

ผลกระทบจากการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการตกผลึกใหม่ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304



นายสมชาย เบ้าทอง

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2703-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECTS OF CYCLIC ANNEALING ON RECRYSTALLIZATION
IN 304 STAINLESS STEEL



Mr. Somchai Baotong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2002
ISBN 974-17-2703-8

| | |
|----------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | ผลกระทบจากการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการตกผลึกใหม่ในเหล็กกล้า ไร้สนิม 304 |
| โดย | นายสมชาย เมาทอง |
| สาขาวิชา | นิวเคลียร์เทคโนโลยี |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | อาจารย์เดโช ทองอร่าม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ ทวีปรั้งมีพร |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุปลัมภ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์เดโช ทองอร่าม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ ทวีปรั้งมีพร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

สมชาย เบ้าทอง : ผลกระทบจากการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการตกผลึกใหม่ในเหล็กกล้า
ไร้สนิม 304. (EFFECTS OF CYCLIC ANNEALING ON RECRYSTALLIZATION IN
304 STAINLESS STEEL) อ. ที่ปรึกษา : อ.เดโช ทองอร่าม, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ดร.
วิศิษฐ์ ทวีปริงษ์พร จำนวนหน้า 50 หน้า. ISBN 974-17-2703-8.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบจากการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 หลังจากเกิดการตกผลึกใหม่ การอบอ่อนแบบวัฏจักรทำโดยการให้ชิ้นงานตัวอย่างเคลื่อนที่สลับไปมาระหว่าง 2 อุณหภูมิ จากเตาความร้อน 2 ตัวที่สร้างขึ้น เวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อนและเวลาที่หยุดพักในแต่ละรอบของอุณหภูมิระหว่าง 850 และ 950 องศาเซลเซียส คือตัวแปรหลักของการศึกษาครั้งนี้ รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนถูกนำมาใช้เพื่อเปรียบเทียบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างซึ่งรวมถึงขนาดและจำนวนด้านของเกรน ผลการทดลองพบว่า การอบอ่อนแบบวัฏจักรทำให้เกิดการหน่วงอัตราการขยายขนาดของเกรนซึ่งแสดงให้เห็นโดยขนาดของเกรนเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 40 ถึง 50 ไมครอน เมื่อเวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อนเป็น 30 และ 120 นาที ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ขนาดของเกรนมีการกระจายตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อน จากข้อสังเกตนี้อาจอธิบายได้ว่าการเคลื่อนที่ของขอบเกรนลดลงระหว่างการอบอ่อนแบบวัฏจักรและแสดงให้เห็นจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนด้านของเกรนส่วนใหญ่จาก 4 ด้านไปเป็น 6 ด้าน เมื่อเวลาในการอบอ่อนเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบด้วย 10% กรดออกซาลิก หลังจากนำชิ้นงานตัวอย่างไปแช่ในไซท์ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าการอบอ่อนแบบวัฏจักรทำให้เกิดการต้านทานการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนได้ดีขึ้นเมื่ออบอ่อนเป็นเวลา 30 และ 60 นาทีที่จำนวนรอบมากขึ้น แต่เมื่ออบอ่อนนานขึ้นไปจนถึง 120 นาที พบว่าการอบอ่อนแบบวัฏจักรไม่ช่วยทำให้สมบัติด้านการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนดีขึ้น

ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

สาขาวิศวกรรมเทคโนโลยี

ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อผู้คิด.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4470578421 :MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: CYCLIC ANNEALING / RECRYSTALLIZATION / MICROSTRUCTURE

SOMCHAI BAOTONG : EFFECTS OF CYCLIC ANNEALING ON RECRYSTALLIZATION IN 304 STAINLESS STEEL. THESIS ADVISOR : DECHO THONG – ARAM, THESIS CO-ADVISOR : ASST.PROF.DR.VISIT THAVEEPRUNGSRIPORN, 50 PP. ISBN 974-17-2703-8

The objective of this thesis was to study effects of cyclic annealing on the microstructure of 304 stainless steel 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 850-950°C were the two main variables in this study. Scanning electron micrographs were used for microstructure comparison including grain size and number of sides per grain. Results show that cyclic annealing retarded the grain growth rate as evidenced by the fact that the total annealing time of 30 and 120 min led to the mean grain size between 40 - 50 μm range, respectively. However, the grain size variation is widening with increasing total annealing time. These observations may be explained by the reduction in grain boundary mobility during thermal cycling, and the fact that the number of grain sides increases from 4 to 6 as annealing time increases. Intergranular corrosion test in 10% oxalic acid after sensitized specimens at 650°C for 5 hrs. indicated that cyclic annealing improves intergranular corrosion resistance when annealing for 30 and 60 min with higher cyclic frequency. Longer annealing time up to 120 min., cyclic annealing has no beneficial effect on intergranular corrosion property.

Department Nuclear Technology

Student's signature.....

Field of study Nuclear Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2002

Co - advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ อาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำและช่วยเหลือด้านอิเล็กทรอนิกส์และการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิศิษฐ์ ทวีปรั้งมิตร ผู้แนะนำให้รู้จักโลกของวิศวกรรม ขอบเกรน ทั้งยังคงขอให้คำแนะนำในส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลและสนับสนุนด้านทุนการศึกษา ขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ ประธานและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยตรวจแก้วิทยานิพนธ์ รวมทั้งความคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอขอบคุณ นายสมยศ สรรพมังคลากร ผู้ร่วมออกแบบและสร้างเตาความร้อนสูง พร้อมทั้งระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง

ขอขอบคุณ นายเยี่ยม ไทยน้อย ที่ช่วยเหลือในด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ และการเชื่อมโยงสัญญาณกับคอมพิวเตอร์

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนอุดหนุนโครงการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์

ขอบคุณ บริษัทไทยน็อกซ์ สตีล จำกัด ที่อนุเคราะห์เหล็กกล้าไร้สนิม 304 เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอบคุณ นายประภาส คุณนาม, นายสมคิด กางแก้ว, และนายสาวัฒน์ มรกตจินดา และเพื่อนๆ ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี สำหรับมิตรภาพอันดีและความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ และขอบคุณนางสาวรุ่งทิwa จันทรสภา ที่คอยให้กำลังใจและเชื่อมั่นในตัวผู้เขียน

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ นายเปลื้อง เบ้าทอง บิดา และนางสนิท เบ้าทอง มารดา ที่ให้การสนับสนุนด้านการเงินและคอยให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญตาราง..... | ณ |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... | 2 |
| 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 3 |
| 2. การขอเสนอและการตกผลึกใหม่..... | 4 |
| 2.1 การขอเสนอที่อุดมหมุมคิงที่ค่าหนึ่ง..... | 4 |
| 2.2 การตกผลึกใหม่..... | 5 |
| 2.2.1 กลไกของการตกผลึกใหม่..... | 6 |
| 2.2.2 หลักการทั่วไปของการผลึกใหม่..... | 10 |
| 3. การขอเสนอแบบวัฏจักร..... | 11 |
| 3.1 เตาความร้อนสูง..... | 11 |
| 3.2 ระบบการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง..... | 12 |
| 3.3 การบันทึกข้อมูล..... | 13 |
| 4. วิธีการทดลอง..... | 15 |
| 4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง..... | 15 |
| 4.2 การเตรียมชิ้นงาน..... | 15 |
| 4.3 การขอเสนอที่อุดมหมุมคิงที่ค่าหนึ่ง..... | 15 |
| 4.4 การขอเสนอแบบวัฏจักร..... | 16 |
| 4.5 การวัดความแข็ง..... | 16 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค..... | 16 |
| 4.7 การทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน..... | 17 |
| 5. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล..... | 18 |
| 5.1 การอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง..... | 18 |
| 5.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดการตกผลึกใหม่..... | 18 |
| 5.1.2 ผลกระทบของเวลาต่อการเกิดการตกผลึกใหม่..... | 20 |
| 5.2 การอบอ่อนแบบวัฏจักรความร้อน..... | 25 |
| 5.3 การทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน..... | 34 |
| 6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ..... | 40 |
| 6.1 สรุปผลการทดลอง..... | 40 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ..... | 40 |
| รายการอ้างอิง..... | 41 |
| ภาคผนวก | 44 |
| ภาคผนวก ก..... | 45 |
| ภาคผนวก ข..... | 47 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 50 |

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

| ตาราง | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 | 14 |
| ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ | 18 |
| ตารางที่ 5.2 สรุปผลกระทบของเวลาต่อการเกิดการตกผลึกใหม่ | 20 |
| ตารางที่ 5.3 สรุปผลการอบอ่อนแบบวิญจักร..... | 25 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 แสดงผลกระทบที่เกิดกับโครงสร้างและสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปของโลหะ ที่ผ่านการรีดเย็น เนื่องจากการทำให้ร้อนขึ้น | 4 |
| รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ 5657 (0.8% Mg) หลังผ่านการรีดเย็น 85% | 5 |
| รูปที่ 2.3 แสดงสัดส่วนของการตกผลึกใหม่ที่เวลาอบอ่อนต่างๆ เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ | 6 |
| รูปที่ 2.4 แสดงการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิต่างๆ ของทองแดงบริสุทธิ์หลังจากรีดเย็น 98% | 6 |
| รูปที่ 2.5 แสดงเวลาการอบอ่อนกับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ ใน Zirconium ที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นแตกต่างกัน | 7 |
| รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนหลังเกิดการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิต่างๆ กับเปอร์เซ็นต์การรีดเย็นของ Alpha Brass | 8 |
| รูปที่ 2.7 ลักษณะการโตขึ้นของเกรนขณะเกิดการตกผลึกใหม่ในเวลาต่างๆ | 8 |
| รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่สร้างขึ้น..... | 11 |
| รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ..... | 12 |
| รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังการทำงานของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง..... | 13 |
| รูปที่ 3.4 แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่างระหว่างอบอ่อนแบบวัฏจักร เมื่อให้ชิ้นงานหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา 5 นาที..... | 13 |
| รูปที่ 3.5 ตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึกในระหว่างการทดลอง โดยหลักที่ 1 คือ เวลา และหลักที่ 2 คือ อุณหภูมิ..... | 14 |
| รูปที่ 4.1 เครื่อง HV – 5 สำหรับวัดความแข็งของชิ้นงาน | 16 |
| รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆ | 19 |
| รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เมื่อผ่านการรีดเย็น 30 % แล้วนำมาอบอ่อน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ a) อุณหภูมิห้อง b) 500 °C c) 700 °C และ d) 900 °C..... | 19 |
| รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับเวลาในการอบอ่อน ที่อุณหภูมิต่างๆ | 21 |
| รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับเวลาในการอบอ่อน ที่อุณหภูมิต่างๆ..... | 21 |
| รูปที่ 5.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน หลังจากการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา a) 10 นาที b) 30 นาที c) 60 นาที และ d) 120 นาที..... | 22 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 5.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน หลังจากการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา a) 10 นาที b) 30 นาที c) 60 นาที และ d) 120 นาที..... | 22 |
| รูปที่ 5.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน หลังจากการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา a) 10 นาที b) 30 นาที c) 60 นาที และ d) 120 นาที..... | 23 |
| รูปที่ 5.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน หลังจากการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 850 °C เป็นเวลา a) 10 นาที b) 30 นาที c) 60 นาที และ d) 120 นาที..... | 23 |
| รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับ $d^{-1/2}$ | 24 |
| รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln d$ กับ $\ln t$ | 24 |
| รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนเมื่ออบอ่อนเป็นเวลาต่างๆ..... | 26 |
| รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับจำนวนรอบ..... | 26 |
| รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับจำนวนรอบ..... | 27 |
| รูปที่ 5.14 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักร เป็นเวลา 30 นาที และหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) 2 นาที b) 5 นาที c) 10 นาที..... | 28 |
| รูปที่ 5.15 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักร เป็นเวลา 60 นาที และหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) 2 นาที b) 5 นาที c) 10 นาที..... | 28 |
| รูปที่ 5.16 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักร เป็นเวลา 120 นาที และหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) AR b) 5 นาที c) 10 นาที..... | 28 |
| รูปที่ 5.17 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออบอ่อนแบบวัฏจักร เป็นเวลา 30 นาที..... | 29 |
| รูปที่ 5.18 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออบอ่อนแบบวัฏจักร เป็นเวลา 60 นาที..... | 29 |
| รูปที่ 5.19 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออบอ่อนแบบวัฏจักร เป็นเวลา 120 นาที..... | 30 |
| รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนด้านของเกรนกับขนาดของเกรน..... | 30 |
| รูปที่ 5.21 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อให้ชิ้นงานตัวอย่าง หยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา 2 นาที..... | 31 |
| รูปที่ 5.22 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อให้ชิ้นงานตัวอย่าง หยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา 5 นาที..... | 31 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 5.23 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อให้ชิ้นงานตัวอย่าง หยุดค้ำที่แต่ละเตาเป็นเวลา 10 นาที..... | 32 |
| รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนด้านของเกรนกับลักษณะการเคลื่อนที่ของขอบเกรน.... | 32 |
| รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนด้านของเกรนกับพลังงานของขอบเกรน..... | 33 |
| รูปที่ 5.26 แสดงการกักร่อนบริเวณขอบเกรน ของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรเป็น เวลา 30 นาที และหยุดค้ำที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) 2 นาที b) 5 นาที และ c) 10 นาที...34 | |
| รูปที่ 5.27 แสดงการกักร่อนบริเวณขอบเกรน ของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรเป็น เวลา 60 นาที และหยุดค้ำที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) 2 นาที b) 5 นาที และ c) 10 นาที...34 | |
| รูปที่ 5.28 แสดงการกักร่อนบริเวณขอบเกรน ของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรเป็น เวลา 120 นาที และหยุดค้ำที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) AR b) 5 นาที และ c) 10 นาที.....34 | |
| รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง % Carbide Linkage กับเวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อน..... | 35 |
| รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง % Carbide Linkage กับจำนวนขอบ ในการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน..... | 35 |
| รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า S.D กับสัดส่วน CSLB | 36 |
| รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CFDA กับสัดส่วน CSLB..... | 36 |
| รูปที่ 5.33 แสดงจำนวนด้านของเกรนกับมุมที่ Triple Junction..... | 37 |
| รูปที่ 5.34 การกระจายของมุมในชิ้นงานตัวอย่างที่อบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 30 นาที..... | 38 |
| รูปที่ 5.35 การกระจายของมุมในชิ้นงานตัวอย่างที่อบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 60 นาที..... | 38 |
| รูปที่ 5.36 การกระจายของมุมในชิ้นงานตัวอย่างที่อบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 120 นาที..... | 39 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อายุการใช้งานของโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ถูกกำหนดโดยอัตราการเสื่อมสภาพของวัสดุ [1] เนื่องจากวัสดุถูกใช้งานที่อุณหภูมิสูงและรับรังสีในปริมาณสูงตลอดเวลา ทำให้สมบัติต่างๆ ของวัสดุเปลี่ยนแปลงไป มีผลทำให้อายุการใช้งานสั้นกว่าการใช้งานปกติ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติของวัสดุให้ดีขึ้น เพื่อลดอัตราการเสื่อมสภาพของวัสดุลง

เหล็กกล้าไร้สนิม 304 เป็นวัสดุชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เพราะมีสมบัติทนต่อการกัดกร่อนได้ดีและสามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงได้ ขณะเดียวกันพบว่าเหล็กกล้าไร้สนิม 304 เมื่อนำไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิ 450 – 850 องศาเซลเซียส เช่นการเชื่อมประกอบโครงสร้าง เป็นต้น จะมีการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน หรือการลดลงของปริมาณโครเมียมบริเวณขอบเกรนอันเนื่องมาจากผลของรังสี [2,3] ทำให้ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนลดลง จากการศึกษางานวิจัยพบว่าการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ขึ้นกับโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 [4,5,6,7]

การปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ให้มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้น สามารถทำได้โดยการนำเหล็กกล้าไร้สนิม 304 มาผ่านกระบวนการความร้อนเชิงกล[8,9,10] ซึ่งเป็นการให้ความเครียดกับวัสดุแล้วนำมาให้ความร้อน แต่กระบวนการนี้ให้ผลดีเมื่อทำซ้ำหลายๆ ครั้ง ทำให้ต้องใช้เวลาและทำได้เฉพาะวัสดุที่มีความเหนียวเท่านั้น ในขณะที่วัสดุที่มีความเปราะ เช่น เซรามิกส์และสารกึ่งตัวนำ ไม่สามารถใช้กระบวนการความร้อนเชิงกลนี้ได้ ปัจจุบันจึงได้หันมาสนใจกระบวนการใหม่ๆ ในการกระตุ้นให้โครงสร้างจุลภาคของวัสดุเกิดการปรับเปลี่ยนตัวเอง เพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น การใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก[11] และความแตกต่างของส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น

จากการศึกษาวิจัยพบว่าการอบอ่อนโดยให้ชิ้นงานได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกันสลับไปสลับมา ทำให้เกิดการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาค เช่น การเร่งการขยายขนาดของเกรน [12] เปลี่ยนลักษณะการจัดเรียงตัวของดิสโลเคชัน [13,14] การแบ่งแยกของสารเจือปนบริเวณขอบเกรน [15] และการทำให้โลหะมีความหนาแน่นมากขึ้น [16] จะเห็นว่าการอบอ่อนโดยใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิทำให้ได้สมบัติต่างๆ ที่ดีขึ้น แต่ยังไม่มียานวิจัยไหนนำมาประยุกต์ใช้กับการ

ทำวิศวกรรมขอบเกรน งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคแบบใหม่ โดยการประยุกต์ใช้การอบอ่อนในอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างเตา 2 เตา อาศัยสมมติฐานที่ว่า เมื่อวัสดุอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะทำให้เกิดการแพร่ในโครงสร้างจุลภาคที่ต่างกัน นำมาซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมใหม่ จากสมมติฐานนี้จึงได้เกิดแนวความคิดที่จะทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 หลังจากเกิดการตกผลึกใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและทดลองหาผลกระทบจากการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 หลังจากเกิดการตกผลึกใหม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเตาความร้อนสูง พร้อมทั้งระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง
2. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนแบบวัฏจักร เช่น ขนาดของเกรน และทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบและสร้างเตาความร้อนสูง พร้อมทั้งระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง
3. ทดสอบระบบที่ได้พัฒนาขึ้น
4. ทำการอบอ่อนแบบวัฏจักรตามเงื่อนไขต่างๆ เช่น ช่วงความต่างของอุณหภูมิ เวลา และจำนวนรอบ
5. ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 และทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน
6. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

กระบวนการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่ได้จากการวิจัยนี้ จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ให้ทนต่อการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนได้ดีขึ้น และอาจนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุทางวิศวกรรมอื่นๆ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านต่างๆ ให้ดีขึ้น

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2542 ปิยะพร ลีน โสรก [17] แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการวิจัยเรื่องผลกระทบของการรีคริสตัลไลเซชันและการขยายขนาดเกรนต่อการเกิดแอนนิลลิงทวินในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 พบว่าเมื่อให้ความร้อนเชิงกลแบบ iterative strain annealing สามารถเพิ่มจำนวน CSLBs ได้ถึง 54% ในชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการรีคริสตัลไลเซชันที่ 850 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ความเครียด 3% แล้วนำไปอบให้ความร้อนที่ 950 °C เป็นเวลา 10 นาที ทำซ้ำสามครั้ง

2. ปี 2538 W. Horvath, W. Prantl, E. Werner, and H. P. Stüwe [14] ทำการวิจัยเรื่อง Influence of thermal cycling on the microstructure of a ferritic – austenitic duplex stainless steel พบว่าการอบอ่อนแบบวัฏจักรระหว่างอุณหภูมิ 20 °C และ 900 °C ไม่ได้ทำให้สัดส่วนของเฟสเฟอร์ไรต์และออสเตไนต์เปลี่ยนแปลงไป แต่จะมีผลอย่างมากต่อการจัดเรียงตัวของดิสโลเคชันในทั้งสองเฟส นอกจากนี้ยังพบว่าการตกตะกอนของคาร์ไบด์เพิ่มขึ้นในระหว่างการอบอ่อนแบบวัฏจักร

3. ปี 2546 S.S. Sahay, C.P. Malhotra, A.M. Kolkhede [12] ทำการวิจัยเรื่อง Accelerated grain growth behavior during cyclic annealing พบว่ามีการเร่งการขยายขนาดของเกรนระหว่างทำการอบอ่อนแบบวัฏจักรในชิ้นงานเหล็กกล้าที่ผ่านการรีดเย็น โดยขนาดของเกรนเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนรอบของการอบอ่อนแบบวัฏจักรและช่วงต่างของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกิดจากขอบเกรนถูกกระตุ้นให้เกิดการเคลื่อนที่มากกว่าปกติในระหว่างการอบอ่อนแบบวัฏจักร ส่งผลให้ effective activation energy สำหรับการขยายขนาดของเกรนลดลง

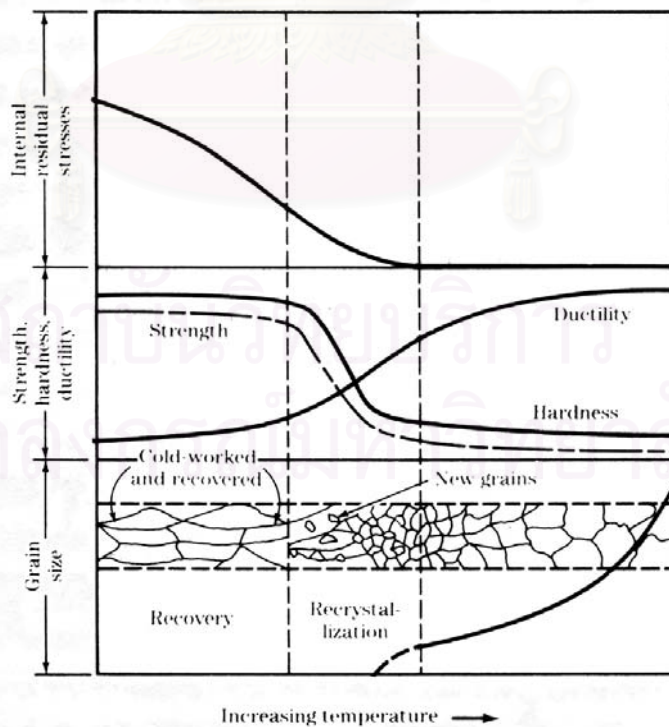
บทที่ 2

การอบอ่อนและการตกผลึกใหม่

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง ประกอบด้วยการอบอ่อนที่คงที่ค่าหนึ่ง และการตกผลึกใหม่ ซึ่งจะเป็นข้อมูลในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 หลังจากผ่านกระบวนการอบอ่อนแบบวัฏจักร

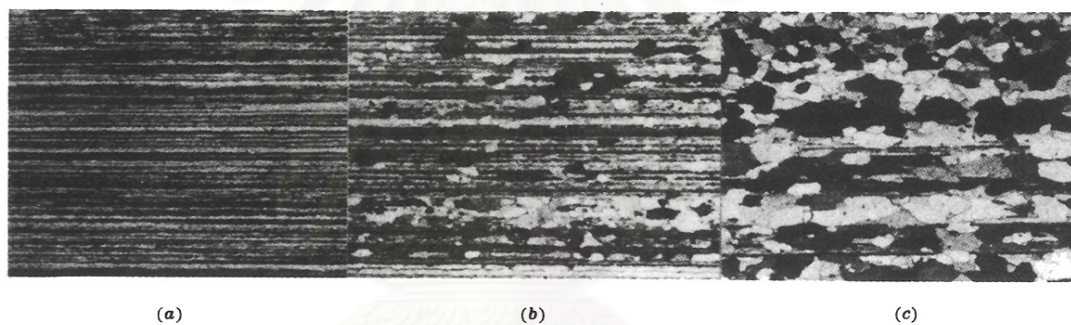
2.1 การอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง (Isothermal Annealing)

ในกระบวนการผลิตโลหะหรือโลหะผสมนั้น จะเกี่ยวข้องกับการแปรรูปโลหะหรือโลหะผสม เช่น การรีดเย็น การรีดร้อน และการตีขึ้นรูป เป็นต้น เพื่อให้ได้ความหนาหรือขนาดตามที่ต้องการ กระบวนการดังกล่าวมีผลทำให้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติต่างๆ ของโลหะหรือโลหะผสมเปลี่ยนแปลงไป ส่วนใหญ่จะเป็นสมบัติที่ไม่ต้องการ จึงต้องมีการให้ความร้อนเพื่อปรับเปลี่ยนให้ได้โครงสร้างจุลภาคและสมบัติต่างๆ ตามที่ต้องการ กระบวนการที่ทำให้โลหะที่ผ่านการแปรรูปแบบถาวรร้อนขึ้นมาใหม่เพื่อต้องการให้โลหะนั้นอ่อนตัวลง เรียกว่า การอบอ่อน ซึ่งอาจเป็นการอบอ่อนเพียงบางส่วน (Partial annealing) หรือการอบอ่อนทั้งหมด (full annealing) ขึ้นอยู่กับการทำให้โลหะนั้นอ่อนตัวลงมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 2.1 แสดงผลกระทบที่เกิดกับโครงสร้างและสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนไปของโลหะที่ผ่านการรีดเย็น เนื่องจากการทำให้ร้อนขึ้น [18]

การอบอ่อนจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของโลหะ และในขณะเดียวกันสมบัติเชิงกลของโลหะก็จะเปลี่ยนไปด้วย ดังรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึง 3 กระบวนการที่เกิดขึ้นขณะทำการอบอ่อนโลหะ คือ เกิดการคืนสภาพ (Recovery) ขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของดิสโลเคชัน แม้ไม่ได้ทำให้ดิสโลเคชันหมดไป แต่จะเกิดเป็นเพียง subgrain structure เรียกว่า Polygonization มีผลทำให้ความเค้นตกค้างภายในวัสดุลดลง ความแข็งแรงของโลหะนั้นจะลดลงเล็กน้อย แต่ความเหนียวจะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกจะเกิดการตกผลึกใหม่ (Recrystallization) ขั้นตอนนี้ดิสโลเคชันได้รับพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนที่เข้าหากันและเกิดการรวมตัวกันหรือหักล้างกัน ทำให้จำนวนดิสโลเคชันลดลงอย่างมาก ขณะเดียวกันก็เกิดเกรนใหม่ขึ้น และเกิดการขยายขนาดของเกรนใหม่ที่เกิดขึ้น ความเค้นที่ยังคงเหลืออยู่จะถูกขจัดให้หมดไปด้วยการเกิดเกรนใหม่อย่างรวดเร็ว ทำให้ความแข็งแรงของโลหะลดลงอย่างมาก ขณะที่ความเหนียวเพิ่มมากขึ้น ถ้ายังให้อุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกก็จะทำให้เกรนขยายขนาดมากขึ้น ซึ่งเป็นกระบวนการสุดท้ายของการอบอ่อน



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ 5657 (0.8% Mg) หลังผ่านการรีดเย็น 85% [19]

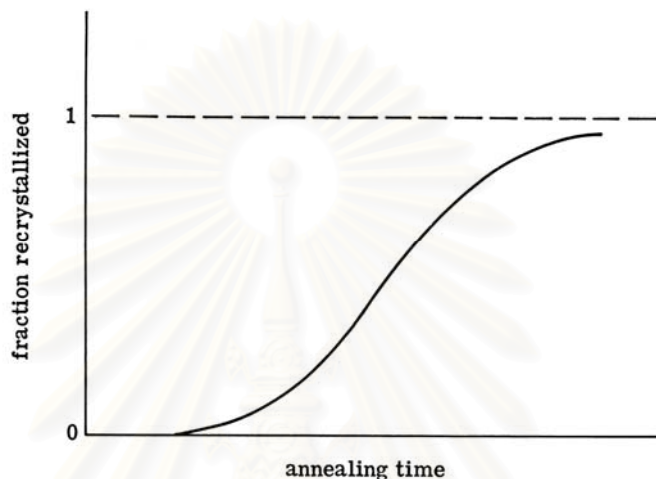
- (a) โครงสร้างจุลภาคหลังจากรีดเย็น 85%
- (b) เมื่อให้ความร้อนที่ 302 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มีบางส่วนของอะลูมิเนียมเกิดการตกผลึกใหม่
- (c) เกิดการตกผลึกใหม่เกือบสมบูรณ์ เมื่อให้ความร้อนที่ 316 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

2.2 การตกผลึกใหม่

การตกผลึกใหม่เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการเกิดและขยายตัวของเกรนใหม่ในโลหะที่ถูกแปรรูป และดำเนินไปจนกระทั่งส่วนที่ถูกแปรรูปของโลหะหมดไป โดยกระบวนการนี้เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่และการชนกันของขอบเกรนขณะที่เกิดการขยายตัว ส่วนขนาดของเกรนที่ได้หลังจากเกิดการตกผลึกใหม่สมบูรณ์แล้ว จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมี เวลา ระดับการแปรรูปและอุณหภูมิในการอบอ่อน เป็นต้น

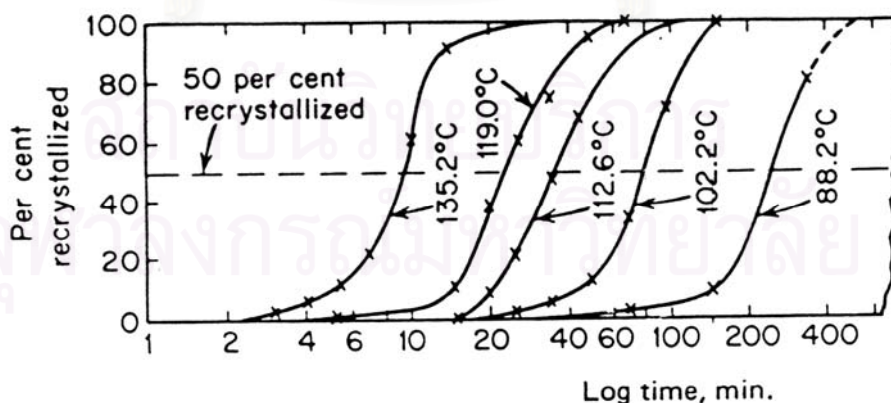
2.2.1 กลไกของการตกผลึกใหม่ (Mechanisms of Recrystallization)

การตกผลึกใหม่เป็นกระบวนการที่เกรนเกิดขึ้นใหม่ในขณะที่อยู่ในสถานะเป็นของแข็ง โดยจะมีระดับพลังงานอิสระที่ต่ำกว่าเดิม แนวทางหนึ่งในการศึกษากลไกการตกผลึกใหม่คือ การใช้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การตกผลึกกับเวลาในการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงสัดส่วนของการตกผลึกใหม่ที่เวลาอบอ่อนต่างๆ เมื่อให้อุณหภูมิคงที่ [20]

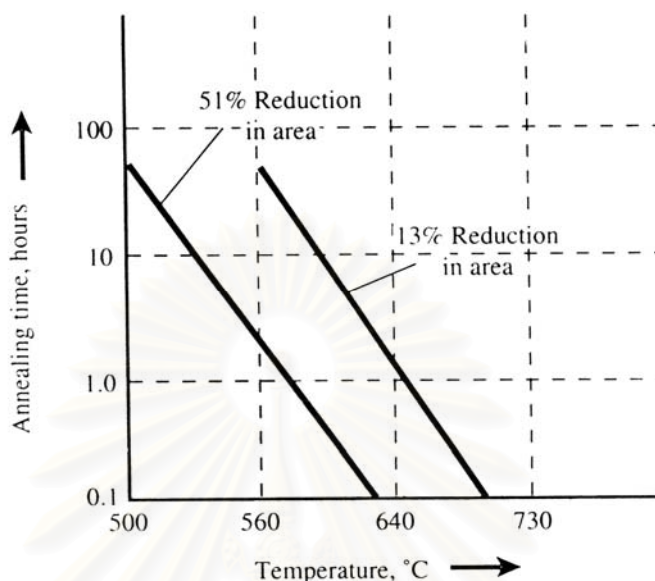
จากรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของจำนวนการเกิดการตกผลึกใหม่และเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ ของทองแดงบริสุทธิ์หลังจากรีดเย็น 98% โดยแต่ละเส้นกราฟจะบอกถึงลักษณะการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน จากกราฟจะเห็นว่าอุณหภูมิต่ำกว่าจะใช้เวลาในการตกผลึกใหม่ที่สั้นกว่า



รูปที่ 2.4 แสดงการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิต่างๆ ของทองแดงบริสุทธิ์หลังจากรีดเย็น 98% [21]

โดยที่ ขนาดเกรน และความบริสุทธิ์ของโลหะจะมีผลกระทบเป็นอย่างมากต่อการตกผลึกใหม่ เช่น โลหะที่มีความบริสุทธิ์สูงจะมีอัตราการตกผลึกที่ไวกว่าโลหะที่มีธาตุอื่นเจือปน

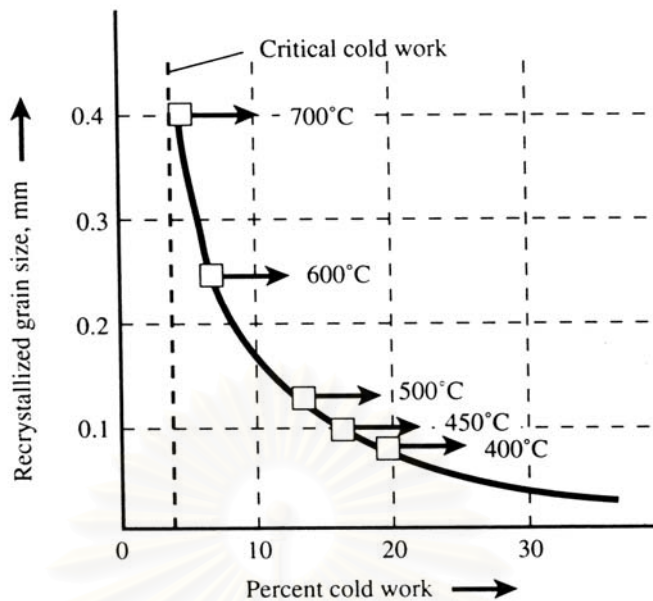
เชื่อกันว่าธาตุที่เจือปนอยู่ในเนื้อโลหะจะไปยับยั้งกลไกการตกผลึกใหม่ นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์การแปรรูป (Deformation) ก็มีผลต่อการตกผลึกใหม่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงเวลาการอบอ่อนกับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่
ใน Zirconium ที่เปอร์เซ็นต์การรีดเย็นแตกต่างกัน [22]

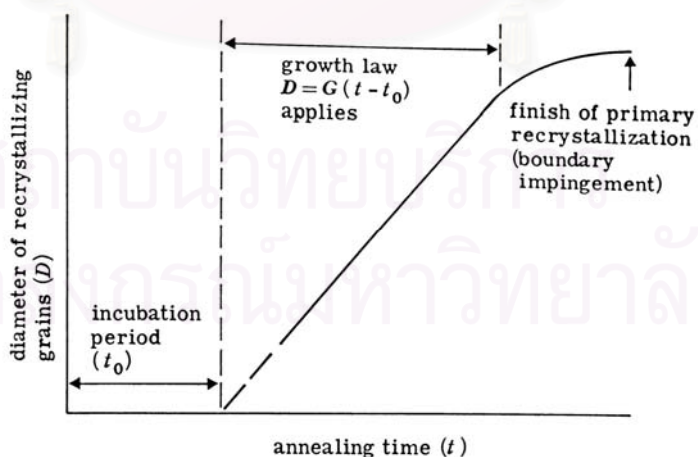
สำหรับโลหะหลายผลึก (Polycrystalline) ขณะถูกแปรรูปเย็น (Cold work) ขอบเกรนจะทำหน้าที่เป็นตัวยับยั้งกระบวนการเลื่อนตัว (slip process) ของอะตอมภายในเกรน ซึ่งผลให้โครงข่ายโดยรวมที่อยู่รอบๆ ขอบเกรนนั้นเกิดการบิดเบี้ยว ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วจะบิดเบี้ยวมากกว่าภายในเกรน การลดลงของขนาดเกรนมีผลทำให้พื้นที่ของขอบเกรนมีมากขึ้น ซึ่งหมายถึงปริมาณและความสม่ำเสมอของการบิดเบี้ยวของโลหะมากขึ้นตามไปด้วย ผลกระทบอันนี้มีผลต่อจำนวนตำแหน่งในการเกิดเกรนใหม่ ยิ่งไปกว่านั้นขนาดเกรนที่เล็กกว่าในเนื้อโลหะก่อนแปรรูปเย็นจะยิ่งเพิ่มอัตราการเกิดเกรนใหม่ให้มากขึ้น ส่งผลให้ขนาดของเกรนหลังจากตกผลึกใหม่แล้วมีขนาดเล็กกว่าด้วย

ขนาดเกรนที่ได้หลังจากการเกิดการตกผลึกใหม่ คือขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นทันทีเมื่อสิ้นสุดกระบวนการตกผลึก รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงขนาดเกรนที่ได้จากการตกผลึกขึ้นกับเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูปของทองเหลืองก่อนการอบอ่อน ส่วนสำคัญของกราฟนี้คือขนาดเกรนจะโตขึ้นทันทีที่ลดเปอร์เซ็นต์การขึ้นรูป และอีกประการหนึ่งการขึ้นรูปที่น้อยเกินไปจะไม่สามารถเกิดการตกผลึกใหม่ได้แม้ว่าจะใช้เวลานานก็ตาม นำไปสู่หลักการของค่าวิกฤติของการขึ้นรูป (Critical amount of cold work) ซึ่งอาจจะกำหนดโดยค่าต่ำสุดในการขึ้นรูปขึ้นงานที่จะทำการตกผลึกใหม่ (ภายในช่วงเวลาในการตกผลึกที่เหมาะสม)



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนหลังเกิดการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิต่างๆ กับเปอร์เซ็นต์การการรีดเย็นของ Alpha brass [22]

จากรูปที่ 2.6 ซึ่งงานทองเหลืองมีค่าวิกฤติของการขึ้นรูป คือ 3% ของการแปรรูปเย็น ซึ่งค่าวิกฤติของการขึ้นรูปมีความสำคัญมาก เพราะคุณสมบัติของวัสดุบ่อยครั้งขึ้นกับความแข็งแรง และมีความสัมพันธ์กับขนาดของเกรน ตัวอย่างเช่น โลหะแผ่นเมื่อทำการแปรรูปเย็นให้เป็นรูปร่างที่ซับซ้อนขึ้น จะต้องมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเกรนที่เล็กกว่า 0.05 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องการผิวที่เรียบ หรือจะกล่าวอีกอย่างว่า ถ้าขนาดเกรนใหญ่เมื่อแปรรูปเย็นแล้วผลที่ด้านผิวชิ้นงานจะหยาบเหมือนผิวส้ม (orange-peel effect)



รูปที่ 2.7 ลักษณะการโตขึ้นของเกรนขณะเกิดการตกผลึกใหม่ที่เวลาต่างๆ [20]

อัตราการเกิดผลึกใหม่ของโลหะขึ้นอยู่กับ อัตราการเกิดและการขยายตัวของเกรนใหม่ ถ้าเกรนใหม่เกิดขึ้นแบบทันทีทันใดพร้อมๆ กับการขยายตัวอย่างช้าๆ ในทุกๆ ผลึก สุดท้าย

จะได้ขนาดเกรนที่เล็ก หรือในทางตรงข้าม เกรนที่มีขนาดใหญ่เนื่องมาจากอัตราการเกิดเกรนใหม่ที่ช้าเมื่อเทียบกับอัตราการขยายตัวของเกรน ลักษณะการโตขึ้นของเกรนขณะเกิดการตกผลึกใหม่ในเวลาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.7

Avrami ได้ทำการศึกษากฎที่ อัตราการเกิดเกรนใหม่ค่อยๆ ลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียลกับเวลาให้ผลเป็นดังสมการ 1

$$X = 1 - \text{Exp}(-kt^n) \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ X คือ สัดส่วนของการตกผลึก k และ n คือ ค่าคงที่ โดย k เป็นฟังก์ชันของอัตราการเกิดและการขยายตัวของเกรนใหม่ และ n โดยทั่วไปพบว่าจะอยู่ระหว่าง 3 และ 4 สมการนี้บ่อยครั้ง เรียกว่า Avrami equation สมการนี้เป็น phenomenological equation สำหรับอธิบายพฤติกรรมของการเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์ ของการเปลี่ยนเฟสในสถานะที่เป็นของแข็ง (transformation kinetics of solid-solid phase transformations)

ในทางปฏิบัติมีจุดที่น่าสนใจ คือ เมื่อมองในแง่ของการควบคุมอุณหภูมิในการตกผลึกใหม่และขนาดเกรนที่จะได้จากการตกผลึกใหม่ โดยประเมินว่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะส่งผลอย่างไรในการควบคุม ผลคือ Johnson-Mehl equation ซึ่งเป็นสมการที่มีรูปแบบเดียวกับ Avrami equation โดยที่ค่าคงที่ k ถูกแสดงในเทอมอัตราการเกิดเกรนใหม่(N) และอัตราการโตของเกรน (G)

$$X = 1 - \text{Exp}\left(-\frac{\pi}{3} NGt^4\right) \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อทั้ง N และ G เป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ตามสมการ Arrhenius (แปรผันตรงกับ $\text{Exp}[-Q/RT]$) อุณหภูมิการเกิดการตกผลึกใหม่ถูกกำหนดไว้ภายในเวลาเฉพาะค่าหนึ่ง ส่วนมาก 1 ชั่วโมง ถ้าเราสมมติให้ 95% ของการตกผลึกใหม่จากการตกผลึกใหม่ที่สมบูรณ์ จาก Johnson-Mehl equation อาจแสดงเวลาที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ 95% ของปริมาตรที่เปลี่ยนรูปเป็นผลึกใหม่แล้ว ($t_{0.95}$)

$$t_{0.95} = \left[\frac{2.85}{NG}\right]^{1/4} \dots\dots\dots(3)$$

นั่นคือ การเพิ่มอัตราการเกิด และ/หรือ การขยายตัวของเกรนใหม่ จะส่งผลในการลดเวลาการตกผลึกใหม่ ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนที่ตกผลึกใหม่แล้วและอัตราการเกิดและขยายตัวของเกรนใหม่ ที่ได้คือ

$$d = (\text{const}) \left[\frac{G}{N} \right]^{1/4} \dots \dots \dots (4)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าขนาดเกรนที่เล็กลงหลังตกผลึกใหม่ถูกกำหนดโดยอัตราการเกิดนิวเคลียสที่สูงและอัตราการโตของนิวเคลียสที่ต่ำ สุดท้ายนี้จะเห็นว่า การตกผลึกใหม่สามารถนำไปสู่การควบคุมขนาดเกรนได้ ทั้งขนาดเกรนที่ได้จากการตกผลึกและอุณหภูมิสามารถควบคุมได้ด้วย N และ G จากความรู้ทางด้านฟิสิกส์ตัวแปรที่ส่งผลกับ N และ G ได้แก่ อุณหภูมิ และขนาดเกรน ตามความหมายในสมการ 3 และ 4

2.2.2 หลักทั่วไปของการตกผลึกใหม่

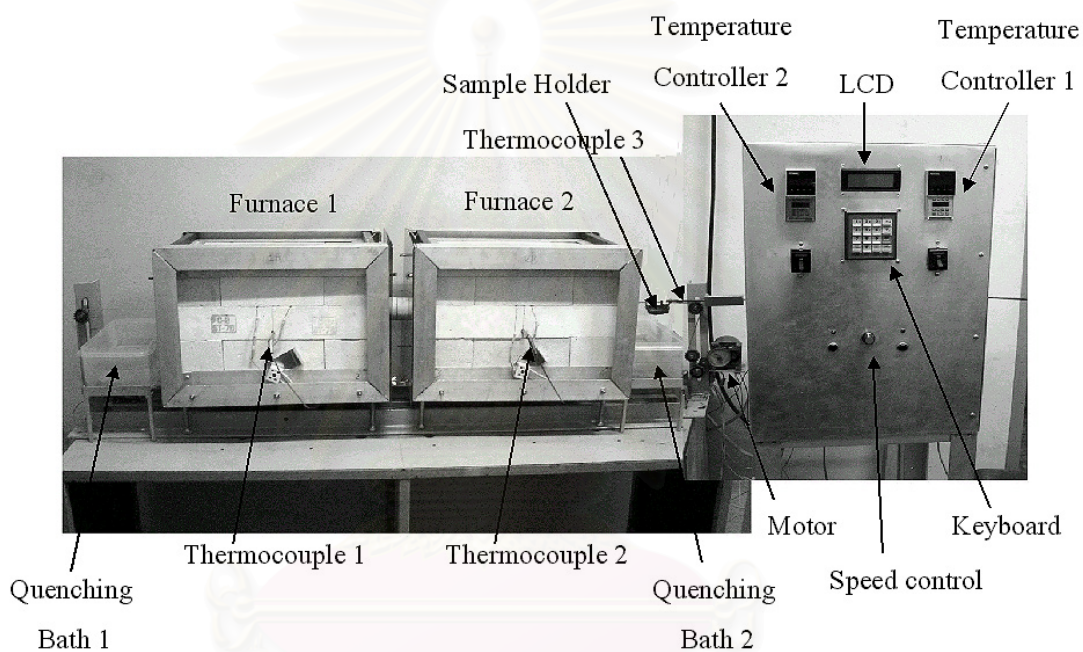
การเกิดการตกผลึกใหม่ของโลหะสามารถเกิดขึ้นได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างโดยขึ้นอยู่กับตัวแปรข้างบนนี้ ดังนั้นจึงไม่อาจกล่าวถึงอุณหภูมิของการตกผลึกใหม่ได้เหมือนกับจุดหลอมเหลว แต่มีหลักทั่วไปที่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการตกผลึกใหม่มีดังนี้

1. การตกผลึกใหม่จะเกิดได้จำเป็นต้องมีระดับการแปรรูปของโลหะน้อยที่สุด
2. ถ้าระดับการแปรรูปมีน้อยเท่าใด ก็ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากขึ้นเท่านั้น เพื่อทำให้เกิดการตกผลึกใหม่
3. ถ้าเพิ่มอุณหภูมิในการทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ให้สูงขึ้น จะช่วยลดเวลาที่ใช้ให้น้อยลง เพื่อให้เกิดการตกผลึกใหม่ที่สมบูรณ์
4. ขนาดของเกรนหลังเกิดการตกผลึกใหม่ ขึ้นอยู่กับระดับการแปรรูปของโลหะเป็นหลัก ถ้าระดับการแปรรูปยิ่งมาก อุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนเพื่อทำให้เกิดการตกผลึกใหม่จะต่ำลง และขนาดของเกรนหลังเกิดการตกผลึกใหม่จะเล็กลงด้วย
5. ถ้าขนาดของเกรนเดิมยิ่งโตยิ่งต้องใช้ระดับการแปรรูปมากขึ้น เพื่อทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการตกผลึกใหม่เท่ากัน
6. อุณหภูมิที่เกิดการตกผลึกใหม่ลดลงเมื่อใช้โลหะที่มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น และถ้าเติมธาตุอื่น ๆ เจือปนเข้าไป จะทำให้อุณหภูมิที่เกิดการตกผลึกใหม่สูงขึ้นเสมอ

บทที่ 3

การอบอ่อนแบบวัฏจักร

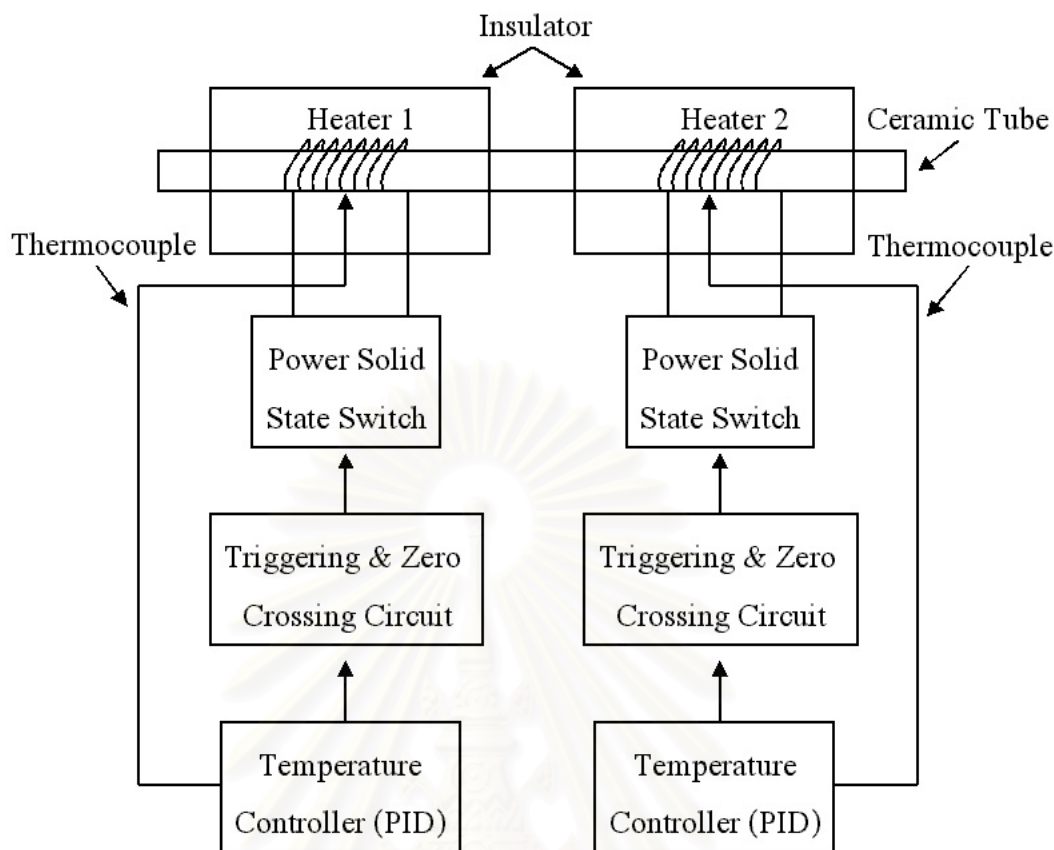
ในขั้นตอนการอบอ่อนแบบวัฏจักรมีความจำเป็นต้องสร้างเตาความร้อนสูง 2 ชุด พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิของแต่ละเตา นอกจากนี้ยังต้องพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน ตัวอย่างและระบบการเชื่อมโยงสัญญาณกับไมโครคอมพิวเตอร์เพื่อใช้สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลของ อุณหภูมิ ณ เวลาต่างๆ โครงสร้างและส่วนประกอบของระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่สร้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบของระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่สร้างขึ้น

3.1 เตาความร้อนสูง

จากโครงสร้างและส่วนประกอบของระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 3.1 จะเห็นว่า มีเตาความร้อนสูง 2 ชุด พร้อมระบบควบคุมอุณหภูมิของแต่ละเตา เพื่อให้สามารถตั้งค่าอุณหภูมิใช้งานของแต่ละเตาได้อย่างอิสระ แผนผังการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 3.2 เตาแต่ละตัวถูกออกแบบให้ใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงสุด 1000 องศาเซลเซียส ที่กำลังไฟฟ้า 1500 วัตต์ และใช้กับสัปดาห์ไฟฟ้าขนาด 220 โวลต์ สำหรับระบบการควบคุมอุณหภูมิของแต่ละเตาเป็นแบบ PID ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดการสูญเสียความร้อน จึงออกแบบให้ช่วยลดความร้อนพ่นลงบนท่อเซรามิกส์โดยตรง โครงร่างของเตาและระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรดูได้จากภาคผนวก ก



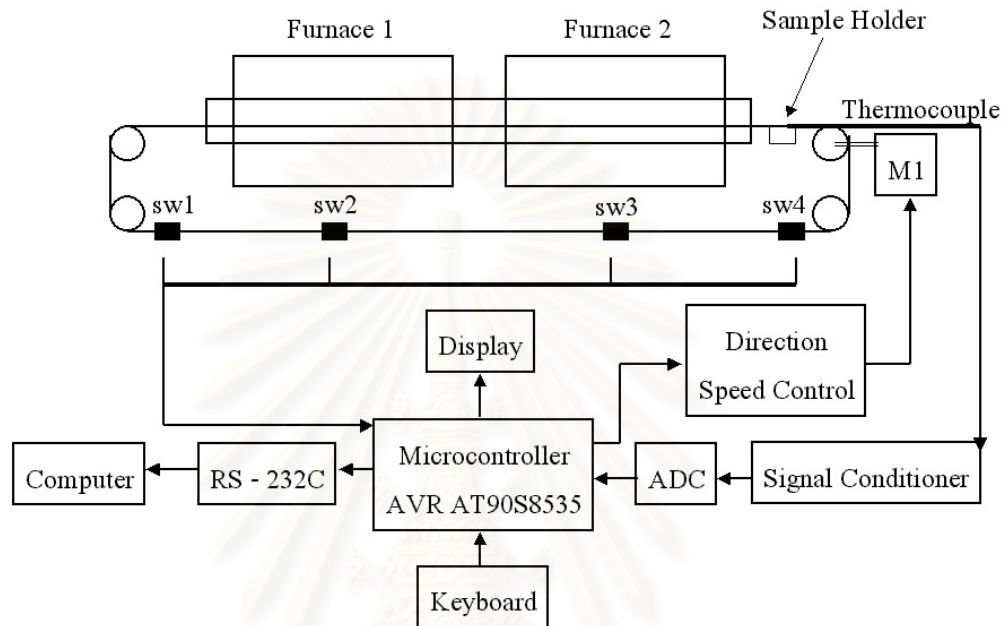
รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมอุณหภูมิ

จากแผนผังการทำงานของระบบเตาความร้อนสูงมีหลักการการทำงานคือ อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) จะถูกตั้งค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการ จากนั้นจะส่งสัญญาณไปยังวงจร Triggering and zero crossing circuit เพื่อไปควบคุมการปิด - เปิดของ Power solid state switch ทำให้ขดลวดความร้อน (Heater) ร้อนขึ้น หลังจากนั้นค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกอ่านกลับมาที่ตัวควบคุมอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K

3.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง

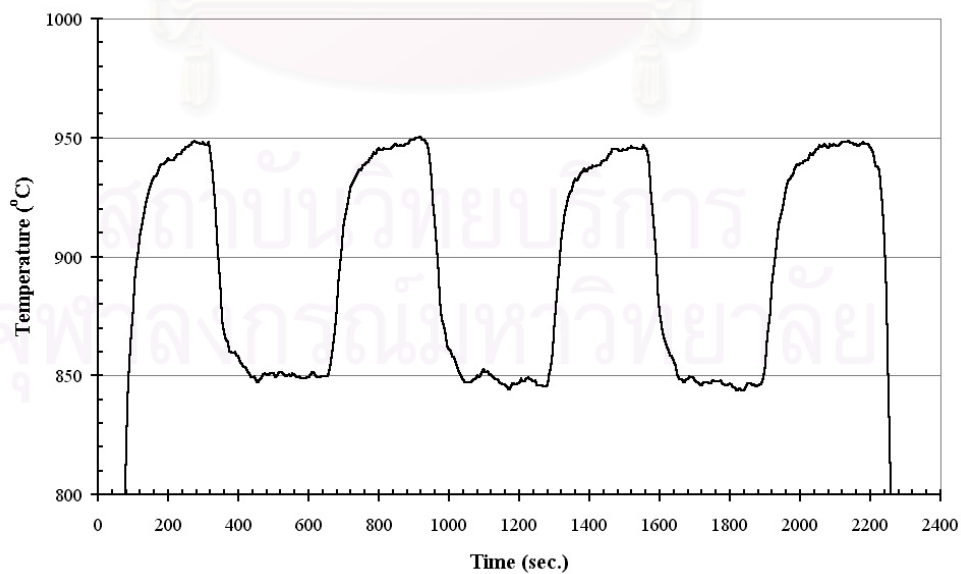
การควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่างได้ออกแบบระบบโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 8 บิต เป็นตัวควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงในกรณีที่ต้องการแก้ไขหรือปรับเปลี่ยนระบบการทำงานในอนาคต ซึ่งรูปที่ 3.3 แสดงแผนผังการทำงานของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง การทำงานของระบบเริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยการป้อนข้อมูลผ่านทางแป้นพิมพ์ ข้อมูลนี้จะถูกประมวลผลและแสดงทางจอภาพ LCD แบบ 4 แถว (คู่มือการใช้งานดูได้จากภาคผนวก ข) จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการส่งสัญญาณควบคุมไปยังมอเตอร์ (M1) เพื่อขับสายพานให้เคลื่อนที่

นำชิ้นงานตัวอย่างพร้อมทั้งเทอร์โมคัปเปิลไปยังตำแหน่งต่างๆ ภายในเตาความร้อนที่ 1 และ 2 ตามที่ได้ตั้งค่าไว้ โดยมีลิมิตสวิตช์ sw2 และ sw3 เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของชิ้นงานในแต่ละเตา สำหรับลิมิตสวิตช์ sw1 และ sw4 จะทำหน้าที่กำหนดตำแหน่งการตกน้ำของชิ้นงานตัวอย่าง (quenching) อุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่าง ณ เวลาต่างๆ จะถูกอ่านจากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดไปกับชิ้นงานตัวอย่าง แล้วส่งไปบันทึกที่ไมโครคอมพิวเตอร์ทุกๆ 5 วินาที



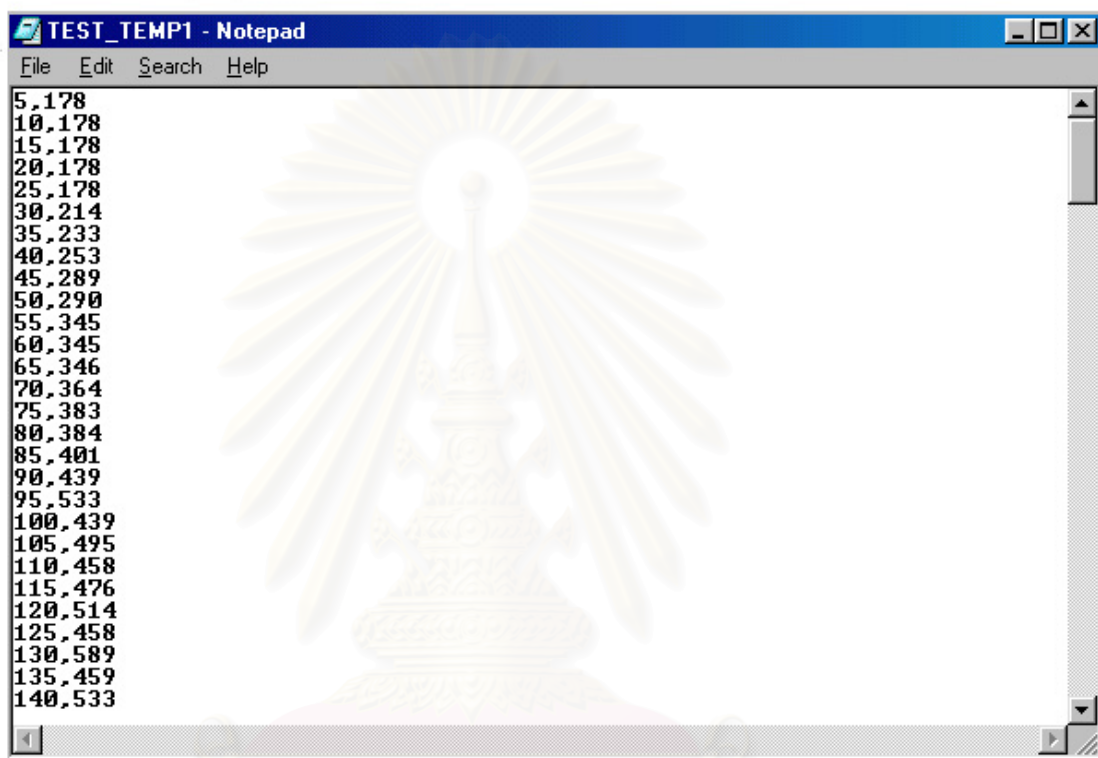
รูปที่ 3.3 แสดงแผนผังการทำงานของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง

3.3 การบันทึกข้อมูล



รูปที่ 3.4 แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานตัวอย่างระหว่างอบอ่อนแบบวัฏจักร
เมื่อให้ชิ้นงานหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา 5 นาที

ก่อนที่ไมโครคอมพิวเตอร์จะทำการรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาโปรแกรมรับข้อมูลแบบอนุกรม (RS - 232c) โดยในที่นี้ได้ใช้โปรแกรม Microsoft Visual Basic เพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมรับข้อมูล ชื่อ ReadTemp ซึ่งโปรแกรมนี้จะรับข้อมูลของเวลาและอุณหภูมิมาเก็บไว้ในรูปของ Text file แสดงในรูปที่ 3.5 จากนั้นนำไปพลอต กราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาด้วยโปรแกรม Microsoft excel



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างของข้อมูลที่บันทึกในระหว่างการทดลอง โดยหลักที่ 1 คือ เวลาและหลักที่ 2 คือ อุณหภูมิ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วิธีการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลองและการทดสอบต่างๆ ที่ได้ทำในวิทยานิพนธ์ เริ่มจากวัสดุที่ใช้ในการทดลอง การเตรียมชิ้นงานก่อนการทดลอง วิธีการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง และวิธีการอบอ่อนแบบวัฏจักร จากนั้นจะกล่าวถึงการทดสอบความแข็ง การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค และการทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

4.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ได้มาจากโรงงานไทยน็อคซ์ สตีล จำกัด ซึ่งมีความหนา 1.2 มม. ขนาดเกรน 33 μm ความแข็ง 189 HV และมีส่วนประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

| Elements | Fe | Cr | Ni | C | Mn | Si | Mo | N | P | Cu | S |
|------------|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Weight (%) | Bal | 18.27 | 8.18 | 0.052 | 0.860 | 0.310 | 0.127 | 0.051 | 0.027 | 0.164 | 0.002 |

4.2 การเตรียมชิ้นงาน

ก่อนนำเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ได้จากโรงงานมาทดลอง ต้องนำมาผ่านการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 1050 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที ทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วด้วยน้ำ เพื่อให้โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเป็นเฟสออสเทนิติกทั้งหมด จากนั้นนำชิ้นงานมาตัดให้มีขนาด 2 ซม. X 1 ซม. นำไปรีดเย็นที่อุณหภูมิห้องให้มีความหนาลดลง 30%

4.3 การอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง (Isothermal Annealing)

การอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ 1. ทำการทดลองเพื่อเลือกช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่หลังผ่านการรีดเย็นให้มีความหนาลดลง 30 % โดยนำชิ้นงานมาอบอ่อนที่อุณหภูมิตั้งแต่ 100 $^{\circ}\text{C}$ ถึง 1000 $^{\circ}\text{C}$ แต่ละช่วงอุณหภูมิห่างกัน 100 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาหาค่าความแข็งและศึกษาลักษณะทั่วไปของโครงสร้างจุลภาค การทดลองที่ 2. เป็นการทดลองเพื่อดูผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการเกิดการตกผลึกใหม่ โดยการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 850, 900, 950 และ 1000 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที 30 นาที 60 นาที และ 120 นาที นำชิ้นงานมาวัดความแข็งและหาขนาดของเกรน

4.4 การอบอ่อนแบบวัฏจักร (Thermal Cyclic Annealing)

การอบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นการอบอ่อนที่อุณหภูมิ 2 อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ในวิทยานิพนธ์นี้ กำหนดให้อุณหภูมิต่างกัน $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยชิ้นงานจะเคลื่อนที่ระหว่างอุณหภูมิ $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปอยู่ที่อุณหภูมิ $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ก่อนเสมอทุกๆ การทดลอง จากนั้นทำการทดลองโดยให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปมาระหว่างอุณหภูมิทั้งสองเป็นเวลา 30 นาที 60 นาที และ 120 นาที และหยุดที่เตาทั้ง 2 เป็นเวลาเท่ากัน คือ 2 นาที 5 นาที และ 10 นาที จากนั้นนำมาหาค่าความแข็งและศึกษาลักษณะทั่วไปของโครงสร้างจุลภาค

4.5 การวัดความแข็ง

นำชิ้นงานทั้งหมดมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 600 1000 และ 1500 สุดท้ายขัดมันด้วยผงขัดเพชร ขนาด $1\text{ }\mu\text{m}$ ทำการวัดความแข็ง ด้วยเครื่อง HV – 5 กำหนดน้ำหนักในการกดที่ 5 กิโลกรัม และใช้เวลากด 13 วินาที ทำการกดชิ้นงานละ 10 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยและค่าการกระจายของข้อมูล



รูปที่ 4.1 เครื่อง HV – 5 สำหรับวัดความแข็งของชิ้นงาน

4.6 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรจะถูกวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) Philips XL 40 ที่ศูนย์เชี่ยวชาญนิวเคลียร์เทคโนโลยี สำหรับการวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ (NucMAT) ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยนำชิ้นงานทั้งหมดมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 600 1000 และ 1500 แล้วนำไปทำ Electropolishing ในสารละลาย 60 % กรดอโธพอสฟอ

ริก (H_3PO_4) และ 40 % กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่ 10 โวลต์ เป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้เห็นขอบเกรนทำได้โดยการนำชิ้นงานมากัดกรดแบบ Electrolytic etching ในสารละลาย 60 % กรดไนตริก กับน้ำ 40 % โดยใช้แพลทินัมเป็นแคโทด ที่ 1.27 โวลต์ เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นหาขนาดของเกรนด้วยวิธีลากเส้นตรงแล้วนับจำนวนขอบเกรนที่ตัดกับเส้นตรง แล้วนำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$D = (4 \cdot N_L) / \pi$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน และ N_L คือ ความยาวของเส้นตรงต่อจำนวนขอบเกรนที่ตัดกับเส้นตรง นอกจากนี้ยังนับจำนวนด้านของเกรนและวัดมุมบริเวณ Triple Junction เพื่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเกรน

4.7 การทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน

เพื่อทดสอบชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนแบบวัฏจักรว่า ขอบเกรนสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้หรือไม่ สามารถทำได้โดยการนำชิ้นงานไปแช่ในซีไอซ์ที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง นำชิ้นงานทั้งหมดมาขัดออกไซด์ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 320 600 1000 และ 1500 สูดท้ายขัดมันด้วยผงขัดเพชร ขนาด $1\ \mu\text{m}$ จากนั้นทำการกัดกรดแบบ Electrolytic etching ในสารละลาย 10% กรดออกซาลิก ที่ 6 โวลต์ เป็นเวลา 20 วินาที

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ โดยจะเริ่มผลการทดลองจากการอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งเพื่อเลือกช่วงของการตกผลึกใหม่ จากนั้นจะเป็นผลการทดลองที่ได้จากการอบอ่อนแบบวัฏจักร และวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การอบอ่อนที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง (Isothermal annealing)

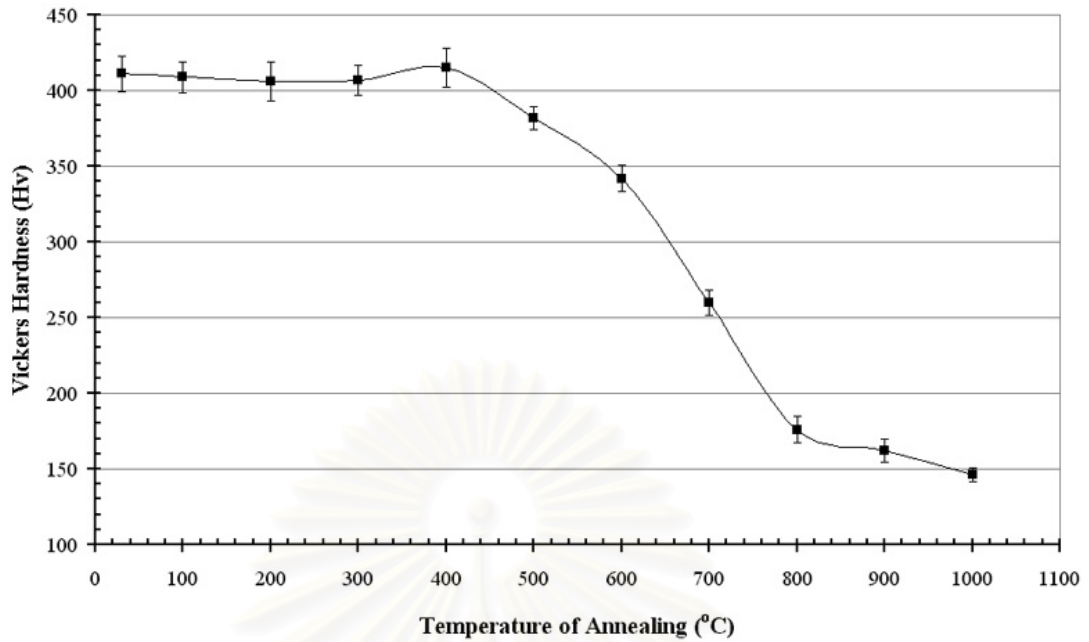
การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ตอน โดยมีจุดประสงค์เพื่อหาช่วงของอุณหภูมิและเวลาที่ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการรีดเย็นที่อุณหภูมิห้องให้มีความหนาลดลง 30% เกิดการตกผลึกใหม่ ซึ่งจะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดเงื่อนไขของการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อไป

5.1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการเกิดการตกผลึกใหม่

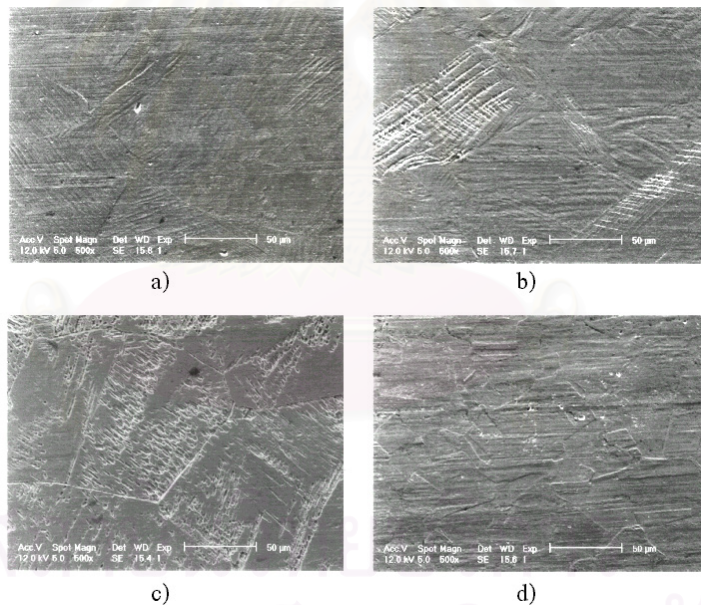
เพื่อให้รู้ช่วงอุณหภูมิที่ชิ้นงานจะเกิดการตกผลึกใหม่ จึงได้ทำการอบอ่อนชิ้นงานตัวอย่างที่อุณหภูมิ 100 °C ไปจนถึง 1000 °C โดยเพิ่มอุณหภูมิขึ้นช่วงละ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้ววัดความแข็งของชิ้นงานในแต่ละอุณหภูมิที่ทำการอบอ่อน ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าความแข็งของชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ

| อุณหภูมิ (°C) | ความแข็ง (HV) |
|---------------|---------------|
| 30 | 411 ± 11.8 |
| 100 | 409 ± 10.2 |
| 200 | 406 ± 12.9 |
| 300 | 407 ± 10.0 |
| 400 | 415 ± 13.0 |
| 500 | 382 ± 7.6 |
| 600 | 342 ± 8.5 |
| 700 | 260 ± 8.4 |
| 800 | 176 ± 8.5 |
| 900 | 162 ± 7.7 |
| 1000 | 146 ± 4.4 |



รูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 5.2 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน เมื่อผ่านการรีดเย็น 30 % แล้วนำมาอบอ่อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่ a) อุณหภูมิห้อง b) 500 °C c) 700 °C และ d) 900 °C

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอุณหภูมิในการอบอ่อนดังรูปที่ 5.1 สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 อุณหภูมิต่ำกว่า 400 °C ค่าความแข็งไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากในช่วงนี้ อุณหภูมิที่ให้ไม่มากพอที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในโครงสร้างจุลภาค บางที่เรียกช่วงนี้ว่า Stress Redistribution ช่วงที่ 2 อุณหภูมิระหว่าง 400 ถึง 800 °C ค่าความแข็งลดลงอย่างรวดเร็ว จากโครงสร้างจุลภาคที่แสดงดังรูปที่ 5.2 ทำให้ทราบว่าไม่มีการตกผลึกใหม่

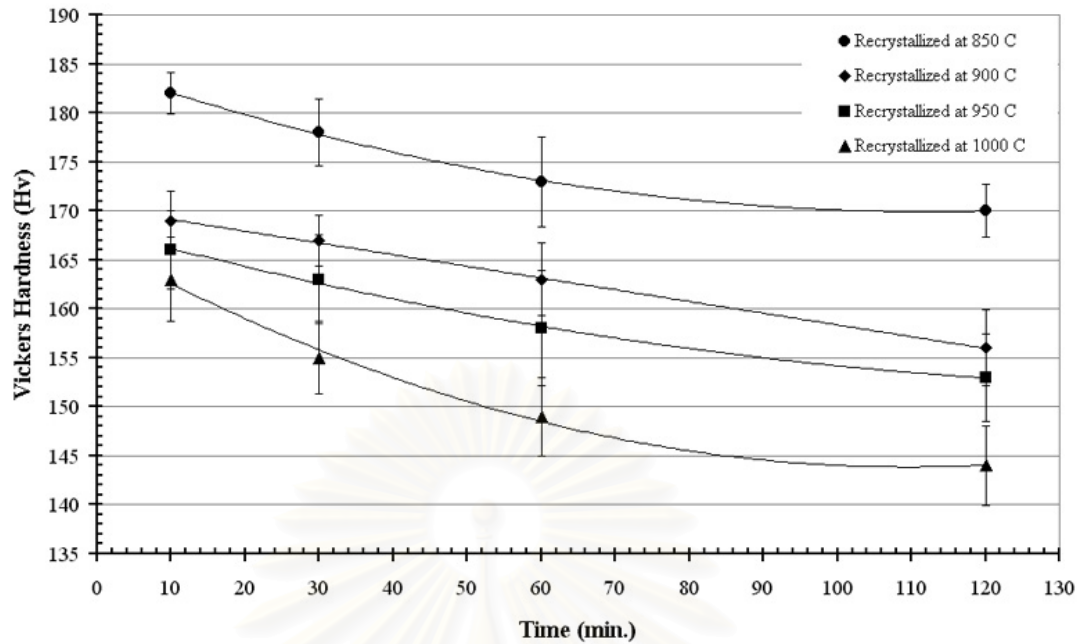
เกิดขึ้น ถึงแม้จะมีการตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์เกิดขึ้นแต่เหล็กกล้าไร้สนิม 304 ไม่สามารถทำให้แข็งขึ้นได้จากการตกตะกอน ดังนั้นค่าความแข็งที่ลดลงจึงเกิดจากการ Recovery เท่านั้น ช่วงที่ 3 อุณหภูมิมากกว่า 800 °C ค่าความแข็งค่อยๆ ลดลง เป็นผลมาจากการเกิดการตกผลึกและการขยายขนาดของเกรน ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการรีดเย็นให้มีความหนาผลดลง 30% จะเริ่มเกิดการตกผลึกใหม่ในเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิประมาณ 800 °C ขึ้นไป

5.1.2 ผลกระทบของเวลาต่อการเกิดการตกผลึกใหม่

การทดลองนี้ทำขึ้นเพื่อศึกษาผลกระทบของเวลาต่อการเกิดการตกผลึกใหม่ พบว่าเมื่อเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อนมากขึ้นจะทำให้ขนาดของเกรนเพิ่มขึ้น และค่าความแข็งลดลง ดังแสดงในตารางที่ 5.2

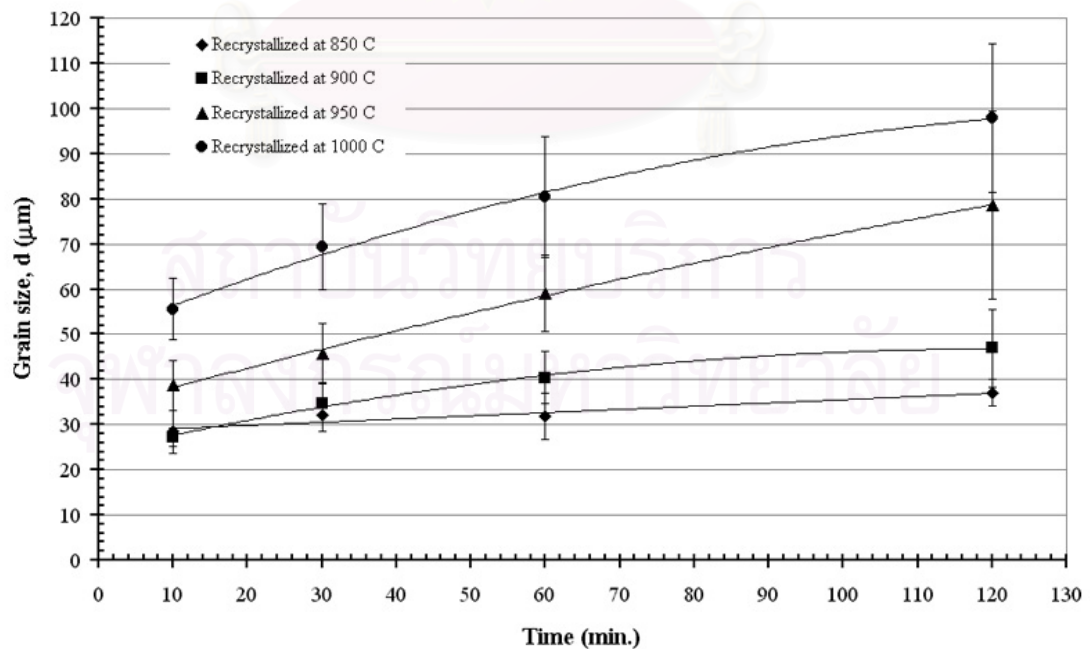
ตารางที่ 5.2 สรุปผลกระทบของเวลาต่อการเกิดการตกผลึกใหม่

| อุณหภูมิ (°C) | เวลา (นาที) | ความแข็ง (HV) | ขนาดของเกรน (μm) |
|---------------|-------------|---------------|-------------------------------|
| 850 | 10 | 182 ± 2.1 | 28.43 ± 4.67 |
| | 30 | 178 ± 3.4 | 32.07 ± 3.45 |
| | 60 | 173 ± 4.6 | 31.78 ± 5.15 |
| | 120 | 170 ± 2.7 | 37.13 ± 2.85 |
| 900 | 10 | 169 ± 3.0 | 27.32 ± 2.06 |
| | 30 | 167 ± 2.6 | 34.80 ± 4.19 |
| | 60 | 163 ± 3.7 | 40.44 ± 5.70 |
| | 120 | 156 ± 3.9 | 46.91 ± 8.51 |
| 950 | 10 | 166 ± 4.0 | 38.71 ± 5.56 |
| | 30 | 163 ± 4.5 | 45.81 ± 6.60 |
| | 60 | 158 ± 5.9 | 59.13 ± 8.41 |
| | 120 | 153 ± 4.5 | 78.66 ± 20.80 |
| 1000 | 10 | 163 ± 4.7 | 55.62 ± 6.72 |
| | 30 | 155 ± 3.7 | 69.34 ± 9.53 |
| | 60 | 149 ± 4.0 | 80.49 ± 13.41 |
| | 120 | 144 ± 4.1 | 97.91 ± 16.42 |

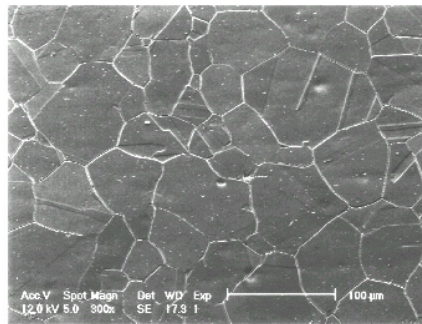


รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับเวลาในการอบอ่อน ที่อุณหภูมิต่างๆ

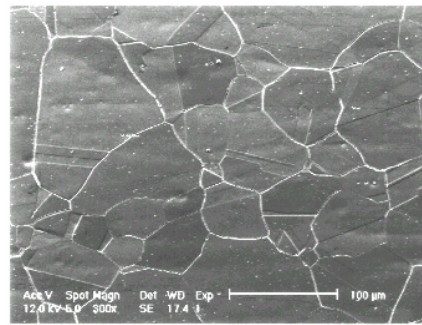
รูปที่ 5.3 และ 5.4 แสดงค่าความแข็งและขนาดของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและเวลา โดยขนาดของเกรนจะโตขึ้นเมื่อให้อุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อนมากขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดการแพร่ได้ง่ายขึ้นส่งผลให้ขอบเกรนเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นด้วย ซึ่งจะตรงกันข้ามกับค่าความแข็งที่ลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการอบอ่อน เป็นผลมาจากเกรนโตขึ้นนั่นเอง



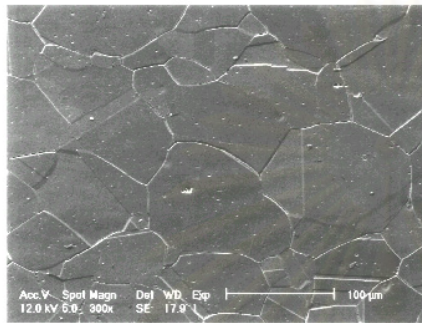
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับเวลาในการอบอ่อน ที่อุณหภูมิต่างๆ



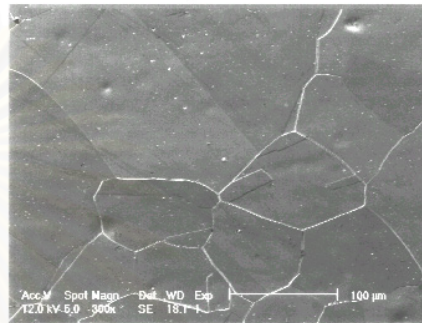
a)



b)

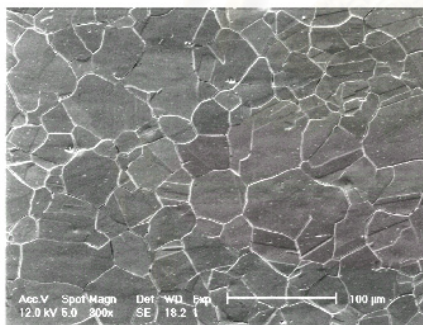


c)

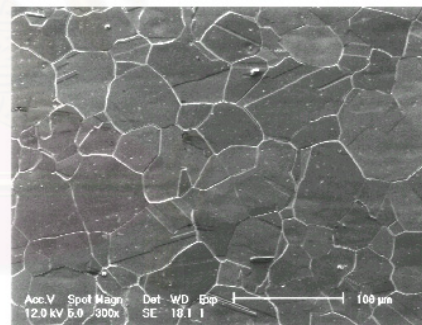


d)

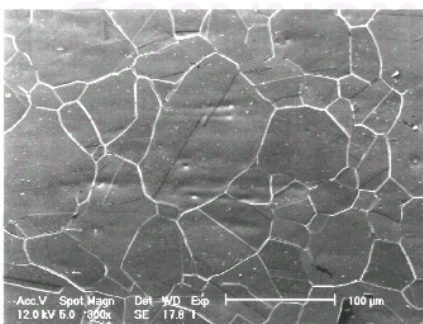
รูปที่ 5.5 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน หลังจากการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา a) 10 นาที b) 30 นาที c) 60 นาที และ d) 120 นาที



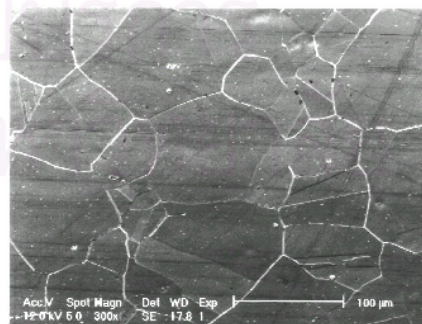
a)



b)

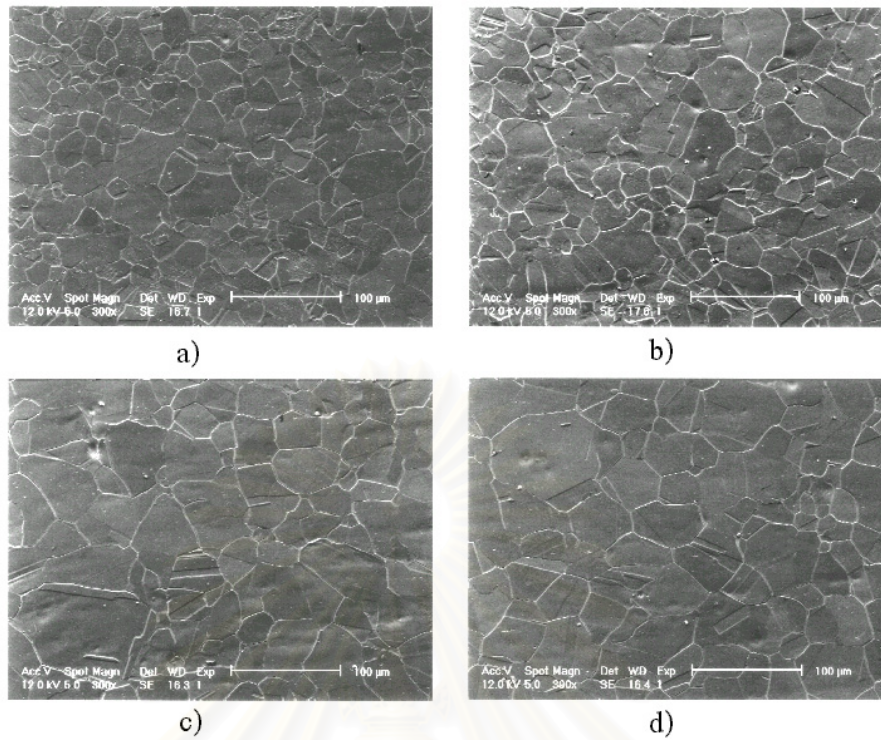


c)

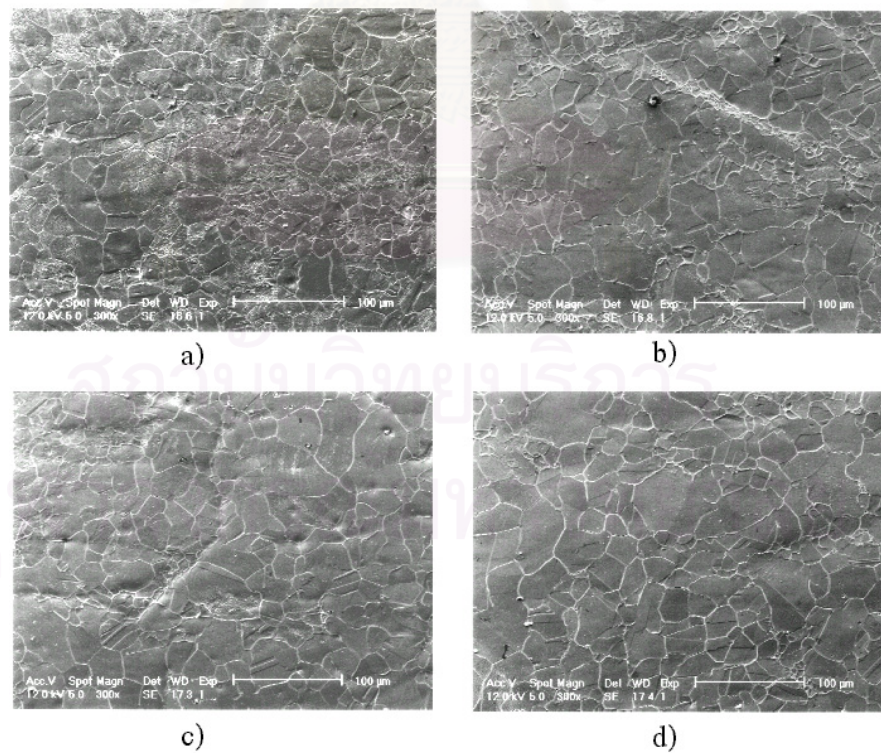


d)

