บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาผลการอบแบบวัฏจักรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมเกรด 1100 หลังจากเกิดการตกผลึกใหม่ การอบแบบวัฏจักรทำโดยการให้ชิ้นงานตัวอย่างเคลื่อนที่สลับไปมาระหว่าง 2 อุณหภูมิ จากเตาความร้อน 2 ตัวที่สร้างขึ้น โดยมีตัวแปรในการควบคุม คือ เวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อน ขนาดเกรนตอนเริ่มต้น เวลาที่หยุดพักในแต่ละรอบของอุณหภูมิระหว่าง 350^{0}C และ 450 ^{0}C ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่ติดตั้งกล้องดิจิตอลถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งรวมถึงขนาดและจำนวนด้านของเกรน ผลการทดลองพบว่า การอบแบบวัฏจักรทำให้ขนาดเกรนเฉลี่ยโตกว่าการอบแบบอุณหภูมิเดียว ถึง 8-10 % เมื่อทำการอบแบบวัฏจักรระหว่างอุณหภูมิ 350^{0}C และ 450 ^{0}C เป็นเวลา 60 นาที โดยก่อนหน้านี้ต้องมีการเตรียมชิ้นงานให้มีเกรนขนาดเล็กเป็นพิเศษก่อน ส่วนทางด้านความแข็งของชิ้นงานแล้วโดยรวมไม่มีเปลี่ยนแปลง

ในการแสดงผลการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นผลของการหาเงื่อนไขการทดลอง และส่วนที่สองเป็นผลจากการทดลองขยายผล โดยทั้ง 2 ส่วนนี้จะได้ผ่านขั้นตอนและกรรมวิธีในการเตรียมชิ้นงานที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งหลักการของกรรมวิธีการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.1 โดยเริ่มต้นจากการแปรรูปเย็นตามด้วยการอบตกผลึกใหม่และทำการอบเพื่อศึกษาการโตขึ้นของเกรน

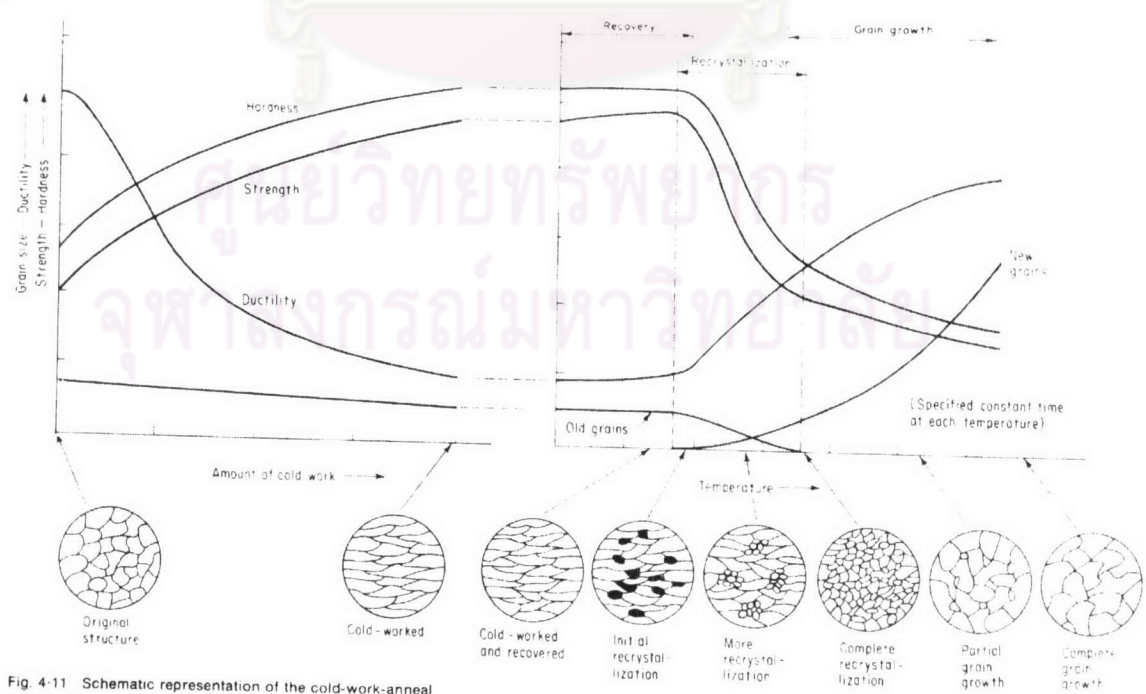


Fig. 4·11 Schematic representation of the cold-work-anneal cycle showing the effects on properties and microstructure. (From C. O. Smith, "The Science of Engineering Materials," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1969.)

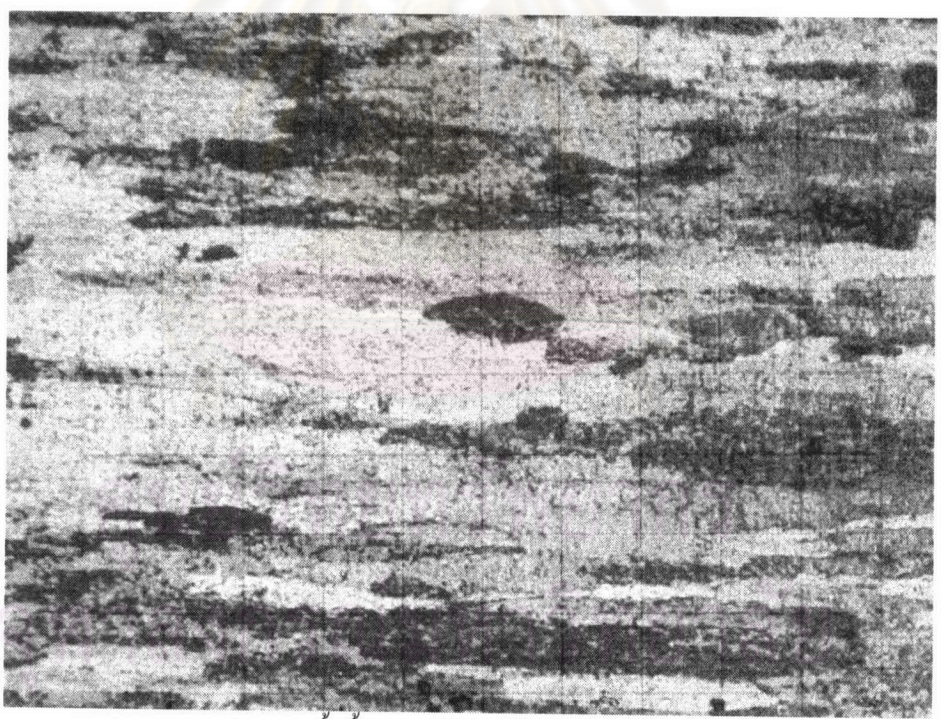
รูปที่ 5.1 แสดงลำดับขั้นการอบเริ่มจากขั้นตอนแปรรูปเย็นจนถึงการโตขึ้นของเกรน

5. 1 ผลการสืบหาเงื่อนไขการทดลอง

5.1.1 ผลการวัดความแข็ง

จากการนำชิ้นงานเดิมจากโรงงานไปทำการรีดเย็น เพิ่มเติมอีก 73% เพื่อให้เกิดการตกผลึกใหม่ให้ได้ขนาดเกรนที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม และกระจายอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งผลที่ได้ตามมา ก็คือ จะได้ความแข็งที่เพิ่มขึ้น จากเดิม 45.48 HV มาเป็น 52.39 HV เมื่อไปทำการอบเพื่อตกผลึกใหม่ที่ 500 °C เป็นเวลา 4 นาที จะได้โครงสร้างเกรนใหม่ที่สมบูรณ์ โดยที่ชิ้นงานดังกล่าวจะมีค่าความแข็งลดลงประมาณ 25.2 HV(ลดลงประมาณ 52%) ในขณะที่เมื่อเกิดการตกผลึกใหม่บางส่วนที่ 500 °C เป็นเวลา 3.5 นาที จะได้ค่าความแข็งประมาณ 29.5 HV(ลดลงประมาณ 44%)

จากรูปที่ 5.2,5.3 ,5.4 และ5.5 แสดงโครงสร้างเกรนของชิ้นงานที่ได้รับจากโรงงาน , ที่ผ่านการรีดเพิ่มอีก 73% , ทำการอบที่ 500 °C 3.5นาที และทำการอบที่ 500 °C 4นาที ตามลำดับ โดยรูปดังกล่าวทั้งหมดเป็นพัฒนาการตั้งแต่การรีดเย็นไปจนถึงการอบ ซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดการตกผลึกใหม่ และยังผลให้ความแข็งของชิ้นงานลดลง

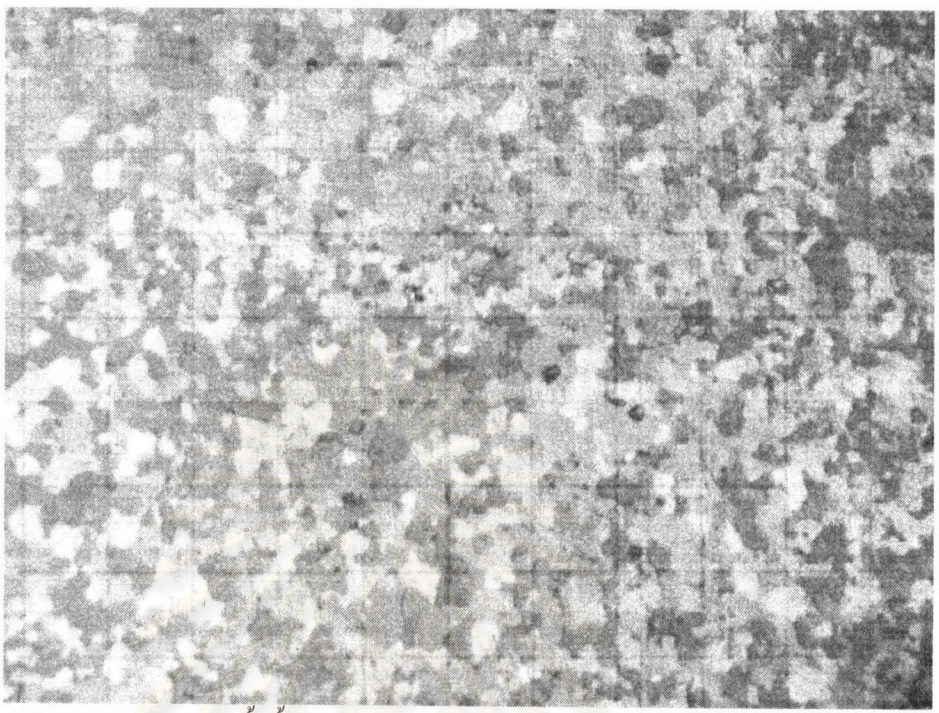


รูป 5.2 แสดงลักษณะเนื้อชิ้นงานแผ่นรีดเย็นมาจากโรงงาน 50X(As-receive)

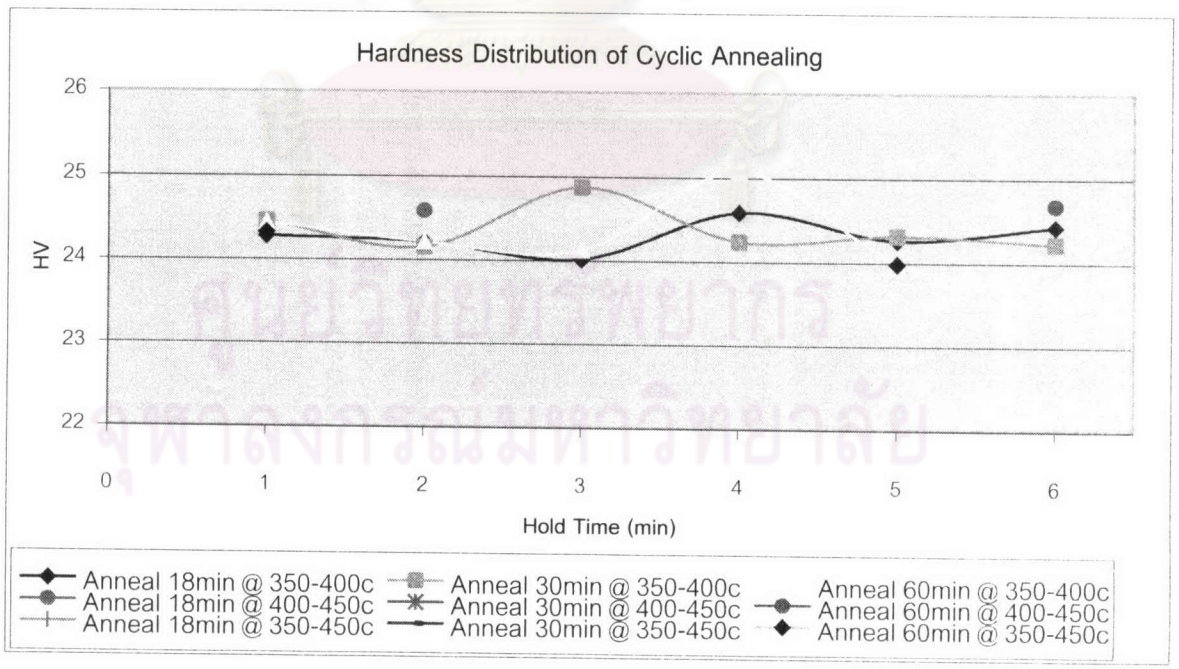
แต่ละด้านของ Grid ยาว 222 um

รูป 5.3 แสดงลักษณะเนื้อชิ้นงานโดยผ่าน As-receive+Transverse rolled73% @ 50X

รูป 5.4 แสดงลักษณะเนื้อชิ้นงานโดยผ่าน As-receive + Transverse rolled73% + Annealed 500C 3.5min @ 50X



รูป 5.5 แสดงลักษณะเนื้อชิ้นงานโดยผ่าน As-receive + Transverse rolled73% + Annealed 500C 4min @ 50X (ภาพนี้ใช้เทคนิค Panoramaในการตัดต่อภาพ)

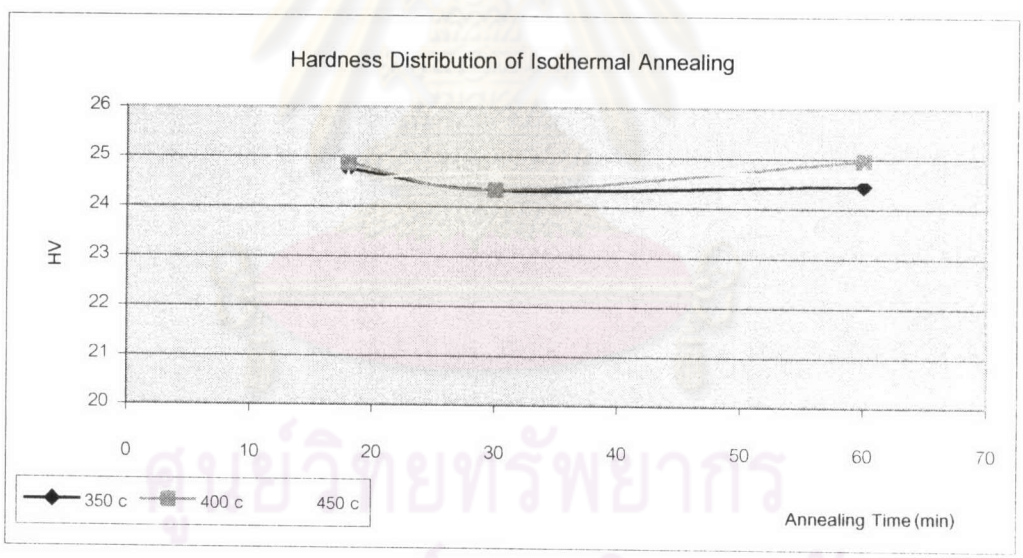


รูปที่ 5.6 แสดงค่าความแข็งที่ได้จากการอบแบบ Cyclic ในช่วง 350-400 , 400-450 และ 350-450 ที่ Hold Time 1 ถึง 6

จากการที่ได้ทดสอบการวัดความแข็ง ดังรูปที่ 5.6 พบว่า ค่าความแข็งไม่เปลี่ยนแปลง ไม่ว่าจะเป็นช่วงอุณหภูมิ 350-400 °C , 400-450 °C หรือ 350-450°C ค่าความแข็งเกาะกลุ่มกันในช่วงแคบๆ 24-25 HV ในทุกๆช่วง Hold Time และเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งของการอบแบบ Cyclic กับแบบ Isothermal ซึ่งจะพอสรุปได้ว่า การอบแบบ Cyclic ไม่มีผลทำให้ความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นหรือลดลง เนื่องจากความแข็งของทั้ง 2 แบบ อยู่ในช่วง 24-25 HV

	Hardness HV
As Recieve	45.48
Cool Work 73%	52.39
Anneal 3.5min	29.51
Anneal 4.0min	25.22

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงาน ในเงื่อนไขต่างๆ

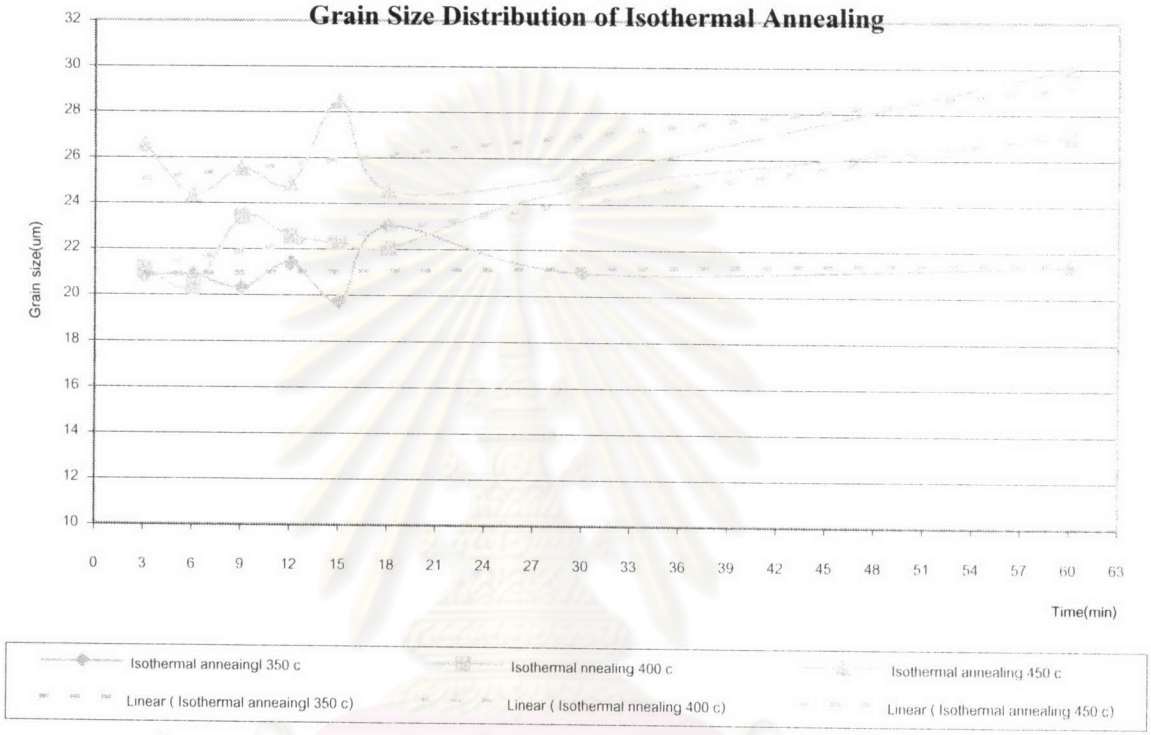


รูปที่ 5.7 แสดงค่าความแข็งที่ได้จากการอบแบบ Isothermal ที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 โดยใช้เวลาการอบ 18, 30 และ 60 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

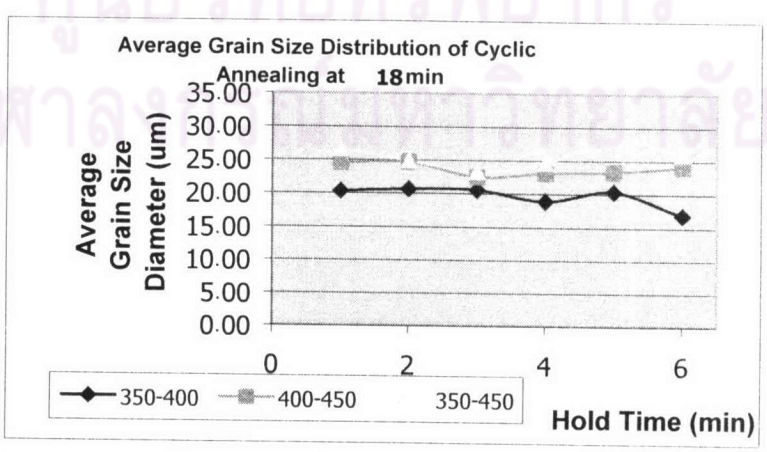
5.1.2 ผลการวัดขนาดเกรนเฉลี่ย

ผลการวัดขนาดเกรนเฉลี่ยของการกระจายตัวของการอบแบบ Isothermal พบว่ามีแนวโน้มที่เกรนจะมีขนาดเกรนเฉลี่ยที่โตขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น แต่ในอัตราการเพิ่มที่ไม่สูงมากนักอันเนื่องจากอุณหภูมิ ซึ่งอาจจะเป็นผลการโตแบบไม่ปกติ(Abnormal Grain Growth)ในบางจุดของชิ้นงาน ดังในรูปที่ 5.8

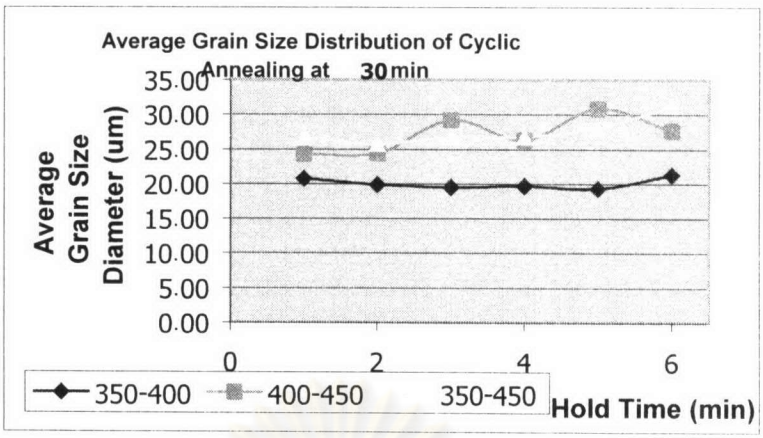


รูปที่5.8 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Isothermal ที่เวลาอบต่างๆ

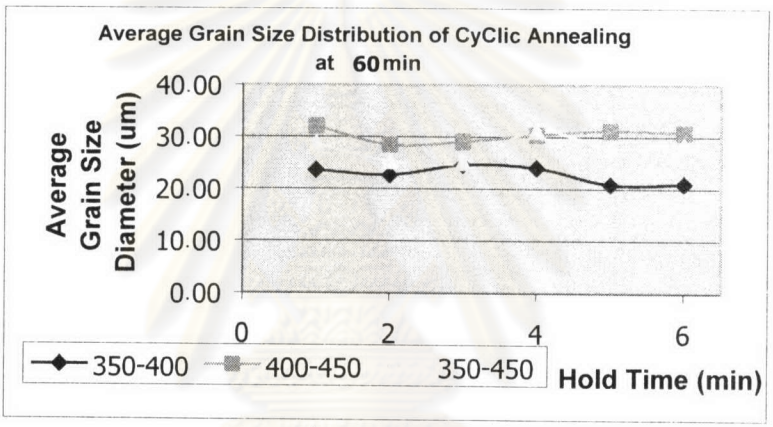
จากการเปรียบเทียบขนาดเกรนเฉลี่ยในกลุ่มเงื่อนไขอุณหภูมิ 350-450 ^{0}C และ 400-450 ^{0}C มีผลที่ใกล้เคียงกัน ขณะที่กลุ่ม 350-400 ^{0}C จะมีขนาดเกรนเฉลี่ยที่เล็กกว่าอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่5.9 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 18 นาที



รูปที่5.10 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 30 นาที



รูปที่5.11 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 60 นาที

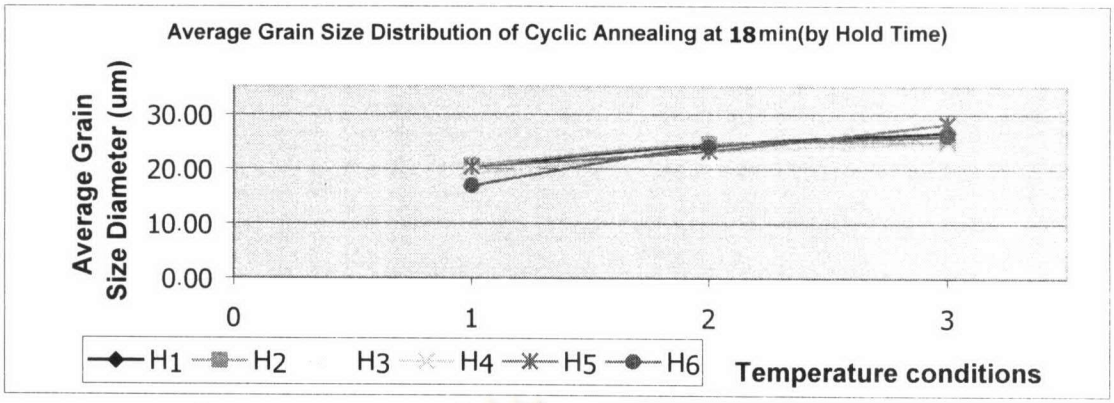
จากการจัดเรียงผลการทดลองด้วย Hold Time ดังรูป 5.9 ถึง 5.11 มีเงื่อนไขอุณหภูมิดังนี้

เงื่อนไขอุณหภูมิ ที่1 คือ ทำการอบ cyclic ในช่วง 350-400 ^{0}C

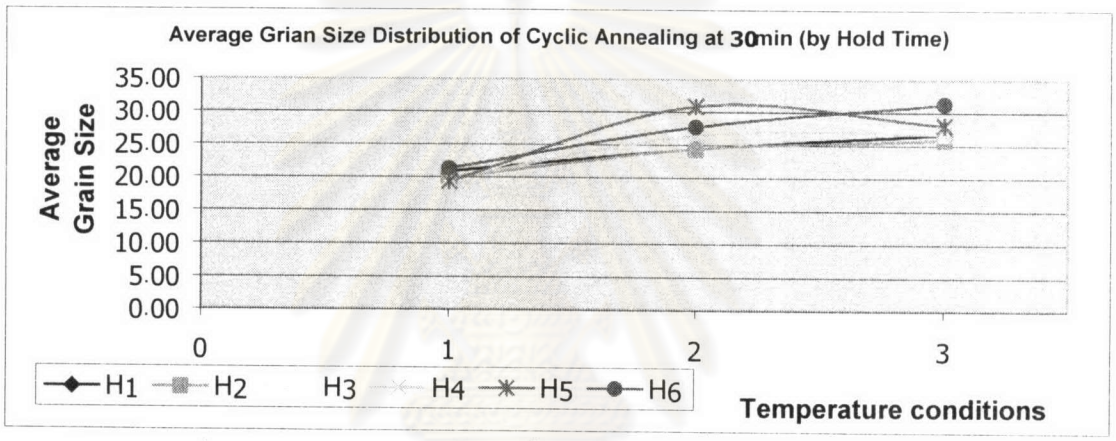
เงื่อนไขอุณหภูมิ ที่2 คือ ทำการอบ cyclic ในช่วง 400-450 ^{0}C

เงื่อนไขอุณหภูมิ ที่3 คือ ทำการอบ cyclic ในช่วง 350-450 ^{0}C

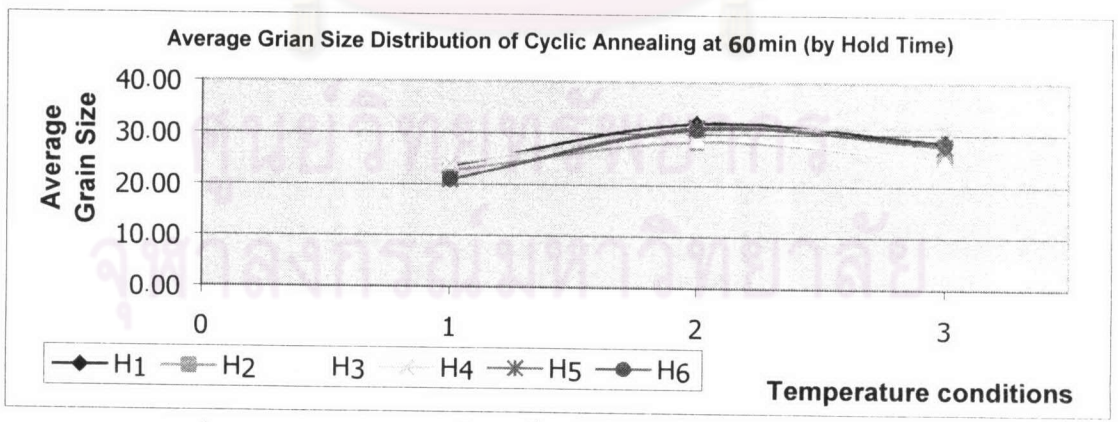
จากรูปได้พบแนวโน้มพิเศษที่ เงื่อนไข 350-450 ว่ามีการยกระดับกลุ่มขนาดเกรนเฉลี่ยสูงกว่าเงื่อนไขตัวอื่นเมื่อใช้เวลาอบรวม 18 นาที ดังรูป5.12 แต่เมื่อใช้เวลาการอบรวมมากขึ้นเป็น 30 นาทีขนาดเกรนเฉลี่ยจะเทียบเคียงได้กับเงื่อนไข 400-450 ดังรูป5.13 ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อใช้เวลาการอบรวมเป็น 60 นาที จะพบว่าขนาดเกรนเฉลี่ยจะลดระดับลงต่ำกว่าเงื่อนไข 400-450 ^{0}C ดังรูป 5.14



รูปที่5.12 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 18 นาที โดยลักษณะของ Hold Time

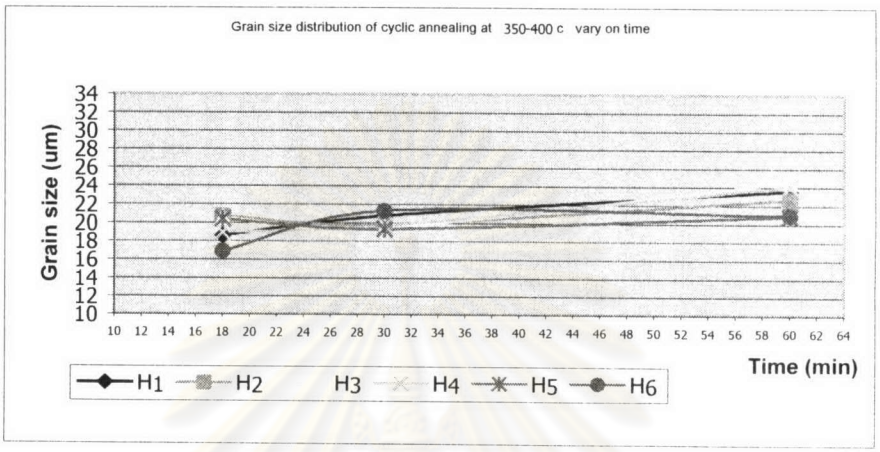


รูปที่5.13 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 30 นาที โดยลักษณะของ Hold Time

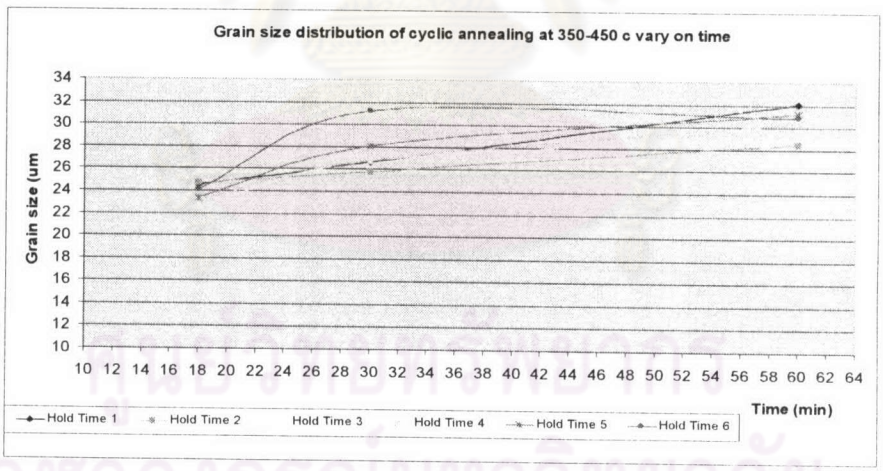


รูปที่5.14 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ที่ 60 นาที โดยลักษณะของ Hold Time

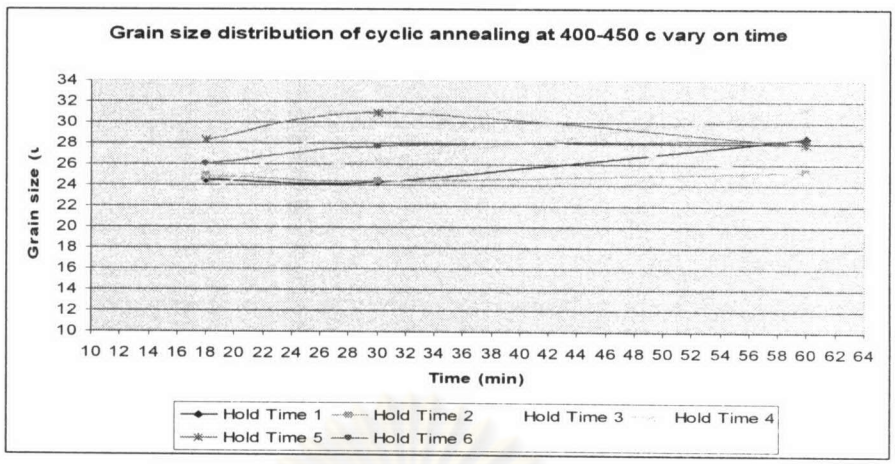
จากรูปชุดการกระจายของขนาดเกรนเฉลี่ย 5.15 ถึง 5.17ได้พบว่าการอบในช่วงอุณหภูมิ 350 – 450 °C และ 400 - 450 °C มีลักษณะที่ใกล้เคียงกันแต่ต่างกันตรงที่ขนาดเกรนของเวลาการอบรวม 18 นาที ของชุด 350 - 450 °C จะต่ำกว่า ส่วนทางด้านชุด 350 – 400 °C จะมีขนาดเกรนที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่5.15 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ในช่วง 350 – 400 c ตามลักษณะของ Hold Time

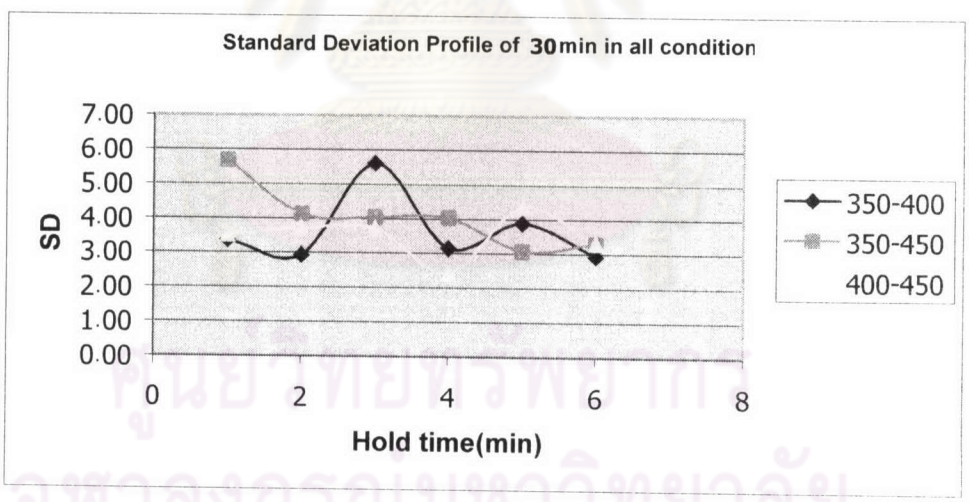


รูปที่5.16 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ในช่วง 350 – 450 c ตามลักษณะของ Hold Time

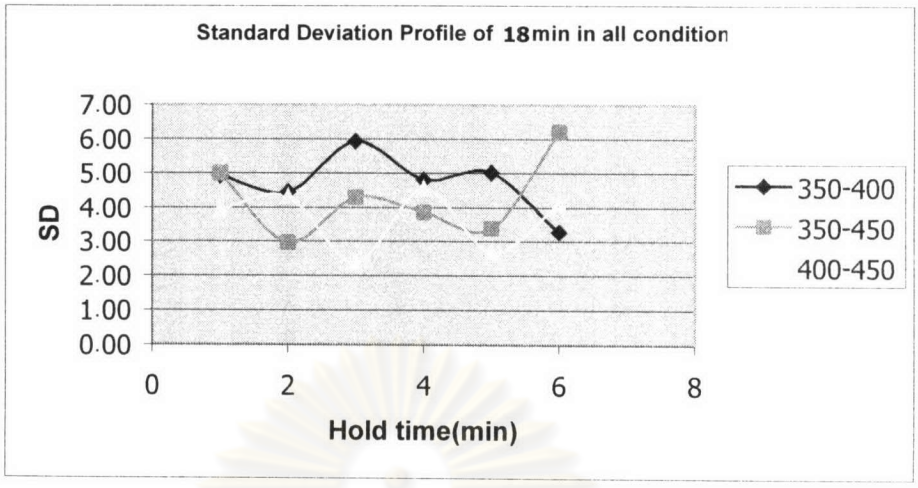


รูปที่5.17 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผ่านการอบแบบ Cyclic annealing ในช่วง 400 – 450 c ตามลักษณะของ Hold Time

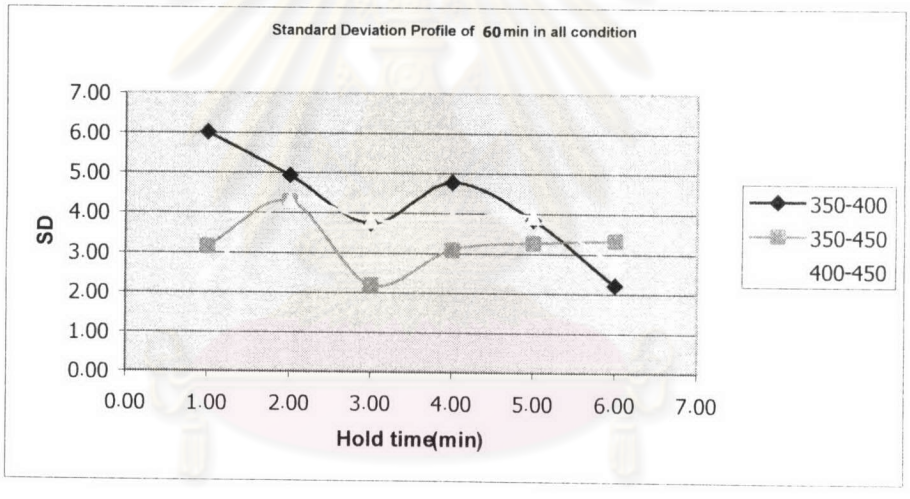
โดยภาพรวมของค่า SD ของชิ้นงาน ที่คำนวณหาค่าเฉลี่ยขนาดเกรนจะได้ค่า SD ที่ไม่เกิน 6.0 ซึ่งเป็นภาพรวมที่ไม่แย่นักและนอกจากนี้ทางมาตรฐาน ASTM แนะนำให้ Percent relative accuracy น้อยกว่า 10 ดังรูปที่ 5.18 – 5.20



รูปที่5.18 แสดงเค้าโครงของค่า Standard Deviation ของการอบแบบ Cyclic เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่5.19 แสดงเค้าโครงของค่า Standard Deviation ของการอบแบบ Cyclic เป็นเวลา 18 นาที

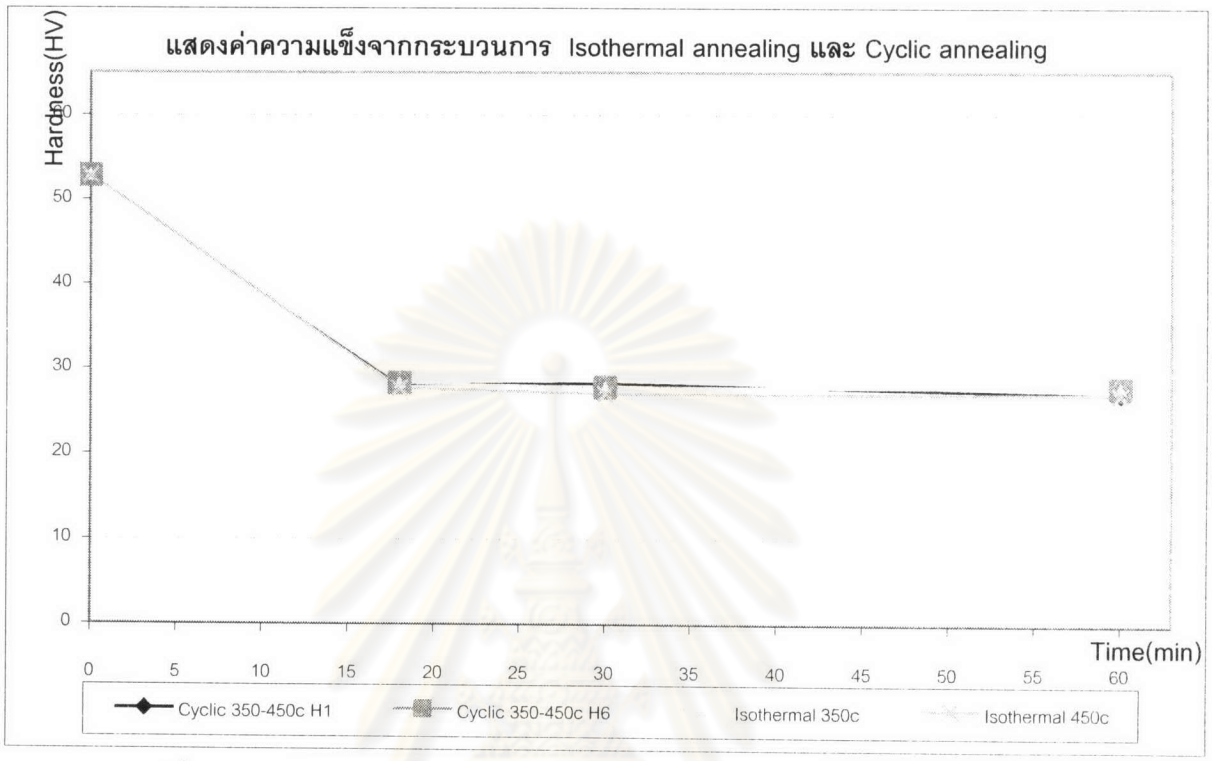


รูปที่5.20 แสดงเค้าโครงของค่า Standard Deviation ของการอบแบบ Cyclic เป็นเวลา 60 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

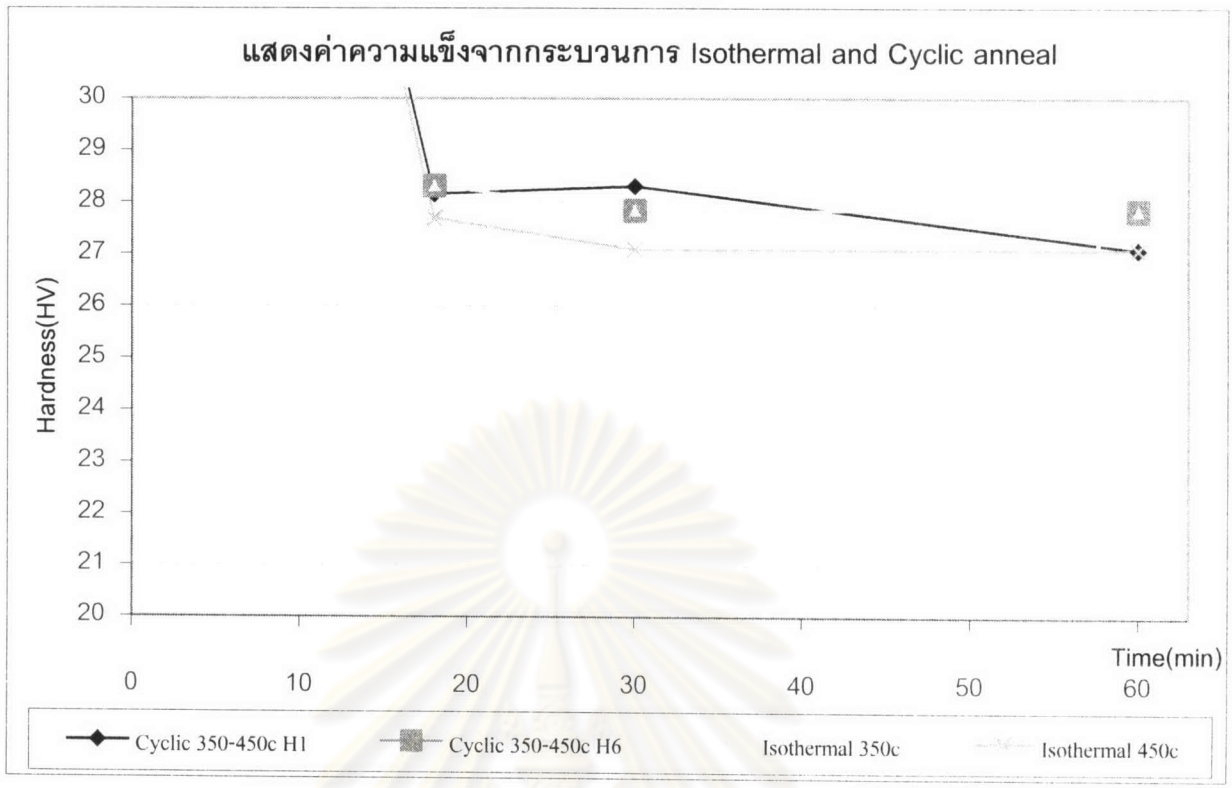
5.2 ผลการทดลองขยายผล

5.2.1 ผลการวัดค่าความแข็ง



รูปที่ 5.21 แสดงค่าความแข็งจากกระบวนการ Isothermal annealing และ Cyclic annealing ที่ผ่าน Pre-anneal แบบใหม่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.22 แสดงค่าความแข็งจากกระบวนการ Isothermal annealing และ Cyclic annealing ที่ผ่าน Pre-anneal แบบใหม่(ขยาย)

รีดเหลือ(%)	อบครั้งที่ 1	อบครั้งที่ 2	อบครั้งที่3 Anneal / Cyclic	ขนาดรอยกดจากโหลด 2 kg (mm)	HV
10	-	-	-	0.240	64.39
10	300c 10min	-	-	0.260	54.86
10	300c 10min	250c 2hr	-	0.265	52.81
10	300c 10min	250c 2hr	18 min H1	0.363	28.15
10	300c 10min	250c 2hr	18 min H6	0.362	28.30
10	300c 10min	250c 2hr	30 min H1	0.362	28.30
10	300c 10min	250c 2hr	30 min H6	0.365	27.84
10	300c 10min	250c 2hr	60 min H1	0.370	27.09
10	300c 10min	250c 2hr	60 min H6	0.365	27.84
10	300c 10min	250c 2hr	350c 18min	0.362	28.30
10	300c 10min	250c 2hr	450c 18min	0.366	27.69
10	300c 10min	250c 2hr	350c 30min	0.365	27.84
10	300c 10min	250c 2hr	450c 30min	0.370	27.09
10	300c 10min	250c 2hr	350c 60min	0.365	27.84
10	300c 10min	250c 2hr	450c 60min	0.370	27.09

รูปที่ 5.23 แสดงค่าความแข็งชิ้นงานที่ผ่าน Pre-anneal แบบใหม่

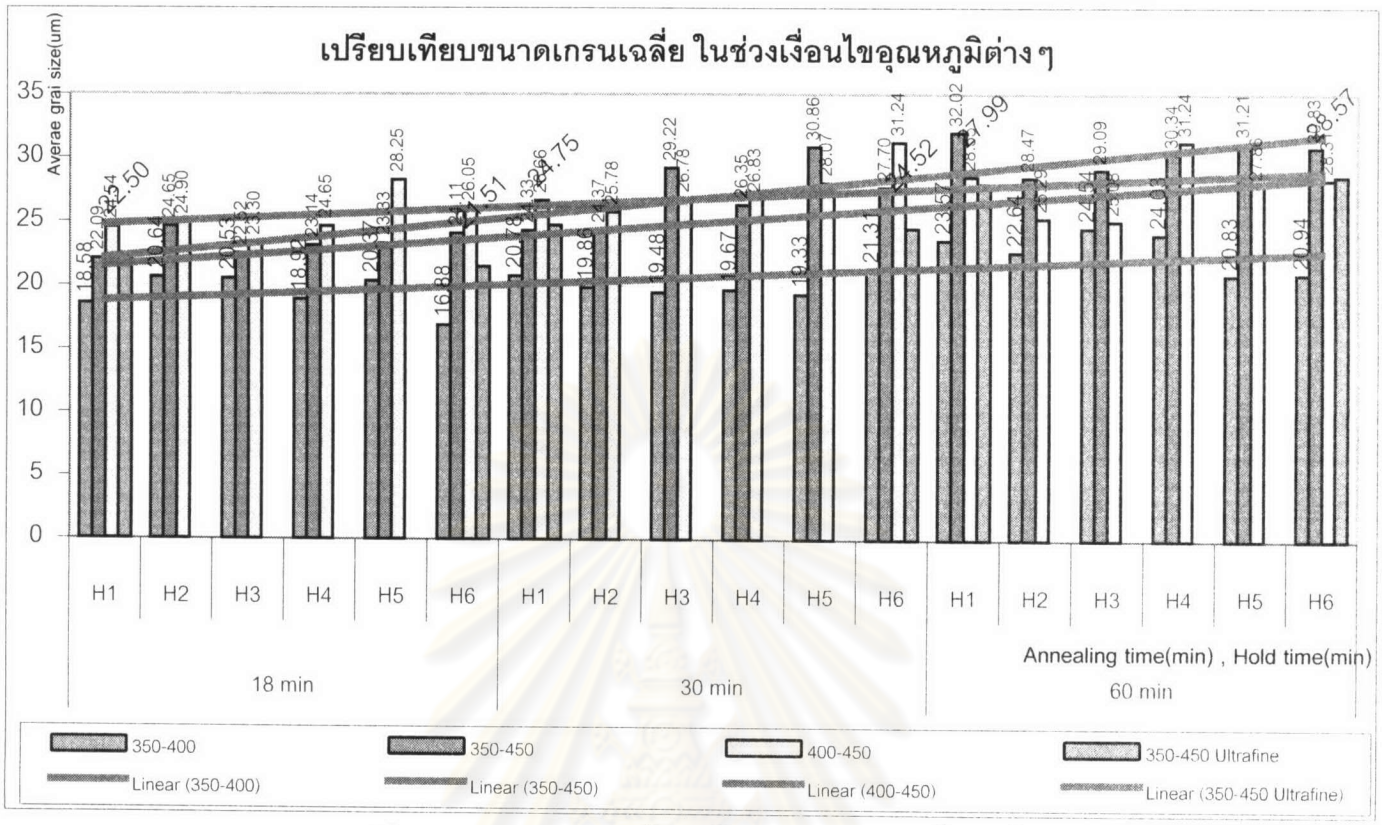
การทดลองวัดค่าความแข็งจากชิ้นงาน โดยใช้น้ำหนักในการกดที่ 2 กิโลกรัม กระทำลงบนชิ้นงานหนา 0.46 มิลลิเมตร ซึ่งได้ทำการทดสอบแล้วว่าไม่ทำให้เกิดรอยนูนอีกด้านของชิ้นงานหลังการถูกกดจากปลายหัวกดเพชร ทำการกด 3 จุด นำมาหาค่าเฉลี่ย ผลที่ได้จากการวัดนี้ค่อนข้างละเอียดอ่อน เพราะค่าความแข็งกระจายในช่วงแคบๆ 27-28 HV ซึ่งผิดพลาดได้ง่ายมากในการวัดจริง และในการวัดจริงต้องทำทุกอย่างกับตัวเครื่องวัดให้คงที่แม้แต่ตำแหน่งการมองเลนส์ในกล้องที่วัดยังต้องเป็นตำแหน่งเดิม หรือแม้แต่ตัวชิ้นงานเองต้องคงที่ด้วยเช่นกันในด้านแนวการรีดกับตำแหน่งเหลี่ยมหัวกดเพชรที่กดลงบนชิ้นงาน ซึ่งทั้งหมดนี้จะมีผลต่อการเปลี่ยนไปเป็นอีกค่าหนึ่งได้

ในขั้นตอนการตกผลึกใหม่ที่เกิดขึ้นในช่วง Pre-Annealing นี้ทำให้ความแข็งลดลง 18 % และตั้งแต่ขั้นตอนการรีดเย็นชิ้นงานจนถึงขั้นตอน Cyclic Annealing เรียบร้อยแล้ว จะเห็นว่าความแข็งชิ้นงานลดลงเกือบ 60 % ดังปรากฏในรูปที่ 5.23

ข้อมูลที่ได้รับนี้จะเห็นแนวโน้มที่สัมพันธ์กับขนาดเกรนที่ได้จากการวัดขนาดเกรนเฉลี่ยนี้ แต่ถึงกระนั้นก็ต้องคำนึงถึงค่า HV นี้กระจายในช่วงที่แคบมาก ในขั้นตอน Isothermal และ Cyclic Annealing

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2 ผลการวัดขนาดเกรนเฉลี่ย



รูปที่ 5.24 แสดงขนาดเกรนเฉลี่ยโดยที่มีเส้นสีเขียวแสดงถึงชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแบบใหม่ (Ultrafine)

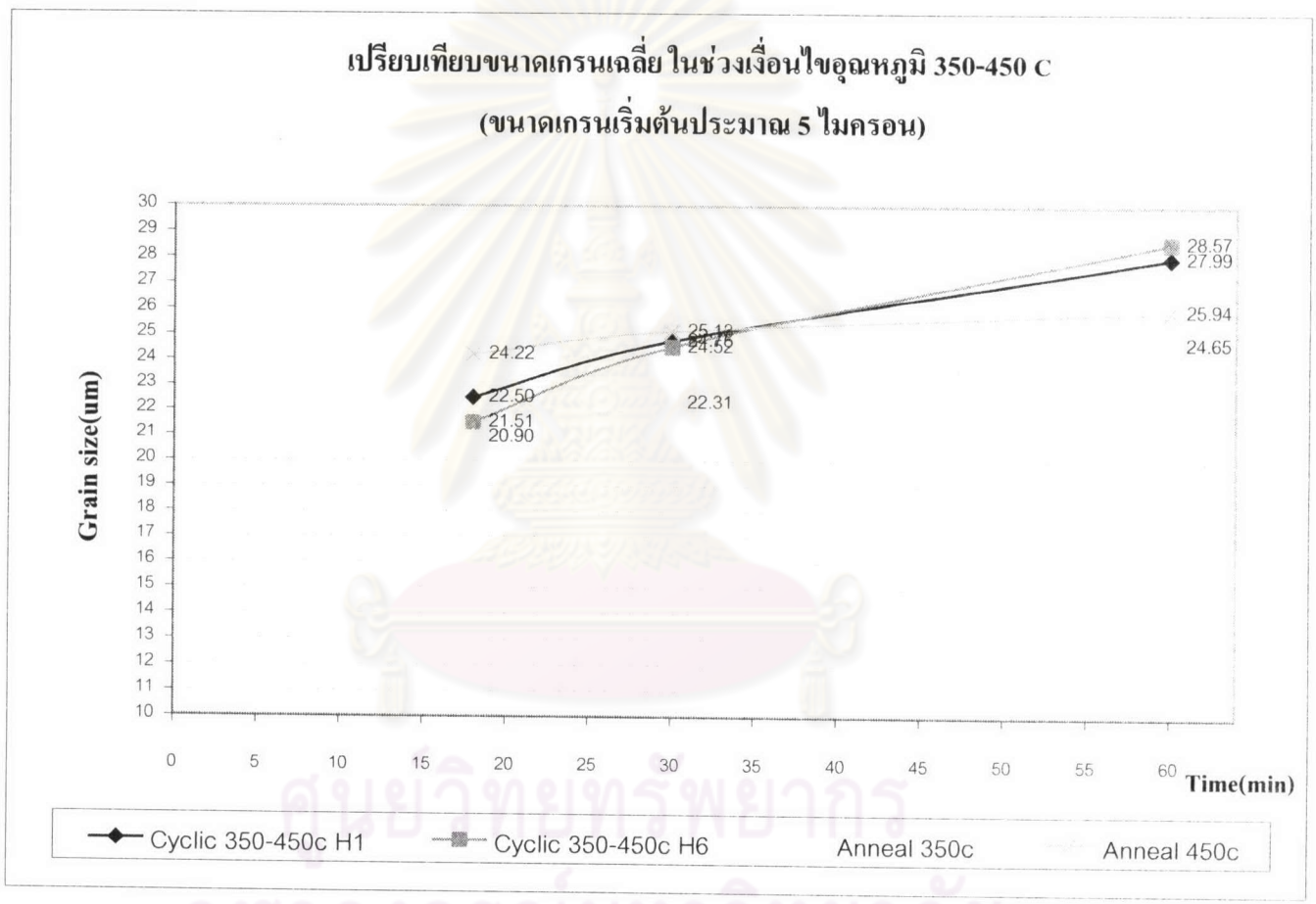
จากรูปที่ 5.24 เป็นแผนภูมิของชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแบบเดิม แต่มีเพียงกราฟแท่งสีเขียวเท่านั้นที่ผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานแบบใหม่ โดยที่ชิ้นงานทั้งหมดหลังจากผ่านขั้นตอนการ Pre-Annealing จะเข้าสู่กระบวนการ Cyclic Annealing ซึ่งขนาดเกรนเฉลี่ยที่ได้รับโดยภาพรวมมีขนาด 20 ถึง 30 ไมครอน

แต่ชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอน Pre-Annealing แบบเก่าจะมีขนาดประมาณเกือบ 20 ไมครอน ซึ่งขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอน Pre-Annealing แบบใหม่ มีขนาดเกรนประมาณ 5 ไมครอน ก่อนที่จะเข้ากระบวนการ Cyclic Annealing ด้วยเหตุผลนี้จะเห็นว่าเกรนในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Pre-Annealing แบบใหม่ มีอัตราการโตขึ้นของเกรนสูงกว่าแบบเก่าอย่างชัดเจนทั้งๆ ที่ใช้เวลาและอุณหภูมิในการอบเท่าเทียมกัน

เมื่อพิจารณาในส่วนของชิ้นงานที่ผ่านการ Pre-Annealing แบบใหม่ ที่ตามด้วยกระบวนการ Isothermal และ Cyclic Annealing ในรูปที่ 5.25 จะเห็นพฤติกรรมที่เรียกว่า Accelerated grain growth ซึ่งได้ทำการทดลองพบอัตราการโตขึ้นดังนี้

$$\text{cyclic 350-450 °C H6 โตกว่า Anneal 450c} = \frac{(28.57 - 25.94)}{25.94} \times 100 = 10\%$$

$$\text{cyclic 350-450 °C H1 โตกว่า Anneal 450c} = \frac{(27.99 - 25.94)}{25.94} \times 100 = 8\%$$

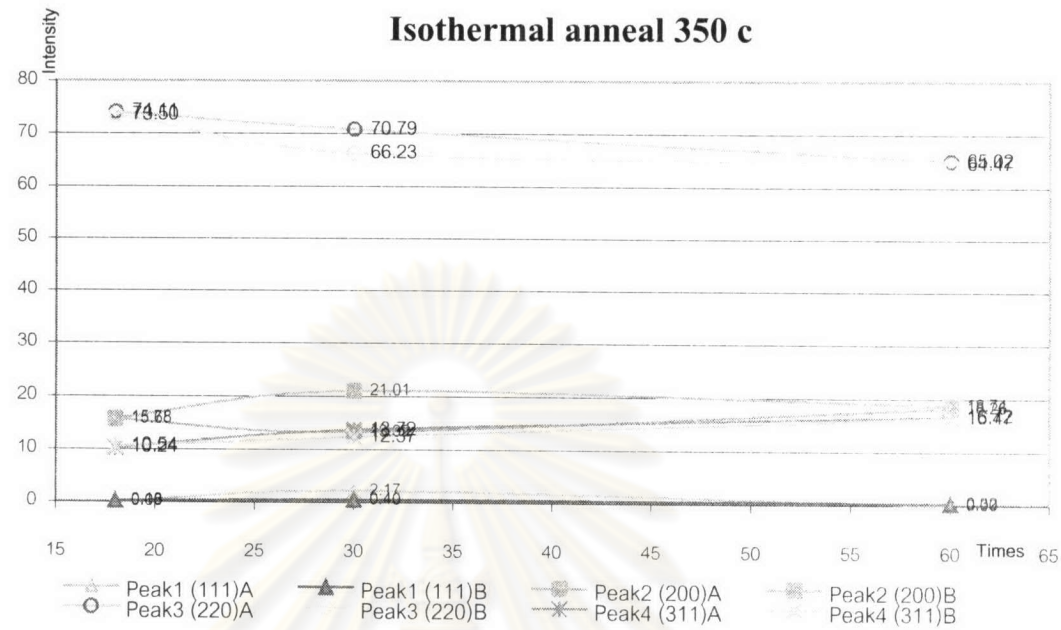


รูปที่ 5.25 แสดงลักษณะการโตขึ้นของเกรนของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการ Pre-Annealing แบบใหม่ แล้วตามด้วยกระบวนการ Isothermal และ Cyclic Annealing

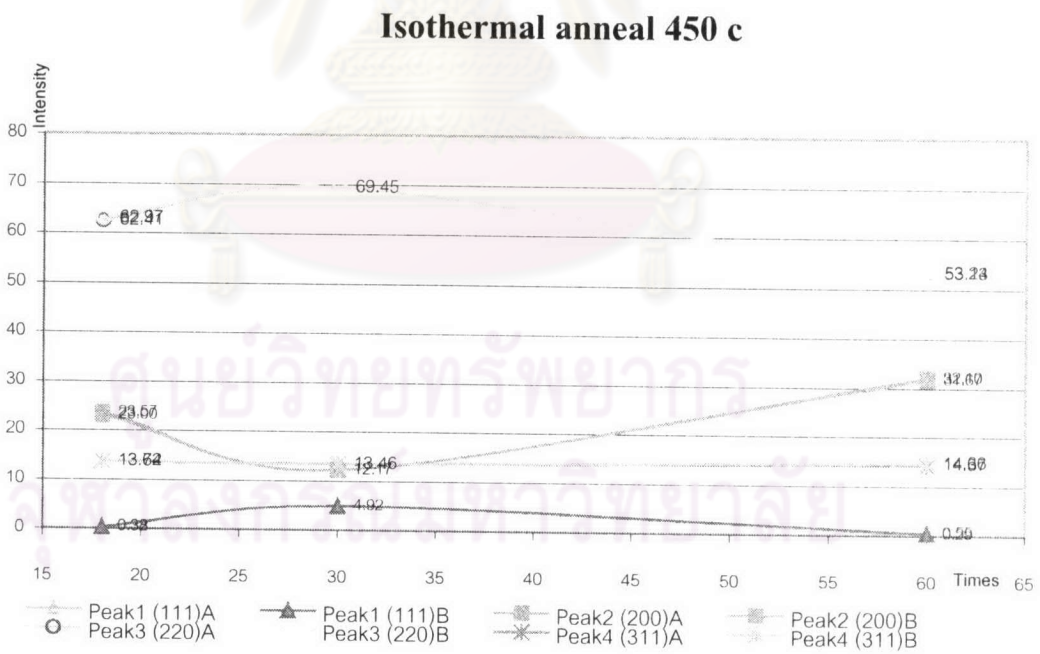
แล้วยังพบอีกว่า การทำ Cyclic Annealing ที่ค้างในแต่ละเตา 1 หรือ 6 นาที แทบไม่มีผลแตกต่าง คือ ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ย ซึ่งทั้งนี้ทั้งนั้นต้องทำการทดลองหาข้อเท็จจริงเพิ่มเติมต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

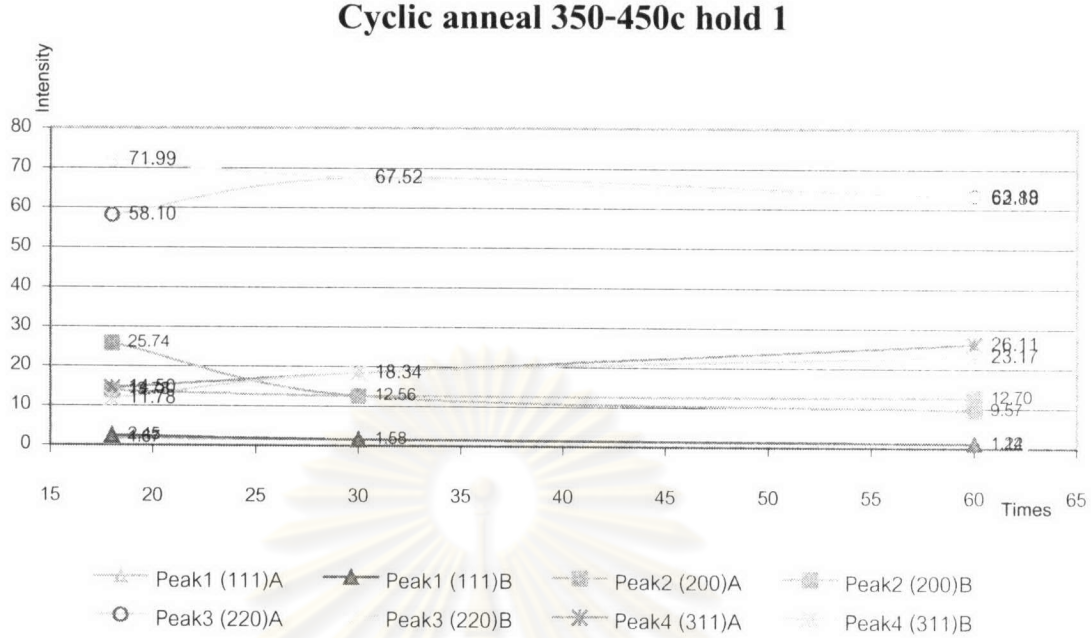
5.2.3 ผลการวิเคราะห์ XRD



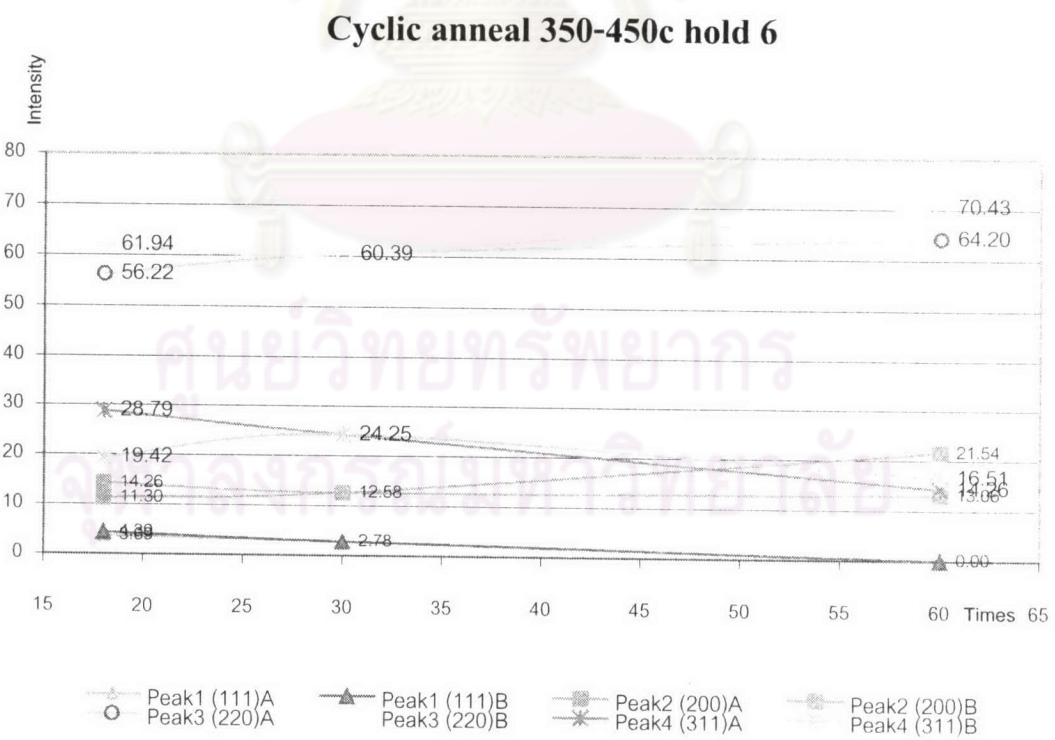
รูปที่5.26 แสดงเปอร์เซ็นของจำนวนระนาบต่างๆ ในช่วงเวลาการอบ 18, 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 350 °c



รูปที่5.27 แสดงเปอร์เซ็นของจำนวนระนาบต่างๆ ในช่วงเวลาการอบ 18, 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิ 450 °c



รูปที่5.28 แสดงเปอร์เซ็นของจำนวนระนาบต่างๆ ในช่วงเวลาการอบ 18, 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิช่วง 350-450 °c hold 1 นาที



รูปที่5.29 แสดงผลของ Intensity ในระนาบต่างๆ ของช่วงเวลาการอบ 18, 30 และ 60 นาที ที่อุณหภูมิช่วง 350-450 °c hold 6 นาที

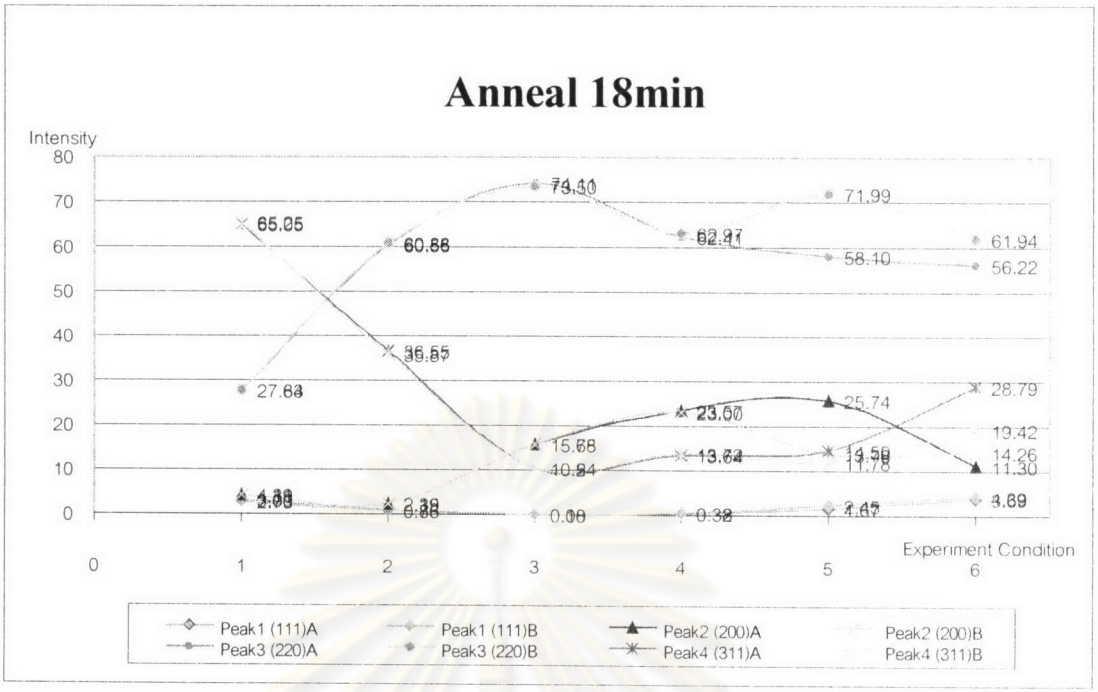
ตารางแสดงข้อมูลดิบที่มีผลต่อระนาบต่าง

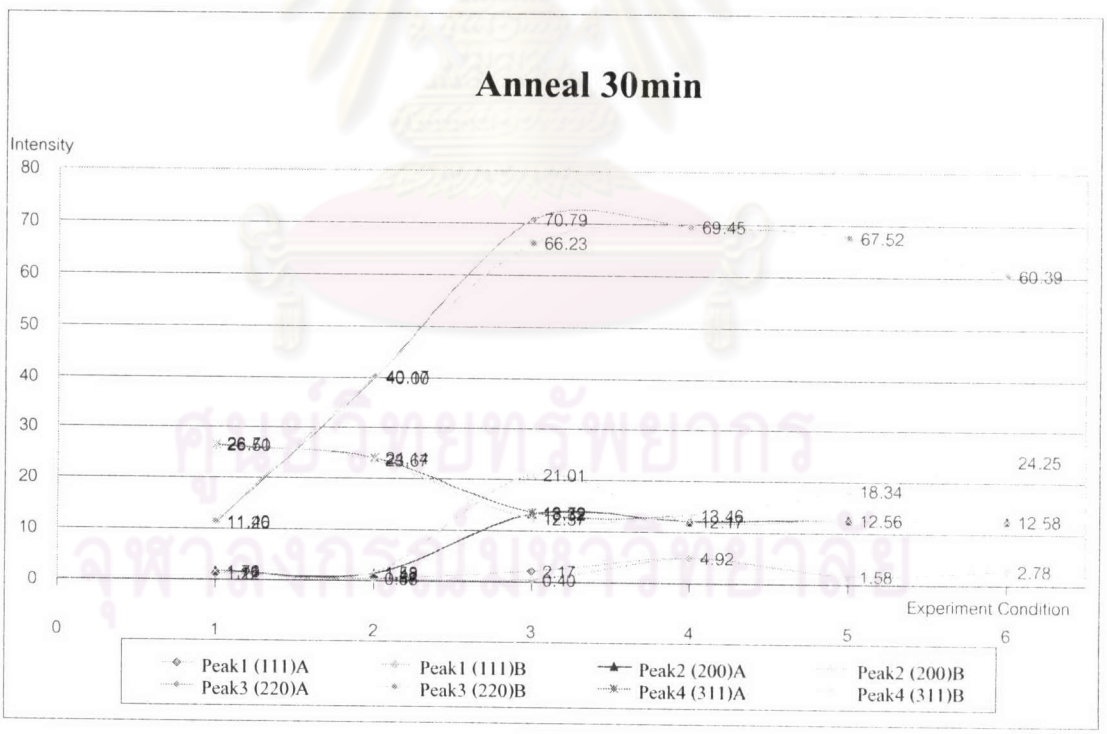
Annealing Condition	Annealing time	Peak1 (1,1,1)	Peak2 (2,0,0)	Peak3 (2,2,0)	Peak4 (3,1,1)
iso 350	18	0.06	10.35	48.63	6.85
	30	0.65	9.38	36.72	6.98
	60	0.10	11.15	39.02	10.00
iso 450	18	0.21	13.73	36.96	8.06
	30	1.98	4.91	28.00	5.43
	60	0.16	17.81	29.72	8.11
18H1	18	1.06	10.31	33.59	6.82
30h1	30	0.74	5.88	31.60	8.58
60h1	60	0.46	4.37	24.74	9.67
18H6	18	1.65	5.20	24.18	10.10
30h6	30	0.95	4.29	20.58	8.27
60h6	60	0.00	8.47	32.32	7.37
pure rolled	-	1.17	1.74	11.33	26.60
Pre anneal	-	0.52	1.50	40.08	23.90

ผลการวิเคราะห์ระนาบผลึกในชิ้นงานตัวอย่าง

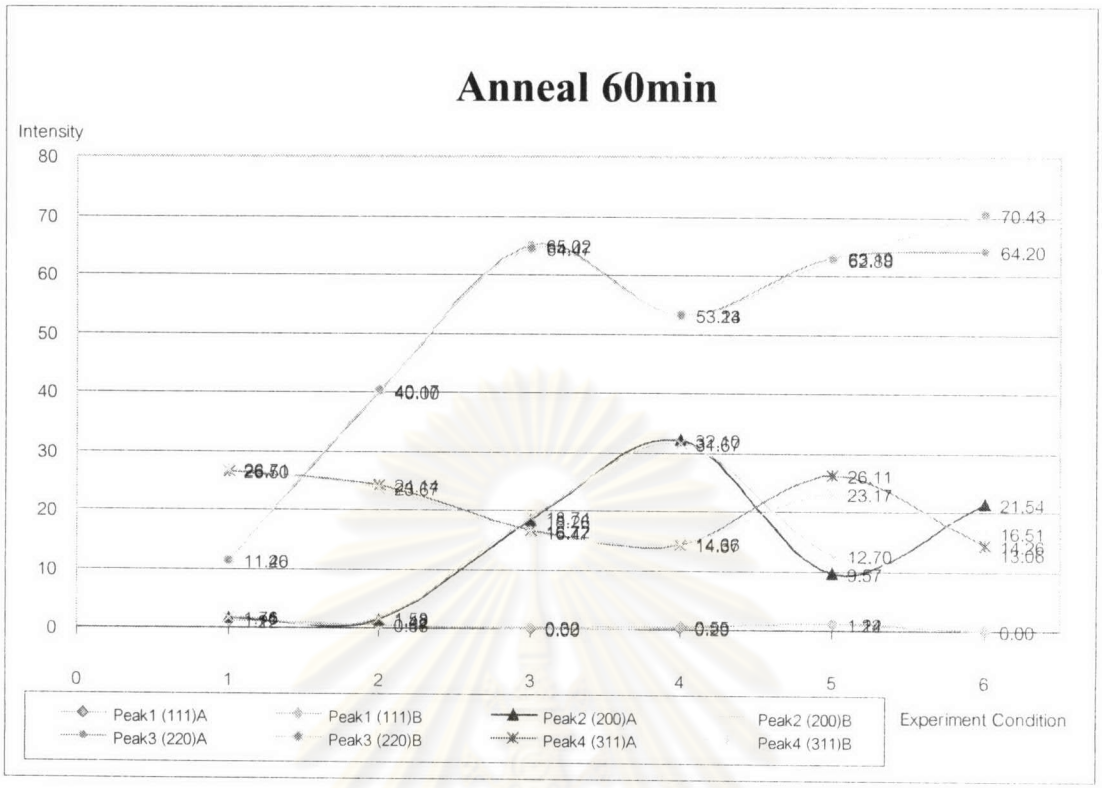
ผลที่มีต่อระนาบ (2,2,0)

ในการอบแบบ Isothermal anneal ที่ 450°C มีผลให้ปริมาณระนาบ(2,2,0)ลดลงจากอุณหภูมิ 350°C ในทุกๆเวลาการอบ 23.9%(อบ 18 นาที) 23.7%(อบ 30 นาที) และ 29.72%(อบ 60 นาที)อย่างชัดเจน





ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1 = Pure rolled **3 = Isothermal anneal 350** **5 = Cyclic anneal 18 hold 1**

2 = Pre-anneal **4 = Isothermal anneal 450** **6 = Cyclic anneal 18 hold 6**

รูปที่ 5.30 แสดงชุดภาพตามลำดับขั้นตอนการทดลองเพื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ระนาบผลึก

ทางด้านทางการอบแบบ Cyclic anneal ชนิดค้างในแต่ละเตา 1 นาทีได้ผลโดยรวมที่ลดระนาบนี้มากกว่า Isothermal anneal 450°C เสียอีก ซึ่งเป็นเรื่องที่น่าสังเกต

ผลที่มีต่อระนาบ (2,0,0)

ในการอบแบบ Isothermal anneal ที่ 450°C ไม่เป็นดังเช่นระนาบ(2,2,0) แต่กลับปรับตัวสูงขึ้นกว่าที่ 350 °C

ทางด้านทางการอบแบบ Cyclic anneal ทั้งสองชุดโดยรวมระนาบ(2,0,0)นี้ได้มีประมาณที่ลดกว่าแบบ Isothermal anneal ที่ 350°C และ 450°C โดยเฉพาะลดต่ำกว่า Isothermal anneal ที่ 350°C ประมาณ 1 เท่า

ผลที่มีต่อระนาบ (3,1,1)

โดยรวมเป็นลักษณะการแกว่ง ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน

ผลที่มีต่อระนาบ (1,1,1)

เป็นระนาบที่มีการสูญหาย และปรากฏขึ้นมาเพียงเล็กน้อย ซึ่งโดยรวมแล้วระนาบนี้จะปรากฏมากขึ้นเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่ 350°C

5.3 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและทดลองหาผลกระทบของการอบแบบวัฏจักรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์เกรด 1100 หลังการแปรรูปเย็น 90 เปอร์เซ็นต์และอบตกผลึกใหม่พบว่า

1. ช่วงอุณหภูมิการอบแบบวัฏจักรที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแตกต่างไปจากปกติ คือ ช่วงอุณหภูมิการอบ 350-450 ^{0}C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่มีความแตกต่างมากที่สุดในชุดการทดลองทั้งหมด
2. ช่วงอุณหภูมิการอบแบบวัฏจักร 350-450 ^{0}C ก่อให้เกิดขนาดเกรนเฉลี่ยที่สูงกว่าการอบที่อุณหภูมิเดียว 450 ^{0}C อยู่ 8 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์
3. การศึกษาระนาบผลึกพบว่ามีความสัมพันธ์กันของระนาบ (200) (220) และ(311) โดยที่ระนาบ(220)จะปรากฏในการอบแบบวัฏจักรน้อยกว่าในการอบที่อุณหภูมิเดียวที่เวลาการอบ 18 และ 30 นาที
4. ความแข็งของชิ้นงานโดยรวมไม่มีการเปลี่ยนใดๆที่เกิดจากการอบแบบวัฏจักร

5.4 ข้อเสนอแนะ

การอบอ่อนแบบวัฏจักรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการประยุกต์ใช้ความแตกต่างช่วงอุณหภูมิระหว่างเตาความร้อน 2 เตา ซึ่งมีตัวแปรอีกหลายตัวที่ยังไม่ได้ศึกษา เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน เวลาที่ค้างในแต่ละเตาที่มากกว่า 6 นาที เป็นต้น

ในการศึกษาระนาบผลึกยังพบอีกว่า ยังมีอีกหลายระนาบผลึกที่เกิดหักล้างกันของคลื่นแสงซึ่งไม่ปรากฏให้เราเห็นจากความจริงที่เกิดขึ้นทั้งหมด อย่างเช่น ระนาบ (201)หรือ(210) , (211) , (221) , (311) , ... เป็นต้น ซึ่งสิ่งนี้ที่ควรทำการค้นคว้าเพื่อเข้าใจกลไกการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย