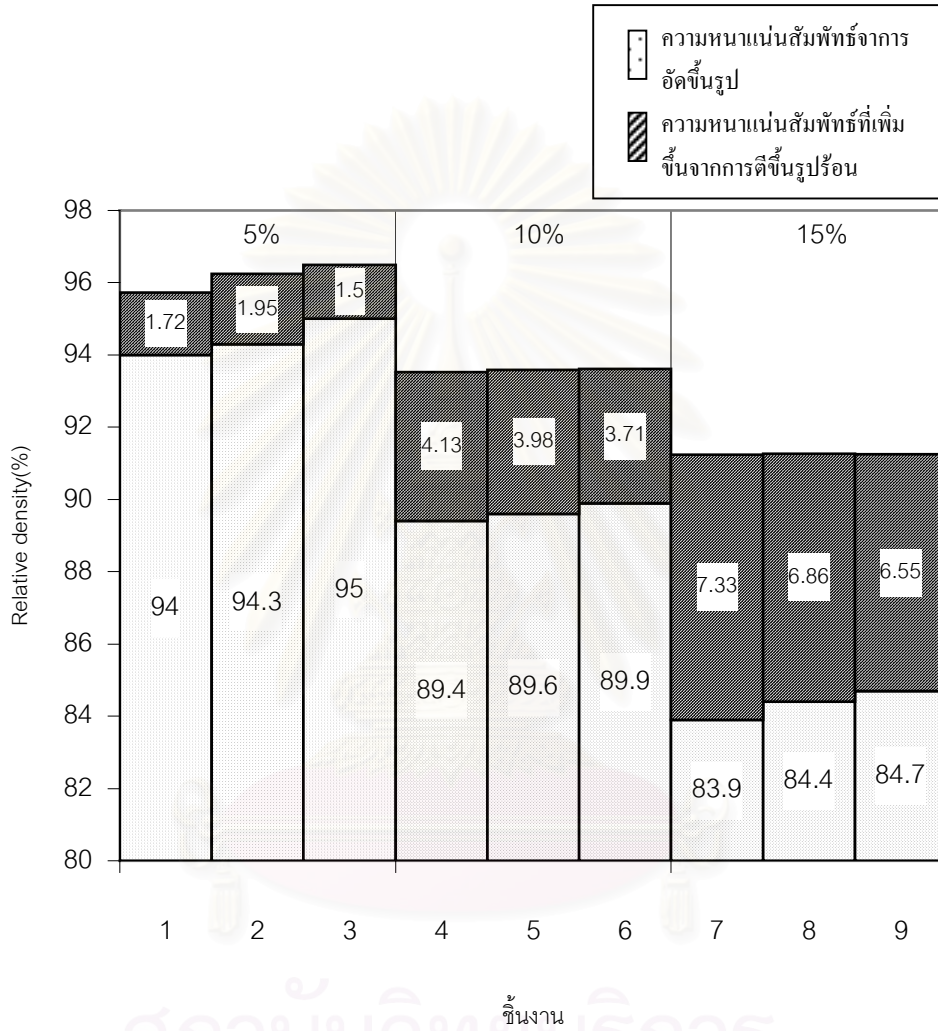
ตารางที่ 4.2 ผลการตรวจสอบความหนาแน่นและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการตีขึ้นรูปร้อนในการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง

ส่วนผสม	ชิ้นที่	ความหนาแน่นทางทฤษฎี	ความดันในการตี (MPa)	Bulk density (g/cm ³)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (%)
Al - 5 mol%MnO ₂	1	2.89	716	2.766	95.72
	2	2.89	838	2.782	96.25
	3	2.89	948	2.788	96.5
Al - 10 mol%MnO ₂	4	3.07	749	2.871	93.53
	5	3.07	738	2.873	93.58
	6	3.07	771	2.874	93.61
Al - 15 mol%MnO ₂	7	3.24	804	2.956	91.23
	8	3.24	793	2.957	91.26
	9	3.24	715	2.737	91.25



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสม กับความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงาน 5atom%, 10atom% และ 15atom% แมงกานีสไดออกไซด์ ที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อนในการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์จากการอัปเดตข้อมูลกับ ความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นหลังจากทำการดีขึ้นรูปอื่นของแต่ละชั้นงานในการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง

4.2.3 การทดสอบแรงดึง

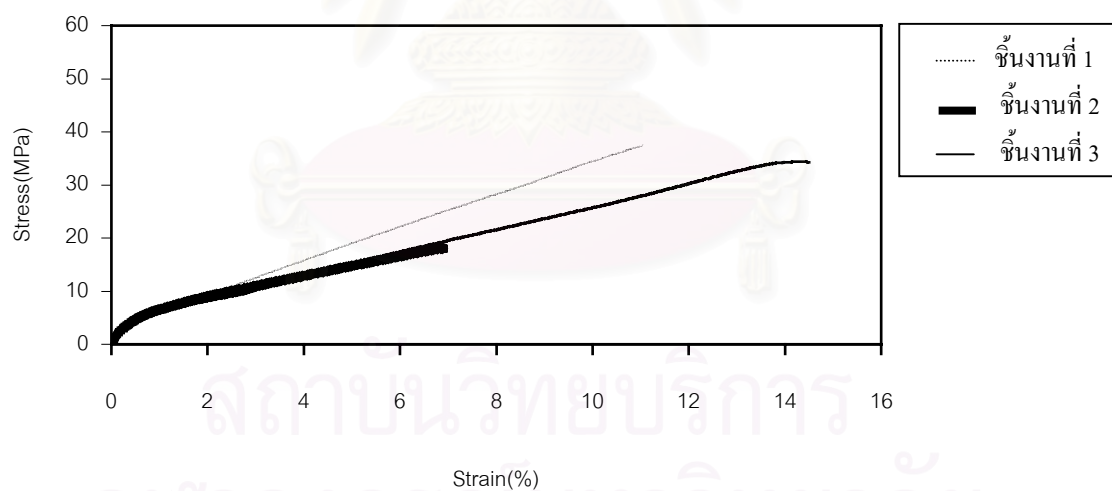
ในการทดสอบแรงดึงจะใช้ชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อนมาทำการทดสอบ โดยชิ้นงานจะถูกนำมากลึงให้เป็นรูปชิ้นงานทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.5 ชิ้นงานที่ผ่านการกลึงมาพบว่าที่บริเวณผิวมีความไม่สม่ำเสมอของผิวเนื่องมาจากเกิดรอยแตกจากการที่ผิวกลึงและยังเกิดรอยแตกที่ผิวด้วยเนื่องจากความเปราะของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.10 ดังนั้นก่อนที่จะนำชิ้นงานไปทำการทดสอบ จะต้องนำชิ้นงานมาทำการตกแต่งผิวให้มีความเรียบ และลบรอยแตกที่เกิดจากการกลึงเสียก่อน ผลการทดสอบแรงดึงดังแสดงในตารางที่ 4.3 รูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 แสดงกราฟความเค้นความเครียดในการทดสอบแรงดึงของชิ้นงาน 5atom% , 10atom% และ 15atom% แมงกานีสไดออกไซด์ตามลำดับ และรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานกับค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด



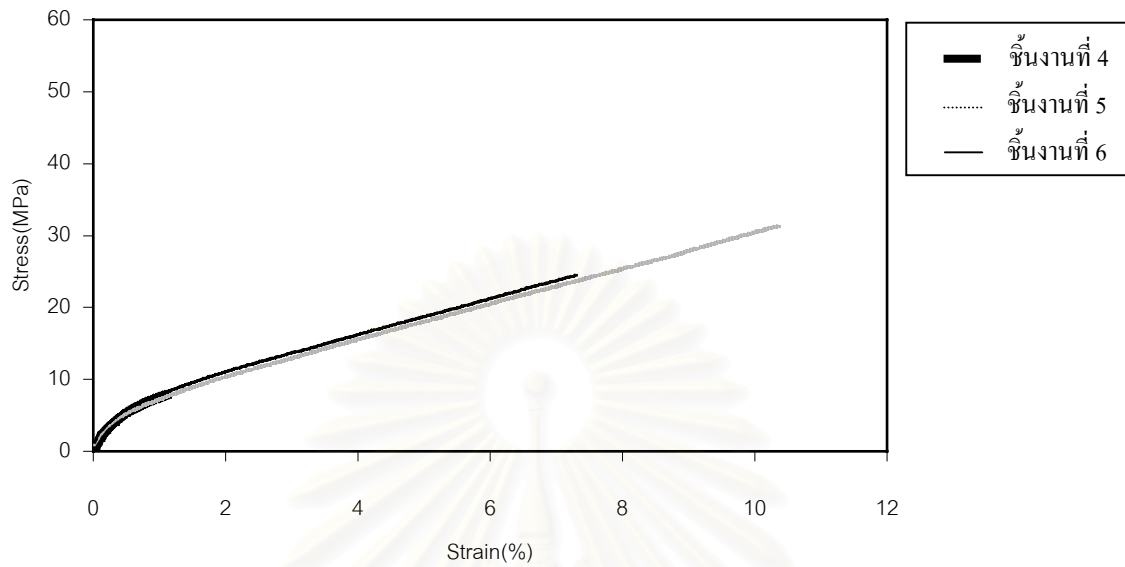
รูปที่ 4.10 ลักษณะผิวชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อนที่ผ่านการกลึงเป็นรูปชิ้นงานทดสอบแรงดึง ก่อนนำไปขัดแต่งผิวชิ้นงานแล้วจึงนำไปทำการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดึงแสดงค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อน

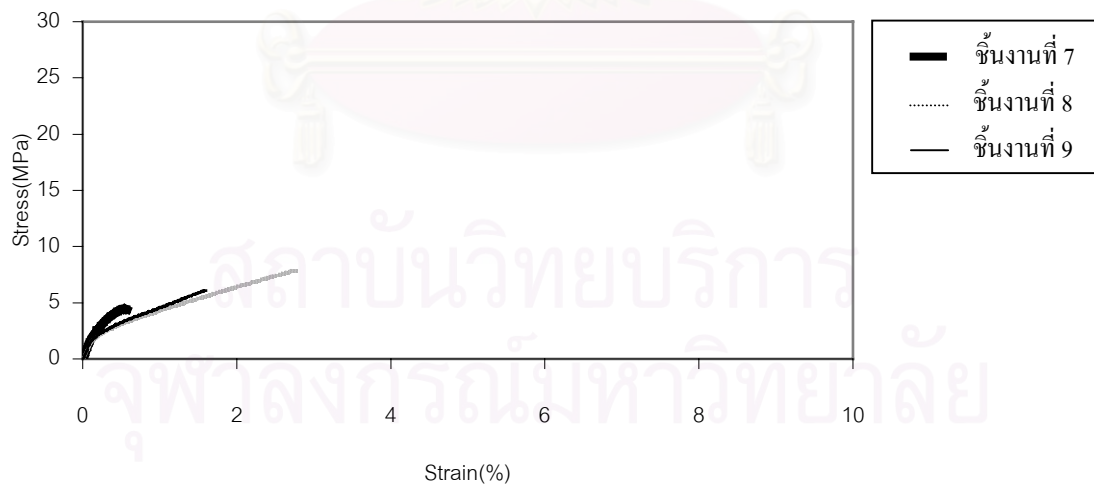
ส่วนผสม	ชิ้นงาน ที่	ความหนาแน่น สัมพัทธ์ (%)	การยืดตัว (%)	ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด ,UTS (MPa)	UTS เฉลี่ย (MPa)
Al- 5atom%MnO ₂	1	95.72	1.32	37.44	29.92
	2	96.25	1.12	18.06	
	3	96.50	1.53	34.26	
Al- 10atom%MnO ₂	4	93.53	0.21	8.27	21.35
	5	93.58	1.18	31.32	
	6	93.61	1	24.45	
Al- 15atom%MnO ₂	7	91.23	0.24	4.44	6.13
	8	91.26	0.59	7.85	
	9	91.25	0.53	6.09	



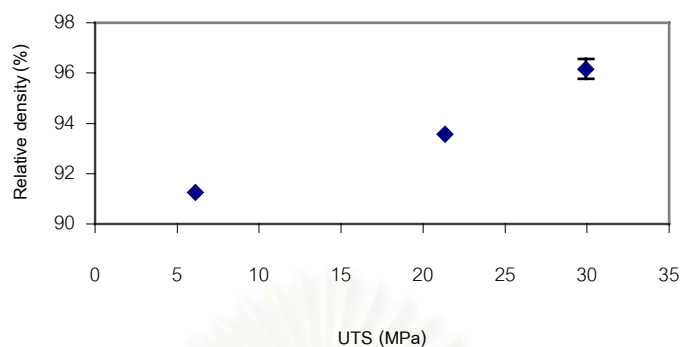
รูปที่ 4.11 แผนภาพความเค้น-ความเครียด จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อนที่มีส่วนผสม Al- 5atom%MnO₂



รูปที่ 4.12 แผนภาพความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อนที่มีส่วนผสม Al- 10atom%MnO₂



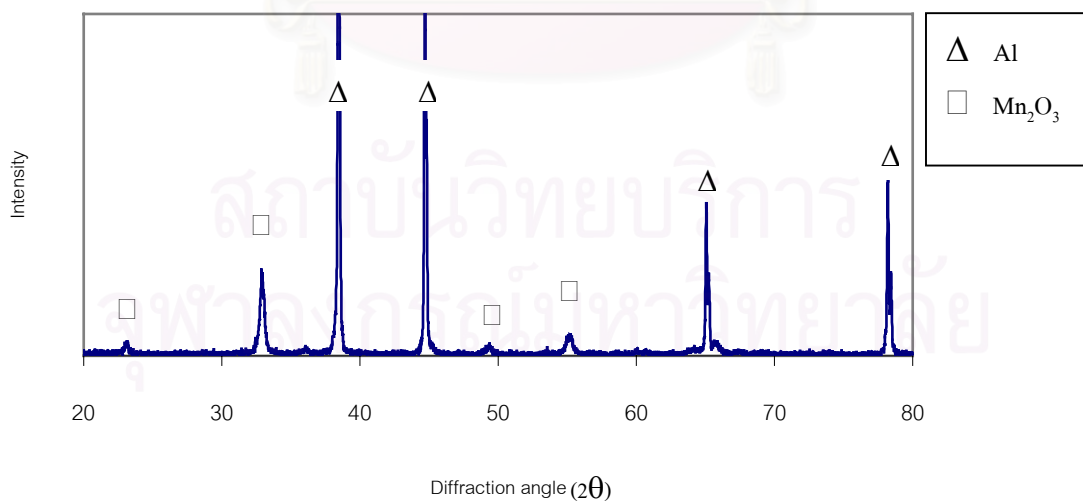
รูปที่ 4.13 แผนภาพความเค้น-ความเครียดจากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อนที่มีส่วนผสม Al- 15atom%MnO₂



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสัมพัทธ์กับค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดเฉลี่ยของชิ้นงานแต่ละกลุ่ม

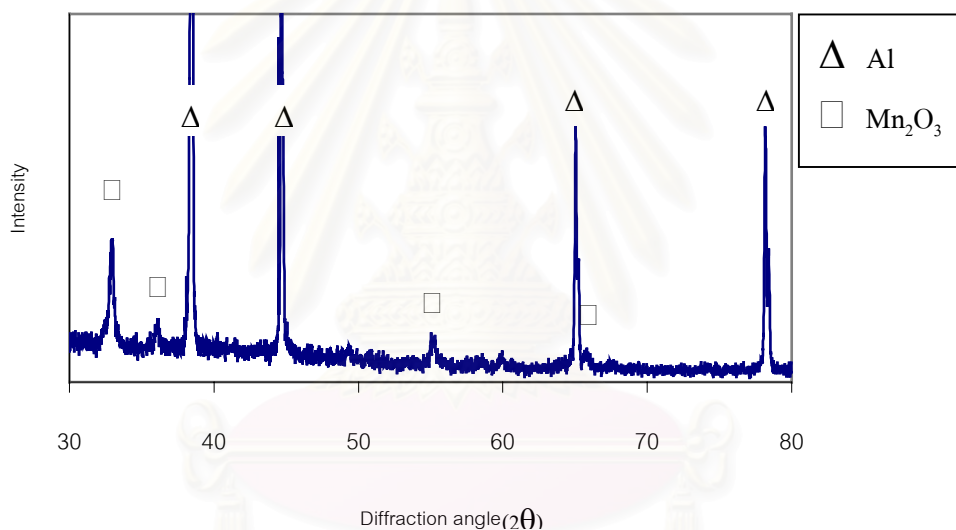
4.2.4 การตรวจสอบเฟสอะลูมินาเสริมแรงด้วย XRD

การตรวจสอบหาเฟสอะลูมินาในชิ้นงานด้วย XRD จะใช้ชิ้นงานที่ 8 ในการตรวจสอบเพราะว่าเป็นชิ้นงานที่มีส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์สูงสุดและมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดมากที่สุดในกลุ่มที่มีส่วนผสมเดียวกัน เนื่องจากผลการทดสอบแรงดึงมีค่าต่ำเราจึงใช้ XRD ในการตรวจสอบการแตกตัวของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) และตรวจสอบการเกิดขึ้นของเฟสอะลูมินาเสริมแรง

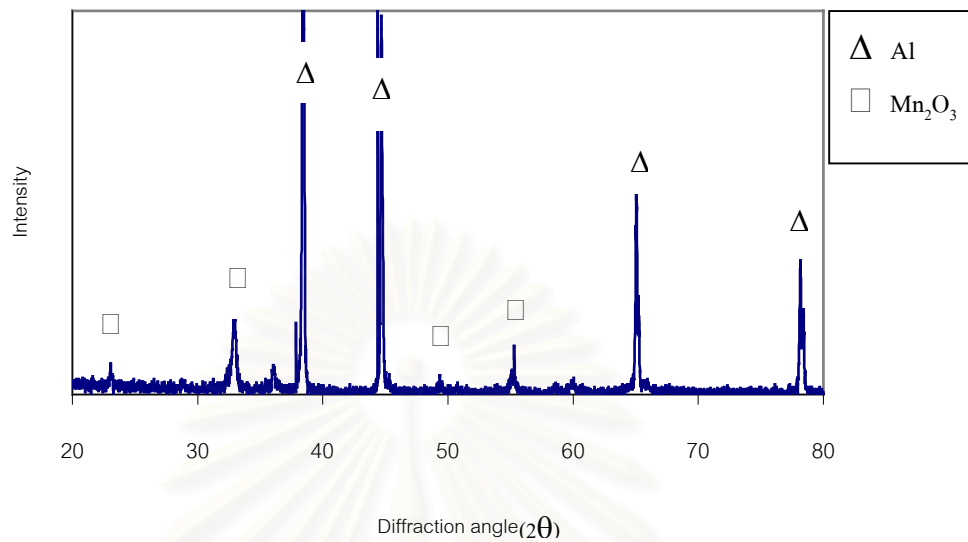


รูปที่ 4.15 ผล XRD ของชิ้นงานที่ 8 หลังจากการทดสอบแรงดึงพบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและ bixbyite (Mn_2O_3)

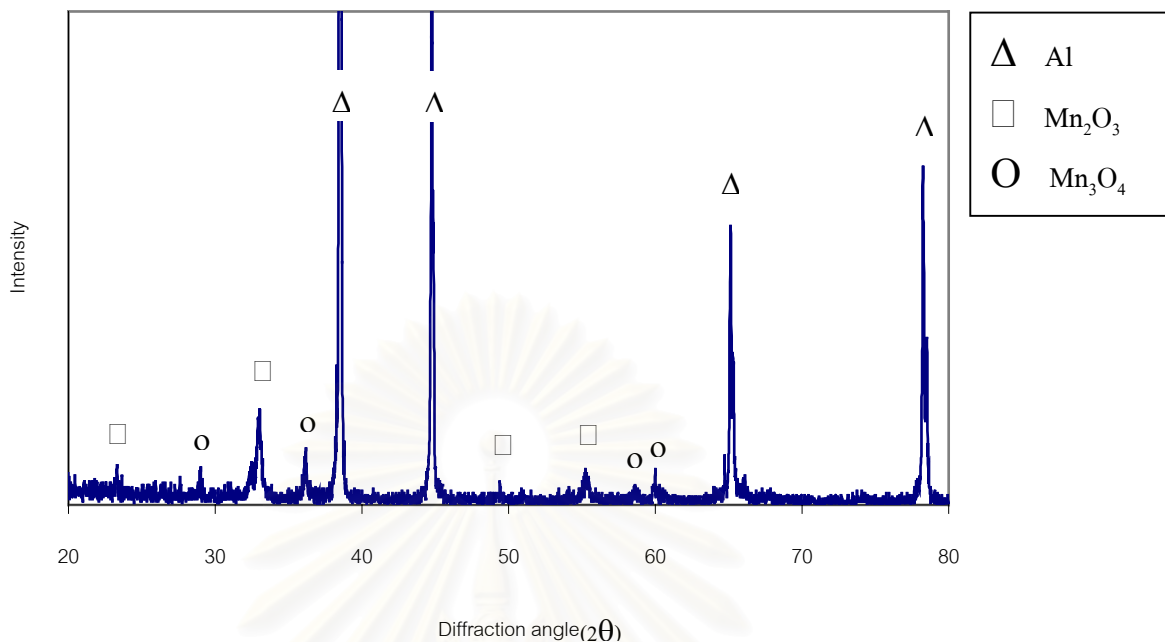
จากผลของการตรวจสอบด้วย XRD ในรูปที่ 4.15 พบว่าในชิ้นงานยังไม่มีเกิดการเกิดของอะลูมินาเสริมแรง โดยพบว่าการแตกตัวให้ออกซิเจนของของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) เป็น bixbyite (Mn_2O_3) ไม่พบ MnO_2 เหลืออยู่แสดงว่ามีการแตกตัวจนหมด (แต่เกิดการแตกตัวไม่สมบูรณ์) อาจเป็นเหตุให้การเกิดอะลูมินามีโอกาสน้อยลงในการตรวจสอบขั้นต่อไปจึงทดลองนำเอาชิ้นงานที่ 8 นี้มาทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C , 550°C และ 600°C เพื่อตรวจสอบหาการแตกตัวของแมงกานีสไดออกไซด์ว่าที่อุณหภูมิใดจะมีการแตกตัวได้มากที่สุดโดยใช้เวลาในการอบเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง แล้วจึงนำไปทดสอบด้วย XRD โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.16, รูปที่ 4.17 และ รูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 ผล XRD ของชิ้นงานที่ 8 หลังจากการทดสอบแรงดึง จากนั้นนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C , 1 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและ bixbyite (Mn_2O_3) ประกอบอยู่