รูปที่ 5.6 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน หลังจากการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 950 °C เป็นเวลา a) 10 นาที b) 30 นาที c) 60 นาที และ d) 120 นาที

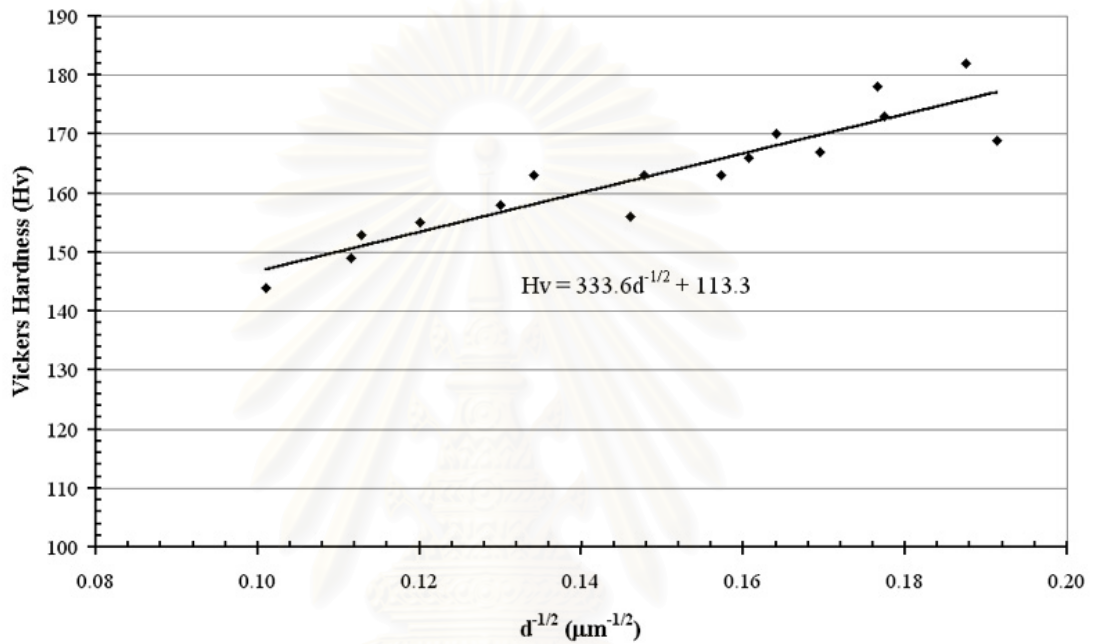


รูปที่ 5.7 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน หลังจากการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา a) 10 นาที b) 30 นาที c) 60 นาที และ d) 120 นาที

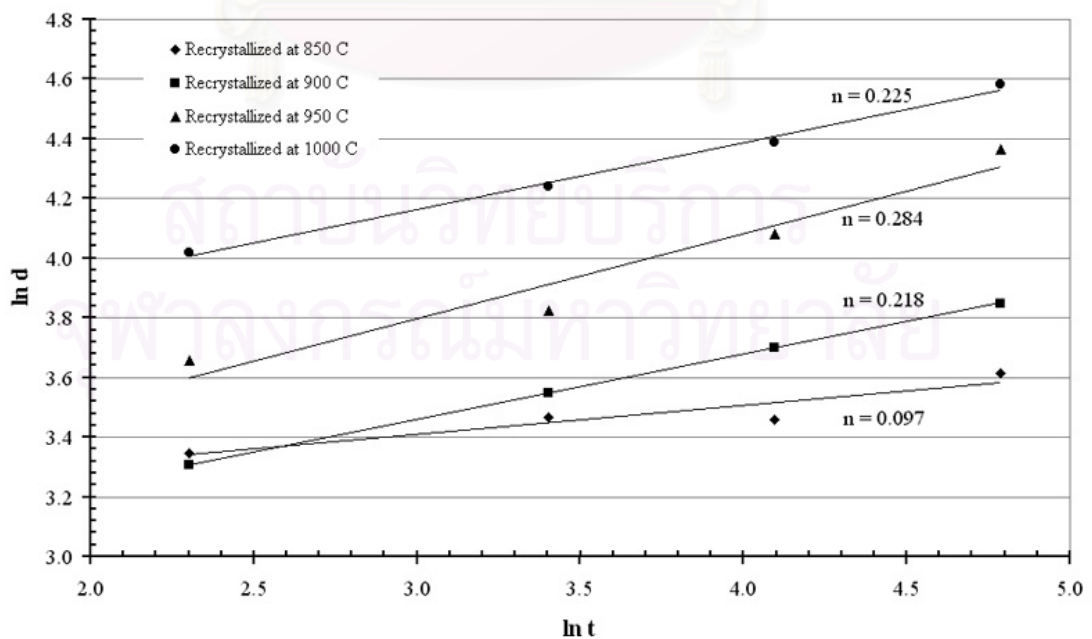


รูปที่ 5.8 แสดงโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน หลังจากการตกผลึกใหม่ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา a) 10 นาที b) 30 นาที c) 60 นาที และ d) 120 นาที

จากสมการของ Hall - Petch ($\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรน (d) กับค่า yield stress (σ) ในวัสดุ โดยขนาดของเกรนที่ใหญ่ขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงของวัสดุลดลง เราสามารถนำความสัมพันธ์นี้มาประยุกต์ใช้ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับความแข็งแรงของวัสดุได้ เพราะโดยทั่วไปความแข็งแรงจะมีค่ามากกว่า yield stress ประมาณ 3 เท่า รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับ $d^{-1/2}$ ได้สมการ $H_v = 333.6 d^{-1/2} + 113.3$



รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งแรงกับ $d^{-1/2}$



รูปที่ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln d$ กับ $\ln t$

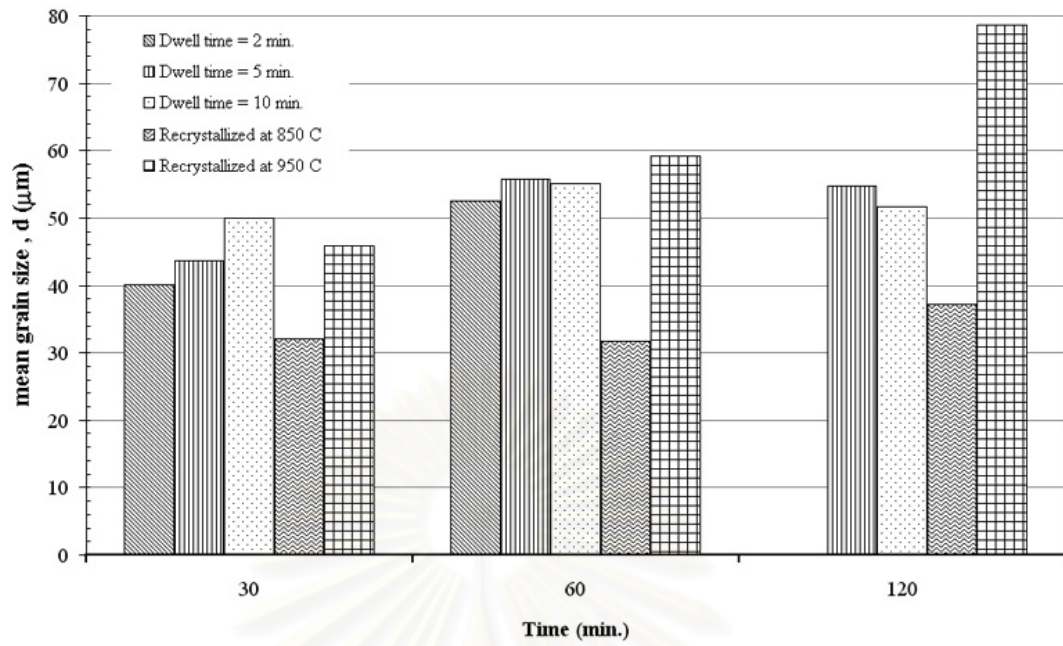
จากจลนศาสตร์ของการขยายขนาดของเกรน ขนาดของเกรนสามารถอธิบายเป็นฟังก์ชันของเวลาได้ดังนี้ $d = kt^n$ เมื่อ d คือขนาดของเกรน k คือค่าคงที่ t คือเวลาในการอบอ่อน และ n คือ metallurgical constant จากรูปที่ 5.9 ค่า n มากที่สุดที่อุณหภูมิ 950 °C และต่ำสุดที่อุณหภูมิ 850 °C นั่นคืออัตราการขยายขนาดของเกรนมากที่สุดที่อุณหภูมิ 950 °C และอัตราการขยายขนาดของเกรนต่ำที่สุดที่อุณหภูมิ 850 °C ดังนั้นจากการทดลองนี้ เราจึงเลือกอุณหภูมิ 950 และ 850 °C ในการทำการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อไป

5.2 การอบอ่อนแบบวัฏจักร (Cyclic Annealing)

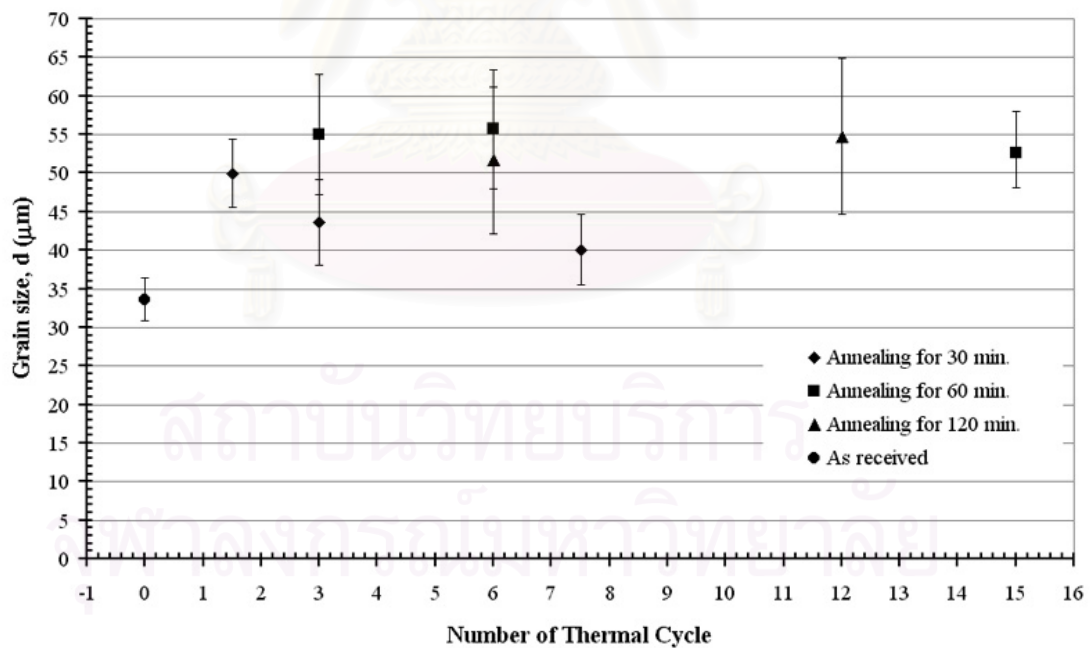
การอบอ่อนแบบวัฏจักรทำโดยให้ชิ้นงานตัวอย่างเคลื่อนที่สลับไปมาระหว่างอุณหภูมิ 850 และ 950 °C ผลการทดลองพบว่าขนาดของเกรนไม่ได้เป็นไปตามกฎของการอบอ่อนแบบที่ให้อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งขนาดของเกรนเฉลี่ยจะใหญ่ขึ้นเมื่อเวลาอบอ่อนนานขึ้น แต่หลังจากทำการอบอ่อนแบบวัฏจักรขนาดของเกรนเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลง โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 40 ถึง 50 ไมครอน เมื่อให้เวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อนเพิ่มจาก 30 นาที เป็น 120 นาที ตารางที่ 5.3 แสดงขนาดของเกรนตามเงื่อนไขการอบอ่อนแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการอบอ่อนแบบวัฏจักร

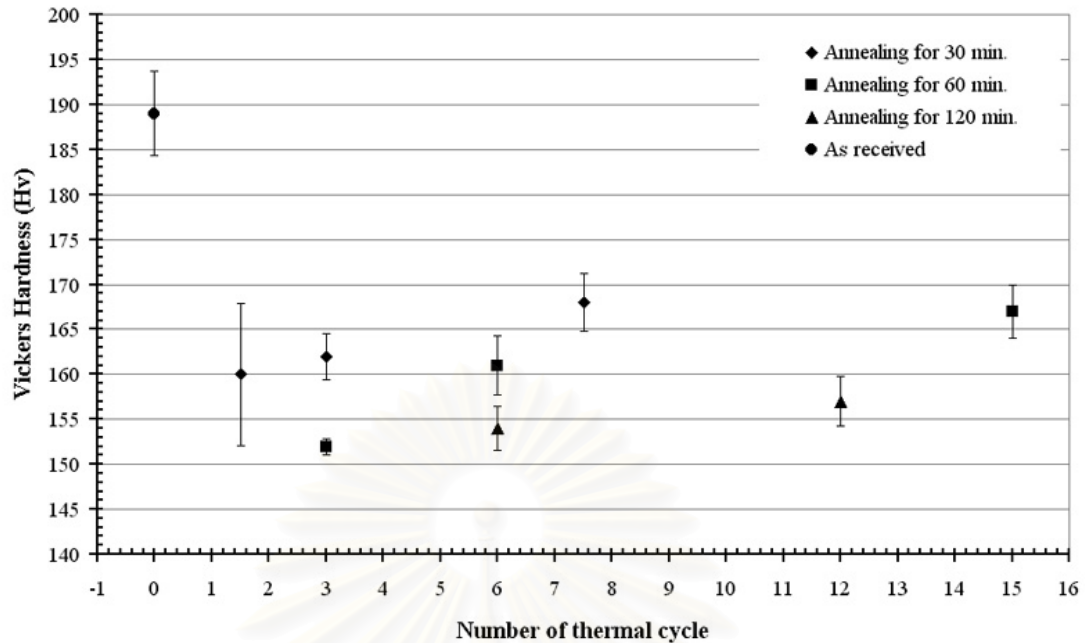
| Temperature | | Time | | Number of thermal cycle | Results | |
|-------------|------|-------------------|-------------------|-------------------------|-----------------|---------------|
| Tmax | Tmin | Total time (min.) | Dwell time (min.) | | Grain size (um) | Hardness (Hv) |
| | | | 2 | 7.5 | 40.03 ± 4.58 | 168 ± 3.2 |
| | | 30 | 5 | 3 | 43.60 ± 5.55 | 162 ± 2.6 |
| | | | 10 | 1.5 | 49.96 ± 4.46 | 160 ± 7.9 |
| | | | 2 | 15 | 52.59 ± 5.42 | 167 ± 3.0 |
| 950 | 850 | 60 | 5 | 6 | 55.71 ± 7.73 | 161 ± 3.3 |
| | | | 10 | 3 | 55.02 ± 7.83 | 152 ± 0.9 |
| | | | 2 | 30 | x | x |
| | | 120 | 5 | 12 | 54.75 ± 10.11 | 157 ± 2.5 |
| | | | 10 | 6 | 51.66 ± 9.57 | 154 ± 2.8 |



รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนเมื่ออบอ่อนเป็นเวลาต่างๆ



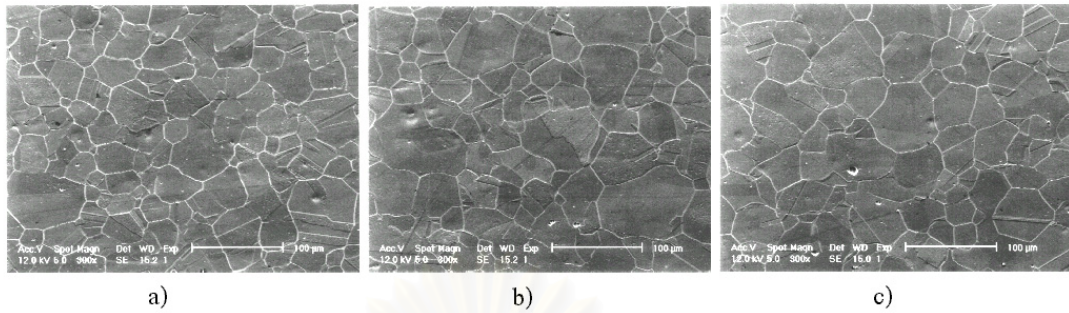
รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของเกรนกับจำนวนรอบ



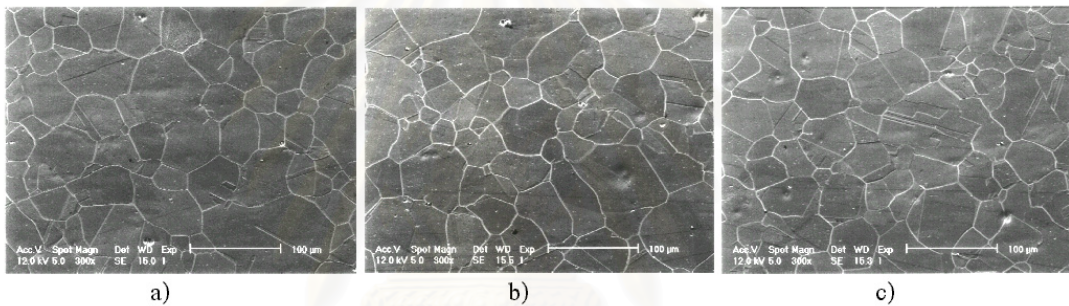
รูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับจำนวนรอบ

ผลจากการหน่วงอัตราการโตขึ้นของเกรนในระหว่างอบอ่อนแบบวัฏจักร อาจอธิบายได้จากการแพร่ของขอบเกรน เกรนโตขึ้นในช่วงแรกเป็นเพราะการเกิดขึ้นมาใหม่ของเกรน หลังจากถูกแปรรูป ทำให้มี driving force มากพอที่จะทำให้ขอบเกรนเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อโครงสร้างเกิดการตกผลึกใหม่หมดแล้ว จะทำให้การเคลื่อนที่ของขอบเกรนลดลงขึ้นอยู่กับจัดเรียงตัวของอะตอมบริเวณขอบเกรน เมื่อให้ความร้อนกลับไปกลับมาระหว่างอุณหภูมิสูงกับอุณหภูมิต่ำ มีผลทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของการแพร่บริเวณขอบเกรน นำมาถึงการที่เกรนไม่สามารถโตขึ้นได้

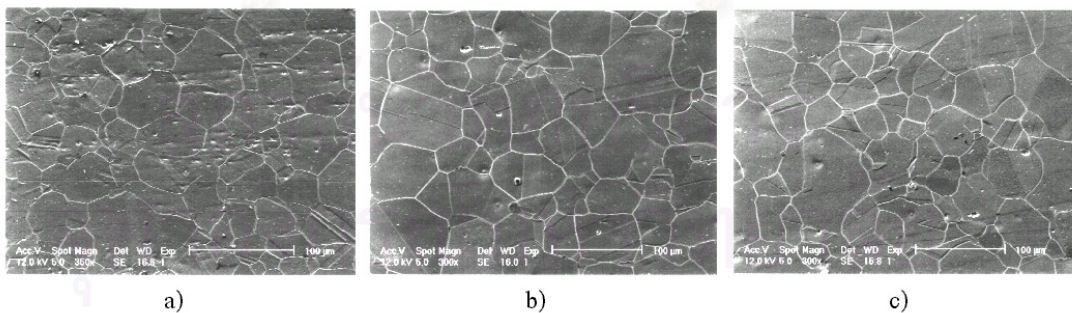
รูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดงความสัมพันธ์ของขนาดของเกรนกับจำนวนรอบในการเคลื่อนที่ขึ้นงานและเวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อน และรูปที่ 5.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับจำนวนรอบในการเคลื่อนที่ขึ้นงาน ซึ่งจะเห็นว่าค่าความแข็งและขนาดของเกรนยังคงมีความสัมพันธ์กันเหมือนกับการอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำที่ค่าหนึ่ง นั่นคือค่าความแข็งไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อขนาดของเกรนเฉลี่ยไม่เปลี่ยน รูปที่ 5.14 ถึง 5.16 แสดงโครงสร้างจุลภาคของขึ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรตามเงื่อนไขต่างๆ



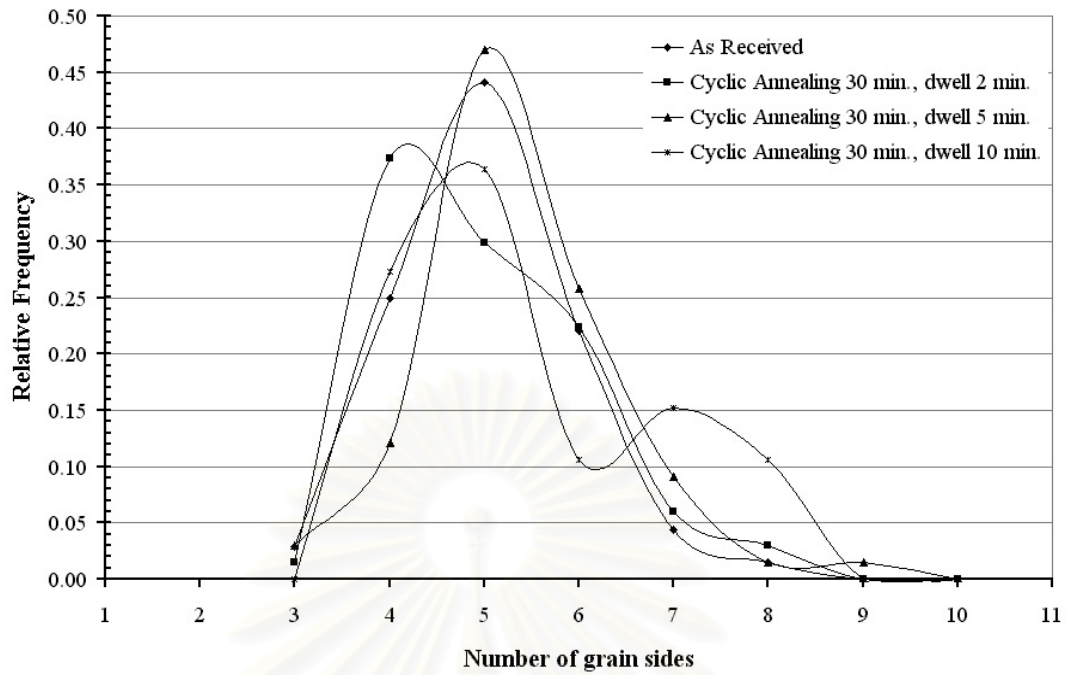
รูปที่ 5.14 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักร เป็นเวลา 30 นาที และหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) 2 นาที b) 5 นาที c) 10 นาที



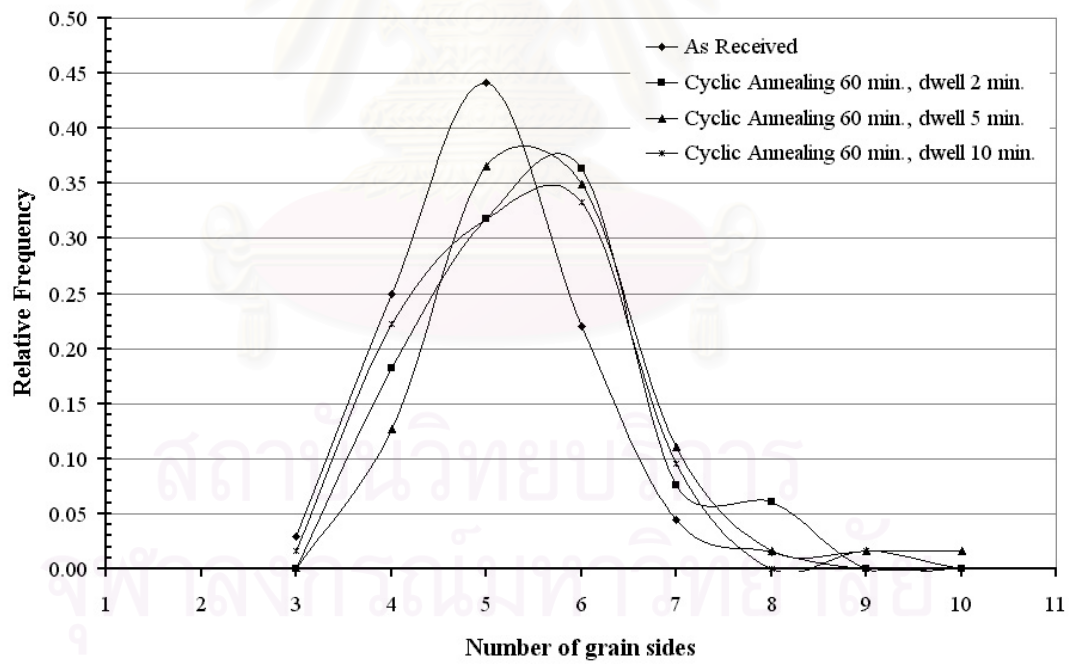
รูปที่ 5.15 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักร เป็นเวลา 60 นาที และหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) 2 นาที b) 5 นาที c) 10 นาที



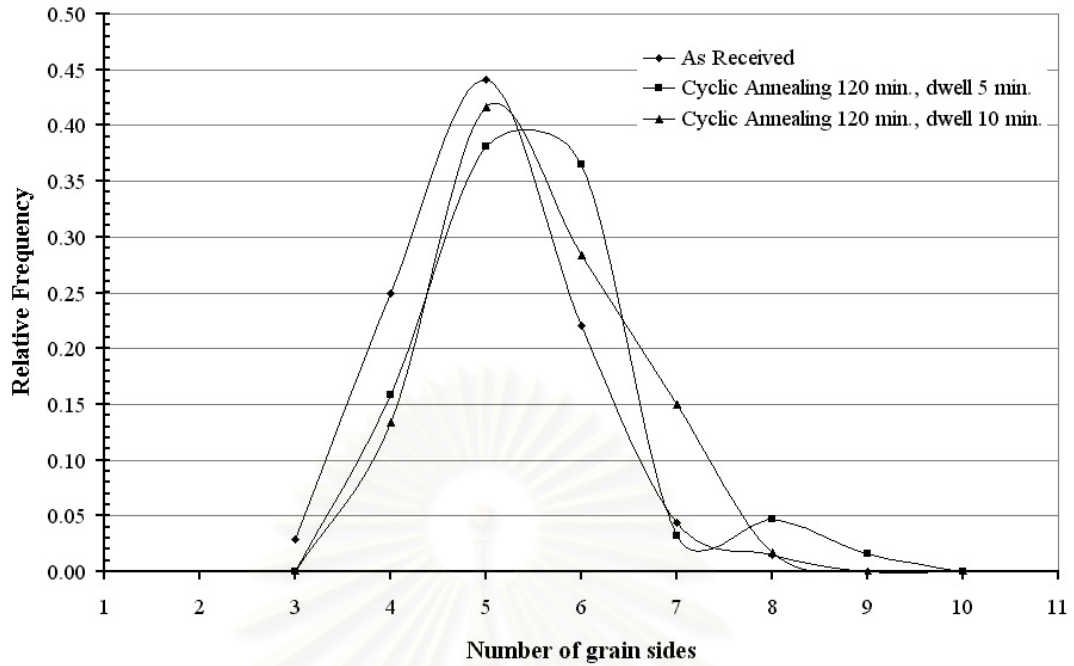
รูปที่ 5.16 โครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 a) As received และที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักร เป็นเวลา 120 นาที และหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา b) 5 นาที และ c) 10 นาที



รูปที่ 5.17 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 30 นาที

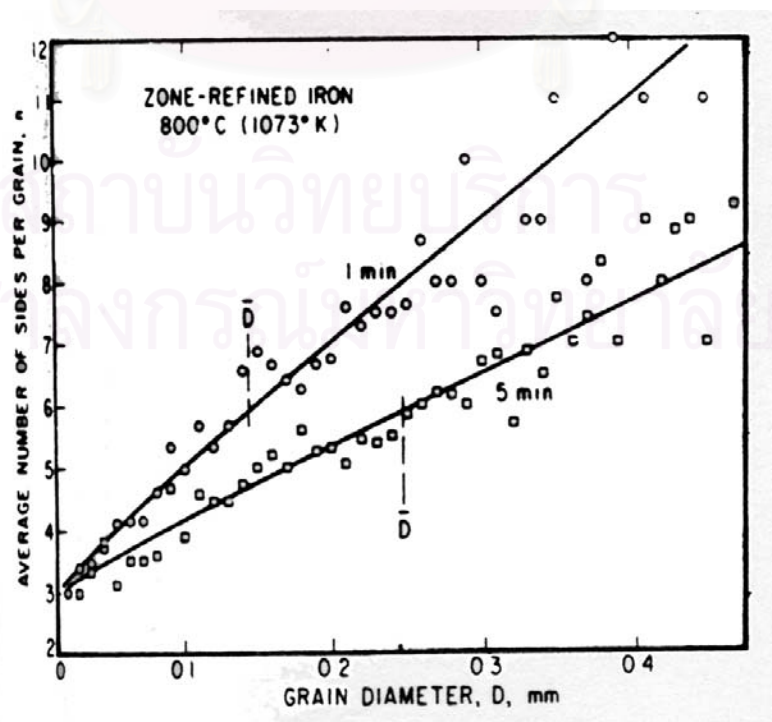


รูปที่ 5.18 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 60 นาที

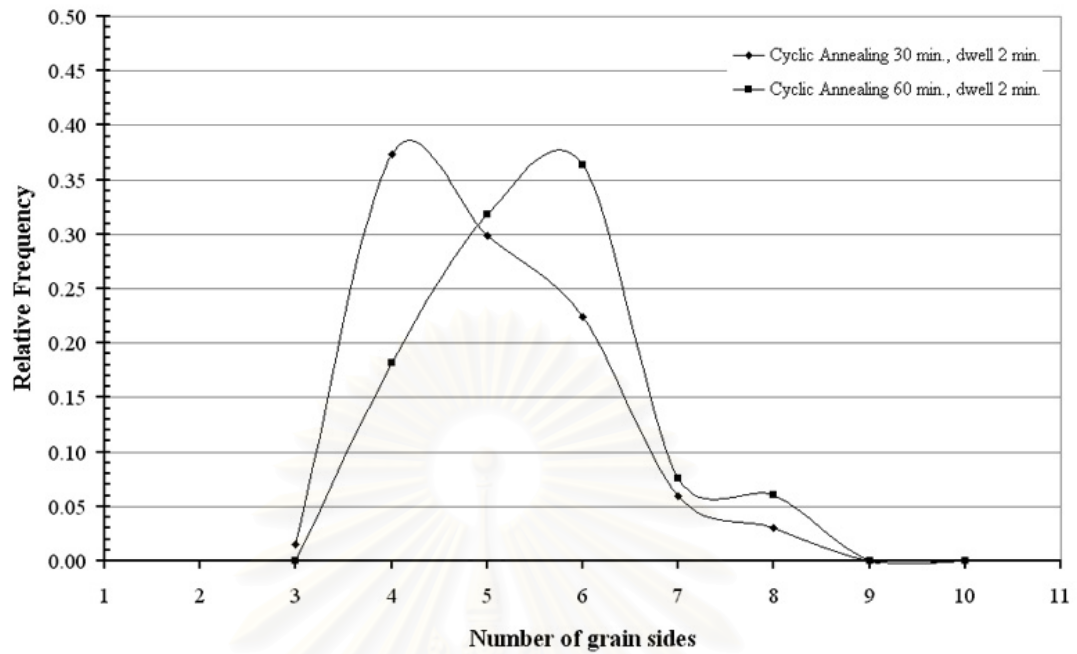
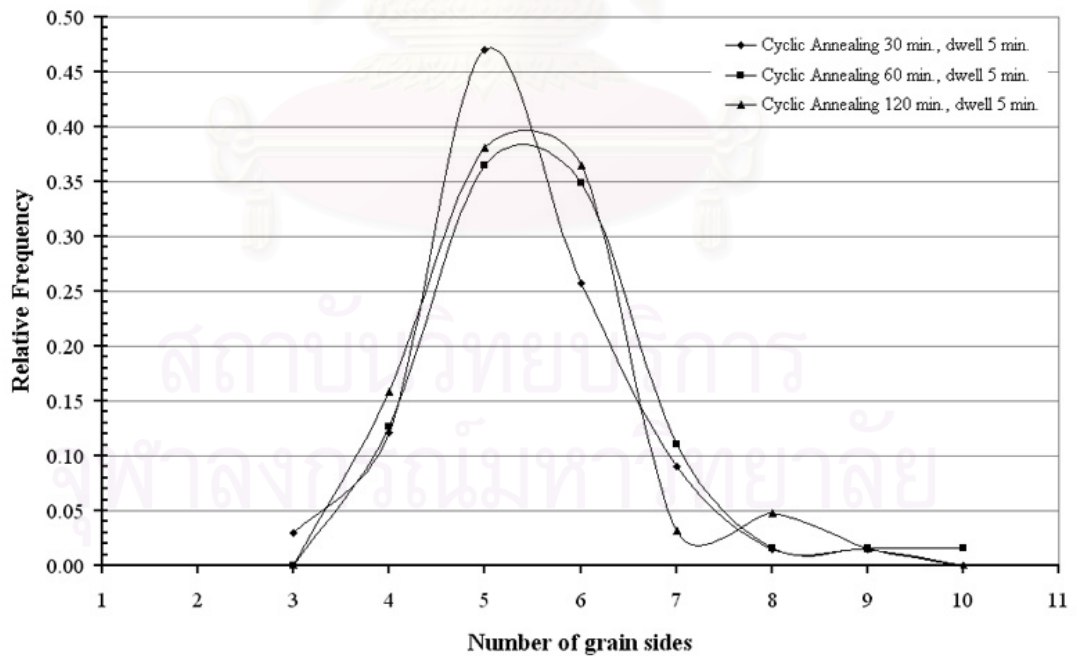


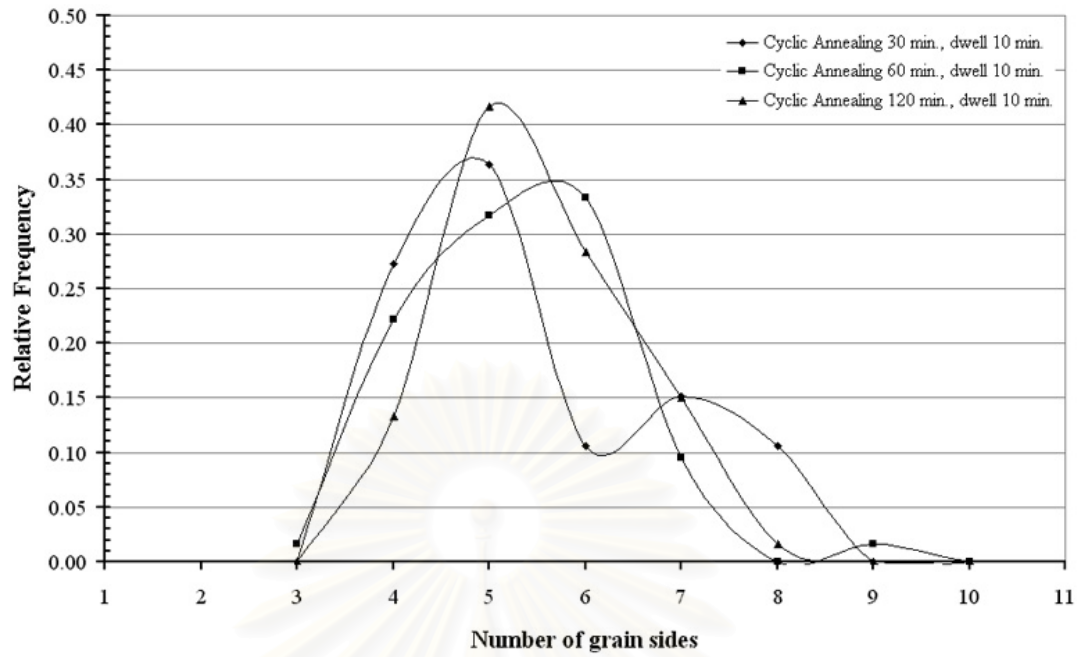
รูปที่ 5.19 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่ออบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 120 นาที

เพื่ออธิบายว่าทำไมขนาดของเกรนจึงไม่โตขึ้นในขณะที่ทำการอบอ่อนแบบวัฏจักรเมื่อให้เวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อนนานขึ้น จากงานวิจัยของ Hsun Hu [23] พบว่าขนาดของเกรนมีความสัมพันธ์กับจำนวนด้านของเกรน โดยจำนวนด้านของเกรนจะมากขึ้นเมื่อเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 5.20 จึงได้ทำการนับจำนวนด้านของเกรน รูปที่ 5.17 ถึง 5.19 และรูปที่ 5.21 ถึง 5.23 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เกิดขึ้นขณะทำการอบอ่อนแบบวัฏจักรตามเงื่อนไขต่างๆ

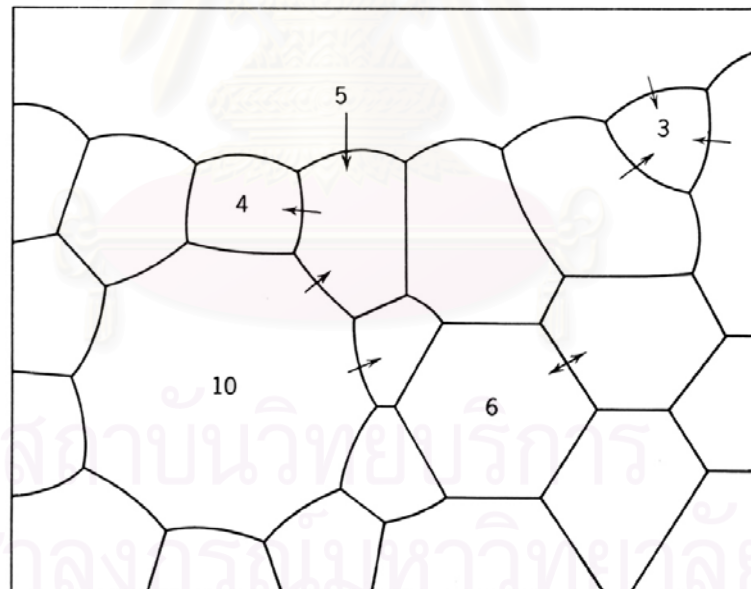


รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนด้านของเกรนกับขนาดของเกรน [23]

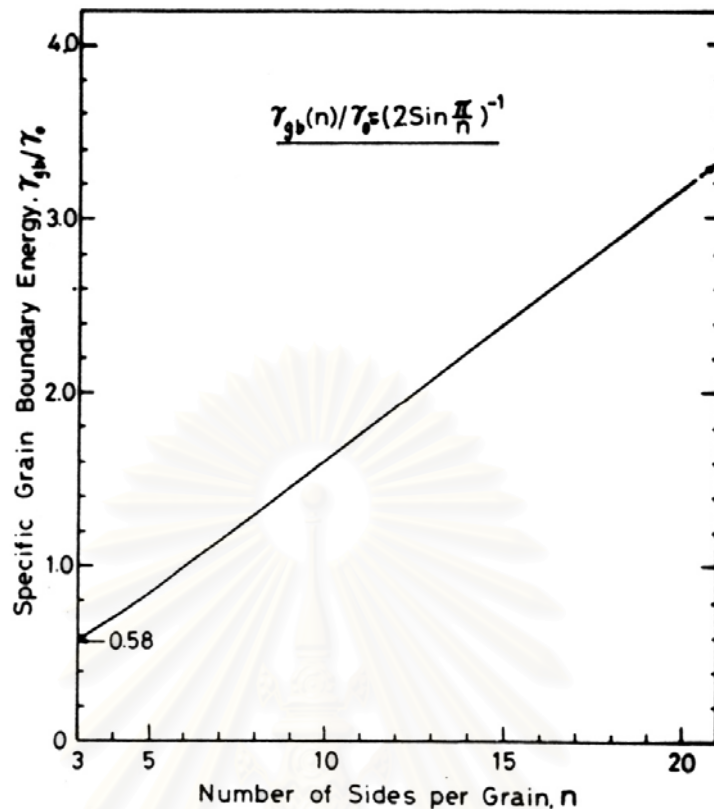
รูปที่ 5.21 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อให้ชิ้นงานตัวอย่าง
หยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา 2 นาทีรูปที่ 5.22 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อให้ชิ้นงานตัวอย่าง
หยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 5.23 แสดงจำนวนด้านของเกรนที่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อให้ชิ้นงานตัวอย่าง
หยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา 10 นาที



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนด้านของเกรนกับลักษณะการเคลื่อนที่ของขอบเกรน [24]



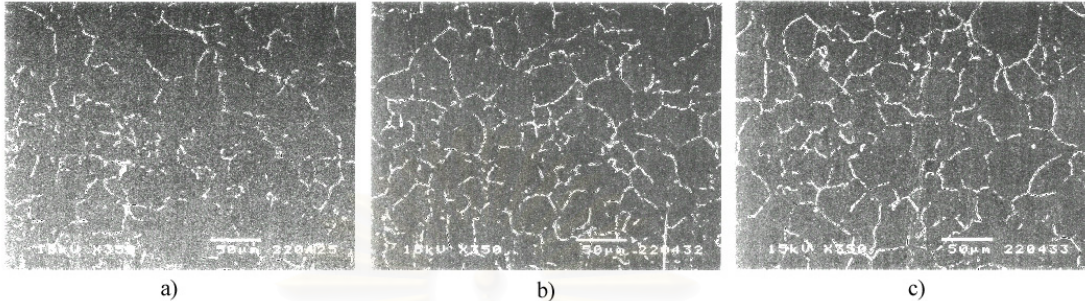
รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนด้านของเกรนกับพลังงานของขอบเกรน [25]

จากรูปที่ 5.20 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้มีจำนวนด้านมากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ กล่าวคือในการทดลองนี้จำนวนด้านของเกรนส่วนใหญ่เพิ่มขึ้นจาก 4 ด้าน ไปเป็น 6 ด้าน เมื่อเพิ่มเวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อนจาก 30 นาที เป็น 120 นาที รูปที่ 5.24 แสดงให้เห็นว่าเมื่อจำนวนด้านของเกรนน้อยกว่า 6 ด้าน ขอบเกรนจะเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในเกรน ทำให้เกรนที่มีจำนวนด้านน้อยกว่า 6 มีแนวโน้มที่จะหายไป และเกรนจะโตขึ้นเมื่อเกรนที่มีจำนวนด้านมากกว่า 6 เนื่องจากขอบเกรนเคลื่อนที่ออกจากตัวเกรน ในขณะที่เกรนมีจำนวนด้านเท่ากับ 6 เกรนจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง นี่อาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่จะตอบคำถามว่าทำไมขนาดของเกรนจึงไม่โตขึ้นเมื่อเวลาในการอบอ่อนนานขึ้น

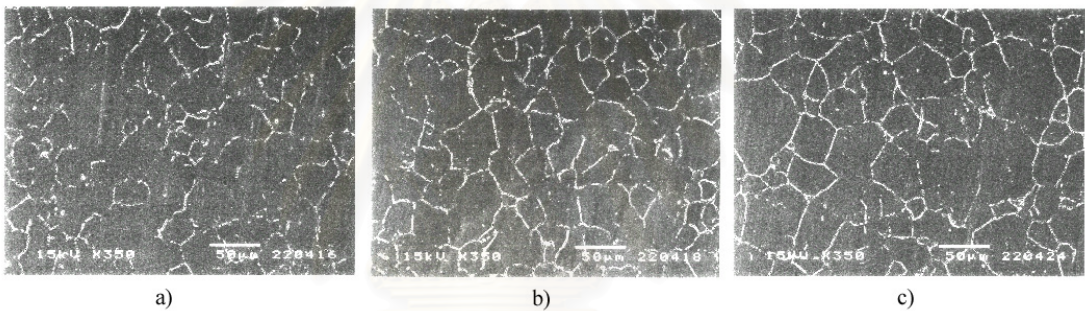
จากการวัดจำนวนด้านเป็นการแสดงให้เห็นในลักษณะทางกายภาพ เนื่องจากเกรนโตขึ้นจากการเคลื่อนที่ของขอบเกรน ซึ่งนอกจากจะขึ้นกับความโค้งของขอบเกรนแล้วยังขึ้นกับพลังงานที่ขอบเกรนด้วย จากงานวิจัยของ Tadao Watanabe แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนด้านของขอบเกรนกับพลังงานของขอบเกรน ดังรูปที่ 5.24 จะเห็นว่าเมื่อจำนวนด้านของเกรนเพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานของขอบเกรนเพิ่มขึ้นด้วย จากการทดลองจำนวนด้านของเกรน

ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทำให้พลังงานของขอบเกรนไม่แตกต่างกัน เป็นผลให้ขอบเกรนเคลื่อนที่ได้ ในอัตราเร็วที่เท่าๆ กัน จึงไม่ทำให้เกิดการโตขึ้นของเกรน

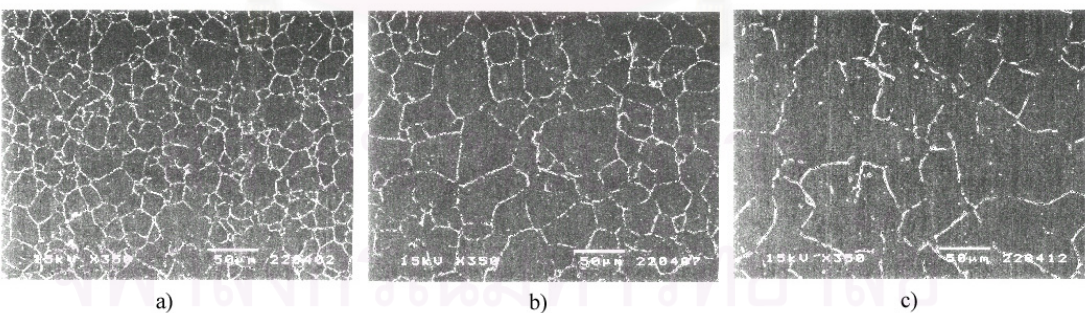
5.3 การทดสอบการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน



รูปที่ 5.26 แสดงการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน ของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 30 นาที และหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) 2 นาที b) 5 นาที และ c) 10 นาที



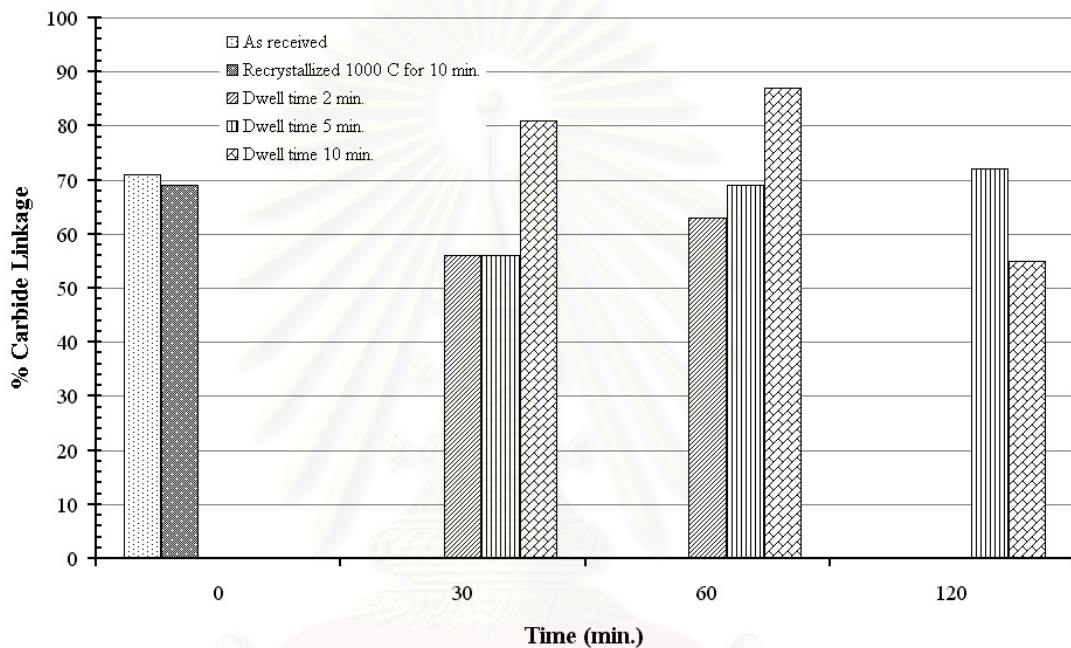
รูปที่ 5.27 แสดงการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน ของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 60 นาที และหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) 2 นาที b) 5 นาที และ c) 10 นาที



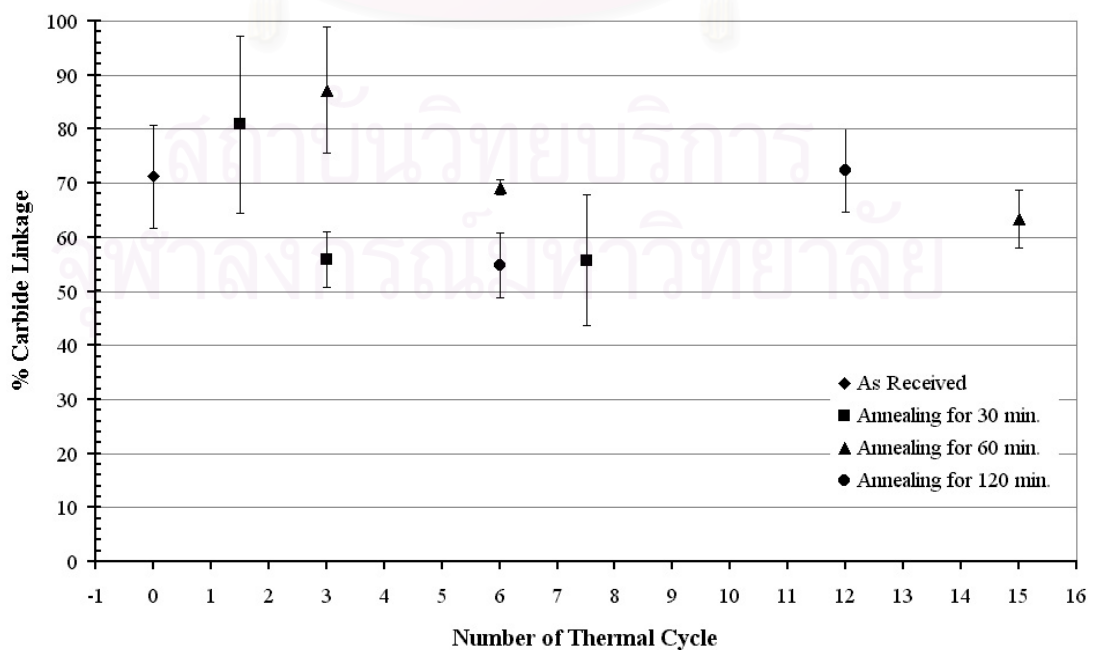
รูปที่ 5.28 แสดงการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน ของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 120 นาที และหยุดค้างที่แต่ละเตาเป็นเวลา a) As – Received b) 5 นาที และ c) 10 นาที

เพื่อศึกษาถึงผลกระทบจากการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการต้านทานการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน ชิ้นงานถูกนำไปแช่ในซีไอซ์ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทดสอบด้วย 10% กรดออกซาลิก รูปที่ 5.26 – 5.28 แสดงการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน ของ

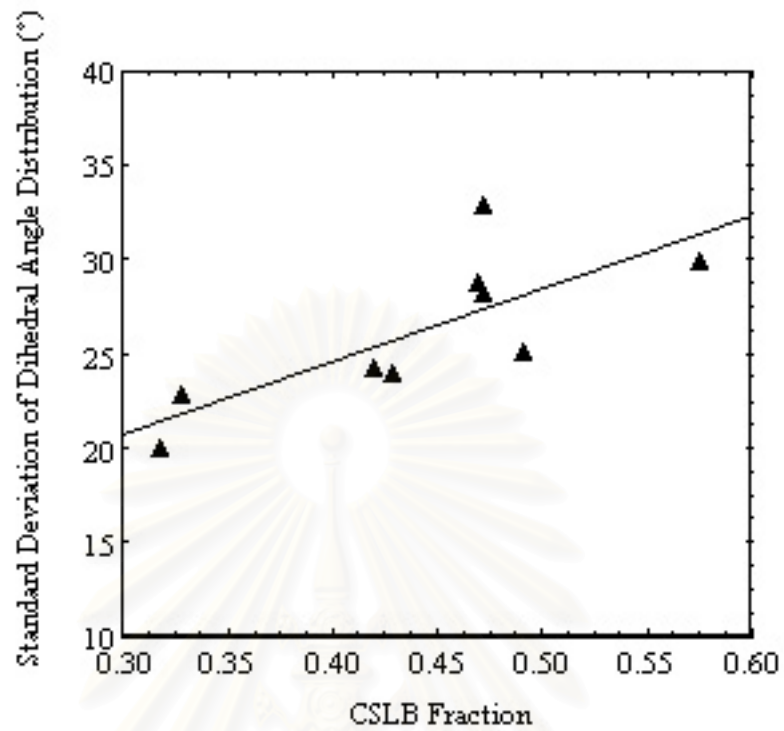
ชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรตามเงื่อนไขต่างๆ เนื่องจากขนาดของเกรนไม่เท่ากัน จึงไม่สามารถเปรียบเทียบปริมาณการกัดกร่อนได้โดยตรงจากรูปถ่ายที่กำลังขยายเท่ากัน รูปที่ 5.29 – 5.30 แสดง % Carbide Linkage เป็นฟังก์ชันของเวลาและจำนวนรอบตามลำดับ หลังจากปรับแก้ให้ขอบเกรนมีปริมาณเท่ากันแล้ว จะเห็นว่า การอบอ่อนแบบวัฏจักรสามารถเพิ่มการต้านทานการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนได้มากขึ้น เมื่ออบอ่อนเป็นเวลา 30 และ 60 นาที โดยเพิ่มจำนวนรอบให้มากขึ้น ส่วนการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่เวลา 120 นาที ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติด้านการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน



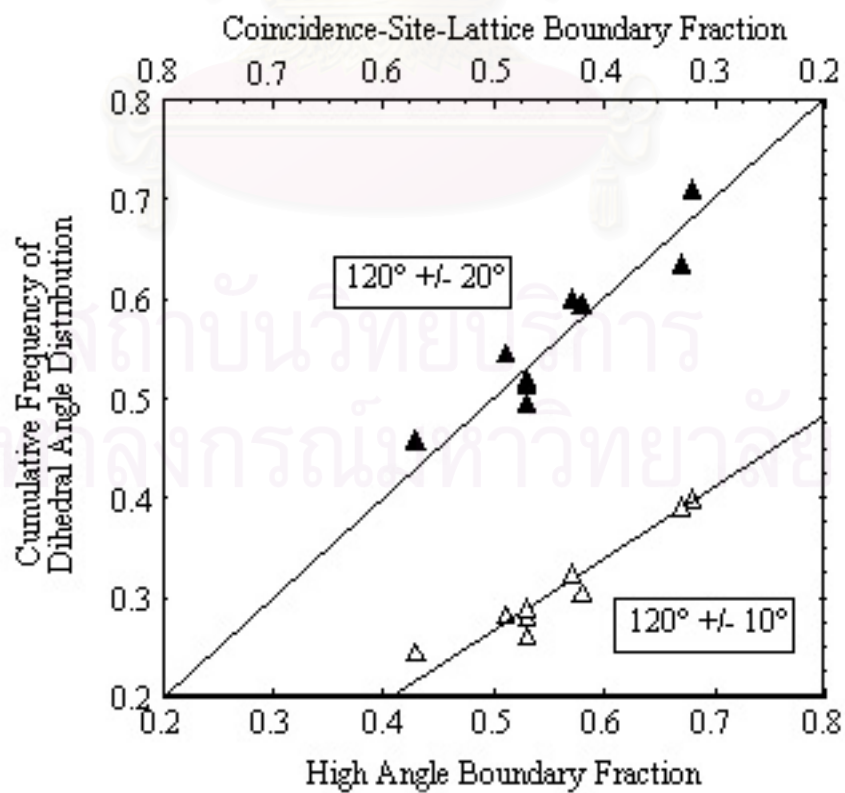
รูปที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่าง % Carbide Linkage กับเวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อน



รูปที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง % Carbide Linkage กับจำนวนรอบในการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน

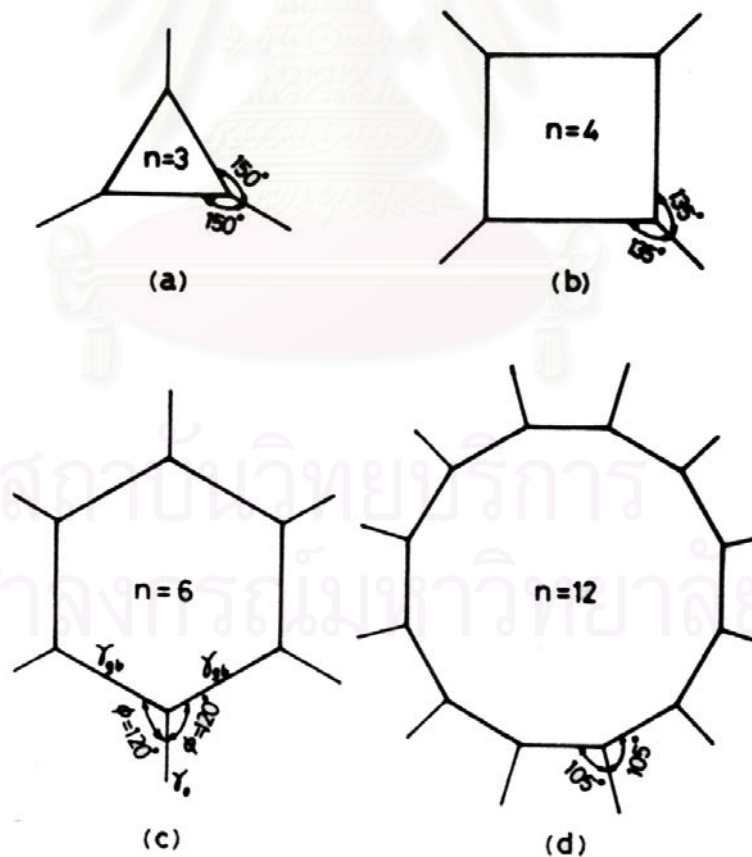


รูปที่ 5.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า S.D กับสัดส่วน CSLB [26]

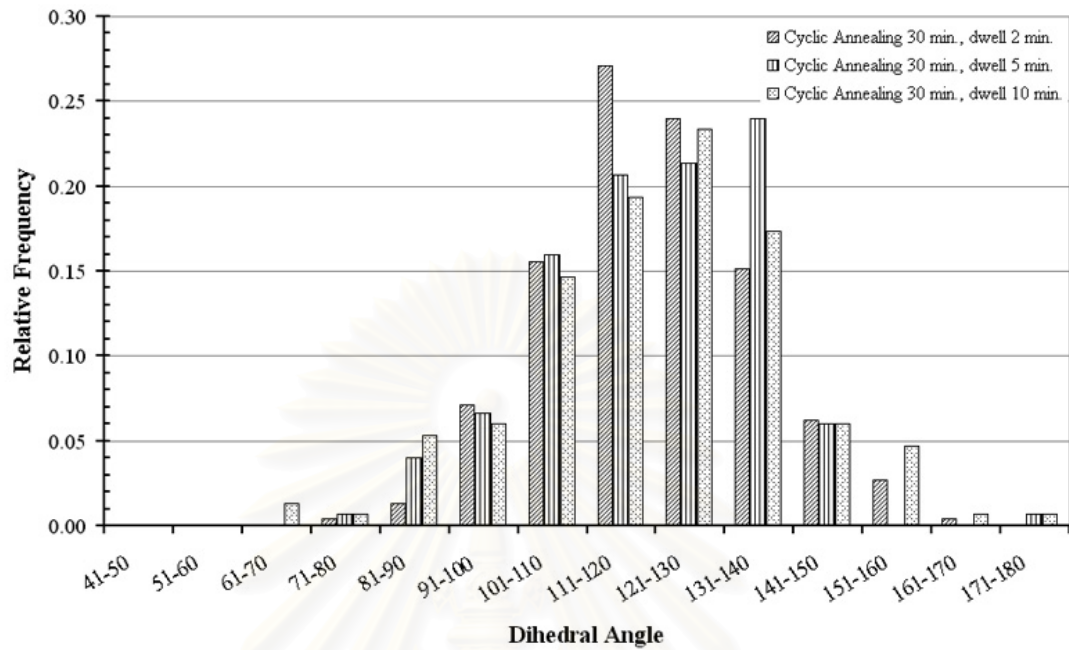


รูปที่ 5.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า CFDA กับสัดส่วน CSLB [26]

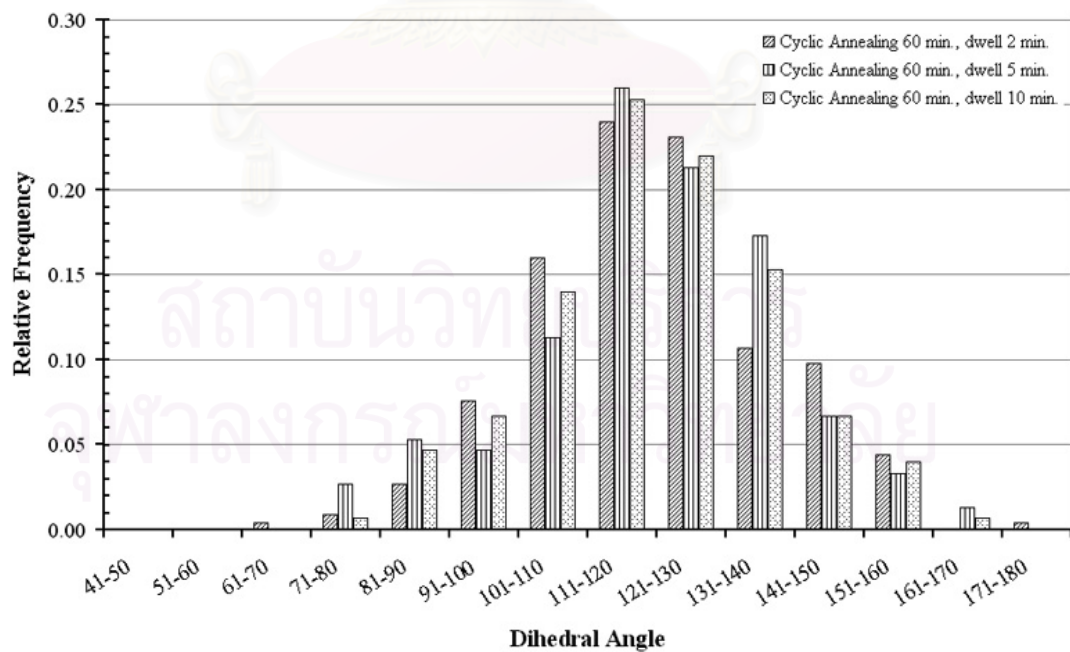
การตกตะกอนของโครเมียมคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน จะเกิดขึ้นเฉพาะขอบเกรนที่มีการจัดเรียงของอะตอมบริเวณขอบเกรนแบบไม่เป็นระเบียบ ทำให้ขอบเกรนมีพลังงานสูง จากงานวิจัยของ T. Watanabe [25] พบว่าสามารถคำนวณหาพลังงานของขอบเกรนจากมุมบริเวณ Triple Junction โดยมุมที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับจำนวนด้านของเกรนด้วย ดังรูปที่ 5.33 นอกจากนี้ V. Thaveprungsriporn และคณะ [26] ยังพบความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวของมุมกับสัดส่วนของ CSLB (Coincidence – site – lattice boundaries) ดังแสดงในรูปที่ 5.31 – 5.32 ผลการวัดการกระจายของมุมบริเวณ Triple Junction ของชิ้นงานที่ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักรตามเงื่อนไขต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.34 - 5.36 จะเห็นว่าการกระจายของมุมไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับการที่จำนวนด้านของเกรนส่วนใหญ่ไม่แตกต่างกันนั่นเอง ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้การกระจายของมุมมาอธิบายเหตุผลว่าทำไมชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบอ่อนแบบวัฏจักรแล้วสามารถทนต่อการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนได้ดีขึ้น



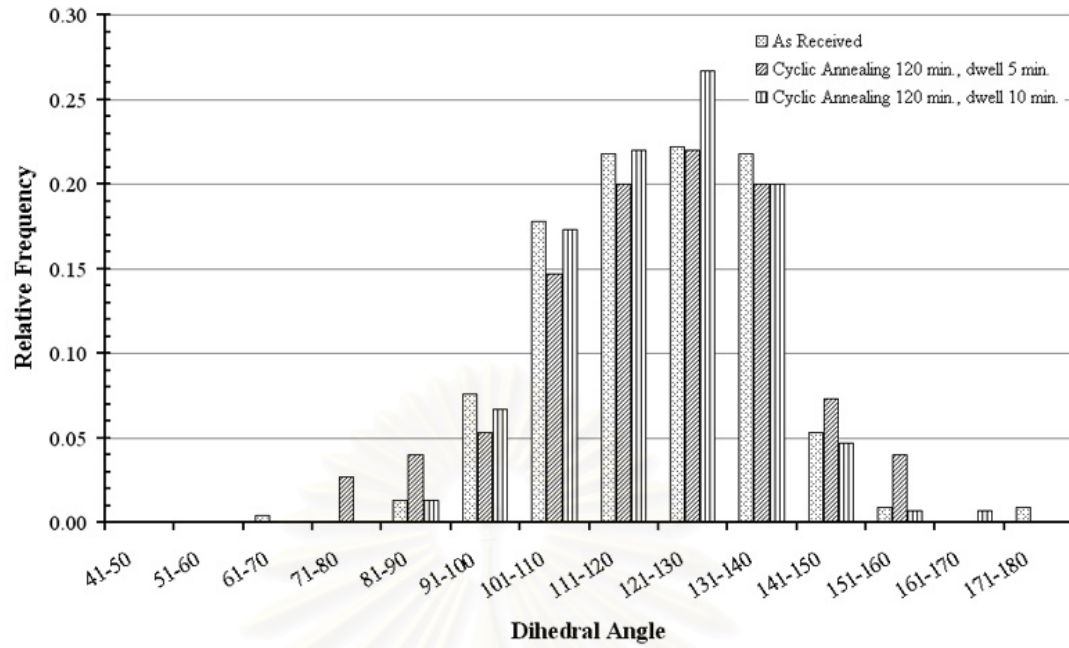
รูปที่ 5.33 แสดงจำนวนด้านของเกรนกับมุมที่ Triple Junction [25]



รูปที่ 5.34 การกระจายของมุมในชิ้นงานตัวอย่างที่อบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 5.35 การกระจายของมุมในชิ้นงานตัวอย่างที่อบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 5.36 การกระจายของมุมในชิ้นงานตัวอย่างที่อบอ่อนแบบวัฏจักรเป็นเวลา 120 นาที และชิ้นงานที่ไม่ได้ผ่านการอบอ่อนแบบวัฏจักร

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

บทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองที่ทำมาทั้งหมด พร้อมทั้งเสนอแนะแนวทางการทดลองต่างๆ เพื่อให้เข้าใจกระบวนการอบอ่อนแบบวัฏจักรและนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของวัสดุให้ดีขึ้น

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาและทดลองหาผลกระทบจากการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 หลังเกิดการตกผลึกใหม่ โดยการรีดเย็นชิ้นงานให้มีความหนาลดลง 30 % จากนั้นนำมาอบอ่อนโดยให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ระหว่างอุณหภูมิ 950 °C และ 850 °C ตามเงื่อนไขต่าง ๆ พบว่า

1. ขนาดของเกรนเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนจำนวนรอบในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานและเวลารวมทั้งหมดในการอบอ่อน ซึ่งอาจเกิดจากอัตราการขยายขนาดของเกรนถูกหน่วงให้ช้าลงขณะทำการอบอ่อนแบบวัฏจักร

2. หลังจากนำไปเซนซิไทซ์ที่อุณหภูมิ 650 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง การอบอ่อนแบบวัฏจักรสามารถทำให้เหล็กกล้าไร้สนิม 304 มีความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรนได้ดีขึ้น เมื่อจำนวนรอบในการเคลื่อนที่ของชิ้นงานมากขึ้นที่เวลาการอบอ่อนเป็น 30 และ 60 นาที ส่วนที่เวลาการอบอ่อน 120 นาที ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติด้านความต้านทานการเกิดการกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การอบอ่อนแบบวัฏจักรที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการประยุกต์ใช้ความแตกต่างช่วงอุณหภูมิระหว่างเตาความร้อน 2 เตา โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็นตัววัดอุณหภูมิของชิ้นงานที่เคลื่อนที่อยู่ในเตาทั้งสอง การทดลองที่ทำในที่นี้ได้ศึกษาตัวแปรบางตัวที่คิดว่ามีผลกระทบต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ยังเหลือตัวแปรอีกหลายตัวที่ยังไม่ได้ศึกษา เช่น การเปลี่ยนช่วงอุณหภูมิ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของชิ้นงาน เวลาที่หยุดค้างในแต่ละเตา (หยุดค้างในแต่ละเตาที่เวลาไม่เท่ากัน) และการเริ่มอบอ่อนที่อุณหภูมิต่ำก่อนแล้วค่อยเคลื่อนไปที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น ซึ่งจะทำให้เราเข้าใจกลไกของการอบอ่อนแบบวัฏจักรต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุให้ดีขึ้น นำมาซึ่งการออกแบบและควบคุมโครงสร้างจุลภาคของวัสดุให้มีสมบัติที่ดีกว่าเดิม

รายการอ้างอิง

1. Bruemmer S.M. and Was G.S. Microstructural and microchemical mechanisms controlling intergranular stress corrosion cracking in light – water – reactor systems. Journal of Nuclear Materials 216 (1994): 348 – 363.
2. Simonen E.P. and Bruemmer S.M. Radiation effects on environmental cracking of stainless steels. JOM 50 (1998): 128 - 136.
3. Nakata K.; Shimanuki S.; Anzai H.; Fuse M.; and Hattori S. Effects of γ -ray irradiation on crack growth of sensitized type 304 stainless steel in 288°C water. Corrosion science 49 (1993): 421 - 432.
4. Bennett B.W. and Pickering H. W. Effect of grain boundary structure on sensitization and corrosion of stainless steel. Metallurgical transactions A. 18A (June 1987): 1117 - 1124.
5. Romero R.J. and Murr L.E. Torque-related lamellar carbide growth associated with annealing twins in 304 stainless steel. Acta materialia 43 (1995): 418 – 429.
6. Kokawa H.; Shimada M.; and Sato Y.S. Grain – boundary structure and precipitation in sensitized austenitic stainless steel. JOM (July 2000): 34 – 37.
7. Murr L.E.; Advani A.; Shankar S.; and Atteridge D.G. Effects of deformation (strain) and heat treatment on grain boundary sensitization and precipitation in austenitic stainless steel. Materials Characterization 24 (1990): 135 – 158.
8. Randle V. Mechanism of twinning-induced grain boundary engineering in low stacking-fault energy materials. Acta materialia 47 (1999): 4187 – 4196.
9. Kumar M.; Schwartz A.J; and King W.E. Microstructure evolution during grain boundary engineering of low to medium stacking fault energy fcc materials. Acta materialia 50 (2002): 2599 – 2612.

10. Shimada M.; Kokawa H.; Wang Z.J.; Sato Y.S.; and Karibe I. Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twin – induced grain boundary engineering. Acta materialia 50 (2002): 2331 – 2341.
11. Sheikh – Ali A.D; Molodov D.A.; and Garmestani H. Migration and reorientation of grain boundaries in Zn bicrystals during annealing in a high magnetic field. Scripta materialia 48 (2003): 483 – 488.
12. Sahay S.S.; Malhotra C.P.; and Kolkhede A.M. Accelerated grain growth behavior during cycling annealing. Acta materialia 51 (2003): 339 – 346.
13. Kitajima S.; Ohta M.; and Tonda H. Production of highly perfect copper crystals with thermal cyclic annealing. Journal of Crystal Growth 24/25 (1974): 521 – 526.
14. Horvath W.; Prantl W.; Werner E.; and Stüwe H.P. Influence of thermal cycling on the microstructure of a ferritic – austenitic duplex stainless steel. Materials Characterization 34 (1995): 227 – 285.
15. Ilyin A.M.; Tazhibaeva I.L.; and Borisov B.A. Effect of thermal cycling on impurity grain boundary segregation in maraging steel. Journal of Nuclear Materials 307 – 311 (2002): 475 – 478.
16. Schuh C.A. and Dunand D.C. Enhanced densification of zinc powders through thermal cycling. Acta materialia 50 (2002): 1349 – 1358.
17. ปิยะพร สิ้นโสทรก. ผลกระทบของการรีคริสตัลไลเซชันและการขยายขนาดเกรนต่อการเกิดแอนนีลลิ่งทวินในเหล็กกล้าไร้สนิม 304. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
18. Jastrzebski Z.D. The nature and properties of engineering materials. 2nd Ed., Wiley, 1976.
19. Metal Handbook. Vol. 7, 8th ed. American Society for Metals, 1972.

20. Cotteril P. and Mould P.R. Recrystallization and grain growth in metals. Surrey University Press, 1976.
21. Reed – Hill R.E. Physical Metallurgy Principles. 2nd ed., PWS-KENT Publishing Co., Boston, MA, 1973.
22. William K. Dalton. The technology of metallurgy. Macmillan Publishing Company, 1994.
23. Hsun Hu, Can.Met.Quart., 13, 275 (1974).
24. Yet – Ming Chiang, Dunbar Birnie III and W. David Kingery. Physical Ceramics : Principles for ceramic science and engineering. John Wiley & Sons, 1997.
25. Tadao Watanabe. Prediction of change in grain boundary energy during grain growth. Scripta materialia. 21 (1987): 427 – 432.
26. Thaveeprungsriporn V., Sinsrok P., and Thong – Aram D. Effect of iterative strain annealing on grain boundary network of 304 stainless steel. Scripta materialia. 44 (2001): 67 – 71.



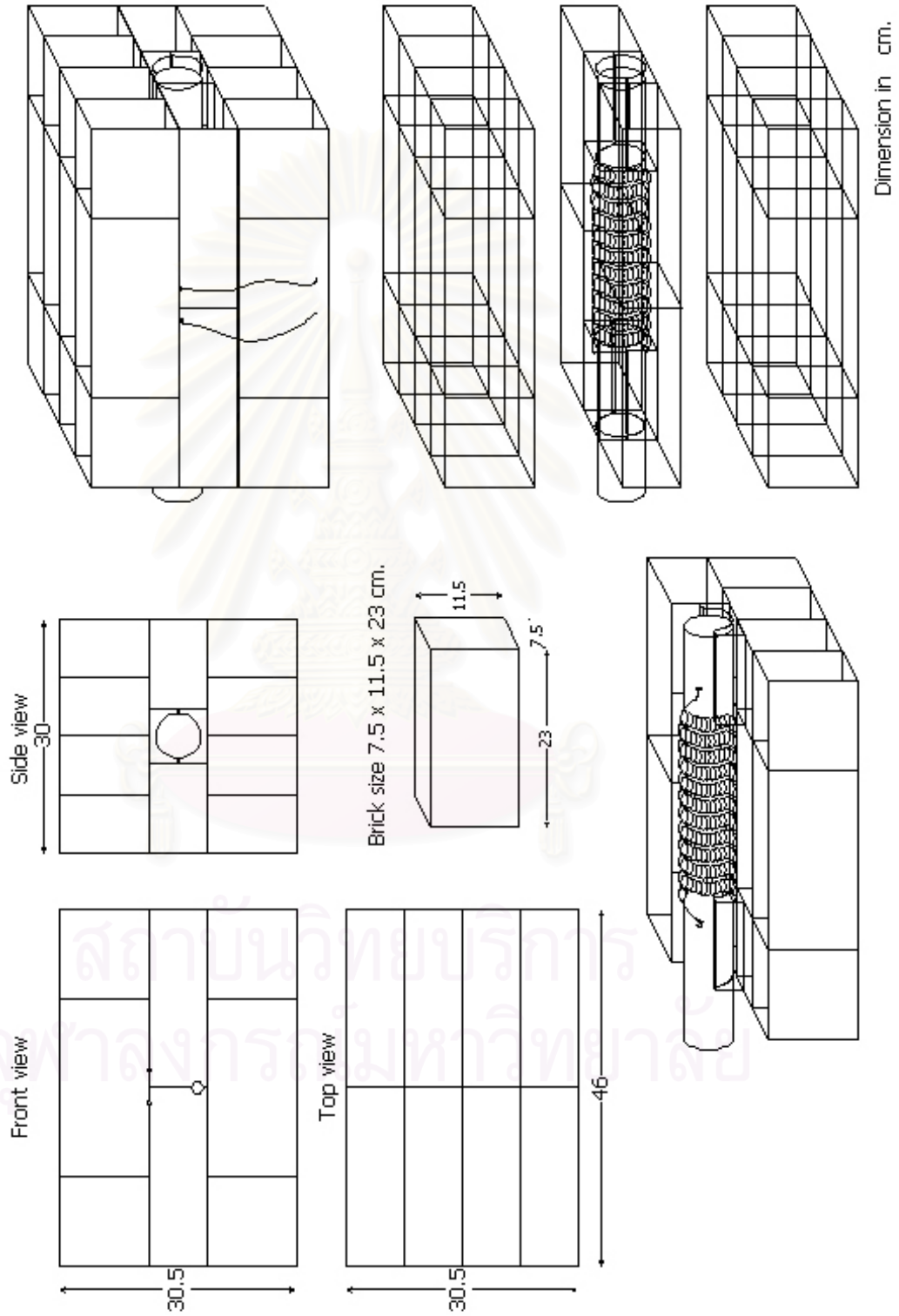
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

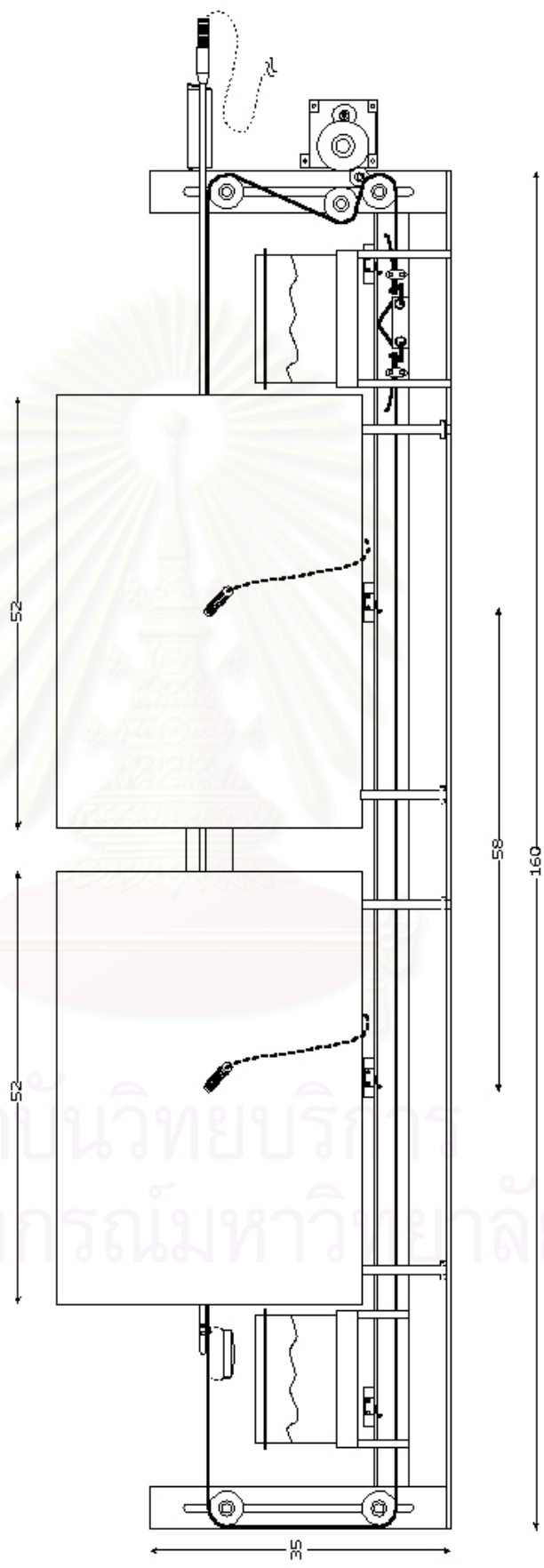
ภาคผนวก ก

โครงสร้างของเตาและระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักร

Details of Furnace Unit



Cyclic Annealing System



Dimension in cm.

ภาคผนวก ข

การใช้งานระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักร

เพื่อให้คนทั่วไปสามารถใช้งานระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาได้อย่างถูกต้องและปลอดภัย จำเป็นที่จะต้องมียุ่มือการใช้งาน ซึ่งจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

คู่มือการใช้งานระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักร

1. ระบบการอบอ่อนแบบวัฏจักรที่ออกแบบและสร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังรูปข้างล่าง ประกอบด้วยเตา 2 ตัว ตู้ควบคุม ที่ใส่ชิ้นงานตัวอย่าง ระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง และคอมพิวเตอร์สำหรับบันทึกข้อมูล



2. ตั้งอุณหภูมิที่ต้องการ โดยการตั้งค่าที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นรอจนกว่าเตาทั้ง 2 จะร้อนถึงอุณหภูมิที่ตั้งไว้

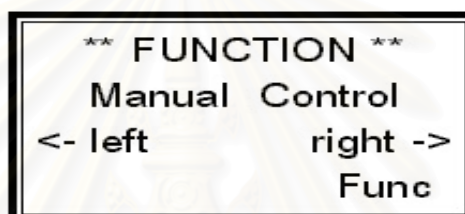
3. เปิดระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่าง หน้าจอ LCD จะแสดงข้อความดังรูปข้างล่าง

Cyclic Movement
Controller
Nuclear Engineering
Material Laboratory

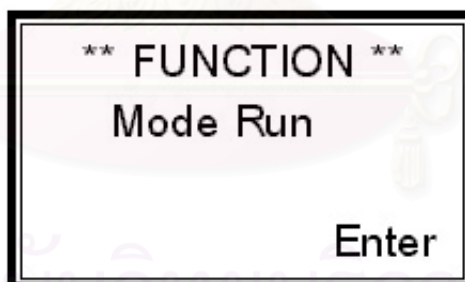
4. กดปุ่ม FUN ที่เป็นพิมพ์เพื่อเข้าสู่การใช้งานฟังก์ชันต่างๆ หน้าจอ LCD จะแสดงข้อความดังรูปข้างล่าง ซึ่งจะเริ่มจากโหมด Manual Control เป็นโหมดที่ให้ผู้ใช้งานเป็นผู้ควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่างด้วยตนเอง



5. กดปุ่ม Enter ถ้าต้องการจะใช้งานในโหมดนี้ ซึ่งจะปรากฏหน้าจอ ดังรูปข้างล่าง ถ้าต้องการให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ไปด้านซ้าย ให้กดปุ่ม ◀ และกดปุ่ม ▶ ชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปด้านขวา ถ้าต้องการหยุดให้กดปุ่ม Clear สามารถกลับไปหน้าฟังก์ชันโดยการกดปุ่ม FUN



6. จากข้อ 4 ถ้าไม่ต้องการใช้งานโหมด Manual Control ให้กดปุ่ม ▲ หรือ ▼ เพื่อเลือกโหมดต่อไป นั่นคือโหมดรัน ดังรูปข้างล่าง โหมดนี้เป็นการควบคุมแบบอัตโนมัติทั้งการเคลื่อนที่ของชิ้นงานตัวอย่างและการบันทึกข้อมูล ซึ่งจะใช้โหมดนี้ในการทดลอง



7. กดปุ่ม Enter เพื่อเข้าสู่การทำงานต่อไป จะปรากฏหน้าจอ ดังรูปข้างล่าง ในช่อง Total Time คือเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง ให้ป้อนเวลาตามที่ต้องการ โดยเวลาที่ใช้ในโปรแกรมนี้จะเป็นหน่วยนาทีทั้งหมด เมื่อป้อนข้อมูลเสร็จ กดปุ่ม Enter เพื่อป้อนข้อมูลต่อไป Furnace A และ Furnace B คือเวลาที่จะให้ชิ้นงานตัวอย่างหยุดค้างในเตาที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ถ้าไม่ต้องการให้หยุดค้างที่เตาใดให้กด Enter ผ่านไป Start คือตำแหน่งเริ่มต้นของเตาที่จะให้ชิ้นงานไปหยุดค้าง

หมายเหตุ ถ้าป้อนข้อมูลผิดให้กดปุ่ม Clear เพื่อป้อนข้อมูลใหม่ และก่อนเริ่มการทดลองชิ้นงานต้องอยู่ด้านเดียวกับมอเตอร์เสมอ!!!

| | |
|--------------|-------|
| Total Time : | min |
| Furnace A : | min |
| Furnace B : | min |
| Start : | (A,B) |

8. เมื่อป้อนข้อมูลครบแล้ว กดปุ่ม Enter ระบบจะเริ่มทำงาน โดยจะแสดงหน้าจอ ดังรูปข้างล่าง Status จะแสดง ON เมื่อระบบทำงาน และจะเป็น OFF เมื่อหยุดทำงาน ส่วน Sample Position จะแสดงตำแหน่งของเตาที่ขึ้นงานเคลื่อนที่ไปหยุด และจะแสดง - เมื่อจบการทำงาน

| | |
|------------------------|--|
| Cyclic Movement | |
| Status : | |
| Sample Position : | |

9. ก่อนที่จะเริ่มทดลองเราจะต้องตั้งชื่อไฟล์เพื่อเก็บข้อมูล ทำได้โดยการเรียก โปรแกรม ReadTemp บนเครื่องคอมพิวเตอร์ จะได้โปรแกรมดังรูปข้างล่าง ตั้งชื่อไฟล์เสร็จแล้ว กดปุ่ม OK

10. เมื่อทดลองเสร็จ ให้กดปุ่ม STOP เพื่อหยุดการบันทึกข้อมูล โดยข้อมูลที่ได้จะ อยู่ในรูปของ Text File

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายสมชาย เป้าทอง เกิดวันที่ 15 สิงหาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2) สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ในปีการศึกษา 2542 จากนั้นทำงานที่ศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีเพื่อการวิเคราะห์และทดสอบวัสดุ ภาคนิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย