

ผลของการรีดเย็น การอบไฮโดรจีไนเซชัน และอุณหภูมิการอบอ่อนต่อลมนบีติเชิงกล
ของอะลูมิเนียมแผ่นAA8006 (Al-Fe-Mn-Si)

นางสาว สิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2213-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF COLD REDUCTION, HOMOGENIZATION AND ANNEALING TEMPERATURE ON
MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM SHEET AA8006 (Al-Fe-Mn-Si)

Miss Siriwan Sakultanchareonchai

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

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering


Chulalongkorn University

Academic Year 2002

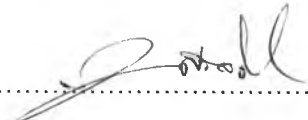
ISBN 974-17-2213-3


หัวข้อวิทยานิพนธ์ ผลของการรีดเย็น การอบไฮโมจีไนเซชัน และอุณหภูมิการอบอ่อนต่อ
สมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมแผ่น AA8006 (Al-Fe-Mn-Si)
โดย นางสาวสิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย
สาขาวิชา วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. จัตุรชัย สมศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. บัญชา ธนบุญสมบัติ

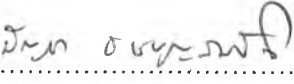
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

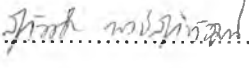
.....  คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

.....  อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. จัตุรชัย สมศิริ)

.....  อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ดร. บัญชา ธนบุญสมบัติ)

.....  กรรมการ
(อาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์)

สิริวรรณ สกุลตันเจริญชัย : ผลของการรีดเย็น การอบไฮโมจิโนเซชัน และ อุณหภูมิการอบอ่อนต่อสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมชนิดแผ่น AA8006 (Al-Fe-Mn-Si). (EFFECTS OF COLD REDUCTION, HOMOGENIZATION AND ANNEALING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMNUM SHEET AA8006 (Al-Fe-Mn-Si) อ.ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. ฉัตรชัย สมศิริ, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ดร. บัญญา ธนบุญสมบัติ ; 97หน้า. ISBN 974-17-2213-3

การศึกษานี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากระบวนการเชิงความร้อน และเชิงกลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของอะลูมิเนียมชั้นคุณภาพ AA8006 ชิ้นงานซึ่งผลิตจากระบวนการหล่อแบบทวินโรลล์ที่มีความหนาเริ่มต้น 6.5 มิลลิเมตร โดยนำแผ่นตัวอย่างมาผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันที่ 550 และ 580 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมงและนำมารีดเย็นที่อัตราการรีดเย็นตั้งแต่ 61 จนถึง 92 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นชิ้นงานถูกนำไปอบอ่อนที่อุณหภูมิ 270 300 และ 380 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 8 ชั่วโมง การศึกษาชนิดของอนุภาคสำหรับชิ้นงานหลังการอบไฮโมจิโนเซชันได้รับการวิเคราะห์โดยเทคนิคการทำละลาย และ เทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน โครงสร้างจุลภาคที่ปรากฏได้รับการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบสะท้อนแสงและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด

จากผลการศึกษาพบว่ามีเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเฟสที่สองจาก Coarse Interdendritic ไปเป็นอนุภาคขนาดเล็กหลังจากการอบไฮโมจิโนเซชันที่ 550 และ 580 องศาเซลเซียสซึ่งส่งผลให้เกิดการลดลงของสมบัติเชิงกลจากการทดสอบแรงดึงเนื่องจากการตกผลึกใหม่ ซึ่งสนับสนุนโดยกลไก Particle Stimulated Nucleation (PSN)

โครงสร้างการตกผลึกใหม่แบบ full recrystallization จะพบในชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันที่ระดับการรีดเย็น 61 ถึง 83 เปอร์เซ็นต์และผ่านการอบอ่อนที่ 380 องศาเซลเซียส การตกผลึกใหม่เฉพาะจุดและ abnormal grain growth เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันที่มีอัตราการรีดเย็น 92 และ 97 เปอร์เซ็นต์ ในทุกอุณหภูมิของการอบอ่อน เนื่องจากการเพิ่มแรงผลักดัน (Driving Force) สำหรับกระบวนการตกผลึกใหม่และสถานะคืนตัวที่ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิอบอ่อนและการรีดเย็น การทดลองพบว่าชิ้นงานที่มีสมบัติเชิงกลและความสามารถในการแปรรูปดีจะมีโครงสร้างในสถานะคืนตัว (Recovery) และเป็นชิ้นงานประเภทที่ไม่ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชันเนื่องจากผลของกลไกการเกิดอนุภาคขนาดเล็กในช่วงการอบอ่อนซึ่งขัดขวางการตกผลึกใหม่ (Zener Drag) ดังนั้นกลไก PSN จึงเป็นกลไกหลักที่เกิดในชิ้นงานที่ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชัน และมีโครงสร้างสุดท้ายขนาดใหญ่ ส่วนผลของกลไก Zener Drag จะเกิดในชิ้นงานประเภทไม่ผ่านการอบไฮโมจิโนเซชัน ส่งผลให้เนื้อโลหะมีความต้านทานการอบอ่อนและการเติบโตของเกรน (Grain Growth) ส่งผลให้โครงสร้างสุดท้ายละเอียด ไม่มีการเกิดผลึกขนาดใหญ่

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโลหการ.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4270685721 MAJOR :METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORDS : RECRYSTALLIZATION/TWIN-ROLL CASTING /AA8006/(Al-Fe-Mn-Si)

SIRIWAN SAKULTANCHAREONCHAI : EFFECTS OF COLD REDUCTION HOMOGENIZATION AND ANNEALING TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM SHEET AA8006 (Al-Fe-Mn-Si). THESIS ADVISER : ASSOC. PROF. CHATCHAI SOMSIRI, Ph.D. ; THESIS COADVISER : Dr. BANCHA THANABOONSOMBUT. 97pp. ISBN 974 -17-2213-3.

A study of tensile tests and ductility tests were carried out to investigate the effect of thermo-mechanical processing on microstructural evolution and mechanical properties of aluminum sheet AA8006. The test specimens were produced by twin-rolled casting method at 6.5 mm thickness. The specimens were homogenized at 550°C and 580°C for eight hours and rolled in different degrees from 61% to 97% cold reduction. In the final step of the thermo-mechanical processing, the samples were annealed at 270°C, 300°C and 380°C for eight hours. Then dissolution technique and XRD analysis were carried out to reveal the phase transformation after the homogenization. The microstructure was identified with optical microscope and scanning electron microscope.

It was found that transformation of coarse interdendritic second phase to fine divorced particles were induced by 550°C and 580°C homogenization. Decreasing of tensile strength of homogenized samples was attributed to grain and structure coarsening as assisted by mechanism of Particle Stimulated Nucleation (PSN mechanism).

Fully recrystallized microstructure was found in homogenized samples with 61-83% reduction at 380°C annealing. Partial recrystallization and abnormal grain growth were found in the homogenized samples with 92 and 97 % reduction at all annealing temperature. Increasing of driving force for reformation of the annealed structure are assisted by increasing in degree of cold reduction and annealing temperature. The optimum condition for thermo-mechanical process for high strength and good ductility was to obtain structure in the recovery state of the non-homogenized samples. The fine structure is attributed to the precipitation of small particles which give rise to pinning effect during the annealing (Zener Drag). Therefore, PSN is the primary mechanism occurred in the homogenized samples and the Zener drag mechanism is a primary mechanism for the non-homogenized samples during the thermo-mechanical process.

Department.....Metallurgical EngineeringStudent's signature.....

Field of study...Metallurgical Engineering.....Advisor's signature.....

Academic year.....2002.....Co-advisor's signature.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงด้วยความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย สมศิริ ที่ให้ความกรุณาเป็นทั้งที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และแนะนำแนวทางการแก้ปัญหาในงานวิจัยอย่างดี ตลอดจนขอขอบพระคุณดร.บัญชา ธนบุญสมบัติ ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมและเสนอแนะแก้ไขและกระบวนการทำงานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์ดร.เอกสิทธิ์ และอาจารย์ ศิริรัต นิสารัตนพร สำหรับความช่วยเหลือในการทำงานวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ในการเครื่องมือสำหรับงานวิจัย รวมทั้งแนะนำแนวทางการแก้ปัญหาในงานวิจัยเสมอมา ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ ศรีเจริญชัยที่ให้ความกรุณาเป็นประธานกรรมการการสอบ วิทยานิพนธ์และเอื้ออำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยในภาควิชาด้วยตลอดมา ขอขอบคุณอาจารย์สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณเสนีย์ คุณธรรมนิตย์ และคุณวิมา ครูปฏิบัติการประจำภาควิชาวิศวกรรมโลหการ ที่ให้คำแนะนำในการแก้ปัญหาเฉพาะหน้า ฝึกอบรมการอุปกรณ์ในภาควิชา รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์เข้าช่วยเหลือในงานวิจัยเมื่อผู้เขียนประสบปัญหาในงานวิจัย ขอขอบคุณ คุณนิรมล คุณบุพา และคุณชองทองสำหรับคำแนะนำในการติดต่อประสานงาน รวมทั้งให้ข้อมูลเกี่ยวกับสถานที่ และการใช้เครื่องมือในงานวิจัย ขอขอบคุณบริษัท เอ.เอ็ม.ดี. ประเทศไทยในความอนุเคราะห์ให้ใช้กล้องจุลทรรศน์ SEM

ผู้เขียนขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดจนการใช้อุปกรณ์ภายนอกมหาวิทยาลัยตลอดมา

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ คุณเล็ก สังเกตการณ์ และครอบครัว คุณดวงกมล สกุลตันเจริญชัย สำหรับการอำนวยความสะดวกด้านคอมพิวเตอร์ รวมถึงการแนะนำการค้นคว้าหาข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ และให้กำลังใจเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 ปรีทรรสนั้วรรณกรรม	3
2.1 ข้อมูลทั่วไปสำหรับอะลูมิเนียม 8xxx	3
2.2 ผลการหล่อแบบทวิน โรล(Twin roll casting) ต่อโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมแผ่น	5
2.3 ผลของธาตุผสม ต่อการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมแผ่น AA8006	6
2.4 ทฤษฎีการตกผลึกใหม่	9
2.4.1 ผลกระทบจากบทบาทในเชิงอนุภาค	9
2.4.2 การตกผลึกด้วยกลไก PSN (Particle Stimulated Nucleation)	13
2.4.2.1 ขั้นตอนของการเกิดกลไก PSN	13
2.4.3 อนุภาคขัดขวางการขยายตัวของขอบเกรนในช่วงการตกผลึกใหม่ (Zener Drag)	16
2.5 สถานะคืนตัว (Recovery State)	17
3 กระบวนการดำเนินงานวิจัย	21
3.1 วัตถุประสงค์ที่ใช้และรายละเอียดของชิ้นงานทดลอง	21
3.2 รายละเอียดขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานทดลอง	23
3.2.1 การอบไฮโมจิโนเซชัน	23
3.2.2 การรีดเย็น	23
3.2.3 การอบอ่อน (Back Annealing)	23
3.3 เทคนิคการวิเคราะห์ชิ้นงานทดลองและการเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์	23
3.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและการเตรียมชิ้นงานสำหรับการวิเคราะห์	23
3.3.2 การทดสอบเชิงกล	24
3.3.3 การวิเคราะห์ Powder Dissolution และเทคนิค เอกซเรย์คิฟแฟรกชัน(XRD)	24

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	28
4.1 การอบไฮโมจิในเซชัน	28
4.2 การรีคเย็น	31
4.3 การอบอ่อน (Back Annealing)	35
5 สรุปผลการทดลอง	59
6 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย	61
รายการอ้างอิง	62
ภาคผนวก	64
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	97

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

3-1 ส่วนประกอบทางเคมีและสภาวะควบคุมการหล่อ (Casting Condition) สำหรับอะลูมิเนียม	
AA8006	22
3-2 รายละเอียดของชิ้นงานทดลอง	22

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2-1 ภาพแสดงการกระจายตัวของอนุภาคในสภาวะ as-polish ของอะลูมิเนียมแผ่น ก) ชิ้นงานผ่านการหล่อทวิน โรล์ ข) สำหรับชิ้นงานผ่านการอบ โฮโมจิไนเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส 6 ชม.	4
2-2 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงจุดคราก(Yield Strength)และ อัตราการยืดของ Al-0.8 Fe ต่ออุณหภูมิการอบอ่อน ⁽²⁾	4
2-3 ภาพแสดง โครงสร้าง Subgrain ที่มีอนุภาคขนาดเล็กขัดขวางที่ขอบเกรน ของอะลูมิเนียมผสม (1.36% Fe, 0.6% Mn) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบ Transmission Electron microscope ⁽²⁾	4
2-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าใช้จ่ายในการผลิตอะลูมิเนียมแผ่นหนา 0.25 นิ้ว จากข้อมูลในปี 1974-88: 1) กระบวนการรีดร้อนที่มีอัตราการผลิตสูงสุด 60,000ตัน/ปี 3) กระบวนการผลิตแบบ Strip Casting และรีดร้อน 4) กระบวนการผลิตแบบทวินโรล ส่วน ก) แสดงค่าใช้จ่ายรวมในการสร้างโรงงานจนถึงการผลิต ข) ค่าใช้จ่ายในการแปรรูปอะลูมิเนียมให้มีความหนา 0.25 นิ้ว	5
2-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเย็นตัว กับค่า Dendrite Arm Spacing สำหรับอะลูมิเนียม 3004 และ Al-4.5%Cu-2.0%Mn ในกระบวนการผลิตหลายชนิด ⁽³⁾	6
2-6 ผลของอัตราการเย็นตัวต่อ ก) อัตราการละลายของแมงกานีสในยูเทคติก ข) ขนาดของสารประกอบเชิงซ้อนของเหล็กและ แมงกานีส สำหรับโลหะผสม อะลูมิเนียม-ทองแดง (4.45-4.48 % Cu) (A.Kamio, H.Tezuka and T, Takahashi) ⁽³⁾	6
2-7 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมพัทธ์ ΔS ของอะลูมิเนียมแผ่น AA8006 และ AA8011 ในช่วงการอบอ่อน(จำลองสภาวะการอบโฮโมจิไนเซชันในเชิงอุตสาหกรรม) ⁽⁵⁾	8
2-8 อนุภาคสารประกอบเชิงโลหะ (Intermetallic Particle) ในอะลูมิเนียม AA8006 ภายหลังจาก Quenching จาก 510 องศาเซลเซียส	8
2-9 ค่าความแข็งที่อุณหภูมิห้องของทองแดงซึ่งเติมอนุภาคขนาดเล็ก (Dispersion - Strength Copper Alloy) ผ่าน Extrusion และอบอ่อน (Preston and Grant 1961) ⁽⁸⁾	10
2-10 ผลของกราฟแสดงผลของขนาดอนุภาคต่อการตกผลึกใหม่ใน Al-Si ที่ผ่านการรีดเย็น และอบที่ 300 องศาเซลเซียส ก) เวลาสำหรับการตกผลึกใหม่ 50% ข) ขนาดเกรนหลังการตกผลึก (Humphreys 1977) ⁽⁸⁾	11
2-11 ผลของกราฟแสดงผลของระยะห่างระหว่างอนุภาคต่อการตกผลึกใหม่ ของ Al-Cu แบบผลึกเดี่ยวผ่านการรีด 60% และอบอ่อน 300 องศาเซลเซียส ก) เวลาการตกผลึกใหม่ 50% ข) ขนาดของเกรนหลังการตกผลึกใหม่ (Doherty and Martin) ⁽⁸⁾	11
2-12 ลักษณะเกรนของ Al-Al ₂ O ₃ ผ่านการรีดและตกผลึกใหม่ ⁽⁸⁾	12

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างผลของขนาดอนุภาค Volume Fraction และอัตราการแปรรูป (Prior Strain) ต่อการตกผลึกใหม่.....	12
2-14 โครงสร้างการตกผลึกใหม่ด้วยกลไก PSN ในเหล็กที่มีสิ่งปลอมปนประเภท Oxide (8)	14
2-15 ภาพแสดงการตกผลึกใหม่ของชิ้นงาน In-situ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ แบบ HEVM (High Voltage Transmission Electron Microscopy แสดงลักษณะ Subgrain ในบริเวณการแปรรูป รุนแรงที่ติดกับอนุภาค ก)การตกผลึกใหม่เกิดที่บริเวณลูกศรของ Deformation Zone ใกล้เคียง อนุภาค ข) การตกผลึกใหม่สิ้นสุดเมื่อหมดขอบเขต Deformation Zone	14
2-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาด Subgrain และความไม่เป็นระเบียบใน โครงสร้างภายในบริเวณ Deformation Zone ของอนุภาคซิลิกอนในอะลูมิเนียม ตรวจสอบ โดย HEVM ภายหลังจากอบอ่อนที่ 250 องศาเซลเซียส) จลศาสตร์การเติบโต (Growth Kinetics) ข) ค่าความไม่เป็นระเบียบสูงสุดบริเวณ Deformation Zone (Humphreys 1980) ⁽⁸⁾ ..	15
2-17 แสดงการแปรรูปใน โครงสร้างโลหะ ⁽⁸⁾	15
2-18 ก) แสดงปัจจัยการรีดขนาดและ ขนาดอนุภาคต่อกลไก PSN และ ข) การเปรียบเทียบ ผลข้อมูลจากการทดลอง และ การคำนวณทางทฤษฎีของ Nucleous formation และ Growth	16
2-19 ภาพจาก TEM (Transmission Electron Microscopy) แสดงการยับยั้งการเคลื่อนที่ของ ดิสโลเคชันที่ขอบเกรนในอนุภาค A และ B ในลักษณะ Low Angel Boundary ของ อะลูมิเนียม (Jone และ Hansen 1981) ⁽⁸⁾	17
2-20 ผลของขนาดเกรนคือ Pinning Pressure (Zener Drag) สำหรับ โลหะที่มี การกระจายตัว ของอนุภาคแบบเล็กละเอียด ⁽⁸⁾	17
2-21 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลในช่วงการรีดเย็นและการอบอ่อน	18
2-22 แสดงลำดับขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของดิสโลเคชัน ในสถานะคืนตัวของวัสดุที่ผ่านการ แปรรูปถาวร ⁽⁸⁾	18
2-23 การเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลและความแข็ง ของอะลูมิเนียม AA8006 และ A8011 ที่ผ่านกระบวนการเชิงกลและความร้อนที่แตกต่างกัน ⁽¹⁾	20
3-1 ภาพแสดงกระบวนการหล่อแบบทวิน โรล (twin roll casting process)	22
3-2 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลอง ในกระบวนการเชิงความร้อนและเชิงกล (Thermo - mechanical processing) ของชิ้นงานอะลูมิเนียม AA8006	25
3-3 แผนผังแสดง Thermal history ของชิ้นงานอะลูมิเนียม AA8006	26
3-4 ภาพแสดงทิศทางและระนาบของชิ้นงานที่ผ่านการรีด	27
3-5 รายละเอียดของชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง ⁽¹²⁾	27

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4-1 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบกวาด (SEM) แสดงความแตกต่างของการกระจายตัวของอนุภาคจากการอบไฮโมจิในเซชันของชิ้นงานประเภทก) ไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน ข) ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน ที่ 550 องศาเซลเซียส ค) ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 580 องศาเซลเซียส	29
4-2 ลักษณะเกรนของชิ้นงานประเภท ก) ไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน ข) ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน ที่ 550 องศาเซลเซียส ค) ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน ที่ 580 องศาเซลเซียส	30
4-3 การกระจายตัวของอนุภาคเมื่อเพิ่มอัตราการรีดเย็นของชิ้นงานประเภทไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน และชิ้นงานประเภทผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส	32
4-4 ลักษณะเกรน เมื่อเพิ่มอัตราการรีดเย็นของชิ้นงานประเภทไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน และชิ้นงานประเภทผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส	33
4-5 ลักษณะเกรนของชิ้นงานประเภทผ่านการอบไฮโมจิในเซชันและอบอ่อนที่ 300 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงอัตราการรีดเย็น	34
4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความแข็งแรงสูงสุดของชิ้นงานประเภทผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 580 องศาเซลเซียสเมื่อเปรียบเทียบ ผลการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน	35
4-7 ผลการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อนต่อลักษณะเกรนของชิ้นงานประเภทผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 550 องศาเซลเซียสมีอัตราการรีดเย็นที่ 71 % ภายหลังการอบอ่อนที่ ก) 270 องศาเซลเซียส ข) 300 องศาเซลเซียส ค) 380 องศาเซลเซียส	36
4-8 ผลการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อนต่อลักษณะการกระจายตัวของชิ้นงานประเภทไม่ผ่านการอบไฮโมจิ ในเซชันที่อัตราการรีดเย็น 61% ก) ภายหลังการรีด ข) หลังอบอ่อนที่ 300 องศาเซลเซียส ค) หลังอบอ่อนที่ 380 องศาเซลเซียส	37
4-9 ลักษณะเกรนของชิ้นงานประเภท ไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่อัตราการรีดเย็น 61% ก) ภายหลัง การรีด ข) หลังอบอ่อนที่ 380 องศาเซลเซียส	38
4-10 ก) ความสัมพันธ์ของลักษณะเกรนและสมบัติเชิงของประเภท ไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่อัตราการรีดเย็น 61%เมื่อเปรียบเทียบผลการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน	39
4-10 ข) ความสัมพันธ์ของลักษณะเกรนและสมบัติเชิงของประเภท ไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่อัตราการรีดเย็น 97%เมื่อเปรียบเทียบผลการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน	40
4-11 ก) ความสัมพันธ์ของลักษณะเกรนและสมบัติเชิงของประเภทผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการรีดเย็น 61 %เมื่อเปรียบเทียบผลการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน	42
4-11 ข) ความสัมพันธ์ของลักษณะเกรนและสมบัติเชิงของประเภทผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส ที่อัตราการรีดเย็น 97 %เมื่อเปรียบเทียบผลการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน	43

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-12 ก) ความสัมพันธ์ของลักษณะเกรนและสมบัติเชิงของประเภทผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 580 องศาเซลเซียส ที่อัตราการรีดเย็น 61% เมื่อเปรียบเทียบผลการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน	44
4-12 ข) ความสัมพันธ์ของลักษณะเกรนและสมบัติเชิงของประเภทผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 580 องศาเซลเซียส ที่อัตราการรีดเย็น 83% เมื่อเปรียบเทียบผลการเพิ่มอุณหภูมิการอบอ่อน	45
4-13 อิทธิพลของอัตราการรีดเย็นต่อค่า particle-count ต่อ 25 ตารางไมครอนของชิ้นงานภายหลังการรีดเย็น.....	46
4-14 อิทธิพลของอัตราการรีดเย็นต่อขนาดอนุภาคเฉลี่ย(ไมครอน) ของชิ้นงานภายหลังการรีดเย็น.....	46
4-15 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Particle-count ต่อ 25 ตารางไมครอน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานที่อัตราการรีด 61 %	48
4-16 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคเฉลี่ย(ไมครอน)เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิของชิ้นงานที่อัตราการรีด 61 %	49
4-17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่า Particle-count ต่อ 25 ตารางไมครอน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นงานที่อัตราการรีด 97 %	49
4-18 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคเฉลี่ย(ไมครอน)เมื่อเพิ่ม อุณหภูมิของชิ้นงานที่อัตราการรีด 97 %	50
4-19 ลักษณะเกรนภายหลังการอบอ่อน380 องศาเซลเซียส ที่อัตราการรีด 71%ของชิ้นงานประเภท ก)ไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชัน ข) ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันที่ 550 องศาเซลเซียส	50
4-20 การเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของอนุภาคในชิ้นงานที่ผ่านการรีด ณ อัตราการรีด ก) 61% ข) 83% ค) 97%	51
4-21 ลักษณะเกรนของชิ้นงานประเภทไม่ผ่านการอบไฮโมจิในเซชันตามกระบวนการเชิงความร้อนและ เชิงกลที่แตกต่างกัน	52
4-22 ลักษณะเกรนของชิ้นงานผ่านการอบอ่อนที่อัตราการรีดเย็น 61% ณ กระบวนการเชิงความร้อนและเชิงกลที่แตกต่างกัน	53
4-23 ลักษณะเกรนของชิ้นงานผ่านการอบอ่อนที่อัตราการรีดเย็น 92% ณ กระบวนการเชิงความร้อน และเชิงกลที่แตกต่างกัน	54
4-24 ลักษณะเกรนของชิ้นงานผ่านการอบอ่อนที่อัตราการรีดเย็น 97% ณ กระบวนการเชิงความร้อนและเชิงกลที่แตกต่างกัน	55
4-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) ณ กระบวนการเชิงความร้อนและเชิงกลแตกต่างกัน.....	57

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า Ductility และค่าความแข็งแรงสูงสุด ของอะลูมิเนียมแผ่น ที่อัตราารรีด 61 % ณ กระบวนการเชิงความร้อนและเชิงกลที่แตกต่างกัน	58
4-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ค่า Ductility และค่าความแข็งแรงสูงสุด ของอะลูมิเนียมแผ่น ที่อัตราารรีด 97 % ณ กระบวนการเชิงความร้อนและเชิงกลที่แตกต่างกัน	58