รูปที่ 4.17 ผล XRD ของชิ้นงานที่ 8 หลังจากการทดสอบแรงดึง จากนั้นนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 550°C , 1 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียมและ bixbyite (Mn₂O₃)



รูปที่ 4.18 ผล XRD ของชิ้นงานที่ 8 หลังจากการทดสอบแรงดึง จากนั้นนำไปอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C , 1 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียม, bixbyite (Mn_2O_3) และ hausmannite (Mn_3O_4) ประกอบอยู่

จากรูปที่ 4.16-4.18 จะเห็นได้ว่าเมื่ออบที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้อัตราส่วนของออกซิเจนในแมงกานีสออกไซด์ลดลง แสดงว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นแมงกานีสออกไซด์ให้ออกซิเจนออกมามากขึ้น

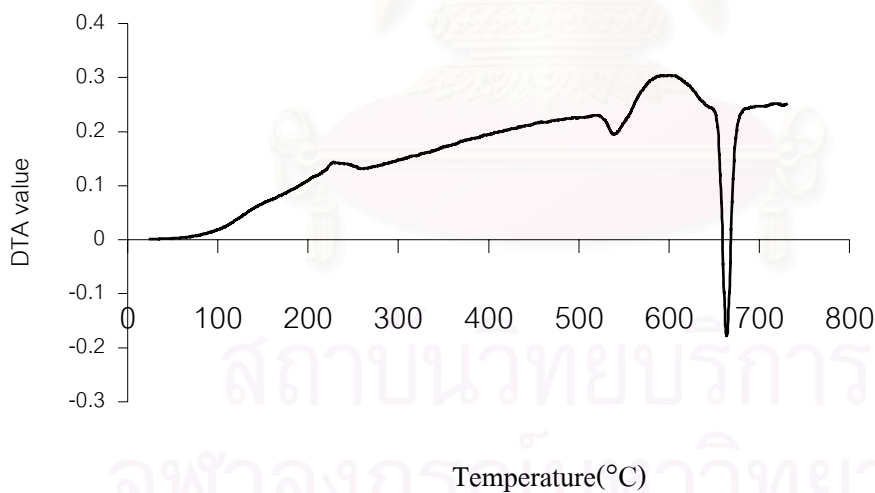
4.3 การทดลองกลุ่มที่สอง

เป็นการทดลองที่มีการปรับปรุงการทดลองจากในช่วงแรกโดยในขั้นตอนการผลิตชิ้นงานดีขึ้น รุปร้อนมีการเพิ่มกระบวนการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C และ 650°C โดยใช้เวลาในการอบให้ความร้อน 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง รวมไปถึงจนถึงอุปกรณ์และวิธีการในขั้นตอนต่างๆ มีการปรับปรุงเพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติที่ดีสำเร็จตามวัตถุประสงค์

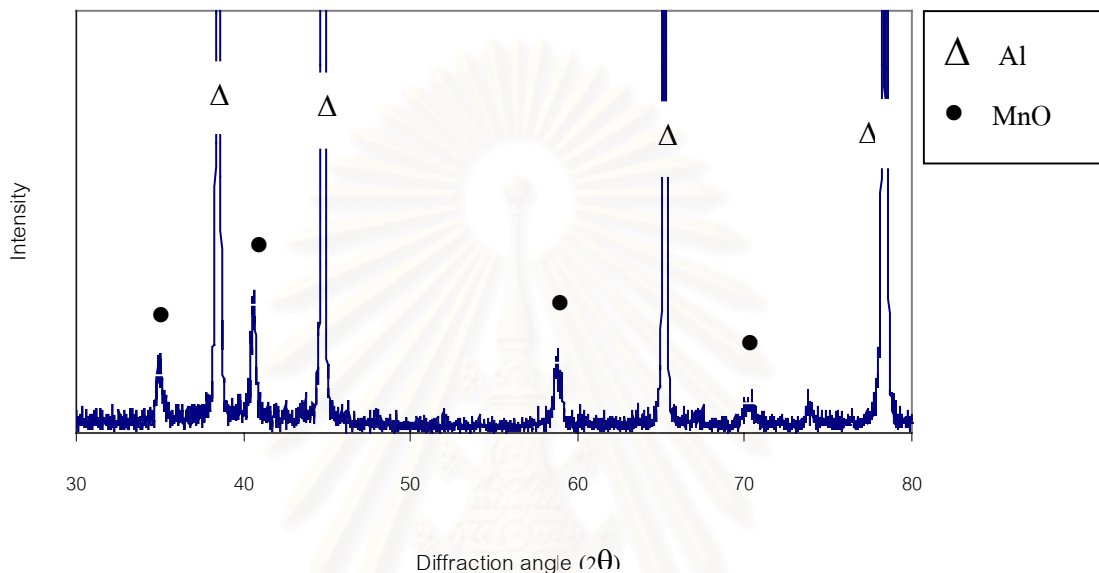
4.3.1 การผลิตชิ้นงานด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะ

4.3.1.1 การผสมผง

ในการผสมผงจะใช้ส่วนผสมในการทดลองที่ 1atom%MnO₂ และ 5atom%MnO₂ โดยทำการผสมด้วยใช้เครื่อง rocking mill รูปที่ 4.19 แสดงผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะทางความร้อนของผงที่ผ่านการผสมโดยเครื่อง rocking mill โดยพบว่าที่อุณหภูมิ 560°C ถึง 650°C จะเกิดปฏิกิริยาการคายความร้อนในช่วงอุณหภูมินี้ และในช่วงอุณหภูมิ 190°C ถึง 250°C ก็เป็นอีกช่วงที่เกิดปฏิกิริยาทางความร้อนอย่างเห็นได้ชัดแต่ไม่รุนแรงนัก จากรูปที่ 4.20 แสดงผลของการตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อนซึ่งทำการผสมโดยเครื่อง rocking mill เมื่อนำมาทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C , 1 ชั่วโมงพบว่าแม้จะยังไม่พบเฟสอะลูมินาเสริมแรงแต่ก็พบกับเฟส manganosite (MnO) ซึ่งเป็นเฟสที่มีอัตราส่วนออกซิเจนน้อยที่สุดในแมงกานีสออกไซด์



รูปที่ 4.19 ผลจากการวิเคราะห์คุณลักษณะทางความร้อนของผง Al-1atom%MnO₂ ที่ผ่านการผสมโดยเครื่อง rocking mill ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 4.20 ผล XRD ของชิ้นงานที่ผ่านการดัดขึ้นรูปร้อน และทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600 °C , 1 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมิเนียม และ manganosite (MnO) ประกอบอยู่

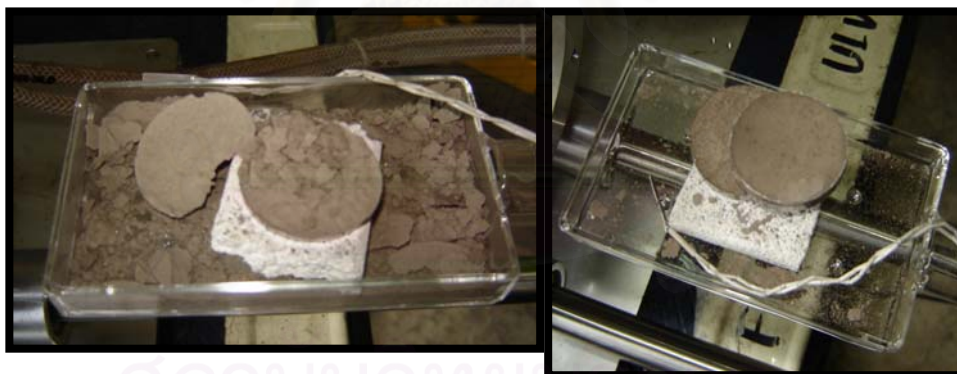
4.3.1.2 การอัดขึ้นรูป

ในขั้นตอนการอัดขึ้นรูปได้มีการปรับเปลี่ยนเครื่องมือที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปจากเครื่อง servo motor screw press เป็นเครื่อง hydraulic press ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความคล่องตัวในการทำการทดลองนอกจากนั้นยังทำการเปลี่ยนขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปจากเดิมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 มิลลิเมตร เป็นแม่พิมพ์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ในการทดลองในช่วงที่สองนี้เราได้กำหนดความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานไว้ไม่ให้เกิน 90% (84%-88%) เนื่องจากหากความหนาแน่นสัมพัทธ์สูงเกินไปเมื่อนำชิ้นงานไปทำการอบให้ความร้อนจะพบว่าชิ้นงานเกิดการระเบิดขึ้นใน

ระหว่างการอบที่ช่วงอุณหภูมิ 190°C-250°C ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ดังนั้นในการอัดขึ้นรูปชิ้นงานจะอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยแรงอัด 142 MPa โดยน้ำหนักของชิ้นงานจะอยู่ที่ 20-21 กรัม ชิ้นงานที่ได้จะมีส่วนสูงประมาณ 1.2 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.4 ความดันอัดในการอัดขึ้นรูป ความหนาแน่นสัมพัทธ์ และการเกิดระเบิดของชิ้นงานในระหว่างขั้นตอนการอบให้ความร้อน

ส่วนผสม	ชิ้นงานที่	น้ำหนัก (กรัม)	ความดันอัด(MPa)	ความหนาแน่นสัมพัทธ์(%)	การระเบิดในการอบให้ความร้อน
Al-5atom%MnO ₂	1	20.43	142	87.92	ไม่เกิด
	2	20.43	425	94.13	เกิดที่ 250 °C
	3	20.3	142	87.17	ไม่เกิด
	4	20.46	142	87.09	ไม่เกิด



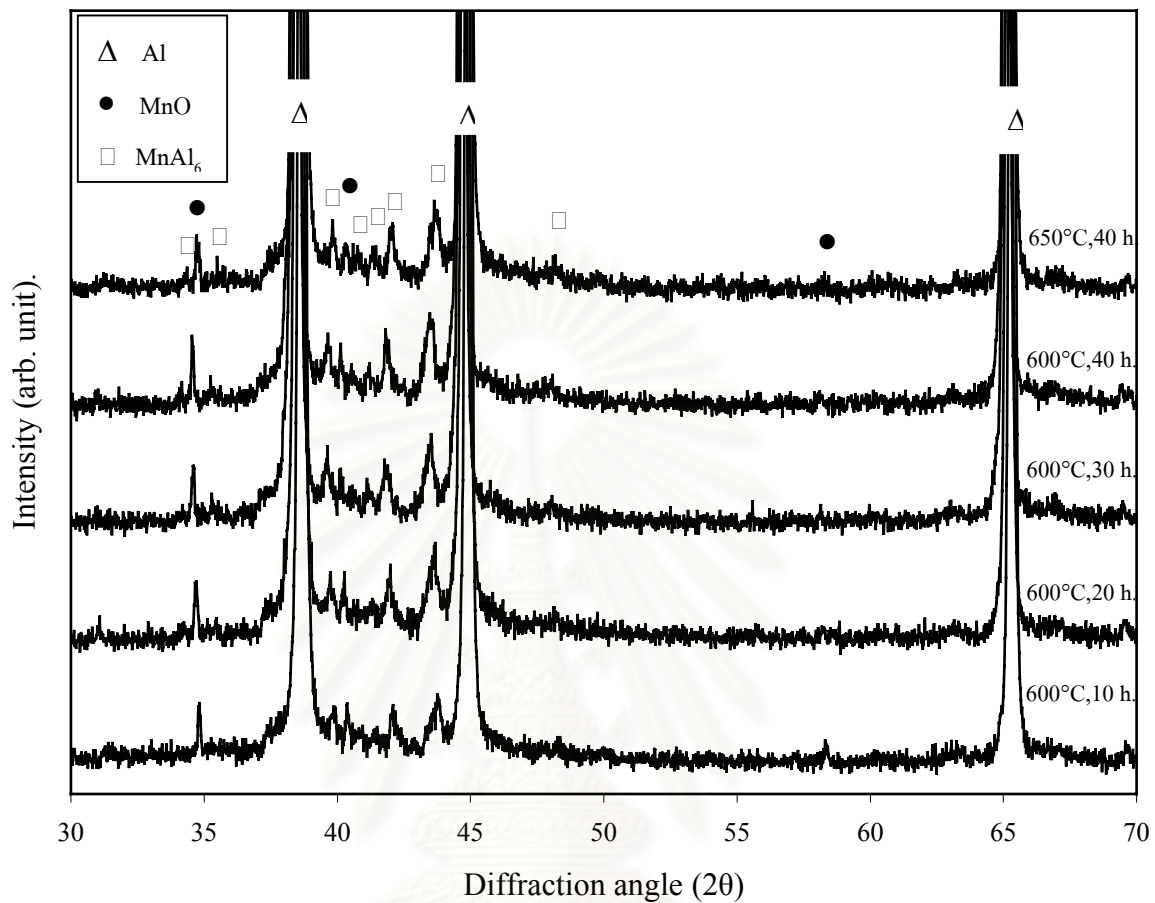
รูปที่ 4.21 ลักษณะของชิ้นงานที่เกิดการระเบิดขึ้นในระหว่างการอบให้ความร้อนที่ช่วงอุณหภูมิ 190°C-250°C ของชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสัมพัทธ์มากกว่า 90%

4.3.1.3 การอบให้ความร้อน

ในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งยังไม่มี การเพิ่มกระบวนการนี้ โดยในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งนั้น ทำการทดลองโดยการผสมผง อัดขึ้นรูป และทำการตีขึ้นรูปร้อนก็จบกระบวนการ แต่เนื่องจากชิ้นงานที่ได้เมื่อนำไปทดสอบแรงดึงแล้วพบว่าความสามารถในการต้านทานแรงดึงต่ำมากจึงมีการปรับปรุงกระบวนการในการทดลองใหม่ โดยทดลองใช้การผสมผงโดยใช้เครื่อง rocking mill ช่วยในการผสม โดยจะเป็นเครื่องที่ผสมผงโดยใช้การเขย่าให้เข้ากันที่ความถี่สูงในขั้นตอนการผสมผง และเพิ่มขั้นตอนการอบให้ความร้อน โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการอบให้ความร้อนภายหลังการตีขึ้นรูปร้อน และก่อนการตีขึ้นรูปร้อน ผลจากการอบให้ความร้อนแสดงในตารางที่ 4.5 และในรูปที่ 4.22 แสดงผลการตรวจสอบด้วย XRD ของชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการอบให้ความร้อนที่เวลา 10, 20 ,30 และ 40 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 600°C และชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการอบให้ความร้อนที่เวลา 40 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 650°C

ตารางที่ 4.5 น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานหลังจากผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปทำการตีขึ้นรูปร้อน

ส่วนผสม	ชิ้นงาน	น้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักหลังอบ (กรัม)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (%)
Alบริสุทธิ์	1	20.09	20.20	0.11	0.55
	2	20.07	20.17	0.10	0.5
	3	20.08	20.19	0.11	0.55
	4	20.04	20.15	0.11	0.55
Al - 1atom%MnO ₂	5	20.11	20.54	0.43	2.14
	6	20.12	20.54	0.42	2.09
	7	20.12	20.50	0.38	1.89
	8	20.06	20.44	0.38	1.89
	9	20.07	20.45	0.38	1.89
	10	20.04	20.38	0.34	1.69



รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD ของชิ้นงานที่ทำการตีขึ้นรูปร้อน และทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เป็นระยะเวลา 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 650°C เป็นระยะเวลา 40 ชั่วโมง พบว่าประกอบไปด้วย อะลูมิเนียม, manganosite (MnO) และสารประกอบโลหะ MnAl₆

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

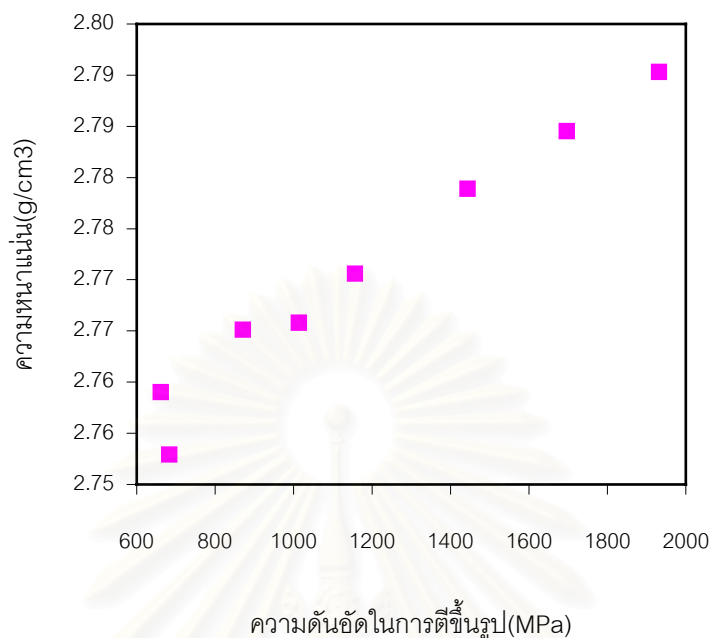
4.3.1.4 การตีขึ้นรูปรีออน

การตีขึ้นรูปรีออนเป็นกระบวนการเดียวในการทดลองที่ไม่ได้มีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนหรืออุปกรณ์ แต่อาจจะมีการสลับลำดับขั้นตอนกับขั้นตอนการอบให้ความร้อนเพื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกัน โดยในตารางที่ 4.6 แสดงความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปรีออนด้วยความดันอัดต่างๆ กัน โดยความหนาแน่นของชิ้นงานก่อนการตีขึ้นรูปมีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ของแรงในการตีขึ้นรูปรีออนกับความหนาแน่นของชิ้นงานที่ใช้ความดันอัดในการตีขึ้นรูปรีออนที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ของชิ้นงานตีขึ้นรูปรีออนที่มีผลมาจากความดันอัดที่ใช้ในการตีขึ้นรูปรีออนที่แตกต่างกัน

ส่วนผสม	ชิ้นงานที่	ความหนาแน่นก่อนตีขึ้นรูปรีออน (g/cm ³)	ความดันอัดในการตีขึ้นรูปรีออน (MPa)	ความหนาแน่นหลังตีขึ้นรูปรีออน (g/cm ³)
Al- 1atom%MnO ₂	1	2.4109	661	2.7690
	2	2.4120	683	2.7529
	3	2.4198	871	2.7651
	4	2.4187	1014	2.7658
	5	2.4163	1157	2.770
	6	2.4271	1444	2.7789
	7	2.4245	1697	2.7845
	8	2.4083	1932	2.7903

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ของความดันอัดในการตีขึ้นรูปกับความหนาแน่นของชิ้นงาน

4.3.2 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ใช้จะมีสี่ชุด คือชุดแรกจะเป็นชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง และทำการตีขึ้นรูปด้วยแรงต่างๆ กัน ชุดที่สองจะเป็นชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ทำการตีขึ้นรูปด้วยแรงต่างๆ กัน และชุดที่สามจะเป็นชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C โดยใช้เวลาต่างๆ กันในขั้นตอนการอบให้ความร้อน ตีขึ้นรูปที่ความดันอัดประมาณ 660 MPa และมีการสลับลำดับขั้นตอนระหว่างการอบให้ความร้อนและการตีขึ้นรูป ชุดที่สี่จะเป็นชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง มีการสลับลำดับขั้นตอนในการอบให้ความร้อนกับการตีขึ้นรูป และใช้ความดันอัดในการตีขึ้นรูปต่างกัน ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.7, 4.8, 4.9 และ 4.10 ในรูปที่ 4.24 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นงาน เมื่อใช้อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนต่างกันใช้เวลาเท่ากันที่ความดันอัดใกล้เคียงกัน รูปที่ 4.25, 4.26 และ 4.27 เปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียด เมื่อใช้ความดันอัดที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิการอบให้ความร้อนเท่ากันและเวลาเดียวกัน

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C นาน 30 ชั่วโมง และทำการตีขึ้นรูปร้อนโดยใช้ความดันอัดที่แตกต่างกัน

ส่วนผสม	ชิ้นงานที่	ความดันอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การยืดตัว (%)	ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (MPa)
Al-pure	1	694	2.716	4.26	23.07
	2	915	2.716	7.5	27.72
	3	1003	2.711	10.23	23.83
	4	1201	2.711	13.38	30.94
Al- 1atom%MnO ₂	5	639	2.752	2.56	23.54
	6	871	2.721	3.06	34.4
	7	992	2.754	2.62	72.72
	8	1179	2.754	4.12	81.61

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C นาน 30 ชั่วโมง และทำการตีขึ้นรูปร้อนโดยใช้ความดันอัดที่แตกต่างกัน

ส่วนผสม	ชิ้นงานที่	ความดันอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การยืดตัว (%)	ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (MPa)
Al-pure	1	672	2.721	7.65	42.41
	2	838	2.731	10.59	72
	3	1003	2.683	12.53	74.6
	4	1124	2.705	13.68	83.7
Al- 1atom%MnO ₂	5	716	2.783	3.82	96.3
	6	959	2.761	3.85	97.3
	7	1069	2.819	3.74	103.78
	8	1091	2.8	5.29	104.74

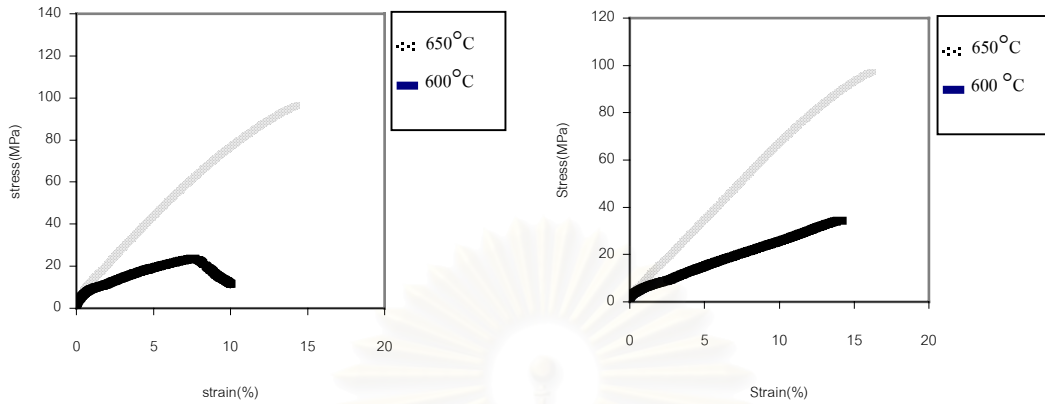
รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดของชิ้นงานที่ใช้เวลาในการอบให้ความร้อนที่แตกต่างกันที่อุณหภูมิ 600°C รูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงการเปรียบเทียบกราฟความเค้น-ความเครียดเมื่อมีการสลัดลำดับขั้นตอนการอบให้ความร้อนและการตีขึ้นรูปร้อน โดยใช้เวลาในการอบและความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนต่างกัน ตามลำดับ รูปที่ 4.31-4.33 แสดงผลการตรวจสอบเฟสเสริมแรงบริเวณรอยแตกของชิ้นงานด้วยกล้อง SEM และอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS ในรูปที่ 4.31 แสดงการกระจายตัวของเฟสเสริมแรงที่พบในรอยแตก รูปที่ 4.32 แสดงความต่อเนื่องกันของเฟสเสริมแรงกับเนื้อพื้น และรูปที่ 4.33 แสดงเฟสเสริมแรง และผลการวิเคราะห์เฟสเสริมแรงด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C โดยใช้เวลาต่างๆ กันและตีขึ้นรูปร้อนที่ความดันอัด 660 MPa และมีการสลัดลำดับขั้นตอนการอบให้ความร้อนและการตีขึ้นรูปร้อน โดยทุกชิ้นมีส่วนผสม 1atom%MnO₂

ชิ้นงานที่	เวลาในการอบให้ความร้อน (ชั่วโมง)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การยืดตัว (%)	ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (MPa)
ตีขึ้นรูปร้อนก่อนการอบให้ความร้อน				
1	10	2.75	5.12	102.9
2	20	2.777	7.59	114.3
3	30	2.767	7.91	119.5
4	40	2.767	5.56	118.6
อบให้ความร้อนก่อนการตีขึ้นรูปร้อน				
5	10	2.751	3.65	48.67
6	20	2.737	3.21	63.8
7	30	2.735	4.09	76.5
8	40	2.744	3.74	83.8

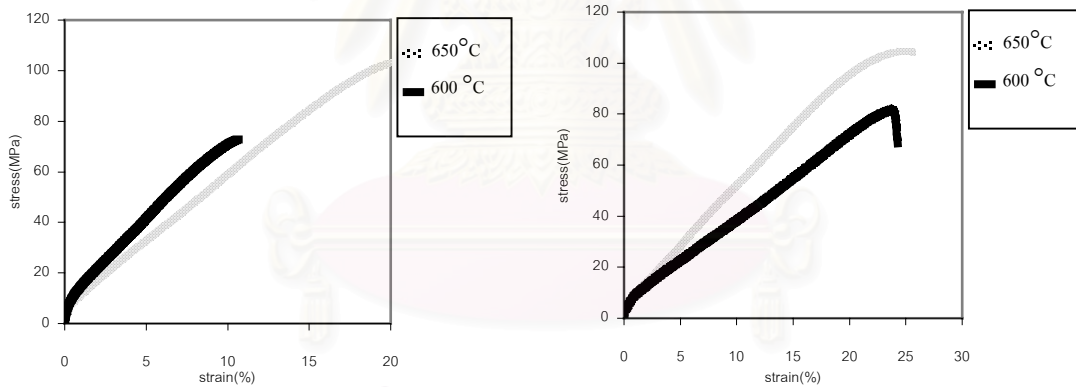
ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบแรงดึงชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C โดยใช้เวลา 40 ชั่วโมง และทำการตีขึ้นรูปรีดที่ความดันอัดต่างๆ กัน และยังมีการสลับลำดับขั้นตอน ระหว่างการอบให้ความร้อนและการตีขึ้นรูปรีด โดยทุกชิ้นมีส่วนผสม 1atom%MnO₂

ชิ้นงานที่	ความดันอัดในการตีขึ้นรูปรีด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	การยืดตัว (%)	ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด (MPa)
อบให้ความร้อนก่อนการตีขึ้นรูปรีด				
1	727	2.757	3.74	91.82
2	926	2.769	4.55	103.06
3	1003	2.758	4.97	106.98
4	1212	2.770	6.8	110.55
ตีขึ้นรูปรีดก่อนการอบให้ความร้อน				
5	683	2.753	6.67	115.89
6	771	2.728	6.64	117.46
7	793	2.722	8.68	120.37
8	871	2.753	8.63	118.04
9	871	2.729	7.76	120.66
10	882	2.718	6.46	121.10
11	1014	2.745	9.77	118.71
12	1003	2.720	8.31	121.10
13	1003	2.722	6.26	121.48
14	1157	2.755	9.09	124.43
15	1146	2.730	8.01	125.11
16	1179	2.727	7.83	123.95



ก.) 600°C (639 MPa) , 650°C (716 MPa)

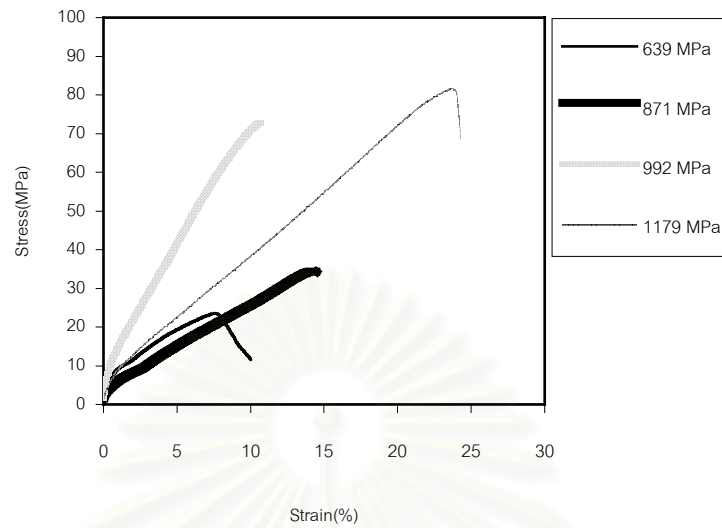
ข.) 600°C (871 MPa) , 650°C (959 MPa)



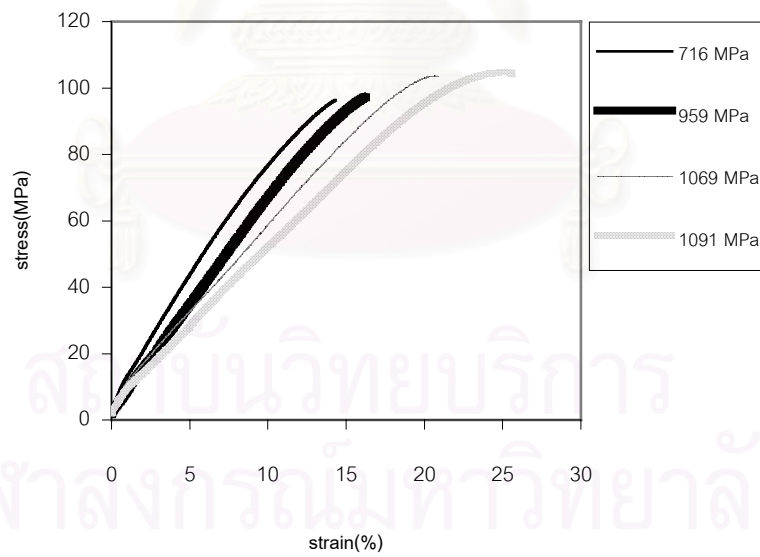
ค.) 600°C (992 MPa) , 650°C (1069 MPa)

ง.) 600°C (1179 MPa) , 650°C (1091 MPa)

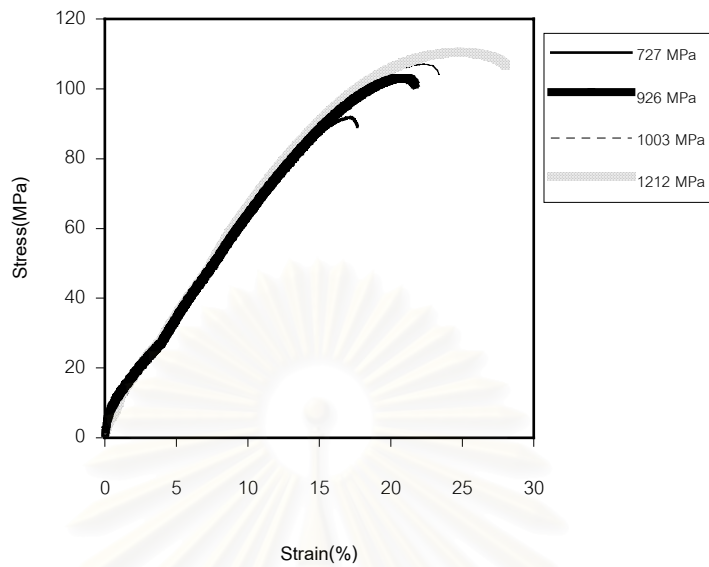
รูปที่ 4.24 แผนภูมิความเค้น-ความเครียด โดยเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการอบให้ความร้อน ระหว่าง 600°C และ 650°C โดยใช้เวลา 30 ชั่วโมง เท่ากัน และด้วยความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนใกล้เคียงกัน



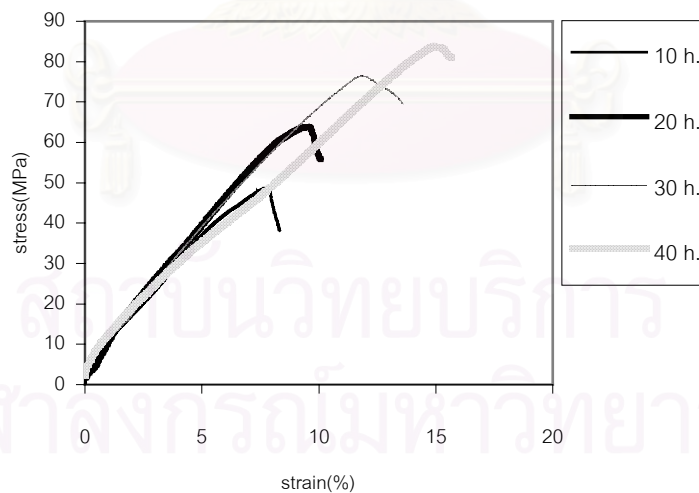
รูปที่ 4.25 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบความดันอัดที่ใช้ในการตีขึ้นรูปร้อน โดยเป็นชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่ 600°C , 30 ชั่วโมง



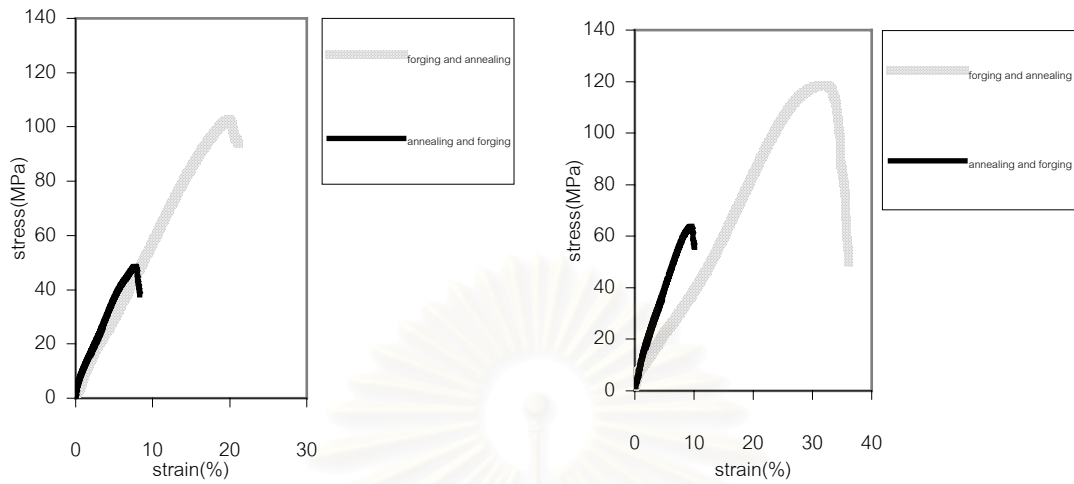
รูปที่ 4.26 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบความดันอัดที่ใช้ในการตีขึ้นรูปร้อน โดยเป็นชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่ 650°C , 30 ชั่วโมง



รูปที่ 4.27 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบความดันอัดที่ใช้ในการตีขึ้นรูปร้อนโดยเป็นชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่ 650°C , 40 ชั่วโมง

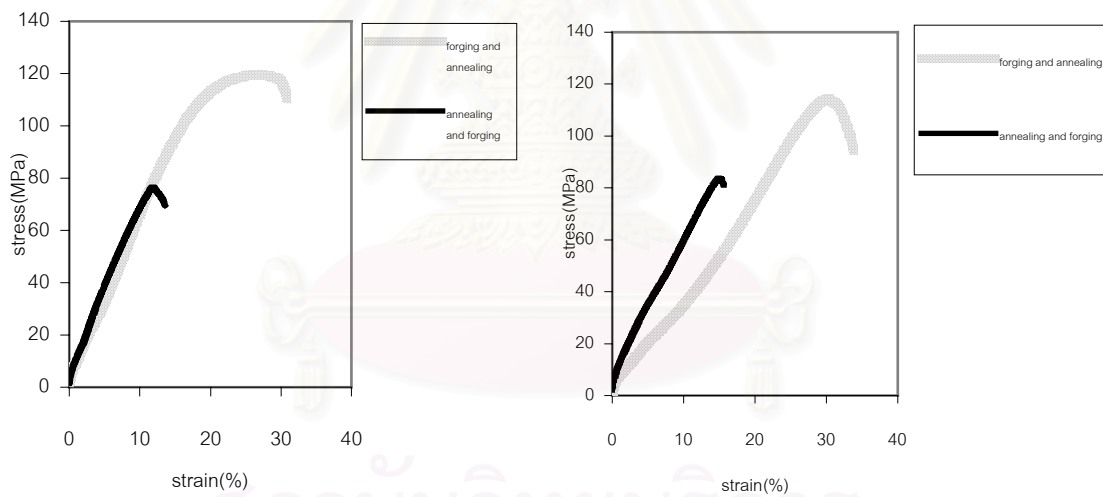


รูปที่ 4.28 แผนภูมิความเค้น-ความเครียด เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการอบให้ความร้อน ที่เวลา 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิในการอบให้ความร้อน 600°C และตีขึ้นรูปร้อนด้วยความดันอัดประมาณ 660 MPa



(ก.) 10 ชั่วโมง

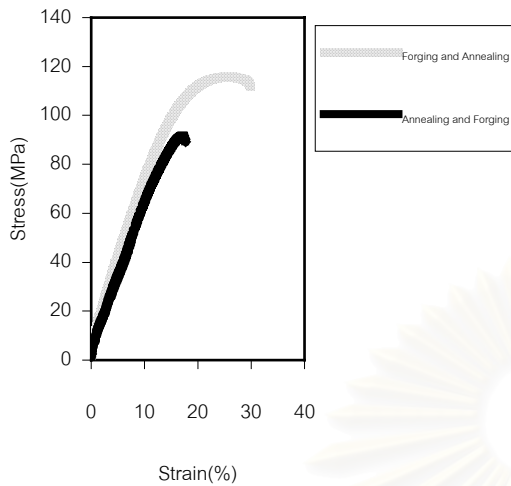
(ข.) 20 ชั่วโมง



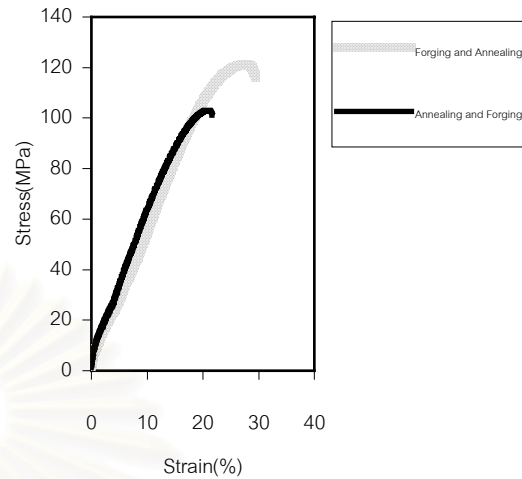
(ค.) 30 ชั่วโมง

(ง.) 40 ชั่วโมง

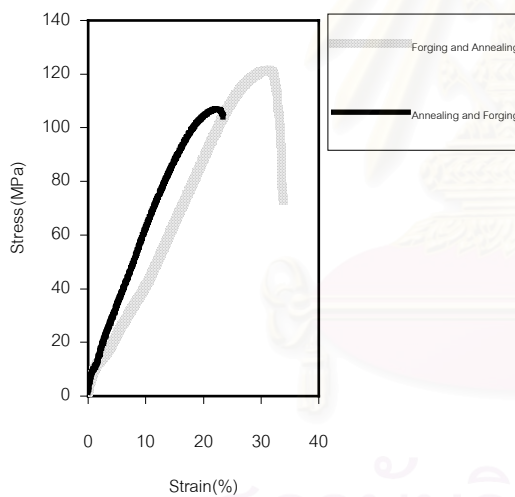
รูปที่ 4.29 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบเมื่อเราสลับลำดับขั้นตอนการตีขึ้นรูป และ การอบให้ความร้อน โดยใช้ชิ้นงานที่อบให้ความร้อน 600°C (ก.) 10 ชั่วโมง (ข.) 20 ชั่วโมง (ค.) 30 ชั่วโมง (ง.) 40 ชั่วโมง โดยใช้ความดันอัดในการตีขึ้นรูป 660 MPa



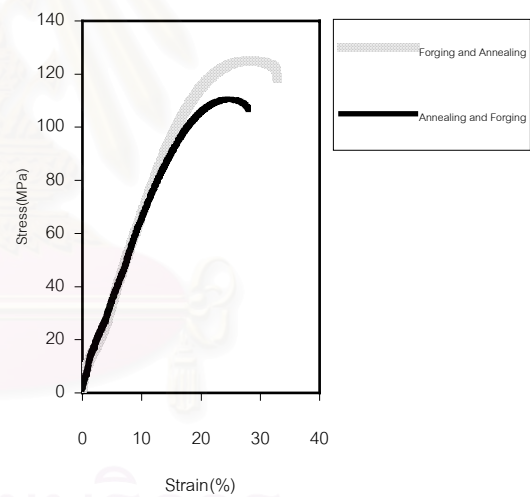
(ก.) Forging and Annealing (683 MPa)
Annealing and Forging (727 MPa)



(ข.) Forging and Annealing (882 MPa)
Annealing and Forging (926 MPa)

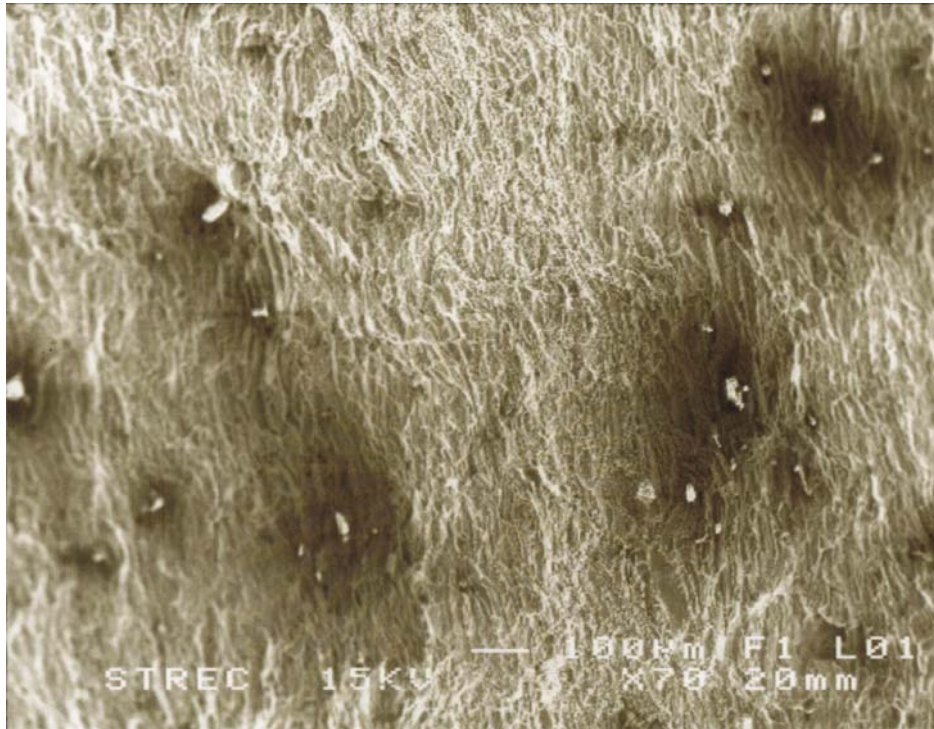


(ค.) Forging and Annealing (1003 MPa)
Annealing and Forging (1003 MPa)

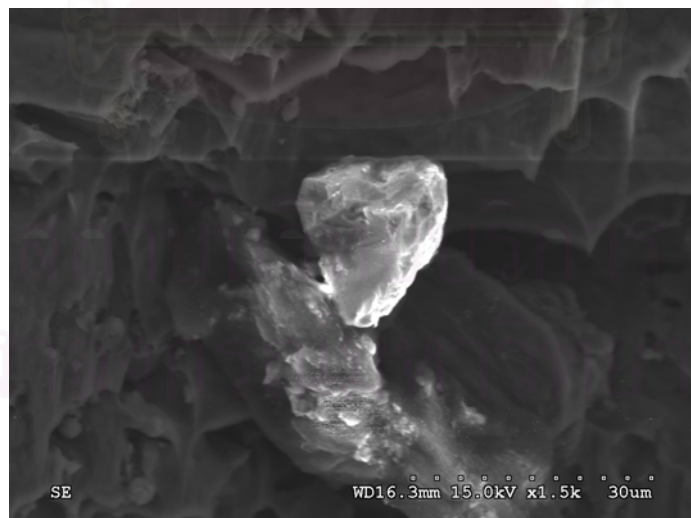


(ง.) Forging and Annealing (1212 MPa)
Annealing and Forging (1146 MPa)

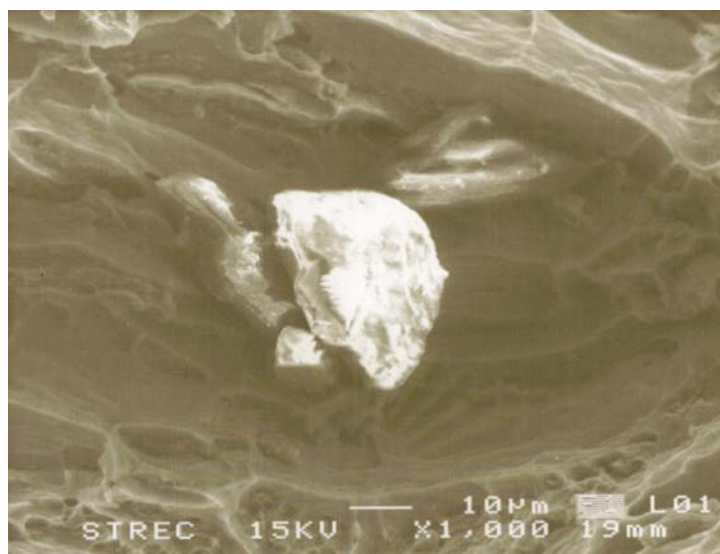
รูปที่ 4.30 แผนภูมิความเค้น-ความเครียดเปรียบเทียบเมื่อเราสลับลำดับขั้นตอนการตีขึ้นรูป และความดันในการตีขึ้นรูปร้อนที่ใกล้เคียงกัน โดยใช้ชิ้นงานที่อบให้ความร้อน 650°C เป็นเวลา (ก.) 10 ชั่วโมง (ข.) 20 ชั่วโมง (ค.) 30 ชั่วโมง (ง.) 40 ชั่วโมง



รูปที่ 4.31 รูปถ่ายจาก SEM ของรอยแตกจากการทดสอบแรงดึงที่กำลังขยาย 70 เท่า แสดงการกระจายตัวของเฟสเสริมแรงในชิ้นงาน



รูปที่ 4.32 รูปถ่ายจาก SEM ของเฟสเสริมแรงในรอยแตกของชิ้นงานจากการทดสอบแรงดึงที่กำลังขยาย 1,500 เท่า แสดงความต่อเนื่องกันของเฟสเสริมแรงกับเนื้อพื้น

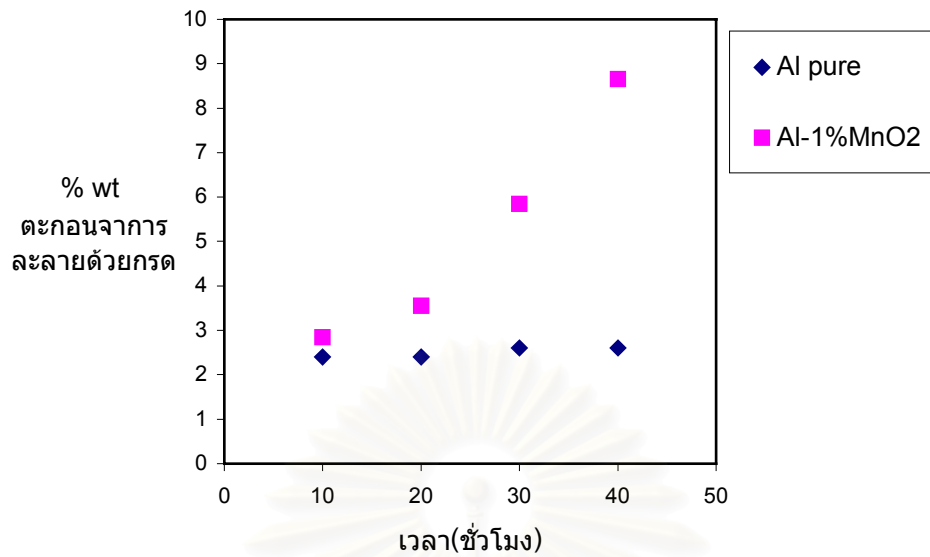


Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	15.61	23.93
Al K	ED	82.97	75.43
Mn K	ED	1.42	0.63
Total		100.00	100.00

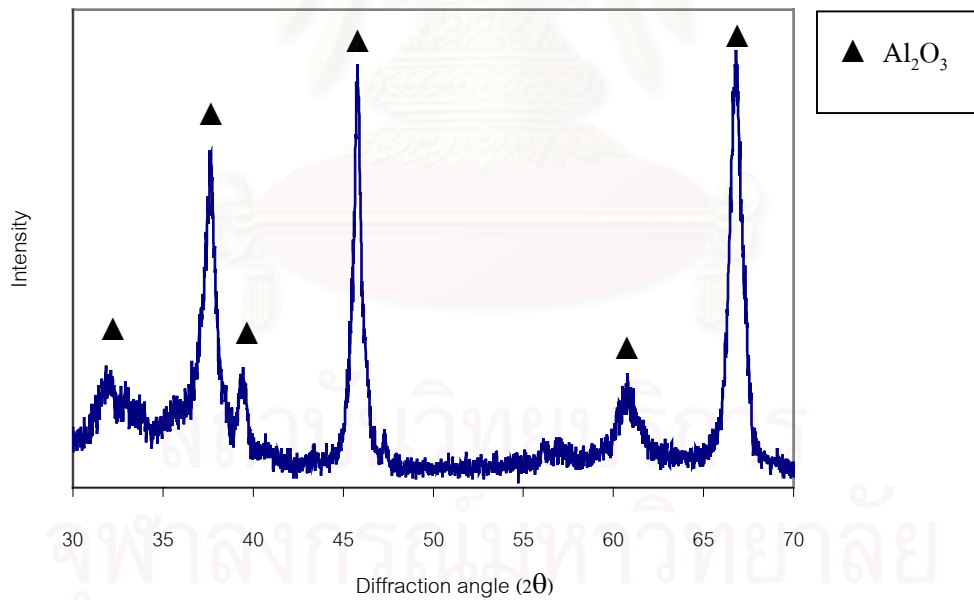
รูปที่ 4.33 รูปถ่ายจาก SEM ของเฟสเสริมแรงในรอยแตกของชิ้นงานจากการทดสอบแรงดึงที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และผลการตรวจสอบด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS ที่เฟสเสริมแรง

4.3.3 การตรวจสอบหาอะลูมินาโดยใช้วิธีละลายในกรด

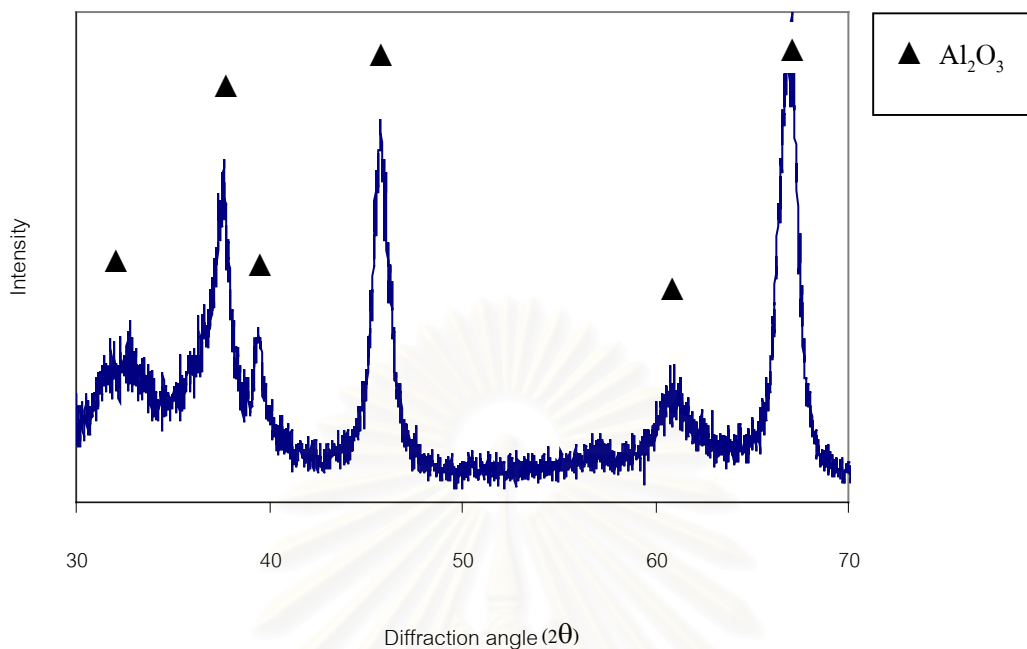
ในการตรวจสอบจะใช้ชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการอบให้ความร้อนโดยเป็นชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการตีขึ้นรูปร้อน ในรูปที่ 4.34 แสดงน้ำหนักของตะกอนที่ได้มาจากการละลายด้วยกรดเกลือของชิ้นงาน Al บริสุทธิ์และ Al-1atom%MnO₂ ที่ทำการอัดขึ้นรูปและอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 10 , 20 , 30 และ 40 ชั่วโมง รูปที่ 4.35 แสดงผลของการตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD ของตะกอนที่ได้จากการละลายด้วยกรดของชิ้นงาน Al-1atom%MnO₂ ที่อบที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง รูปที่ 4.36 แสดงผลของการตรวจสอบด้วย XRD ของตะกอนที่ได้จากการละลายด้วยกรดของชิ้นงาน Al-บริสุทธิ์ ที่อบที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของตะกอนที่ได้มาจากการละลายด้วยกรดกับเวลาที่ใช้ในการอบให้ความร้อนของ Al บริสุทธิ์และ Al-1atom%MnO₂ ที่อุณหภูมิ 650°C



รูปที่ 4.35 ผลของการตรวจสอบธาตุด้วยเครื่อง XRD ของตะกอนที่ได้จากการละลายด้วยกรดของชิ้นงาน Al-1atom%MnO₂ ที่อบที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง



รูปที่ 4.36 ผลของการตรวจสอบธาตุด้วยเครื่อง XRD ของตะกอนที่ได้จากการละลายด้วยกรดของชิ้นงานอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่อบที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง

4.3.4 การวัดความแข็ง

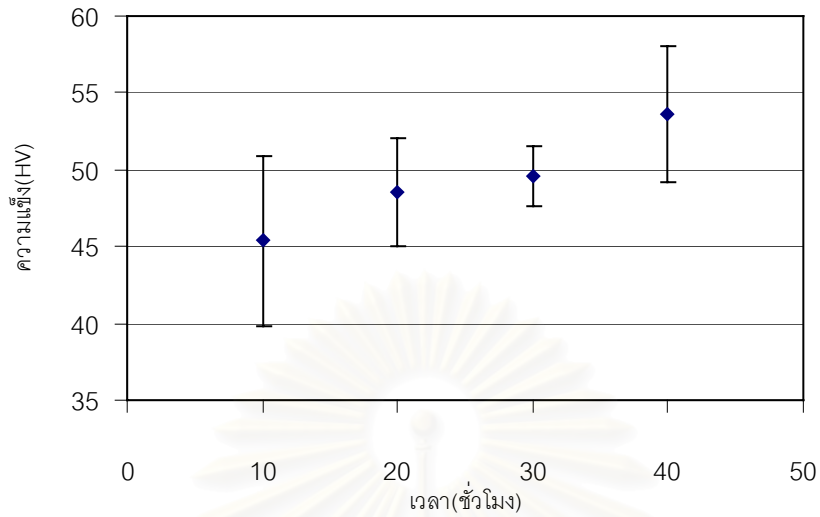
การวัดความแข็งเพื่อตรวจสอบความแข็งของชิ้นงาน ที่ทำการทดลองเมื่อใช้เวลาในการอบให้ความร้อนต่างกันผลแสดงในตารางที่ 4.11 และความแข็งของชิ้นงานที่ทำการทดลองโดยใช้ความดันอัดต่างกันที่อุณหภูมิ 600°C และ 650°C ผลแสดงในตารางที่ 4.12 โดยรูปที่ 4.37 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างเวลาในการอบให้ความร้อนกับความแข็งที่ได้ และรูปที่ 4.38 แสดงการเปรียบเทียบความแข็งที่ได้เมื่อความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนต่างกันที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนต่างกัน

ตารางที่ 4.11 ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานอบให้ความร้อน 600°C แรงดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อน 660 MPa ส่วนผสม Al-1atom%MnO₂

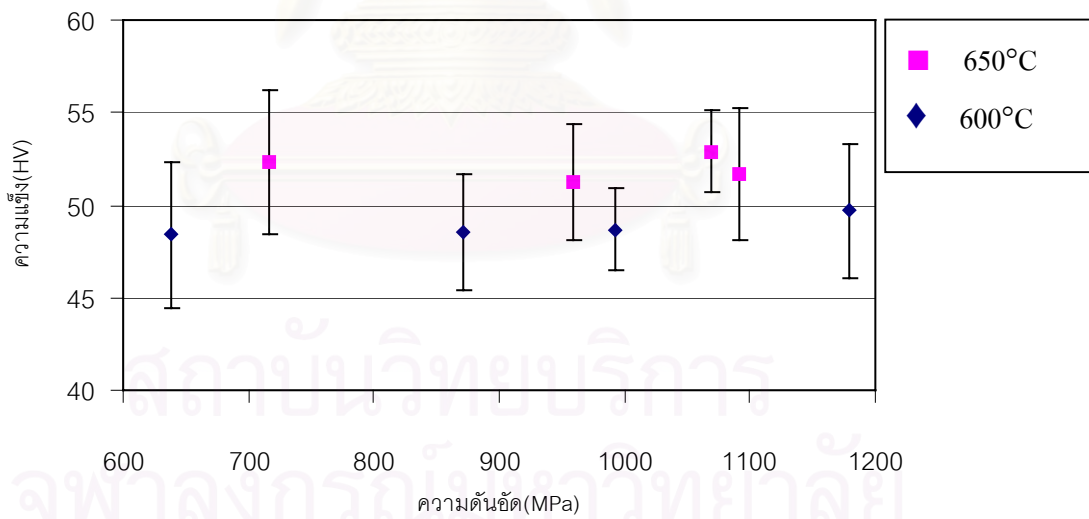
ชิ้นงาน	เวลาในการอบให้ความร้อน (ชั่วโมง)	HV _{50g}
1	10	45.37
2	20	48.49
3	30	49.57
4	40	53.61

ตารางที่ 4.12 ผลการวัดความแข็งของชิ้นงานอบให้ความร้อน 600°C และ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ส่วนผสม Al-1atom%MnO₂ แรงดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนต่างกัน

ชิ้นงาน	อุณหภูมิการอบให้ความร้อน (°C)	ความดันอัด (MPa)	HV _{50g}
1	600°C	639	48.39
2		871	48.53
3		992	48.66
4		1179	49.96
1	650°C	716	52.33
2		959	51.21
3		1069	52.88
4		1091	51.70



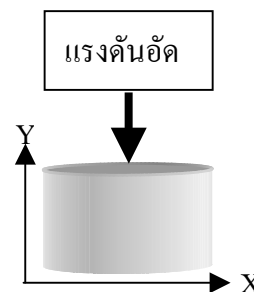
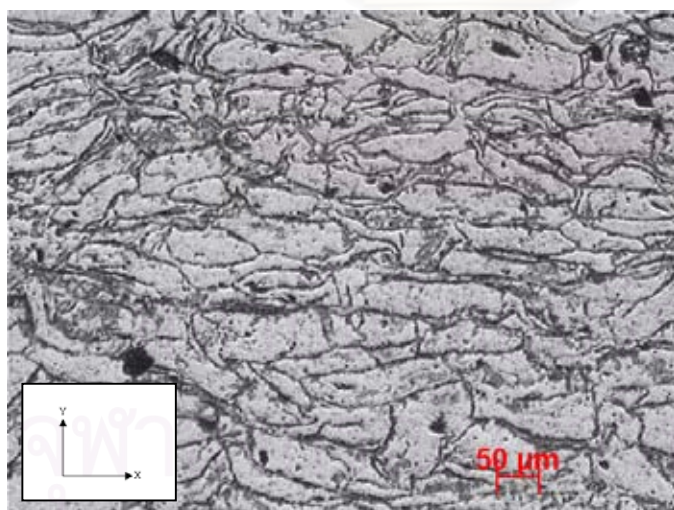
รูปที่ 4.37 ผลของเวลาที่ใช้ในการอบให้ความร้อนที่มีต่อความแข็งของชิ้นงาน Al-1atom%MnO₂ ที่ทำการตีขึ้นรูปร้อนที่ความดันอัด 660 MPa



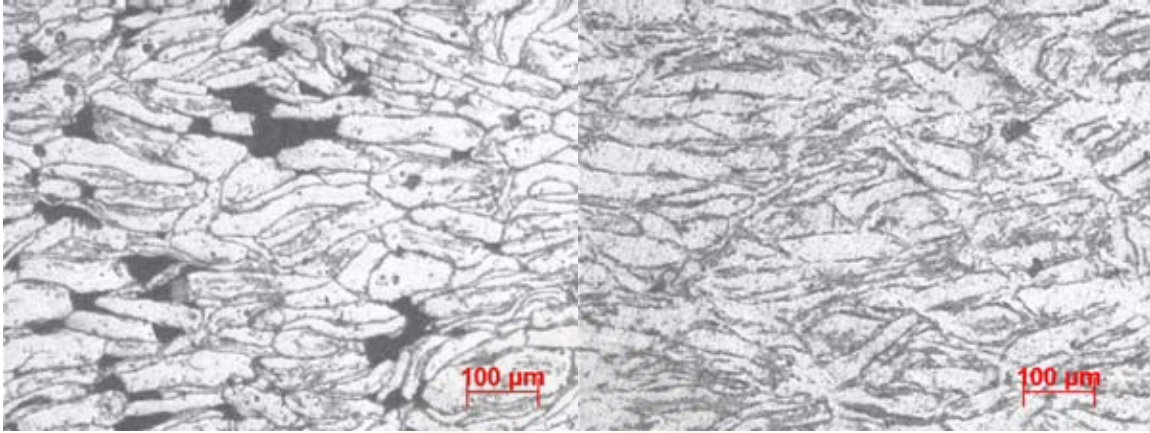
รูปที่ 4.38 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบให้ความร้อน และความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนที่มีต่อความแข็งของชิ้นงาน Al-1atom%MnO₂ โดยใช้เวลาอบให้ความร้อน 30 ชั่วโมง

4.3.5 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

การตรวจสอบโครงสร้างโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แสงใช้เพื่อตรวจสอบโครงสร้างแบบมหภาคของชิ้นงานในรูป 4.39-4.41 และการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย SEM เพื่อตรวจสอบหาเฟสอะลูมินาเสริมแรงด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS ในรูป 4.42-4.46 และการตรวจสอบเฟสด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS แบบ linescan ในรูปที่ 4.47-4.48 รูปที่ 4.39 แสดงลักษณะรูปร่างของเกรนของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อน และทิศทางการตีขึ้นรูปร้อน รูปที่ 4.40 เป็นการเปรียบเทียบโครงสร้างโดยรวมของชิ้นงานอัดขึ้นรูปกับชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อน รูปที่ 4.41 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างโดยรวมของชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่เวลาต่างกัน รูปที่ 4.42, 4.43, 4.44 และ 4.46 แสดงเฟสที่พบและผลการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ในรูปที่ 4.45 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบโดยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง และในรูปที่ 4.47-4.48 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคโดยใช้การวิเคราะห์แบบ linescan ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง และชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง



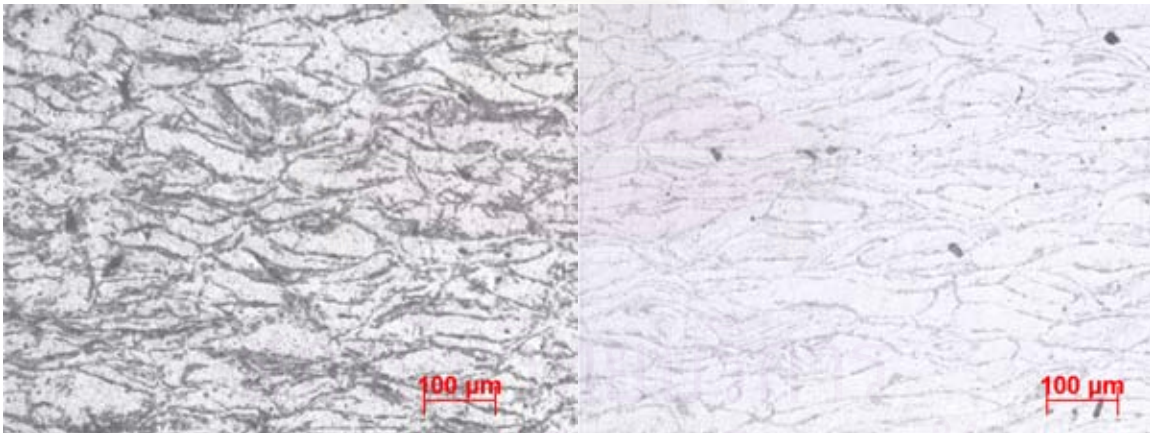
รูปที่ 4.39 โครงสร้างที่กำดั่งขยาย 50 เท่าจากกล้องจุลทรรศน์แสง แสดงโครงสร้างโดยรวม และรูปร่างของเกรนของชิ้นงาน ที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง



(ก.)

(ข.)

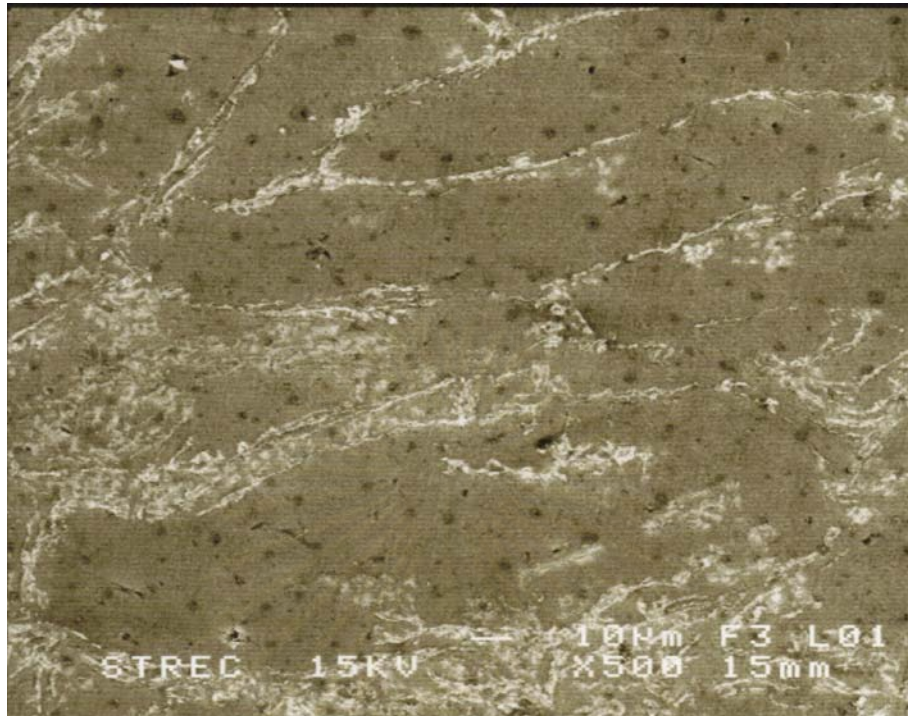
รูปที่ 4.40 โครงสร้างโดยรวมที่กำลังขยาย 50 เท่าจากกล้องจุลทรรศน์แสง แสดงโครงสร้างโดยรวมของชิ้นงาน ที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง โดย (ก.) เป็นชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูปจากนั้นจึงนำไปอบให้ความร้อน (ข.) เป็นชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป, อบให้ความร้อน และตีขึ้นรูปร้อน



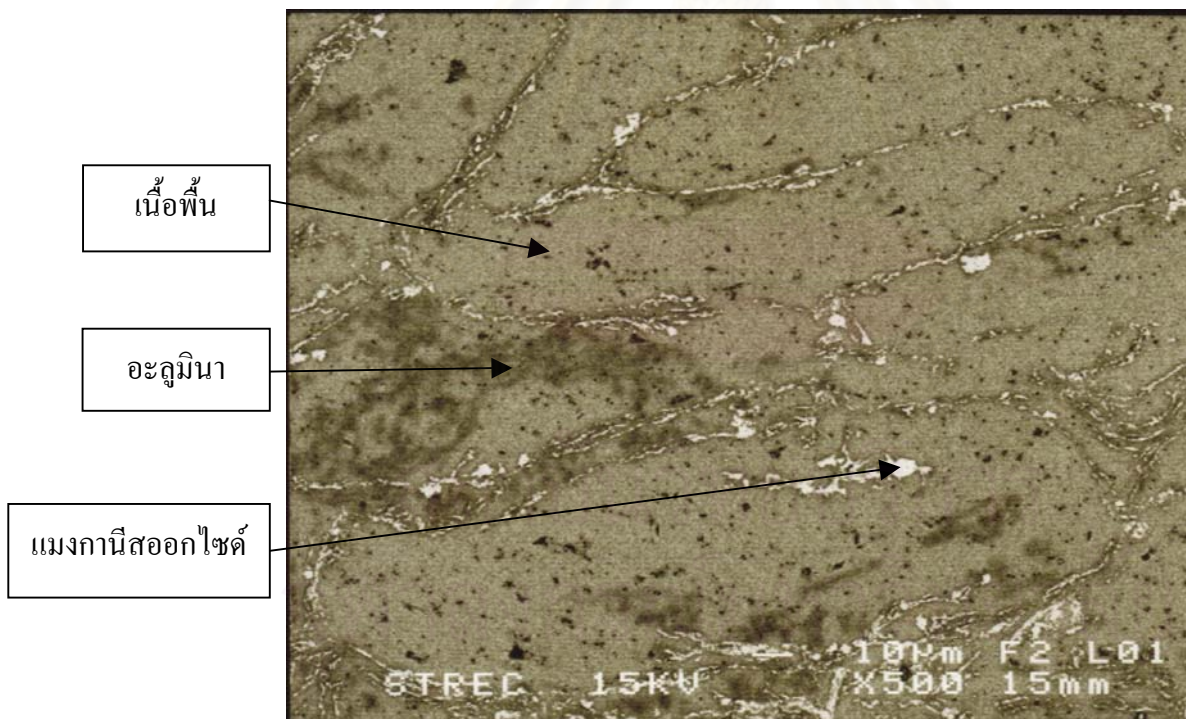
(ก.)

(ข.)

รูปที่ 4.41 โครงสร้างโดยรวมที่กำลังขยาย 50 เท่าจากกล้องจุลทรรศน์แสง แสดงโครงสร้างโดยรวมของชิ้นงาน ที่ทำการตีขึ้นรูปร้อนและอบให้ความร้อนที่ 650°C โดย (ก.) เป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนเป็นเวลา 30 ชั่วโมง (ข.) เป็นชิ้นงานที่ผ่านการอบให้ความร้อนเป็นเวลา 40 ชั่วโมง

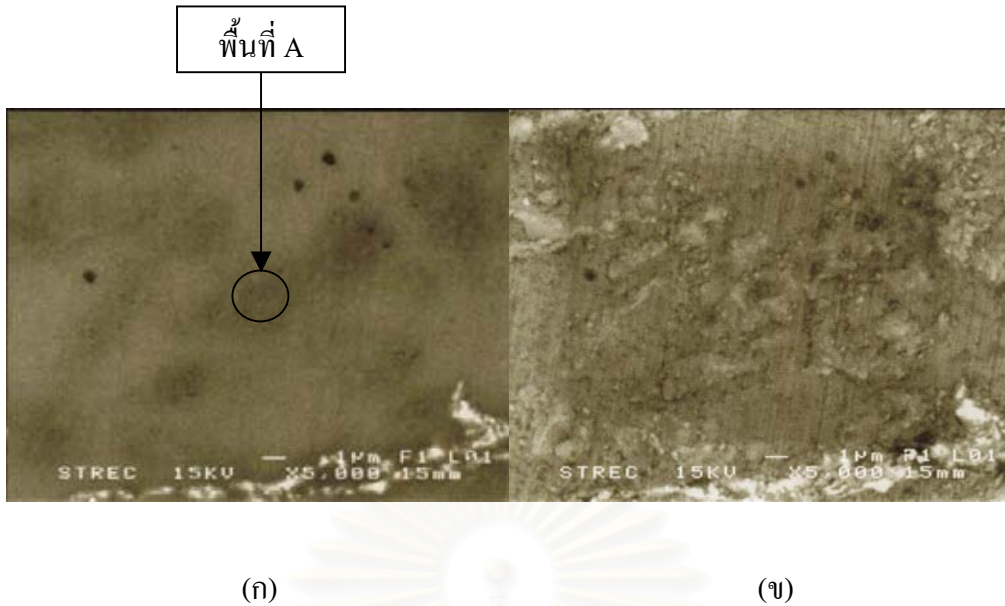


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.42 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงโครงสร้างที่กำลังขยาย 500 เท่าแสดงเฟสที่พบในชิ้นงาน (ก) ภาพแบบ Secondary electron image (ข) ภาพแบบ Backscatter electron image ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง

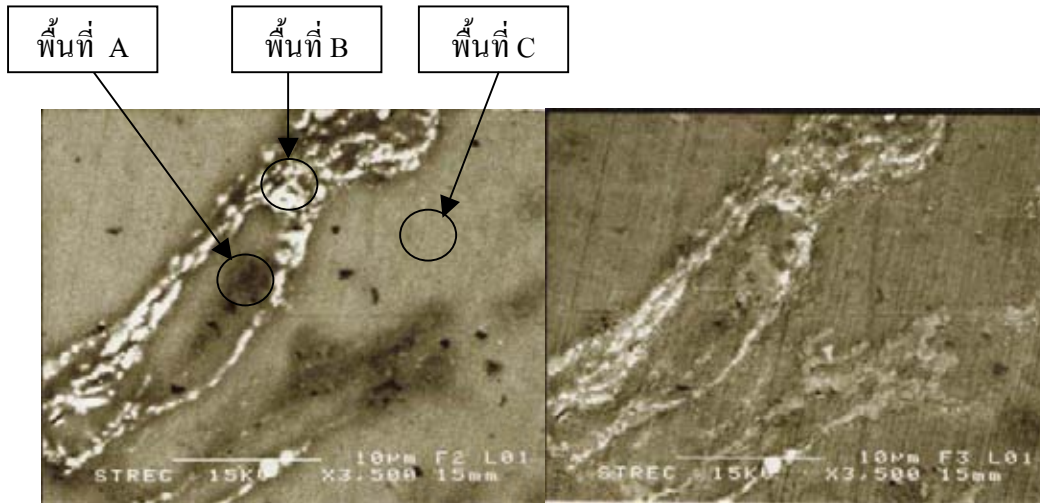


Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	17.22	25.99
Al K	ED	82.60	73.93
Mn K	ED	0.18*	0.08*
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

รูปที่ 4.43 ภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่าของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง แสดงกลุ่มอะลูมินา และผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ A (ก) เป็นภาพแบบ Backscattered electron image และ (ข) เป็นภาพแบบ Secondary electron image

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	21.41	31.48
Al K	ED	78.59	68.52
Total		100.00	100.00

(ข)

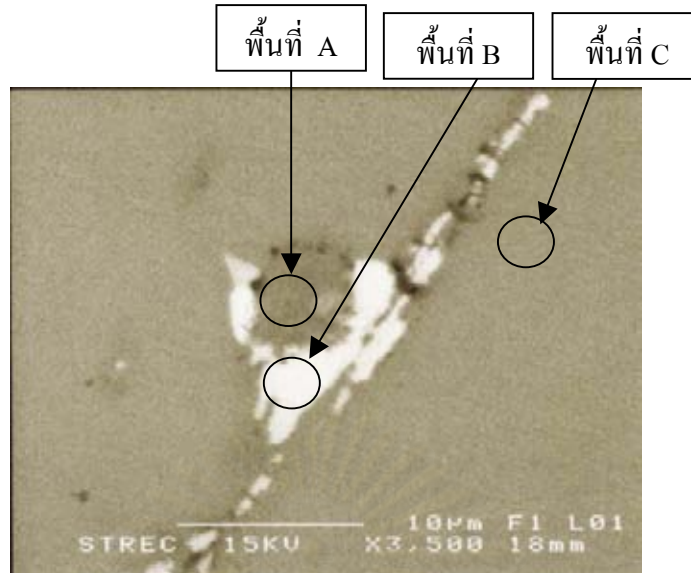
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	29.89	42.43
Al K	ED	66.72	56.17
Mn K	ED	3.39	1.40
Total		100.00	100.00

(ง)

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	3.64	6.00
Al K	ED	96.31	93.98
Mn K	ED	0.04*	0.02*
Total		100.00	100.00

(จ)

รูปที่ 4.44 ภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง แสดงกลุ่มอะลูมินาและกลุ่มของอะลูมินาปนอยู่กับแมงกานีส ออกไซด์ (ก) เป็นภาพแบบ Backscattered electron image และ (ข) เป็นภาพแบบ Secondary electron image (ค) ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ A (ง) ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ B (จ) ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ C



(ก)

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	28.00	39.97
Al K	ED	69.91	59.16
Mn K	ED	2.08	0.87
Total		100.00	100.00

(ข)

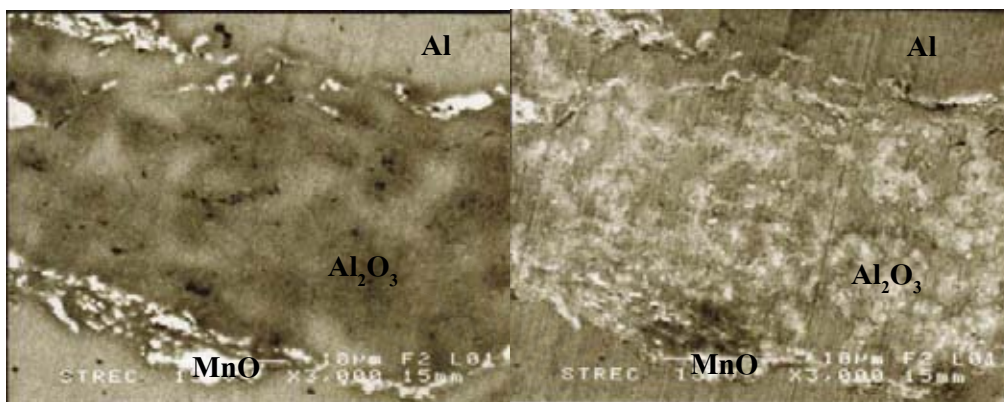
Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	3.25	5.78
Al K	ED	81.97	86.55
Mn K	ED	14.79	7.67
Total		100.00	100.00

(ค)

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	4.40	7.24
Al K	ED	94.70	92.34
Mn K	ED	0.90	0.43
Total		100.00	100.00

(ง)

รูปที่ 4.45 ภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 35,00 เท่า ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง แสดงเฟสและผลการตรวจสอบด้วย EDS (ก) เป็นภาพแบบ Backscattered electron image (ข) ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ A (ค) ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ B (ง) ผลจากการวิเคราะห์ธาตุด้วย EDS ที่พื้นที่ C

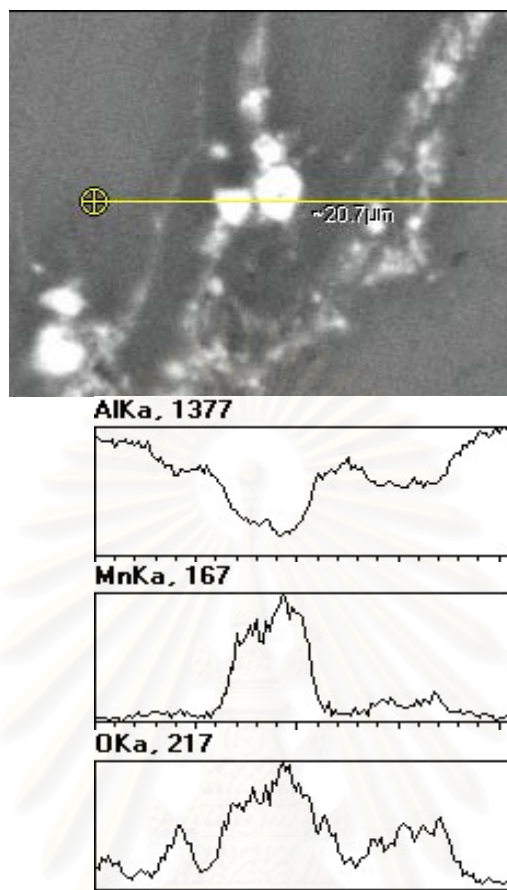


(ก)

(ข)

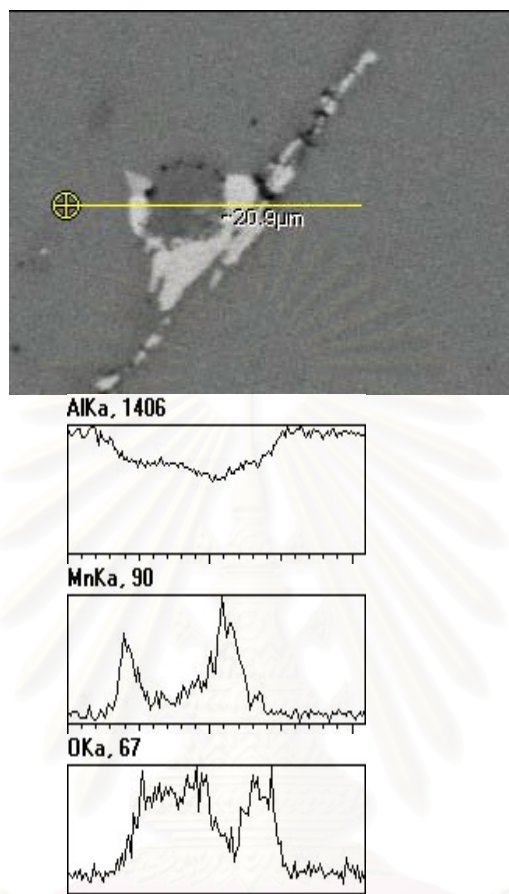
รูปที่ 4.46 ภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง แสดงกลุ่มอะลูมินา, แมงกานีสออกไซด์ และเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (ก) เป็นภาพแบบ Backscattered electron image และ (ข) เป็นภาพแบบ Secondary electron image

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.47 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยการวิเคราะห์แบบ linescan ของชิ้นงานที่ทำกา
รอบให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง แสดงการเปรียบเทียบปริมาณของธาตุที่
เฟสต่างกันตามแนวของเส้นตรงที่ลากผ่าน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.48 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยการวิเคราะห์แบบ linescan ของชิ้นงานที่ทำกา
 ropicให้ความร้อนที่ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง แสดงการเปรียบเทียบปริมาณของธาตุที่
 เฟสต่างกันตามแนวของเส้นตรงที่ลากผ่าน

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 การผสมผง

ผงตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วย DTA ตามรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าจุดหลอมเหลวที่ได้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของผงบริสุทธิ์ เนื่องจากความไม่บริสุทธิ์ของผงที่ใช้ในการทดลองโดยผงอะลูมิเนียมที่ใช้มีจุดหลอมเหลว 656.5°C โดยต่ำกว่าจากจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ 3.5°C และผงแมงกานีสไดออกไซด์มีจุดหลอมเหลว 524.3°C โดยต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของผงแมงกานีสไดออกไซด์บริสุทธิ์ 10.7°C ลักษณะรูปร่างของของผงทั้งสองชนิดตามรูปที่ 4.3 และ 4.4 มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยผงส่วนใหญ่มีลักษณะรูปร่างกลมและจะมีผงที่มีลักษณะรูปร่างอื่นปะปนอยู่

ในขั้นตอนการผสมผงทั้งสองวิธีเมื่อดูการลักษณะภายนอกของผงที่ผสมจากรูปที่ 4.5 จะพบว่าผงจากการผสมด้วยเครื่อง rocking mill มีความแวววาวของอะลูมิเนียม เนื่องในการผสมผงถูกกระทำด้วยแรงจากลูกบิดทำให้ผงอะลูมิเนียม และผงแมงกานีสไดออกไซด์เกิดการเสีรูปร่างหรือแตกหัก ทำให้ขนาดของผงมีความแตกต่างกันมากขึ้น หรือช่วงขนาดของผงกว้างขึ้น ดังนั้นการผสมด้วยเครื่อง rocking mill ทำให้ผงที่ได้มีความเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าผงที่ผสมจากวิธีการผสมแบบสุมด้วยการคน เมื่อนำผงจากการผสมทั้งสองวิธีไปวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนจากผลการทดลองในรูปที่ 4.6 เป็นผงที่ผสมโดยการคน และรูปที่ 4.19 เป็นผงที่ผสมโดยวิธี rocking mill แล้วพบว่าผงจากการผสมด้วยเครื่อง rocking mill แสดงปฏิกิริยาทางความร้อนที่รุนแรงกว่าโดยในรูปที่ 4.19 จะพบว่ามีสองช่วงที่เกิดปฏิกิริยาคายความร้อนอย่างรุนแรงคือที่อุณหภูมิ 190°C ถึง 250°C และที่อุณหภูมิ 560°C ถึง 650°C ซึ่งเป็นผลให้ขั้นตอนในการอบให้ความร้อนของการทดลองกลุ่มที่สองเกิดการระเบิดของชิ้นงาน ระหว่างการอบที่อุณหภูมิ 190°C ถึง 250°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาเคมีอย่างรุนแรงจากผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนน่าจะเกิดจากการปล่อยแก๊สออกซิเจนอย่างรวดเร็ว และมีปริมาณมากทำให้เกิดแรงดันภายในชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการระเบิด จากผลการตรวจสอบด้วย XRD ในรูปที่ 4.20 เมื่อเทียบกับผลการทดสอบในรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าการผสมด้วยเครื่อง rocking mill ส่งผลให้ความสามารถในการแตกตัวของแมงกานีสไดออกไซด์เกิดได้ดีกว่าการผสมโดยการคนด้วย

