

ผลกระทบของการให้ความร้อนแบบวัฏจักรต่อการโตของเกรนในอะลูมิเนียม



นายสมยศ สรรพมังคลากร

ศูนย์วิทยพัทยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4941-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF CYCLIC ANNEALING ON GRAIN GROWTH OF ALUMINUM



Mr. Somyos Suppamangkalakorn

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineer in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4941-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของการให้ความร้อนแบบวัฏจักรต่อการโตของเกรนใน  
อะลูมิเนียม

โดย

นายสมยศ สรรพมงคลากร

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

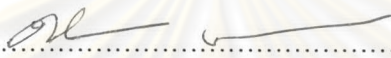
อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ ทวีปรั้งนิพร

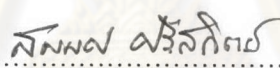
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์เดโช ทองอร่าม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

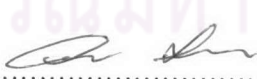
  
.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ ทวีปรั้งนิพร)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

สมยศ สรรพมงคลากร : ผลกระทบของการให้ความร้อนแบบวัฏจักรต่อการโตของ  
เกรนในอะลูมิเนียม. (EFFECTS OF CYCLIC ANNEALING ON GRAIN  
GROWTH OF ALUMINUM) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. วิศิษฐ ทวีปรัญญ์พร, อ. ที่ปรึกษา  
ร่วม : อ.เค โส ทองอร่าม จำนวนหน้า 89 หน้า. 974-17-4941-4

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อ  
การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 1100 ภายหลังจากเกิดการตกผลึกใหม่  
การอบอ่อนแบบวัฏจักรทำโดยการให้ชิ้นงานตัวอย่างเคลื่อนที่สลับไปมาระหว่าง 2 อุณหภูมิ  
จากเตาความร้อน 2 ตัวที่สร้างขึ้น โดยมีตัวแปรหลักในการศึกษาครั้งนี้ คือ เวลารวมทั้งหมดใน  
การอบอ่อน เวลาที่หยุดค้างในแต่ละเตาขณะทำการอบ ซึ่งมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการ  
ศึกษาที่ 350 และ 450 องศาเซลเซียส การถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์ที่ติดตั้งกล้องดิจิทัลและ  
การศึกษาระนาบผลึกด้วยเทคนิค XRD ได้นำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้น  
งานตัวอย่าง โดยพบว่า การอบอ่อนแบบวัฏจักรทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยสูงกว่าการอบแบบ  
อุณหภูมิเดียว 8 ถึง 10% เมื่อทำการอบแบบวัฏจักรระหว่างอุณหภูมิ 350 และ 450 เป็นเวลา 60  
นาที และการศึกษาระนาบผลึกพบว่ามีความสัมพันธ์กันของระนาบ (200) (220) และ(311)  
โดยที่ระนาบ(220)จะปรากฏในการอบแบบวัฏจักรน้อยกว่าในการอบที่อุณหภูมิเดียวที่เวลาการ  
อบ 18 และ 30 ส่วนทางด้านความแข็งของชิ้นงานแล้วโดยรวมไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆที่เกิดจาก  
การอบแบบวัฏจักร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี  
สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2546

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4470578421 :MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: CYCLIC ANNEALING / GRAIN GROWTH / MICROSTRUCTURE/XRD

SOMYOS SUPPAMANGKALAKORN : EFFECTS OF CYCLIC ANNEALING ON GRAIN GROWHT OF ALUMINUM. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.DR.VISIT THAVEEPRUNGSRIPOORN, THESIS CO-ADVISOR : DECHO THONG – ARAM, 89 PP. ISBN 974-17-4941-4.

The objective of this thesis was to study effects of cyclic annealing on the microstructure of 1100 Aluminium after recrystallization. A two-zone furnace was constructed and the cyclic annealing was achieved by moving specimens between the two temperature zones. Total annealing time and dwelling time at each cycle in the range of 350-450°C were the two main variables in this study. Optical micrographs and x-ray diffraction technique were used for microstructure comparison. Results show that cyclic annealing accelerated grain growth rate as evidenced by the fact that the total annealing time of 60 minute led to the mean grain size of 8-10% bigger than isothermal annealing. X-ray diffraction also revealed that among the crystallographic planes of (200), (220), and (311), the intensity of (220) peak was systematically reduced in samples that were 18 and 30 minutes cyclically annealed as compared to those that were isothermally annealed. Results from hardness test however did not indicate any difference between cyclic and isothermal annealing method.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology  
Field of study Nuclear Technology  
Academic year 2003

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

สำหรับความสำเร็จที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วิศิษฐ์ ทวีปรั้งมีพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เป็นแบบอย่างแนวคิดในการดำรงชีวิต และอาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้ ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดีและช่วยเหลือด้านอิเล็กทรอนิกส์และการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาชีวเคมีสรีรเทคโนโลยีทุกท่าน ที่ให้ความรู้และคำปรึกษาตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษาที่ภาควิชา

นอกจากนี้ งานวิจัยคงจะสำเร็จลุล่วงไปไม่ได้หากไม่ได้รับกำลังใจ แรงผลักดันและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งในทุกด้านจากเพื่อน พี่และน้องทุกคนในภาควิชาชีวเคมีสรีรเทคโนโลยี จึงขอขอบคุณเพื่อน พี่และน้องทุกคนไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ นายสมชาย เบ้าทอง ผู้ร่วมออกแบบและสร้างเตาความร้อนสูง พร้อมทั้งระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนโครงการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์

ท้ายนี้สำหรับกำลังใจที่ได้รับอย่างแรงกล้า และแรงผลักดันที่ดียิ่ง ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจตลอดมา รวมทั้งน้องสาว และน้องๆ ทางร้านอินเตอร์เน็ตทุกๆ คน ในทุกสิ่งที่ทำให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ

### บทที่

1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้.....	4
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2. ทฤษฎี (Theory).....	7
2.1 การแปรรูปเย็น (Cool Work).....	8
2.1.1 การแปรรูปเย็น.....	8
2.1.2 ผลของการแปรรูปเย็นที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุ.....	8
2.2 การตกผลึกใหม่.....	9
2.3 การอบตกผลึก (Recrystallization).....	10
2.3.1 อุณหภูมิการตกผลึก (Recrystallization Temperature).....	10
2.3.2 การตกผลึกใหม่ในวัสดุชนิดเฟสเดียว (Recrystallization Nuclei in Single Phase Materials) .....	13
2.3.3 Nucleation Mechanism .....	14
2.4 การโตขึ้นของเกรน (Grain Growth).....	14
2.4.1 Grain Size Control.....	15
2.4.2 Normal Grain Growth .....	16
2.4.3 การรวมตัวกันของเกรน (Grain Coalescence).....	23
2.5 การวิเคราะห์ด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดีเฟรกชัน (X-ray diffraction).....	30
2.5.1 กฎข้อที่ 1 ของแบรกกส์ (Braggs 's law I).....	32

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	.. หน้า
2.5.2 กฎข้อที่ 2 ของแบรกกส์ (Braggs 's law II).....	33
3. วัสดุ เครื่องมือ และอุปกรณ์การวิจัย.....	35
3.1 เตาความร้อนสูง.....	37
3.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง.....	38
3.3 การบันทึกข้อมูล .....	39
4. วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
4.1 วัสดุที่จะนำมาทำการทดลอง (As-received specimen).....	46
4.2 ขั้นตอนการรีดเย็น (Cold rolling).....	46
4.3 ขั้นตอนการอบเพื่อตกผลึกใหม่ (Recrystallisation).....	48
4.4 ขั้นตอนการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Annealing).....	52
4.5 ขั้นตอนการอบอ่อนแบบวัฏจักร (Cyclic Annealing).....	52
4.6 ขั้นตอนการเย็นตัวของชิ้นงาน .....	53
4.7 ขั้นตอนการขัดผิวโครงสร้าง .....	54
4.8 ขั้นตอนการกัดกรดผิวโครงสร้าง (Etching) .....	55
4.9 ขั้นตอนการดูภาพจากกล้องจุลทรรศน์ .....	55
4.10 ขั้นตอนการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์ .....	58
4.11 ขั้นตอนการวัดความแข็ง .....	59
4.12 ขั้นตอนการนับขนาดเกรน.....	60
5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	65
5.1 ผลการสืบหาเงื่อนไขการทดลอง.....	66
5.1.1 ผลการวัดความแข็ง .....	66
5.1.2 ผลการวัดขนาดเกรนเฉลี่ย.....	70
5.2 ผลการทดลองขยายผล .....	76
5.2.1 ผลการวัดค่าความแข็ง.....	76
5.2.2 ผลการวัดขนาดเกรนเฉลี่ย.....	78
5.2.3 ผลการวิเคราะห์ XRD.....	80
รายการอ้างอิง.....	87
บรรณานุกรม .....	88



สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	123



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 1.1	เป็นส่วนหนึ่งของ แผนผังการไหลของขบวนการ thermomechanical process.....	2
ตารางที่ 1.2	เป็นส่วนหนึ่งของ แผนผังการไหลของขบวนการ thermomechanical process.....	2
ตารางที่ 2.1	แสดงผลของการเสียรูปแบบพลาสติก ต่อคุณสมบัติ Tensile Strength ในวัสดุทองเหลือง (70%ทองแดง 30%สังกะสี) .....	8
ตารางที่ 2.2	อุณหภูมิตกผลึกใหม่โดยประมาณ ที่ใช้ในการโลหะและโลหะผสมต่างๆ .....	11
ตารางที่ 2.3	แสดงรายการดัชนีระนาบ hkl ของอะลูมิเนียม.....	31
ตารางที่ 4.1	95% Confidence Interval Multipliers, t .....	62
ตารางที่ 4.2	แสดงความสัมพันธ์ของ Grain Size Number กับค่าอื่นๆ .....	63
ตารางที่ 5.1	แสดงค่าความแข็งของชิ้นงาน ในเงื่อนไขต่างๆ.....	69



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1	ภาพตัดขวางที่เกิดจากการ sensitized (600 C ที่ 1 ชม.) alloy 800 (Fe-35 Ni-25Cr) ตามด้วย 120 ชม. ใน ASTM G28 .....1
รูปที่ 1.2	ลักษณะ positive eletrod grid Pb-Ca-Sn ในขั้วแบตเตอรี่ที่ลักษณะเป็นตระแกรงภายใต้เงื่อนไขการกักคร่อนเช่นเดียวกับในแบตเตอรี่ .....1
รูปที่ 1.3	แผนผังการไหลของขบวนการ thermomechanical process ของ J. Schwartz and Wayne E. King .....3
รูปที่ 2.1	แสดงลำดับขั้นของวัฏจักรการอบและคุณสมบัติต่างๆ ในโครงสร้างจุลภาค.....7
รูปที่ 2.2	แสดงกราฟเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของทองแดงความบริสุทธิ์สูง ที่มีผลต่อพลังงานที่สะสมภายในวัสดุจากการแปรรูปเย็น.....8
รูปที่ 2.3	ผลของการแปรรูปเย็นบนต่อคุณสมบัติ Tensil Strength และ Yield Strength ของทองแดง.....9
รูปที่ 2.4	คุณสมบัติเชิงเปรียบเทียบของการอบอุณหภูมิคงที่ ในสามอุณหภูมิที่ต่างกัน ที่มีผลต่อความเครียดตกค้าง.....9
รูปที่ 2.5	กราฟที่เป็นลักษณะเฉพาะของการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยช่วงแรกของการอบจะมีช่วงการฟักตัวของการตกผลึกใหม่ด้วย.....10
รูปที่ 2.6	แสดงระดับพลังงานต่างๆ ที่ต้องใช้ในการตกผลึกใหม่ .....10
รูปที่ 2.7	ผลของอัตราความหนืดในการแปรรูปเย็น (Prior Deformation) ที่มีผลต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเริ่มอบตกผลึกใหม่ของโลหะทองแดง.....11
รูปที่ 2.8	ผลของการแปรรูปเย็นที่มีต่อขนาดเกรนที่เกิดขึ้นมาใหม่ภายหลังการอบเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ 950 C <sup>0</sup> .....12
รูปที่ 2.9	กราฟที่เป็นลักษณะเฉพาะของการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยช่วงแรกของการอบจะมีช่วงการฟักตัวของการตกผลึกใหม่ด้วย.....13
รูปที่ 2.10	การกำเนิดของนิวเคลียสที่มาจากเซลล์ที่มีลักษณะหลายเหลี่ยม .....14
รูปที่ 2.11	แนวโน้มของอุณหภูมิที่จะมีต่อขนาดเกรนใหม่ที่จะได้จากขบวนการตกผลึก.....14
รูปที่ 2.12	กราฟของการโตขึ้นของเกรนแบบอุดมคติ (Ideal grain growth law) $D = kt^n$ .....16
รูปที่ 2.13	การเปลี่ยนแปลงของเลขยกกำลัง n ของ grain growth law .....16
รูปที่ 2.14	การกระจายตัวของเกรนตามฟังก์ชันของจำนวนด้านของเกรน โดยการสุ่มตัดระนาบของชิ้นงาน .....17

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.15	การกระจายตัวของเกรนตามฟังก์ชันของจำนวนด้านของเกรน โดยการสุ่มตัดระนาบของชิ้นงาน .....17
รูปที่ 2.16	ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่เกรน ต่อจำนวนด้านของเกรน .....18
รูปที่ 2.17	การกระจายตัวของเกรนจากผลกระบวนการเกิดเกรนโต.....18
รูปที่ 2.18	ลักษณะบริเวณ triple junction และมุมต่างๆใน dihedral angle.....19
รูปที่ 2.19	รูปแบบการหดตัวของเกรนใน 2 มิติ จนกลายเป็น triple junction .....19
รูปที่ 2.20	Chemical Potential ที่แตกต่างกันที่ถูกกั้นด้วยขอบเกรน.....20
รูปที่ 2.21	ขอบเกรนระหว่างเกรน I ที่ผ่านการอบแล้ว และเกรน II ที่ผ่านการแปรรูปเย็นมา.....21
รูปที่ 2.22	element ของพื้นผิวโค้งทรงกระบอกที่จำลองสำหรับขอบเกรน.....22
รูปที่ 2.23	การโตขึ้นของเกรนอะลูมิเนียม.....22
รูปที่ 2.24	การเคลื่อนที่ของขอบเกรน ขณะเกิดการโตขึ้นของฟองสบู่ .....23
รูปที่ 2.25	การกระจายความถี่ของค่าแรงตึงผิว $\gamma$ ของขอบเกรนของสาม โครงสร้างที่แตกต่างกัน.....24
รูปที่ 2.26	การรวมกันทางรูปร่างของเกรน 2 และ 4 .....25
รูปที่ 2.27	การรวมตัวกันของ 2 เกรนที่มีการจัดเรียงตัวที่แตกต่างกัน โดยเป็นลักษณะที่มีเกรนหนึ่งเกรนใดหรือทั้ง 2 เกรนหมุนตัวเพื่อเข้าหาเพื่อ ให้ได้การจัดเรียงตัวที่ตรงกัน.....25
รูปที่ 2.28	ลักษณะสี่ประเภทของการรวมตัวกัน.....26
รูปที่ 2.29	ลักษณะ 5 รูปแบบพื้นฐานทางเรขาคณิตในการรวมตัวกันของเกรน(สามมิติ) .....27
รูปที่ 2.30	ลำดับขั้นการรวมตัวกันของเกรนชนิดคอคอด ซึ่งเกิดขึ้นได้ไม่บ่อยนัก.....28
รูปที่ 2.31	ลักษณะการเกิดคอคอด จากการรวมตัวแบบ geometrical coalescence ที่ไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานผลึกเดี่ยว silicon-iron ที่ถูกแปรรูปเย็นมา.....28
รูปที่ 2.32	ภาพลำดับภาพที่สังเกตได้จากกล้อง of x-ray reflection microscope ของเกรนคู่หนึ่ง โดยแบ่งได้ 3 ขั้นตอนของการรวมตัวขณะทำการอบ .....29
รูปที่ 2.33	ลักษณะของเกรนทองเหลือง(beta brass)จริงๆที่ถูกแกะออกมา ซึ่งเป็นเกรนที่ยังไม่มีการรวมตัว.....29

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.34	ลักษณะของเกรนทองเหลือง(beta brass)จริงๆที่ถูกแกะออกมา ซึ่งเป็นเกรนที่เกิดการรวมตัวแล้ว.....29
รูปที่ 2.35	แพทเทอร์นของการเกิด peak ณ ตำแหน่งมุมต่างๆ ในอะลูมิเนียม.....31
รูปที่ 2.36	ระนาบอะตอมเดี่ยว โดยมีลำรังสีตกกระทบ.....32
รูปที่ 2.37	ระนาบอะตอมหลายชั้น โดยมีลำรังสีตกกระทบ.....33
รูปที่ 2.38	การจัดเรียงของชิ้นงานขณะลำรังสีตกกระทบและลำรังสีสะท้อน เพื่อบันทึกผล.....34
รูปที่ 3.1	โครงสร้างและส่วนประกอบของระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่สร้างขึ้น.....35
รูปที่ 3.2	โครงสร้างและส่วนประกอบของระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่สร้างขึ้น.....36
รูปที่ 3.3	โครงสร้างและส่วนประกอบของระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่สร้างขึ้น.....36
รูปที่ 3.4	แผนผังการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ.....37
รูปที่ 3.5	แผนผังการทำงานของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง.....38
รูปที่ 3.6	อุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่างระหว่างอบอ่อนแบบวัฏจักร เมื่อให้ชิ้นงานหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา 5 นาที.....39
รูปที่ 3.7	ตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึกในระหว่างการทดลอง .....40
รูปที่ 4.1	ลำดับขั้นตอนการอบชิ้นงาน.....42
รูปที่ 4.2	ค่าขนาดเกรนเฉลี่ยจากขั้นตอนการหาเงื่อนไขการทดลอง .....43
รูปที่ 4.3	ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแบบใหม่ (ตาราง grid มีขนาด 55 ไมครอน) .....45
รูปที่ 4.4	ลักษณะเนื้อชิ้นงานแผ่นรีดเย็นมาจากโรงงาน 50x .....46
รูปที่ 4.5	ลักษณะเนื้อชิ้นงาน โดยผ่าน as receive+Transverse rolled 73%@50X .....47
รูปที่ 4.6	ภาพชิ้นงานที่ได้จากการ Pre-anneal แบบใหม่ .....48
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิในการทำการอบที่เกิดขึ้นในขบวนการต่างๆ ที่มีผลต่อความแข็งของตัววัสดุ .....49
รูปที่ 4.8	ลักษณะเนื้อชิ้นงาน โดยผ่าน As receive+ Transverse rolled73% + Annealed 500C 3min @ 50X .....49
รูปที่ 4.9	ลักษณะเนื้อชิ้นงาน โดยผ่าน As receive+ Transverse rolled73% + Annealed 500C 3.5min @ 50X .....50

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.10	ลักษณะเนื้อชิ้นงาน โดยผ่าน As receive+ Transverse rolled73% + Annealed 500C 4min @ 50X .....50
รูปที่ 4.11	แสดงลักษณะเนื้อชิ้นงาน โดยผ่าน As receive+ Transverse rolled73% + Annealed 500C 4min @ 200X .....51
รูปที่ 4.12	ลักษณะเนื้อชิ้นงาน โดยผ่าน As receive+ Transverse rolled73% + Annealed 500C 4min @ 400X .....51
รูปที่ 4.13	พฤติกรรมการเกร่งตัวของอนุกรมุมิ ขณะทำการอบแบบวัฏจักร .....53
รูปที่ 4.14	ขนาดเกรนเฉลี่ยแตกต่างกันของชิ้นงาน ที่ผ่านการเย็นตัวในน้ำและอากาศ.....53
รูปที่ 4.15	ลำดับขั้นตอนการขัดชิ้นงาน.....54
รูปที่ 4.16	ส่วนประกอบโดยรวมของกล้อง Optical Microscope .....55
รูปที่ 4.17	กำลังขยายของ Grid ต่อขนาด Scaleจริง @ 50X.....56
รูปที่ 4.18	กำลังขยายของ Grid ต่อขนาด Scaleจริง @ 100X.....56
รูปที่ 4.19	กำลังขยายของ Grid ต่อขนาด Scaleจริง @ 200X.....57
รูปที่ 4.20	กำลังขยายของ Grid ต่อขนาด Scaleจริง @ 400X.....57
รูปที่ 4.21	การหักเหของแสงเมื่อผ่าน Polariser และ Analyser โดยชิ้นงานเป็น Anisotropic Material.....58
รูปที่ 4.22	การหักเหของแสงเมื่อผ่าน Polariser และ Analyser โดยชิ้นงานเป็นลิ้ม Quartz (Anisotropic).....59
รูปที่ 4.23	เครื่อง HV – 5 สำหรับวัดความแข็งของชิ้นงาน.....59
รูปที่ 4.24	Test Pattern for Intercept Counting.....60
รูปที่ 4.25	95% Confidence Internal Multipliers, t .....62
รูปที่ 4.26	การประยุกต์ใช้ แผ่นฟิล์มนับจุดตัดของของเกรนกับเส้นรอบวง บนหน้าจอ คอมพิวเตอร์.....63
รูปที่ 4.27	ตัวอย่างการคำนวณ ของชิ้นงานที่ผ่านการอบ Recrystallisation ที่ 500C 4min @ 400X.....64
รูปที่ 5.1	แสดงลำดับขั้นตอนการอบเริ่มจากขั้นตอนแปรรูปเย็นจนถึงการโตขึ้นของเกรน.....65
รูปที่ 5.2	ลักษณะเนื้อชิ้นงานแผ่นรีดเย็นมาจากโรงงาน 50X(Asreceive) แต่ละด้านของ Grid ยาว 222 um.....66
รูปที่ 5.3	ลักษณะเนื้อชิ้นงาน โดยผ่าน as receive+Transverse rolled73% @ 50X.....67

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.4	ลักษณะเนื้อชิ้นงาน โดยผ่าน As receive+ Transverse rolled73% + Annealed 500C 3.5min @ 50X.....67
รูปที่ 5.5	ลักษณะเนื้อชิ้นงาน โดยผ่าน As receive+ Transverse rolled73% + Annealed 500C 4min @ 50X.....68
รูปที่ 5.6	ค่าความแข็งที่ได้จากการอบแบบ Cyclic ในช่วง 350-400 , 400-450 และ 350-450 ที่ Hold Time 1 ถึง 6.....68
รูปที่ 5.7	ค่าความแข็งที่ได้จากการอบแบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 โดยใช้เวลารอบ 18, 30 และ 60 นาที.....69
รูปที่ 5.8	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Isothermal ที่เวลาอบต่างๆ.....70
รูปที่ 5.9	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 18 นาที.....70
รูปที่ 5.10	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 30 นาที.....71
รูปที่ 5.11	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 60 นาที.....71
รูปที่ 5.12	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 18 นาที โดยลักษณะของ Hold Time.....72
รูปที่ 5.13	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 30 นาที โดยลักษณะของ Hold Time.....72
รูปที่ 5.14	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 60 นาที โดยลักษณะของ Hold Time.....72
รูปที่ 5.15	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ในช่วง 350 – 400 c ตามลักษณะของ Hold Time.....73
รูปที่ 5.16	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ในช่วง 350 – 450 c ตามลักษณะของ Hold Time.....73
รูปที่ 5.17	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ในช่วง 400 – 450 c ตามลักษณะของ Hold Time.....74
รูปที่ 5.18	เค้าโครงของค่า Standard Deviation ของการอบแบบ Cyclic เป็นเวลา 30 นาที.....74
รูปที่ 5.19	เค้าโครงของค่า Standard Deviation ของการอบแบบ Cyclic เป็นเวลา 18 นาที.....75

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 5.20	เค้าโครงของค่า Standard Deviation ของการอบแบบ Cyclic เป็นเวลา 60 นาที.....75
รูปที่ 5.21	ค่าความแข็งจากกระบวนการ Isothermal annealing และ Cyclic annealing ที่ผ่าน Pre-anneal แบบใหม่.....76
รูปที่ 5.22	ค่าความแข็งจากกระบวนการ Isothermal annealing และ Cyclic annealing ที่ผ่าน Pre-anneal แบบใหม่(ขยาย).....76
รูปที่ 5.23	ค่าความแข็งชิ้นงานที่ผ่าน Pre-anneal แบบใหม่.....77
รูปที่ 5.24	ขนาดเกรนเฉลี่ย โดยที่มีเส้นสีเขียวแสดงถึงชิ้นงานที่ผ่าน ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแบบใหม่ (Ultrafine.....79
รูปที่ 5.25	ลักษณะการโตขึ้นของเกรนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Pre-Annealing แบบใหม่ แล้วตามด้วยกระบวนการ Isothermal และ Cyclic Annealing.....80
รูปที่ 5.26	แสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนระนาบต่างๆ ในช่วงเวลาการอบ 18, 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 350 °c.....81
รูปที่ 5.27	แสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนระนาบต่างๆ ในช่วงเวลาการอบ 18, 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 450 °c .....81
รูปที่ 5.28	แสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนระนาบต่างๆ ในช่วงเวลาการอบ 18, 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิช่วง 350-450 °c hold 1 นาที .....82
รูปที่ 5.29	แสดงผลของ Intensity ในระนาบต่างๆ ของช่วงเวลาการอบ 18, 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิช่วง 350-450 °c hold 6 นาที .....82
รูปที่ 5.30	แสดงชุดภาพตามลำดับขั้นตอนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ระนาบผลึก...85