ซ็อนสเดนเลส ดังนั้นวิธีการผสมผงด้วยเครื่อง rocking mill จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่จะก่อให้เกิดเฟสเสริมแรงตามปฏิกิริยาเคมีในหัวข้อที่ 2.10

5.2 การอัดขึ้นรูป

ในการอัดขึ้นรูปในการทดลองกลุ่มที่หนึ่ง ซึ่งใช้เครื่อง servo motor screw press ในการอัดขึ้นรูป โดยมีแม่พิมพ์ขนาด 33 มิลลิเมตร และใช้ส่วนผสม 5atom% ,10atom% และ 15atom% MnO_2 ในการทดลอง พบว่าในการผลิตชิ้นงานดีขึ้นรูปร้อนนั้นมีความยุ่งยากเนื่องจากเมื่อเราทำการอัดขึ้นรูปแล้วเราต้องเปลี่ยนแม่พิมพ์เป็นแม่พิมพ์ในการตีขึ้นรูปร้อนซึ่งการเปลี่ยนต้องใช้เวลาเนื่องจากทั้งสองแม่พิมพ์มีขนาดใหญ่ ปัญหาอีกข้อคือขนาดของแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปและแม่พิมพ์ตีขึ้นรูปร้อนมีขนาดใกล้เคียงกันทำให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการตีขึ้นรูปร้อนเนื่องจากก่อนการตีขึ้นรูปร้อนจะมีการอบให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนทำการตีขึ้นรูปร้อน ซึ่งทำให้เมื่อนำชิ้นงานไปใส่ลงในแม่พิมพ์ตีขึ้นรูปร้อนทำได้ยากขึ้นจากผลการขยายตัวจากความร้อน และด้วยขนาดที่ใกล้เคียงกันทำให้การเปลี่ยนรูป(plastic deformation) ของชิ้นงานมีปริมาณน้อยซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน และปัญหาอีกข้อหนึ่งคือปริมาณผงที่ใช้ต่อชิ้นค่อนข้างสิ้นเปลืองจากผลของแม่พิมพ์ที่มีขนาดใหญ่ และจากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 พบว่าส่วนผสมมีผลต่อความหนาแน่นของชิ้นงานที่ได้อย่างมากโดยที่ส่วนผสมมากขึ้นจะทำให้ความสามารถในการอัดขึ้นรูปลดลง เนื่องมาจากความไม่บริสุทธิ์ของชิ้นงานมีมากขึ้น เช่น จากตารางที่ 4.1 ชิ้นงานที่ 1 ทำการอัดด้วยความดันอัด 608 MPa มีความหนาแน่นสัมพัทธ์ 94% ซึ่งมากกว่าชิ้นที่ 9 ที่ใช้ความดันอัด 866 MPa แต่ได้ความหนาแน่นสัมพัทธ์เพียง 84.4%

ในการทดลองในกลุ่มที่สองได้มีการปรับเปลี่ยนจากการทดลองในกลุ่มที่หนึ่งคือมีการเปลี่ยนแม่พิมพ์เป็นขนาด 30 มิลลิเมตรและทำการอัดโดยใช้เครื่อง hydraulic press ซึ่งทำให้การทดลองมีความคล่องตัวขึ้น ลดปริมาณผงที่ใช้ การตีขึ้นรูปร้อนทำได้ง่ายขึ้นและเพิ่มปริมาณในการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในการตีขึ้นรูปร้อน และเปลี่ยนส่วนผสมเป็น 1atom% MnO_2 เพื่อทำให้ความสามารถในการอัดขึ้นรูปเพิ่มขึ้น และทำให้เราสามารถนำชิ้นงานที่ผลิตได้ไปเปรียบเทียบกับงานของ Abdulhaqq A. Hamid และคณะ[25]ได้ซึ่งเป็นงานที่ใช้ส่วนผสมเดียวกันต่างกันที่กระบวนการในการผลิต ซึ่งใช้วิธีการผลิตวัสดุผสมแบบเฟสของเหลว แต่จากปัญหาการเกิดระเบิดของชิ้นงานในระหว่างขั้นตอนการอบให้ความร้อนดังแสดงในรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.4 เนื่องการผสมผงด้วย rocking mill ทำให้ความสามารถในการแตกตัวของแมงกานีสออกไซด์ให้ออกซิเจนเกิดได้ดีขึ้น ทำให้ต้องจำกัดความหนาแน่นสัมพัทธ์

ของชิ้นงานในการอัดขึ้นรูปไว้ที่ไม่เกิน 90% โดยในการทดลองจริงจะได้ความหนาแน่นสัมพัทธ์อยู่ที่ 84%-88% โดยใช้ความดันอัดในการอัดขึ้นรูป 142 MPa

5.3 การอบให้ความร้อน

ขั้นตอนการอบให้ความร้อนเป็นขั้นตอนที่เพิ่มเข้ามาในการทดลองกลุ่มที่สองเนื่องมาจากต้องการเพิ่มสมบัติของชิ้นงานให้ดีขึ้น และมีจุดประสงค์เพื่อให้เป็นขั้นตอนในการเพิ่มความสามารถในการแตกตัวของแมงกานีสไดออกไซด์ ซึ่งจะส่งผลให้สร้างอะลูมินาเสริมแรงมีโอกาสเกิดได้มากขึ้น โดยจากผลการทดสอบแรงดึงในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งพบว่าค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ได้มีค่าต่ำมาก จากผลของการตรวจสอบด้วย XRD ในรูปที่ 4.15 พบว่าในชิ้นงานยังไม่มีเกิดการเกิดของอะลูมินาเสริมแรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งพบว่าการแตกตัวให้ออกซิเจนของแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) นั้นแตกตัวเป็น bixbyite (Mn_2O_3) เป็นการแตกตัวที่ไม่สมบูรณ์อาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลให้การเกิดอะลูมินามีโอกาสน้อยลงในการตรวจสอบขั้นต่อไปจึงทดลองนำเอาชิ้นงานที่ 8 นี้มาทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C , 550°C และ 600°C เพื่อตรวจสอบหาการแตกตัวของแมงกานีสไดออกไซด์ว่าที่อุณหภูมิใดจะมีการแตกตัวได้มากที่สุดโดยใช้เวลาในการอบเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมง จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาทำการขัดผิวให้มีความเรียบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 แล้วจึงนำไปทดสอบด้วย XRD ผลที่แสดงในรูปที่ 4.16-4.18 จากผล XRD ในรูปที่ 4.18 พบว่าชิ้นงานมีส่วนประกอบของอะลูมินเนียม, bixbyite (Mn_2O_3) และ hausmannite (Mn_3O_4) ประกอบอยู่ แสดงว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 600°C แมงกานีสไดออกไซด์สามารถแตกตัวให้ออกซิเจนได้ดีขึ้น ซึ่งเมื่อดูผลจากการตรวจสอบคุณลักษณะทางความร้อนของผงที่ผสมโดยเครื่อง rocking mill ในรูปที่ 4.19 พบว่าช่วงอุณหภูมิที่มีการเกิดปฏิกิริยาคายความร้อนที่รุนแรงคือที่ช่วงอุณหภูมิ 190°C ถึง 250°C และช่วงอุณหภูมิ 560°C ถึง 650°C

ดังนั้นในการทดลองในกลุ่มการทดลองที่สองจึงได้ทำการอบให้ความร้อนชิ้นงานที่อุณหภูมิ 600°C และ 650°C โดยใช้เวลาในการอบให้ความร้อนยาวนานที่ 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง ในตารางที่ 4.5 แสดงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นงานอะลูมินเนียมบริสุทธิ์ และ 1atom%MnO₂ หลังทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานอะลูมินเนียมบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น 0.5% โดยน้ำหนัก แสดงว่าอะลูมินาที่เกิดขึ้นเกิดจากบรรยากาศในเตาอบ และชิ้นงาน 1atom%MnO₂ พบว่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นประมาณ 2% โดยน้ำหนัก แสดงว่าการเติมแมงกานีสไดออกไซด์มีผลให้เกิดอะลูมินาเสริมแรงขึ้น 1.5% โดยน้ำหนัก จากรูปที่ 4.22 ซึ่งเป็นผลการตรวจสอบชิ้นงานด้วย XRD โดยเป็น

ชิ้นงานที่ทำการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เป็นระยะเวลา 10, 20, 30 และ 40 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 650°C เป็นระยะเวลา 40 ชั่วโมง พบว่าประกอบไปด้วย อะลูมิเนียม, manganosite (MnO) และสารประกอบโลหะ MnAl₆ โดยเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิพบว่าที่ 650°C มีปริมาณ MnO น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 600°C ดูได้จากความสูงของยอดคลื่นที่ 41 องศา ที่ต่ำกว่า สำหรับเวลาที่ใช้ในการอบให้ความร้อนที่ต่างกันที่อุณหภูมิ 600°C จากรูปพบว่าความสูงของยอดคลื่นที่ได้มีความใกล้เคียงกันแสดงว่ามีปริมาณแตกต่างกันน้อย และความสูงของคลื่นของสารประกอบโลหะ MnAl₆ เมื่อดูที่ยอดคลื่นที่ 44 องศา พบว่ามีความสูงที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการอบให้ความร้อนที่เวลานานขึ้น แสดงว่าปริมาณการเกิด MnAl₆ มีมากขึ้น แสดงว่าการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า และเวลานานกว่าทำให้การแตกตัวของ MnO เพิ่มขึ้นทำให้ MnO มีปริมาณลดลง และการเกิดสารประกอบโลหะ MnAl₆ เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากได้รับแมงกานีสจากการแตกตัวเพิ่มขึ้นของ MnO จากรูปที่ 4.34 แสดงน้ำหนักของตะกอนที่หลือมาจากการละลายด้วยกรดที่เวลาในการอบให้ความร้อนแตกต่างกัน โดยพบว่าที่เวลาในการอบให้ความร้อนที่มากขึ้นจะมีตะกอนหลือมาจากการละลายด้วยกรดมากขึ้น โดยอะลูมินาที่เกิดขึ้นน่าจะมาจากการแตกตัวของ MnO₂ ทำให้เกิดออกซิเจนทำปฏิกิริยาทางเคมีกับอะลูมิเนียมได้เป็นสารประกอบอะลูมินา โดยมีส่วนน้อยที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างออกซิเจนภายในเตาอบกับอะลูมิเนียมตามที่แสดงในตารางที่ 4.5 เมื่อทำการคำนวณการเกิดอะลูมินาเสริมแรงตามสมการเคมีในหัวข้อ 2.10 พบว่าการเกิดของอะลูมินาจะอยู่ที่ 2.5% โดยน้ำหนัก แต่ปริมาณของตะกอนที่ได้จากการละลายด้วยกรดมีมากถึง 5.85% โดยน้ำหนักเมื่ออบที่เวลา 30 ชั่วโมง และมากถึง 8.65% โดยน้ำหนักเมื่ออบที่ 40 ชั่วโมง ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงกว่าที่คำนวณได้จากปฏิกิริยาเคมี เนื่องมาจากว่าแมงกานีสไดออกไซด์นอกจากจะทำให้เกิดการแตกตัวให้ออกซิเจนแล้วน่าจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยให้ชิ้นงานเกิดอะลูมินาจากบรรยากาศในเตาอบได้ดีขึ้นทำให้น้ำหนักของตะกอนที่ได้จากการละลายด้วยกรดมีมากกว่าที่ได้จากการคำนวณ นอกจากนั้นในการละลายกรดอาจมีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น ซิลิกอนที่ถูกกรดละลายจากบีกเกอร์ที่ใช้เป็นต้น

5.4 การตีขึ้นรูปร้อน

ในการตีขึ้นรูปร้อนจากการทดลองในกลุ่มที่หนึ่งจากตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 พบว่าความหนาแน่นของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อนมีผลมาจากส่วนผสมและแรงที่ใช้ในการตีขึ้นรูปร้อน โดยที่ปริมาณแมงกานีสไดออกไซด์มากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นมีค่าน้อยลง เช่น ในชิ้นงานที่ 2 กับชิ้นงานที่ 7 ในตารางที่ 4.2 ซึ่งความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนใกล้เคียงกัน คือ 838 MPa และ 804 MPa

ตามลำดับต่างกันที่ชั้นที่ 2 มีส่วนผสม 5atom%MnO₂ และชั้นที่ 7 มีส่วนผสม 15atom%MnO₂ พบว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้ต่างกันถึง 5% และจากรูปที่ 4.9 พบว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์จากการอัดขึ้นรูปไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นสัมพัทธ์ในการตีขึ้นรูปร้อน ดูได้จากชั้นงานที่ 4-6 และชั้นงานที่ 7-9 โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้จากการอัดขึ้นรูปของชั้นงานในแต่ละกลุ่มไม่เท่ากัน แต่เมื่อนำมาทำการตีขึ้นรูปร้อนที่ความดันอัดเท่าๆ กันพบว่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ได้มีค่าเท่าๆ กัน

ในการทดลองในกลุ่มที่สองเมื่อเรากำหนดส่วนผสมของชั้นงานไว้ที่ 1atom%MnO₂ พบว่าความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของชั้นงาน โดยความดันอัดในการตีขึ้นรูปที่มากขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นของชั้นงานมากขึ้นตามไปด้วย ตามตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.23 โดยสามารถตีขึ้นรูปร้อนชั้นงานมีความหนาแน่นสูงสุดได้ที่ 2.79 g/cm³ โดยใช้ความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อน 1.93 GPa แต่มีปัญหาเกิดขึ้นเมื่อใช้ความดันอัดสูงคือชั้นงานจะเกิดคืบขนาดใหญ่และยาวขึ้นทำให้การเอาชั้นงานออกจากแม่พิมพ์ทำได้ยากมากขึ้น เสี่ยงต่อการเสียหายของชั้นงาน และอาจทำให้เกิดความเสียหายกับแม่พิมพ์ได้ รวมไปถึงอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ที่ลดลง ดังนั้นในการทดลองจึงใช้ความดันอัดไม่เกิน 1.2 GPa

5.5 การตรวจสอบหาเฟสอะลูมินาด้วย XRD

ในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งการตรวจสอบหาเฟสอะลูมินาจะใช้การตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD โดยตรวจสอบโดยตรงที่ชั้นงานโดยผลการตรวจสอบตามรูปที่ 4.15-4.18 พบว่าตรวจไม่พบอะลูมินาซึ่งสรุปได้สองอย่างคือ อะลูมินาไม่เกิดขึ้นในชั้นงาน หรืออะลูมินาเกิดขึ้นแต่น้อยกว่า 5% โดยน้ำหนัก จึงทำให้การตรวจสอบด้วยเครื่อง XRD หาไม่พบ ดังนั้นในตรวจสอบด้วย XRD จึงใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบการแตกตัวให้ออกซิเจนของแมงกานีสออกไซด์ที่อุณหภูมิ 500°C, 550°C และ 600°C เพื่อนำไปปรับปรุงในการทดลองกลุ่มที่สองจากผลที่ได้พบว่าการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C ขึ้นไปการแตกตัวของแมงกานีสออกไซด์เกิดได้ดีขึ้น

การตรวจสอบอะลูมินาในการทดลองกลุ่มที่สองเป็นการทดลองที่ใช้ส่วนผสมของแมงกานีสออกไซด์น้อยดังนั้นอะลูมินาที่เกิดขึ้นน่าจะมีปริมาณน้อยตามไปด้วยในการตรวจสอบจึงใช้วิธีทางเคมีวิเคราะห์โดยการละลายด้วยกรดเกลือเข้าช่วยเพื่อละลายเอาอะลูมิเนียมและแมงกานีสออกไซด์ออกไปเพื่อทำการตรวจสอบหาอะลูมินาด้วย XRD ได้ง่ายขึ้น เพื่อแก้ปัญหาเมื่อปริมาณของอะลูมินาที่ต่ำ 5%

โดยน้ำหนัก โดยจากรูปที่ 4.35 และ 4.36 แสดงผลการตรวจสอบผงที่ได้จากการละลายด้วยกรดเกลือ จากเครื่อง XRD แสดงการพบเฟสอะลูมินาที่อยู่ในชั้นงาน $1\text{atom}\% \text{MnO}_2$ และ Al บริสุทธิ์ ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปและทำการอบให้ความร้อนที่ 650°C , 40 ชั่วโมง ในรูปที่ 4.34 แสดงน้ำหนักของผงตะกอนที่ได้จากการละลายด้วยกรดโดยเมื่อเวลาในการอบให้ความร้อนนานขึ้นพบว่าตะกอนที่เหลือจากการละลายด้วยกรดเกลือมีมากขึ้นตามไปด้วย

5.6 การทดสอบแรงดึง

ในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งผลการทดสอบแรงดึงจากตารางที่ 4.3 พบว่าค่า ความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ได้มีค่าต่ำมาก เช่น ชั้นงานที่ 4 มีค่าเพียง 4.4 MPa เนื่องมาจากผงในชั้นงานไม่เกิดการประสานกันเป็นผลมาจากเวลาในการอบให้ความร้อนน้อยเกินไป โดยเป็นเพียงการอบให้ความร้อนก่อนทำการตีขึ้นรูปร้อนที่ 600°C เป็นเวลาเพียง 15 นาทีเท่านั้น จากรูปที่ 4.11-4.13 พบว่าสิ่งที่มีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด คือส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์ยิ่งปริมาณมากก็เป็นผลให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดยิ่งต่ำลง เนื่องมาจากการตีขึ้นรูปร้อนมีประสิทธิภาพต่ำลงเมื่อมีส่วนผสมของแมงกานีสไดออกไซด์มากขึ้น ตามที่แสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งแสดงถึงผลของความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่ส่งผลต่อค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด โดยความหนาแน่นสัมพัทธ์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น

ในการทดลองกลุ่มที่สองผลการทดสอบแรงดึงพบว่ามีค่าสูงกว่าชั้นงานในการทดลองกลุ่มที่หนึ่งมาก ตารางที่ 4.7-4.10 แสดงผลการทดสอบแรงดึงในการทดลองกลุ่มที่สอง จากรูปที่ 4.24 แสดงว่าอุณหภูมิในการอบให้ความร้อนมีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด โดยในการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C จะให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่สูงกว่าการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เช่น ในชั้นงานที่ 8 ของตารางที่ 4.7 อบให้ความร้อนที่ 600°C , 30 ชั่วโมง ใช้ความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อน 1.18 GPa ได้ความเค้นแรงดึงสูงสุด 81.61 MPa กับชั้นงานที่ 8 ของตารางที่ 4.8 อบให้ความร้อนที่ 650°C , 30 ชั่วโมง ใช้ความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อน 1.09 GPa ได้ความเค้นแรงดึงสูงสุด 104.74 MPa เนื่องจากปริมาณอะลูมินาเสริมแรงที่มากกว่า และการเชื่อมประสานกันของผงมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จากรูปที่ 4.25-4.27 แสดงผลของความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนมีผลต่อค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด โดยชั้นงานที่ใช้ความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนที่มากขึ้นจะมีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่มากขึ้นด้วย เช่น ในตารางที่ 4.7 ชั้นงานที่ 5 ใช้ความดันอัดในการตีขึ้นรูป 639 MPa ได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 23.54 MPa กับ ชั้นงานที่ 8 ใช้ความดันอัดในการตีขึ้นรูป 1179 MPa ได้ค่าความเค้นแรงดึงสูง

สุด 81.61 MPa ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่มากขึ้นก็มาจากการเปลี่ยนรูปที่มากขึ้น ปริมาณและขนาดของรูพรุนลดลง ความหนาแน่นมากขึ้น จากรูปที่ 4.28 แสดงเวลาในการอบให้ความร้อนมากขึ้นจะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดมากขึ้นตามไปด้วย เช่น ในตารางที่ 4.9 ชิ้นงานที่ 5 อบให้ความร้อน 10 ชั่วโมง ได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 48.67 MPa กับชิ้นงานที่ 8 อบให้ความร้อน 40 ชั่วโมง ได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 83.8 MPa เป็นต้น เนื่องมาจากผลของปริมาณอะลูมินาที่มากขึ้น และการเชื่อมประสานกันของผงที่ดีขึ้นจากเวลาในการอบให้ความร้อนที่มากขึ้น จากรูปที่ 4.29 และ 4.30 แสดงผลของการสลับลำดับขั้นตอนระหว่างการอบให้ความร้อนกับการตีขึ้นรูปรีด โดยทั้งสองรูปแสดงว่าการอบให้ความร้อนก่อนแล้วจึงทำการตีขึ้นรูปรีดจะให้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ต่ำกว่าการตีขึ้นรูปรีดก่อนแล้วจึงค่อยนำไปอบให้ความร้อน เช่น ในตารางที่ 4.9 ระหว่างชิ้นงานที่ 1 กับชิ้นงานที่ 5 โดยพบว่าชิ้นงานที่ 1 ตีขึ้นรูปรีดแล้วจึงอบให้ความร้อนได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 102.9 MPa แต่ชิ้นงานที่ 5 อบให้ความร้อนก่อนแล้วจึงทำการตีขึ้นรูปรีดได้ค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 48.67 เท่านั้น เนื่องมาจากการที่เราตีขึ้นรูปรีดก่อนจะทำให้ความหนาแน่นสูงส่งผลให้เมื่อนำมาอบให้ความร้อนทำให้การเกิดปฏิกิริยาทางความร้อนเกิดได้ดีขึ้นเนื่องมาจากผิวสัมผัสระหว่างเฟสที่เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกันที่มากขึ้นเมื่อรูพรุนลดลง

ความเค้นแรงดึงสูงสุดของชิ้นงานที่ได้มีผลมาจากการเกิดเฟสอะลูมินาเสริมแรงในชิ้นงานมากกว่าที่จะเกิดจากความหนาแน่นของชิ้นงานซึ่งสามารถดูได้จากการเปรียบเทียบความหนาแน่นของชิ้นงานที่ 2 ในตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นชิ้นงานอะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีความหนาแน่น 2.731 g/cm^3 และค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 72 MPa กับชิ้นงานที่ 9 ในตารางที่ 4.10 ซึ่งเป็นชิ้นงาน $1\text{atom}\% \text{MnO}_2$ มีความหนาแน่น 2.729 g/cm^3 และค่าความเค้นแรงดึงสูงสุด 120.66 MPa โดยทั้งสองชิ้นจะเห็นได้ว่ามีความหนาแน่นที่เท่ากันตีขึ้นรูปรีดที่ความดันอัดใกล้เคียงกัน โดยต่างกันที่เฟสเสริมแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจากค่าความเค้นแรงดึงสูงสุดที่ได้พบว่ามีค่าที่ต่างกันมาก ในรูปที่ 4.31 แสดงการกระจายตัวของเฟสเสริมแรงซึ่งพบว่ามีกระจายที่สม่ำเสมอ และเฟสเสริมแรงที่พบแสดงการยึดเหนี่ยวที่ดีกับเนื้อพื่นได้ จากเฟสเสริมแรงที่พบจะอยู่ที่ผิวที่สีดำซึ่งเป็นก้นหลุมของรอยแตก ในรูปที่ 4.32 แสดงความต่อเนื่องของเฟสเสริมแรงกับเนื้อพื่นจากรูปพบว่าเฟสเสริมแรงเหมือนเป็นเนื้อเดียวกันกับเนื้อพื่นเนื่องจากการเกิดเฟสเสริมแรงนั้นเกิดมาจากเนื้อพื่นนั่นเอง รูปที่ 4.33 แสดงการตรวจสอบเฟสเสริมแรงโดยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุ EDS พบว่าเฟสเสริมแรงประกอบไปด้วย อะลูมิเนียม, ออกซิเจน และแมงกานีส โดยปริมาณของแมงกานีสน้อยมากเพียง $0.63\text{atom}\%$ ซึ่งแสดงว่าเฟสที่พบนี้เป็นอะลูมินาเนื่องจากประกอบไปด้วยอะลูมิเนียม $75.43 \text{ atom}\%$ และออกซิเจน $23.93 \text{ atom}\%$

5.7 การวัดความแข็ง

จากตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.37 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานจะอยู่ที่เวลาที่ใช้ในการอบให้ความร้อนเป็นสำคัญ โดยความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนที่มีปริมาณต่างกันก็ไม่ได้ทำให้ชิ้นงานที่ได้มีความแข็งแตกต่างกันมากนัก และจากตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.38 พบว่าที่อุณหภูมิในการอบให้ความร้อนที่ 650°C จะได้ความแข็งของชิ้นงานสูงกว่าการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600°C เนื่องจากความแข็งที่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณของอะลูมินาเสริมแรงที่มีปริมาณต่างกันจากอุณหภูมิและเวลาในการอบให้ความร้อนที่ต่างกัน โดยที่การอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้ปริมาณของอะลูมินาเสริมแรงมากกว่าส่งผลให้ความแข็งที่ได้จะสูงกว่า และการอบให้ความร้อนที่เวลานานกว่าจะทำให้ได้ปริมาณของอะลูมินามากกว่าส่งผลให้ความแข็งที่ได้สูงกว่า

5.8 โครงสร้างจุลภาค

จากรูปที่ 4.39 แสดงลักษณะของเกรนของชิ้นงานที่ 8 ในตารางที่ 4.8 พบว่าลักษณะของเกรนรูปร่างรีเนื่องจากผลของความดันอัดในการตีขึ้นรูปร้อนโดยทิศทางการไหลของเกรนจะตั้งฉากกับทิศทางของความดันอัด รูปที่ 4.40 แสดงลักษณะของโครงสร้างโดยรวมของชิ้นงานที่ผ่านการอัดขึ้นรูป และชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อนพบว่าทิศทางการไหลของเกรนมีลักษณะใกล้เคียงกันทั้งสองแบบแตกต่างกันที่ชิ้นงานอัดขึ้นรูปมีปริมาณรูพรุนที่มากกว่าและมีขนาดที่ใหญ่กว่าซึ่งส่งผลให้เกรนของชิ้นงานที่ผ่านการตีขึ้นรูปร้อนมีความสม่ำเสมอมากกว่า รูปที่ 4.41 แสดงลักษณะของโครงสร้างโดยรวมของชิ้นงานตีขึ้นรูปร้อนที่ผ่านการอบให้ความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกันแต่เวลาในการอบต่างพบว่าชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่เวลานานกว่าจะพบว่าเฟสของแมงกานีสออกไซด์ที่เป็นเส้นสีดำมีความหนาแน่นน้อยกว่าชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่เวลาสั้นกว่าเนื่องจากการอบให้ความร้อนที่เวลานานกว่าแมงกานีสไดออกไซด์จะเกิดการแตกตัวมากกว่าทำให้ขนาดของเฟสแมงกานีสออกไซด์มีขนาดเล็กกว่าต่างกัน รูปที่ 4.42 แสดงรูปจาก SEM ที่กำลังขยาย 500 เท่า จากรูปแบบ backscatter แสดงเฟสอะลูมินาเสริมแรงเป็นกลุ่มสีดำ และเฟสแมงกานีสออกไซด์เป็นกลุ่มสีขาว โดยในภาพแบบ secondary ไม่สามารถแยกเฟสอะลูมินาและแมงกานีสออกไซด์ออกจากกันได้เนื่องจากมีสีที่ใกล้เคียงกันและโดยมากจะอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน ในรูปที่ 4.43, 4.44 และ 4.46 แสดงภาพ SEM แบบ backscatter และ secondary ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า รูปที่ 4.43 แสดงเฟสอะลูมินาและปริมาณธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์

เฟสอะลูมินาด้วย EDS รูปที่ 4.44 แสดงเฟสอะลูมินาและเฟสแมงกานีสออกไซด์ และผลการวิเคราะห์ทั้งสองเฟสด้วย EDS และรูปที่ 4.46 แสดงเฟสทั้งหมดที่พบในชิ้นงานที่ 8 จากตารางที่ 4.8 โดยเป็นชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง รูปที่ 4.45 แสดงภาพจากกล้อง SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่าและผลการวิเคราะห์ธาตุด้วย XRD ของชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง พบว่าเฟสที่พบคล้ายคลึงกันคือประกอบไปด้วยเฟสอะลูมินาเสริมแรง เฟสอะลูมิเนียมเนื้อพื้น และเฟสแมงกานีสออกไซด์ ในรูปที่ 4.47 แสดงภาพ SEM ของโครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 5,000 เท่า และผลการตรวจสอบเฟสด้วย EDS แบบ linescan ของชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 30 ชั่วโมง ซึ่งก็แสดงเฟสที่พบในชิ้นงานโดยเฟสสีดำเป็นเฟสของอะลูมินา เฟสสีขาวเป็นเฟสของแมงกานีสออกไซด์ และเฟสสีเทาเป็นเฟสอะลูมิเนียมเนื้อพื้น ในรูปที่ 4.48 แสดงภาพ SEM ของโครงสร้างจุลภาคที่ กำลังขยาย 5,000 เท่า และผลการตรวจสอบเฟสด้วย EDS แบบ linescan ของชิ้นงานที่อบให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 40 ชั่วโมง ซึ่งก็แสดงเฟสที่พบในชิ้นงาน โดยเฟสสีดำเป็นเฟสของอะลูมินา เฟสสีขาวเป็นเฟสของแมงกานีสออกไซด์ และเฟสสีเทาเป็นเฟสอะลูมิเนียมเนื้อพื้น จากผลการวิเคราะห์ที่พบว่าทุกเฟสแสดงปริมาณของอะลูมิเนียมสูงเนื่องมาจากเฟสของอะลูมินาและเฟสแมงกานีสออกไซด์ถูกขัดทำให้มีความบางมากเมื่อทำการวิเคราะห์ด้วย EDS ทำให้ได้ปริมาณของอะลูมิเนียมที่อยู่ข้างใต้ผิวมาด้วย

จากโครงสร้างจุลภาคพบว่าอะลูมินาเสริมแรงที่เกิดขึ้นจะเกิดปนอยู่ในบริเวณเดียวกันกับเฟสแมงกานีสออกไซด์เสริมที่ตกค้างอยู่ ซึ่งมีบางบริเวณที่แมงกานีสออกไซด์สลายตัวไปหมดจะพบกลุ่มของอะลูมินาอยู่เป็นเฟสเดี่ยว หรือเนื่องมาจากในเวลาขัดเตรียมชิ้นงานชั้นของแมงกานีสออกไซด์ถูกขัดออกไปจึงพบเฟสอะลูมินาที่ไม่ปนอยู่กับเฟสแมงกานีสออกไซด์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง

1. การผลิตวัสดุผสมอะลูมิเนียม-อะลูมินา ด้วยกระบวนการตีขึ้นรูปผงโลหะนั้นสามารถทำได้ โดยต้องมีการอบให้ความร้อนเข้าไปภายหลังการตีขึ้นรูปร้อน เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีสร้างเฟสเสริมแรง
2. การวิเคราะห์คุณลักษณะทางความร้อนของผงอะลูมิเนียมผสมแมงกานีสไดออกไซด์ พบว่ามีสองช่วงอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาทางความร้อนอย่างมาก นอกจากจุดหลอมเหลวของผงอะลูมิเนียมและแมงกานีสไดออกไซด์ คือช่วงแรกที่อุณหภูมิ 190°C - 250°C และช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 560°C - 650°C
3. ความแข็งแรงของชิ้นงานขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในการอบให้ความร้อน เวลาในการอบให้ความร้อน และแรงในการตีขึ้นรูปร้อน ซึ่งทำให้เกิดปริมาณอะลูมินาเสริมแรง และความหนาแน่นที่แตกต่างกัน
4. โครงสร้างมหภาคของชิ้นงานพบว่าลักษณะเกรนเป็นรูปรี โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานพบว่าเฟสอะลูมินาจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมกับเฟสแมงกานีสไดออกไซด์

รายการอ้างอิง

- [1] Cho, J.R., Y.S. Joo, and H.S. Jeong. The Al-powder forging : its finite element analysis. Journal of Materials Processing Technology 111(2001):204-029.
- [2] Park, Jong-Ok., Kil-Jun Kim, Dae-Yong Kang, Young-seog Lee, and Young-Ho Kim. An experimental study on the optimization of powder forging process parameters for an aluminium –alloy piston. Journal of Materials Processing Technology 113(2001):486-492.
- [3] Dashwood, R.J., and G.B. Schaffer. Powder forging of a sintered Al-3.8Cu-1Mg-0.8Si-0.1Sn alloy. Materials Science and Engineering A323(2002):206-212.
- [4] Fukaura, K. In situ preparation of alumina reinforced aluminium matrix composites. Japan Society Powder Powder Metal 44(1997):202-206.
- [5] Davis, J.R. ASM Specialty Handbook : Aluminium and Aluminium Alloys. USA: ASM international, 1996.
- [6] Dieter, George E. Mechanical Metallurgy. Singapore: McGraw-Hill, 1998.
- [7] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ธนบุรี. คณะวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรม. Aluminium Manganese Alloy[Online]. (n.d.). Available from:http://www.aluminiumlearning.com/html/w_3xxx.html [2000]
- [8] Matthews, F.L., and R.D. Rawlings. Composite Materials: Engineering and Science. Great Britain: Chapman&Hall, 1994.
- [9] Schwartz, Mel M. Composite Materials, Volume 2: Processing, Fabrication and Applications. USA: Prentice-Hall Inc, 1996.
- [10] Suresh, S., Mortensen A., and Needleman A. Fundamental of Metal Matrix Composites. USA: Butterworth-Heineman, 1998.

- [11] Gibson, R.F. Principle of Composite Materials Mechanical. Singapore: McGraw-Hill, 1994.
- [12] Porter, D.A., and K.E. Easterling. Phase Transformations in Metals and Alloys. Great Britain: Chapman&Hall, 1997.
- [13] Cayron, Cyril. TEM study of interfacial reactions and precipitation mechanisms in Al₂O₃ short fiber or high volume fraction SiC particle reinforced Al-4Cu-1Mg-0.5Ag Squeeze –cast metal matrix composite. France:Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 2000.
- [14] Tsunekawa, Y., H. Suzuki, and Y. Genma. Application of ultrasonic vibration to in situ MMC process by electromagnetic melt stirring. Materials and Design 22(2001): 467-472.
- [15] Yang, Bin., Guoxiang, and Jishan. Study effect of Ti/C additions on the formation of intermetallic Al₃Ti of situ TiC/Al metal matrix composites. Materials and Design 22(2001):645-650.
- [16] Olszowka-Myalska, A. Microstructural study of the aluminium/nickel aluminide interface formed in a hot-pressed in situ composite. Materials Chemistry and Physics 81(2003):333-335.
- [17] Feng, C.F., and L. Froyen. On the Reaction Mechanism of an Al-TiO-B₂ System For Producing In-Situ (Al₂O₃+TiB₂)/Al Composites. Scripta Materials 39(1998):109-118.
- [18] Tjong, S.C., G.S. Wang, L. Geng, and Y.W. Mai. Low-cycle fatigue behavior of Al-based composites containing in situ TiB₂, Al₂O₃ and Al₃Ti reinforcements. Materials Science and Engineering A 358(2003):99-106.
- [19] Tjong, S.C., G.S. Wang, L. Geng, and Y.W. Mai. Cyclic deformation behavior of in situ aluminum-matrix composites of the system Al-Al₃Ti-TiB₂-Al₂O₃. Composites Science and Technology 64(2004):1971-1980.

- [20] Tjong, S.C., and G.S. Wang. High-cycle fatigue properties of Al-based composites reinforced with in situ TiB_2 and Al_2O_3 particulates. Materials Science and Engineering A 86(2004):48-53.
- [21] Liuzhang, Ouyang, Luo Chengping, Sui Xiandong, Zeng Meiqin, and Zhu Min. Fabrication and microstructure of in-situ Al_2O_3 decomposed from $Al_2(SO_4)_3$ system reinforced aluminum matrix composites. Materials Letters 57(2003):1712-1715.
- [22] Fan, Tongxiang, Di Zhang, Guang Yang, Toshiya Shibayanagi, and Massaki Naka. Fabrication of in situ Al_2O_3/Al composite. Journal of Materials Processing Technology 142(2003):556-561.
- [23] Tee, K.L., L. Lu, and M.O. Lai. Improvement in mechanical properties of in-situ $Al-TiB_2$ composite by incorporation of carbon. Materials Science and Engineering A 47(2003) 227-231.
- [24] Xing, Z.P., J.T. Guo, L.G. Yu, J.Y. Dai, and Z.Q. Hu. Influence of HIP processing on the interface of $NiAl-TiC$ in situ composite. Materials Letters 28(1996)361-363.
- [25] Hamid, Abdulhaqq A., P.K. Ghosh, S.C. Jain, and Subrata Ray. Processing, Microstructure, and Mechanical properties of cast in-situ $Al(Mg,Mn)-Al_2O_3(MnO_2)$ Metal Matrix Composite. Metallurgical and Materials Transaction A 36A(2000):2211-2223.
- [26] He, WenLiang, YongCai Zhang, XiaoXue Zhang, Hao Wang, and Hui Yan. Low temperature preparation of nanocrystalline Mn_2O_3 via ethanal-thermal reduction of MnO_2 . Journal of Crystal Growth 252(2003)285-288.
- [27] Chase, M.W., Jr. JANAF Thermochemical Tables, Third Edition. New York: American Chemical Society, 1985.
- [28] วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา และคณะ. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการดำเนินงานเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- [29] Ragone, David V.. Thermodynamics of Materials Volume 1., New York: John Wiley & Son Inc., 1995.

[30] Moore, J.J. Chemical Metallurgy. New York :Butterworth&Co.(Publishers) Ltd., 1990.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

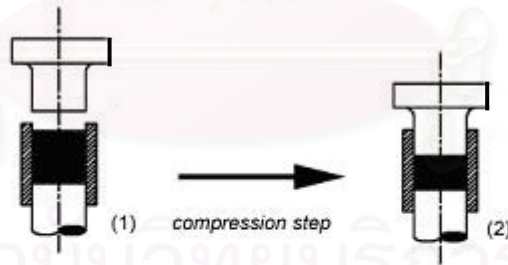
รูปและขั้นตอนการทำงานของเครื่อง servo motor screw press ในการอัดขึ้นรูป



ก)



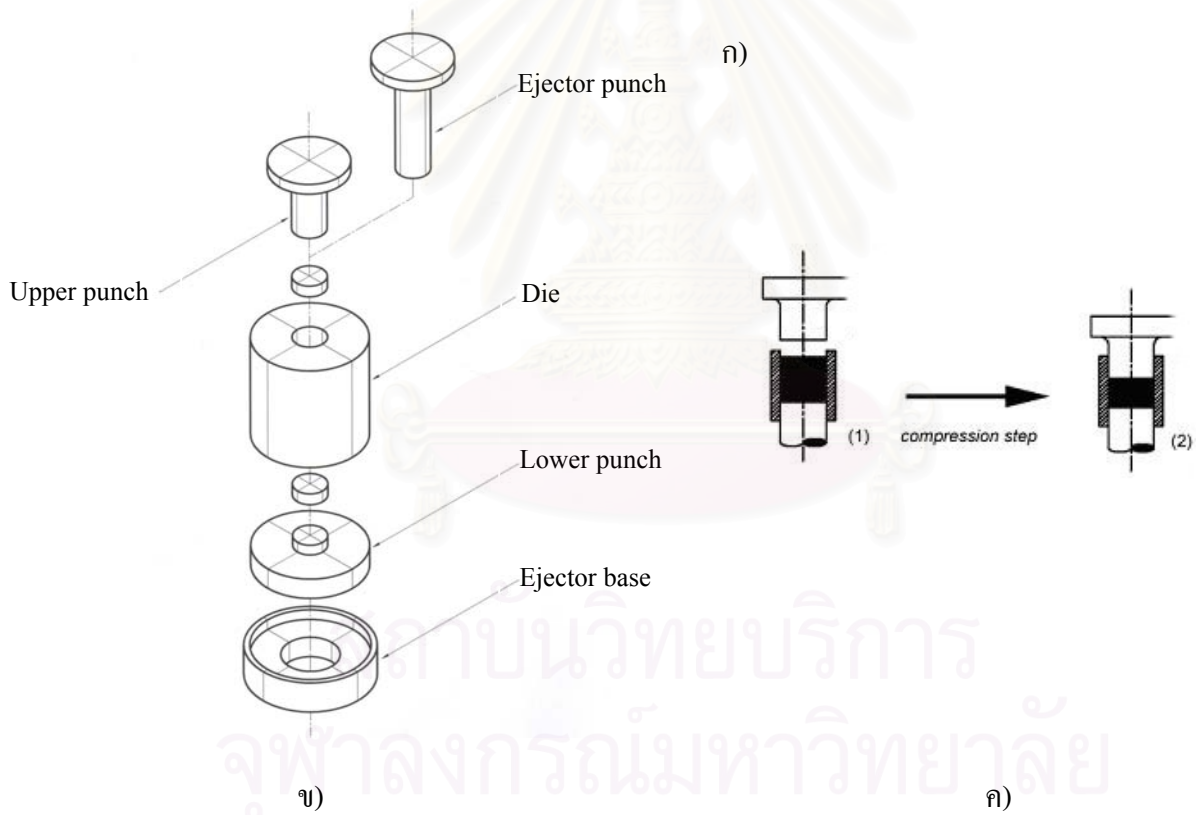
ข)



ค)

รูปที่ ก.1 เครื่อง BMA และขั้นตอนการทำงานของ ก) เครื่อง BMA ข) ชุดพunchและแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 33 มิลลิเมตร ค) ขั้นตอนการทำงาน

รูปและขั้นตอนการทำงานของเครื่อง Hydraulic press ในการอัดขึ้นรูป



รูปที่ ก.2 เครื่อง Hydraulic press และขั้นตอนในการทำงาน ก) เครื่อง Hydraulic press ข) แม่พิมพ์อัดขึ้นรูปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ค) การทำงานของการตีขึ้นรูปร้อน

รูปและขั้นตอนการทำงานของเครื่อง servo motor screw press ในการตีขึ้นรูปรีน



Forging punch

Die

ก)

ข)



ก)

รูปที่ ก.3 เครื่อง servo motor screw press และขั้นตอนในการทำงาน ก) เครื่อง servo motor screw press ข) แม่พิมพ์ตีขึ้นรูปรีน ค) การทำงานของการตีขึ้นรูปรีน

ภาคผนวก ข



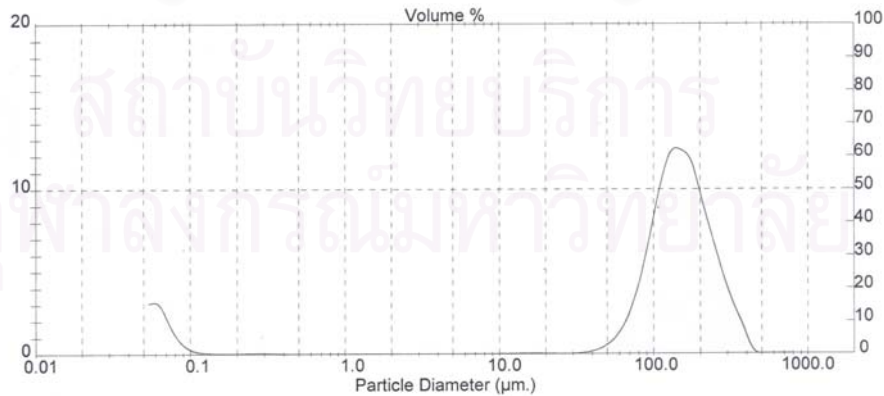
Analysis Result

Sample Details		
Sample ID: Aluminium	Run Number: 4	Measured: 6 Mar 2006 15:46PM
Sample File: OTHER23	Record Number: 154	Analysed: 6 Mar 2006 15:46PM
Sample Path: C:\		Result Source: Analysed
Sample Notes: Wet Analysis System Dispersing medium : Water Tested by Kaew Kajornchaiyakul		

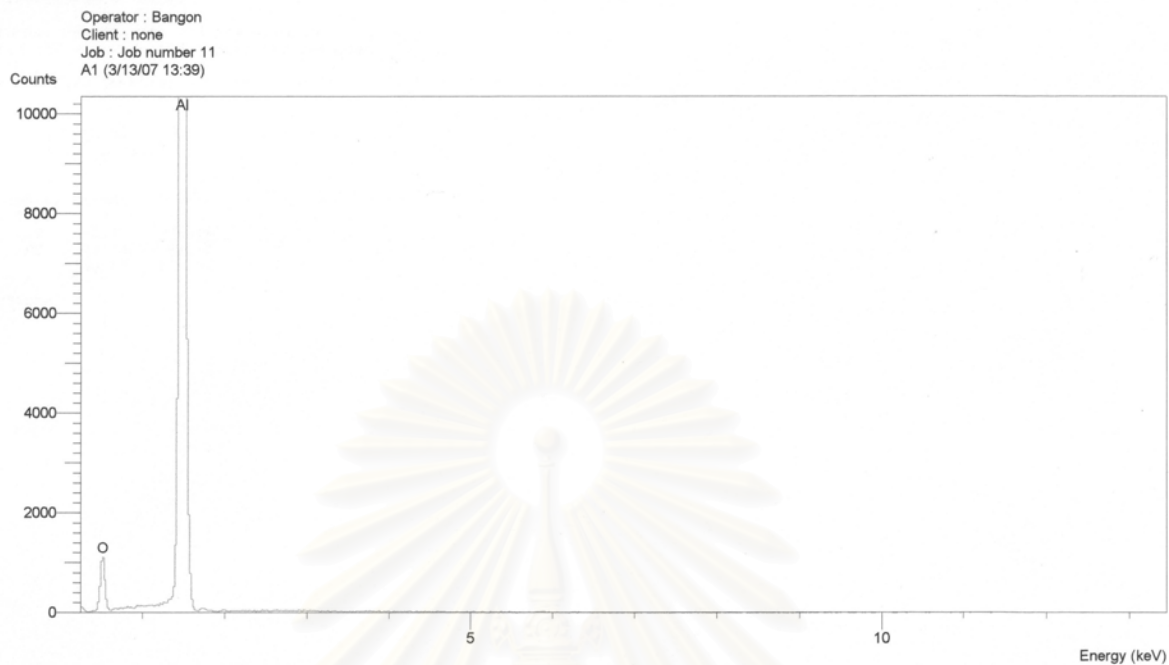
System Details			
Range Lens: 300RF mm	Beam Length: 2.40 mm	Sampler: MS1	Obscuration: 13.4 %
Presentation: 30HD	[Particle R.I. = (1.5295, 0.1000);	Dispersant R.I. = 1.3300]	Residual: 0.342 %
Analysis Model: Polydisperse Modifications: None			

Result Statistics			
Distribution Type: Volume	Concentration = 0.0288 %Vol	Density = 1.000 g / cub. cm	Specific S.A. = 8.7569 sq. m / g
Mean Diameters:	D (v, 0.1) = 41.78 um	D (v, 0.5) = 141.17 um	D (v, 0.9) = 259.46 um
D [4, 3] = 148.79 um	D [3, 2] = 0.69 um	Span = 1.542E+00	Uniformity = 4.552E-01

Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%	Size Low (um)	In %	Size High (um)	Under%
0.05	3.06	0.06	3.06	6.63	0.01	7.72	9.56
0.06	3.05	0.07	6.11	7.72	0.02	9.00	9.58
0.07	1.83	0.08	7.94	9.00	0.02	10.48	9.60
0.08	0.80	0.09	8.75	10.48	0.03	12.21	9.63
0.09	0.30	0.11	9.04	12.21	0.04	14.22	9.67
0.11	0.11	0.13	9.15	14.22	0.04	16.57	9.71
0.13	0.05	0.15	9.20	16.57	0.04	19.31	9.75
0.15	0.03	0.17	9.23	19.31	0.03	22.49	9.79
0.17	0.03	0.20	9.26	22.49	0.02	26.20	9.81
0.20	0.04	0.23	9.30	26.20	0.02	30.53	9.83
0.23	0.06	0.27	9.36	30.53	0.04	35.56	9.87
0.27	0.07	0.31	9.43	35.56	0.12	41.43	9.99
0.31	0.05	0.38	9.47	41.43	0.30	48.27	10.29
0.38	0.03	0.42	9.50	48.27	0.67	56.23	10.96
0.42	0.02	0.49	9.52	56.23	1.37	65.51	12.33
0.49	0.01	0.58	9.53	65.51	2.62	76.32	14.96
0.58	0.01	0.67	9.54	76.32	4.64	88.91	19.60
0.67	0.00	0.78	9.54	88.91	7.45	103.58	27.05
0.78	0.00	0.91	9.54	103.58	10.38	120.67	37.43
0.91	0.00	1.06	9.54	120.67	12.23	140.58	49.68
1.06	0.00	1.24	9.54	140.58	12.31	163.77	61.97
1.24	0.00	1.44	9.54	163.77	11.56	190.80	73.53
1.44	0.00	1.68	9.54	190.80	9.30	222.28	82.84
1.68	0.00	1.95	9.54	222.28	7.09	258.95	89.93
1.95	0.00	2.28	9.54	258.95	4.97	301.68	94.90
2.28	0.00	2.65	9.54	301.68	3.14	351.46	98.05
2.65	0.00	3.09	9.54	351.46	1.70	409.45	99.75
3.09	0.00	3.60	9.54	409.45	0.25	477.01	100.00
3.60	0.00	4.19	9.54	477.01	0.00	555.71	100.00
4.19	0.00	4.88	9.54	555.71	0.00	647.41	100.00
4.88	0.00	5.69	9.54	647.41	0.00	754.23	100.00
5.69	0.01	6.63	9.55	754.23	0.00	878.67	100.00



รูปที่ ข.1 ผลจากเครื่อง laser particle size analyzer ของผงอะลูมิเนียมบริสุทธิ์แสดงขนาดเฉลี่ย 148.8 µm



SEMQuant results. Listed at 3:10:52 PM on 3/13/07
Operator: Bangon
Client: none
Job: Job number 11
Spectrum label: A1

System resolution = 59 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

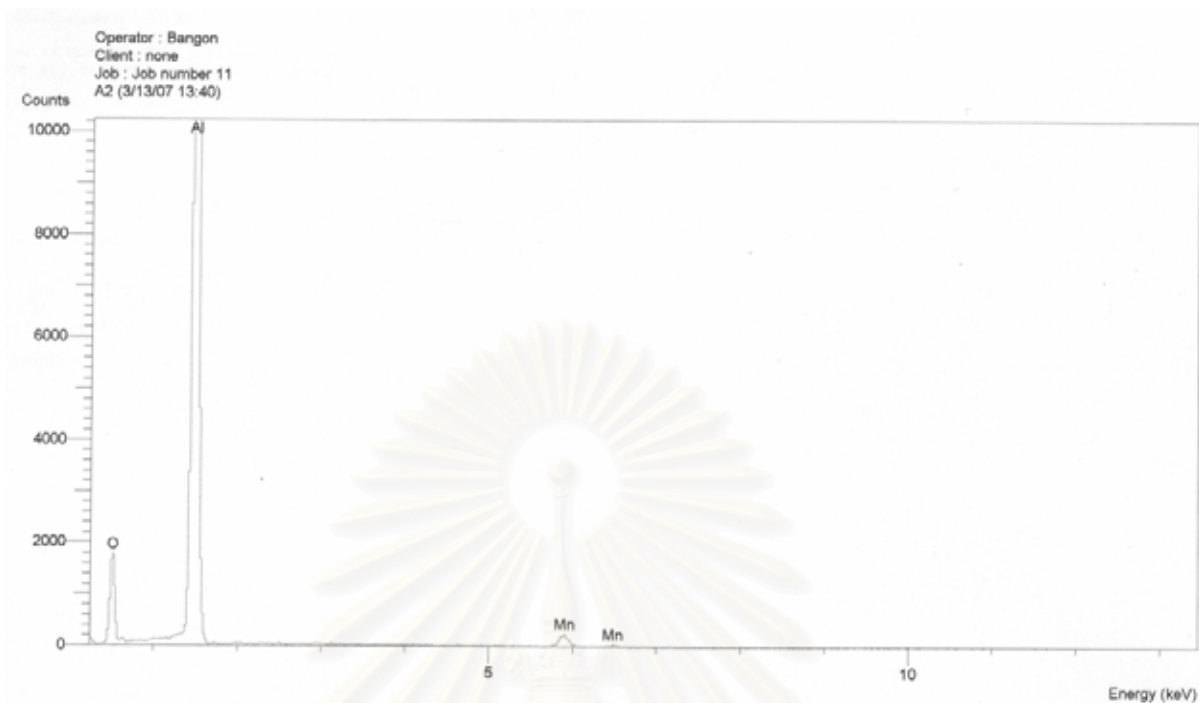
Standards :

O K Quartz 01/12/93
Al K Al2O3 23/11/93

Elmt	Spect.	Element	Atomic
	Type	%	%
O K	ED	21.41	31.48
Al K	ED	78.59	68.52
Total		100.00	100.00

* = <2 Sigma

รูปที่ ข.2 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง EDS แสดงเฟสอะลูมินา



SEMQuant results. Listed at 3:10:02 PM on 3/13/07

Operator: Bangon

Client: none

Job: Job number 11

Spectrum label: A2

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).

Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

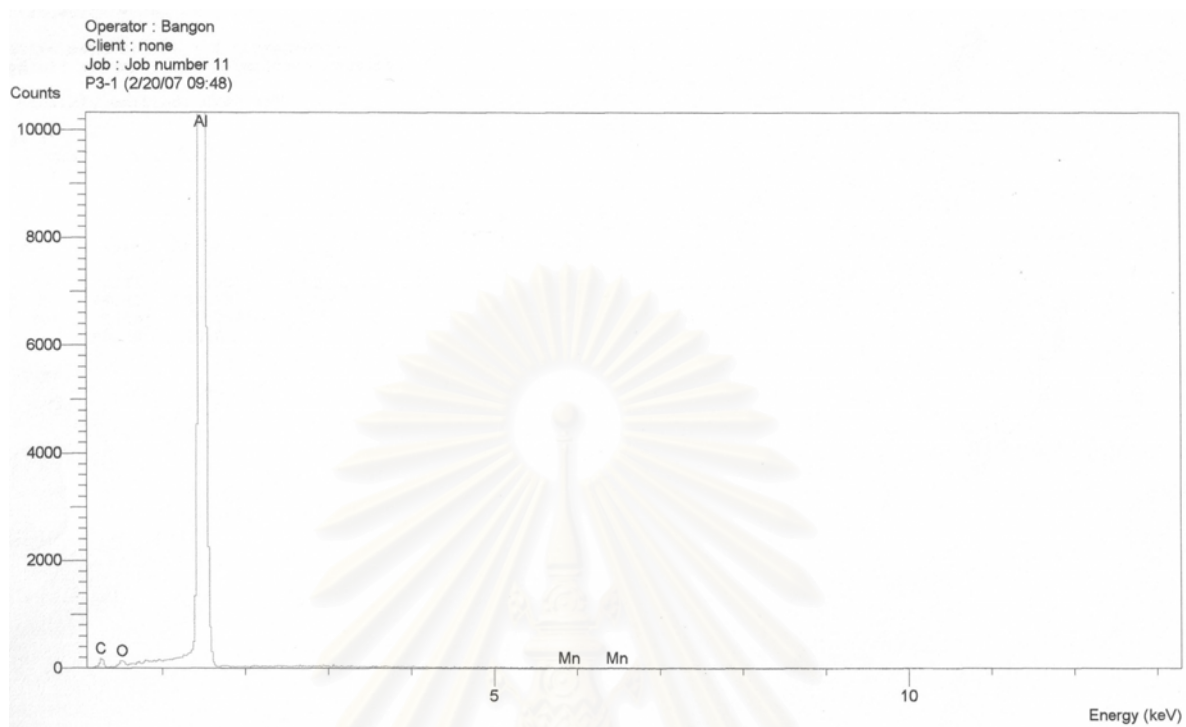
O K Quartz 01/12/93

Al K Al2O3 23/11/93

Mn K Mn 01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	29.89	42.43
Al K	ED	66.72	56.17
Mn K	ED	3.39	1.40
Total		100.00	100.00

รูปที่ ข.3 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง EDS แสดงเฟสแมงกานีสออกไซด์



SEMQuant results. Listed at 10:06:35 AM on 2/21/07
Operator: Bangon
Client: none
Job: Job number 11
Spectrum label: P3-1

System resolution = 62 eV

Quantitative method: ZAF (3 iterations).
Analysed all elements and normalised results.

1 peak possibly omitted: 0.00 keV

Standards :

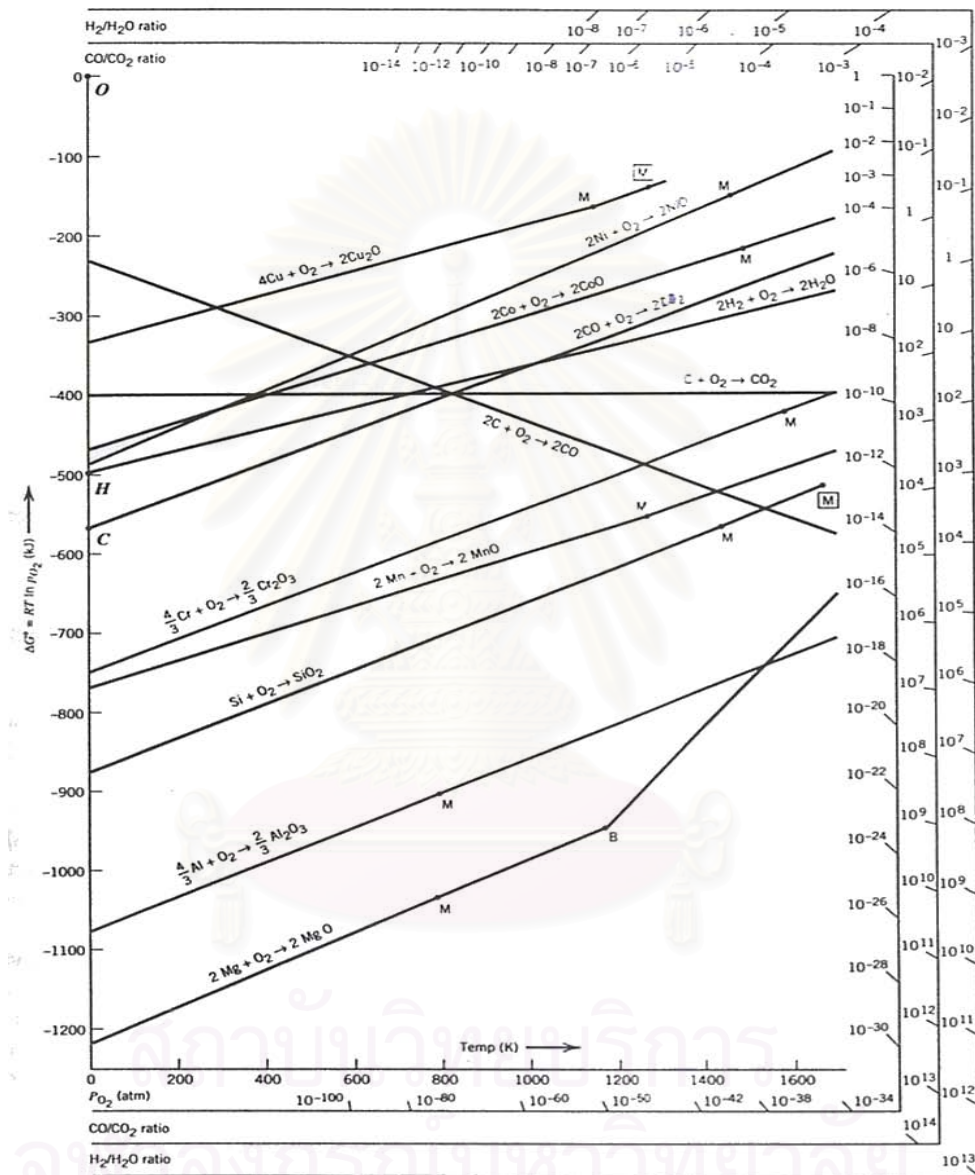
O K Quartz 01/12/93
Al K Al2O3 23/11/93
Mn K Mn 01/12/93

Elmt	Spect. Type	Element %	Atomic %
O K	ED	3.64	6.00
Al K	ED	96.31	93.98
Mn K	ED	0.04*	0.02*
Total		100.00	100.00

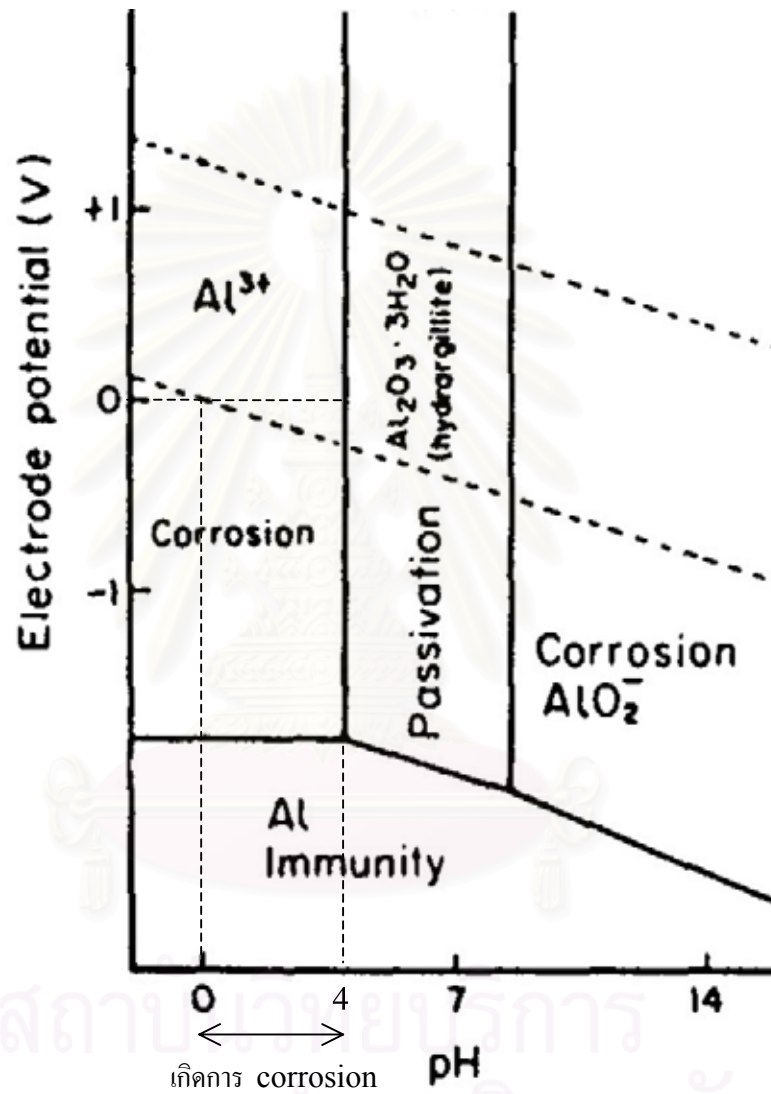
* = <2 Sigma

รูปที่ ข.4 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง EDS แสดงเนื้อพื้นอะลูมิเนียม

ภาคผนวก ก



รูปที่ ก.1 แผนภาพ Eling Ellingham diagram แสดง standard Gibb's energy of formation ของ Al_2O_3 และ MnO [29]



รูปที่ ค.2 แผนภาพ Pourbaix diagram ของอะลูมิเนียม-น้ำ ที่ pH เท่ากับศูนย์ และความต่างศักย์เป็นกลาง พบว่าอยู่ในพื้นที่ของการกัดกร่อน[30]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย เลอเลิศ ชำรงภูวดล เกิดเมื่อวันที่ 17 พฤศจิกายน พ.ศ. 2522 เข้าศึกษาระดับอุดมศึกษาที่สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2541 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท ปีการศึกษา 2545 จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย